

**T.C.  
UŞAK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI ÇEVRE KOŞULLARININ TABAKALI KOMPOZİTLERİN STATİK VE  
DİNAMİK DAYANIMLARINA ETKİSİ**

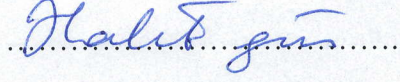
**DOKTORA TEZİ**

**HÜSEYİN ERSEN BALCIOĞLU**

**UŞAK, 2017**

**Hüseyin Ersen BALCIOĞLU** tarafından hazırlanan “**Farklı Çevre Koşullarının Tabakalı Kompozitlerin Statik ve Dinamik Dayanımlarına Etkisi**” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. HALİT GÜN



Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İRFAN AY

(Makine Mühendisliği, Balıkesir Üniversitesi)

Prof. Dr. HALİT GÜN

(Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Prof. Dr. MEVLÜT TERCAN

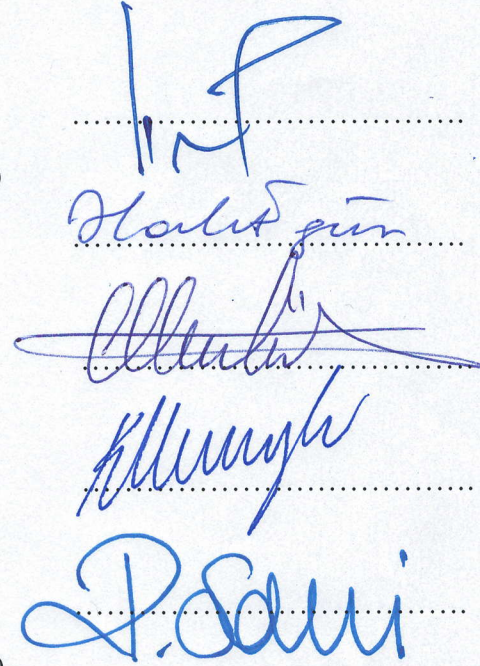
(Tekstil Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. KEMAL MAZANOĞLU

(Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Yrd. Doç. Dr. RAİF SAKİN

(Makine Mühendisliği, Balıkesir Üniversitesi)

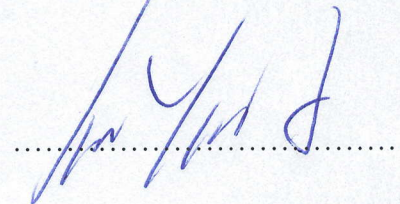


Tarih: 15.09.2017

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans / Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. İSA YEŞİYURT

**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü**



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

(İmza)

Hüseyin Ersen BALCIOĞLU



# **FARKLI ÇEVRE KOŞULLARININ TABAKALI KOMPOZİTLERİN STATİK VE DİNAMİK DAYANIMLARINA ETKİSİ**

**(Doktora Tezi)**

**Hüseyin Ersen BALCIOĞLU**

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Eylül, 2017**

## **ÖZET**

Günümüzde kullanılan yapı malzemelerinde sağlamlık ve hafiflik başlıca aranan özelliklerdendir. Bu durum geleneksel metalik malzemelerin yerine onun kadar sağlam fakat ondan daha hafif olan kompozit malzemelerin kullanımını zorunlu kılmıştır. Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin kendi özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturmak için makro düzeyde bir araya gelmeleriyle oluşur. Kompozit malzemeler üstün darbe ve korozyon direnci, yüksek rijitlik, hafiflik ve iyi ısı iletkenlik gibi özelliklerinden dolayı kara, deniz ve hava taşıtlarında, ayrıca inşaat ve savunma sanayinde yapı elemanı olarak kullanılmaktadırlar.

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri kullanılan fiber ve matrise göre değişmektedir. Bundan dolayı kompozit yapı elemanlarının kullanılacağı ortam koşullarının ve yapı üzerindeki gerilme durumunun iyi bilinip, fiber ve matris malzemesinin ona göre seçilmesi gerekir. Polimer esaslı kompozitler ortamın sıcaklık, ph, nem vb. durumlardan olumsuz etkilenerek dayanımlarını kaybedebilirler. Mühendislik malzemelerinin birçoğu, kullanım esnasında tekrarlanan yükler altında çalışmaktadırlar. Dinamik yükler altında çalışan malzemeler akma dayanımlarının altında dahi hasara uğrayabilirler. Dinamik yükler altında malzemenin yüzeyinde çatlakların oluşması, ilerlemesi ve bunu takiben kırılması, yorulma olarak adlandırılmaktadır. Uygun olmayan ph ortamları kompozit malzemelerin yorulma

ömrünü düşürebilir. Bu yüzden asidik ve bazik ortamlarda çalışacak kompozit malzemelerin iş güvenliği bakımından yorulma ömürlerinin bilinmesi gerekir.

Bu tez çalışmasında, asidik ve bazik ortamlarda bekletilmiş tabakalı kompozit malzemelerin statik dayanımları, yorulma ömürleri ve yorulma hasarları araştırılmıştır. Bu kapsamda sekiz tabakalı cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozit malzemeler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler %5, %15 ve %25 derişime sahip asidik ve bazik çözeltilerde 1ay, 2ay, 3ay ve 4ay boyunca bekletilmiştir. Çevre şartlarının tabakalı kompozitlerin statik dayanımlarına etkisini incelemek için kompozit numunelerin çeki, bası ve eğilme mukavemetleri belirlenmiştir. Asidik ve bazik ortamlarda kompozit malzemenin dinamik davranışlarını belirlemek için numuneler eğilme yüklemesi altında yorulmaya maruz bırakılmıştır. Bu kapsamda aynı anda 10 adet test numunesini yorabilen bilgisayar kontrollü ankastre tip yorulma cihazı tasarlanıp imal edilmiştir. Eğilme yüklemesi altındaki yorulma ömürleri eğilme dayanımlarının %80, %70, %60, %50 ve %40'ına karşılık gelen yükleme değerlerinde belirlenmiştir. Dinamik (yorulma) testleri sonrası numunelerde meydana gelen hasarların mekanizmasını incelemek için hasarlı numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır. Asidik ve bazik ortamların cam/epoksi ve karbon/epoksi numunelerin statik ve dinamik dayanımlar üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması için test sonuçları, hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin test sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Test sonuçları asidik ve bazik ortamların cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin statik ve dinamik dayanımları olumsuz etkilediğini göstermiştir. Çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça statik ve dinamik dayanımların azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, cam fiber ve karbon fiber takviyeli numunelerin farklı çevresel ortama karşı farklı tepki gösterdikleri ve bunun sonucunda cam/epoksi ve karbon/epoksi için farklı hasar mekanizmalarının geliştiği görülmüştür.

**Bilim Kodu:** 625.03.01.

**Anahtar Kelimeler:** Statik dayanım, yorulma dayanımı ve yorulma ömrü, S-N eğrileri, cam/epoksi, karbon/epoksi, asidi ve bazik ortam, nem alma ve kütle kaybı.

**Sayfa Adedi:** 240

**Tez Yöneticisi:** Prof. Dr. Halit GÜN

# **THE EFFECT OF DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITION ON THE STATIC AND DYNAMIC STRENGTH OF LAMINATED COMPOSITES**

**(Doctoral Dissertation)**

**Hüseyin Ersen BALCIOĞLU**

**UŞAK UNIVERSITY**

**INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**September, 2017**

## **ABSTRACT**

The strength and lightness are mainly desirable properties in the structure materials used today. This circumstance caused to unavoidable usage of composite materials which is as durable as conventional metallic materials but lighter than it. Composite materials occur by coming together two or more materials in macro scale to make a new material having superior properties than own properties. Composite materials have been used as structural material in land, sea, and air vehicle also building industry and defense industry due to their properties as ultra-impact and corrosion resistance, high rigidity, lightness and good thermal conductivity.

The mechanical properties of composite materials change according to used fiber and matrix. Therefore, ambient conditions, where this type of composite will be used, and stress situation on the structure must be well known, after that fiber and matrix material should be chosen this phenomenon. Polymer based composites can be loss their strength by negatively affecting from environmental conditions such as temperature, pH, and moisture etc. Many of engineering materials are working under cycling load during usage. The materials which is working under dynamic loading, can be damaged even under their yield strength. Under dynamic load, creating of crack on the surface of material, progressing of crack, and following that fracturing is named fatigue. The fatigue life of composite materials can be decreased in

improper ph. environments. For that reason, the fatigue life of composite materials, which works at acidic and basic atmosphere, must be known in case of workers and job safety.

Static strength, fatigue life and failure mechanism of laminated composite materials, which retained into acidic and alkali environments, were investigated with this thesis study. In this content, glass/epoxy, and carbon/epoxy (K8) having eight layers were produced by using hand lay-up method. The produced composite materials were retained into acidic and alkali solution having 5%, 15%, and 25% concentration along 1, 2, 3, and 4 months. Tensile, compressive, and flexural strength were determined to investigate environmental effects on the static strength of laminated composites. In order to determine the dynamic behavior of composite material in the acidic and alkaline environments, samples were subjected to fatigue under bending load. In this scope, a computer-controlled fixed end type fatigue test machine capable of tilting 10 test samples at the same time was designed and manufactured. Fatigue life under flexural loading were defined in load value which equal to 80%, 70%, 60%, 50%, and 40% of bending strength. To describe failure mechanism of damage which occurs after fatigue, SEM image of damaged specimens were taken. Also, to better understand of environmental condition on the fatigue life, results were compared with results of hybrid and un-hybrid composites, which didn't retain into any environments (0%).

Test results have shown that acidic and alkaline environment adversely affected the static and dynamic strengths of glass/epoxy and carbon/epoxy laminated composites. Static and dynamic strengths were observed to decrease as the amount of solution concentration and the duration of stay increased. In addition, glass fiber and carbon fiber reinforced specimens react differently to different environmental conditions, and as a result, different damage mechanisms for glass/epoxy and carbon/epoxy have been developed.

**Science Code:** 625.03.01.

**Key Words:** Static strength, fatigue strength and fatigue life, S-N curves, glass/epoxy, carbon/epoxy, acid and alkaline environments, dehumidification and mass loss.

**Page Number:** 240

**Adviser:** Prof. Dr. Halit GÜN

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam sırasında, bilimsel bir çalışmanın ve doktora tez projenin ne kadar yorucu, uzun ve stresli olduğunu anladım. Fakat tüm bu zorlukların beni akademik hayata daha iyi hazırladığını fark ettim. Ustasının döverecek şekil ve dayanım kazandırdığı bir demir gibi dövüldükçe tecrübe, bilgi, erdem gibi faziletler edindim.

Doktora çalışmam süresince yaptığı bütün katkılardan ve yol göstericiliğinden dolayı; Uşak Üniversitesi öğretim üyesi ve danışman hocam Prof. Dr. Halit Gün'e,

Değerli fikirleri ile doktora çalışmam süresince yolumu aydınlatan kıymetli hocam Doç. Dr. Hayri Baytan Özmen'e,

Yorulma cihazının tasarım ve imalatını gerçekleştirilmesinde bilgisini, tecrübesini ve emeğini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Raif Sakin'e, Öğr. Gör. Akif Dumanay ve ekip arkadaşlarına,

Statik ve dinamik testlerden elde edilen verilerin analizinde yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Çağdaş Seçkin kardeşime,

Tabakalı kompozitlerin üretimi ve yorulma testlerinin gerçekleştirilmesi sırasında emeği geçen Derviş Yalçın kardeşime,

SEM görüntülerinin alınmasında emeği geçen Dr. Erkan Halay hocama,

Doktora tezimin düzenlenmesinde görüş ve önerilerini esirgemeyen değerli jüri üyesi hocalarıma,

Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde bir Doktora Tezi olarak bu çalışmanın yapılmasını maddi olarak destekleyen Uşak Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna,

Sonsuz teşekkür ederim.

Ve hayatımın her aşamasında kolaylık, rahatlık ve huzur sağlayan ve doktora çalışmam süresince beni yalnız bırakmayan ve bana rehberlik yapan eşim, sana ne kadar teşekkür etsem azdır.



## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESİM LİSTESİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xviii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1. BÖLÜM GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Giriş .....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	13
1.3. Sponsor.....	15
<b>2. BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>16</b>
2.1. Kompozit Malzemelere Giriş .....	16
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	17
2.2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler.....	17
2.2.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler .....	20
2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	22
2.3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	22
2.3.2. Seramik Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	24
2.3.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri .....	25
2.4. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	27
2.4.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları .....	28
2.4.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları .....	29
<b>3. BÖLÜM YORULMA</b> .....	<b>30</b>
3.1. Malzemelerin Yorulma Mekanizması .....	31
3.2. Yorulma Mukavemet Sınırları .....	33
3.2.1. Gerilme Parametreleri.....	34
3.2.2. Parça Geometrisine Bağlı Unsurlar .....	37
3.2.3. Dış Çevre Parametreleri.....	37

3.3.	Ortalama Gerilmenin Yorulma Dayanımı Üzerindeki Etkileri .....	38
3.4.	Yorulma Deney Türleri ve Kullanılan Cihazlar .....	41
3.5.	S-N Eğrileri (Wöhler Eğrileri) .....	44
3.7.	Kompozit Malzemelerin Yorulması.....	47
<b>4.</b>	<b>BÖLÜM YORULMA TEST MAKİNASININ TASARIM VE İMALATI.....</b>	<b>51</b>
4.1.	Giriş.....	51
4.2.	Yorulma Test Makinesinin Avantajları.....	53
4.3.	Malzeme ve Metot.....	55
4.3.1.	Kontrol Yazılımı ve Ara Yüzü.....	55
4.3.2.	Yorulma Test Makinesi Konstrüksiyonu ve Çalışma Prensibi .....	57
4.3.3.	Gereksinimler.....	59
4.3.4.	Servo-Motor ve Lineer Vidalı Hareket Tablası .....	62
4.3.5.	Uzaktan Test, Veri Takip Ve Uyarı Sistemi .....	64
4.3.6.	Ana Pano ve Bilgisayarlı Ölçüm.....	65
4.4.	Performans ve Kalibrasyon İçin Yorulma Testleri .....	67
<b>5.</b>	<b>BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARI .....</b>	<b>77</b>
5.1.	GİRİŞ .....	77
5.2.	Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretimi .....	77
5.2.1.	Takviye Malzemesi.....	77
5.2.2.	Matris Malzemesi.....	79
5.2.3.	Tabakalı Kompozitlerin Üretilmesi .....	80
5.3.	Test Numunelerinin Hazırlanması .....	83
5.4.	Statik Testler .....	87
5.4.1.	Tabakalı Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Belirlenmesi .....	87
5.4.2.	Tabakalı Kompozitlerin Kayma Dayanımlarının Belirlenmesi .....	89
5.4.3.	Tabakalı Kompozitlerin Basma Dayanımlarının Belirlenmesi.....	90
5.4.4.	Tabakalı Kompozitlerin Eğilme Dayanımlarının Belirlenmesi .....	91
5.4.5.	Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Mekanik Özelliklerin Doğrulanması.....	92
5.5.	Dinamik Testler.....	96
5.5.1.	Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Dayanımları ve Ömürlerinin Belirlenmesi .....	97
5.6.	Tabakalı Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Ölçümleri .....	102

5.6.1.	Hidroklorik Asit (HCl) ve Sodyum Hidroksit (NaOH) Ortamları.....	104
<b>6.</b>	<b>BÖLÜM SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....</b>	<b>106</b>
6.1.	Statik Testler .....	106
6.1.1.	Tabakalı Kompozitlerin Çekme Testleri.....	106
6.1.2.	Tabakalı Kompozitlerin Basma Dayanımları .....	126
6.1.3.	Tabakalı Kompozitlerin Eğilme Dayanımları.....	134
6.2.	Dinamik Testler.....	143
6.2.1.	Cam/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Davranışları .....	143
6.2.2.	Karbon/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Davranışları .....	153
6.3.	Tabakalı Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Sonuçları .....	162
6.3.1.	Cam/Epoksi Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Sonuçları.....	162
6.3.2.	Karbon/Epoksi Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Sonuçları.....	167
6.4.	Yorulma Testleri Sonrası Hasar Analizleri .....	170
6.5.	Sonuçların Değerlendirilmesi.....	174
6.5.1.	Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	174
6.5.2.	Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	178
6.5.3.	Eğilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	180
6.5.4.	Yorulma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	182
6.5.5.	Nem Alma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	184
<b>7.</b>	<b>BÖLÜM GENEL DEĞERLENDİRMELER.....</b>	<b>185</b>
<b>8.</b>	<b>EK-1 .....</b>	<b>189</b>
8.1.	Cam/Epoksi Numunelerin Asidik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri.....	189
8.2.	Cam/Epoksi Numunelerin Bazik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri.....	192
8.3.	Karbon/Epoksi Numunelerin Asidik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri.....	195
8.4.	Karbon/Epoksi Numunelerin Bazik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri.....	198
8.5.	Çözelti Derişimine ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Cam/Epoksi Kompozitlerin Yorulma Dayanım ve Ömür Değerlerinin Değişim Yüzdeleri .....	201

8.6. Çözelti Derişimine ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Karbon/Epoksi Kompozitlerin Yorulma Dayanım ve Ömür Değerlerinin Değişim Yüzdeleri .....	203
<b>9. KAYNAKLAR.....</b>	<b>205</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Endüstride kullanılan kompozit malzeme türleri.....	17
Şekil 3.1 Sabit genlikli yorulmada kullanılan yükleme tipleri .....	34
Şekil 3.2 (a) farklı gerilme oranı ve (b) ortalama gerilme değeri için S-N eğrisi [58] .....	35
Şekil 3.3 Frekansın yorulma davranışı üzerindeki etkileri (a) Nonaka ve arkadaşları [60], (b) Guennec ve arkadaşları [61] .....	36
Şekil 3.4 Soderberg, Goodman ve Gerber modelleri.....	39
Şekil 3.5 Smith diyagramı.....	41
Şekil 3.6 Yorulma testlerinde uygulanan dalga tipleri.....	44
Şekil 3.7 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrisi.....	45
Şekil 3.8 S-N eğrisi üzerindeki bölgeler .....	46
Şekil 3.9 Sabit genlikte yorulma yüklemesi altında kompozit malzemenin dayanım ve rijitliğinin azalması [69].....	48
Şekil 4.1 Yorulması test makinesi için yazılım-ara yüzü .....	56
Şekil 4.2 Yorulma test cihazı (a) izometrik (b) ön görünüş.....	58
Şekil 4.3 Kompozitler için 10 numuneli eğme yorulması dinamik test cihazı şematik resmi	60
Şekil 4.4 Yorulma test cihazı yan görünüş .....	62
Şekil 4.5 5 Hz frekans altında tam-değişken ( $R=-1$ ) yüklemde tipik bir üçgen dalga formu .....	63
Şekil 4.6 (a) Yazılım sistemi için akış diyagramı (b) IP kamera akış diyagramı ve (c) Hasar uyarı için mail gönderme akış diyagramı.....	65
Şekil 4.7 Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi .....	67
Şekil 4.8 (a)Eğilme testinin şematik gösterimi, (b) test sonuçları .....	67
Şekil 4.9 Deplasman ve frekans parametrelerinin ayarlanması.....	69
Şekil 4.10 Statik eğilme mukavemetinin %40'ın da yorulmaya zorlanan cam/epoksi test numunesi.....	71
Şekil 4.11 Statik mukavemetinin %80'in de yorulmaya zorlanan test numunesi.....	72
Şekil 4.12 Cam/epoksi tabakalı kompozitin genlik-ömür davranışı (a) Belingardi ve Cavatota [44], (b) testlerden elde edilen .....	74
Şekil 4.13 (a) Fiber takviyeli kompozit malzemeler için tipik rijitlik hasar eğrisi [113], (b) %40 ve (c) %80 gerilme genliklerinde yüklenen cam/epoksi numuneye ait rijitlik değişimleri .....	75

Şekil 5.1 Çekme Test numuneleri (a) fiber yönü, (b) fibere dik yön ve (c) çapraz yön .....	84
Şekil 5.2 Basma numuneleri (a) fiber yönü ve (b) fibere dik yön .....	84
Şekil 5.3 3 nokta eğilme test numunesi boyut oranları .....	85
Şekil 5.4 Yorulma test numunesi ve boyutları .....	86
Şekil 5.5 Gerilme-birim uzama eğrisi .....	88
Şekil 5.6 Çekme analizinde kullanılan geometrik model ve sınır koşulları .....	93
Şekil 5.7 Basma analizinde kullanılan geometrik model ve sınır koşulları .....	94
Şekil 5.8 3nokta eğilme analizinde kullanılan geometrik model ve sınır koşulları .....	94
Şekil 5.9 Sonlu elemanlar analiz sonuçları (a) çekme analizi, (b) basma analizi ve (c) 3 nokta eğilme analizi .....	95
Şekil 5.10 1sn'lik trapez yükleme frekans eğrisi .....	97
Şekil 5.11 Eğilmeli yükleme altında yorulma numunesinde oluşan von Mises gerilim dağılımı .....	99
Şekil 5.12 (a) Deneysel ve (b)sonlu elemanlar hasar karşılaştırması .....	100
Şekil 5.13 Yorulma testlerinden elde edilen rijitlik kayıpları .....	102
Şekil 6.1 Cam/epoksi tabakalı kompozitleri fiber yönü elastisite modül değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	107
Şekil 6.2 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü elastisite modül değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	109
Şekil 6.3 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme mukavemeti değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	111
Şekil 6.4 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme mukavemeti değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	113
Şekil 6.5 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modül değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	115
Şekil 6.6 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modül değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	117
Şekil 6.7 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	119
Şekil 6.8 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	121

Şekil 6.9 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin kayma modülü değişimleri	(a)
HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen.....	123
Şekil 6.10 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin kayma modülü değişimleri	(a)
HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen.....	125
Şekil 6.11 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma mukavemetleri değişimleri	
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	127
Şekil 6.12 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma mukavemetleri değişimleri	
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	129
Şekil 6.13 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemetleri	
değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	131
Şekil 6.14 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemetleri	
değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	133
Şekil 6.15 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modül değişimleri (a) HCl, (b)	
NaOH ortamlarında bekleyen .....	135
Şekil 6.16 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modül değişimleri (a) HCl,	
(b) NaOH ortamlarında bekleyen.....	137
Şekil 6.17 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme mukavemet değişimleri	(a)
HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen.....	139
Şekil 6.18 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme mukavemet değişimleri	
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen .....	141
Şekil 6.19 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl	
çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı).....	146
Şekil 6.20 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl	
çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25.....	147
Şekil 6.21 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH	
çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı).....	149
Şekil 6.22 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH	
çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25.....	150
Şekil 6.23 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl	
çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı).....	156
Şekil 6.24 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl	
çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25.....	157

Şekil 6.25 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı).....	159
Şekil 6.26 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25.....	160
Şekil 6.27 Cam/epoksi kompozitlerin nem alma yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen .....	163
Şekil 6.28 Cam/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen .....	164
Şekil 6.29 Karbon/epoksi kompozitlerin nem alma yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen .....	168
Şekil 6.30 Karbon/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen .....	169



## RESİM LİSTESİ

Resim 2.1 Alüminyum matris SiC takviyeli metal matrisli kompozit [47].....	18
Resim 2.2 Magnezyum takviyeli seramik matrisli kompozit [48].....	19
Resim 2.3 Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitin optik mikroskop görüntüsü [49] .....	20
Resim 3.1 Yorulma sırasında ortaya çıkan kayma bantları [57].....	33
Resim 3.2 Yorulma test cihazları (a) aksenal, (b) eğilmeli, (c) burulmalı ve (d) bileşik gerilmeli .....	43
Resim 3.3 Fiber takviyeli kompozitlerde yorulma sonucu gelişen hasar tipleri [71–74] .....	49
Resim 4.1 Bilgisayar kontrollü çok numuneli ankastre tip eğilmeli yorulma test cihazı .....	57
Resim 4.2 Ana pano içi ve bilgisayarlı ölçme bölümü .....	66
Resim 4.3 IP kamera üzerinden yorulma testlerinin takibi.....	73
Resim 5.1 Takviye malzemesi cam ve karbon fiber kumaşlar .....	78
Resim 5.2 DTE 1000 epoksi ve DTS 1100 sertleştirici.....	79
Resim 5.3 Tabakalı kompozit üretim aşamaları .....	82
Resim 5.4 Su jeti ile test numunesi kesimi .....	86
Resim 5.5 Ekstansiyometre birim uzama ölçümü.....	88
Resim 5.6 Fiber ve fibere dik yöndeki kırılma hasarları .....	89
Resim 5.7 Kayma testi hasarı.....	90
Resim 5.8 Basma testi hasarı .....	91
Resim 5.9 Eğilme test ve delaminasyon hasarı.....	91
Resim 5.10 Kurumaya bırakılan cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit numuneler .....	103
Resim 6.1 Asit ortamının cam/epoksi kompozitte sebep olduğu hasarlar .....	165
Resim 6.2 1Ay ve 4Ay süresi boyunca HCl ve NaOH çözeltisinde beklemiş cam/epoksi kompozitlerin görünüşlerinin karşılaştırılması .....	166
Resim 6.3 Asidik, bazik ve hiçbir ortamda beklemeyen numunelerin mikroskop görüntüleri karşılaştırması .....	167
Resim 6.4 Asit ortamının karbon/epoksi kompozitte sebep olduğu hasarlar.....	169
Resim 6.5 Cam/epoksi kompozitlerde yorulma sonucu oluşan delaminasyon hasarları.....	171
Resim 6.6 Cam/epoksi kompozitlerde meydana gelen yorulma hasarları.....	172
Resim 6.7 Karbon/epoksi kompozitlerde meydana gelen yorulma hasarları .....	173

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri.....	22
Çizelge 4.1 Yorulma test cihazı tanımlayıcı özellikleri.....	59
Çizelge 5.1 E-camı mekanik ve fiziksel özellikleri [115].....	77
Çizelge 5.2 3K karbon fiber fiziksel ve mekanik özellikleri [116].....	78
Çizelge 5.3 Reçine sisteminin kürleşme ve mekanik özellikleri [117].....	80
Çizelge 5.4 Statik ve dinamik test numuneleri için kullanılan standartlar .....	83
Çizelge 5.5 deneysel ve solu elamanlar sonuçlarının karşılaştırılması.....	96
Çizelge 6.1 Cam/epoksi fiber yönü elastisite modül ve standart sapma değerleri.....	106
Çizelge 6.2 Karbon/epoksi fiber yönü elastisite modül ve standart sapma değerleri .....	108
Çizelge 6.3 Cam/epoksi fiber yönü çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri.....	110
Çizelge 6.4 Karbon/epoksi fiber yönü çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri ....	112
Çizelge 6.5 Cam/epoksi fibere dik yön elastisite modül ve standart sapma değerleri.....	114
Çizelge 6.6 Karbon/epoksi fibere dik yön elastisite modül ve standart sapma değerleri ....	116
Çizelge 6.7 Cam/epoksi fibere dik yön çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri...	118
Çizelge 6.8 Karbon/epoksi fibere dik yön çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri .....	120
Çizelge 6.9 Cam/epoksi çapraz yön (45°) elastisite modül ve standart sapma değerleri.....	122
Çizelge 6.10 Cam/epoksi kayma modülü .....	122
Çizelge 6.11 Karbon/epoksi çapraz yön (45°) elastisite modül ve standart sapma değerleri .....	124
Çizelge 6.12 Karbon/epoksi kayma modülü.....	124
Çizelge 6.13 Cam/epoksi fiber yönü basma mukavemeti ve standart sapma değerleri.....	126
Çizelge 6.14 Karbon/epoksi fiber yönü basma mukavemeti ve standart sapma değerleri ..	128
Çizelge 6.15 Cam/epoksi fibere dik yön basma mukavemeti ve standart sapma değerleri .	130
Çizelge 6.16 Karbon/epoksi fibere dik yön basma mukavemeti ve standart sapma değerleri .....	132
Çizelge 6.17 Cam/epoksi 3 nokta eğilme modülleri ve standart sapma değerleri .....	134
Çizelge 6.18 Karbon/epoksi 3 nokta eğilme modülleri ve standart sapma değerleri.....	136
Çizelge 6.19 Cam/epoksi 3 nokta eğilme mukavemetleri ve standart sapma değerleri.....	138
Çizelge 6.20 Karbon/epoksi 3 nokta eğilme mukavemetleri ve standart sapma değerleri ..	140
Çizelge 6.21 Sade (%) ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları .....	143

Çizelge 6.22 Cam/epoksi numunelerdeki maksimum yorulma mukavemeti ve ömür kayıpları .....	144
Çizelge 6.23 Cam/epoksi numuneler için gerçek ve Power Law fonksiyonu yorulma mukavemeti karşılaştırması .....	151
Çizelge 6.24 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrilerine göre $N_f=10^6$ çevrim sayısına karşılık gelen maksimum gerilme değerleri.....	152
Çizelge 6.25 Sade (%0) ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları.....	153
Çizelge 6.26 Karbon/epoksi numunelerdeki maksimum yorulma mukavemeti ve ömür kayıpları .....	153
Çizelge 6.27 Karbon/epoksi numuneler için gerçek ve Power Law fonksiyonu yorulma mukavemeti karşılaştırması .....	161
Çizelge 6.28 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrilerine göre $N_f=10^6$ çevrim sayısına karşılık gelen maksimum gerilme değerleri.....	162
Çizelge 6.29 Cam/epoksi kompozitlerin nem alma yüzdeleri ve standart sapma değerleri	163
Çizelge 6.30 Cam/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzdeleri ve standart sapma değerleri .....	164
Çizelge 6.31 Karbon/epoksi kompozitlerin nem alma yüzdeleri ve standart sapma değerleri .....	167
Çizelge 6.32 Karbon/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzdeleri ve standart sapma değerleri .....	168
Çizelge 8.1 1 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları.....	189
Çizelge 8.2 2 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları.....	189
Çizelge 8.3 3 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları.....	189
Çizelge 8.4 4 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları.....	189
Çizelge 8.5 1 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları....	190
Çizelge 8.6 2 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları....	190
Çizelge 8.7 3 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları....	190
Çizelge 8.8 4 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları....	190
Çizelge 8.9 1 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları....	191
Çizelge 8.10 2 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları..	191
Çizelge 8.11 3 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları..	191
Çizelge 8.12 4 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları..	191

Çizelge 8.13 1 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	192
Çizelge 8.14 2 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	192
Çizelge 8.15 3 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	192
Çizelge 8.16 4 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	192
Çizelge 8.17 1 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	193
Çizelge 8.18 2 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	193
Çizelge 8.19 3 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	193
Çizelge 8.20 4 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	193
Çizelge 8.21 1 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	194
Çizelge 8.22 2 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	194
Çizelge 8.23 3 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	194
Çizelge 8.24 4 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları	194
Çizelge 8.25 1 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	195
Çizelge 8.26 2 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	195
Çizelge 8.27 3 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	195
Çizelge 8.28 4 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	195
Çizelge 8.29 1 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	196
Çizelge 8.30 2 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	196
Çizelge 8.31 3 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	196
Çizelge 8.32 4 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	196

Çizelge 8.33 1 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	197
Çizelge 8.34 2 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	197
Çizelge 8.35 3 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	197
Çizelge 8.36 4 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	197
Çizelge 8.37 1 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	198
Çizelge 8.38 2 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	198
Çizelge 8.39 3 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	198
Çizelge 8.40 4 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	198
Çizelge 8.41 1 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	199
Çizelge 8.42 2 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	199
Çizelge 8.43 3 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	199
Çizelge 8.44 4 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	199
Çizelge 8.45 1 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	200
Çizelge 8.46 2 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	200
Çizelge 8.47 3 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	200
Çizelge 8.48 4 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları	200

Çizelge 8.49 Sade numunelere göre HCl %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	201
Çizelge 8.50 Sade numunelere göre HCl %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	201
Çizelge 8.51 Sade numunelere göre HCl %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	201
Çizelge 8.52 Sade numunelere göre NaOH %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	202
Çizelge 8.53 Sade numunelere göre NaOH %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	202
Çizelge 8.54 Sade numunelere göre NaOH %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	202
Çizelge 8.55 Sade numunelere göre HCl %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	203
Çizelge 8.56 Sade numunelere göre HCl %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	203
Çizelge 8.57 Sade numunelere göre HCl %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	203
Çizelge 8.58 Sade numunelere göre NaOH %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	204
Çizelge 8.59 Sade numunelere göre NaOH %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	204
Çizelge 8.60 Sade numunelere göre NaOH %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri.....	204

## SİMGELER ve KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\varepsilon$	Çekme testinden elde edilen numunenin birim şekil değişimi
$\varepsilon_{ap}$	Plastik uzama genliği
$\varepsilon'_f$	Yorulma süneklik katsayısı
$\sigma_{üst}$	Değişken yükleme sırasında numunede meydana gelen maksimum gerilme değeri
$\sigma_{Akma}$	Çekme testinden elde edilen numunenin çekme gerilmesi
$\sigma_D$	Sürekli mukavemet sınırı
$\sigma_{DN}$	Yorulma mukavemeti
$\sigma_{Kopma}$	Çekme testinden elde edilen numunenin kopma gerilmesi
$\sigma_{alt}$	Değişken yükleme sırasında numunede meydana gelen minimum gerilme değeri
$\sigma_e$	Elastik birim şekil değiştirme genliği
$\sigma_f$	Üç nokta eğilme mukavemeti
$\sigma'_f$	Yorulma dayanım katsayısı
$\sigma_g$	Değişken yükleme durumunda ortalama gerilmenin maksimum veya minimum gerilmeden farkı, gerilme genliği
$\sigma_t$	Çekme gerilmesi
$\sigma_{tit}$	Malzemenin titreşimli zorlanma durumunda yorulma sınır değeri
$\nu_{12}$	Poisson's oranı
$A_{kesit}$	Yüke maruz kalan numune kesit alanı
A, B	Power Law fonksiyonu için denkleme sabitleri
b	Test numunesinin genişliği
c	Yorulma dayanım üssü
d	Yorulma süneklik üssü

$E_1$	Fiber yönü elastisite modülü
$E_2$	Fibere dik yön elastisite modülü
$E_{45}$	Çapraz yön elastisite modülü
$E_f$	3 nokta eğilme modülü
$F_{hasar}$	Test numunesinin hasara uğradığı andaki taşıdığı kuvvet değeri
$G_{12}$	Kayma modülü
$h$	Test numunesinin kalınlığı
$L$	Yorulma testinde yükün uygulandığı yerden yorulma hasar bölgesine olan mesafe
$L_s$	3 nokta eğilme testinde mesnetler arası mesafe
$m$	3 nokta eğilme testinde yük deplasman eğrisinin lineer bölgedeki eğimi
$N$	Yorulma testinde yük değişim (çevrim) sayısı
$n$	Emniyet katsayısı
$N_D$	Sonsuz ömür çevrim sayısı
$N_f$	Yorulma ömrü, yorulma hasarı çevrim sayısı
$R$	Gerilme genlik oranı
$S_a$	Power Law fonksiyonu için yorulma mukavemeti
$X_c$	Fiber yönü basma mukavemeti
$X_t$	Fiber yönü çekme mukavemeti
$Y_c$	Fibere dik yön basma mukavemeti
$Y_t$	Fibere dik yön basma mukavemeti
$\delta$	3 nokta eğilme testinde maksimum kuvvete karşılık gelen deplasman değeri

**Kısaltmalar Açıklama**

MMC	Metal matrisli kompozit
SMC	Seramik matrisli kompozit
PMC	Polimer matrisli kompozit



# 1. BÖLÜM GİRİŞ

## 1.1. Giriş

18. yüzyılda Avrupa’da başlayan sanayi devrimi ile endüstride kullanılan makine sayısı artmış ve buna bağlı olarak üretim kapasitesi hızla yükselmiştir. O yıllarda makine, inşaat ve ulaşım araçlarının imalatı gibi ağır sanayi olarak nitelendirilen alanlarda ucuz ve kolay işlenebilir oluşundan dolayı metaller yapı malzemesi olarak kullanılmaktaydı. 19. yüzyılın başlarında teknolojiye gelişmeler yapılar da kullanılan malzemelerde hafiflik, ağırlığa oranla yüksek dayanım, üstün darbe ve korozyon direnci gibi kavramların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu durum bilim adamlarını metaller yerine kullanılacak, metaller kadar sağlam fakat ondan daha hafif bir alternatif malzeme bulma arayışına girmelerine sebep olmuştur.

1848 yılında İsveçli kimyacı Christian Friedrich Schoenbein plastiği icat etmesiyle plastik, imalat sektöründen tekstile, inşaat sektöründen yapı malzemelerine birçok alanda insan hayatına girmiştir. Plastik; karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve diğer organik ya da inorganik elementlerin oluşturduğu monomer adı verilen yapıların bir araya gelerek uzun ve zincirli bir yapıya dönüşmesi ile elde edilen malzemedir. Plastikler, metaller kadar kolay işlenebilmesi ve yüksek korozyon direncine sahip olmalarına rağmen, dayanım değerleri metallere göre çok düşüktür. Bu yüzden plastikler o yıllarda metalik malzemelere alternatif olabilecek mekanik özelliklere sahip değildi. Plastik yapıların daha dayanıklı malzemelerle desteklenerek dayanımlarının artırılması fikri, onlara metallere alternatif olabilmesi için bir şans daha vermiştir. Cam kap üretici olan Owens-Illinois de çalışan Russel Games Slayter’in 1932 yılında kazara cam elyaf yapılı lif kümesini bulması fiber takviyeli polimer matrisli yapıların geliştirilmesini sağlamıştır. Liflerle takviye edilmiş sentetik reçineler 1950’li yıllardan itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde “fiber-glass” diye tanınan bu malzemeler, 1960’lı yıllardan itibaren sıvı tankları, çatı levhaları, küçük boy deniz tekneleri gibi elemanların imalatında kullanılmaktadır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan Anadol’un kaportası da bu malzemedendir. Polimer kısmının matris, fiber-glass kısmının takviye olarak iki bileşenden oluşan bu yapı malzeme biliminde polimer kompozit malzeme olarak adlandırılır.

Gelişen üretim teknikleri ve malzeme bilimindeki buluşlar 21. yüzyılda kompozit malzemeleri önemli bir konuma taşımıştır. Geleneksel yapı malzemelerine göre kıyaslandığında sahip olduğu üstün darbe ve korozyon direnci, yüksek rijitlik ve hafiflik gibi özelliklerinden dolayı günümüzde kompozit malzemeler hava, kara ve deniz taşıtlarından inşaat sektörüne, askeri uygulamalardan, günlük hayatta kullandığımız birçok ürünün imalatında yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanının giderek yaygınlaşması kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik davranışlarının geleneksel yapı malzemelerine alternatif olabilecek seviyeye gelmesiyle sağlanmıştır. Araştırmacıların fiber ve matris üzerine yaptıkları çalışmalar kompozit malzemelerin mekanik dayanımlarının artmasına katkıda bulunmuştur. Öyle ki literatürde bu konu hala popülerliğini korumaktadır.

Banakar ve arkadaşları [1] fiber oryantasyonunun ve tabaka kalınlığının cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme dayanımları üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Test sonuçları, fiber oryantasyonu ve tabaka kalınlığının çekme dayanımları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca oryantasyon açısı ve kalınlık değeri tabakalı kompozitlerin yük altındaki elastik deformasyonu ile de ilişkidir.

Tarfaoui ve arkadaşları [2] yüksek hızda bası yüklemesine maruz kalan tabakalı kompozitlerde fiber oryantasyonunun darbe dayanımlarına etkisini incelemiştir. Bu kapsamda  $0^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 70^\circ$  ve  $90^\circ$  fiber açısına sahip cam/epoksi tabakalı kompozit deney numuneleri farklı şekil değiştirme hızlarında darbe testine tabi tutulmuşlardır. Test sonuçları, kompozit malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin fiber oryantasyonundan ve deformasyon hızından hassas bir şekilde etkilendiğini ortaya koymuştur.

Barile ve arkadaşları [3] yaptıkları çalışmalarında karbon fiber kumaş takviyeli tabakalı kompozitlerde tabakaları birbirine dikerek malzemenin numunelerinin çekme dayanımını arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışmalarında karbon kumaşları yine aynı malzemedeki karbon fiber ipliklerle zikzak formunda dikmişlerdir. Sonuçlar dikme etkisinin kompozit malzemenin çekme mukavemetini %15 ve elastisite modülünü %17 civarında arttırdığını göstermiştir.

Rajesh ve Pitchaimani [4] doğal fiber kumaş takviyeli tabakalı kompozitlerde takviye kumaşa doğal fiberden örülmüş şerit takviyeler ekleyerek malzemenin mekanik dayanımını arttırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda jüt ve muz liflerini kullanarak şerit takviye elemanları

örmüşler ve bunlarla jüt ve muz liflerinden dokunmuş kumaşlara takviye yapmışlardır. Test sonuçlarını takviye yapılmamış numunelerinin test sonuçları ile karşılaştırmışlar. Sonuçlar şerit takviyesinin malzemenin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarına olumlu katkıları olduğunu gözlemlemişlerdir.

Naito ve Oguma [5] çekirdek kısmı cam, kabuk kısmı karbon fiberden örgü şeritler halinde birleştirilmiş hibrit kompozit çubukların çekme dayanımlarını araştırmışlardır. Bu kapsamda üç farklı karbon/cam oranına sahip hibrit kompozit çubuklar üç farklı örgü açısında örülerek birleştirilmiştir. Test sonuçları karbon yoğunluğu arttıkça çekme dayanımı ve çekme modülünün arttığını, Poisson's oranı ve hasar deformasyon miktarında değişim olmadığını göstermiştir.

Carozzi ve Poggi [6] polipropilen benzisoksazol (PBO), karbon, cam ve PBO cam fiberlerini kafes şeklinde öreerek betonu takviye etmişler ve birleşme uzunluğunun fiber takviyeli betonun çekme dayanımını üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Test sonuçları 10.42kN ile karbon fiber takviyeli betonun en iyi çekme dayanımına sahip olduğunu gösterirken, yapışma uzunluğu arttıkça çekme dayanımının 4 kata kadar arttığı gözlemlenmiştir.

Attia ve arkadaşları [7] polipropilen, cam ve polipropilen-cam hibrit ve hibrit olmayan tabakalı kompozitlerin çekme, eğilme ve tabakalar arası kayma mukavemetlerini incelemişlerdir. Test sonuçları her bir mekanik özellik için polipropilen lifleri cam ile hibritlemek polipropilen life dayanım sağlarken, sadece cam fiber kullanmaya göre de daha uygun maliyet kazandırmıştır.

Ikbal ve Wei [8] aynı düzlemde, farklı biçimlerde karbon ve cam lifleri ile hibrit olarak ürettikleri kumaşla takviye ettikleri polimer matrisli kompozit malzemenin çekme ve basma dayanımlarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Hibrit tabakalı kompozitlerin sonuçlarını hibrit olamayan karbon ve cam epoksi takviyeli tabakalı kompozitlerle kıyaslamışlardır. Hibrit kompozitlerde karbon yoğunluğu arttıkça çekme ve basma dayanımlarının arttığını göstermiştir.

Cai ve arkadaşları [8] tek yönlü ve dokuma kumaş takviyeli cam/epoksi tabakalı kompozitler de farklı doğrultularda yüklemenin çekme dayanımları üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Tsai-Wu fiber hasar kriterini kullanarak tek yönlü ve dokuma kumaş takviyeli cam/epoksi tabakalı kompozitlerin test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Test sonuçları yükleme açısına göre, takviye türünün farklı davranışlar sergilediğini göstermiştir. Öyle ki tek yönlü fiberlerle takviye edilmiş cam/epoksi 90° de minimum çekme dayanımı gösterirken, dokuma kumaş için bu değer 45° dir.

Mukavemet değerleri yüksek fiber takviyeli kompozit üretmek için her zaman en güçlü fiberi ya da en güçlü matris malzemesini seçmek maliyet açısından uygun olmayabilir. Günümüz tasarımcılarının vazgeçilmez kriteri olan fiyat/performans oranı en iyi olan kompoziti üretmek için fiber ve matris uyumuna yani fiber matris birleşme ara yüzeyindeki uyum da göz önünde bulundurulmalı. Kusursuz bir fiber/matris birleşimi için fiber yüzeyinin pürüzsüz ve temiz olması gerekmektedir. Bu yüzden araştırmacılar doğal ve sentetik fiberin üzerinde düzgün bir yüzey elde etmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir.

Frey ve Brunner [9] yaptıkları çalışmalarında, cam fiber yüzeyindeki silan kaplamasını 600°C’de aseton ile kimyasal işleme tutmuşlar ve silanı cam fiberden uzaklaştırarak cam fiberi yeniden boyutlandırmışlardır. Yeniden boyutlandırdıkları cam fiber ile takviye edilen kompozitlerin eğilme performanslarını işlem görmemiş cam fiber ile takviye edilen kompozitlerle karşılaştırmışlardır. Test sonuçları, asetonla kimyasal işlemin cam fiber takviyeli kompozitlerin eğilme performanslarını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir.

Huda ve arkadaşları [10] silan ve alkali çözelti ile kimyasal işlem görmüş ananas fiberleri ile takviye edilmiş doğal kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Test sonuçları kimyasal işlem görmüş fiberlerle takviye edilen kompozitler işlem görmemişlere kıyasla daha yüksek eğilme modülüne ve darbe mukavemetine sahip olduklarını göstermiştir.

Kuzmin ve arkadaşları [11] silan ve nano silika ile yüzey modifikasyonu yapılmış bazalt fiber takviyeli epoksi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Test sonuçları silan ile işlem görmüş kompozit malzemelerin çekme mukavemetlerinde %23’e varan iyileşmeler olduğunu göstermiştir.

Jiang ve arkadaşları [12] elektrokimyasal oksitleme yöntemi ile yüzey modifikasyonu yapılan karbon fiber ile takviye edilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 25 µm boyutundaki grafen oksiti çeşitli kimyasal işlemlerden geçirerek

karbon fiber yüzeyine bağlamışlardır. Test sonuçları tabakalar arası kayma mukavemeti ve bası mukavemetlerinin sırasıyla %59,4 ve %12,8 oranında arttığını göstermiştir.

Kompozit malzeme üreticileri, malzemenin üretimi için fiber ve matris malzemesini yüksek mukavemetli seçip, aralarında çok iyi bir birleşme sağlasa da malzeme kullanıldığı koşullara göre kendisinden istenen, yüksek aşınma mukavemeti, yüksek darbe dayanımı ve tokluk, iyi elektriksel özellikler ya da elektromanyetik geçirgenlik gibi özellikleri karşılayamayabilirler. Bazı durumlarda yüksek mukavemetli bileşen kullanmak üreticiler için ekonomik olmayabilir. Farklı yöntemler kullanılarak üretilen kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. Böyle bir durumda, kompozit malzeme üretimi sırasında bazı eklentiler yapılarak malzeme kendisinden beklenen özellikleri karşılayabilecek forma getirilebilir.

Xu ve arkadaşları [13] karbon fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde karbon nanotüp film takviyesinin malzemenin mekanik ve elektriksel özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Akışkan katalitik kimyasal buhar depolama yöntemi ile takviye karbon kumaşın yüzeyinde karbon nanotüp yapılı film oluşturmuşlardır. Test sonuçları, %0,22'ye kadarki takviye yüzdesinin eğilme dayanımını ve tabakalar arası kayma mukavemetini arttırdığını göstermiştir.

Eskizeybek ve arkadaşları [14] karbon nanotüp takviye cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme ve tokluk davranışlarını araştırmışlardır. Bu amaçla amino silan ile kimyasal işlem uyguladıkları cam fiberlere ağırlıkça %0,3 çok duvarlı karbon nanotüp aşımışlardır. Test sonuçları cam fiberlere karbon nanotüp aşımamın çekme dayanımını %11 düşürürken çekme tokluğunu %57 arttırdığını göstermiştir.

Heshmati ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışmada tabakalı kompozitlerin mekanik ve titreşim özelliklerini çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi (MWCNT) ile iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Test sonuçları ağırlıkça %1'lik MWCNT takviyesinin elastisite modülünü %39,89, çekme mukavemetini %7,54 ve doğal frekansını %17,32 oranında arttırdığını göstermiştir.

Teja ve arkadaşları [16] silisyum karbür (SiC) katkısı ile takviye ettikleri sisal/polyester kompozit malzemenin mekanik ve termal özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu

amaçla sisal/polyester kompozitleri ağırlıkça %0, %5 ve %10 oranında SiC tozları ile takviye etmişlerdir. Test sonuçları %10'luk SiC takviyesi, takviyesiz numunelere oranla kompozit yapının çekme mukavemetini 2,53 kat ve darbe mukavemetini ise 1,73 kat arttırmıştır.

Polimer yapılı kompozit malzemelerin ürün kataloğundaki statik ve dinamik dayanım değerleri belirlenirken, kompozit numuneler genellikle laboratuvar ortamında test edilirler. Fakat polimer yapılı kompozit malzemelerin kullanım alanları göz önüne alındığında genellikle dış ortamın etkilerine maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden tasarım aşamasında malzemenin maruz kalacağı yüklemenin yanında dış ortamında sıcaklık, nem, rüzgar, ortam pH vb. gibi faktörlerin malzeme üzerindeki etkileri hesaba katılmalıdır. Kullanılacağı yere göre tasarımı yapılan yapı elemanının servis ömrü önceden bilinir ve bu da kullanıcıya iş güvenliği sağlar. Bu amaçla araştırmacılar kompozit malzemenin farklı ortam şartlarındaki davranışlarını araştırmışlardır.

Bajracharya ve arkadaşları [17] sıcaklık, radyasyon ve nem etkisine maruz bırakılmış kısa cam fiber takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin mukavemet karakteristiğini incelemişlerdir. Test sonuçları termoplastik matrisli kompozit malzemeleri 60°C ve daha üst sıcaklıklara maruz bırakmak mekanik dayanımlarını düşürdüğünü göstermektedir. UV radyasyona maruz bırakılan kompozitlerde çekme meydana geldiği için tabakalar arası yapışma mukavemetinde iyileşme meydana gelirken, nem etkisinde bırakılan kompozit numunelerde şişme meydana geldiğinden dayanım değeri düşmüştür.

Boubakri ve arkadaşları [18] sıcaklık ve su difüzyonu ile yaşlandırdıkları termoplastik poliüretanın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında 25°C, 70°C ve 90°C sıcaklıkta su difüzyonu yaptıkları test numunelerinde sıcaklık ve su difüzyon süresi artıkça mekanik dayanımların azaldığını gözlemlemişlerdir.

Fang ve arkadaşları [19] deniz suyunda 6 ay süresince bekletilmiş cam takviyeli polimer kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Test sonuçları camsı geçiş sıcaklığının, çekme mukavemetinin ve eğilme mukavemetinin sırasıyla %2,5, %13,8 ve %9,8 oranında azaldığını göstermiştir.

Hristozov ve arkadaşları [20] doğal ve sentetik fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin uzun dönem çekme davranışlarını araştırmışlardır. Bu kapsamda keten ve cam

fiber takviyeli kompozit malzemeleri 20°C, 50°C ve 60°C'deki kuru, saf su, tuzlu su ve bazik ortamlarda 120 gün boyunca bekletmişlerdir. Test sonuçları sıcaklık ve bekleme süresi arttıkça keten ve jüt takviyeli kompozitlerin çekme mukavemetlerinde %89'a varan mukavemet kaybının olduğu belirlenmiştir.

Cordeiro ve arkadaşları [21] bazik ve UV radyasyon ortamında bekletilmiş cam fiber takviyeli polimerik kompozitlerin çekme dayanımı, renk ve kütle özelliklerini araştırmışlardır. Bu kapsamda vinilester ve fenolik reçine ile ürettikleri kompozit numuneleri %1,0 NaOH, %1,4 KOH, ve % 0.16 Ca(OH)<sub>2</sub> sulu çözeltilerinde 120 gün boyunca bekletmişlerdir. Radyasyon ortamı için yine aynı süre boyunca numuneleri 160UV, 320UV ve 480UV ortamlarında bekletmişlerdir. Test sonuçları vinilester reçinenin fenolik reçineye göre daha başarılı olduğunu gösterse de her iki matris türü içinde bekleme süresi ve radyasyon miktarı arttıkça mekanik ve fiziksel özelliklerin azaldığı görülmektedir.

Feng ve arkadaşları [22] korozif ortamın cam fiber takviyeli pultrüzyon ile üretilmiş kompozitlerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla test numunelerini 60°C'de asidik, bazik ve tuzlu su çözeltili ortamlarda 90 güne kadar bekletmişlerdir. Test sonuçları hem asidik hem de bazik ortam için bekleme süresi arttıkça eğilme modülünün düştüğünü fakat tuzlu su ortamının fazla bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

Amaro ve arkadaşları [23] asidik ve bazik ortamın cam/epoksi kompozitlerin eğilme ve darbe dayanımları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda cam/epoksi kompozitleri ağırlıkça %10 derişime sahip hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH) ortamlarında 36 gün süresince bekletmişlerdir. Test sonuçları bekleme süresi arttıkça nem alma miktarlarının arttığını ve eğilme ve darbe dayanımlarının düştüğünü göstermiştir.

Yukarıda kompozit malzemelerin statik dayanımlarına ait son yıllarda yapılmış bazı çalışmalara yer verilmiştir. Bu çalışmalarda fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin statik dayanımlarının fiber türü, fiber oryantasyonu, fiber örgü yapısı, matris türü, yüzey modifikasyon işlemi, toz veya nano tüp takviyesi ve çevresel ortam koşullarından etkilendiği görülmektedir. Fakat çalışma sırasında kompozit yapı üzerine gelen yüklemeler ve çevre koşulları dikkate alındığında kompozit malzemeler statik dayanımlarının altındaki değerlerde de hasara uğramaktadırlar. Fiber takviyeli kompozitlerde hasar mekanizması;

matris çatlaması, fiber matris ara yüzey kırılması, komşu tabakalar arasında ayrılma (delaminasyon) ve fiber kırılması şeklinde gerçekleşmektedir. Kompozit malzemelerdeki hasar oluşumunu ve ilerlemesini daha iyi anlamak için bu mekanizmayı tetikleyen statik yüklemeler dışındaki diğer yüklemelerinde etkileri bilinmelidir.

Literatürde malzeme üzerinde meydana gelen tekrarlı yüklemeler neticesinde malzemenin statik dayanımının altındaki bir değerde hasara uğraması olayına yorulma denilmektedir. Yorulma esnasında yapı üzerine gelen yüklemeye değişken olduğundan dolayı yorulma hasarı malzemenin dinamik davranışının bir göstergesidir. Uygulama alanına değinildiğinde özellikle hava araçlarının kanat yapıları, rüzgar pervaneleri ve vantilatör kanatları, deniz taşımacılığında kullanılan araçların pervaneleri genellikle polimer matrisli kompozit yapılardan meydana gelmektedir. Bu yapılar çalışma esnasında tekrarlı yüklemelere maruz kalmaktadırlar. Bu sebepten dolayı kompozit malzeme seçimi ve boyutlandırma işleminde her zaman statik dayanımları göz önünde bulundurmak doğru değildir. Malzemenin dinamik yükler altındaki (yorulma, darbe vb.) davranışlarının da bilinmesi gerekmektedir.

Khashaba [24] farklı fiber hacim oranlarına sahip cam/polyester kompozitlerin burulmalı dinamik (yorulma) davranışlarını incelemiştir. Deneysel sonuçları 2 parametrelili Weibull analizi ile yorumlamıştır. Analiz sonuçları, fiber hacim oranı arttıkça malzemenin yorulma ömrünün iyileştiğini göstermiştir.

Khashaba ve arkadaşları [25] çatlaklı ve çatlaksız cam/epoksi tabakalı kompozitlerin dinamik (yorulma) davranışlarını araştırmışlardır. Deneysel sonuçları, çatlaksız numunelerin en iyi yorulma ömrüne sahip olduğunu ve deney numunesindeki çatlak büyüklüğü arttıkça malzemenin yorulma dayanımının düştüğünü göstermiştir.

Sakin ve Ay [26] dört farklı dokuma yoğunluğuna sahip cam fiber ile takviye edilmiş polyester kompozitlerin eğilmeli yorulma davranışlarını incelemiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarının güvenilirliğini test etmek için dört farklı güvenlik seviyesinde Weibull analizi yapmışlardır.

Borrego ve arkadaşları [27] kil ve karbon nano tüp partikül takviyeli cam/epoksi kompozitlerin çeki-çeki ve üç nokta eğme yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını



incelemişlerdir. Deney sonuçları matris içerisine atılan partikül miktarı arttıkça yorulma dayanımının düştüğünü göstermiştir.

Ferreira ve arkadaşları [28] alümina ile kaplanmış ve kaplanmamış cam fiberler ile takviye edilmiş epoksi ve polyester matrisli kompozit malzemelerin yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçları, cam fiberlerin alümina ile kaplanmasının malzemenin çekme ve yorulma dayanımını düşürdüğü göstermiştir.

Bedi ve Chandra [29] cam/vinilester ve cam/epoksi tabakalı kompozitlerin burulmalı eğilme yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada yorulma ömür verilerini kullanarak %90 güvenilirlik seviyesine sahip iki parametrelili Weibull analizini gerçekleştirmişlerdir.

Koricho ve arkadaşları [30] twill dokuma tipine sahip e-cam/epoksi kompozitlerin eğilme yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Yorulma testlerini  $R=0,1$  gerilme genliği oranında, deplasman kontrollü eğilmeli yorulma test cihazı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçları; yorulma yükü seviyesi arttıkça, yorulma ömrünün azaldığını ve katastrofik hasardan önce hasar gören bölgenin boyutunun daha küçük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, düşük yorulma yükü seviyesinde yorulma ömrü uzadığı ve hasar gören bölgenin boyutunun genişlediği gözlemlenmiştir.

Manjunatha ve arkadaşları [31] ağırlıkça %10 nano silika partiküle sahip olan cam/epoksi kompozitlerin çeki yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Test sonuçları %10 nano silika partiküle sahip olan numunelerin sahip olmayanlara göre yorulma ömürlerinin 3 kat daha fazla olduğunu göstermiştir.

Daggumati ve arkadaşları [32] dokuma karbon fiberler ile takviye edilmiş polifenilin sülfür matrisli kompozitlerin yorulma ve yorulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Sabit yükler altında gerçekleştirilen yorulma testlerinde çevrim sayısı arttıkça yorulma sonrası mekanik özelliklerin düştüğü gözlenmiştir.

Khan ve arkadaşları [33] farklı oranlarda nano kil ile takviye edilmiş karbon/epoksi kompozit malzemelerin çeki-çeki yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada matrise %3 oranına kadar nano kil takviyesinin yorulma ömrünü olumlu etkilediği gözlenmiştir.

Wang ve arkadaşları [34] karbon fiber takviyeli betonun dört nokta eğme yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını incelemiştir. Yapılan testlerin sonuçları karbon fiber takviyesinin betonun çatlak ilerlemesi, yorulma ömrü ve enerji absorbe etme kapasitesi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Makeev [35] uçaklarda yapı malzemesi olarak kullanılan E-cam/epoksi ve IM-Karbon/epoksi kompozit malzemelerde üç nokta eğme yüklemesi altındaki tabakalar arası kayma yorulmasını incelemiştir. Bu çalışmada tekrarlı yükler altında meydana gelen kayma şekil değişimini belirlemek için korelasyon tekniğini kullanarak sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir.

Belingardi ve arkadaşları [36] cam-karbon/epoksi tabakalı hibrit kompozitlerin farklı genliklerdeki dört nokta eğme yorulma davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar genlik miktarı arttıkça cam-karbon/epoksi tabakalı hibrit kompozitlerin yorulma dayanımlarının düştüğünü göstermiştir.

Burks ve arkadaşları [37] 180°C’de termal olarak yaşlandırılmış cam-karbon/epoksi tabakalı hibrit kompozitlerin yorulma davranışını nümerik olarak incelemiştir. Sonlu elemanlar analizinde 0, 3 ve 6 ay yaşlandırılmış kompozit malzemeyi modellemek için 3D visko-elastik hacim eleman kullanılmıştır. Analiz sonuçları termal yaşlandırmanın tabakalı hibrit kompozitlerde ön gerilmeye sebep olarak yorulma ömrünü düşürdüğünü göstermiştir.

Dai ve Mishnaevsky [38] farklı oranlarda takviye edilmiş cam-karbon/epoksi hibrit kompozitlerin üç boyutlu yorulma davranışlarını çeki-çeki, bası-bası ve çeki-bası yükleri altında nümerik olarak incelemiştir. Yapılan analizlerde, malzemedeki karbon oranı arttıkça hibrit kompozitin yorulma ömrünün arttığı görülmüştür.

Kar ve arkadaşları [39] çekirdek kısmı karbon, kabuk kısmı cam ile takviye edilmiş hibrit kompozit millerin farklı genlikteki çeki-çeki yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Test sonuçları genlik değeri artışının cam-karbon ara yüzeyinde ayrılmalara neden olduğunu ve buna bağlı olarak yorulma ömrünün azaldığını göstermiştir.

Khalid ve çalışma arkadaşları [40] alüminyum destek üzerine elyaf sarma yöntemiyle cam fiberler sarılarak elde edilmiş hibrit kompozit millerin eğilme yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Deney sonuçları, sarım sayısı arttıkça yorulma

dayanımının arttığını ve sarım için en uygun fiber oryantasyonunun +45/-45 olduğunu göstermiştir.

Murri ve Schaff [41] konik yapılu grafit/cam hibrit kompozit kirişlerin yorulma ömürlerini bileşik gerilmeler altında deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Sonlu elemanlar analizi için kiriş geometrisine, sınır şartlarına ve yükleme durumuna bağlı olarak iki boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlardır. Deneysel ve nümerik sonuçlar kirişin yüzeyine yakın yerlerde oluşan delaminasyon sonucu malzemenin hasara uğradığını göstermiştir.

Lee ve arkadaşları [42] tek yönlü prepreg ve dokusuz yüzeye sahip karbon ile takviye edilmiş hibrit tabakalı kompozitlerin çeki-çeki gerilmesi altındaki yorulma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Deney sonuçları 45° fiber yönlümesine sahip tabakalarda fiber çatlaklarının ve delaminasyonların meydana geldiğini göstermiştir.

Shan ve Liao [43] farklı oranlarda takviye edilmiş cam-karbon/epoksi hibrit kompozitlerin hava ve 25°C su içerisindeki çeki-çeki yorulma davranışını incelemiştir. Deney sonuçları, cam-karbon takviyesinin yorulma ömrü üzerinde etkili olduğunu ancak havada ve suda yapılan deneylerde yorulma ömrü açısından önemli bir fark olmadığını göstermiştir.

Belingardi ve Cavatorta [44] çapraz-kat ve açılı-kat cam-karbon/epoksi tabakalı hibrit kompozitlerin eğilme yüklemesi altında yorulma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Deney sonuçları, maksimum eğilme mukavemetinin %45-60 arasındaki yorulma yüklemeleri için çapraz-kat numunelerde daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Burianek ve Spearing [45] ortasında delik bulunan titanyum/grafit tabakalı hibrit kompozitlerin çeki-bası yüklemesi altındaki yorulma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Delik etrafında meydana gelen çatlaklar ve delaminasyonlar sonucu yorulmanın olduğu gözlenmiştir.

Wu ve arkadaşları [46] cam, karbon, bazalt ve polipropilen benzisoksazol (PBO) kullanılarak üretilmiş hibrit kompozitlerin çeki-çeki yüklemesi altındaki yorulma dayanımlarını deneysel olarak incelemiştir. Test sonuçları en iyi yorulma ömrünün karbon ve PBO yapılu kompozitlerde olduğunu ve karbon/bazalt yapılu hibrit kompozitlerin yorulma dayanımlarının sadece bazalt yapılu kompozitlere oranla daha iyi olduğunu göstermiştir.

Yukarıdaki çalışmalar incelendiğinde kompozit malzemelerin farklı yükleme durumlarında (Çeki, bası, çeki-çeki, çeki-bası, eğilmeli, dönel eğilmeli) ve farklı çevresel koşullardaki dinamik (yorulma) davranışları daha önce araştırılmıştır. Ayrıca yükleme durumuna bağlı olarak literatürde geçen ankastre tip eğilme, üç nokta eğilme ve dönel eğilmeli yorulma testlerinin tamamı oda sıcaklığında yapılmıştır. Ayrıca, asidik ve bazik ortamların tabakalı kompozitlerin statik ve dinamik dayanımlarına etkileri bir arada incelenmemiştir.

Bu çalışmada, uçak kanadı, rüzgar pervaneleri ve türbin kanatları gibi yapılarda kullanılan polimer matrisli kompozitlerin farklı çevre şartlarındaki statik ve dinamik dayanımları incelenmiştir. Bu amaçla farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamlarda farklı sürelerde bekletilen cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin statik dayanımları, yorulma mukavemetleri, yorulma ömürleri ve yorulma hasar mekanizmaları incelenmiştir. Bu kapsamda sekiz tabakalı cam/epoksi (C<sub>8</sub>), karbon/epoksi (K<sub>8</sub>) tabakalı kompozit malzemeler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler %5, %15 ve %25 derişime sahip asidik (H<sub>2</sub>O+HCl) ve bazik ((H<sub>2</sub>O+NaOH) çözeltide 1ay, 2ay, 3ay ve 4ay süresi boyunca bekletilmiştir.

Çevresel şartların cam ve karbon takviyeli kompozitlerin statik dayanımlarına etkisini incelemek için kompozit malzemelerin fiber yönü elastisite modülü (E<sub>1</sub>), fibere dik yön elastisite modülü (E<sub>2</sub>), kayma modülü (G<sub>12</sub>), fiber yönü çekme mukavemeti (X<sub>T</sub>), fibere dik yön çekme mukavemeti (Y<sub>T</sub>), fiber yönü basma mukavemeti (X<sub>C</sub>), fibere dik yön basma mukavemeti (Y<sub>C</sub>), eğilme modülü (E<sub>f</sub>) ve eğilme mukavemeti ( $\sigma_f$ ) belirlenmiştir. Test sonuçları hiçbir ortama maruz kalmamış (%0) test numunelerinin statik dayanımları ile kıyaslanarak asidik ve bazik ortamların statik dayanıma etkisi belirlenmiştir.

Asit ve baz ortamlarının cam ve karbon takviyeli polimer kompozitlerin dinamik davranışları etkisini incelemek için tam değişken (R=-1) eğilme yüklemesi altında numunelerin yorulma mukavemetleri, ömürleri ve yorulma hasarları incelenmiştir. Her bir malzeme tipi ve ortam koşulu için, eğilme yüklemesi altındaki yorulma ömürleri statik eğilme dayanımlarının %80, %70, %60, %50 ve %40'ına karşılık gelen yükleme değerlerinde belirlenmiştir. Bu kapsamda aynı anda 10 adet yorulma test numunesini istenilen genlik ve frekansta eğilmeli yorulma testine tabi tutan ankastre tipi bilgisayar kontrollü yorulma cihazının tasarım ve imalatı yapılmıştır. Bu yorulma test cihazının, piyasadaki ticarileşmiş yorulma test cihazlarından esas

farkı aynı anda 10 adet numuneyi test edebilmesi ve bilgisayar kontrolü sayesinde numune üzerindeki dayanım değişimlerinin anlık olarak izlenebilmesidir. Bilindiği gibi yorulma testleri uzun süren deneylerdir. Aynı anda 10 adet numuneyi test edebilmesi ile hem zamandan kazanç sağlanmıştır hem de numune üzerinden anlık veriler alınarak parametrelerin takibinde hata yapma olasılığı minimuma indirilmiştir. İmalatı yapılan cihazda eğilme yorulması testlerinde deplasman kontrollü yorulma tipi kullanılmıştır. Cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma ömürlerinin belirlenmesinde deneysel verilen kullanılarak her bir test parametresi için yorulma mukavemeti-ömür diyagramları (S-N eğrişi veya Wöhler eğrisi) elde edilmiştir. Çevresel koşulların tabakalı kompozitlerin dinamik davranışlarına etkisini daha iyi anlamak için hiçbir ortama maruz kalmamış test numunelerinin dinamik dayanımları da belirlenip sonuçlar kıyaslanmıştır.

Polimer matrisli kompozit yapılar neme karşı dayanıklıdır. Fakat maruz kalma süresi ve ortam pH'ı ile zamanla bu dayanımlarını kaybederek, bünyelerine nem alırlar. [18,19,21]. Bu çalışmada 1ay, 2ay, 3ay ve 4ay süresi boyunca farklı derişimlere sahip asidik ve bazik ortamlarda bekletilen numunelerin her ay için nem alma miktarları ve kütle kayıpları ağırlıkça hesaplanmıştır. Sonuçlar hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin ağırlık değerleri ile karşılaştırılmış, asit ve bazın cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitler üzerindeki yıpratıcı etkileri belirlenmiştir.

Asidik ve bazik ortam koşullarının ve maruz kalma süresinin cam ve karbon takviyeli kompozitlerin yüzey ve morfolojik yapısına olan etkisini anlamak için tarama elektrom mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak matris ve fiberde meydana gelen hasarlar görsel olarak incelenmiştir.

Ülkemizde kompozit malzemelerin hava, kara, deniz, inşaat ve savunma sanayi gibi dallarda kullanımını her geçen gün artmaktadır. Çalışmanın sonuçları, ülkemizde kompozit yapılar üreten firmalar için (özellikle otomobil parçaları, rüzgâr türbinleri, kompozit yapı malzemeleri) hem üretim hem de ekonomik anlamda yararlı sonuçlar doğuracaktır.

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasının ana amacı çevresel şartlarının endüstride kompozit malzemeler arasında en çok yapı malzemesi olarak kullanılan tabakalı kompozit malzemelerin statik ve dinamik

davranışlarına olan etkisinin deneysel olarak incelenmesidir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Endüstride fiber takviye elemanı olarak kullanılan cam ve karbon fiber takviye kumaşların ve epoksi reçinenin satın alınması. El yatırması yöntemiyle cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin üretilmesi,
- Uygun test standartları kullanılarak kompozit malzemelerin statik ve dinamik dayanımlarını belirlemek için uygun ölçülerde test numunesi hazırlanması,
- Asidik ve bazik ortamlarda bekletilen numunelerde %nem alma ve %kütle kaybı değerlerinin belirlenmesi için ilk ağırlıklarının tartılması,
- Çevrenin ve maruz kalma süresinin kompozit malzeme üzerindeki etkisini araştırmak için test numunelerinin farklı derişimlerdeki asidik ve bazik ortamlarda (%5, %15 ve %25) dört farklı süre boyunca (1 Ay, 2 Ay, 3 Ay ve 4 Ay) bekletilmesi,
- Bekleme süresi tamamlanan numunelerde ağırlıkça %nem alma ve %kütle kaybı değerlerinin belirlenmesi için ıslak ve kuru ağırlıklarının tartılması,
- Ortam derişiminin ve bekleme süresinin etkilerini daha iyi anlamak için hiçbir ortama maruz kalmamış saf numunelerin (%0) statik ve dinamik testlerinin yapılarak sonuçların karşılaştırılması
- Saf ve bekleme süresi tamamlanan test numunelerinin statik dayanımlarının belirlenmesi için çekme, basma ve 3 nokta eğme testlerinin yapılması,
- Aynı anda 10 adet numuneyi eğilme yorulması testine tabi tutabilecek, bilgisayar kontrollü dinamik yorulma cihazının tasarımı ve imalatı,
- Saf ve bekleme süresi tamamlanan test numunelerinin yorulma davranışlarını ve yorulma ömürlerini statik eğilme dayanımlarının %80, %70, %60, %50 ve %40'ına denk gelen gerilmeler altında belirlenmesi,

- Ortam derişiminin ve bekleme süresinin malzemenin morfolojik ve fizyolojik özelliklerine etkisini anlamak için taramalı elektron mikroskop görüntülerinin alınması,
- Statik ve dinamik test sonuçlarının analizi, derişime ve bekleme süresine göre mukavemet değişim grafiklerinin hazırlanması, sonuçların çizelgeler halinde verilmesi.

Tabakalı kompozit yapılar üzerine yapılan çalışmalar göz önüne alındığında, statik dayanım, eğilmeli yorulma, tabakalı kompozit ve çevresel etki bağlamında bütün parametrelerin bir arada ele alındığı herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu bulgular ışığında yapılan bu özgün çalışma ile elde edilen bilimsel tecrübenin yanında literatüre katkı sağlamak hedeflenmiştir.

### **1.3. Sponsor**

Bu doktora tez çalışması Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi tarafından desteklenmiştir. (Proje Numarası: UBAP01 2014/MF013)

## 2. BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELER

### 2.1. Kompozit Malzemelere Giriş

İki ya da daha fazla bileşenin kendi özelliklerinden daha üstün özellikte bir malzeme oluşturmak için makro düzeyde bir araya gelmeleri ile oluşan yeni yapıya kompozit malzeme denir. Kompozit malzemenin bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler ve özellikle üreticisi tarafından dizayn edilerek üretilirler. Kompozit malzemeyi oluşturan bu bileşenler sürekli faz ve süreksiz faz olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sürekli faza takviye fazı, süreksiz faza ise matris fazı denilmektedir.

Takviye fazı kompozit malzemeye dayanım, rijitlik gibi mekanik öğeler kazandırır. Fakat kullanım amacına göre takviye fazı her zaman kuvvet taşıma görevi üstlenmez. Özellikle partikül takviyeli kompozitlerde, malzemenin aşınma direncinin artırılması, termal özelliklerinin iyileştirilmesi gibi yönleriyle kompozit yapıya katkı sağlar.

Matris fazı ise kompozit malzemeye form verir, fiber fazını çevresel ortamın etkilerinden korur, üzerine gelen yükleri fiber malzemesine eşit olarak dağıtır ve malzemenin tokluğuna katkıda bulunur. Kompozit malzemenin mekanik dayanım sınırları belirleyen iki önemli unsur fiber/matris oranı ve mükemmel fiber/matris birleşimidir. Öyle ki, malzemenin elastisite modülünü etkileyen en önemli bölge fiber/matris ara yüzeyidir. Çünkü bilindiği üzere geleneksel bir malzemenin rijitliği, atomlar arası bağın bir göstergesidir. Atomlar arası bağ kuvvetini de metalin erime sıcaklığının derecesi belirler. Kompozit malzemelerde elastisite modülünü ve tokluğu daha çok ara yüzey bağı belirlemektedir. Bu yüzden kompozitin dayanımının iyi olması için fiber/matris ara yüzey bileşiminin kusursuz olması gerekir.

Günümüzde endüstrinin ihtiyaç duyduğu özelliklere göre birçok formda kompozit yapı üretmek mümkün hale gelmiştir. Kompozit malzemelerin üretimi ile aşağıdaki özelliklerin bir ya da birkaçının geliştirilmesi amaçlanır.

- Yüksek mukavemet/yoğunluk
- Yüksek sıcaklık performansı
- Aşınma dayanımı
- Isıl ve akustik iletkenlik



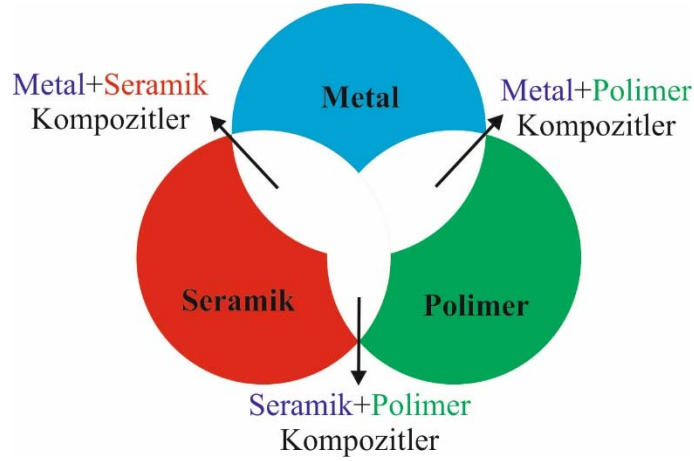
- Yorulma dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Korozyon dayanımı
- Kırılma Tokluğu
- Maliyet
- Estetik görünüm
- İmalat kolaylığı/tamir edilebilirlik
- Elektriksel iletkenlik/direnç

## 2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, bileşenlerin türüne göre sınıflandırmak mümkündür.

### 2.2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit yapılarda kullanılacak matris malzemesinin seçimi önemlidir. Çünkü yapı üzerine gelecek kuvvet ya da çevresel etkiye ilk matris malzemesi tepki vermektedir. Bu yüzden matris malzemesinin seçimi yapılırken kendisinden beklenen özellikleri karşılayacak yetenekte olmalıdır. Matris malzemesi seçerken dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise takviye türünün cinsi ve kullanılacak üretim yöntemidir. Bu amaçla endüstride kullanılan farklı türler de matris malzemesi bulunmaktadır.



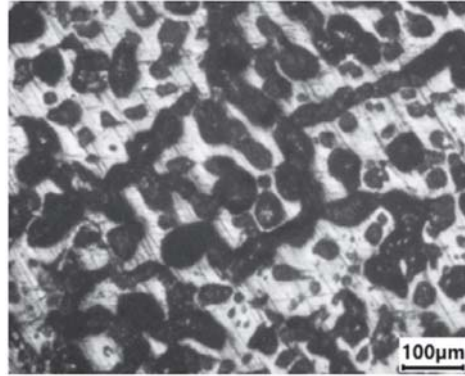
Şekil 2.1 Endüstride kullanılan kompozit malzeme türleri

Kompozit malzemeler yapılarındaki matris malzemesinin türüne göre metal matrisli kompozitler (MMC), seramik matrisli kompozitler (SMC) ve polimer matrisli kompozitler (PMC) olmak üzere 3 farklı şekilde sınıflandırılırlar (Şekil 2.1).

### 2.2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, esas yapıyı matris metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak da genellikle seramik türünden bir takviye fazının kullanıldığı kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler geleneksel malzemelerin yerine kullanılacak en büyük alternatiflerdendir. Metal matris, seramik fiberlerin yüksek elastik modülü ile metallerin plastik şekil değiştirme özellikleri birleştirilerek aşınmaya dayanıklı, kırılma tokluğu ve basma gerilmesi yüksek malzemeler elde edilmesini sağlar. Sürekli fiberler, metal matrisli kompozitlere yüksek elastiklik modülü ve dayanım kazandırır fakat anizotropik özellik gösterirler. Resim 2.1’de 23µm boyutundaki SiC ile takviye edilmiş Alüminyum matrisin görüntüsü verilmiştir [47].

Metal matrisli kompozitlerin termal özellikleri ve ısı kararlılıkları çok daha iyidir. Kaynakla veya diğer birleştirme yöntemleri ile birleştirilebilirler. Metal matrisler, her elyafla iyi ara yüzey oluşturmadıkları için kompozit üretimi zor ve pahalı olup bu en önemli dezavantajlarından biridir. Kompozit üretiminde hafif metallerden alüminyum, magnezyum, nikel, titanyum, bakır, çinko ve bunların alaşımları sıkça kullanılan metal matris malzemelerdir. Bu kompozitler yaygın olarak otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Elektrik iletkenliğinin gerekli olduğu alanlarda tercih edilirler.

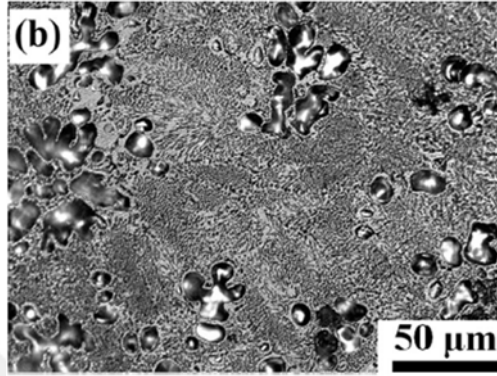


Resim 2.1 Alüminyum matris SiC takviyeli metal matrisli kompozit [47]

### 2.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik; bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementlerle birleşmesi ve sinterlenmesi sonucunda elde edilen inorganik bileşiktir. Seramikler; silikatlar, alüminatlar, su ve metal oksitler ile alkali ve toprak alkali bileşiklerden oluşmaktadır. Seramik matrisli kompozitler çok sert ve kırılmandırlar. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımlarına ve göreceli düşük

yoğunluk özelliklere sahiptirler. Isıl şok direnci ve tokluğu düşük malzemelerdir. Mukavemetleri çok yüksek olmakla birlikte, Seramik malzemeler, çok sert ve gevrek yapıda oldukları için kırılğan yapıya sahiptirler. Bu nedenle kullanım alanları sınırlıdır. Resim 2.2’de kimyasal depolama yöntemi ile üretilmiş seramik matrisli kompozitin elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir [48]



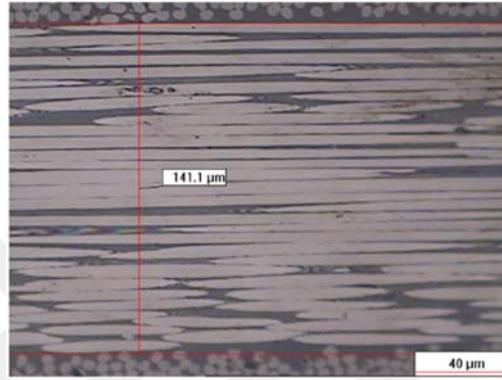
Resim 2.2 Magnezyum takviyeli seramik matrisli kompozit [48]

Seramik matrisli kompozitler; türbin motor disklerinin, askeri zırhların, ısıl işlem fırınlarının, dizel motorların egzoz valflerinin yapımında kullanılmaktadırlar. Alümina ve zirkonya esaslı seramik kompozitler üzerindeki son yıllardaki çalışmalar, bu malzemelerin sadece roket başlığı, uzay araçları gibi uygulamalarda değil aynı zamanda insan vücudunda da biomalzeme olarak kullanılmaya başlanmasına sebebiyet vermiştir. Seramik matrisli kompozit malzemeler; endüstriyel fırınlar, elektrik-elektronik, optik sanayisi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

### 2.2.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, sürekli fiber takviyeli olarak yaygın olarak kullanılan termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır. Termoset plastikler, üretimleri sırasında gerçekleşen polimerizasyon reaksiyonunun geri dönüşümlü olmadığı için ısıtılarak yumuşatılamazlar dolayısıyla şekil verilemezler. Endüstride en çok kullanılan termoset reçineler polyester, vinilester ve epoksi reçinelerdir. Sıvı halde bulunan bu reçineler uygulama esnasında tek başına değil bir ya da daha fazla sertleştirici ve reaksiyon hızlandırıcı kimyasal ile beraber kullanılırlar. Termoset reçinelerin 100°C sıcaklığın altında mekanik ve kimyasal dayanımları iyidir.

Termoplastikler ısıtıldıklarında tekrar yumuşarlar ve soğuduklarında sertleşirler. Böylece üretim döngüsüne tekrar ve tekrar katılabilirler. Termosetlere göre daha sünek yapıdadırlar. Raf ömürleri daha uzundur. Sertleşmeleri için herhangi bir kimyasala ihtiyaç duymazlar. Yüksek darbe mukavemeti ve elektrik yalıtkanlık özellikleri yüksektir. Termosetlere göre daha düşük mukavemete ve rijitliğe sahiptirler. Oda sıcaklığında işlenmeleri zordur. Resim 2.3'te karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Görüntüden farklı yönlerde yönlendirilmiş karbon fiberler görülebilir [49].



Resim 2.3 Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitin optik mikroskop görüntüsü [49]

Cam fiber, kevlar fiber, bor fiber ve karbon fiberler polimer matrisli kompozitlerin takviye yapısı için en çok kullanılan fiber türleridir. PMC'lerin üretiminde en çok kullanılan yöntemler, el yatırması, filament sarma, vakum kalıplama işlemi, pultrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum yöntemleridir. PMC'lerin başlıca kullanım alanları ise, korozyon direnci sebebiyle denizcilik uygulamaları, hafifliği sebebiyle havacılık ve otomotiv gibi taşıt üretim endüstrileri ile spor malzemeleri, yanmazlık özelliği istenen iç dekorasyon gibi alanlar olarak gösterilebilir.

### 2.2.2. Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye elemanları istenilen özel dayanım değerlerini sağlayacak şekilde farklı tip ve formlarda, tasarıma uygun olarak seçilerek kullanılmaktadırlar. Kompozit yapılarda takviye elemanı olarak organik (doğal) veya inorganik (sentetik) yapıli fiberle kullanılabilir. Hemen hemen tüm organik fiberler (jüt, sisal, pamuk, bambu, viskon vb.) düşük yoğunluk, elastikiyet ve dayanım değerlerine sahiptirler. İnorganik fiberler ise (cam, karbon, boron, vb.) organiklere göre yüksek mukavemet ve rijitlik değerlerine sahiptirler. Kompozit malzemeler yapılarında

kullanılan takviye tipine göre elyaf takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma kompozitler olarak sınıflandırılırlar.

Fiber (elyaf) takviyeli kompozitler ince elyafların matris malzemesini takviye etmesiyle meydana gelirler. Fiberin kompozit yapı içerisindeki yerleşimi ve yönlenmesi kompozit malzemenin mukavemetine doğrudan etkisi vardır. Uzun fiberlerin matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile fiber doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, fibere dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş fiber takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotropik bir yapı oluşturmak mümkündür. Fiber takviyeler genellikle polimer matrisli kompozitlerde kullanılmaktadırlar.

Parçacık takviyeli kompozitler bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Parçacıklar matris içerisinde ne kadar homojen dağılırsa kompozit yapı o derece izotropik bir davranış gösterir. Fakat bu durum sanıldığı kadar kolay değildir. Parçacık takviyeli kompozitlerin üretiminde yaşanan en zor durum parçacıkların matris içerisinde homojen dağıtılmasıdır. Parçacık takviyeli kompozitlerin üretimi fiber takviyeli kompozitlere göre daha ekonomiktir. Genellikle seramik ve metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılırlar. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler. Partikül boyutu nanometre seviyesinde ise bu tip kompozitlere nano kompozitler denir.

Tabakalı kompozitler en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit tipidir. Kompozit bir tabakada farklı yönlerde eşit mukavemet elde edebilmek için kumaş şeklinde dokunmuş fiberler kullanılır. Farklı fiber yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile yüksek mukavemet değerleri istenilen yönde elde edilebilir. Genellikle polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. İki tabaka arasına, köpük, bal peteği gibi yapıların yerleştirilmesi ile elde edilen yapılara sandviç kompozitler adı verilir.

Karma kompozitler, aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunması ile meydana gelirler. Bu tip kompozitler genelde düşük maliyetli fakat yüksek dayanımlı kompozit malzemelerdir. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrit kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyaflı kompozitten daha yüksektir.

### 2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

#### 2.3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin, geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özelliklere sahip olması, son yıllarda bu malzemelerin üretim teknikleri üzerinde yapılan çalışmaların artmasını sağlamıştır. Buna rağmen metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri pahalı ve üretim zamanı uzundur. Metal matrisli bir kompozit malzemenin üretim tekniği; üretilecek parçanın şekline, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matrise, takviye elemanı şekli ve türüne göre belirlenir. Çizelge 2.1’de metal matrisli kompozitlerin üretimi için kullanılan yöntemler verilmiştir. Metal matrisli kompozitlerin üretimi için yöntem seçilirken malzemenin çalışma sıcaklığı, takviye malzemesinin şekli ve boyutu, istenilen malzemenin boyutları, takviye malzemesinin homojen dağılımı gibi parametrelerin önceden bilinip ona göre seçim yapılması gerekmektedir.

Çizelge 2.1 Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri

Katı Faz Üretim Yöntemleri	Sıvı Faz Üretim Yöntemleri	Diğer Yöntemler
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toz Metalürjisi Teknikleri</li> <li>• Difüzyon Bağı Yöntemi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sıvı Metal İnfiltrasyon</li> <li>• Sıkıştırma Döküm</li> <li>• Sıvı Metal Karıştırma</li> <li>• Plazma Püskürtme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rheocasting ve Compcasting Döküm Teknikleri</li> <li>• Vidalı Ekstrüzyon</li> <li>• In-Situ Tekniği</li> <li>• XD Tekniği</li> </ul>

- Katı faz üretim tekniklerinden en çok kullanılan yöntem toz metalürjisidir. Toz metalürjisi tekniğinin pahalı olmasına karşılık bu yolla istenilen oranda ve istenilen büyüklükte tozların ara yüzeyde reaksiyon oluşturmaksızın karıştırılarak kompozit

üretimi mümkün olmaktadır. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların genelde sıvı hal üretim yöntemleriyle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir.

- Difüzyon bağı oluşturma işlemi, katı halde kompozit malzeme üretim tekniklerinden en pratik olanlarından birisidir. Bu yöntem vakumda presleme yöntemi olarak da isimlendirilmektedir. Difüzyon bağı yönteminde, takviye elemanları metal folyolar üzerine istenilen açıda ve miktarda yerleştirilebilmekte ve bu işlemler tamamlandıktan sonra ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklık altında basılarak veya haddelenerek matris ile takviye arasında bir bağ oluşturulmak suretiyle kompozit malzeme üretilmektedir.
- Sıvı metal infiltrasyon yöntemi metal matrisli kompozitlerin üretim metotları arasında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu işlemde esas prensip, bir kap veya tüp içerisine yerleştirilmiş fiberler arasına sıvı halindeki metal matrisin emdirilmesidir.
- Sıkıştırma döküm yöntemi; metal bir kalıp içerisine yerleştirilen, ön ısıtma yapılmış, seramik fiber veya başka bir takviye malzemesinden oluşmuş ön şekle, kuvvet yardımıyla eriyik metalin emdirilmesi ve böylece sıkıştırılan eriyik metale yüksek basınç uygulanarak katılaştırılması işlemidir.
- Plazma püskürtme yöntemi özellikle parçacık takviyeli MMC malzemelerin üretiminde kabul görmüş bir yöntemdir. Plazma püskürtme, atomize edilmiş ergimiş metal parçacıklarının takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. Bu üretim metoduyla matris malzemesi takviye elemanı üzerine istenilen kalınlığı verecek şekilde püskürtülerek karmaşık şekilli parçalar üretilebilir. Bu yöntem takviyeler arası mesafenin kontrolü ve takviyelerin daha rahat yönlendirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir.
- Sıvı metal karıştırma tekniklerinde, ön ısıtma yapılmış takviye malzemeleri, sürekli karıştırılan ergimiş metal içerisine değişik yöntemlerle katılmakta ve daha sonra döküm işlemi yapılmaktadır. Karıştırma işleminin atmosfere açık olarak yapılması ergimiş metalin atmosferden gaz alması problemini oluşturduğundan dolayı işlem koruyucu gaz veya vakum altında yapılır.

- Rheocasting ve Compocasting olarak bilinen döküm yöntemleri kısa fiber veya partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler için uygulanan yöntemlerin en ekonomiklerinden biridir. Matris malzemesi, karıştırma üniteli bir ergitme fırınının içine yerleştirilip ergime sıcaklığının 40-50°C üzerinde ısıtılmakta, sıcaklık homojenize edilmekte ve sıvı metal sıcaklığı kontrollü olarak düşürülmektedir.
- Polimer ürünlerin işlemleri için geliştirilen ve kullanılan vidalı ekstrüzyon yöntemi Dow laboratuvarları tarafından Mg alaşımı esaslı kompozit malzeme üretimi için kullanılmıştır. Yöntemde matris malzemesini oluşturacak olan Mg, küçük parçacıklar halinde takviye partiküller ile birlikte bir haznenin içine doldurulur. Haznenin ağzı, hazırlanan karışımın, vidalı ekstrüzyon sisteminin içerisine kolayca doldurulabilmesi için uygun bir geometride yapılmıştır. Haznedeki beraberce ilerleyen matris ve takviye malzemesi aynı anda hem ısıtılıp hem de karıştırılmaktadır. İlerleme esnasında matris malzemesi ergime sıcaklığı civarına geldiğinde yarı katı yarı sıvı haldeki karışım sistemin sonundaki kalıp içine beslenir.
- In-Situ tekniğinde, bir ötektiğin yönlenmiş olarak katılaştırılması ile iki fazlı bir yapı ortaya çıkmaktadır. Fazlardan biri matris diğeri ise matris içine dağıtılmış lamel, plaka veya fiber şeklinde fazdır. Uygulamaların çoğu alüminyum, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar kullanılarak yapılmaktadır.
- Martin Marietta tarafından geliştirilen XD tekniği yöntemi, takviye fazın sıvı metal içerisinde bir bileşik ilavesi ile oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile sıvı metal fazı içerisinde pek çok seramik bileşik oluşturulabilmektedir [50].

### 2.3.2. Seramik Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Seramik matrisli kompozitler üretmek için ergitilmiş matrisin sızdırılması ve sıcak preslenmesi, kimyasal buhar kaplama ve sızdırma, kimyasal reaksiyonla bağlama ve toz metalürjisi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

- Ergitilmiş matrisin sızdırılması ve sıcak preslenmesi yönteminde çoğunlukla cam seramik matrislerin üretimi için tercih edilen yöntemdir. Whisker (İplik) halindeki fiberlerin, matris malzemesini içeren sıvı içinde dağılması sağlanır. Elde edilen ergitilmiş matris, kalıpta sıcak preslenir.



- Kimyasal Buhar Kaplama ve Sızdırma yönteminde 800°C gibi düşük sıcaklıklarda uygulanabilir ve malzeme üzerine herhangi bir basınç uygulanması gerekmez. Karmaşık şekilli parçalar bu metotla üretilebilir. Ekonomik, düşük maliyetli bir sistemdir. Proses işleminin uzun olması, malzeme yoğunluğunun ayarlanamaması ve imal edilecek parçaların boyutlarının sınırlı oluşu yöntemin dezavantajlarıdır.
- Kimyasal Reaksiyonla Bağlama yöntemi silisyum nitratla takviyelendirilmiş silisyum karbür (SiC) üretiminde kullanılır. Fiber önce silisyum ile temas ettirilir. Sonradan azot ile sinterlenerek fiberin etrafında silisyum nitrat oluşumu sağlanır. Silisyum, fiberin üzerine püskürtülerek kaplanabilir.
- Toz Metalürjisi yönteminde, istenilen forma sahip bir kalıp içerisinde preslenerek ön mukavemet kazandırılan tozlar daha sonra sinterlenerek mukavemetlendirilir. Sıcak preslemede, presleme ve sinterleme işlemleri bir arada yapılır. Toz halindeki matris metali, whisker veya elyaf şeklindeki pekiştiriciler karıştırılarak preslerde şekillendirilirler. Soğuk presleme uygulandığında boşluksuz, kompakt bir yapının elde edilmesi için yüksek basınç uygulanır bu da takviye malzemesinde hasara sebep olur. Bu nedenle sıcak presleme uygulaması tercih edilir [51].

### 2.3.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitlerin kullanım yeri, malzeme üretim yeri ve malzeme formuna göre geliştirilmiş birçok üretim metodu vardır. İstenilen özelliklerde ve biçimde polimer matrisli kompozit malzeme üretmek için kullanılan yöntemler aşağıda sıralanmıştır.

- El yatırma yöntemi, keçe veya dokuma biçimli elyaf, daha önceden hazırlanan kalıp içerisine yerleştirilerek, matrisi oluşturan reçine fırça gibi basit el aletleriyle elyafın üzerine sürülür. İstenilen kalınlık elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir, böylece tabakalı kompozit üretilmiş olur. Bu yöntemde en uygun reçineler; polyester ve epoksidir.
- Elyaf püskürtme metodu el yatırma yönteminin makineleşmiş halidir. Yöntemde, sürekli beslenen fitil kesici bıçaklardan geçerek kırıldıktan sonra katalize edilmiş, reçine ile beraber jelkot uygulanmış kalıp yüzeyine püskürtülür ve oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılır. Püskürtme sonrası reçine içindeki havayı çıkarmak ve yüzeyi

düzgünleştirmek amacıyla rulolama uygulanır. Oto kaportası, kayık, küvet, yüzme havuzlarının iç yüzeyi bu yöntemle kaplanır.

- Elyaf sarma yönteminde, elyaf reçine banyosuna daldırıldıktan sonra iki punta arasında dönmekte olan ve üzerine ayırıcı sürülmüş kalıp üzerine sarılmasından ibarettir. Üretim bir mandrel üzerine elyaf sarılması şeklinde olduğundan iç yüzeyi pürüzsüz parçalar imal edilebilir. Polyester ve vinilester gibi reçineler kullanılabilir. Kuru sarma ve yaş sarma gibi iki çeşit imalat çeşidi vardır. Ayrıca sürekli lifler kalıp üzerine düzlemsel veya helisel sarılabilirler. Genellikle; silindirik kaplar, silolar, basınçlı kaplar, güç iletim şaftları ve roket motor kasaları bu yöntemle üretilirler. Bu üretim yöntemiyle; kapı, pencere profilleri, kara yolları korkulukları gibi kompozit ürünler üretilebilmektedir.
- Profil çekme yönteminde elyaflar önce reçine tankından geçirildikten sonra istenilen kesit formuna sahip ısıtılmış kalıptan geçirilir. Kalıptan geçirilirken ısının etkisi ile reçine sertleşir ve kompozit profil mamul hale gelmiş olur. Bir diğer adı pultrüzyon yöntemidir. Pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Yöntemin en büyük eksikliği üretim öncesi ön hazırlık sürecinin uzun olması ve herhangi bir sebepten ötürü üretime ara verilmesi durumunda fire miktarının fazla olmasıdır.
- Reçine transferli kalıplama yöntemi, iki tarafı düzgün veya parlak ürün elde etmek için uygun bir biçimde hazırlanmış olan alt kalıba (dişi kalıp) öngörülen tüm takviye malzemelerinin yerleştirilip üst kalıp (erkek kalıp) kapatıldıktan sonra, kapalı kalıbın içine uygun bir makine/ekipman ile reçinenin enjekte edilmesi işlemidir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Otomotiv sektöründe karbon fiber şaseler bu yöntemle üretilmektedirler.
- Ekstrüzyon yöntemi, termoplastiklerin şekillendirilmesinde büyük ölçüde kullanılmakla beraber takviyeli termoplastiklerde sınırlı oranda uygulanmaktadır. Sürekli bir yöntem olup tonajı yüksek olduğu zaman ekonomiktir. Tüp, boru veya karmaşık şekilli profillerin üretimi mümkündür.

- Basınçlı kalıplama yöntemi cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karmaşık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç duyulmasıdır.
- Vakum torbalama yöntemi genellikle sandviç kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır. Kompozit takviye bileşenleri önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulanarak içerisinden geçirilen reçine aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de vakum torbalama yöntemi kullanılmaktadır.
- Otoklav yöntemi vakum torbalama yönteminin daha geliştirilmiş bir türüdür. Otoklav yönteminde, reçine ve takviye daha yüksek basınç ve ısı altında birleşir. Bunun için dışarıdan sıkıştırılmış bir gaz yarı mamul kompozit üzerine uygulanmaktadır. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır [51].

#### **2.4. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları**

Kompozit malzemeler birçok özelliklerinden dolayı geleneksel malzemelere alternatif olabilmeleri bakımından önem kazanmışlardır. Doğada saf halde bulunmamaları ve insan eliyle yapılmalarından dolayı iyileştirilmiş performanslarının yanında alternatiflerine kıyasla bazı dezavantajlara sahiptirler. Aşağıda sayılan avantajlarından ötürü talep edilmesinin ne

derece haklı olduğu ve bunun yanında dezavantajları ile de daha fazla geliştirilmeleri gerektiği vurgulanmıştır.

#### 2.4.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları

- Kompozitlerin çekme, eğilme, darbe ve basınç dayanımı birçok metalik malzemeye göre çok daha iyi ve yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir.
- Kompozitler birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastiklere, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadırlar. Ürüne sağladığı yüksek mukavemet/ hafiflik özelliğinin etkin bir şekilde kullanılmasında en önemli nedenlerden biridir.
- Büyük ve karmaşık parçalar tek işleme bir parça halinde kalıplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar. Kompozitler bir tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif ya da fonksiyonel şekle sokulabilirler.
- Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler. Ayrıca istenildiği takdirde yalıtım özellikleri yüksek kompozit malzemeler üretilebilir. Seramik matrisli kompozitler yalıtım özelliği iyi olan kompozit türlerindedir.
- Özellikle termoset polimer kompozit malzemeler, hava etkileri, korozyon ve çoğu kimyasal etkilere karşı daha uzun dayanabilmektedirler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında kullanılmaktadır.
- Seramik matrisli kompozitler düşük ısıl iletim katsayısı sayesinde ısıl yalıtım istenen ortamlarda kullanılmaktadır. Özellikle ergitme fırınlarının refrakter tuğlaları seramik matrisli kompozitlerden yapılmaktadırlar [52].

#### 2.4.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

- Polimer esaslı kompozit malzemelerde kürleşme sırasında meydana gelen hava kabarcıkları malzemenin statik ve dinamik dayanımını olumsuz etkiler,
- Kompozit malzemelerin değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler göstermesi, anizotropik yapıdan kaynaklı aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerlerinin farklılıklar göstermesi,
- Polimer matrisli kompozit malzemeler dıŐında diğer kompozit malzemelerin süneklik ve tokluğunun d Őuk oluşu,
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları fiber/matris ara yüzeyinde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalatın yapılamaması,
- Polimer kompozit malzemeler dıŐında, kompozit malzemelerin üretim maliyetinin yüksek olması,

Bu dezavantajları ile kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eŐyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda problemleri çözümlenmesi gereken bir malzeme grubudur [52].

### 3. BÖLÜM YORULMA

Birçok makine parçası veya yapı elemanı kullanımları sırasında tekrarlı yükler ve farklı frekanslardaki titreşimlere maruz kalmaktadırlar. Tekrarlı yükler altında çalışan yapı elemanlarında oluşan gerilmeler, malzemenin statik dayanımının altındaki bir değerde olmasına rağmen belirli bir zaman sonunda yüzeyde mikro çatlaklara neden olur. Bu çatlaklar zamanla ilerleyerek malzemenin kırılmasına neden olmaktadır. Malzemenin statik akma mukavemetinin altında gerçekleşen bu olaya yorulma adı verilmektedir. Mühendislikte deformasyon sebeplerinin en yaygını yorulmadır. Çekme, basma, sürünme ve kırılma testlerinde uygulanan yükler statiktir. Yorulma yükleri ise periyodik gerçekleşmesinden ötürü dinamik yüklerdendir. Yorulma, statik dayanımın altındaki gerilme değerlerinde zamanla gerçekleşen bir durumdur ve önceden tahmin edilmesi zor bir hasar şeklidir. Bu sebeple malzemelerin statik davranışlarından çok dinamik yüklemeler altındaki dayanımlarının bilinmesi daha da önemlidir. Endüstride kullanılan yapı malzemeleri çalışma esnasında sık sık dalgalı ve periyodik yüklere maruz kalmaktadırlar. Uçak kanatları, rüzgar türbin kanatları, gemi veya fan pervaneleri türbülanslı akışta ani şekil değişimlerine zorlanırlar. Pistonlu motorların krank ve bağlantı elemanları, yaprak yaylar eğilmeye zorlanırlar.

Yorulma olayı ilk olarak 1837 yılında madenlerde taşıyıcı konveyörlerde kullanılan demir zincirler üzerinde bazı tekrarlı yükler uygulayarak denemeler yapan WAJ Albert tarafından incelenmiştir [53]. 19. Yüzyılın ortalarında demiryolu sistemlerinin hızla gelişmeye başlamasıyla trenlerin akslarında yorulma sonucu oluşan kırılmalar tekrarlı yüklerin malzemenin kullanım ömrü üzerinde ne derece etkili olduğunu gözler önüne sermiştir. 1842'de termodinamikte Rankine çevriminin mucidi olarak bilinen Rankine trenlerin akslarındaki yorulma dayanımını araştırmıştır [54]. 5 Ekim 1842'de Fransa Versailles de nedeni tam olarak anlaşılamayan lokomotif aksının kırılmasından ötürü gerçekleşen kazada altmışa yakın kişi hayatını kaybetmiştir. 1954'te iki adet Comet uçağının gövde yapısında meydana gelen yorulma hasarı nedeniyle düşmesi sonucu yüze yakın insan hayatını kaybetmiştir. Bu kazalar tasarımcılara yapı elemanlarında malzeme seçimi ve boyutlandırma sırasında statik hesapların yanı sıra dinamik etkilerinde göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir.

1853 yılında Frenchman Morin posta taşımacılığı için kullanılan at arabası dingillerinin güvenlik için 60000km de değişmesi gerektiğini söylemiştir. Yaptıkları incelemede

70000km'den sonra kesit değişimlerinin meydana geldiği yüzeylerde çatlak oluşumu gözlemlenmişlerdir. [53]. 1858-1870 yılları arasından Alman demiryolu mühendisi August Wöhler ilk olarak sistematik yorulma araştırmasını yaptı ve geliştirdi. Lokomotif akslarında kullanılan malzeme için tekrarlanan yükler altında eğilme, burulma ve radyal olarak tekrarlanan yüklerde denemeler yaptı. Wöhler elde ettiği verileri malzemenin yorulma karakteristiğini ifade eden S-N diyagramı diye bilinen eğrilerle yorumladı [55].

Makinaya dayalı bir hayat kültürünün giderek yaygınlaştığı günümüzde can ve mal güvenliği bakımından malzemelerin yorulma davranışları daha önemli bir konuma gelmiştir. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık %90'ı yorulma sonucunda olmaktadır. Endüstride kullanılan malzeme çeşitliliğinin artmasına karşın geliştirilen test cihazları ve bilgisayar yazılımları sayesinde malzemelerin yorulma karakteristiği daha kolay ve kesin sonuçlarla belirlenebilmektedir.

### **3.1. Malzemelerin Yorulma Mekanizması**

Metalurjistler; yük altında çalışan malzemelerin davranışlarını belirleyip, hasar mekanizmalarına ait teoriler geliştirmelerine rağmen, yorulma ile oluşan kırılmalara sebep olan nedenleri tam olarak izah edememişlerdir. Çünkü yorulma hasarının karmaşık bir mekanizması vardır. Yorulma hasarında, parçaya dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetlerin yanında lokal genleşme ve büzülme deformasyonları neticesinde meydana gelen ısıl gerilmelerde etki etmektedir[56].

Atom mertebesinde bir hatanın civarında oluşan plastik şekil değişimi tane sınırlarında dislokasyonların oluşmasına neden olmaktadır. Değişken yükler altında dislokasyonlar ilerleyerek kayma bantlarını meydana getirirler. Kayma bantlarındaki yüksek şekil değiştirme enerjisi çatlağın başlangıcına neden olur. Kritik uzunluğa erişmeyen çatlak kararlı bir yapıdadır. Fakat zamanla gelişen çizgisel hatalar ve dış faktörleri etkisiyle çatlak yayılarak kararsız bir hal alır. Bu noktadan sonra çatlak ilerlemesi daha hızlı bir hal alır. Çatlak uzunluğu kritik seviyeye ulaştığında nihai kopma gerçekleşir. Yani yorulma hasarında plastik deformasyonlar söz konusudur. En genel hali ile yorulma kırılması bu şekilde ifade edilebilir. Tanımdan da anlaşılacağı üzere yorulma hasarı; çatlağın oluşması, çatlağın yayılması ve malzemenin hasara uğraması gibi üç kademedir meydana geldiği düşünülmektedir. Bu hasar

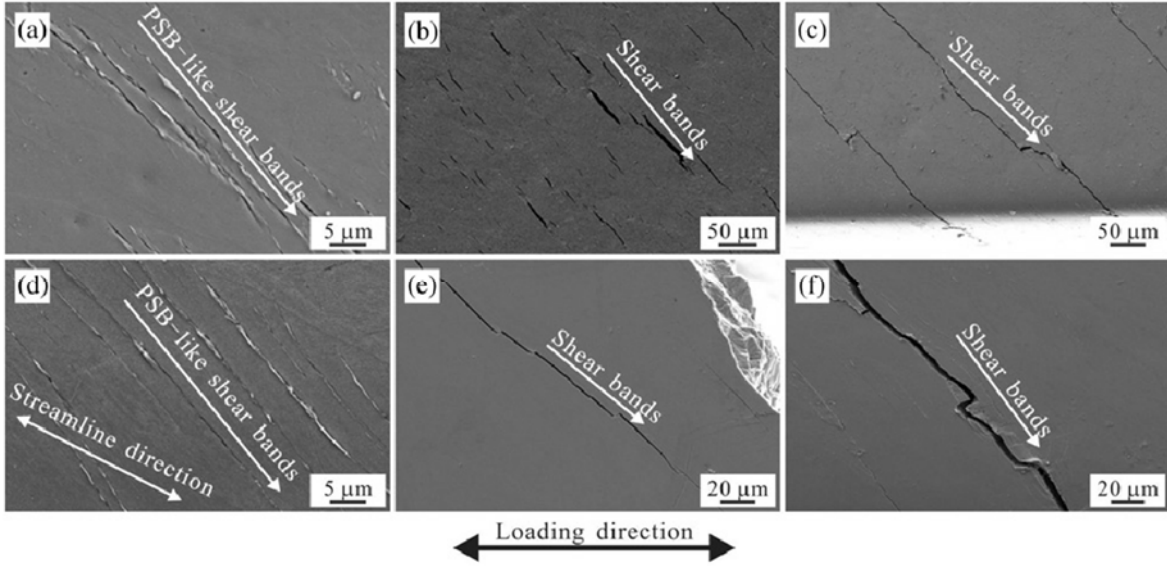
mekanizmasının çalışması için numune üzerindeki gerilmenin statik dayanımın altında fakat yeteri kadar büyük olmalı, uygulanan gerilme geniş bir değer aralığında değişip dalgalanmalı ve uygulanan gerilme yeteri kadar büyük tekrar sayısında etkimelidir.

Yorulma olayı sonunda malzemede kırılmanın ne şekilde meydana geldiğini açıklamak için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Özellikle son yıllarda görüntüleme teknolojilerinin gelişmesi sayesinde içyapı muayenesinden elde edilen veriler yorulma hasar mekanizmasının oluşumu hakkında somut veriler sağlamıştır. Ayrıca yorulmuş numunelerin morfolojik ve fiziksel özelliklerin incelenmesi yorulma olayına etki eden parametrelerin bilinmesini sağlamıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde yorulma sırasında meydana gelen kararsız bölgedeki çatlak ilerlemesinin ne gibi aşamalardan geçtikten sonra hasara neden olduğunu ortaya koyan bazı teoriler vardır. Yorulma mekanizmaları ile ilgili başlıca teoriler şunlardır:

Gough'a göre malzeme çevrimsel g altında aynı yönlü ve tek eksenli gerilme olduğu gibi aynı kristalografik yönde kayar. Yalnız tek eksenli kayma yapının her yerinde görülürken, yorulmada bazı tanelerde kayma bantları görülmez. Kayma bantları genellikle ilk birkaç bin çevrimde ortaya çıkar (Resim 3.1). Fakat kayma bantlarının sayısı çevrim sayısı ile doğru orantılı değildir.

Çok ağır kayma bölgelerinde kayma bantları bir doygunluk değerine ulaşır. Yorulma kırılmasına neden olan çatlaklar, yorulma sınırının altındaki gerilme değerlerinde kayma bandına paralel olarak yüksek plastik deformasyonların olduğu yerde oluşur. Yorulma testi bir yerde kesilip yüzey morfolojisi incelendiğinde görülen büyük kayma bantları embriyonik yorulma çatlaklarıdır. Bu tür bantlar toplam yorulma ömrünün %5'inden sonra görülür. Bu bantlara çekme gerilmesi uygulandığında, bantlar geniş çatlaklara dönüşür [55].





Resim 3.1 Yorulma sırasında ortaya çıkan kayma bantları [57]

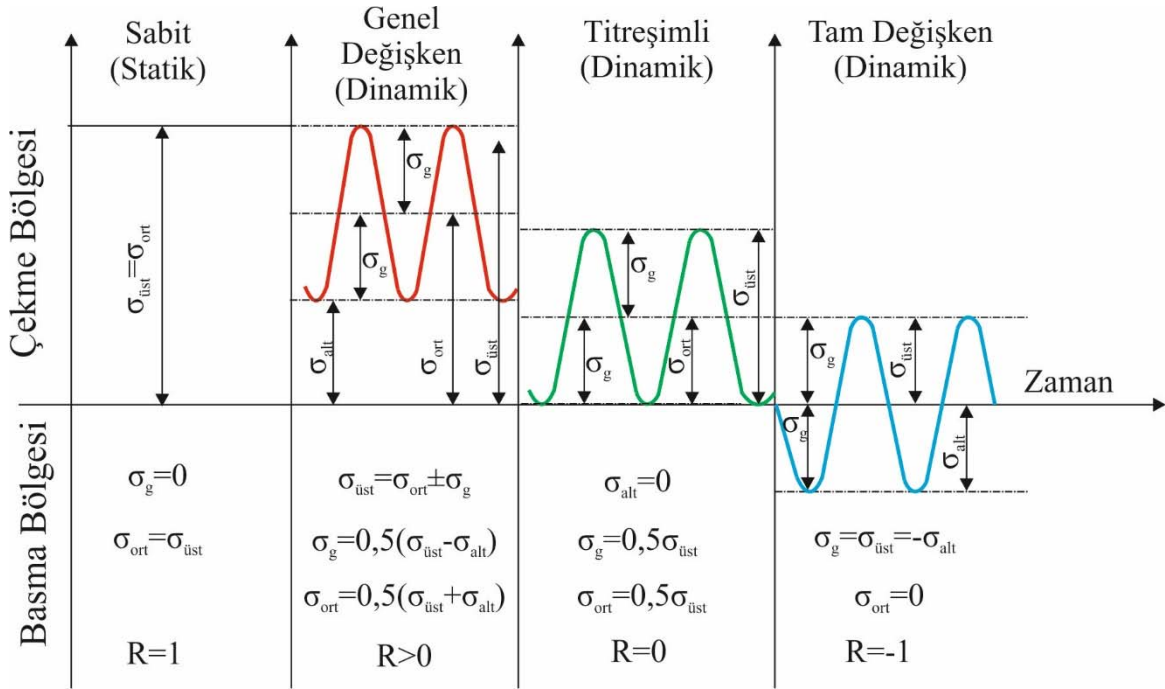
Wood'a göre yorulma iki aşamada meydana gelmektedir. Birinci aşamada çatlak kayma bandı boyunca ilerler. Çok kristalli metallerde çatlak ilerlemesi ikinci çatlığa geçmeden önce, sadece birkaç atom çapı boyutunda ilerler. Bu aşamada çatlak yüzeyi yapı bakımından belirgin bir özellikte değildir. İkinci aşama, inklüzyonlar ya da ikinci faz parçacıkları plastik deformasyon bölgesinde boşluklar oluşturarak birbirleri ve çatlak ucu ile birleşir. Böylece çatlak oluşmuş olur. Bu aşama çatlığın daha hızlı ilerlediği aşamadır. Her bir çevrimde kırık yüzeylerinin sayısı daha da artmaktadır. Malzeme de kesit değişimi yani süreksiz bölgede plastik deformasyon vardır [55].

### 3.2. Yorulma Mukavemet Sınırları

Değişken yüklemeler altında çalışan makine elemanlarının yorulma mukavemetine birçok parametre etki eder. Bu parametreler en genel anlamda; gerilme, parça geometrisi ve dış çevreyle ilişkilidir. Gerilme parametreleri, gerilmenin durumu, gerilmenin genliği, gerilme oranı, yükün etki ettiği frekans değeridir. Parça geometrisine bağlı unsurlar; boyut, kesit değişimleri, keskin köşeler, parça üzerindeki bağlantılar veya kaynak durumu gibi mekanik ve metalürjik özellikleri kapsar. Dış çevre parametreleri ise, parçanın çalıştığı ortamın sıcaklık, nem, korozyon, pH değeri ve parçanın kuru ya da yağlı ortamda çalışma durumuna bağlı etkilerdir.

### 3.2.1. Gerilme Parametreleri

Yorulma testlerinde malzemenin yorulma dayanımı-ömür durumunu karakterize etmek için, test numuneleri farklı yükleme durumlarında yüklenerek test edilirler. Şekil 3.1’de yorulma testlerinde kullanılan yükleme tipleri gösterilmiştir. Grafikte  $\sigma_{üst}$  maksimum gerilme değerini,  $\sigma_{alt}$  minimum gerilme değerini,  $\sigma_{ort}$  ortalama gerilme değerini,  $\sigma_g$  gerilme genliğini ve R gerilme oranının ifade etmektedir. Gerilme genliği minimum gerilme değerinin maksimum gerilme değerine oranıdır.



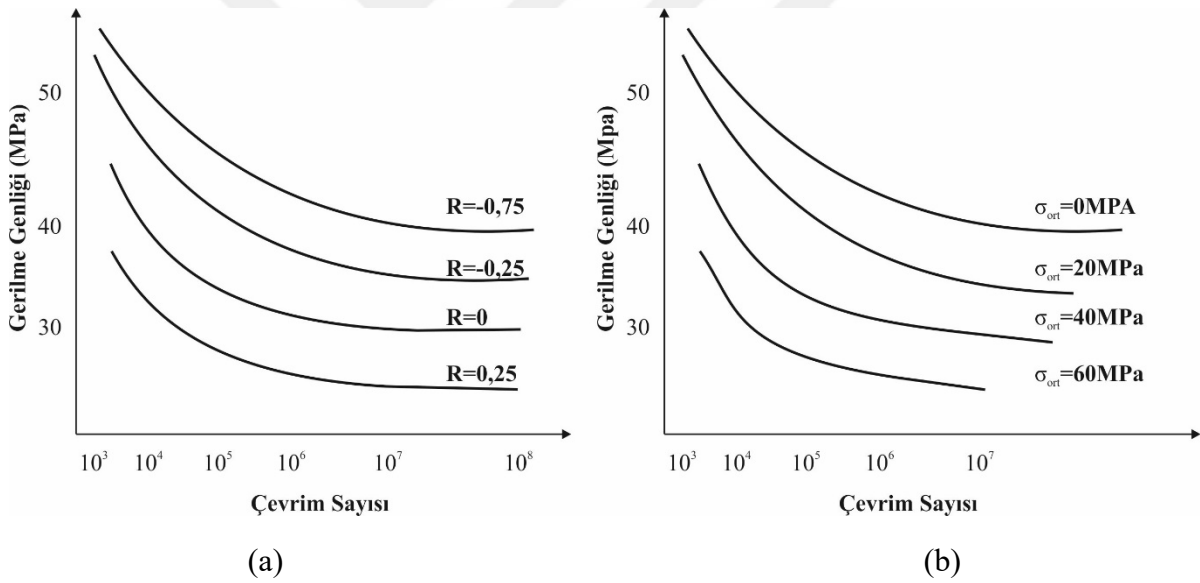
Şekil 3.1 Sabit genlikli yorulmada kullanılan yükleme tipleri

Maksimum ve minimum gerilme değerlerinin aynı bölgede yer aldığı gerilme durumuna genel değişken yükleme durumu ( $R > 0$ ), minimum gerilme değerinin sıfır olduğu yükleme durumuna titreşim ( $R = 0$ ) ve minimum basma gerilmesinin maksimum çekme gerilmesine eşit olduğu tam değişken yükleme ( $R = -1$ ) durumu denir.

Aynı tür yükleme durumu için gerilme genliği ( $\sigma_g$ ), gerilme oranı (R) ve ortalama gerilmenin ( $\sigma_{ort}$ ) etkileri önemlidir. Şekil 3.2’de farklı gerilme oranı ve farklı ortalama gerilme değerleri için S-N eğrisinin değişimi ifade edilmiştir [58]. Gerilme oranının büyük olduğu durumlarda test numunesinin yorulma ömrünün uzun olması için ortalama gerilmenin sıfıra yakın olması

gerekir. Değişken zorlanmaya maruz kalan yapı elemanın gerilme genliği azaldıkça, pekleşme ve yorulma ömrü artar.

Yorulma ömrü ( $N_f$ ) değişken zorlamaya maruz kalan elemanın kopuncaya kadar geçen zamandır. Ömür, yorulma olayında yük değişme sayısı  $N$  ile ifade edilir. Kopma olmaması şartı ile yapı elemanına tatbik edilen maksimum gerilme genliğine yorulma mukavemeti ( $\sigma_{DN}$ ) denilir. Çok büyük, pratik bakımdan sonsuz olarak kabul edilen  $N_0$  yük değişme sayısında kopma olmaksızın elemana uygulanan maksimum gerilme genliğine ise sürekli mukavemet sınırı ( $\sigma_D$ ) (sonsuz ömür karşılık gelen gerilme değeri) denilir. Çeliklerde  $10^6$ - $10^8$  çevrim sayısı sonsuz yorulma ömrü olarak kabul edilir. Fiber takviyeli kompozit yapılarda bu değer  $10^6$ - $10^7$  arasında değişmektedir [59]. Değişken zorlanmanın etkisi ancak  $N \geq 10^3$  yük değişme sayısından sonra başlar. Bu sebepten  $N = 0$  ile  $N = 10^3$  değerleri arasındaki zorlamalar statik zorlama olarak kabul edilir [59].

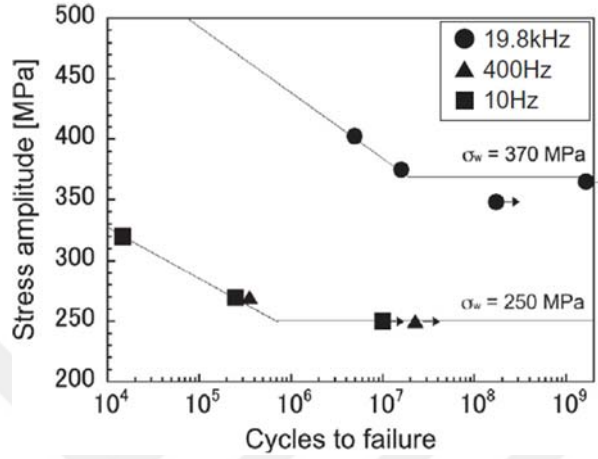


Şekil 3.2 (a) farklı gerilme oranı ve (b) ortalama gerilme değeri için S-N eğrisi [58]

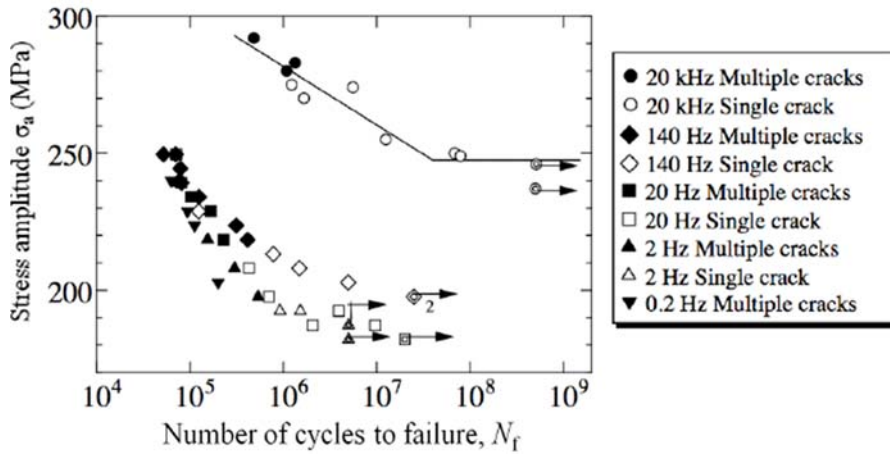
Malzemede hasarın gerçekleştiği yorulma ömrü, mukavemet sınırı için belirlenen ömürden küçükse sonlu ömürlü, eşit veya büyükse sonsuz ömürlü olarak ifade edilir.

Yapı elemanlarındaki artık gerilmelerin varlığı malzemelerin yorulma dayanımına doğrudan etki etmektedir. İmalattan kaynaklanan veya herhangi bir ısıl işlem sonucu meydana gelen artık gerilmelerin üzerine, makine elemanının çalışma sırasında maruz kaldığı gerilmeler de eklenince yorulma gerilmesinin seviyesi ve yorulma ömrü etkilenir. Çeki-çeki gerilmesiyle

zorlanan yapı elemanlarında bası yönünde artık gerilme oluşu ya da bası-bası gerilmesiyle zorlanan yapı elemanlarında çeki gerilmesi oluşu malzemenin yorulma ömrünün uzamasını sağlar. Bu durumunun tam tersi olursa yapı elemanı beklenenden daha kısa sürede hasara uğrar.



(a)



(b)

Şekil 3.3 Frekansın yorulma davranışı üzerindeki etkileri (a) Nonaka ve arkadaşları [60], (b) Guennec ve arkadaşları [61]

Makine elemanı üzerine etkileyen kuvvetlerin yükleme sıklığı olan gerilme frekansının yorulma ömrüne etkisinin net olduğu söylenemez. Nonaka ve arkadaşları [60] trenlerin aks millerinin yorulma davranışlarını 10Hz, 19.8Hz ve 400Hz deki yüklemeler altında araştırmışlardır. Test sonuçları 10Hz ve 400Hz için hemen hemen yakın çıkarken, 19.8Hz de daha uzun ömür elde etmişlerdir. Guennec ve arkadaşları [61] farklı frekanslar altında gerçekleştirdikleri yorulma testlerinde düşük karbonlu çeliklerin mikro plastisite özelliklerini çalışmışlardır. Test

sonuçları Nonaka ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın sonuçlarını doğrular niteliktedir. Her iki çalışmadan elde edilen S-N eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.3'te ifade edilmiştir.

### 3.2.2. Parça Geometrisine Bağlı Unsurlar

Malzeme üzerindeki gerilmeler, malzemenin yapısal ve imalat kusurlarından kaynaklanan çentik, mikro boşluk, çizik gibi süreksizlik bölgelerinde yoğunlaşır. Kaynaklı parçalardaki gerilim arttırıcılar, gaz boşlukları gibi gömülmüş kusurlar, hapsolmuş cüruf ve kaynaşma eksikliği, kaynak bitişleri ve kaynak çıkıntıları ya da geometrik değişikliklerdir. Yorulma sonucu meydana gelen kırılmalar malzeme bünyesindeki bir çatlakın başlamasıyla meydana gelir. Değişken yüklemeler sonucu oluşan bu çatlakların en çok olduğu yerler malzeme bünyesindeki bu süreksizlik bölgeleridir. Bunun yanında tane büyüklüğü de yorulma ömrüne doğrudan etki eder. Küçük tane yapısına sahip malzemelerin yorulma ömürleri daha yüksektir.

Malzemenin yüzey pürüzlülüğü, dövme, taşlama ve parlatma gibi kullanılan işleme metoduyla değiştiğinde yorulma mukavemeti de değişmektedir. Ayrıca sertlik, yüzey morfolojisi gibi yüzey özellikleri; işleme şeklinin sonucu olarak değişir ve bunlar, farklı malzemeler için pürüzlülük değerlerini değiştirdiğinden, her bir malzeme ve işleme şekli kategorisine göre yorulma ömrü de etkilenmektedir [58].

Parça geometrisine bağlı olan unsurlardan biri de parça yüzeyine uygulanan işlemlerdir. Yorulma kırılmasında çatlak yüzeyden başlamaktadır. Malzeme yüzeyine uygulanan dövme, sementasyon, kaplama gibi işlemler yüzey sertliğini arttırarak çatlak oluşumuna karşı mukavim hale getirir. Böylece parçanın yorulma mukavemeti de artırılmış olur.

### 3.2.3. Dış Çevre Parametreleri

Sıcaklığın yükselmesi molekülleri birbirine bağlayan bağların zayıflamasına neden olduğu için malzemenin mukavemeti azalır. Dolayısıyla bu da yorulma dayanımı ve yorulma ömrünün düşmesine neden olmaktadır. Çok düşük sıcaklıklarda atom hareketleri yavaşlar ve malzemeler gevrek bir yapı almaktadırlar. Gevrek yapılarda çatlak ilerlemesi daha kolay olduğundan yorulma hasarı daha erken gerçekleşir.

Bir cisim korozyon ortamının içinde iken değişken kuvvetlerin etkisi altında kalması halinde korozyon yorulması denilen durum meydana gelir. Bu durum yorulmanın en tehlikeli halidir. Zira korozyon özellikle metallerin yüzeyini pürüzlü hale getirerek çentik etkisi oluşturur.

Havadaki oksijenin metaller ile yaptıkları bileşikler malzeme bünyesinde kütle kaybına neden olur ve bu da yorulma mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. Ortamın pH derecesi de malzemenin mukavemetini etkiler. Özellikle metallerde asidik ortamlarda pas oluşumu daha hızlıdır. Korozyon yorulmasına karşı korunma genel olarak iki farklı yöntem ile gerçekleştirilir. Bunlardan ilki mekanik işlemlerle metalin yüzeyinin sertleştirilmesi, diğeri malzeme yüzeyine korozyon olayını engelleyici anodik bir kaplamanın yapılmasıdır.

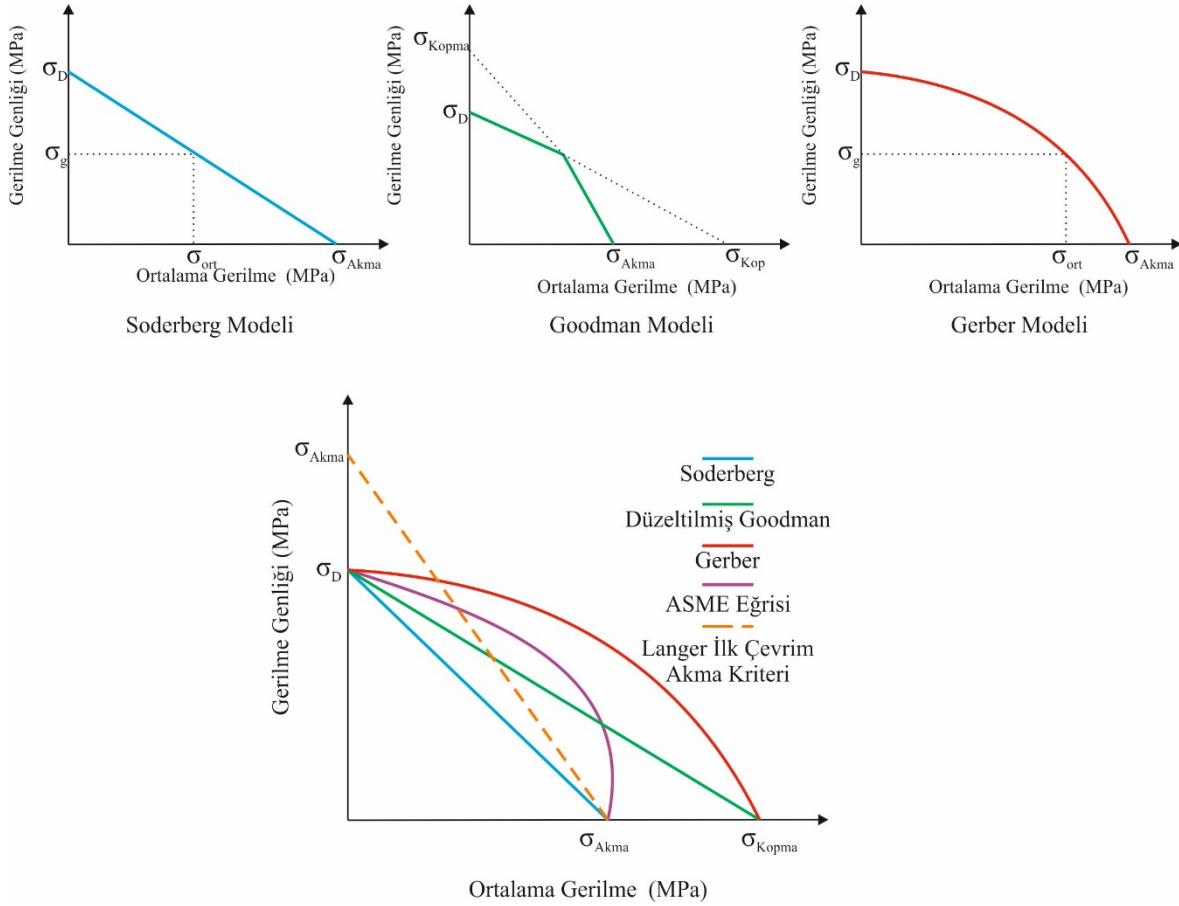
Birbirine değmekte olan iki cisim değışken kuvvetlerin etkisi altında bulunuyorsa sürtünme sonucunda ince toz halinde yapı bileşenleri malzemedan ayrılırlar. Yüzeyden ayrılan parçalar çalışma esnasında malzeme yüzeyinde çizikler meydana getirirler. Bu çizikler mikro çatlak gibidirler. Zamanla ilerleyerek malzemenin yorulma kırılmasında etkin rol oynarlar. Bu yüzden sürtünerek çalışan makine elemanlarında yorulmaya bağlı hasar oluşumunu engellemek için makine parçaları yağlanır. Yağlı ortamda çalışan numuneler sürtünme sonucu oluşan ısıdan ve aşınmadan daha geç etkilenirler. O yüzden yağlı ortamda çalışan makine elemanlarında yorulma hasarı kuru ortamda çalışanlara göre daha geç meydana gelmektedir.

### **3.3. Ortalama Gerilmenin Yorulma Dayanımı Üzerindeki Etkileri**

Ortalama gerilmenin doğrudan yorulma hasarına etkisinin olmamasına rağmen, yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir parçanın yorulma ömrü tahmin edileceği zaman göz önüne alınmalıdır. Yorulma olayını çekme ortalama gerilmesi hızlandırırken, basma ortalama gerilmesi yavaşlatır [62].

Yukarıda ifade edilen  $\sigma_{DN}$  ve  $\sigma_D$  gibi yorulma sınırları  $\sigma_{ort}$ 'nin sıfır olduğu durum, yani tam değışken zorlama hali için geçerlidir.  $\sigma_{ort}$  sıfıra eşit olmadığı, genel değışken zorlama hali için ayrıca yorulma sınırları tayin edilmez. Pratik durumda makine elemanların çoğu genel değışken zorlamalar altında çalışır. Genel değışken zorlanma durumunda deneysel sonuçları ifade edebilmek için üç boyutlu bir diyagram çizilmesi gerekir. Bu diyagram tam değışken durum için çizilen Wöhler eğrisine bir ortalama gerilme eklenerek artan ortalama gerilmeyle yorulma limiti veya yorulma mukavemetindeki değışimi gösterir. Böyle bir deneyin yapılması zaten zor ve pahalı olan yorulma deneylerini tamamen zorlaştırır. Buradaki zorluğu yenmek için tam değışken yorulma deneylerinden ve çekme deneyinden elde edilen değerlerle ortalama gerilmenin etkisi arasında bir bağlantı kurmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Ancak deney yolu ile  $\sigma_{DN}$  ve  $\sigma_D$ 'nin üzerine  $\sigma_{ort}$ 'nin etkisi incelenir ve bu sonuçlar genel değişken zorlamaya maruz kalan elemanların hesabında kullanılır. Dolayısıyla bu durumda kullanılacak dinamik mukavemet sınırlarını belirlemek için, Goodman Soderberg ve Gerber eğrilerinden faydalanılır (Şekil 3.5).



Şekil 3.4 Soderberg, Goodman ve Gerber modelleri

Gerber hasar bölgesi sınırı olarak bir parabol önermiş Goodman ve Soderberg ise birer doğru önermişlerdir. Daha sonra maksimum gerilmenin akma sınırını geçmesi halinde makine elemanında kalıcı şekil değiştirme meydana geleceği için Goodman ikinci bir doğru daha tanımlamıştır. Yapılan deneysel çalışmalar hasarların daha ziyade Goodman ve Soderberg'den dışarıda meydana geldiği, çok az hasarın Goodman içinde oluşturuğu gözlemlenmiştir. Bu durumda Soderberg çok güvenilir bir sınır oluşturmaktadır. Emniyet katsayısı da dikkate alındığında Goodman kriteri yeterli sonucu vermektedir. Bununla birlikte bir tek formülle sonuca gidilmesi açısından zaman zaman Soderberg kriteri de kullanılmaktadır.

Parabolün veya doğrunun üzerinde bulunan ve koordinatları  $\sigma_{ort}$  ,  $\sigma_D$  olan herhangi bir nokta genel değişken zorlanmayı temsil eder. Soderberg modeli ele alınırsa,

$$\sigma_g = \sigma_D \left( 1 - \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{Akma}} \right) \quad (\text{Denklem 3.1})$$

bağıntısı elde edilir. Denklem 3.1 Soderberg eşitliği olarak ifade edilir. Soderberg malzemenin kritik hasar mukavemeti olarak akma dayanımını esas almıştır. Gevrek malzemeler akma göstermeden hasara uğrarlar. Goodman, yorulma eğrisinde Soderberg'in kriterini bir adım ileri götürerek  $\sigma_{Akma}$  noktası yerine  $\sigma_{kopma}$  noktasının esas almıştır. Buna göre;

$$\sigma_g = \sigma_D \left( 1 - \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{Kopma}} \right) \quad (\text{Denklem 3.2})$$

Denklem 3.2'de Goodman modelinin matematiksel ifadesi bulunur.

Gerber yaptığı deneylerde yorulma mukavemeti ile malzemenin kopma dayanımı arasında parabolik bir değişim gözlemlemiştir. Kendi kriterinde bu ilişkiyi;

$$\sigma_g = \sigma_D \left( 1 - \left( \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{Akma}} \right)^2 \right) \quad (\text{Denklem 3.3})$$

Denklem 3.3'teki gibi ifade etmiştir. Bu denklemler çevrim sayısının sonsuz ömürden büyük olması halinde geçerlidir. Eğer yorulma ömrü sonsuz ömürden küçükse, Soderberg, Goodman ve Gerber'in matematiksel ifadeleri Denklem 3.4-3.6'daki gibi olur.

$$\sigma_g = \sigma_{DN} \left( 1 - \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{Akma}} \right) \quad (\text{Denklem 3.4})$$

$$\sigma_g = \sigma_{DN} \left( 1 - \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{Kopma}} \right) \quad (\text{Denklem 3.5})$$

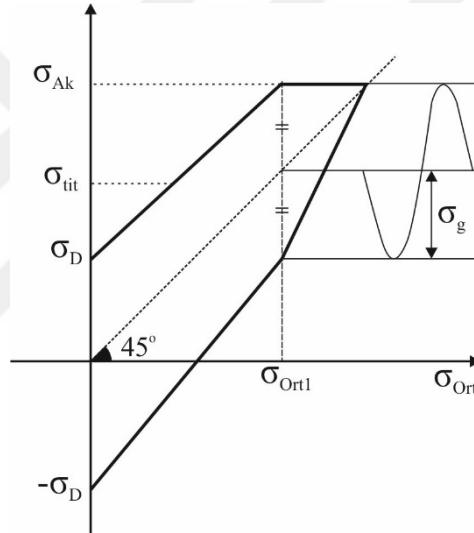
$$\sigma_g = \sigma_{DN} \left( 1 - \left( \frac{\sigma_{ort}}{\sigma_{Akma}} \right)^2 \right) \quad (\text{Denklem 3.6})$$

İkisi de doğrusal olan Soderberg ve Goodman modellerinden sünek malzemeler için sadece Soderberg modeli kullanılırken Goodman ve Gerber modelleri sünek ve gevrek malzemeler için kullanılabilir. Gerber 'in modeli deneyler ile tatbik edilen bir model olduğu için gerçeğe



daha yakın cevap vermektedir. Bunun yanında Soderberg ve Goodman modelleri daha emniyetlidir [59].

Yorulma değerleri Smith diyagramları ile temsil edilirler (Şekil 3.5). Smith diyagramı zorlanma hallerinin genel temsil tarzıdır. Bu diyagramın yatay eksen ortalama gerilme değerleriyle ve dikey eksen statik akma ve kopma dayanımları, sürekli mukavemet sınırı ile gösterilir. Smith diyagramında 45°'lik eğim yapan ve orijinden geçen doğru genel değişken zorlanmalarda mukavemet sınırının ortalama değerini, bu çizgiden üst ve alt çizgilere eşit uzaklıktaki mesafeler gerilme genliğini temsil eder. Herhangi bir zorlanma durumunda nominal gerilmeler Smith diyagramı içerisinde kalıyorsa malzemede yorulma kırılması olmaz.



Şekil 3.5 Smith diyagramı

### 3.4. Yorulma Deney Türleri ve Kullanılan Cihazlar

Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında belirleyici bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyodlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir.

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyi türleri şunlardır:

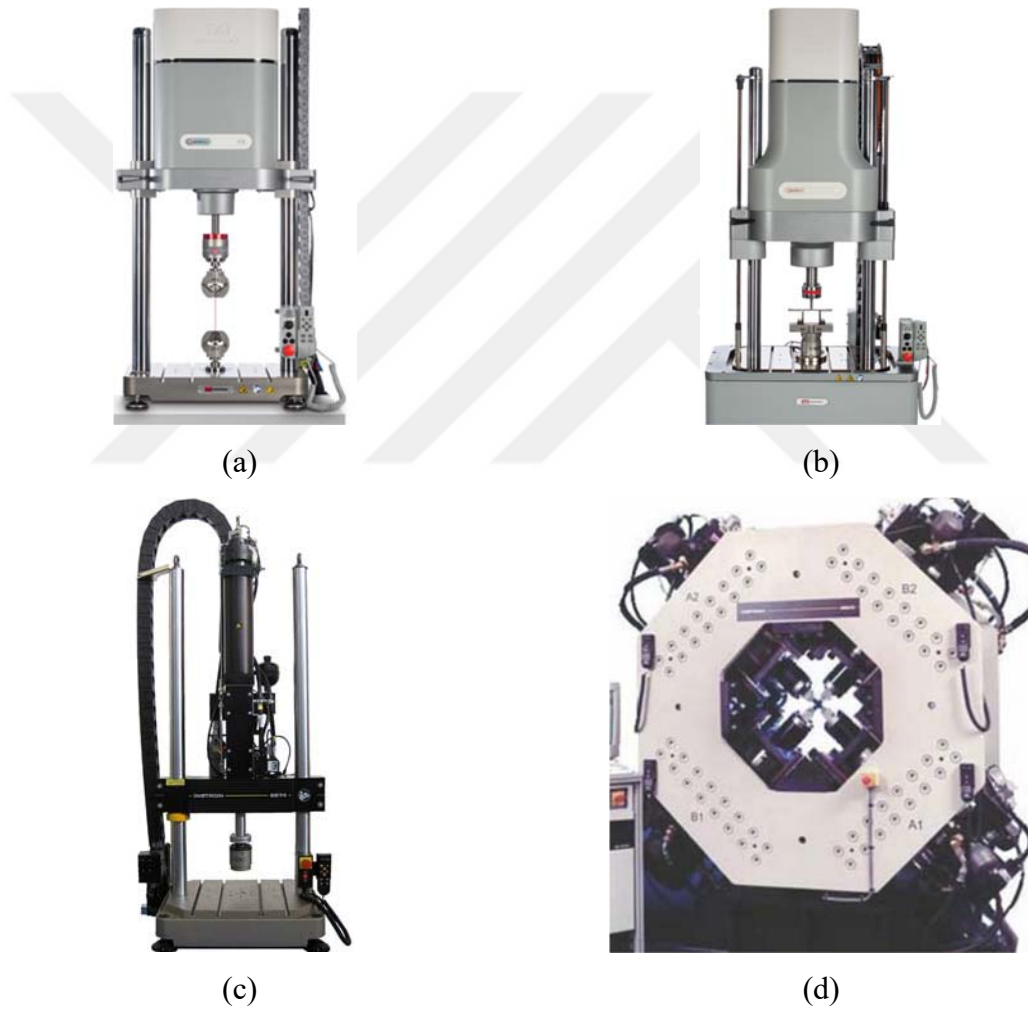
- Eksenel gerilmeli yorulma deneyi
- Burulma gerilmeli yorulma deneyi
- Eğme gerilmeli yorulma deneyi
- Bileşik gerilmeli yorulma deneyi

Yorulma deney türü malzemeye uygulanan değişken yüklemenin tipi ile isimlendirilir. Yorulma test cihazının test sırasında hangi yükleme tipi yaparsa yapsın, test numunesi çeki-çeki, bası-bası, çekme-bası ya da kayma yüklemelerin etkisi altındadır. Pratikte en çok kullanılan eksenel zorlama yapan deney cihazlarıdır (Resim 3.2(a)). Eğilme yorulması yapan test cihazlarında yük titreşimli olarak bir veya birkaç noktadan uygulanabilir (Resim 3.2 (b)). Burulma gerilmeli test cihazında test numunesi dönerken belli bir yük altında eğilmeye zorlanır (Resim 3.2 (c)). Numunenin dönüşü ile test numunesinin maruz kaldığı çekme basma gerilmeleri sürekli yer değiştirir. Çekme ve basma yükleri numuneye aynı genlikte etki ettiği için burulma gerilmeli test cihazlarında tam değişken yorulma durumunda testler gerçekleştirilir. Bileşik gerilmeli yükleme durumunda test numunesi farklı doğrultuda değişken yüklere maruz kalmaktadır (Resim 3.2 (d)).

Yorulma testine başlarken test numunesi çalışma esnasında ne tür gerilmelere uğrayacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazının seçilmesi gerekir. Diğer bir parametre ise çalışma esnasında numunenin maruz kalacağı değişken yüklemeye ait gerilme genliği ve frekans değeridir. Yorulma deneyi cihazları, çalışma prensiplerine göre de mekanik, elektromekanik, manyetik, hidrolik ve elektro-hidrolik cihazlar diye sınıflandırılabilirler. Yorulma deneyi cihazlarının tümünde en önemli özellik deney süresince istenen türde ve istenen mertebede gerilmenin sağlanabilmesidir. Deney süresince, uygulanan yükte meydana gelecek değişim, cihazın çalışma kapasitesinin % 2'sini aşmamalıdır. Cihazlarda uygulanan kuvvetleri gösterebilecek ve kontrolünü sağlayabilecek düzen bulunmalıdır.

Deney cihazlarında çevrim sayısını kaydeden sayaç bulunmalıdır. Sayaç, numune kırıldığı anda otomatik olarak durabilecek özelliğe sahip olmalıdır. Kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. Son yıllara kadar değişik araştırmacılar kullandıkları cihaza uygun farklı numune tipleri geliştirmişlerdir. Buna rağmen yine de numune boyutları için aşağıdaki genel kurallara dikkat edilmesi istenmektedir.

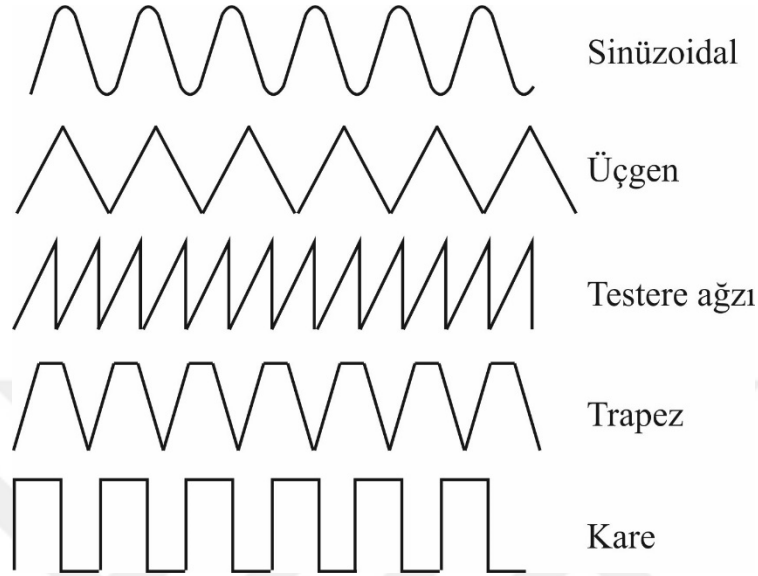
- Yorulma hasarının daraltılmış kesitte meydana gelecek şekilde deney numunesi tasarlanmalıdır.
- Numunenin daraltılmış kesiti öylesine seçilmelidir ki maksimum gerilmenin mutlak değeri deney cihazının çalışma kapasitesinin en çok %25 inde, minimum gerilmenin mutlak değeri ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2.5 inde oluşsun.
- Numune boyutları öylesine seçilmelidir ki numunenin doğal frekansı, cihazın frekansının en az iki katı olsun.



Resim 3.2 Yorulma test cihazları (a) aksenal, (b) eğilmeli, (c) burulmalı ve (d) bileşik gerilmeli

Yorulma testlerinden elde edilen yorulma verileri genellikle sinüzoidal yük çevrimlerine başvurarak elde edilir. Bunun sebebi ise yorulma makinalarının yük uygulaması sırasında

dönen kütleler kullanması veya sünizoidal yükleme ile sonuçlanan örnekler kullanmasıdır. Bu yükleme tipleri hala kullanılsa da farklı dalga tiplerinde yorulma yapabilen yorulma makinaları geliştirilmiştir (Şekil 3.6).



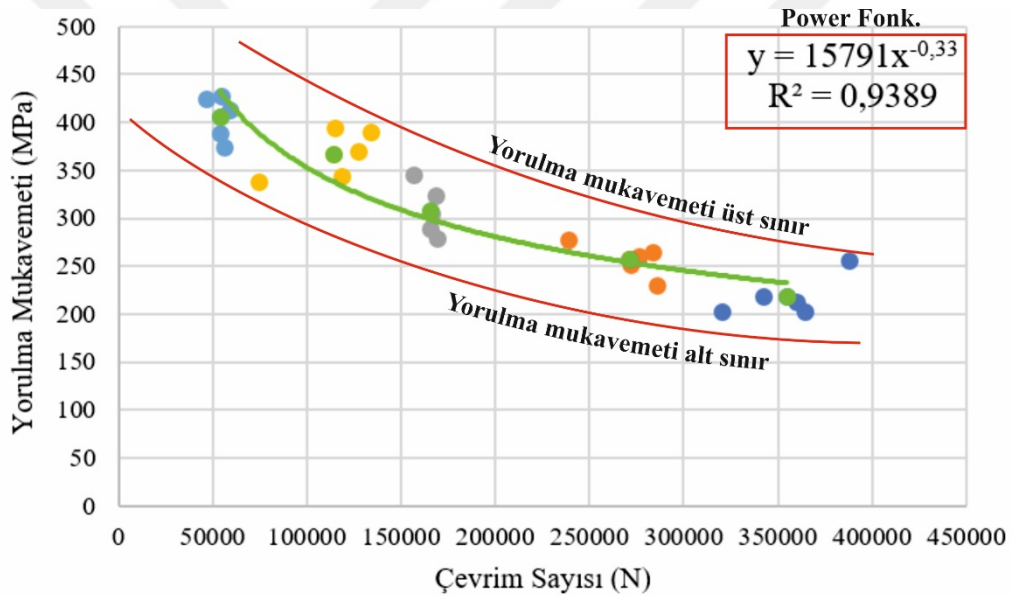
Şekil 3.6 Yorulma testlerinde uygulanan dalga tipleri

Kapalı döngü yorulma testlerinde sabit gerilmeli ya da sabit şekil değiştirme kontrollü yorulma testleri kolaylıkla yapılabilmektedir. Sabit gerilme kontrollü testlerde test numunesi belirlenen maksimum ve minimum yükler arasında yüklenir. Yük sabit olduğu için sabit bir gerilme çevrimi elde edilmiş olunur. Sabit şekil değiştirmeli yüklemelerde test numunesi sabit deformasyon altında zorlanır.

### 3.5. S-N Eğrileri (Wöhler Eğrileri)

Yorulma testine tabi tutulan bir numunenin yorulma davranışı malzemeye uygulanan gerilme seviyelerine karşılık gelen çevrim sayısı ile açıklanır. August Wöhler'in ilk defa bu ilişkiyi grafiksel olarak ifade etmesiyle bu eğriye S-N eğrisi ya da Wöhler eğrisi denilir. Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler ya da sabit şekil değişimleri altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağlantıyı verir. S-N eğrisinin çizilebilmesi için genellikle 8 ila 12 benzer numune kullanılır. Sabit gerilme kontrollü yorulma deneylerinde ortalama gerilme, sabit şekil değişim kontrollü yorulma deneylerinde ise gerilme genliği, tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Küçük

gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Şekil 3.7’de çalışma kapsamında elde edilen cam/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrileri örnek olarak verilmiştir. Grafikte ordinat eksenini yorulma gerilmesini ve absis eksenini bu gerilme altında dayanabildiği çevrim sayısını ifade etmektedir. Grafik üzerinde her bir farklı renk farklı gerilme seviyesini, renk sayısı ise bir gerilme seviyesinde yapılan tekrar sayısını ifade etmektedir. Aynı gerilme seviyesinde yapılan tekrar sayılarında numunelerin birbirine yakın da olsa farklı gerilme-ömür davranışları gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu dayanım-ömür değerleri belli aralıklarda değişmektedir. Bu aralık kırmızı çizgilerle yorulma mukavemeti üst sınırı ve yorulma mukavemeti alt sınırı çizgileri ile sınırlandırılmıştır. Yeşil ile gösterilen çizgi ortalama değerlere ait S-N eğrisidir.



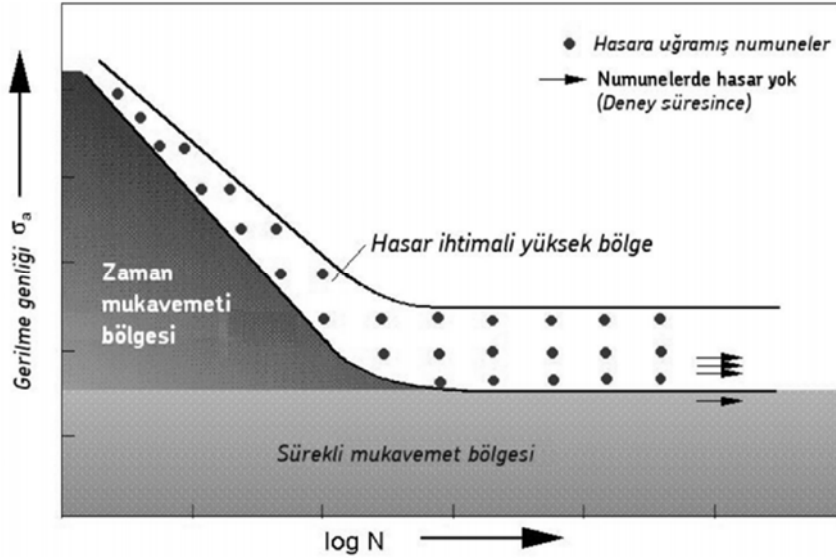
Şekil 3.7 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrisi

S-N eğrileri elde edilen verilen Denklem 3.7’te ifade edilen üstel bir fonksiyon olan Power Law fonksiyonu ile matematiksel olarak ifade edilir [24].

$$S_a = A(N_f)^{-B} \quad (\text{Denklem 3.7})$$

Burada;  $S_a$  yorulma mukavemeti (gerilme genliği, uygulanan maksimum gerilme),  $N_f$  çevrim sayısı (yorulma ömrü), A ve B denklem sabitleridir.

S-N eğrisi yorulma testleri sonucu elde edilen gözlemlere dayanılarak çizilir ve eğrinin formu malzemenin gevrek ve sünek oluşuna göre değişiklik gösterir. Şekil 3.8’de S-N eğrisi üzerindeki bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.8 S-N eğrisi üzerindeki bölgeler

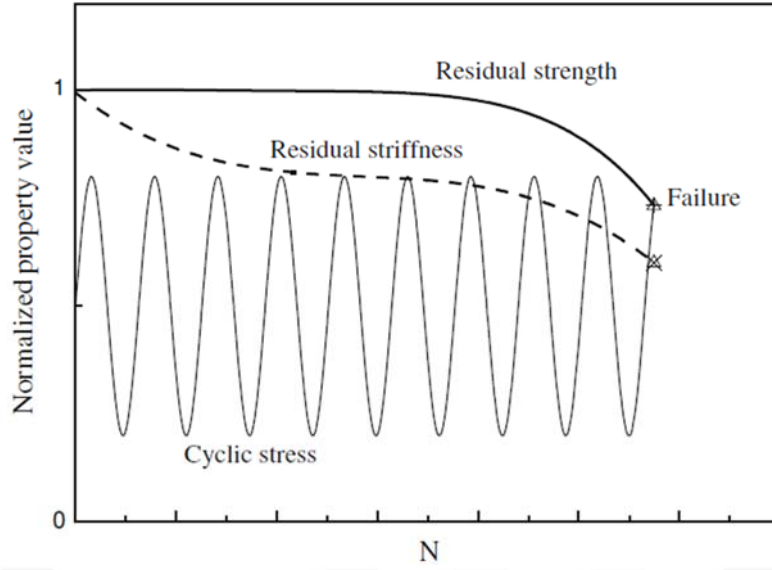
Zaman mukavemeti bölgesinde, malzeme çevrim sayısı arttıkça yorulma mukavemetini hızlı bir şekilde kaybetmektedir. Bu bölgede hasara uğrayan test numunelerinde yorulma hasarı kırılma veya çatlak oluşumu şeklinde meydana gelir. Teorik ömre eşit çevrim sayısında yüke maruz kalmasına rağmen hasara uğramayan numuneler sürekli mukavemet bölgesinde yer almaktadır. Buradaki yükleme değerleri yorulma mukavemet sınırını aşmamaktadır. Yani yorulma mukavemet değeri altında yüklemelere maruz kalan malzeme sonsuz ömürlüdür denilebilir. Böyle bir durumda S-N eğrisi zaman eksenine paralel bir davranış sergiler. İşte bu paralel olma durumu malzeme cinsine bağlıdır. Çelik için eğri  $10^6$ - $10^7$  tekrarda yatay olmaktadır ve yorulma sınırı çekme mukavemetinin yaklaşık %50'si kadardır. Demir olmayan malzemelerin yorulma sınırı olmayıp  $5 \cdot 10^7$  çevrim sayısındaki yorulma genliği olarak kabul edilir. Hafif madenlerde  $3 \cdot 10^7$  tekrara kadar dayanıklılık gösteren gerilme sınır değeri olarak kullanılabilir.

### 3.7. Kompozit Malzemelerin Yorulması

Fiber takviyeli kompozit malzemeler günümüzde uçak, rüzgar türbinleri, yat gibi pahalı ve üretimi süreci uzun zaman alan yapılarda kullanılmaktadırlar. Bu yapılarda kullanılan malzemeler çalışma esnasında değişken rüzgar yüklerinden dolayı yorulmaya zorlanmaktadırlar. Ayrıca fiber takviyeli kompozitler genellikle kırılğan olup yük altında doğrusal davranış gösterirler. Bu sebeple metallere farklı olarak yorulma esnasında önceden bir hasar belirtisi vermeksizin gevrek bir şekilde kırılarak hasara uğrayabilirler. Bunun için fiber takviyeli kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının bilinmesi önemlidir.

Statik mukavemetler hesaba katılarak yapılan malzeme tasarımı, yapının değişken yükler altındaki dayanım değerini göz ardı etmek demektir. Yorulma ömrünün bilinmesi ve bu verilerin üretim sürecine dahil edilmesi üretim süreçlerine de olumlu şekilde yansıtacaktır. Kompozit malzemelerin mekanik davranışı üretime bağlı çeşitli parametrelerden etkilenir. Üretilen malzemelerin homojenliği ve kalitesi yapısal bütünlüğü için gereklidir. Fiber katlanması, fiber kırılması ve matris boşluklar gibi üretim süreci boyunca kolayca oluşabilen içsel kusurlar potansiyel hasar başlatma noktalarını oluşturabilir ve matris kırılması, fiber kırılması, fiber-matris bağlanma sorunları, enine kat kırma, ara yüzey kırma gibi hasar mekanizmalarına hızla dönüşebilir. Bu hasar mekanizmaları bazen bağımsız olarak ve bazen etkileşimli olarak ortaya çıkar ve mikro burkulma, tabakalar çatlak büyümesi ve delaminasyon kaynaklı katastrofik hasarlara neden olurlar.

Değişken yüklemeler sırasında polimer matrisli bir kompozitte meydana gelen hasar mekanizmaları gözle görülebilir bir şekilde oluşmayabilir fakat bu durum kompozit yapının hasara uğradığı gerçeğini değiştirmez. Ayrıca yorulma hasarı tek bir noktadan değil, farklı büyüklükteki yorulmaya bağlı hasarların birikimi ile de meydana gelebilir. Fiber takviyeli kompozitlerde hasarın derecesi o hasara karşı koyan parametrelerin düşüşü ile gözlemlenebilir ki genelde malzemenin dayanımı ve rijitliği bu hasar mekanizmalarına karşı etkin rol oynarlar. Malzeme dayanımını kaybetmesine dayanan bu hasar teorisi, malzemedeki kalan dayanım değeri, uygulanan döngüsel gerilme değerine düştüğünde hasarın gerçekleştiğini varsayar. Şekil 3.13'te fiber takviyeli bir kompozitin sabit genlikte yorulması sırasındaki rijitlik ve dayanım kaybı ifade edilmiştir [69].



Şekil 3.9 Sabit genlikte yorulma yüklemesi altında kompozit malzemenin dayanım ve rijitliğinin azalması [69]

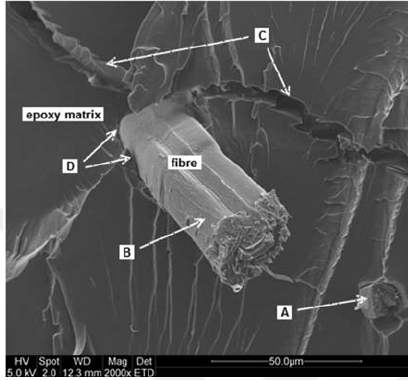
Rijitlik ve dayanım kaybına dayanan yorulma teorisinin bazı zayıf yönleri vardır;

- Yorulma yüklemesine tabi tutulan bir test numunesinin kalan yorulma ömrü tahribatsız test yöntemleri ile tayin edilemez. Çünkü teori malzemenin hasarsız olduğunu kabul eder. Oysaki tekrarlı yüklemeler yapı içerisinde üretimden kaynaklı hataları tetikleyerek, bu hataları ilerletmeye zorlar.
- Polimer matrisli kompozitlerde rijitlik kaybı ile hasar birikimi doğru orantılı olmayabilir. Dayanım değeri hızla azaldığında hasar birikimi çok yavaş gelişebilir ve belli bir hasar doygunluğuna ulaştığında yorulma hasarı ani olarak meydana gelebilir. Chou ve Croman [70] yaptıkları çalışmada kompozitlerdeki yorgunluğu tanımlamak için “ani ölüm fenomeni” terimini kullanmışlardır.
- Kalıntı gerilmeleri içeren kapsamlı bir veri tabanı oluşturmak için her bir tabaka ve malzeme sistemi deneysel olarak karakterize edilmelidir.

Polimer matrisli kompozitlerde fiber-matris ara yüzeyinde bulunan mikro boşluklar potansiyel hasar başlangıç noktalarıdır. Değişken yüklemeler neticesinde yorulma hasarları bu boşluklardan başlayarak ilerler. Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerde yorulma hasarı 3 aşamada gerçekleşir. Bunlar; matris çatlağı, fiber-matris ayrılması ve fiber kırılmasıdır. Fiber kırılması fiberin cinsine ve mukavemetine bağlıdır. Eğer fiber çok güçlü



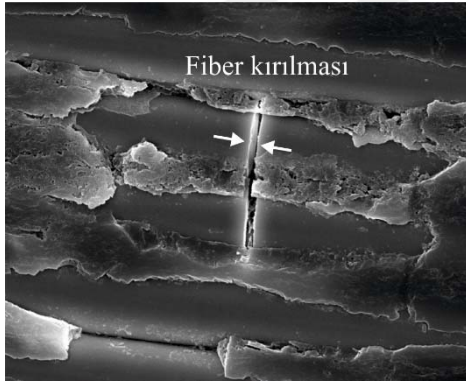
ise, kuvvet artışına oranla gerçekleşen şekil değişiminin bir kısmı matrise transfer olur. Matris gevrek bir yapıda olduğundan, sünek bir fibere göre şekil değiştirme yeteneği fazla yoktur ve gerilme değerlerinde matris çatlakları gerçekleşir (Resim 3(a)). Çatlayan matrisin fiberle bağlantısı zayıflar ve zayıf fiber-matris ara yüzeyinde ayrılma ile sonuçlanan hasarlar gerçekleşir (Resim 3 (b)). Fiber matris ayrılması sonucu yük fiberler üzerinde yoğunlaşır ve artan gerilme ile fiberlerde kırılma meydana gelir (Resim 3 (c)).



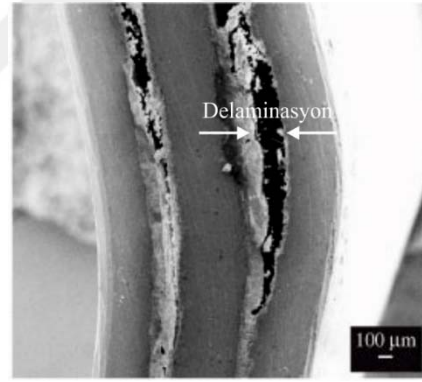
(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 3.3 Fiber takviyeli kompozitlerde yorulma sonucu gelişen hasar tipleri [71–74]

Eğer kompozit malzeme tabakalı bir yapıysa fiber matris ara yüzeyinde gelişen hasar tabakalar arası ayrılmaya neden olabilir. Tabaka arasında gelişen bu hasar tipine delaminasyon denilmektedir (Resim 3 (d)). Delaminasyon veya sınır çatlakları bir kompozit malzemenin farklı tabakaları arasında büyüyen bir çatlak olarak ifade edilir. İki farklı türde delaminasyon vardır. Interlayer delaminasyon kompozit tabakalar arasında kırılma olmaksızın iki tabaka ara yüzeyinde büyüyen bir çatlaktır. Intralayer delaminasyon ise ara yüzeylerde ilerlerken nadiren de olsa komsu ara yüzeylere atlayan bir çatlak türüdür.

Kompozitlerin yorulması ile oluşan hasar türlerinin birçoğu yorulma çatlaklarının ilerlemesi ile meydana gelir. Fiber ve matris kırılmasını içeren bir kompozitteki yorulma çatlağının ilerlemesine kayma çatlakları da yardımcı olur. Kayma çatlakları fiber ve matris arasındaki şekil değişimi farkından dolayı yorulma çatlağı doğrultusunda fakat ondan daha ileride bir yerde meydana gelebilirler. Böyle bir durumda kayma çatlakları yorulma enerjisini absorbe ederek yorulma dayanımına katkıda da bulunabilirler.

Tabakalı kompozitlerde hasar gelişimini etkileyen bir diğer parametre ise her bir tabakadaki fiber yönelme açısıdır. Çatlak yayılması genellikle fiberlere paralel yönde ilerler. Bir üst tabakadaki farklı fiber yönü bu çatlağın ilerlemesini engelleyebilir. Farklı yönlerde takviyelendirilmiş kompozitlerin yorulma dayanımları tek yön takviyeli kompozitlere göre daha yüksektir [59].

## 4. BÖLÜM YORULMA TEST MAKİNASININ TASARIM VE İMALATI

### 4.1. Giriş

Makine tasarım ve imalatı sırasında tasarımcılar için önemli aşamalardan birisi malzeme seçimi ve boyutlandırma aşamasıdır. Bu aşama makinenin ergonomik yapısını ve kullanılan malzeme miktarı, işçilik vb. gibi üretim maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Tasarımcıların boyutlandırma sırasında malzemenin statik değerlerine bağlı kalması her zaman doğru değildir. Tekrarlı yüklemeler altında çalışan malzemeler statik dayanımlarının altındaki gerilme değerlerinde hasara uğrayabilmektedirler. Literatürde bu şekilde hasara uğrama olayı “yorulma” veya “yorulma hasarı” olarak adlandırılmaktadır. Dinamik yükler altında çalışan makine elemanlarının tasarımı ve boyutlandırılması için yorulma davranışlarının ve dayanımlarının doğru olarak bilinmesi gerekmektedir. Statik deneylerin aksine, yorulma deneyleri yükleme tipine göre farklılık gösteren ve uzun süre alan deneylerdir. Bu bağlamda uzun süre çalışabilecek konstrüksiyona sahip, farklı parametreler altında yorulma deneyi yapabilen ve bu parametrelere ait her bir veriyi kayıpsız alabilen bir test cihazı tasarlamak önemlidir.

Gelişen üretim teknolojileri ve azalan doğal kaynaklar üreticileri geleneksel imalat malzemelerine alternatif olabilecek yeni arayışlara sevk etmiştir. Günümüzde üretici ve son kullanıcıların yapı malzemelerinden beklentileri düşük ağırlık ve buna karşın yüksek mukavemet özelliğidir. Özellikle havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde ağırlık kazanan bu istek kompozit yapı malzemelerinin doğuşunu tetiklemiştir. Kompozit gibi heterojen malzemeler anizotropik yapıda olduğu için geleneksel yorulma cihazları ve yöntemleri ile yorulma davranış parametrelerini karakterize etmek zordur [26,78]. Önemli parametrelerin ayarı ve kontrolü bu cihazlar ile kolay değildir. Bu durum yüksek hata oranına sahip sonuçlar elde etmeye sebep olur. Buna ek olarak, servo-hidrolik yorulma test makinelerinin bakım ve servis maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca, bu test makinelerinde test sürecinde sürekli operatörün dikkati gerekir. Bu dezavantajlar altında, kompozit malzemenin önemli test parametrelerinin tanımlanması ve lineer-olmayan hasar mekanizmasının etkisi altındaki yorulma hasar sürecinin değerlendirilmesi zordur. Bu tür cihazların bir diğer kısıtlılığı, farklı frekans ve stres oranları gibi bütün önemli test parametrelerini karşılayacak kapasiteye sahip olmamalarıdır [78–81]. Ayrıca, bu cihazların

birçoğunda aynı anda tek bir numunenin test edilebilmesi, hem test süresini hem de test maliyetini çok fazla arttırmaktadır. Bazı çalışmalarda ise test süresini azaltmak için yüksek frekans üreten vibrasyon cihazları geliştirilmiştir [78,82–86]. Yorulma testlerinde malzemenin yorulma ömrünü belirleyen en önemli iki parametre genlik ve frekanstır. Yüksek frekans altında yapılan yorulma testi sonuçları ile düşük frekansta çalışacak bir malzemenin seçimini yapmak ve o malzemenin yorulma ömrünü yorumlamak doğru değildir. Örneğin, yüksek frekans yorulma cihazları ile rüzgâr türbininde ya da gemi pervanelerinde yapı malzemesi olarak kullanılacak ve düşük frekanslarda çalışacak kompozit malzemeyi test etmek, sonuçlara göre fiber malzemesi seçimi ya da boyutlandırma yapmak uygun değildir. Yüksek frekans test cihazları sonuçları, düşük frekans test cihazlarının sonuçları olarak kabul edilemez [87]. Yani cihazın test frekansı ile gerçek yükleme şartları altında çalışan malzemenin rezonans frekansı aynı olmalıdır [78]. Ayrıca yüksek frekans test cihazlarının yalnızca belirli bir boyut ve şekle sahip numuneleri bağlayabilme gibi bazı dezavantajları vardır. Dolayısıyla yüksek frekanstaki vibrasyon bazlı cihazlar ile yapılan çalışmalar [82,83,85,86,88,89] yukarıda açıklanan sınırlamalardan dolayı gerçekte düşük frekans altında çalışan fiber takviyeli polimer kompozitlerin yorulma araştırması için uygun değildir. Bunun yanında, kompozitler için standart test frekansı aralığı 1-10 Hz gibi düşük frekanstır. Çünkü yüksek frekanslarda, kompozitin izotermal davranışları ve histeretik ısınmadan dolayı test sırasında sıcaklık artışları meydana gelecektir [78,90,91].

Bu tez çalışmasında, literatürde karşılaşılan yorulma test makinelerindeki sınırlamalar ve dezavantajların dayattığı zorluklar, toplam test süresi, mekanik verimlilik, düşük üretim maliyeti gibi özellikler göz önüne alındığında fiber takviyeli kompozit plakaların yorulma davranışlarının incelenmesi için çok numuneli yeni bir yorulma test makinesi geliştirmekle bilimsel alandaki bazı handikapların giderilmesi hedeflenmiştir. Yorulma gibi dinamik testlerde, statik testlerde olduğu gibi belirgin bir hasar şekli (kırılma, ayrılma, büyük şekil değişimleri vb.) ortaya çıkmayabilir. Bu duruma sıklıkla polimer matrisli kompozit malzemelerde karşılaşılmaktadır. Böyle bir durumda polimer matrisli kompozit malzemelerin yorulma mukavemeti-yorulma ömrünü gösteren S-N eğrisini (Wöhler eğrisi) elde etmek için fazla sayıda deney yapma zorunluluğunu meydana getirmektedir. Ayrıca elde edilen birbirinden farklı sonuçları doğru anlayabilmemiz için sonuçların istatistiki olarak yorumlanması gerekmektedir. İstatistiki analizde kullanılması gereken veri adedi de deney sayısını arttırmaktadır. Çalışma kapsamında tasarım ve imalatı gerçekleştirilen deplasman

kontrollü eğilmeli yorulma cihazı aynı anda 10 adet numuneyi test edebilecek kapasiteye sahiptir. Yükleme frekansı ve gerilme genliği oranı gibi parametrelerin ayarlanabileceği şekilde bir kontrol ve yazılım sistemi ile donatılmıştır. Buna ek olarak, yük çevrimi ve mukavemet (rijitlik kaybı) değişimlerinin izlenmesi ve ölçülmesi için bir ölçüm sistemi geliştirilmiş ve kalibre edilmiştir. Sonuçta, yorulma test makinesinin performans ve kalibrasyonu cam fiber takviyeli kompozit levhalar üzerinde yapılan yorulma testleriyle değerlendirilmiştir.

Özellikle hafif levha tipi malzemeler için çok az sayıda “çok numuneli” yorulma tasarımı yapılmış test makinesi vardır [83,90,92–95]. Bu nedenle, bu çalışma literatürde yapılan diğer çalışmalardan farklı olarak orijinaldir. Bu çalışma, günümüzde özellikle deniz ve hava araçlarında çok sık kullanılan hafif levha tipi malzemelerin yorulma ömürlerini karakterize eden S-N eğrilerini elde etmek için kullanılan bilgisayar kontrollü, on numuneli, ankastre-tip eğilmeli yorulma test makinesi ile ilgilidir. Tez çalışması kapsamında tasarım ve imalatı yapılan yorulma test makinesi sehim-kontrollüdür. Yazılım ara yüzü üzerinden yapılacak basit veri girişleri ile farklı test frekansları ve farklı sehim oranları (R) altında testler yapılabilir. Genel olarak test edilebilecek malzemeler; ahşap levhalar, plastik esaslı levhalar, cam, karbon, aramid gibi fiber takviyeli kompozit levhalar ile alüminyum gibi hafif metalik levhalardır.

#### **4.2. Yorulma Test Makinesinin Avantajları**

Yorulma test makinelerinin hemen hemen tamamında aynı anda "tek numune" test edilir. Hâlbuki malzemenin yorulma dayanım sınırını karakterize eden S-N eğrilerini elde edebilmek için, her bir sehim veya gerilme değerine karşılık en az 5 adet numune test etmek gerekir. Genel olarak; S-N eğrisini doğru olarak oluşturabilmek için malzemelerin maksimum dayanımından yaklaşık %20 oranında sürekli azaltılarak 7-8 farklı nokta için testler tekrarlanır. Bu durumda, tek bir malzeme parametresi için elde edilecek S-N eğrisi için ortalama 35-40 adet numunenin yorulma testine tabi tutulması anlamına gelir. Klasik yorulma test makinelerine örnek olarak; 2 farklı malzeme parametresi için, 10 Hz test frekansı altında, her bir gerilme noktası için 5 adet numune, her bir parametre için 40'ar adet numune olmak üzere toplam 80 adet numune kullanmak gerekir. Bu durumda, 10 milyon yük tekrar sayısına kadar devam etmesini planladığımız "yüksek çevrimli yorulma" testi için numune bağlama ve diğer yan süreler hariç toplam test süresi yaklaşık 146 gündür. Bu çalışmadaki on numuneli test makinesinde ise toplam test süresi on kat azalmaktadır. Özellikle kompozitlerin yorulma

testlerinde 10 Hz'lik frekansın üzerine çıkılmaması önerildiğinden ve bu testler çok uzun süren, pahalı ve zahmetli testler olduğundan toplam test süresi çok önemlidir.

Klasik eğilmeli yorulma test makinelerinin hemen hemen tamamında sehim değeri, krank-biyel mekanizması ile elde edilir. Maksimum ve minimum sehim değeri genelde mekanik konstrüksiyon üzerinden manuel olarak ayarlanmaktadır. Dinamik çalışma anında bu mekanizmalar ile "sabit bir sehim değeri" elde etmek hem zordur hem de hassasiyet konusu tartışmalıdır. Krank-biyel mekanizması kullanılan eğilmeli yorulma testlerinde, farklı sehim veya gerilme oranı (R) altında test yapmak zordur. Çünkü test frekansı arttıkça her farklı gerilme oranı (R) eldesi için, krank yarıçapı, biyel kolu uzunluğu veya numune bağlama mesafesinin değiştirilmesi gerekir. Ayrıca bu tip test cihazlarında yapılan yorulma testlerinde yüksek frekanstan dolayı merkezkaç kuvvetinin de etkisi devreye girmektedir. Geliştirdiğimiz test makinesinde "sehim değeri"; yazılım ile kontrol edilen servo-motorun sağa/sola döndürülmesi vasıtasıyla ileri/geri hareket eden lineer vidalı hareket tablası sayesinde 5 µm hassasiyetle sağlanmaktadır. Ayrıca klasik test makinelerine kıyasla, test süresince bu gerilme oranı değişmeden aynı hassasiyetle tekrarlanabilir.

Klasik yorulma test makinelerinde, test için "başlangıç sıfır pozisyonunu" tanımlamak ve ayarlamak, bir diğer önemli zorluktur. Ankastre tip yorulma cihazlarında sıfır pozisyonu tam belirlenemezse, eksen kaçıklığından dolayı oluşacak moment numunede ön gerilmeye sebep olur. Bu durumda malzemenin gerçek S-N eğrisi belirlenemez. Çalışma kapsamında geliştirilen yorulma test makinesinde hafızaya kayıtlı olan "başlangıç sıfır pozisyonu" tanımlaması yazılım ara yüzündeki tek bir buton ile sağlanmaktadır. Yani test tamamlandığında cihaz dur butonu ile başlangıç sıfır pozisyonuna gider ve devamındaki teste aynı konumdan başlar.

Klasik yorulma test makinelerinde ani bir problemten dolayı makine durdurulduğunda, tekrar çalıştırma anına kadar geçmişte elde edilen eğme kuvveti ve rijitlik kaybı, yük tekrar sayısı gibi çok kıymetli verilerin ne olduğu konusu tartışmalıdır. Bu çalışmadaki yorulma test makinesi için geliştirdiğimiz yazılım ara yüzü üzerindeki "teste devam" butonu sayesinde önceki verilerin üzerine ilave edilerek "veri kaybı olmaksızın" teste devam edilebilir. Yukarıda bahsedilen ve tekniğin en çok bilinen klasik eğilmeli yorulma test makinelerine örnek olarak literatürdeki çalışmalar verilebilir [30,96–102]. Çok numuneli eğilmeli yorulma

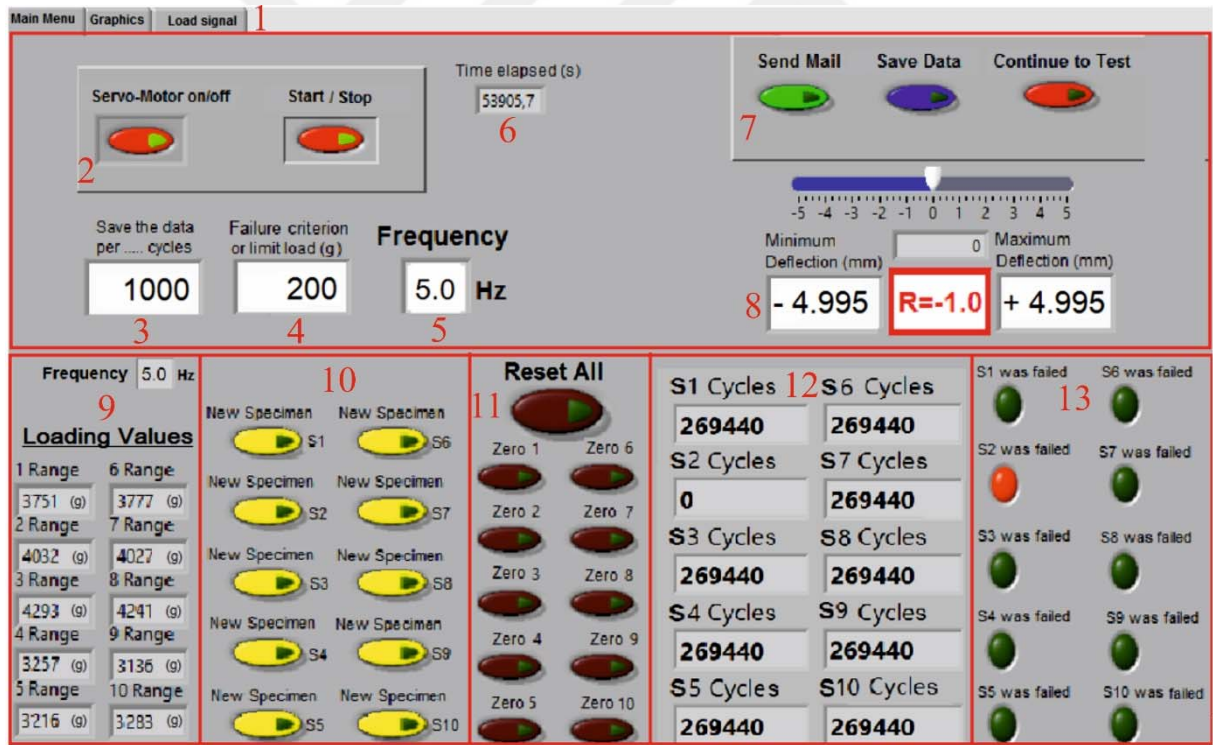
test makineleri için literatürdeki, çekme-çekme [83,90,93,94,103], basma-basma [104,105] ve kayma tipi [102, 103] yorulma makineleri örnek verilebilir.

### 4.3. Malzeme ve Metot

#### 4.3.1. Kontrol Yazılımı ve Ara Yüzü

Bu çalışmanın konusu olan “Bilgisayar kontrollü on numuneli ankastre-tip eğilmeli yorulma test makinesi” tamamen bilgisayar kontrollü olarak çalışmaktadır. Araştırmacı, numunelerini makineye uygun bir şekilde bağladıktan sonra PC’deki kontrol yazılımını çalıştırması yeterlidir. Şekil 4.1’de gösterilen ve çalışma kapsamında geliştirilen yazılım ara yüzü Main Menu, Graphics ve Load signal (1) olmak üzere 3 ana sekmede derlemiştir. Main Menü sekmesinde test parametrelerine ait veriler gösterilmektedir. Graphics sekmesinde test frekansına ait bilgiler grafiksel olarak ifade edilmiştir (Şekil 4.5). Kontrol edilebilir servo motor ile yorulma testi sırasında farklı frekans eğrileri (Üçgen kesitli, kare kesitli, sinüzoidal vb.) elde etmek mümkündür. Load signal sekmesinde ise her bir yük hücresinden alınan gram cinsindeki yük değerleri her bir test numunesi için ayrı ayrı okunabilmektedir. Ara yüzün Main Menü sekmesi üzerinden “servo-motor on/off” (2) tıklandığında, test için başlangıç “sıfır pozisyon” tanımlanır. Sıfır pozisyon, numune üzerine minimum gerilme yüklendiği yerdeki durumdur. Start/Stop butonu testi başlatır ve durdurur. Deney “Start/stop” tuşuyla, servo-motor sağ/sol dönüş hareketine başlar ve kaplin vasıtasıyla lineer vidalı hareket tablasına ileri/geri hareketini verir. (3) numaralı alan test verilerinin hangi çevrim sıklığında kaydedileceğini gösterir. İstenilen çevrim sayısına ulaşıldığında yazılım, çevrim sayı değerini ve o çevrime ait yük hücresindeki yük miktarını gram cinsinden excel formatında kaydeder. Bu işlem araştırmacı tarafından girilen her bir sıklık değeri için tekrarlanır. (4) numara hasar kriterini ifade etmektedir. Yorulma davranışı incelenen malzemenin gram cinsinden eğilme mukavemeti hangi değere geldiğinde testin sonlanmasını isteniyorsa, cihaz o mukavemet değerini elde edene kadar yorulma testine devam eder. Bu yorulma hasar kriteri bilgisi de programa araştırmacı tarafından girilir. (5) numara yorulma testinin hangi frekansta yapılacağını gösterir. Yazılım bu bilgiyi servo motorun hareket parametreleri üzerinden okur. Çalışma kapsamında 1.5 kW’lık DELTA marka servo motor kullanılmıştır. Servo motorun çalışma parametreleri (ileri geri hareket miktarı ve frekans) için firmanın sağlamış olduğu kontrol ara yüzü kullanılmış olup, çalışma kapsamında geliştirilen yazılım, servo motorun yazılımı ile senkronize çalışmaktadır.

(6) numara test için geçen süre saniye cinsinden ifade edilmektedir. (7) numara test parametrelerinin saklama ve kaydetme bilgilerini göstermektedir. Send Mail butonu herhangi bir numune için yorulma olayı gerçekleştiğinde daha önceden kullanıcı tarafından tanımlanan mail adresine ilgili numunenin hasara uğradığı bilgisini ve numuneye ait kaydedilen yorulma test sonuçlarını gönderir. Save Data tanımlanan veri sıklık değerine ulaşıldığında test verilerinin her bir numune için ayrı ayrı kaydedildiğini gösterir. Yorulma testleri uzun süren deneyler olduğu için bu süre zarfında yorulma cihazından ya da elektrik kesintisinden kaynaklanan sıkıntılardan dolayı test durabilir. Continue to Test butonu ile yarıda kalan teste devam edilebilir. Yani yazılım teste yeniden başladığında bunu yeni bir deney gibi görmez ve elde ettiği verileri daha önce kaydedilen verilerin üzerine yazmaya devam eder. (8) numara deney için servo motora tanımlanan ilerleme değerinin doğru olup olmadığı yorulma test cihazı LVDT orantılı analog çıkışlı bir lineer pozisyon sensörü tarafından okunur. Böylece test parametresinin ve servo motorun çalışması doğrulanmış olur.



Şekil 4.1 Yorulması test makinesi için yazılım-ara yüzü

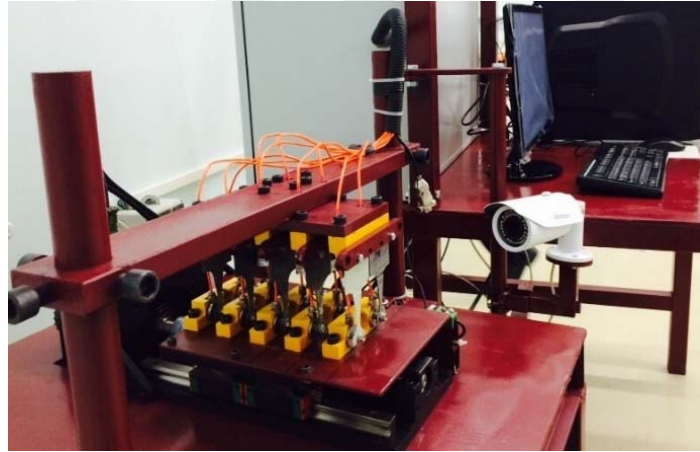
(9) numarada 10 adet test numunesinin her birinin yük hücresi tarafından okunan yük miktarı gram cinsinden verilmektedir. (10) numaradan araştırmacı tarafından istenildiği takdirde istenilen numunenin veri alma akışı kesilebilir. (11) numaradan yük hücrelerinin üzerindeki



kalıcı yükler, yazılım ara yüzü üzerindeki “reset all” tuşu ile tüm numuneler için aynı anda sıfırlanır. İstenildiğinde araştırmacı bu işlemi tek tek ve istenilen numuneler için yapabilir. (12) numaradan her bir numuneye ait çevrim sayıları görülebilir. Eğer herhangi bir numunede hasar meydana gelmişse o numune için veri akışı kesilir ve çevrim sayısı ilerlemez. (13) numarada veri akışı devam eden numuneler yeşil renk ile veri akışı duran numuneler kırmızı renk ile ifade edilmektedir.

#### 4.3.2. Yorulma Test Makinesi Konstrüksiyonu ve Çalışma Prensibi

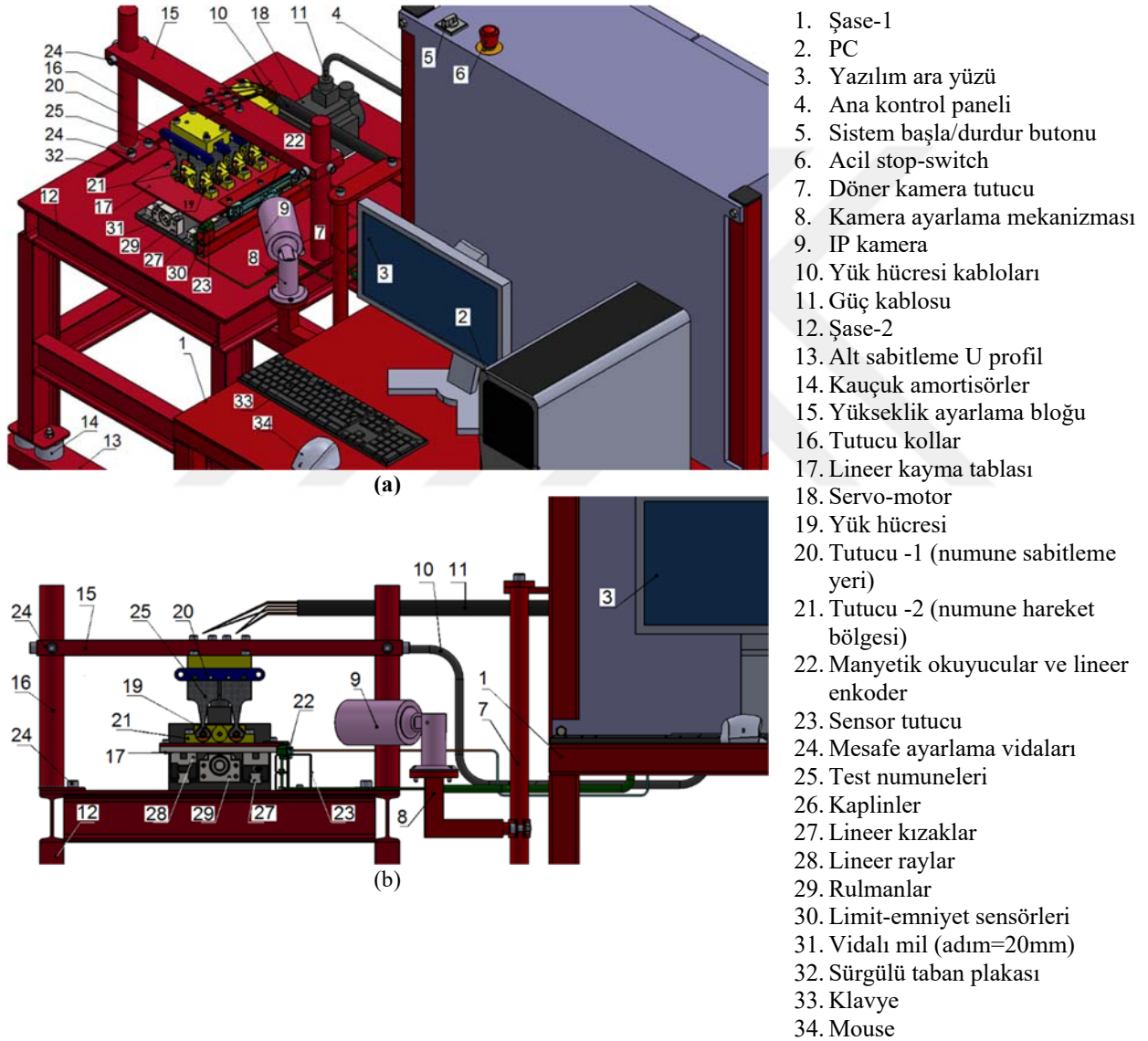
On numuneli ankastre-tip eğilmeli yorulma test makinesi Resim 4.1’de gösterilmiştir. Çalışma prensibinin daha iyi açıklanması için Şekil 4.2 üzerindeki parçalar numaralandırılmış olup, numaraların tanımları verilmiştir. Lineer vidalı hareket tablasının (17) ileri/geri hareketi esnasında yük hücreleri (19) üzerindeki minimum veya maksimum kuvvet değerleri "gram" olarak yazılım ara yüzünden (3) görülebilir. Aynı zamanda, test anındaki “sehim değeri”, (22) nolu sehim kontrol sensörü yardımıyla sürekli olarak yazılım ara yüzünden gösterilmektedir. Böylece, sensör tutucuya (23) monteli olan manyetik okuyucu-lineer enkoder (22) sayesinde sehim değerini hassas izleme ve geri besleme sağlanabilmektedir.



Resim 4.1 Bilgisayar kontrollü çok numuneli ankastre tip eğilmeli yorulma test cihazı

Uzun süren testlerde kullanıcı, yorulma test makinesini çalıştırıp gidebilir. IP kamera (9) ve verilen statik IP ile internet bağlantısının olduğu her yerden, yorulma test makinesini izleyebilir, müdahale edebilir, hatta durdurabilir. Test esnasında bütün numuneleri iyi görebilmek için IP kamera istenilen açıda ayarlanabilir. Acil stop düğmesine (5) basıldığında yorulma makinesi anında durmaktadır. Benzer şekilde, yanlış bir ayar ile lineer vidalı hareket

tablası hareket sınırları dışına çıkmaya çalışırsa limit emniyet sensörleri (30) devreye girerek servo-motorun (18) hareketini durdurur. Ana pano içinde elektrik/elektronik sistem devre elemanları, PC kasası (2) içinde verilerin kayıpsız ve hızlı bir şekilde kaydedilmesini sağlayan katı hal diski (SSD) ve yük hücrelerinden alınan elektrik sinyallerinin sayısal verilere çeviren DAQ kart mevcuttur. Yorulma test makinesi üzerindeki titreşimleri azaltmak için ise, test makinesi şasesi (12) ile alt bağlama U-profili (13) arasında dört adet lastik takoz (14) kullanılmıştır. Yorulma test makinesi elemanlarının özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Yorulma test cihazı (a) izometrik (b) ön görünüş

Viskoelastik malzemelerin yorulma incelenmesi iki modda yapılır; özellikle yorulma mekanizmasının değerlendirilmesi prosedüründe, test metoduna göre ya sehim-kontrollü veya

gerilme-kontrollü olarak iki farklı modda testler yapılır [78,108]. Bu çalışmadaki yorulma makinasının ana özelliği, sabit sehim-kontrollü test yapabilme kabiliyetidir.

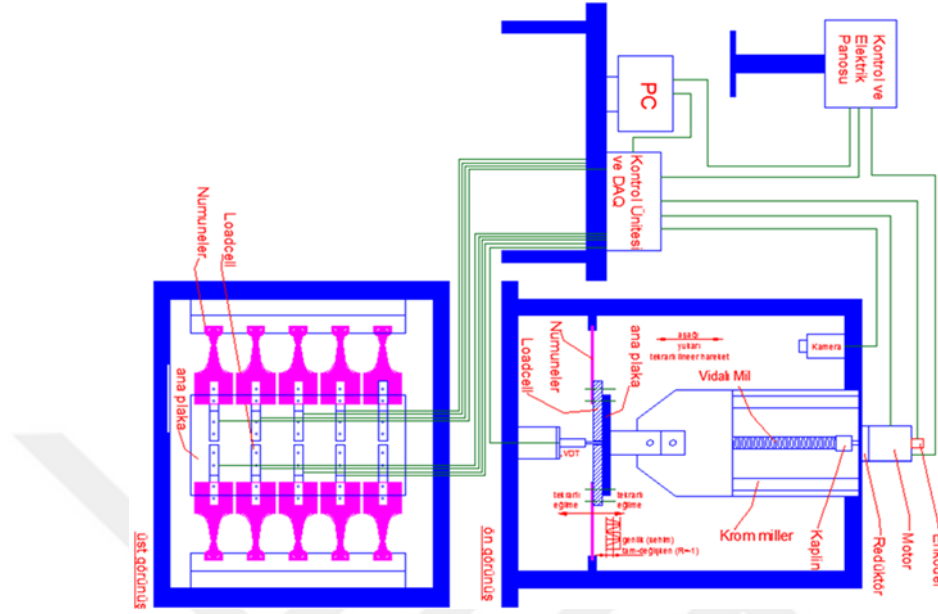
Çizelge 4.1 Yorulma test cihazı tanımlayıcı özellikleri

Servo-motor ve servo sürücü özellikleri		Doğrusal kodlayıcı ve manyetik okuyucu sensörü özellikleri	
Firma Motor model Nominal güç Nominal hız Nominal tork Nominal akım Sürücü modeli Mode	DELTA ELECTRONICS ECMA – E11315RS 1.5 kW 2000 rpm 7.16 N.m 8 A ASD-A2-1521 M Pozisyon ve hız kontrollü	Firma Okuyucu algılayıcı modeli Doğrusal kodlayıcı modeli Hassasiyet Çıkış sinyal tipi Şerit ve sensör arasındaki boşluk Hareket hızı	ATEK MLS130  PS2 Magnetic tape, 240 mm  5 µm push-pull or TTL RS422 line driver 0.1 mm to 2 mm 3 m/s
Doğrusal kaydırıcı / Z eksen vida modülü özellikleri		Yükseltici özellikleri	
Kayan masa Vidalı çubuk çapı Vida çubuk sıklığı Hareket uzunluğu	200x280 mm 20 mm 20 mm 160 mm	Firma Model Güç kaynağı Duyarlılık	SMOWO RW-ST01A DC24V 1.5 ~ 2.1 mV/V
Veri toplama sistemi özellikleri		IP kamera özellikleri	
Veri toplama kartı Analog giriş Örnekleme zamanı Analog çıkış Dijital I/O Sayaçlar Yazılım	NI 6321 PCI express 16 Single Ended 250 kS/s 2 Channels 24 Bidirectional Channels 4 LabVIEW	Firma Model Sensör Lens Çözünürlük Hareket algılama / maskeleme	OPAX CA-706 1/2.8" SONY 2.4MP high-resolution cmos 3 MP 1080P Yes / 3 rectangular area
Yük Hücresi Anma Değerleri			
Firma Model Maksimum kuvvet Yük yönü Nominal çıktı	FORSENTEK In-line type 500 N Tension/compression 2.0 ± 10% mV/V		

#### 4.3.3. Gereksinimler

Bilgisayar kontrollü ve çok numuneli eğilmeli yorulma test makinesini tasarlamak için bazı temel ve önemli ihtiyaçlara karar verildi. Şekil 4.3'te krokisi verilen yorulma makinesi tasarımı ve çalışma prensibi kurgulandı. Daha sonra ihtiyaç duyulan gereksinimlere karar

verildi. Tasarım sürecinin en zorlu aşaması ihtiyaç duyulan gereksinimlerin birbirleri ile uyumudur.



Şekil 4.3 Kompozitler için 10 numuneli eğme yorulması dinamik test cihazı şematik resmi

Tasarım ve imlatatı tez çalışması kapsamında yapılan bilgisayar kontrollü 10 numuneli eğilmeli yorulma cihazının yetenekleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

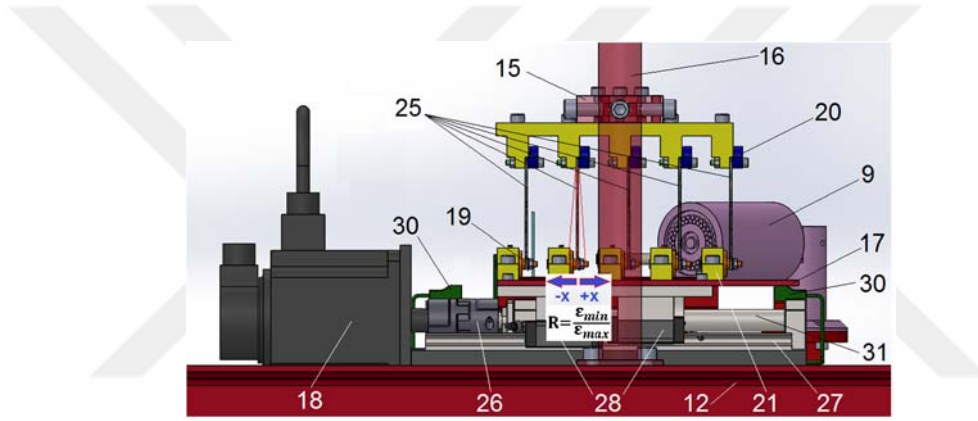
- 1) Sehım (deplasman) kontrollü yorulma testi uygulama becerisine sahiptir.
- 2) Aynı anda 5 veya 10 adet numuneyi yorulma testine tabi tutma özelliği; Böylece klasik test makinelerine göre onda bir zaman tasarrufu sağlanır.
- 3) Servo-motorun yazılımı üzerinden; klasik test makinelerinden farklı olarak istenen sehım değerleri 5  $\mu$ m hassasiyetinde uygulanabilir ve test süresince sabit kalır.
- 4) Herhangi bir pozitif veya negatif R oranında test yapılabilme yeteneği; Sehım değerleri, lineer enkoder ve manyetik okuyucu sensör ile hassas olarak gözlenebilir ve geri besleme sağlanabilir.
- 5) ASTM D671 standardına uygun Tip-A ve Tip-B numune ve farklı ölçülerde dikdörtgen boyutlarda düz numune bağlayabilme özelliğine sahiptir. Bu düz numunelerin boyut sınırları ise iki grup olarak belirlenebilir;

- a) 8.9 – 25.4 mm arasında en, 50.8 – 190.5 mm arasında boya sahip 10 adet numune sağ ve sol bloktaki numune yerlerine
  - b) maksimum 50.8 mm en ve maksimum 190.5 mm boya sahip olan 5 adet numune merkezdeki orta bloğa bağlanabilir.
- 6) Yük kapasitesi; her bir yük hücresi için maksimum 500 N olmak üzere toplam 5000N'dur.
  - 7) Servo-motor sürücüsünün kontrol paneli üzerindeki parametrelerin ayarlanması ile farklı yükleme dalga şekilleri (kare, üçgen, yamuk vb. formlar) oluşturma yeteneğine sahiptir.
  - 8) Teste başlangıç "sıfır pozisyon" ayarının hassas olarak elde edilebilme imkânı vardır.
  - 9) Farklı yükleme frekansları (0.1 – 10 Hz) oluşturma ve ayarlama yeteneğine sahiptir.
  - 10) Yüksek çözünürlüklü IP kamera ile internet veya yerel ağ üzerinden online izleme ve uzaktan kontrol edilerek başında operatör olmadan 7 gün 24 saat çalışma özelliğine sahiptir.
  - 11) Her bir test numunesinin hareketli ucuna monteli yük hücreleri sayesinde, test süresince numunelerin yatay yönde taşıdığı eğilme kuvvetini ölçebilir. Ayrıca, bu yük hücreleri sayesinde testin her anında her bir numunenin "rijitlik kaybı" yazılım üzerinden izlenebilir.
  - 12) Bütün parametre ve verilerin (test frekansı, eğme kuvveti, zaman, yük tekrar sayısı vs.) bilgisayarın diskine (SSD) anlık veya girilen "yük tekrar sayısı" aralıklarında kaydetme özelliğine sahiptir.;
  - 13) Teste ara verildiğinde geçmişte elde edilen verilerin "teste devam" tuşu ile yeni verilere ilave edilme özelliği sayesinde veri kaybı olmaksızın teste devam edilebilir.
  - 14) Test esnasında herhangi bir numune kırıldığında veya girilen rijitlik kaybına uğrayarak hasar gördüğünde, sistem otomatik olarak tanımlanan araştırmacıya bilgilendirme e-postası (numune no, kırılma yükü, hasar çevrim sayısı, zaman, vb.) gönderir.

15) Düşük üretim, bakım ve çalıştırma maliyeti vardır; düşük bakım ve çalışma maliyeti ve operasyonel sadeliği ile bir yorulma test makinesinin tasarımı ve imalatı arzulanan bir durumdur.

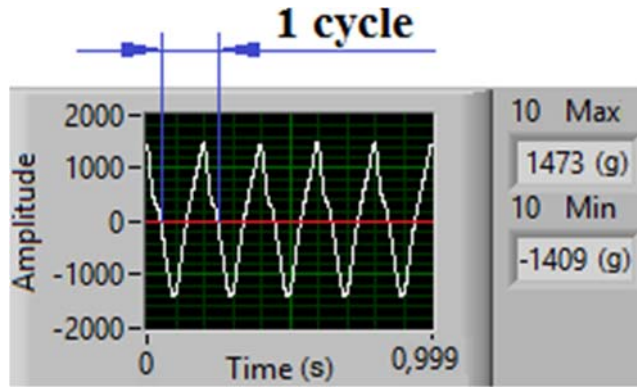
#### 4.3.4. Servo-Motor ve Lineer Vidalı Hareket Tablası

Yorulma makinesinde, eğilme yükü servo-motor tarafından tahrik edilen lineer vidalı hareket tablasının ileri-geri hareketi verilmiştir. Eğilme yükü ise, her bir numunenin hareketli tarafındaki numune tutucuya sabitlenen yük hücreleri tarafından ölçülmektedir. Bu mekanizma ile monotonik, tekrarlı, sehim-kontrollü test numunelere uygulanır.



Şekil 4.4 Yorulma test cihazı yan görünüş

Lineer vidalı hareket tablası sisteminin en önemli parçaları, servo-motor (18) ve 20 mm hatveli ana milidir (17) (Şekil 4.4). Ana mil için gerekli olan güç, direk olarak servo-motor tarafından sağlanır. Servo-motorun mili kaplin (30) ile yük miline bağlanmıştır. Farklı yükleme frekansları yazılım ara yüzünden girilecek sehim değerleri ile üçgen dalga form elde edilmektedir. Şekil 4.5’de 5 Hz frekans altında tam değişken ( $R=-1$ ) yüklemede tipik bir üçgen dalga formu verilmiştir. Diğer dalga formları ise servo-motorun kendi yazılımı üzerinden elde edilebilir.

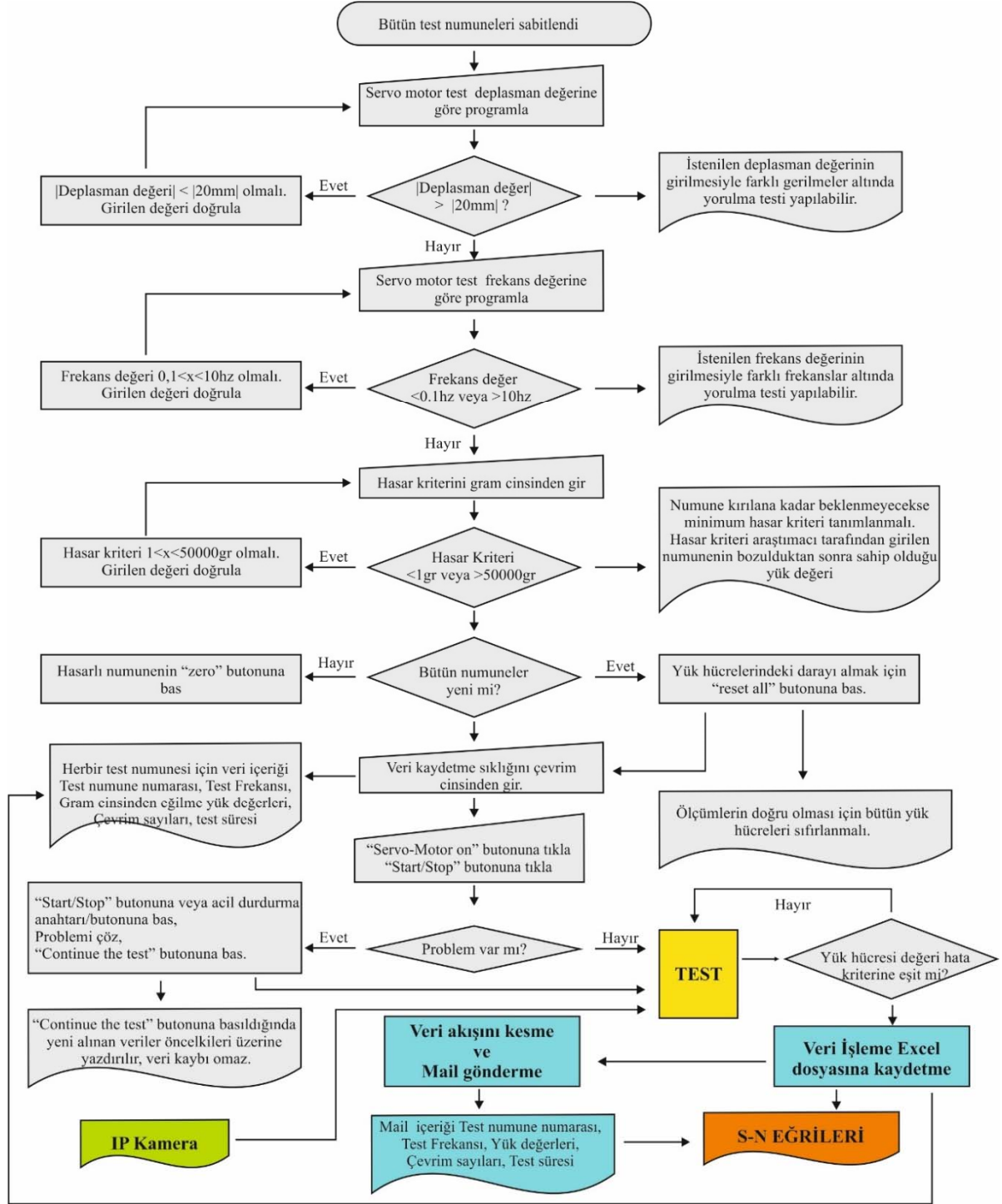


Şekil 4.5 5 Hz frekans altında tam-değişken ( $R=-1$ ) yüklemde tipik bir üçgen dalga formu

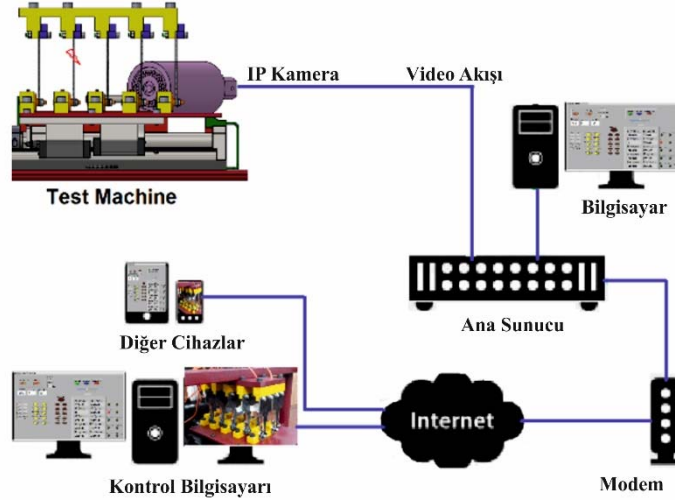


#### 4.3.5. Uzaktan Test, Veri Takip Ve Uyarı Sistemi

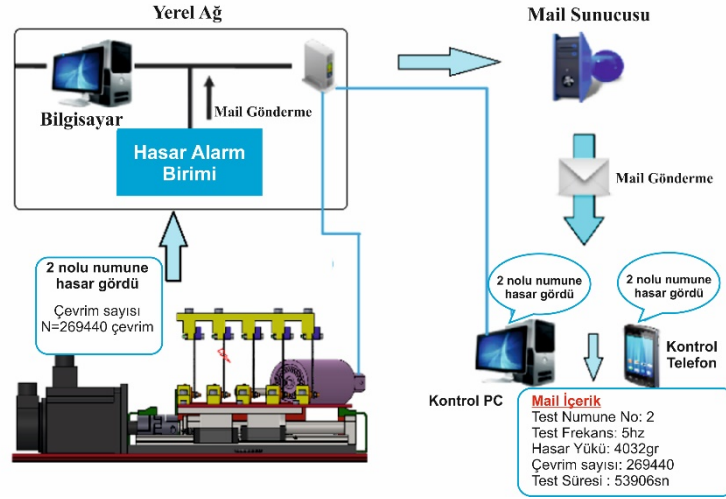
Uzaktan test, veri takip ve uyarı sistemi ise Şekil 4.6'daki akış diyagramı ile daha iyi açıklanabilir.







(b)

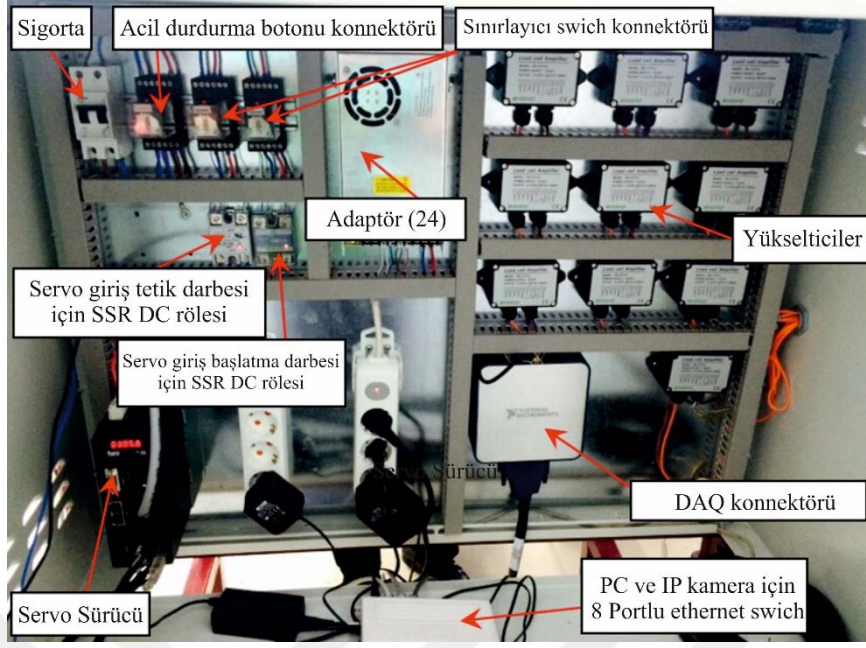


(c)

Şekil 4.6 (a) Yazılım sistemi için akış diyagramı (b) IP kamera akış diyagramı ve (c) Hasar uyarı için mail gönderme akış diyagramı

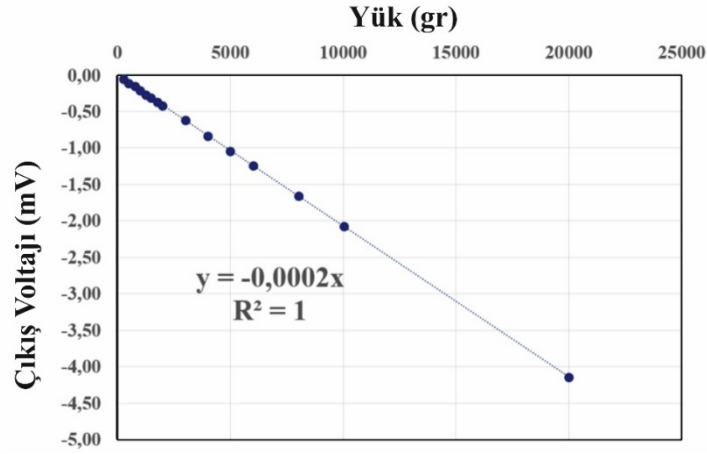
#### 4.3.6. Ana Pano ve Bilgisayarlı Ölçüm

Ana pano içi ve bilgisayarlı ölçme bölümü Resim 4.2 'de gösterilmiştir. Ölçüm birimi yük hücreleri, amplifikatör, DAQ konnektör bloğu ve PC'den oluşur. Yük hücresi çıkışındaki mili volt sinyali, amplifikatör tarafından volt birimine dönüştürülür ve DAQ kartla bütünleşmiş bir A/D dönüştürücüsü tarafından bilgisayara aktarıldı. LabView ile bir alt program yazıldı ve bu program çıkış voltajını gram olarak yük değerlerine çevirerek kayıt etmede kullanıldı.



Resim 4.2 Ana pano içi ve bilgisayarlı ölçme bölümü

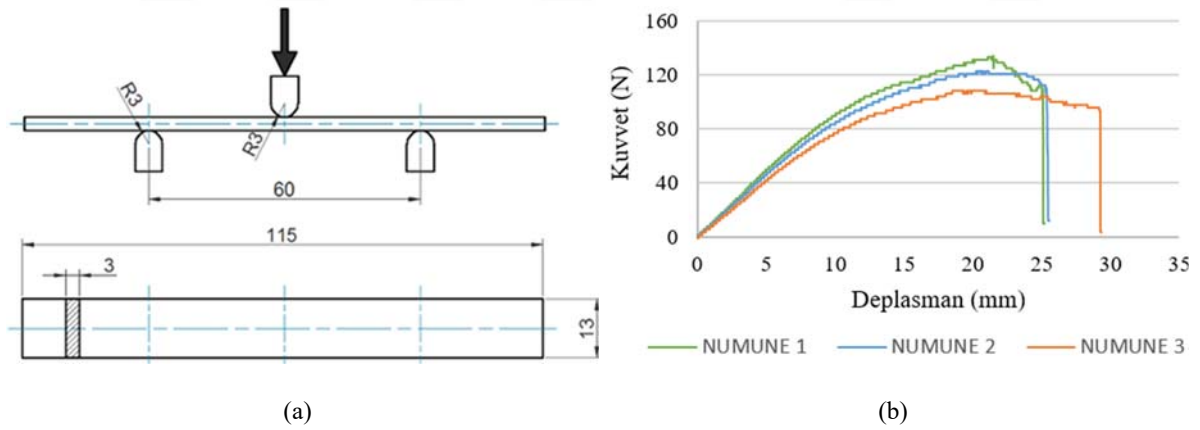
Otomasyon endüstrisindeki ağırlık/tork algılayıcı (sensör) olarak genelde yük hücresi (load cell) kullanılır ve ağırlığın oluşturduğu gerilmeyi ya da burulmayı elektronik yöntemle ölçerler. Belirli koşullar altında bir ölçme cihazında bir referans malzemenin verdiği değerlerle, ölçüm standartları ile gerçekleştirilen ve bunlara karşılık gelen değerler arasındaki ilişkiyi kuran işlemler dizisine kalibrasyon denir. Geliştirilen yorulma test cihazının yük hücreleri, daha önceden ağırlıkları belirlenmiş yüklerle kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sırasında her bir farklı yük değerine karşılık gelen çıkış voltajı okunmuştur ve yük değerine karşılık gelen çıkış voltaj lineer fonksiyon ile formüle edilmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, programda yük ve çıkış voltajlarındaki değişiklikler bir grafik üzerinde çizdirilerek kalibrasyon katsayıları tespit edilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, yük ve çıkış voltajı değişiminin ilişkisi yaklaşık olarak lineerdir. Aynı zamanda burada, hasar mekanizmasını değerlendirmesi için yük - yük çevrimleri yazılım ara yüzünden anlık olarak da izlenebilir.



Şekil 4.7 Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi

#### 4.4. Performans ve Kalibrasyon İçin Yorulma Testleri

Tasarım ve imalatı tamamlanan ankastre-tip eğilmeli yorulma test makinesinin kalibrasyon ve performans testleri için cam/epoksi tabakalı kompozit numuneler kullanıldı. İlk önce malzemenin eğilme mukavemetini belirlemek için statik testler yapıldı (Şekil 4.8 (a)). Üç nokta eğme testleri, polimer matrisli kompozitlerin eğilme özelliklerini belirlemek için kullanılan ASTM D7264 standardına göre yapılmıştır [109].



Şekil 4.8 (a)Eğilme testinin şematik gösterimi, (b) test sonuçları

Eğilme testleri 50kN kapasiteli U-Test marka universal test cihazında gerçekleştirildi. Test cihazının bilgisayar yazılımı yardımıyla test sırasında her bir numuneye ait yük-deplasman grafiği elde edildi (Şekil 4.8 (b)). Malzemenin statik eğilme dayanımı Denklem 4.1'den faydalanılarak hesaplanmıştır [109].

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{Denklem 4.1})$$

Burada  $\sigma_f$  eğilme mukavemetini, F, eğilme testlerinden elde edilen maksimum kuvvet, L mesnetler arası mesafe, b numunenin genişliği ve h numunenin kalınlığını ifade etmektedir. Yorulma testleri malzemenin statik değerinin en az %20 aşağısındaki gerilme değerlerinden başlanarak daha alt gerilme seviyeleri için tekrarlanır. Burada karşılaşılan sorun statik dayanımın altında kalan gerilme seviyelerini test numunesi bünyesinde meydana getirmektir. Kuvvet kontrollü yorulma test cihazlarında, numunenin bağlandığı kola ağırlıklar asılır ve eğilme momentinin etkisiyle numune bünyesinde istenilen gerilme oluşturulur [26,90,91,94]. Çalışma kapsamında imal edilen cihaz deplasman kontrollüdür. Bu sebeple istenilen gerilme seviyesini meydana getirecek olan şekil değişimi (deplasman) değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu bağlamda malzemenin gerilme ve şekil değişimi arasındaki ilişkiyi ifade eden Hooke yasasından faydalanılmıştır. Denklem (4.2-4.4) kullanılarak istenilen gerilme değerini meydana getirecek olan deplasman değerleri hesaplanmıştır [109].

$$\sigma_f = \varepsilon \cdot E_f \quad (\text{Denklem 4.2})$$

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L_s^2} \quad (\text{Denklem 4.3})$$

$$E_f = \frac{L_s^3 m}{4bh^3} \quad (\text{Denklem 4.4})$$

Bu denklemlerde  $\varepsilon$  eğilme birim şekil değişimini,  $E_f$  eğilme modülünü,  $\delta$  maksimum eğilme deformasyon miktarını ve m üç nokta eğme testinden elde edilen yük-deplasman eğrisindeki lineer bölgenin eğimini göstermektedir. Her kompozit numune grubu için elde edilen maksimum eğilme dayanımı değeri yorulma testlerindeki bir çevrimlik eğilme dayanımına yani statik dayanım olarak kullanılmıştır [90,94].

Yorulma testleri için ASTM D671-93 test standardına göre hazırlanmış test numunesi kullanılmıştır [110]. Tasarlanan yorulma cihazı için performans ve kalibrasyon testleri laboratuvar ortamında (yaklaşık 20°C) ve histeretik ısıtmayı önlemek için 10 Hz den daha düşük test frekansı altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yorulma testleri, (-1) gerilme oranında (R değeri) ve 5Hz frekansında gerçekleştirilmiştir.

Delta ASDA-Soft(V5) - ASDA-A2 Servo - [Parametre Editörü 1: [ASDA-A2 Servo] Sürücünden]

Parametre Editörü

V 1.046	Kod	Değer	Birim	Min	Max	Yazdırılan	Açıklama
PS-43	DLV3	0	ms	0	32767	400	Belleme Zamanı 3
PS-44	DLV4	500	ms	0	32767	500	Belleme Zamanı 4
PS-45	DLV5	800	ms	0	32767	800	Belleme Zamanı 5
PS-46	DLV6	1000	ms	0	32767	1000	Belleme Zamanı 6
PS-47	DLV7	1500	ms	0	32767	1500	Belleme Zamanı 7
PS-48	DLV8	2000	ms	0	32767	2000	Belleme Zamanı 8
PS-49	DLV9	2500	ms	0	32767	2500	Belleme Zamanı 9
PS-50	DLV10	3000	ms	0	32767	3000	Belleme Zamanı 10
PS-51	DLV11	3500	ms	0	32767	3500	Belleme Zamanı 11
PS-52	DLV12	4000	ms	0	32767	4000	Belleme Zamanı 12
PS-53	DLV13	4500	ms	0	32767	4500	Belleme Zamanı 13
PS-54	DLV14	5000	ms	0	32767	5000	Belleme Zamanı 14
PS-55	DLV15	5500	ms	0	32767	5500	Belleme Zamanı 15
PS-56	CMST	0		1999	0	COMPARE Data Dizi İlk Adres	
PS-57	CMAX	12		-2147483648	2147483647	COMPARE Sayısı	
PS-58	CMNO	1		1	1999	COMPARE Miktarı	
PS-59	CMCT	0x00640010		0x00010000	0x00FF313F	0x00640010	COMPARE Aktivasyon Kombinasyonu
PS-60	POV0	200,0	r/min	0,1	5000,0	20,0	pozisyon 0 Hareket Hız Ayarı
PS-61	POV1	1,0	r/min	0,1	6000,0	50,0	pozisyon 1 Hareket Hız Ayarı
PS-62	POV2	1,0	r/min	0,1	6000,0	100,0	pozisyon 2 Hareket Hız Ayarı
PS-63	POV3	1,0	r/min	0,1	6000,0	200,0	pozisyon 3 Hareket Hız Ayarı
PS-64	POV4	1,0	r/min	0,1	6000,0	300,0	pozisyon 4 Hareket Hız Ayarı
PS-65	POV5	1,0	r/min	0,1	6000,0	500,0	pozisyon 5 Hareket Hız Ayarı
PS-66	POV6	1,0	r/min	0,1	6000,0	600,0	pozisyon 6 Hareket Hız Ayarı
PS-67	POV7	1,0	r/min	0,1	6000,0	800,0	pozisyon 7 Hareket Hız Ayarı
PS-68	POV8	1,0	r/min	0,1	6000,0	1000,0	pozisyon 8 Hareket Hız Ayarı
PS-69	POV9	1,0	r/min	0,1	6000,0	1300,0	pozisyon 9 Hareket Hız Ayarı
PS-70	POV10	1,0	r/min	0,1	6000,0	1500,0	pozisyon 10 Hareket Hız Ayarı
PS-71	POV11	1,0	r/min	0,1	6000,0	1800,0	pozisyon 11 Hareket Hız Ayarı
PS-72	POV12	1,0	r/min	0,1	6000,0	2000,0	pozisyon 12 Hareket Hız Ayarı
PS-73	POV13	1,0	r/min	0,1	6000,0	2300,0	pozisyon 13 Hareket Hız Ayarı
PS-74	POV14	1,0	r/min	0,1	6000,0	2500,0	pozisyon 14 Hareket Hız Ayarı
PS-75	POV15	1,0	r/min	0,1	6000,0	3000,0	pozisyon 15 Hareket Hız Ayarı
PS-76	CPRS	0		-1073741824	1073741823	0	CAPTURE İlk Pozisyon Reset Data
PS-77	CSAN	0		-2147483648	2147483647	0	Capture Senkronizasyon Elemanı Pozisyon Sayısı
PS-78	CSDS	100	pulse	10	100000000	100	Dr. Capture e-rolling noktası arası nominal pulse sayısı
PS-79	CSDB	0	pulse	-2147483648	2147483647	0	Capture Senkronizasyon Elemanı Hata Pulsesi
PS-80	CSDB	10	%	0	90	10	Capture Senkronizasyon Elemanı Max. Ayarlama Oranı

Firmware Version: 1.046.50

Note: Double-click the Value can be call out the Parameter Setting Helper

Parametre Editörü [ParaList]ParaThread Suspended: From 0 ASDA-A2 Servo ASDA-A2 Servo

(a)

Delta ASDA-Soft(V5) - ASDA-A2 Servo - [Parametre Editörü 1: [ASDA-A2 Servo] Sürücünden]

Parametre Editörü

V 1.046	Kod	Değer	Birim	Min	Max	Yazdırılan	Açıklama
PE-00	ODCP	0x00001000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	Home Tanımlama
PE-01	ODAT	0		-2147483648	2147483647	0	Home Tanımlama Değeri
PE-02	POEF1	0x00000003		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#1 Açıklama
PE-03	PDAT1	171072		-2147483648	2147483647	0	PATH#1 Data
PE-04	POEF2	0x00000003		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#2 Açıklama
PE-05	PDAT2	-171072		-2147483648	2147483647	0	PATH#2 Data
PE-06	POEF3	0x00000002		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#3 Açıklama
PE-07	PDAT3	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#3 Data
PE-08	POEF4	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#4 Açıklama
PE-09	PDAT4	500000		-2147483648	2147483647	0	PATH#4 Data
PE-10	POEF5	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#5 Açıklama
PE-11	PDAT5	300000		-2147483648	2147483647	0	PATH#5 Data
PE-12	POEF6	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#6 Açıklama
PE-13	PDAT6	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#6 Data
PE-14	POEF7	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#7 Açıklama
PE-15	PDAT7	1300000		-2147483648	2147483647	0	PATH#7 Data
PE-16	POEF8	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#8 Açıklama
PE-17	PDAT8	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#8 Data
PE-18	POEF9	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#9 Açıklama
PE-19	PDAT9	300000		-2147483648	2147483647	0	PATH#9 Data
PE-20	POEF10	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#10 Açıklama
PE-21	PDAT10	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#10 Data
PE-22	POEF11	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#11 Açıklama
PE-23	PDAT11	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#11 Data
PE-24	POEF12	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#12 Açıklama
PE-25	PDAT12	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#12 Data
PE-26	POEF13	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#13 Açıklama
PE-27	PDAT13	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#13 Data
PE-28	POEF14	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#14 Açıklama
PE-29	PDAT14	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#14 Data
PE-30	POEF15	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#15 Açıklama
PE-31	PDAT15	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#15 Data
PE-32	POEF16	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#16 Açıklama
PE-33	PDAT16	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#16 Data
PE-34	POEF17	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#17 Açıklama
PE-35	PDAT17	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#17 Data
PE-36	POEF18	0x00000000		0x00000000	0xFFFFFFFF	0x00000000	PATH#18 Açıklama
PE-37	PDAT18	0		-2147483648	2147483647	0	PATH#18 Data

Firmware Version: 1.046.50

Note: Double-click the Value can be call out the Parameter Setting Helper

Parametre Editörü [ParaList]ParaThread Suspended: From 0 ASDA-A2 Servo ASDA-A2 Servo

(b)

Şekil 4.9 Deplasman ve frekans parametrelerinin ayarlanması

Servo motorun çalışma parametreleri motorun satın alındığı firma tarafından sağlanan yazılım ile ayarlanmaktadır. Şekil 4.9 (a)'da Denklem (4.2-4.4) yardımıyla hesaplanan ve yorulma test cihazının hangi deplasman değerlerinde ileri-geri hareket yapılacağını ayarladığımız ekranın görüntüsü gösterilmektedir. Burada her 1mm deplasman değeri 50 katsayısı ile çarpılarak elde edilen değer P5-60 kutucuğuna yazılır. Burada verilen katsayı değeri üretici firmanın kataloğundan alınmıştır. Şekil 4.9 (b)'daki ekran görüntüsünde ise frekans değerinin ayarlandığı menü gösterilmiştir.. 5Hz frekans değeri için her 1mm ilerleme 38800 katsayısı ile çarpılarak elde edilen değer P6-03 kutucuğuna atanır. 38800 katsayısı motora ait bir değerdir ve üretici firmanın kataloğundan alınmıştır. Bu değer ileri yöndeki frekans girdisini ifade eder. Elde edilen değer negatif işaretli P6-05 kutucuğuna yazılır. Bu değerde geri yöndeki frekans girdisini ifade eder. Sıfır pozisyonu frekans girdisi ise P6-07 kutucuğuna yazılır. Tam değişken yükleme için bu değer "0" dir. Deplasman ve frekans değerleri için çarpım katsayıları firma tarafından verilen katalogdan elde edilmiştir. Deplasman ve frekans parametreleri ayarlandıktan sonra yorulma testine ait diğer parametrelerin ayarı, çalışma kapsamında geliştirilen yazılım üzerinden yapılmaktadır.

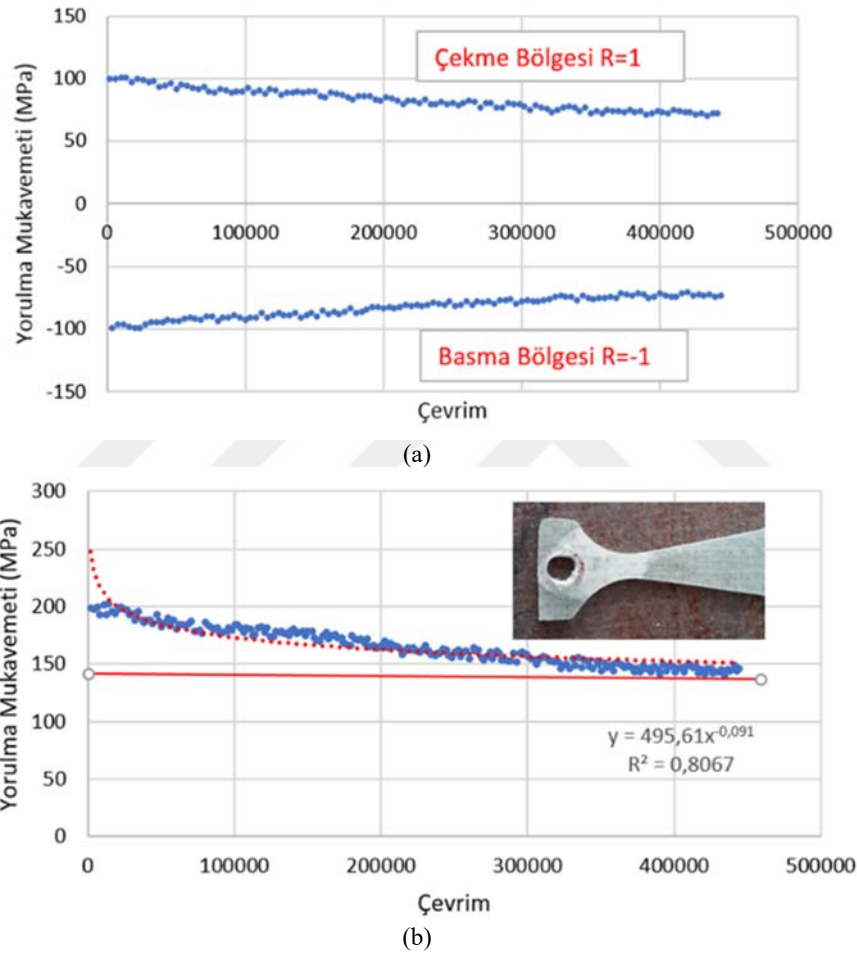
Testler sırasında her 1000 çevrimde bir yük hücrelerinden her bir numune için ayrı ayrı değerler alınarak Excel dosyalarına yazdırılmıştır. S-N eğrilerine ait verileri elde etmek için eğilmeli yorulma testleri kompozit malzemenin 3 nokta eğilme mukavemetinin %80, %70, %60, %50 ve %40'ına karşılık gelen farklı eğilme gerilme seviyelerinde yapılmıştır. Yorulma testlerine, ilgili grup numuneler %20'lik rijitlik kaybına ulaşınca veya numune kırılana kadarki çevrime kadar devam edilmiştir [111,112]. Eğilmeli yorulma yüklemesi sırasında malzemede kırılmaya ya da yorulma hasarına neden olan yorulma gerilmesi, yorulma test standardında yer alan ve Denklem 4.5'te ifade edilen formülasyona göre hesaplanmıştır [110].

$$\sigma_{DN} = \frac{6PL}{bh^2} \quad (\text{Denklem 4.5})$$

Burada P yük hücrelerinden okunan değer, L yükün uygulandığı yerden yorulma hasar bölgesine olan mesafe, b numune hasar bölgesinin genişliği ve h numune kalınlığını ifade etmektedir.

Şekil 4.10 (a)'da eğilme yorulmasına zorlanan test cam/epoksi yorulma test numunesinin çekme (R=1) bölgesindeki ve basma (R=-1) bölgesindeki mukavemet kayıpları ayrı ayrı verilmiştir. Numunenin çekme ve basma gerilmesi altında benzer şekilde mukavemet

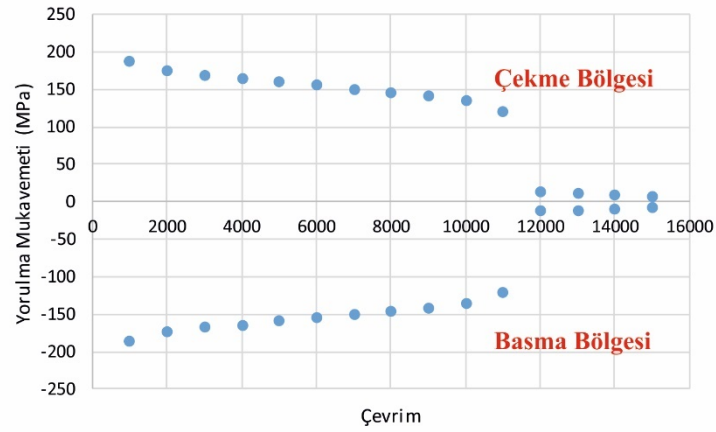
kayıpları yaşadığı söylenebilir. Şekil 4.10 (b)'de çekme-bası gerilmeleri toplanarak bir arada verilmiştir. Numunenin eğilme yüklemesi altında kırılmadan hasara uğradığı ve yaklaşık 400000 çevrim sayısından sonra yorulma mukavemetinde herhangi bir değişim olmadığı buna karşın numunenin yorulma bölgesinde delaminasyon hasarlarının meydana geldiği görülmüştür. Delaminasyonun başladığı çevrim sayısında test numunesi başlangıçtaki mukavemet değerine göre dayanımının yaklaşık %25'ini kaybetmiştir.



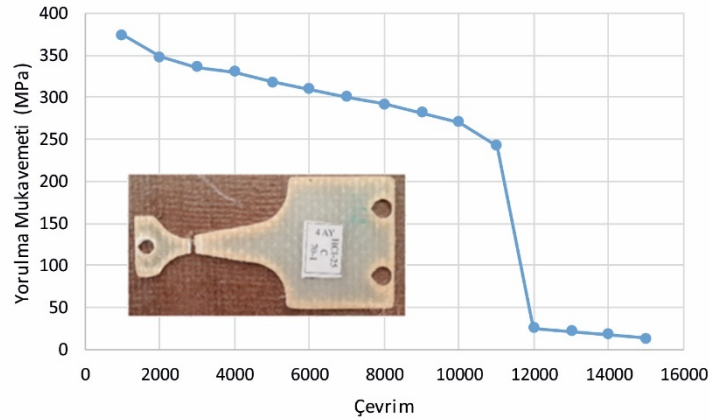
Şekil 4.10 Statik eğilme mukavemetinin %40'ında yorulmaya zorlanan cam/epoksi test numunesi

Şekil 4.11'de numuneyi yormaya zorlayan gerilme değeri büyük olduğu için numunenin rijitlik kaybı çok daha rahat görülebilmektedir. Öyle ki test numunesi her 1000 çevrim için yorulma mukavemetinin yaklaşık %3-4'ünü kaybediyor. Şekil 4.11 (a) çekme ve basma bölgesinde benzer yorulma davranışlarının olduğunu gösteriyor. 11000 çevrime gelindiğinde yorulma sonucunda test numunesinde oluşan çatlaklar, yük taşıyan kesiti daraltarak numunenin kırılmasına sebep olmuştur (4.11 (b)).

Yorulma testi sonuçlarında, düşük gerilme genliklerinde (statik eğilme mukavemetinin %40'ı) yüklenen test numunelerin kırılmadığı fakat yorulma bölgelerinde delaminasyonların meydana geldiği (Şekil 4.10 (b)), yüksek gerilme genliklerinde (statik eğilme mukavemetinin %80'i) ise yorulma test numunelerinin kırıldığı gözlemlenmiştir (Şekil Şekil 4.11 (b)). Performans testleri sırasında motorda herhangi bir ısınma problemi olup olmadığı yada yataklarda herhangi bir aşınma problemi olup olmadığını tespit etmek için makine aynı test paramterelerinde 10 gün süresi boyunca çalışmaya bırakılmıştır. Çalışma sırasında cihazın sürekli yanında durulamayacağından dolayı yorulma cihazı IP kamera üzerinden takip edilmiştir (Resim 4.3).



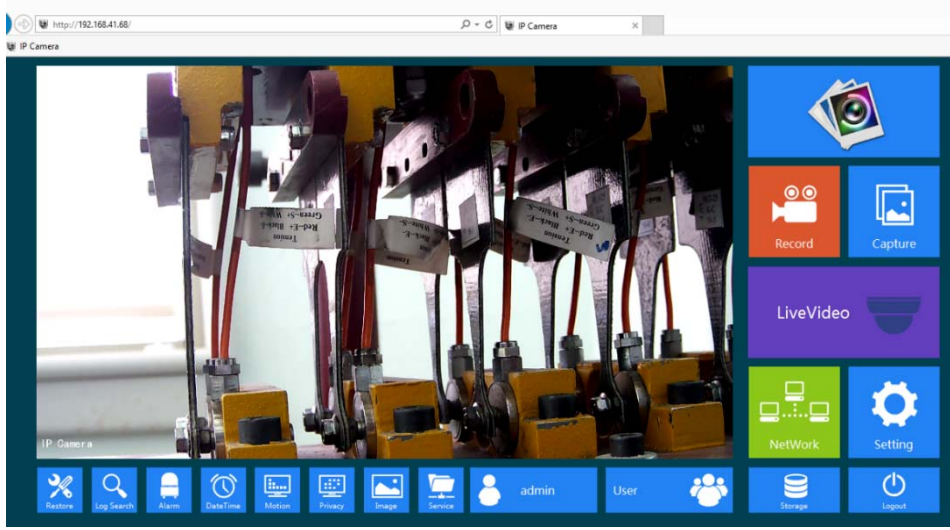
(a)



(b)

Şekil 4.11 Statik mukavemetinin %80'in de yorulmaya zorlanan test numunesi



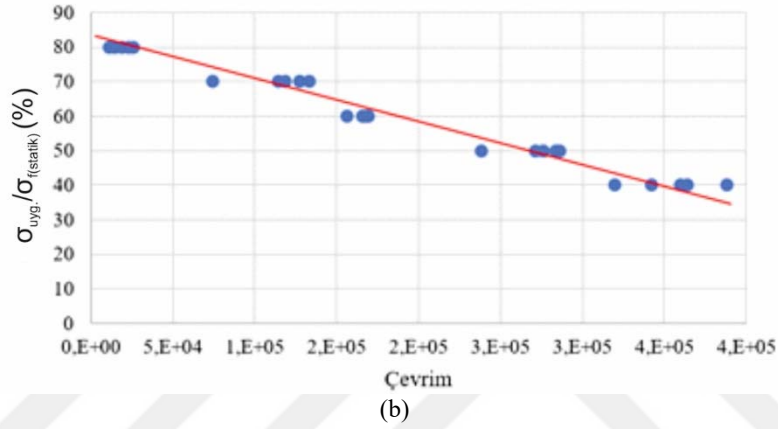
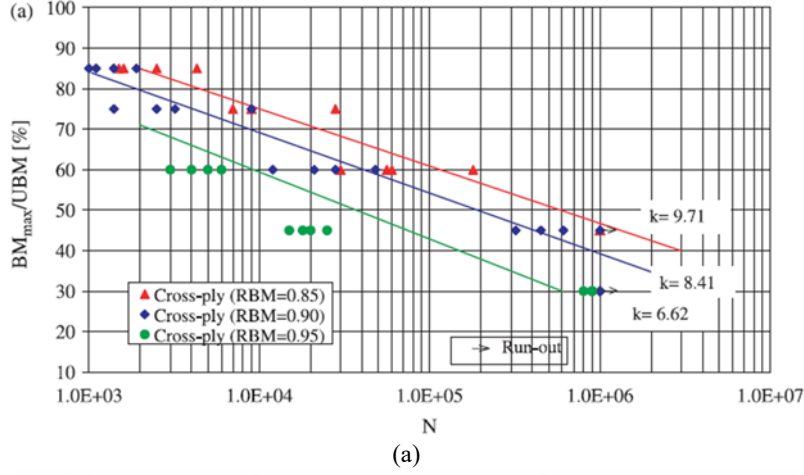


Resim 4.3 IP kamera üzerinden yorulma testlerinin takibi

Belingardi ve Cavatota'nun [44] yapmış olduğu çalışmadan alınan (Şekil Şekil 4.12 (a)) ve geliştirilen cihaz kapsamında elde edilen (Şekil Şekil 4.12 (b)) cam/epoksi tabakalı kompozitlere ait mukavemet kaybı (rijitlik kaybı)-yorulma ömrü değişim grafiği karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Belingardi ve Cavatota yapmış oldukları çalışmada cam-karbon/epoksi hibrit kompozitlerin eğilmeli yükleme altında yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Hibrit kompozitleri statik eğilme gerilmelerinin %85, %90 ve %95'i göreceli eğilme momenti (Relatively Bending Moment, RBM) olarak kabul edilmiştir. Test numunelerinin yorulma davranışları göreceli eğilme moment değerlerinin %85, %75, %60, %45 ve %30'una karşılık gelen gerilme değerlerinde yorulmaya zorlanmıştır. Malzeme bünyesinde meydana gelen %15'lik rijitlik kaybını hasar kriteri olarak kabul etmişlerdir.

Tez kapsamında yapılan yorulma testlerin statik eğilme momentinin %80, %70, %60, %50 ve %40'ında yorulma testleri gerçekleştirdi, statik eğilme dayanımının herhangi bir göreceli değeri alınmamıştır. Her iki yorulma testininde eğilmeli zorlanma şartlarında ve yakın genliklerde yapılmasından dolayı sonuçların birbiri ile kıyaslanabilir nitelikte olduğunu göstermektedir.

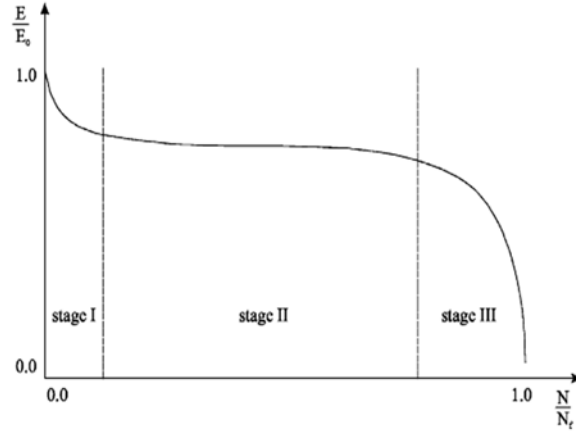
Her iki çalışmadan alınan eğilme rijitliği kayıp değerleri bakıldığında, davranışların benzer olduğu görülmektedir. Yorulma ömür değerlerindeki farklılık test numunelerinin aynı mekanik dayanımlara sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Fakat her iki grafik içinde gerilme genliği ile yorulma ömrünün ters orantılı olduğu söylenebilir.



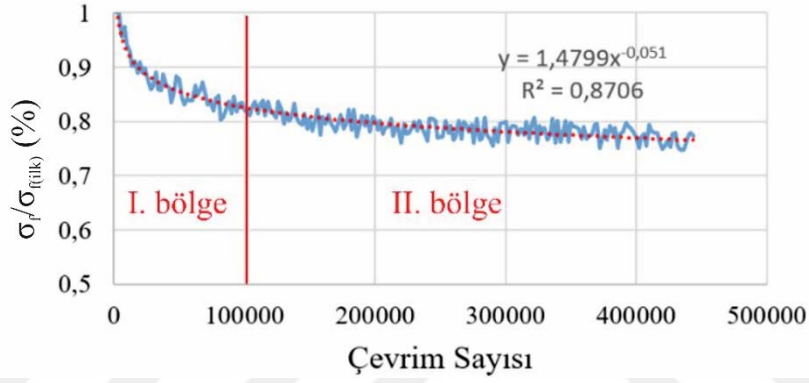
Şekil 4.12 Cam/epoksi tabakalı kompozitin genlik-ömür davranışı (a) Belingardi ve Cavatota [44], (b) testlerden elde edilen

Rijitlik kaybı eğrisini elde etmek için 5 farklı gerilme değerinde her biri için 5 adet numune test edilmiş olup, toplamda farklı genliklerde 25 adet yorulma testi yapılmıştır. Statik 3 nokta eğme gerilme genliğinin %80-%70 seviyesinde test edilen numunelerin bir çoğunun kırıldığı, bunların altında kalan gerilme seviyelerinde (%60, %50 ve %40) kırılma olmaksızın çok yorulma bölgelerinde delaminasyon ve çeşitli matris çatlaklarının olduğu gözlemlenmiştir.

Fiber takviyeli kompozit malzemeler için tipik rijitlik hasarı Şekil 4.13'de görülmektedir [113,114]. Şekil 4.13 (a) 3 bölgeye ayrılırsa; ilk bölgede (Stage I) hızlı bir rijitlik azaltması meydana gelir. Bu bölgede numunede %2-5 seviyesinde hızlı bir rijitlik kaybı yaşanır. Bu rijitlik kaybına enine uzanan matris çatlakları sebep olmaktadır. Orta bölgede (Stage II) rijitlik azalması, çevrim sayısına bağlı olarak doğrusal bir şekilde ortaya çıkar. Burada meydana gelen rijitlik kaybı %1-5 seviyelerindedir. Ayrıca bu bölgede delaminasyonlar ve boyuna matris çatlakları gelişir. Son bölgede (Stage III) sertlik azalması ani adımlarla gerçekleşir ve numunenin kırılması ile sonlanır.

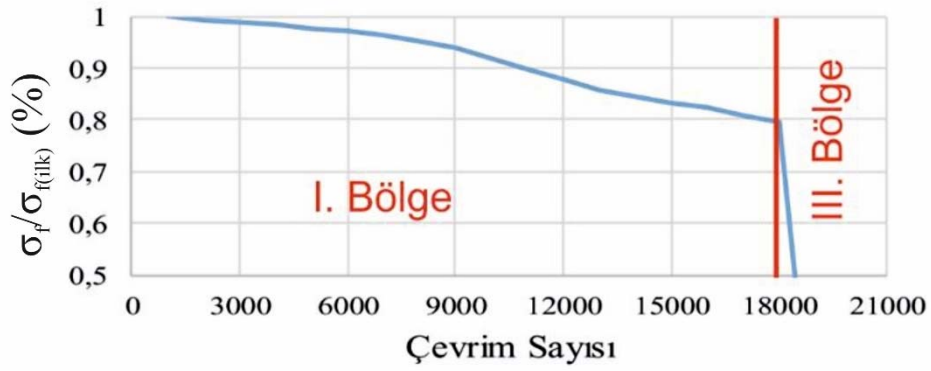


(a)  
%40



(b)

%80



(c)

Şekil 4.13 (a) Fiber takviyeli kompozit malzemeler için tipik rijitlik hasar eğrisi [113], (b) %40 ve (c) %80 gerilme genliklerinde yüklenen cam/epoksi numuneye ait rijitlik değişimleri

4.13 (b-c) %40 ve %80 gerilme genliğinde yüklenmiş numunelerden elde edilen rijitlik kayıparı ifade edilmiştir. %40 genlikte zorlanan numunenin rijitlik kaybına bakıldığında I. bölge ve II. bölgenin elde edildiği görülmektedir. Yapılan testler kapsamında %20'lik rijitlik

kaybı hasar kriteri olarak kabul edildiği için numunede %20'lik rijitlik kaybı tespit edildiğinde deney yazılım tarafından sonlandırılmıştır. Bu sebeple %40'lık gerilme genliğinde zorlanan numunelerin rijitlik kaybı grafiklerinde III. bölge meydana gelmemiştir. Eğer deney çok uzun süre devam ettirilseydi III. bölgeyi de görmek mümkün olabilirdi. %80 gibi yüksek gerilme genliklerinde rijitlik kaybı çok hızlı meydana geldiği için II. bölge çok kısa bir çevrim sayısında meydana gelmektedir. Performans testlerimizde her 1000 çevrimde bir veri alındığı için rijitlik kaybı grafiklerinde II. bölge tespit edilememiştir. Fakat hızlı rijitlik kaybından dolayı deney numunesi kırıldığı için III. bölge gözlemlenmiştir.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 literatürdeki yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile performans testlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve detayları anlatılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

## 5. BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞLARI

### 5.1. GİRİŞ

Yapılan tez çalışmasında, çevresel etkilerin tabakalı kompozit malzemelerin statik ve dinamik dayanımlarına etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, incelenen test şartlarında malzemenin statik davranışlarını belirlemek için fiber yönündeki elastisite modülü ( $E_1$ ), fibere dik yöndeki elastisite modülü ( $E_2$ ), kayma modülü ( $G_{12}$ ), fiber yönü çekme mukavemeti ( $X_t$ ), fibere dik yöndeki çekme mukavemeti ( $Y_t$ ), fiber yönündeki basma mukavemeti ( $X_c$ ), fibere dik yöndeki basma mukavemeti ( $Y_c$ ), eğilme modülü ( $E_f$ ) ve eğilme mukavemeti ( $\sigma_f$ ) testleri uygun standartlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca belirlenen test şartlarında malzemenin dinamik davranışlarını belirlemek için çalışma kapsamında tasarım ve imalatı yapılan yorulma cihazı kullanılarak, cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozit numuneler eğilmeli yorulma testleri yapılmıştır.

Bu bölümde tabakalı kompozitlerin üretimi, statik ve dinamik testlerin gerçekleştirilmesi detaylı olarak anlatılmıştır.

### 5.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretimi

#### 5.2.1. Takviye Malzemesi

Testler için kullanılacak cam/epoksi ( $C_8$ ) ve karbon/epoksi ( $K_8$ ) tabakalı kompozit malzemeler, sekiz tabakalı olarak el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Takviye malzemesi cam dokuma kumaşlarda e-camı fiberler kullanılmıştır. Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel direnci (yalıtkanlık) diğer cam tiplerine göre çok daha iyidir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle e-camı kullanılır. Çizelge 5.1'de e-camına ait mekaniksel özellikler verilmiştir [115].

Çizelge 5.1 E-camı mekanik ve fiziksel özellikleri [115]

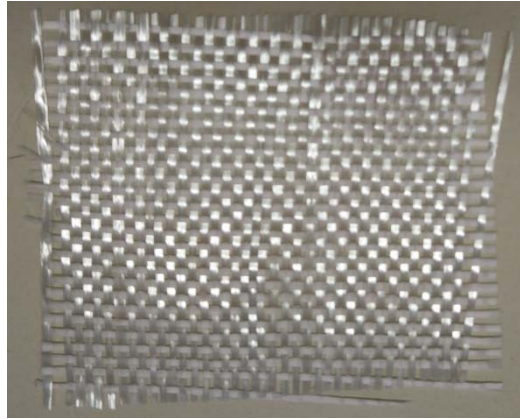
Özellik	Birim	Değer
Çekme Mukavemeti	MPa	3445
Basma Mukavemeti	MPa	1080
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	2.58
Termal Genleşme Miktarı	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	5,4

Temin edilen karbon fiber dokumalı kumaşlarda 3K karbon fiberler kullanılmıştır. Karbon fiberler bünyesinde bulundurdukları filament sayısı ile adlandırılırlar. 3K karbon fiberde 3000 adet filament bulunur. 3K karbon elyaflar fiyat/performans bakımından günümüzde en popüler ve en yaygın kullanılan karbon elyaflardır. Çizelge 5.2’de 3K karbon elyafa ait özellikler verilmiştir [116].

Çizelge 5.2 3K karbon fiber fiziksel ve mekanik özellikleri [116]

Özellik	İngiliz birimi		SI	Tolerans	Birim	Test Metodu
Çekme Mukavemeti	610	ksi	4200	Min.3906	MPa	ISO 10618
Çekme Modülü	35,6	Msi	245	230-270	GPa	ISO 10618
Şekil Değiştirme	1,8	%	1,8	Min.1,5	%	ISO 10618
Yoğunluk	0,065	Ibs/in <sup>3</sup>	1,79	1,78-1,81	g/cm <sup>3</sup>	ISO 10119
Akma	7448	ft/Ibs	200	194-206	g/1000 m	ISO 1889

Her iki kumaşta da fiberler [0°/90°] fiber yönlenmesine sahip olup düz dokuma yapısında dokunmuştur. Kullanılan cam elyaf dokuma kumaşlar 300gr/m<sup>2</sup> ve karbon fiber kumaşlar 330gr/m<sup>2</sup> ağırlığa sahiptirler (Resim 5.1).



(a)



(b)

Resim 5.1 Takviye malzemesi cam ve karbon fiber kumaşlar

Bilindiği üzere cam fiber ve karbon fiber gibi sentetik takviye malzemeleri rulo formunda eni sabit genişlikte boyu ise istenilen uzunlukta dokunarak üretilirler. Dokuma sırasında boyuna uzanan fiberler çözgü, enine uzanan sabit genişlikteki fiberler ise atkı olarak isimlendirilirler.

Çözgü yönündeki iplikler sürekli bir formdadır. Üretim sırasında meydana gelebilecek herhangi bir kopmanın önüne geçmek için çözgü yönünde daha sağlam ve kalın iplikler kullanılırlar. Bu tez kapsamında mekanik özellik değerlerini ifade ederken kullanılan fiber yönü, dokuma kumaşın çözgü yönü ve fibere dik yön ise atkı yönü olarak kabul edilmiştir.

### 5.2.2. Matris Malzemesi

Matris malzemesi olarak DURATEK Firmasından satın alınan DTE1000 reçine ve DTS1100 sertleştiriciye sahip iki bileşenli epoksi reçine kullanılmıştır. Termoplastik reçinelere kıyasla daha yüksek mekanik dayanıma sahip olması ve takviye elemanlarını iyi sarması nedeniyle bu tez çalışmasında termoset yapılı epoksi reçine kullanılmıştır. Seçilen reçine, el yatırması, vakum torbalama gibi açık kalıp laminasyon işlemleri için tasarlanmıştır, ancak vakum infüzyonu, RTM / L-RTM ve belirli filament sarım teknikleri için de uygundur. Farklı sertleştiricilerle 45 - 700 dakika arasında geniş bir kap ömrü vardır. Gemi ve rüzgar türbin kanatlarının imalatında kullanılan DTE100+DTS1100 reçine ikilisi İngiliz Lloyd's Register kalite belgesine sahiptir (Resim 5.2).



Resim 5.2 DTE 1000 epoksi ve DTS 1100 sertleştirici

Epoksi reçineler sıcaklığa ve neme karşı hassas oldukları için uygulama ortamının koşulları 15-25°C sıcaklıkta ve ortam nemi %65'i geçmemelidir. Ayrıca reçine kürleşmesi için uygulama parametrelerinin seçimi kaliteli bir malzeme elde etmek için önemlidir. Reçinede kürleşme süresine ve mekanik dayanıma etki eden parametre; reçine sertleştirici karışım oranı, kürleşme süresi ve kürleşme sıcaklığıdır. Reçine ve sertleştirici oranının uygun seçilmesi, karışımın kullanım süresini de uzatacaktır. Bu kapsamda maksimum mukavemeti elde etmek

için DURATEK firmasının ürün için hazırlamış olduğu teknik veriler kullanılarak üretim parametreleri belirlendi. (Çizelge 5.3) [117].

Çizelge 5.3 Reçine sisteminin kürleşme ve mekanik özellikleri [117]

SİSTEM: DTE 1000 + DTS 1100			KÜRLEŞME: 48 SÜRE @ 23°C +			
Özellik	Birim	Standart	16h @ 50°C	12h @ 60°C	8h @ 80°C	4h @ 100°C
Çekme Mukavemet	N / mm <sup>2</sup>	ISO 527 – 2	68 – 73	71 – 76	70 – 75	74 – 79
Uzama	%	ISO 527 – 2	3,0 – 3,5	4,0 – 4,5	3,8 – 4,3	3,8 – 4,3
Çekme E – Modül	kN / mm <sup>2</sup>	ISO 527 – 2	3,1 – 3,4	3,1 – 3,4	2,9 – 3,2	3,4 – 3,7
Eğilme Mukavemet	N / mm <sup>2</sup>	EN ISO 178	104 – 109	108 – 113	103 – 108	111 – 116
Eğilme E – Modül	kN / mm <sup>2</sup>	EN ISO 178	3,0 – 3,3	2,8 – 3,1	2,9 – 3,2	2,8 – 3,1
HDT	°C	ISO 75 – 2	67 – 72	69 – 74	69 – 74	73 – 78
Su Absorbsiyonu	mg	EN ISO 175	40 – 45	34 – 39	34 – 39	35 – 40

### 5.2.3. Tabakalı Kompozitlerin Üretilmesi

Cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin üretim aşamaları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Cam ve karbon dokuma kumaşlar yönleri [0/90] ve boyutları 80x100cm olacak şekilde kesilmiştir (Resim 5.3 (a)).
- Paslanmaz çelikten imal edilen 2mm kalınlığındaki saclar kir, toz ve yağa karşı tiner ile silinerek temizlenmiştir.
- Sac ve fiber kumaşlar arasında kalıp ayırıcı olarak 200°C'ye kadar erimeyen teflon film serilmiştir (Resim 5.3 (b)).
- Sekiz tabakalı takviye kumaşın ağırlığına eşit ağırlıktaki epoksi matris malzemesi ağırlıkça %75'i reçine ve %25'i sertleştirici olacak şekilde hazırlanmıştır. Maksimum mukavemet değerlerine sahip tabakalı kompozit üretmek için matris/fiber ağırlık oranı 1-1,5 arasında olmalıdır. Reçine ve sertleştirici ayrı kaplarda tartıldıktan sonra, aynı



kapta birleştirilerek 400dev/dk. dönme hızında 3dk. Süresince karıştırılmıştır [117]. Bu aşamada yüksek devirde karıştırmak reçine içinde hava karışımına sebep olacağı için uygun değildir (Resim 5.3 (c)).

- Reçine hazırlandıktan sonra sekiz tabakanın her birine eşit miktarda epoksi reçine gelecek şekilde rulo ile fiber üzerine sürülmüştür. Bu işlem epoksi reçinenin kullanım süresini geçmeyecek şekilde 20dk içerisinde tamamlanmıştır (Resim 5.3 (d)).
- Sekizinci tabakanın üstüne kalıp ayırıcı olarak teflon film serilmiştir. Teflon film serilirken kumaş ve teflon film arasında hava kalmamasına dikkat edildi. Daha sonra en üste 2mm'lik çelik sac konulmuştur. Bu işlem tamamlandıktan sonra yarı mamul tabakalı kompozit malzeme kürleşme işlemi için hazır hale gelmiştir (Resim 5.3 (e)).



(a)



(b)



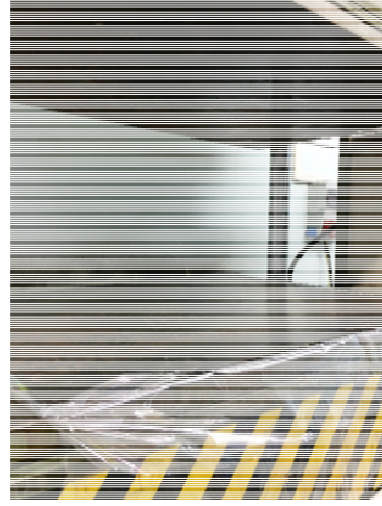
(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Resim 5.3 Tabakalı kompozit üretim aşamaları

Çizelge 5.3'teki veriler göz önünde bulundurularak, kürleşme işlemi için 100°C'de ve 4 saat süresinde ısı-zaman-basınç kontrollü hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Ortam basıncı 6MPa olarak ayarlanmıştır.

- 2mm'lik iki adet saç arasında kürleşmeye bırakılan yarı mamul kompozit plakaların kürleşme işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığında 24 saat süresince soğumaya bırakılmıştır. Hızlı soğuma gerçekleşmesi kompozit plakaların çarpılmasına neden olacağı için üzerlerindeki metal saç plakalar alınmamıştır

Üretilen malzeme çeşitlerinin her birinden 13 adet olmak üzere toplamda 26 adet plaka el yatırması yöntemiyle üretilmiştir (Resim 5.3 (g)). Üretilen tabakalı kompozitlerin ağırlıkça fiber/matris oranları sırasıyla cam için %56 ve karbon için %61'dir.

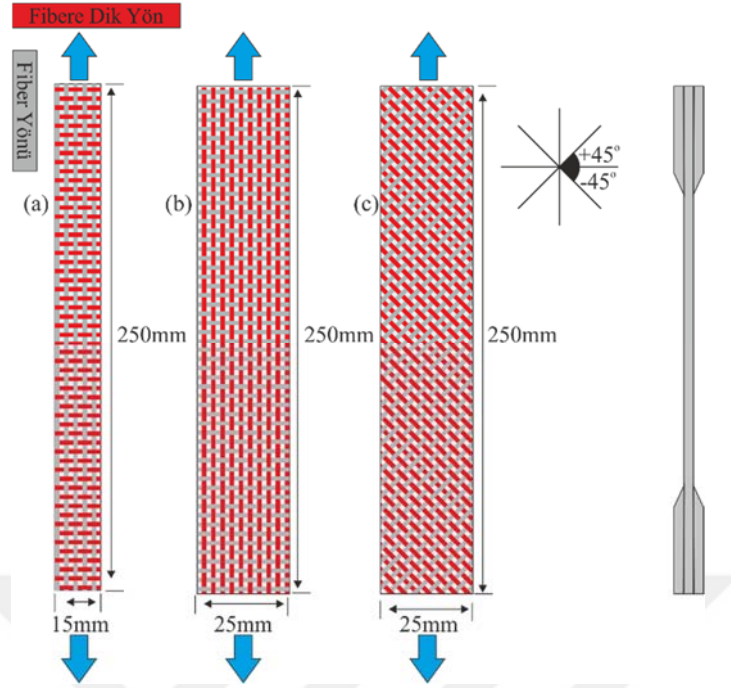
### 5.3. Test Numunelerinin Hazırlanması

Üretilen tabakalı kompozitlerin statik ve dinamik davranışlarını incelemek için numune hazırlanırken tabaka içerisindeki fiber yönlenmesi dikkate alınarak test numunesi hazırlanmıştır. Tabakalı kompozitlerin çekme, basma, kayma, eğilme ve yorulma davranışlarını belirlemek için Çizelge 5.4'teki test standartları esas alınarak test numuneleri hazırlanmıştır.

Çizelge 5.4 Statik ve dinamik test numuneleri için kullanılan standartlar

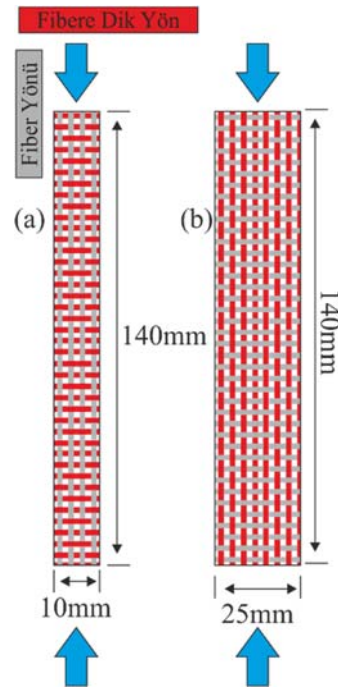
Mekanik Özellik	Kullanılan Standart	Açıklama
Fiber yönündeki elastisite modülü ( $E_1$ )	ASTM D3039	Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials [118]
Fibere dik yöndeki elastisite modülü ( $E_2$ )		
Kayma modülü ( $G_{12}$ )		
Fiber yönü çekme mukavemeti ( $X_t$ )		
Fibere dik yöndeki çekme mukavemeti ( $Y_t$ )		
Fiber yönündeki basma mukavemeti ( $X_c$ )	ASTM D3410	Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading [119]
Fibere dik yöndeki basma mukavemeti ( $Y_c$ )		
3 nokta eğme eğilme modülü ( $E_f$ )	ASTM D7264	Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials [109]
3 nokta eğme mukavemeti ( $\sigma_f$ )		
Yorulma	ASTM D 671 – 93	Standard Test Method for Flexural Fatigue of Plastics by Constant-Amplitude-of-Force [110]

Çekme testlerinde fiber yönü elastisite modülü ( $E_1$ ) ve fiber yönü çekme mukavemeti ( $X_t$ ) için kullanılacak test numunesi boyutları Şekil 5.1 (a)'da, fibere dik yön elastisite modülü ( $E_2$ ) ve fibere dik yön çekme mukavemeti ( $Y_t$ ) için kullanılacak test numunesi boyutları Şekil 5.1 (b)'de ve kayma modülü için kullanılacak test numunesi boyutları Şekil 5.1 (c)'de verilmiştir. Kayma numunesi kesilirken boyutların yanında tabaka içi fiber yönlenmesinin [+45/-45] açılarında olmasına dikkat edilmiştir.



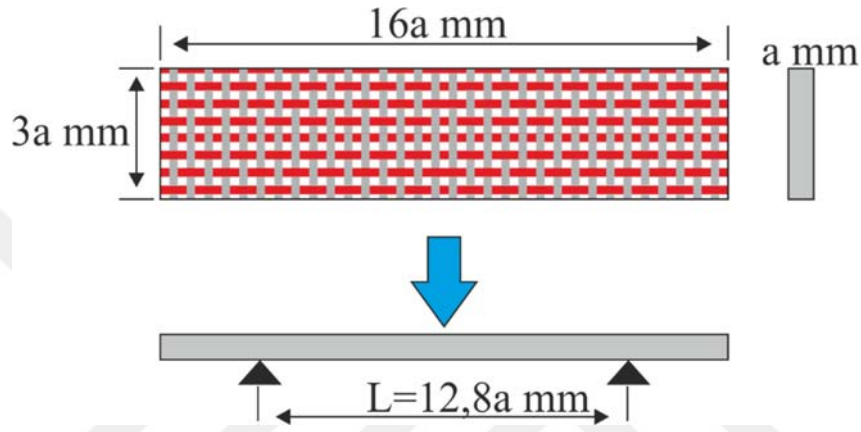
Şekil 5.1 Çekme Test numuneleri (a) fiber yönü, (b) fibere dik yön ve (c) çapraz yön

Basma testlerinde fiber yönü basma mukavemeti ( $X_c$ ) için kullanılacak test numunesi boyutları Şekil 5.2 (a)'da ve fibere dik yön basma mukavemeti ( $Y_c$ ) için kullanılacak test numunesi Şekil 5.2 (b)'de boyutları ile verilmiştir.



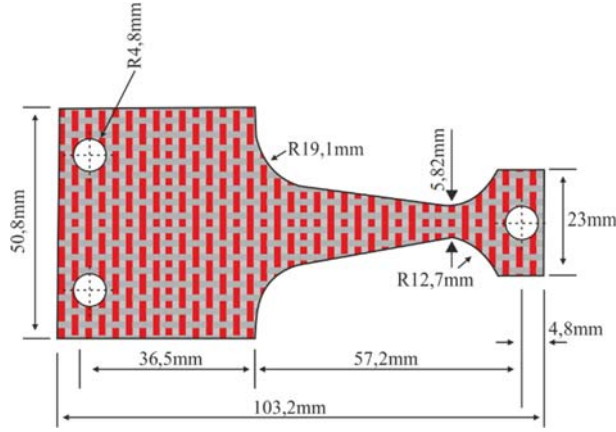
Şekil 5.2 Basma numuneleri (a) fiber yönü ve (b) fibere dik yön

Eğilme test numuneleri için kullanılacak test numunesinin boyut oranları Şekil 5.3’de verilmiştir. Tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme testlerinde kullanılacak standart boyutlarda test numunesi yoktur. Test numunesinin boyutlandırma işlemi üretilen plakanın kalınlığına göre yapılmıştır. Numune genişliği, numune kalınlığının 3 katı, numune boyu ise 16 katı alınmıştır. Test standardında numune boyu: numune kalınlık oranı 16:1, 20:1 ve 32:1 olarak da alınabileceği ifade ediliyor. Boyutlandırma işleminde cam/epoksi malzemeler için ortalama numune kalınlığı 2mm, karbon/epoksi numuneler için 3mm alınmıştır.



Şekil 5.3 3 nokta eğilme test numunesi boyut oranları

ASTM D 671 – 93 standardına göre plastik yapıli malzemelerin sabit genlikte eğilmeli yorulması için kullanılacak aynı forma fakat farklı boyutlara sahip 2 adet test numune türü vardır. Bu farklılığın sebebi, numune kalınlığına bağlı olarak meydana gelen gerilmelerin numune boyunca düzgün bir şekilde dağıtılmasıdır [110]. Çalışma kapsamında kullanılan tabakalı kompozitlerin kalınlığı 3mm’yi geçmediği için şekil 5.4’de gösterilen boyutlardaki numune kullanılmıştır.



Şekil 5.4 Yorulma test numunesi ve boyutları

Tez çalışması kapsamında yapılacak statik ve dinamik deneyler için kullanılacak test numuneleri Uşak Seramik Fabrikasında bulunan su jeti ile kesilmiştir (Resim 5.4). Özellikle yorulma test numunesinin eğimli bir forma sahip olmasından dolayı kesimler bilgisayar kontrollü hassas kesim cihazları ile yapılmalıdır. Kesici takım vasıtası ile gerçekleştirilen kesimlerde sürtünmeden dolayı meydana gelen ısı polimer matris malzemesi için artık gerilmeler meydana getirebilir. Bu sebeple su jeti ile kesim en uygun çözümdür.



Resim 5.4 Su jeti ile test numunesi kesimi

Cam/epoksi ve karbon/epoksi malzemeden kesilen test numunelerinin kesim işlemi tamamlandıktan sonra, çevrenin kompozit malzemeler üzerindeki yıpratıcı etkisini oluşturmak için kesilen test numuneleri %5, %15 ve %25 derişime sahip asidik ( $H_2O+HCl$ ) ve bazik ( $H_2O+NaOH$ ) çözeltilere atılmıştır. Ağzı kapalı kaptta muhafaza edilen numuneler 1ay, 2ay, 3ay ve 4ay süresi boyunca asidik ve bazik ortamda bekletilmiştir.

## 5.4. Statik Testler

### 5.4.1. Tabakalı Kompozitlerin Çekme Dayanımlarının Belirlenmesi

Çekme testleri Uşak Üniversitesinde bulunan 50kN kapasiteli U-Test marka universal çeki-bası cihazının çekme fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Çekme test numunesi için ASTM D3039-76 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials) test standardı kullanılmıştır. Çekme testleri 2mm/dk. çene ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri oda sıcaklığında ve incelenen her bir malzeme parametresi için 3 adet test tekrarı yapılmıştır. Oda koşullarında yapılan testlerden anlamlı çekme modülü ve mukavemet değerini belirlemek için yapılan 3 adet testin ortalaması alınmıştır. Çekme testleri sırasında çekme cihazının bilgisayar yazımı sayesinde her bir numuneye ait saniyenin beşte biri aralıklarında alınan kuvvet-deplasman değerleri kaydedilmiştir. Termoset yapılı polimer reçineler gevrek yapılı oldukları için yüklenme sırasında %uzama değerleri çok düşüktür. Bu sebeple gerilme sırasında meydana gelen kesit daralması hesaba katılmamıştır.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin elastisite modülü, malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini formüle eden Hooke kanunu yardımıyla hesaplanmıştır.

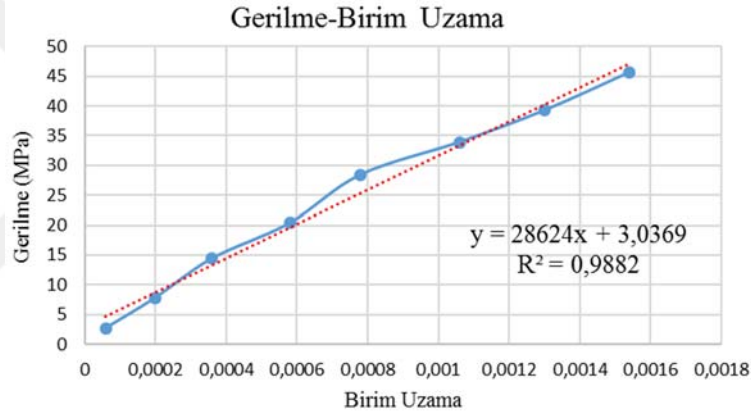
$$\sigma_t = E_x \cdot \varepsilon \quad (\text{Denklem 5.1})$$

Burada  $\sigma_t$  çekme gerilmesi,  $E_x$  x yönündeki elastisite modülü ve  $\varepsilon$  çekme sırasında test numunesinde meydana gelen birim uzamayı ifade etmektedir. Hesaplama ihtiyacı duyulan malzemenin birim şekil değiştirme değeri için ekstansiyometre kullanılmıştır (Resim 5.5). Ekstansiyometre yardımıyla elde edilen elektrik sinyalleri, bağlı olduğu indikatör yardımıyla sayısal değerlere çevrilmiştir. Elde edilen sayısal değerler ekstansiyometrenin ağız aralık değerine bölünerek numunenin birim uzaması belirlenmiştir. Böylece her bir numuneye ait  $\sigma - \varepsilon$  grafiği çizdirilmiştir.  $\sigma - \varepsilon$  eğrisinin lineer bölgedeki eğimi bize malzemenin elastisite modülü değerini vermektedir. Şekil 5.5’de cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme testlerinden elde edilen  $\sigma - \varepsilon$  grafiği örnek olarak verilmiştir.



(a)

Resim 5.5 Ekstansiyometre birim uzama ölçümü



(b)

Şekil 5.5 Gerilme-birim uzama eğrisi

Malzemenin çekme mukavemetini belirlemek için bilgisayar yardımıyla çizdirilen kuvvet-deplasman eğrisinden faydalanılmıştır. Denklem 5.2 de ifade edildiği gibi kuvvet-deplasman eğrisinde fiber kırılma hasarının görüldüğü noktadaki kuvvet değerinin numune kesit alanına bölünmesi ile çekme mukavemeti hesaplanmıştır (Resim 5.6). Şekil 5.5'te cam/epoksi numuneye ait örnek bir gerilme-birim uzama eğrisi verilmiştir. Grafik üzerinde eğrinin denklemini ve R-Kare (belirleme katsayısı) değeri görülmektedir. R-Kare değeri 1'e ne kadar yakınsa denklemin gerçeğe yakınsamasıda o kadar iyi olur.

$$X_t = \frac{F_{hasar}}{A}, Y_t = \frac{F_{hasar}}{A} \quad (\text{Denklem 5.2})$$



Burada  $X_t$  fiber yönü çekme mukavemetini,  $Y_t$  fibere dik yön çekme mukavemetini,  $F_{hasar}$  fiber kırılma hasarı gerçekleştiği andaki kuvvet değeri ve A numune kesit alanını ifade etmektedir.



Resim 5.6 Fiber ve fibere dik yöndeki kırılma hasarları

#### 5.4.2. Tabakalı Kompozitlerin Kayma Dayanımlarının Belirlenmesi

Malzemenin kayma modülünü belirlemek için malzemenin kayma doğrultusundaki birim şekil değişiminin bilinmesi gerekmektedir. Bu değeri deneysel olarak ekstansiyometre kullanarak belirlemek mümkün değildir. Elastik davranış gösteren ortotropik sistemlere kayma modülü matematiksel olarak eksenlere ait elastisite modülü ve Poisson's oranı ile formüle edilebilir [120–122].

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \quad (\text{Denklem 5.1})$$

Burada  $E_{45}$  fiberlerin ( $+45^\circ/-45^\circ$ ) yönlenmesi durumundaki elastisite modülü,  $E_1$  fiber yönü elastisite modülü,  $E_2$  fibere dik yöndeki elastisite modülü ve  $\nu_{12}$  fiber ve fibere dik düzlemdeki Poisson's oranını ifade etmektedir. Kayma modülünü hesaplamak için gerekli olan modül değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Poisson's oranı ise literatürdeki benzer çalışmalar incelenerek 0,32 olarak kabul edilmiştir [120,123,124]. Çapraz yön ( $E_{45}$ ) elastisite modülünü belirlemek için, her bir test parametresi, 3 adet tekrar sayısında ve oda şartlarında test edilmiştir.



Resim 5.7 Kayma testi hasarı

Diğer çekme deneylerinde olduğu gibi fiber kırılma hasarı meydana gelinceye kadar test devam ettirilmiştir. Kayma testlerinde genel olarak hasar şeklinin fiber yönlenmesine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Resim 5.7).

#### 5.4.3. Tabakalı Kompozitlerin Basma Dayanımlarının Belirlenmesi

Bası testleri Uşak Üniversitesinde bulunan 50kN kapasiteli U-Test marka universal çeki-bası cihazında yapılmıştır. Bası test numunesi için ASTM D3410 (Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading) test standardı kullanılmıştır. Bası deneyleri 1,5mm/dk sabit çene basma hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir malzeme tipi için 3 adet deney yapılmıştır (Resim 5.8). Basma testleri sırasında çekme cihazının bilgisayar yazılımı sayesinde her bir numuneye ait saniyenin beşte biri aralıklarında alınan kuvvet-deplasman değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen verilerde bası hasarının meydana geldiği kuvvet değerinin numunenin kesit alanına bölünmesiyle ilgili yöndeki basma mukavemeti belirlenmiştir (Denklem 5.3).

$$X_c = \frac{F_{hasar}}{A}, Y_c = \frac{F_{hasar}}{A} \quad (\text{Denklem 5.3})$$

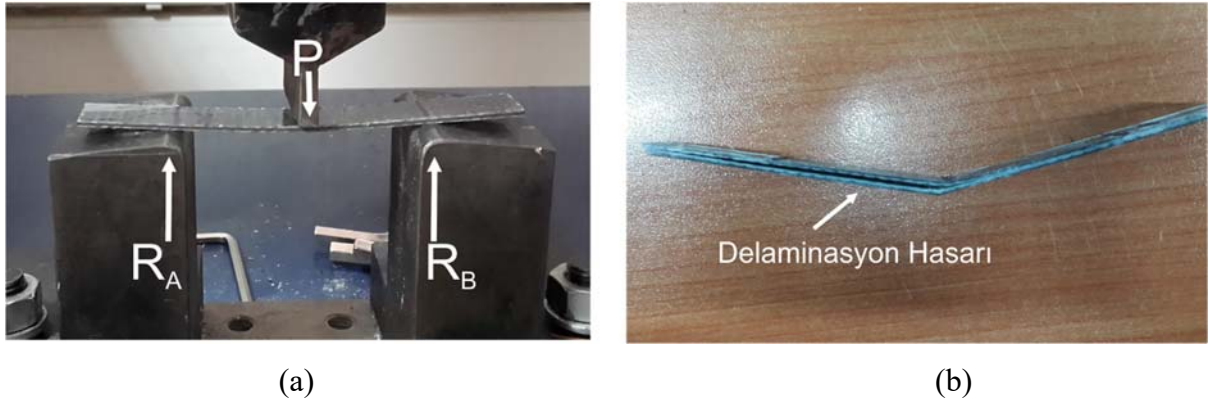
Burada  $X_c$  fiber yönü basma mukavemetini,  $Y_c$  fibere dik yön basma mukavemetini,  $F_{hasar}$  bası hasarının meydana geldiği andaki kuvvet değerini ve  $A$  numune kesit alanını ifade etmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen basma mukavemeti değerlerin ortalaması alınarak anlamlı bası mukavemeti belirlenmiştir.



Resim 5.8 Basma testi hasarı

#### 5.4.4. Tabakalı Kompozitlerin Eğilme Dayanımlarının Belirlenmesi

3 nokta eğilme testleri Uşak Organize Sanayinde faaliyet gösteren Pultech FRP firmasında bulunan 50kN kapasiteli U-Test marka universal çeki-bası cihazında yapılmıştır. Eğilme test numunesi için ASTM D7264 (Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials) test standardı kullanılmıştır. Eğilme deneyleri 1mm/dk sabit çene ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir test parametresi, 3 adet tekrar sayısında ve oda şartlarında test edilmiştir. 3 nokta eğilme testinde cam/epoksi ve karbon/epoksi malzemelerin eğilme modülleri Denklem 4.4'de ve eğilme mukavemetleri Denklem 4.1'e göre belirlenmiştir. Bu değerler test standardında verilen formülasyonlara uygun olarak hesaplanmıştır [109].



Resim 5.9 Eğilme test ve delaminasyon hasarı

3 nokta eğilme testi deney düzeneği ve eğilme hasarı Resim 5.9 (a)' da verilmiştir. 3 nokta eğilme testlerinde fiber kırılma hasarlarının yanında bazı numunelerde tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarlarının olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.9 (b)).

#### 5.4.5. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Mekanik Özelliklerin Doğrulanması

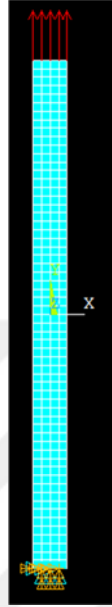
Statik testler kapsamında cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme, basma ve eğilme yüklemeleri altında mekanik davranışları ve dayanım değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, doğru sonuçlar elde etmek için, standartlara uygun numunelerin hazırlanması, test parametrelerinin ilgili cihaza doğru girilmesi, cihazın kalibrasyonunun doğru yapılması ve çevresel koşulların test standardına uygun olması gibi bazı gereklilikler vardır. Araştırmacı ve test cihazından kaynaklanan hataların önüne geçmek adına elde edilen deneysel sonuçlar çeşitli yöntemlerle doğrulanmalıdır. Bu kapsamda deneysel olarak elde edilen verilerin doğruluğu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrulanmıştır. Bu çalışma için Ansys 12.1 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar kapsamında yapılan çalışma sadece test şartlarının standartlara uygun olup olmadığını ve bu deneysel şartlar altında doğru veriler elde edilmediğini doğrulamak için yapılmıştır. Bu yüzden çalışmada sadece herhangi bir ortamda beklememiş (%0) cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme dayanımı, fiber yönü basma dayanımı ve eğilme dayanımı sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmiştir.

Çekme deneyi için Ansys programının yapısal analiz modülü kullanılmıştır. Cam/epoksi tabakalı kompozit gibi ortotropik malzeme yapısına sahip malzemelerin sayısal olarak modellenmesinde SHELL99 kabul eleman tipi kullanılmıştır. Tabakalı yapıların modellenmesinde kullanılan bir eleman tipidir ve maksimum 250 tabakaya kadar ki numunelerin modellenmesinde kullanılabilir. Kullanılan eleman tipi, her düğümde altı serbestlik derecesine sahiptir.

Çekme test numunesinin boyutlarına göre hazırlanan sayısal modelin mekanik özellikleri için deneysel olarak belirlenen, çekme kuvveti altında belirlenen fiber yönü elastisite modülü ( $E_1$ ), fibere dik yön elastisite modülü ( $E_2$ ) ve kayma modülü ( $G_{12}$ ) değerleri kullanılmıştır. Malzemenin şekil değiştirme davranışını ifade eden Poisson's oranı olarak literatürdeki 0.3 değeri esas alınmıştır. Ortotropik bir malzeme 9 farklı değişkenle ifade edilmektedir. Deneysel olarak belirlenemeyen diğer yönlerdeki mekanik özellik değerleri teorik olarak belirlenmiştir [120].

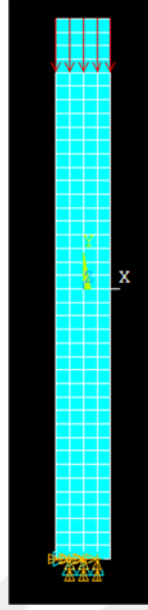
Hazırlanan geometrik model mesh işlemi ile kare elemanlara sahip olacak şekilde elemanlara bölünmüştür. Geometrik model toplamda 849 adet düğüm noktasına sahiptir. Geometrik

model çekme testinde olduğu gibi alt kısmından sabitlenmiş ve üst kısmından her bir düğüm noktasına kuvvet etki edecek şekilde yüklenmiştir. Yük değeri olarak çekme test cihazından elde edilen, cam/epoksi tabakalı kompozitin yük-deplasman eğrisinde malzemenin hasara uğradığı kuvvet değeri kullanılmıştır (Şekil 5.6).



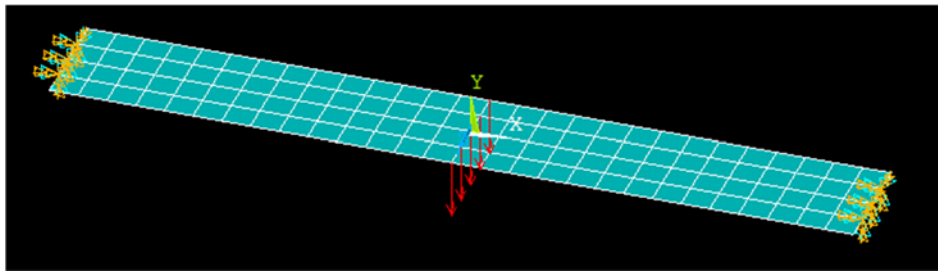
Şekil 5.6 Çekme analizinde kullanılan geometrik model ve sınır koşulları

Cam/epoksi kompozit numunelerin fiber yönü basma dayanımları sayısal olarak belirlenirken, çekme analizinde olduğu gibi geometri modellenmiştir. Mekanik özellik olarak cam/epoksi kompozit malzemenin bası yüklemesi altında belirlenen fiber yönü elastisite modülü ( $E_1$ ), fibere dik yön elastisite modülü ( $E_2$ ) değerleri kullanılmıştır. Hazırlanan geometrik model mesh işlemi ile kare elemanlara sahip olacak şekilde elemanlara bölünmüş ve bası analizi için hazırlanan geometrik model toplamda 569 adet düğüm noktasına sahiptir. Test koşullarına uygun olması açısından geometrik modelin alt kısmının hareket ve dönmeleri kısıtlanmıştır. Bası kuvveti olarak, malzemenin deneysel olarak hasara uğradığı yük değeri modelin üst tarafındaki düğüm noktalarına eşit şekilde dağıtılarak uygulanmıştır (Şekil 5.7).

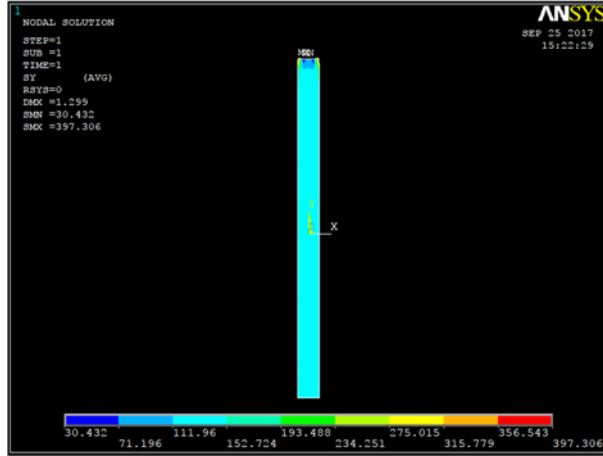


Şekil 5.7 Basma analizinde kullanılan geometrik model ve sınır koşulları

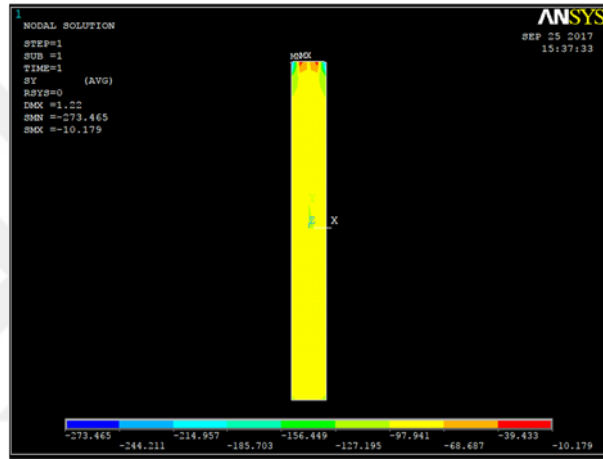
3 nokta eğilme analizini modellemek için cam/epoksi kompozit numune yukarıda verilen analizlerdeki esaslara göre modellenmiştir. 3 nokta eğilme testinde test numunesinin sağ ve sol kenarı sabit, kuvvet numunenin ortasına gelecek şekilde bası yönünde uygulanmıştır. Analizde deneysel şartlara uygun olarak geometrik modelin hareket etmeyecek noktaları sabitlendi ve kuvvet numunenin ortasındaki düğüm noktalarına eşit değerde dağıtılarak bası yönünde uygulanmıştır (Şekil 5.8). Kuvvet değeri olarak, deneysel olarak cam/epoksi test numunesinin hasara uğradığı kuvvet değeri esas alınmıştır.



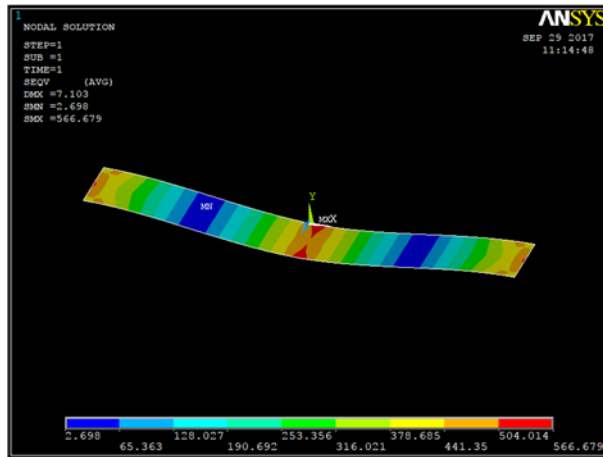
Şekil 5.8 3nokta eğilme analizinde kullanılan geometrik model ve sınır koşulları



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.9 Sonlu elemanlar analiz sonuçları (a) çekme analizi, (b) basma analizi ve (c) 3 nokta eğilme analizi

Sonlu elemanlar analizinden elde edilen test sonuçları Şekil 5.9 da verilmiştir. Test sonuçlarının gerçek değerler ile kıyaslanması ve deneysel değerlere göre yüzde hata oranları Çizelge 5.5'te verilmiştir. Karşılaştırmadaki hata oranları incelendiğinde maksimum hatanın %14,08 ile 3 nokta eğilme analizinde olduğu görülmektedir. Ortotropik bir yapının modellenmesinde gerek duyulan deneysel parametreler, izotropik malzemelere göre fazladır. Sonlu elemanlar çalışması için her parametre deneysel olarak hesaplanamamış, bazı parametrelerin de teorik olarak bulunmuş ve bazıları ise literatürdeki benzer çalışmalardan alınmıştır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, hata miktarlarının kabul edilebilir seviyede olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.5 deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarının karşılaştırılması

Test Türü	Deneysel Sonuç (MPa)	Sonlu Elemanlar Sonuç (MPa)	Hata miktarı (%)
Çekme Testi	360,665	397,306	9,31
Basma Testi	244,561	273,465	10,62
3 Nokta Eğilme Testi	494,452	566,679	12,74

Sonlu elemanlar çalışması ile deneysel parametrelerin doğru şekilde tatbik edilip, test sonuçlarının doğruluğu kanıtlanmış oldu. Ayrıca çekme dayanımı, basma dayanımı ve 3 nokta eğilme dayanımı hesabı için kullanılan formüllerinde uygunluğu kanıtlandı.

### 5.5. Dinamik Testler

Dinamik testler kapsamında gerçekleştirilen eğilmeli yorulma testleri malzemenin yorulma sınırlarını zorlayacak en kötü durum olan tam değişken ( $R=-1$ ) yükleme durumunda gerçekleştirilmiştir. Fiber takviyeli kompozitlerin eğilmeli yorulma davranışları ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalar incelendiğinde test frekanslarının 4hz, 10hz, 25hz arasında değiştiği görülmektedir [25,30,36]. Fakat yüksek test frekansında test etmek numune bünyesinde ısınmaya ve sonucunda termal gerilmelere sebebiyet vermektedir [31]. Yüksek frekansta meydana gelebilecek termal etkilerden kaçınmak için eğilmeli yorulma testleri 5hz'de üçgen dalga girdisi formunda gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi tabakalı kompozit yapıların kullanıldığı uçak kanatları, rüzgar türbin kanatları veya gemi pervaneleri gibi yapılar dinamik olarak eğilmeye zorlanmaktadır. Bu yapıların çalışma koşulları göz önünde bulundurulduğunda düşük frekanslarda zorlanmaktadır. Bu bağlamda

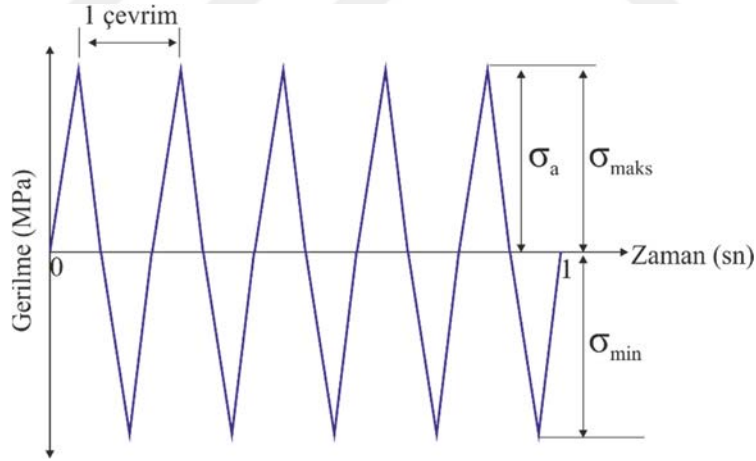


seçilen test frekansı gerçek şartları karşılayabilecek yeterliliktedir. Her bir test parametresi, 5 adet tekrar sayısında ve oda şartlarında test edilmiştir.

#### 5.5.1. Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Dayanımları ve Ömürlerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında geliştirilen eğilmeli yorulma test cihazı deplasman kontrollüdür. Yorulma testleri malzemenin statik dayanımının altındaki gerilme değerlerinde yapılmaktadır. Çalışma kapsamında cam/epoksi ve karbon/epoksi numunelere ait yorulma mukavemeti-yorulma ömrü davranışını karakterize eden S-N eğrilerini elde etmek için test numuneleri malzemenin statik 3 nokta eğilme dayanımlarının %80, %70, %60, %50 ve %40'ına tekabül eden gerilmelerde tam değişken olarak zorlanmıştır.

Test esnasında deney numunesi yorulma test makinesine bir ucu serbest, diğer ucu sabit olacak şekilde ankastre bir formda bağlanmaktadır. Hareketli tabla ön tarafa geldiğinde numune çekiye, arka tarafa gittiğinde basıya zorlanmaktadır. Eğilme gerilmesinin 1sn'deki değişimleri Şekil 5.10'da ifade edilmiştir. Sıfır pozisyonu noktasından harekete başlayan numune öne ve arkaya doğru eşit yer değiştirmeler yapmaktadır. Böyle bir durumda numunedeki bası ve çeki gerilmelerinin mutlak değerleri eşit olmaktadır.



Şekil 5.10 1sn'lik trapez yükleme frekans eğrisi

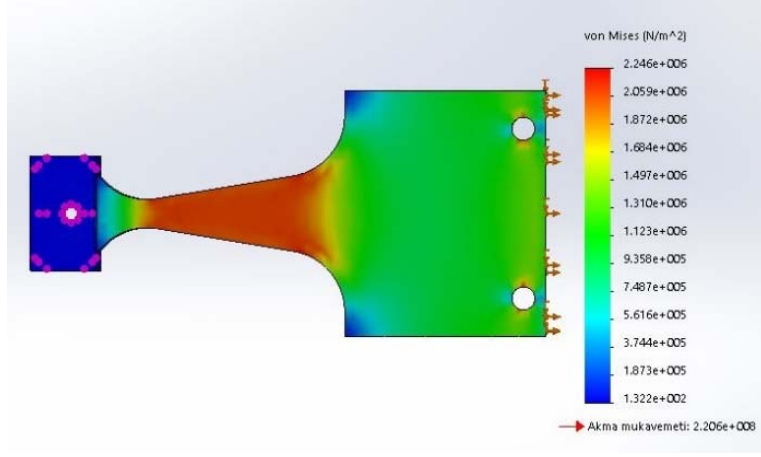
Tam değişken gerilme olarak adlandırılan bu yükleme biçiminde R gerilme gelinliğini ifade etmek üzere;

$$R = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{min}} = -1 \quad (\text{Denklem 5.4})$$

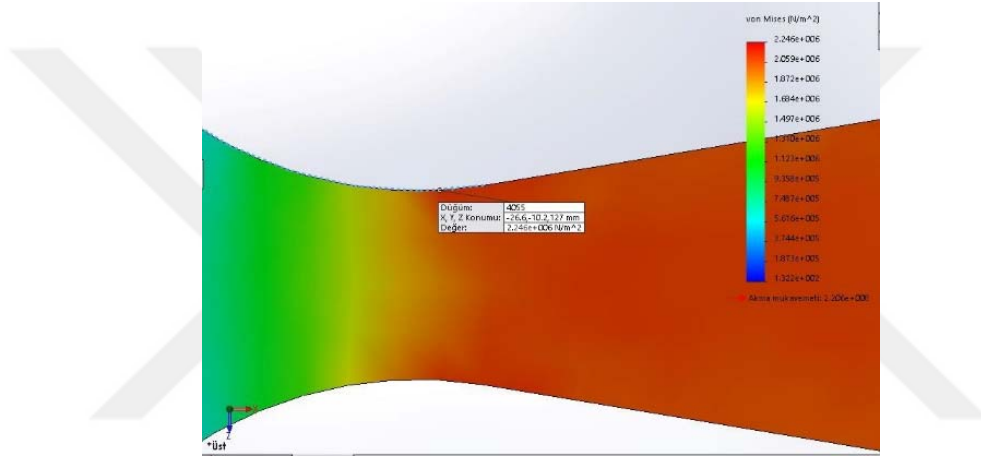
Tam değişken yükleme altında cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma dayanımlarının belirlenmesi detaylı olarak Bölüm 4'te 4.4. Performans ve Kalibrasyon için Yorulma Testleri başlığı altında anlatılmıştır. Bu bölümde anlatılan yorulma hasarı Denklem 4.5'te formüle edilmiş ve denklemdeki her bir parametrenin ne anlama geldiği bahsedilmiştir. Denklemdeki L yükün uygulandığı yerden yorulma hasar bölgesine olan mesafeyi ifade etmektedir. L mesafesinin hesabı "Performans ve Kalibrasyon Testleri" dışında kalan bir konu olduğu için mesafe hesabı bu başlık altında anlatılacaktır.

Yük altında çalışan mekanik sistemlerde kuvvet kolu uzadığı zaman kuvvetin oluşturduğu etkide (moment, tork) artmaktadır. Eğer yorulma test numunesi düzgün bir forma sahip olsaydı yorulma hasarına neden olan maksimum gerilme değeri numunenin ankastre olarak sabitlendiği bölgeye yakın yerlerde meydana gelecekti. Fakat eğilmeli yorulma test standardına göre verilen numune düzgün bir geometriye sahip değildir. Öyle ki numune ankastre bölgesine doğru kuvvet kolu mesafesi (L değeri) artmasına karşın numunenin kesit genişliği değeri (b değeri) de artmaktadır. Bu durumda maksimum gerilmenin oluştuğu yeri tespit etmek için sonlu elemanlar analizinden faydalanılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için Solidworks Simulink programından faydalanılmıştır. Nümerik model gerçeğe uygun olacak biçimde geniş kesitli tarafından sabitlenmiş ve diğer tarafından statik olarak eğilmeye zorlanmıştır. 3 boyutlu mesh elemanın kullanıldığı nümerik modelde 4378 tane nod vardır. Malzeme özelliği olarak Solidworks'n malzeme kütüphanesinde yer alan tabakalı kompozitin mekanik özellik değerleri kullanılmıştır.

şekil 5.11'de eğilmeli yükleme maruz bırakılmış yorulma numunesi üzerindeki von Mises gerilim dağılımları gözükmektedir. Yüksek gerilmelerin ağırlıklı olarak numunenin orta kısmında meydana geldiği, eğilme kuvvetinin uygulandığı bölgeye yakın kısımlarda ise düşük gerilmelerin yoğunlukta olduğu gözükmektedir. şekil 5.11 (b)'de düğüm noktaları incelendiğinde maksimum gerilmenin numunenin dış kenarında ve kesit alanının en dar olduğu yere yakın yerde oluştuğu görülmektedir. Numunenin sabitlendiği noktadan, maksimum gerilmenin oluştuğu yere olan mesafe  $L=22,77\text{mm}$  olarak belirlenmiştir.



(a)



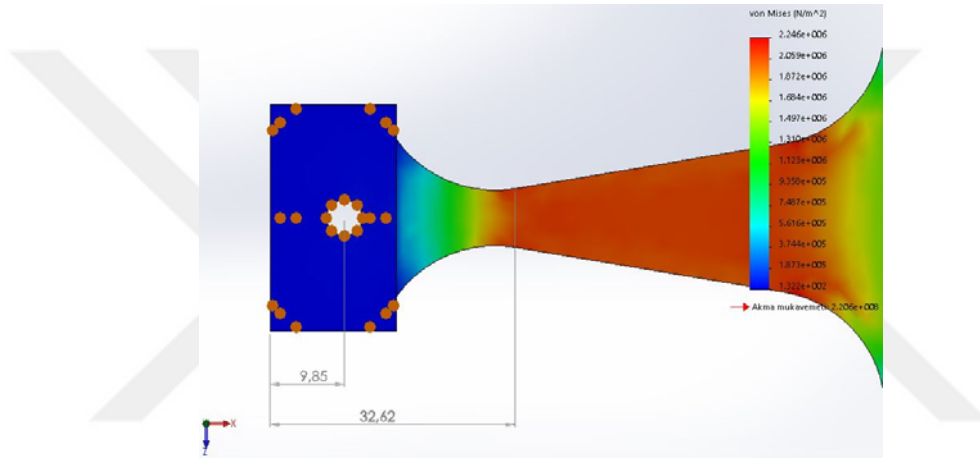
(b)

Şekil 5.11 Eğilmeli yükleme altında yorulma numunesinde oluşan von Mises gerilim dağılımı

Şekil 5.12’de deneysel ve sonlu elamanlardan elde edilen hasar şekli ve gerilme dağılımı ifade edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucunda maksimum gerilmenin meydana geldiği bölge ile deneysel olarak yorulma kırılmasının meydana geldiği bölgenin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel ve sonlu elemanlar sonucunun uyumlu olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.12 (a) Deneysel ve (b)sonlu elemanlar hasar karşılaştırması

Termoset matrisli tabakalı kompozit malzemeler gevrek bir yapıya sahip olsalar da yükleme durumuna bağlı olarak her zaman gevrek bir kırılma şeklinde hasara uğramayabilirler. Eğilmeli yorulma testleri sırasında tabakalı kompozitlerde 2 farklı hasar şekli meydana gelmiştir. Statik 3 nokta eğilme mukavemetine yakın gerilmelerde eğilmeye zorlanan test numunelerinde kırılma meydana gelmiştir. Bu tip hasar şekillerinde kırılma hasarı gerçekleşene kadar geçen çevrim sayısı numunenin yorulma ömrü olarak kabul edilmiştir.

Düşük gerilmelerde eğilme yorulmasına zorlanan numuneler bu çalışma için kabul edilen teorik ömür olan  $10^6$  çevrim sayısına kadar zorlansalar da numunelerde herhangi bir kırılma meydana gelmemiştir. Bu tip numunelerde delaminasyon hasarı meydana gelmiştir. Delaminasyon meydana gelen numunelerin testlerine devam edildiğinde delaminasyon

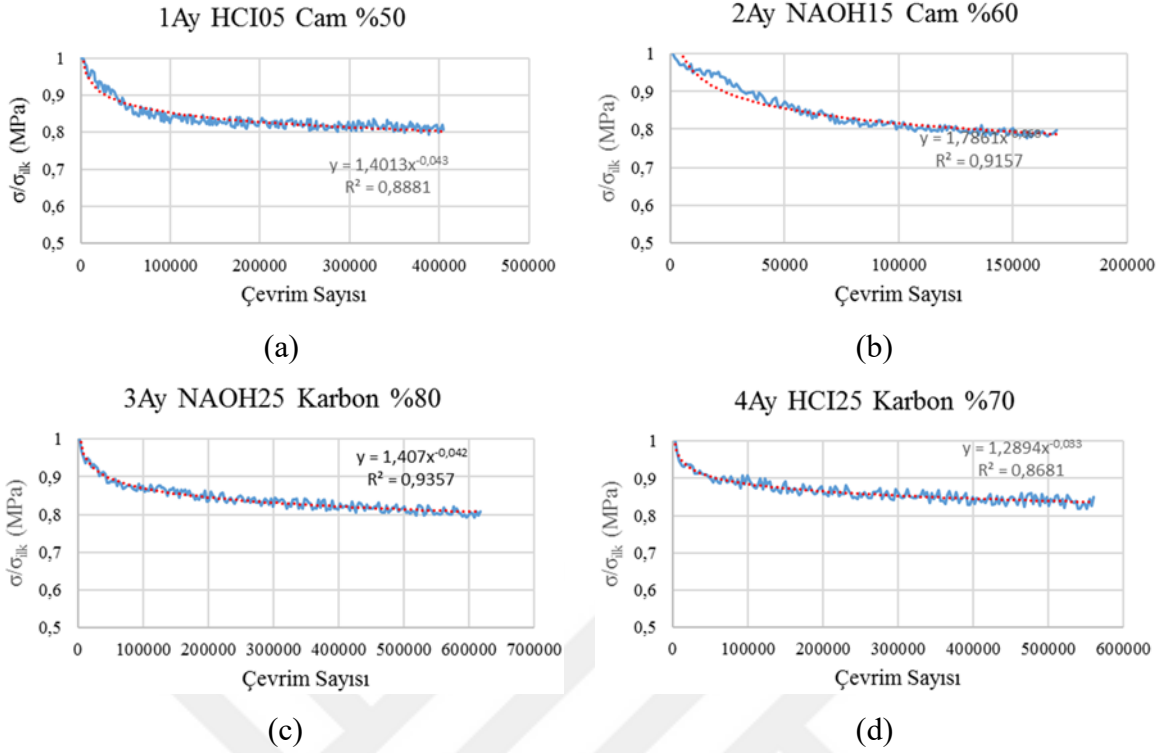
alanında büyüme görülmüş, buna karşın numunenin şekil değişimine gösterdiği direnç azalmıştır.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında bu tür durumlarda yorulma hasar tespiti için farklı yöntemler geliştirmişlerdir. Neubert ve arkadaşları [125] yaptıkları çalışmada kompozit yapılarda hasar gelişimi sırasında malzeme bünyesinde meydana gelen sıcaklık değişimlerini incelemişlerdir ve hasar tespiti için termometrik bir metot geliştirmişlerdir. Vavouliotis ve arkadaşları [126] yorulma hasarı için malzemedeki elektriksel direnç değişimini esas almışlardır. Abry ve arkadaşları [127] da yaptıkları çalışmada aynı metodu esas almışlardır. Ayrıca Weber ve Schwartz [128] yaptıkları çalışmada kompozit malzemelerin yorulma sırasında öz dirençlerindeki değişim ile eğilme modül değişimini doğrulamışlardır.

Kompozit malzemelerin yorulmasını ifade eden diğer bir yöntem ise yorulma sonucu malzemedeki meydana gelen rijitlik kaybını esas alan yorulma kriteridir. Belingardi ve arkadaşları [36], Abd Allah ve arkadaşları [129], Catangiu [130], Paepegem ve Degrieck [113,131] kompozit malzemelerin yorulma ömürlerini belirlerken malzemedeki rijitlik kaybını esas almışlardır.

Khashaba ve arkadaşları [25] %15'lik rijitlik kaybını, Koricho ve arkadaşları [30] %25'lik rijitlik kaybını, Belingardi ve arkadaşları [36] %15'lik rijitlik kaybını ve Selmy ve arkadaşları [111] %20'lik rijitlik kaybını yorulma hasar kriteri olarak kabul etmişlerdir. Ayrıca ISO 13003:2003 numaralı test standardında fiber takviyeli plastiklerde %5-%20 arasındaki rijitlik kaybının yorulma hasarı olarak kabul edilebileceğini önermektedir [132]. Tabakalı kompozitlerin eğilmeli yorulma davranışları ile ilgili yapılan literatürdeki çalışmalar ve deneylerden elde edilen veriler göz önüne alınarak çalışma kapsamında kırılmayan numuneler için %20'lik rijitlik kaybı hasar kriteri olarak esas alınmıştır.

Şekil 5.13'de farklı malzeme, farklı ortam şartları ve farklı yükleme koşulları için eğilmeli yorulma testlerinden yapılan elde edilen rijitlik kaybı grafikleri verilmektedir. Grafikler incelendiğinde %20'lik rijitlik kaybindan sonra numunede gelişen hasarlar neticesinde rijitlik kaybının artık ilerlemediği görülmüştür.



Şekil 5.13 Yorulma testlerinden elde edilen rijitlik kayıpları

Yukarıda anlatıldığı gibi eğilmeli yorulma testlerinden elde edilen veriler ışığında malzemenin yorulma mukavemeti ve yorulma ömrü hesaplandı. Bu değerle yatay eksen yorulma ömrü, dikey eksen yorulma mukavemetini göstermek üzere logaritmik bir ölçekte bir araya getirildi. Malzemenin yorulma karakteristiğini ifaden eden bu S-N eğrisi bu şekilde elde edildi. Ayrıca, deneysel yorulma eğrileri Denklem 5.5’de ifade edilen Power Law fonksiyonu ile matematiksel olarak tanımlanır [83,90,133].

$$S_a = A(N_f)^{-B} \quad (\text{Denklem 5.5})$$

Burada  $S_a$  yorulma mukavemetini,  $N_f$  yorulma ömrünü, A ve B parametre değerleri ise logaritmik regresyon katsayılarını belirtmektedir. Her malzeme tipi, ortam koşulu ve bekleme süresi için yapılan eğilmeli yorulma testlerinden elde edilen S-N eğrileri Power Law fonksiyonu ile matematiksel olarak ifade edilmiştir.

## 5.6. Tabakalı Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Ölçümleri

Hazırlanan test numunelerini ağırlıkça %5, %15 ve %25 yoğunluğa sahip HCl ve NaOH çözeltilerinde 1ay, 2ay, 3ay ve 4ay süre boyunca bekletildi. Farklı derişimlerdeki sulu çözeltilerde bekleyen numuneler ne miktarda nem aldı ya da bu ortamların malzeme

bünyesinde ne gibi fiziksel tahribatlar meydana getirdiği ağırlık kayıplarına bakılarak analiz edildi.

Bu kapsamda ilk olarak bekletme kabına konmadan önce her bir numunenin ilk ağırlığı 1/10000 gram hassasiyete sahip tartı ile tartılarak kaydedildi. Bekleme süresi tamamlanan numuneler buldukları ortamdan çıkartıldı. Çıkartılan numuneler saf su ile yıkanarak üzerlerindeki çözelti kalıntılarından arındırıldı. Temizlenmiş ıslak numuneler tekrar tartılarak ıslak ağırlıkları kaydedildi. Ardından 10 gün boyunca 25°C'deki laboratuvar ortamında kurutulmaya bırakıldı (Resim 5.10).



Resim 5.10 Kurumaya bırakılan cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit numuneler

Kuruyan numunelerin kuru ağırlıkları tekrar tartılarak kaydedildi. Her ay 900 defa olmak üzere toplamda 3600 adet tartma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir deney grubu için 25 adet deney numunesi olmak üzere toplamda 1200 adet numune tartılmıştır. %kütle kaybı ve %nem alma miktarları 25 adet ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Denklem 5.6 kullanılarak %nem alma miktarları ve Denklem 5.7 kullanılarak %kütle kaybı belirlenmiştir.

$$\% \text{ nem alma} = \frac{m_{\text{ıslak}} - m_{\text{kuru}}}{m_{\text{ilk}}} \times 100 \quad (\text{Denklem 5.6})$$

$$\% \text{ kütle kaybı} = \frac{m_{\text{ilk}} - m_{\text{kuru}}}{m_{\text{ilk}}} \times 100 \quad (\text{Denklem 5.7})$$

Burada  $m_{ilk}$  numunenin sulu çözelti ortamına konulmadan önceki ilk ağırlığını,  $m_{islak}$  numunelerin sulu çözelti ortamından çıkarıldıktan sonraki ağırlığını ve  $m_{kuru}$  numunelerin laboratuvar ortamında kurutulduktan sonraki ağırlığını ifade etmektedir.

#### 5.6.1. Hidroklorik Asit (HCl) ve Sodyum Hidroksit (NaOH) Ortamları

Hidroklorik asit, hidrojen ve klor elementlerinden oluşan, oda sıcaklığı ve normal basınçta sıvı halinde bulunan kimyasal bir bileşiktir. Halk arasında tuz ruhu olarak da bilinir. 9. yüzyılda Cabir bin Hayyan tarafından keşfedildi. Sanayi Devrimi sırasında, sanayideki önemi keşfedilen asit, önce Leblanc işlemi, sonrasında Solvay işlemi ile sanayi alanında üretilmeye başlandı. Hidroklorik asit, tarihte yeni kolaylıkların keşfinde önemli roller üstlendi. Günümüzde PVC'den çeliğe, organik madde üretiminden gıda sektörüne kadar hemen hemen tüm alanlarda hidroklorik asit kullanılmaktadır.

Hidroklorik asit, oda sıcaklığında bir litre suda, yaklaşık 450 litre gibi çok yüksek oranda çözünür. Hidroklorik asit tipik bir asit özelliği olarak çinko, demir, magnezyum ya da alüminyum gibi birçok metale etki ederek, hidrojen açığa çıkarır. Derişik hidroklorik asit, sıvı veya katı halde organizmalar için büyük tahribata neden olabilmektedir. Gaz halindeki bir miktar hidroklorik asidin solunumu baştan sona tüm solunum sistemini tahrip edebilmektedir. Sıvı halde de döküldüğü çoğu yüzeyi eritmektedir. Hidroklorik asit ile çalışılırken, eldiven ve koruyucu kıyafetlerin giyilmesi, hidroklorik asitten kaynaklanabilecek tahribatları düşürmekte önemlidir. Hidroklorik asidin vereceği tahribat, asidin derişimiyle alakalıdır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki çevre birimlerine göre, hidroklorik asit, toksin maddeler arasında yer alır. %10-25 arasındaki derişimlerde tahriş edici ve %25'ten sonraki derişimlerde ise aşındırıcı özelliğe sahiptir.

Sodyum hidroksit, beyaz renkte nem çekici bir maddedir. Sodyum hidroksit ilk olarak 1807'de İngiltere'de keşfedilmiştir. NaOH formülüyle gösterilir. Suda kolaylıkla çözünür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. İnsan dokusuna kaşındırıcı bir etkisi vardır. Endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır.

Sodyum hidroksit, temizlik amaçlı kullanılır ve çoğu zaman deterjan ile sabunların içerisinde yer alır. Ancak yanıcı özelliği olduğu için kişilerin sodyum hidroksite karşı tedbirli olmaları önerilir. Sodyum hidroksit saf halindeyken yani herhangi bir bileşen ile karıştırılmadan direk



olarak vücuda temas ettirilmemelidir ve solunmamalıdır. Özellikle solunması halinde kişilerde baş dönmesi ve bayılma gibi komplikasyonlara yol açabilir. Böyle bir durum olması halinde kişilerin hemen açık havaya çıkartılması ve oksijen almaları tavsiye edilir. Sodyum hidroksit aynı zamanda güçlü yağ çözme özelliği taşıdığından paslanmaz çeliklerin temizlenmesinde kullanılabilir.

Doğada birçok madde çevresel etkilerden dolayı asidik veya bazik etkilere maruz kalmaktadır. Endüstride birçok yapıda kullanılan cam ve karbon fiberlerde bu etkilere maruz kalmaktadırlar. Yukarıda da belirtildiği gibi asit ve bazik ortamları oluşturmak için kullanılan HCl ve NaOH'ın maddeler üzerinde tahrip edici özelliği vardır. Bu yüzden fiber takviyeli kompozitlerin bu ortamlardan etkilenme dereceleri bilinip malzeme seçimi, boyutlandırma ve servis ömürleri bu değerlere göre tayin edilmelidir.

## 6. BÖLÜM SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

### 6.1. Statik Testler

#### 6.1.1. Tabakalı Kompozitlerin Çekme Testleri

##### 6.1.1.1. Fiber Yönü Elastisite Modül Değerleri ( $E_1$ )

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme testlerinden elde edilen fiber yönü elastisite modülü ve standart sapma değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Buna göre maksimum elastisite modül değeri 32636,45MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum elastisite modül değeri ise 18986,46MPa olarak %25 derişime sahip HCI asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

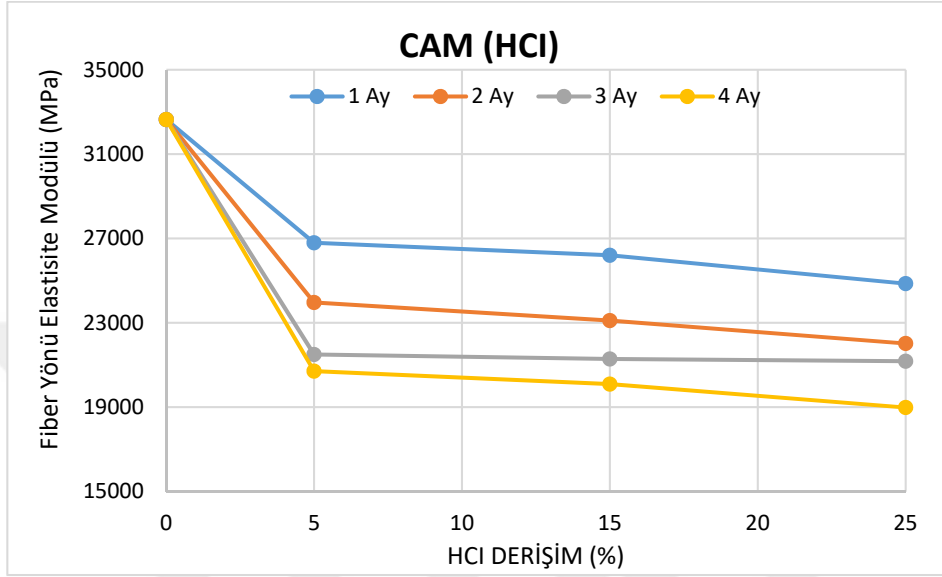
Çizelge 6.1 Cam/epoksi fiber yönü elastisite modül ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCI (MPa)			NAOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	32636,45	-	-	-	-	-	-
	(580,80)	-	-	-	-	-	-
1	-	26796,73	26200,92	24859,93	30948,72	30839,39	28651,29
	-	(902,90)	(936,04)	(1060,05)	(1648,85)	(747,94)	(543,13)
2	-	23967,94	23105,57	22025,25	27165,94	27165,94	26703,58
	-	(804,46)	(133,41)	(862,52)	(1293,38)	(1293,38)	(1024,50)
3	-	21497,70	21290,79	21182,34	25251,28	24369,92	23465,41
	-	(943,49)	(1262,83)	(659,10)	(502,94)	(734,59)	(21,63)
4	-	20711,65	20098,37	18986,46	22640,20	22016,83	22046,66
	-	(848,15)	(427,03)	(727,04)	(642,60)	(306,99)	(785,07)

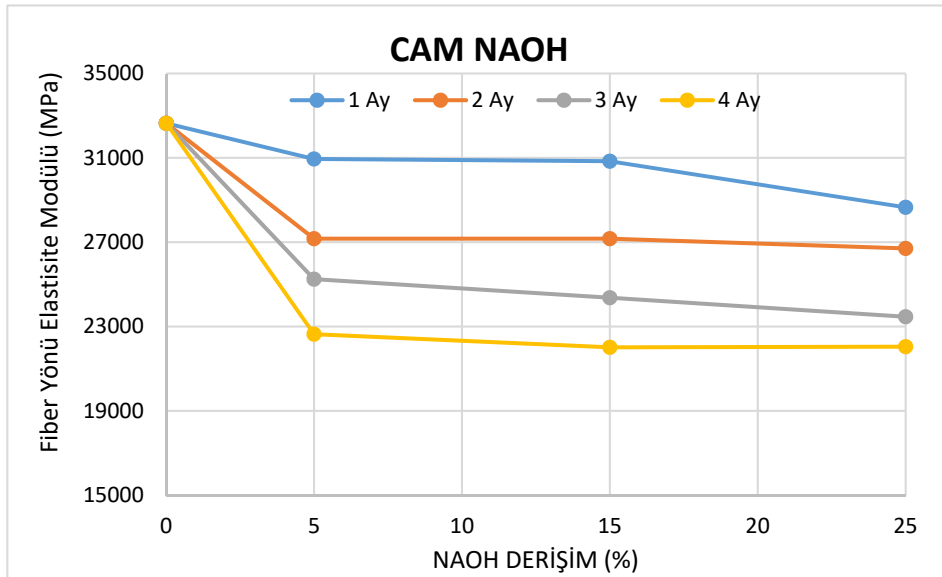
\*(standart sapma)

Şekil 6.1’de farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamların ve bu ortamlardaki bekleme sürelerinin cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü elastisite modülleri üzerindeki etkileri verilmiştir. Buna göre çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça fiber yönü elastisite modül değeri düşmektedir. Asit ve bazda bekleyen cam/epoksi tabakalı kompozit numunelerin fiber yönü elastisite modüllerindeki değişim beraber incelendiğinde çözelti derişiminden daha çok bekle süresinin daha etkili olduğu söylenebilir. Eşit bekleme süresinde ve eşit derişimlerde asit ve bazda bekleyen cam/epoksi numunelerin fiber yönü elastisite modül değerleri karşılaştırıldığında baz da bekleyen numunelerde maksimum %21,24’e kadar daha yüksek fiber yönü elastisite modül değerine sahip olduğu görülmektedir.

Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin fiber yönü elastisite modül değerleri asit ve baz çözeltilisinde bekleyen numunelerin fiber yönü elastisite modül değerleri ile kıyaslandığında, asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %41,82 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değer %32,45 olduğu gözükmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.1 Cam/epoksi tabakalı kompozitleri fiber yönü elastisite modül değışimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü elastisite modül ve standart sapma değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. En yüksek elastisite modül değeri olan 61954,47MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. En düşük elastisite modül değeri ise 50074,04MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

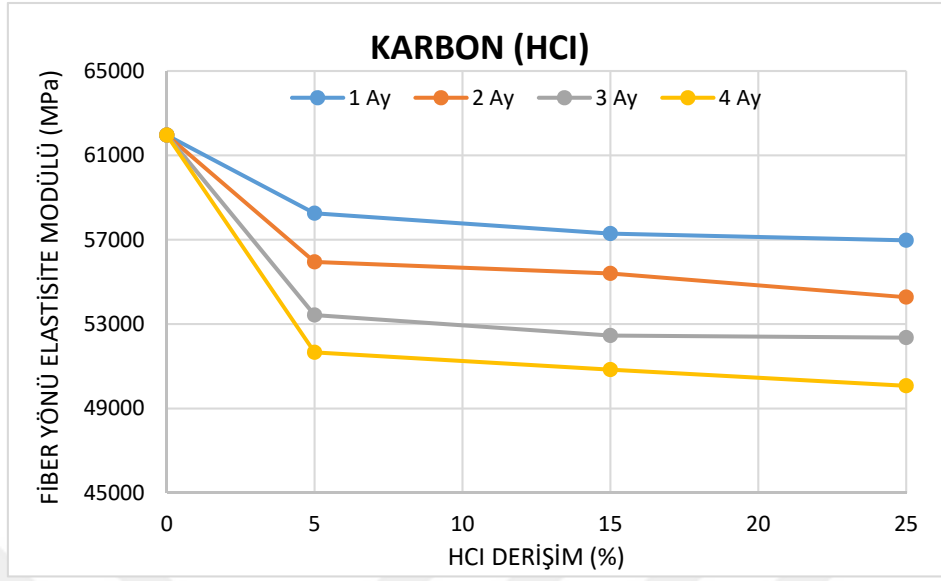
Çizelge 6.2 Karbon/epoksi fiber yönü elastisite modül ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	61954,47	-	-	-	-	-	-
	(2843,48)	-	-	-	-	-	-
1	-	58255,74	57287,13	56973,96	60607,60	59686,32	58440,29
	-	(1072,74)	(1284,37)	(1831,89)	(706,96)	(1779,79)	(1085,55)
2	-	55950,17	55402,59	54279,68	57406,91	56721,89	55410,02
	-	(962,71)	(1173,15)	(1670,25)	(541,69)	(1432,95)	(519,49)
3	-	53427,56	52460,74	52356,75	54991,45	54767,84	54560,44
	-	(1386,08)	(608,54)	(827,53)	(1601,34)	(587,71)	(585,12)
4	-	51659,48	50840,74	50074,04	54138,34	53494,73	53007,34
	-	(939,00)	(1883,90)	(2546,36)	(461,15)	(1143,41)	(338,95)

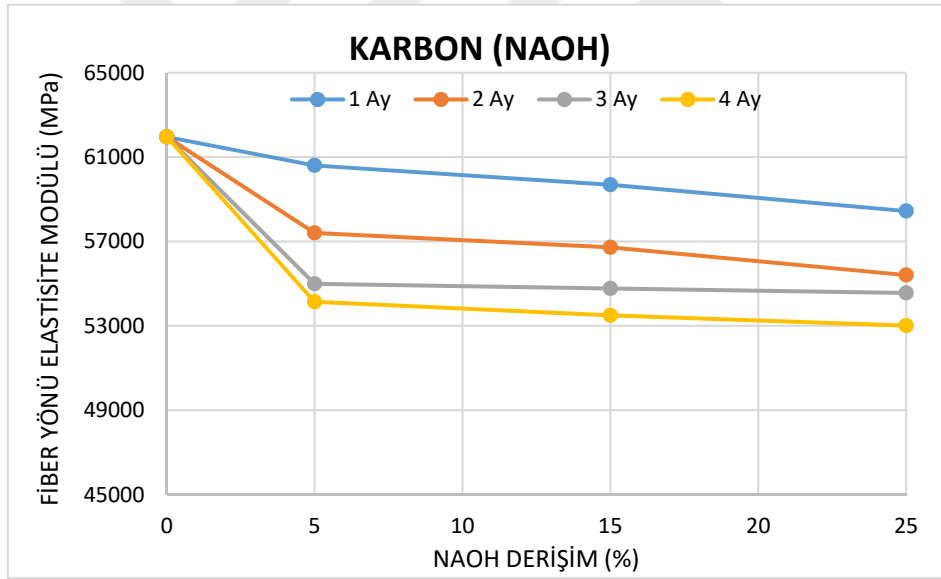
\*(standart sapma)

Asidik ve bazik ortam derişimlerinin ve bekleme sürelerinin karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü elastisite modülleri üzerindeki etkileri Şekil 6.2’de verilmiştir. Şekil 6.2’deki grafikleri incelendiğinde, çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça fiber yönü elastisite modül değeri düşmektedir. Asit ve baz çözeltileri için maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmektedir. Bu ortamda bekleyen numunelerin fiber yönü elastisite modül değerleri ile hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin kıyaslandığında, asit ortamı için maksimum modül değeri kaybı %19,18 olurken, bazik ortamda bekleyen numuneler için ise kayıp değeri %14,44 olmuştur.

Asit ve bazda bekleyen karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü elastisite modüllerindeki değişim değerleri farklı olsada, bekleme süresine ve derişime karşı gösterdiği davranışın benzer olduğu görülmektedir. Eşit bekleme süresinde ve eşit derişimlerde asit ve bazda bekleyen karbon/epoksi numunelerin fiber yönü elastisite modül değerleri karşılaştırıldığında baz da bekleyen numuneler asitte bekleyen numunelere göre maksimum %5,86’ya kadar daha yüksek fiber yönü elastisite modül değerine sahip olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.2 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü elastisite modül değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

### 6.1.1.2. Fiber Yönü Çekme Dayanım Değerleri ( $X_i$ )

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme testlerinden elde edilen maksimum fiber yönü çekme mukavemeti 360,67MPa, minimum değer ise 166,77MPa olarak bulunmuştur. Maksimum değer herhangi bir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilirken, minimum değer 4ay süresince %25'lik asit ortamında bekletilen numunelerden elde edilmiştir. Diğer ortam koşulları ve bekleme süreleri için fiber yönü çekme dayanımı değerleri ve bu değerlere ait standart sapmalar Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Cam/epoksi fiber yönü çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri

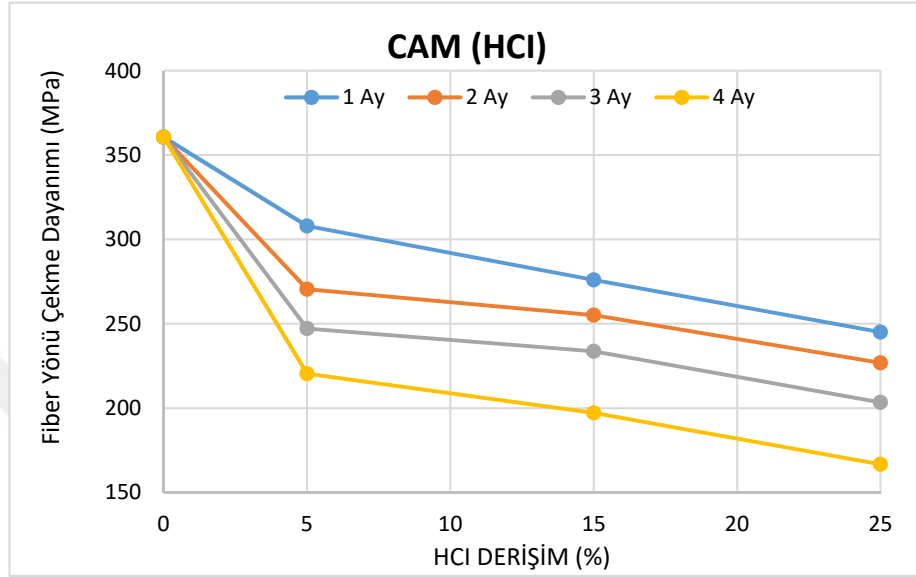
CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	360,67	-	-	-	-	-	-
	(12,19)	-	-	-	-	-	-
1	-	307,99	276,04	245,12	350,40	336,24	314,28
	-	(6,58)	(4,09)	(19,94)	(7,76)	(12,28)	(6,91)
2	-	270,48	255,19	226,88	316,67	301,97	288,81
	-	(10,15)	(9,61)	(11,54)	(5,27)	(4,78)	(12,80)
3	-	247,21	233,70	203,46	297,01	284,68	269,60
	-	(7,38)	(4,25)	(7,62)	(7,50)	(12,87)	(10,24)
4	-	220,44	197,24	166,77	274,72	261,81	248,02
	-	(5,72)	(5,32)	(3,22)	(5,18)	(6,95)	(6,09)

\*(standart sapma)

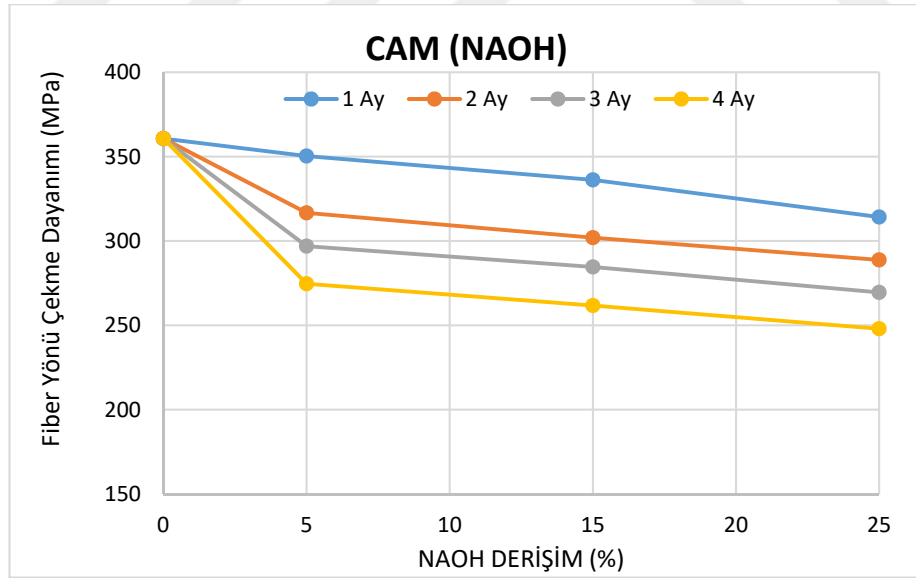
Çözelti derişiminin ve bekleme süresinin cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme mukavemetleri üzerindeki etkileri Şekil 6.3'de verilmiştir. Çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça fiber yönü çekme mukavemeti değeri düşmektedir. Asit ve bazda bekleyen cam/epoksi numunelerin fiber yönü çekme dayanımlarına beraber bakıldığında asitte bekleyen numunelerde daha hızlı bir düşüş meydana gelmiştir. Eşit bekleme süresinde ve eşit derişimlerde asit ve bazda bekleyen cam/epoksi numunelerin fiber yönü çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında baz da bekleyen numunelerde maksimum %48,72'ye kadar daha yüksek fiber yönü elastisite modül değerine sahip olduğu görülmektedir.

Herhangi ortamda bekletilmemiş cam/epoksi numunelerin fiber yönü çekme dayanım değeri asit ortamında bekleyen cam/epoksi numunelerin fiber yönü çekme dayanım değeri ile karşılaştırıldığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %53,76'ya

vara değer kayıpları görülmektedir. Bazik ortamda bekleyen numunelerle aynı kıyaslama yapıldığında fiber yönü çekme dayanımındaki maksimum düşüşün %31,23 olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6.3 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme mukavemeti değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi kompozitlerin fiber yönü çekme dayanımları ve standart sapma değerleri Çizelge 6.4’de verilmiştir. Karbon/epoksi için maksimum çekme dayanım değeri olan 654,98MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum çekme dayanım değeri olan 483,15MPa ise %25 derişime sahip asit ortamında bekleyen numunelerden elde edilmiştir.

Çizelge 6.4 Karbon/epoksi fiber yönü çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCI (MPa)			NAOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	654,98	-	-	-	-	-	-
	(0,98)	-	-	-	-	-	-
1	-	570,51	566,54	546,22	644,95	624,39	615,19
	-	(11,42)	(16,96)	(14,19)	(12,72)	(5,53)	(15,66)
2	-	532,23	525,57	514,07	601,25	589,91	578,81
	-	(6,70)	(9,75)	(3,68)	(11,97)	(13,97)	(10,99)
3	-	510,96	504,53	496,23	575,64	570,18	554,38
	-	(6,97)	(12,54)	(31,19)	(5,86)	(16,65)	(7,40)
4	-	493,06	491,10	483,15	550,76	538,79	536,81
	-	(10,24)	(7,52)	(5,56)	(12,49)	(9,05)	(10,68)

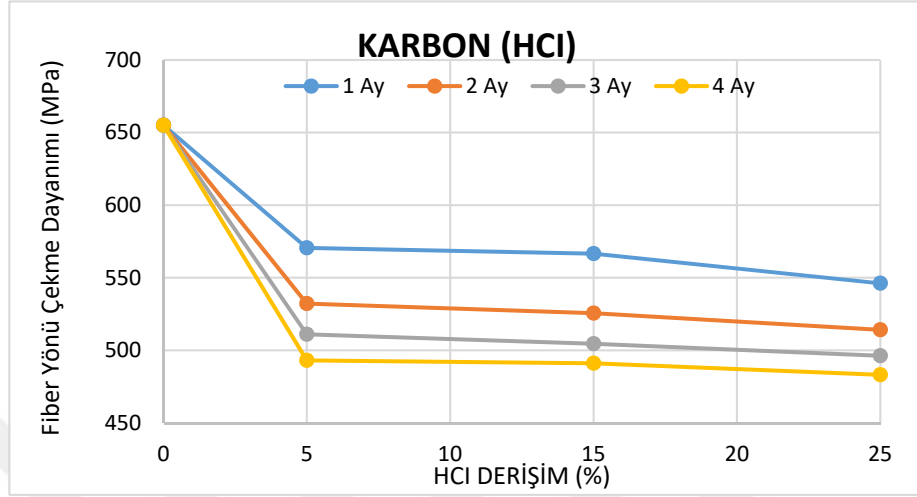
\*(standart sapma)

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme dayanımlarının asit ve baz ortam derişimine ve bekleme süresine göre değişimleri Şekil 6.4’de grafik olarak ifade edilmiştir. Asit ve baz ortamlarında bekleyen karbon epoksi numunlerin fiber yönü çekme mukavemetleri kıyaslandığında değişim değerleri farklı olsada, davranışların birbirine paralel olduğu Şekil 6.4’ten görülebilir. Her iki çözelti türü içinde maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmektedir. Hiçbir ortamda bekletilmemiş karbon/epoksi numunelerin fiber yönü çekme dayanımı asit ortamında beklemiş numunelerin fiber yönü çekme dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %26,23 olduğu görülmüştür. Bazik ortamda bekleyen numuneler aynı karşılaştırma yapılırsa bu değerin %18,04 olduğu gözükmemektedir.

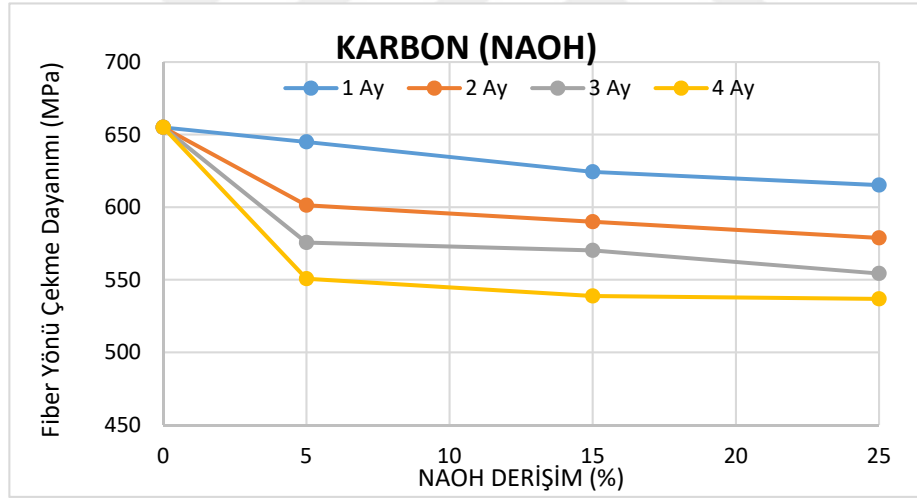
Eşit bekleme süresinde ve eşit derişimlerde asit ve bazda bekleyen karbon/epoksi numunelerin fiber yönü çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında baz da bekleyen numunelerde



maksimum %13,05'e kadar daha yüksek fiber yönü elastisite modül değerine sahip olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.4 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü çekme mukavemeti değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

### 6.1.1.3. Fibere Dik Yön Elastisite Modül Değerleri ( $E_2$ )

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme testlerinden elde edilen fibere dik yön elastisite modül ve standart sapma değerleri Çizelge 6.5’de verilmiştir. Cam/epoksi için maksimum elastisite modül değeri 30326,93MPa ve minimum elastisite modül değeri ise 17626,37MPa’dır.

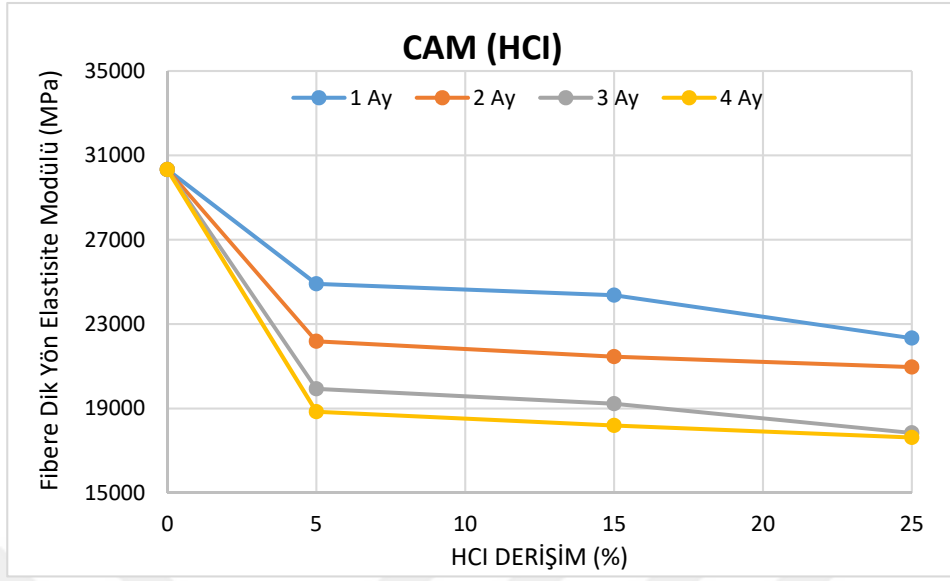
Çizelge 6.5 Cam/epoksi fibere dik yön elastisite modül ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	30326,93	-	-	-	-	-	-
	(780,78)	-	-	-	-	-	-
1	-	24910,38	24366,13	22335,24	29381,25	28271,35	26041,14
	-	(1134,03)	(882,21)	(1292,43)	(1091,38)	(1082,15)	(443,47)
2	-	22180,53	21451,95	20962,45	27748,20	25507,31	23022,87
	-	(736,24)	(1202,25)	(1086,53)	(854,94)	(984,04)	(360,67)
3	-	19930,45	19228,29	17842,74	24996,90	23500,10	22609,81
	-	(521,90)	(1593,06)	(652,46)	(762,69)	(321,33)	(1012,1)1
4	-	18841,68	18196,26	17626,37	23409,54	21845,78	20743,27
	-	(606,42)	(831,53)	(1269,43)	(1254,17)	(258,53)	(154,52)

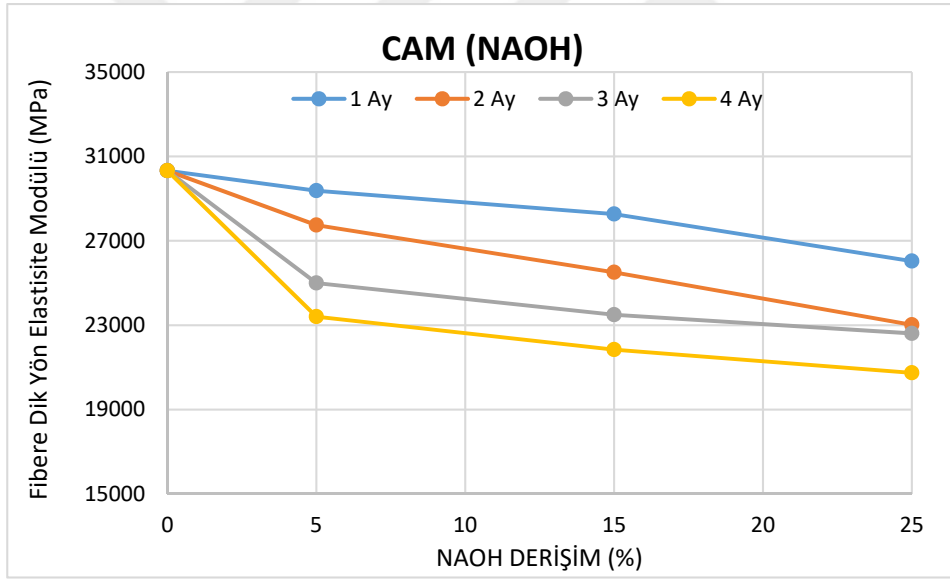
\*(standart sapma)

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin farklı derişimdeki asit ve baz ortamlarındaki fibere dik yön elastisite modüllerinin zamana bağılı olarak değişimleri Şekil 6.5’de verilmiştir. Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin asit ve baz ortamından etkilenme yüzdeleri farklı olsada her iki ortam da numunlerin fiber yönü elastisite modüllerinin olumsuz etkilemiştir. Fakat eşit derişimde ve eşit sürelerde asit ve baz ortamına maruz kalan cam/epoksi numunelerin fibere dik yön elastisite modül değerlerini kıyasladığımızda baz ortamında bekleyen numunelerde maksimum %26,72’ye kadar daha yüksek fibere dik yön elastisite modül değerine sahip olduğu görölmektedir.

Her iki çözelti türü içinde maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görölmektedir. Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin fibere dik yön elastisite modül değerleri ile kıyaslandığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %41,88 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değerin %31,60 olduğu gözükmemektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.5 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modül değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modül ve standart sapma değerleri Çizelge 6.6’da verilmiştir. Çizelge incelendiğinde karbon/epoksi için maksimum fibere dik yön elastisite modül değeri 58327,98MPa (%0 sade numune) ve minimum fibere dik yön elastisite modül değerinin ise 45713,31MPa (%25 HCl 4Ay) olduğu görülmektedir.

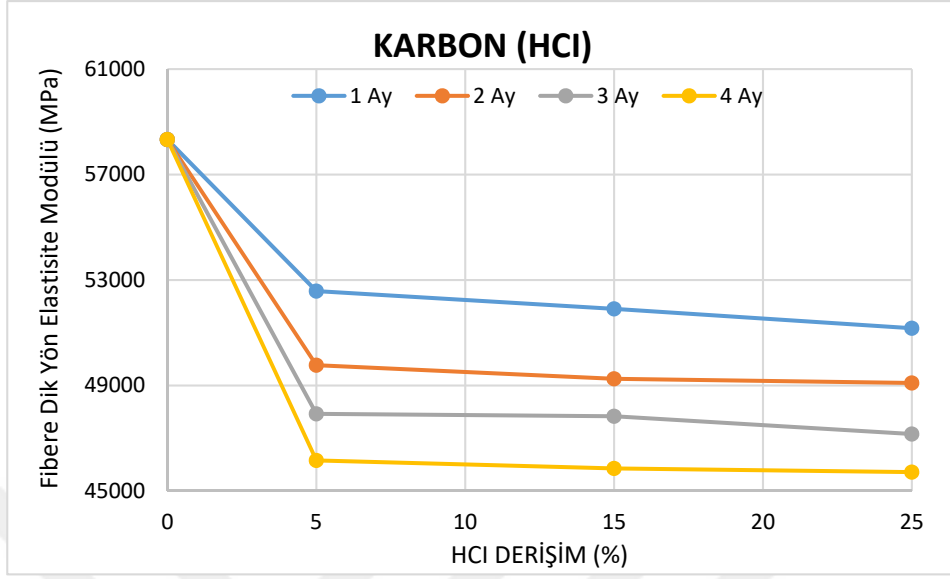
Çizelge 6.6 Karbon/epoksi fibere dik yön elastisite modül ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	58327,98	-	-	-	-	-	-
	(591,39)	-	-	-	-	-	-
1	-	52581,37	51905,35	51170,91	56941,39	56464,37	55957,80
	-	(659,13)	(995,90)	(881,00)	(653,43)	(778,59)	(682,46)
2	-	49769,66	49255,51	49095,05	54223,12	53985,41	53422,39
	-	(358,01)	(778,86)	(431,12)	(1737,76)	(638,96)	(884,36)
3	-	47926,06	47833,33	47158,11	53156,07	51868,47	51140,06
	-	(409,22)	(762,63)	(291,41)	(750,17)	(662,47)	(513,69)
4	-	46155,38	45856,06	45713,31	52553,41	49683,94	49112,60
	-	(392,15)	(437,99)	(399,88)	(3593,66)	(1189,15)	(503,01)

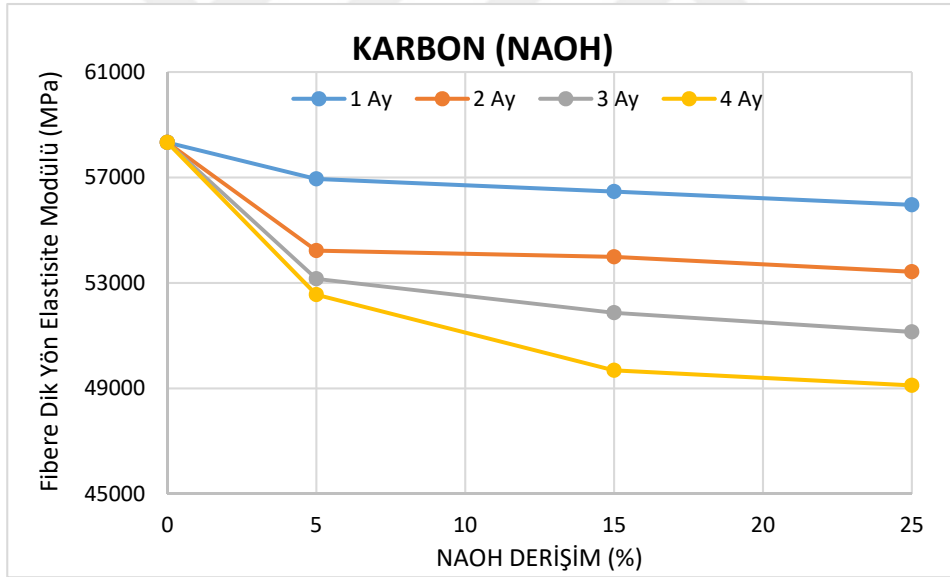
\*(standart sapma)

Şekil 6.6’da farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamların ve bu ortamlardaki bekleme sürelerinin karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modülleri üzerindeki etkileri verilmiştir. Her iki çözelti türü içinde maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmektedir. Eşit sürelerde asidik ve bazik ortama maruz kalan karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modülleri birbiri arasında kıyaslandığında bazik ortamda bekleyen numunelerin fibere dik yön elastisite modül değerlerinin %13,86’ya kadar daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Sade karbon/epoksi numunelerin (%0) fiber yönü elastisite modül değerleri, asit ortamında bekleyen karbon/epoksi numunelerin fiber yönü elastisite modül değerleri kıyaslandığında, asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum %21,63’e kadar bir düşüş olduğu görülmektedir. Aynı kıyaslama değeri bazik ortamda bekleyen numuneler için yapıldığında fibere dik yön elastisite modül değerinde %15,80’e varan düşüş değerleri görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6.6 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön elastisite modül değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

#### 6.1.1.4. Fibere Dik Yön Çekme Dayanımı ( $Y_t$ )

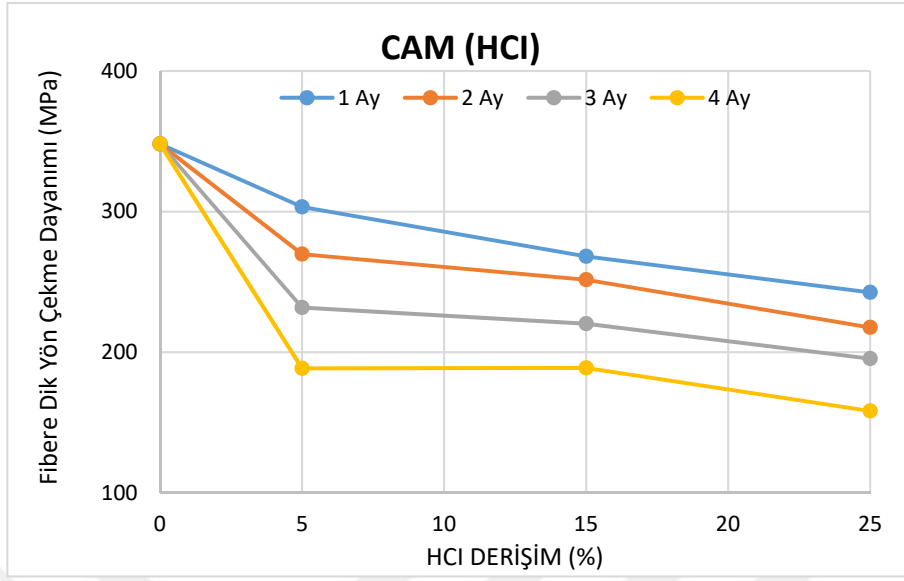
Çekme testlerinden elde edilen, cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme dayanımı ve standart sapma değerleri Çizelge 6.7’de verilmiştir. Cam/epoksi numunelerin maksimum fibere dik yön çekme dayanımı 348,07MPa ve minimum fibere dik yön çekme dayanımı ise 158,25MPa’dır. Maksimum değer sade cam/epoksi numunelerden ve minimum değer ise 4Ay süresince %25’lik asit çözeltisinde bekleyen cam/epoksi numunelerden elde edilmiştir.

Çizelge 6.7 Cam/epoksi fibere dik yön çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri

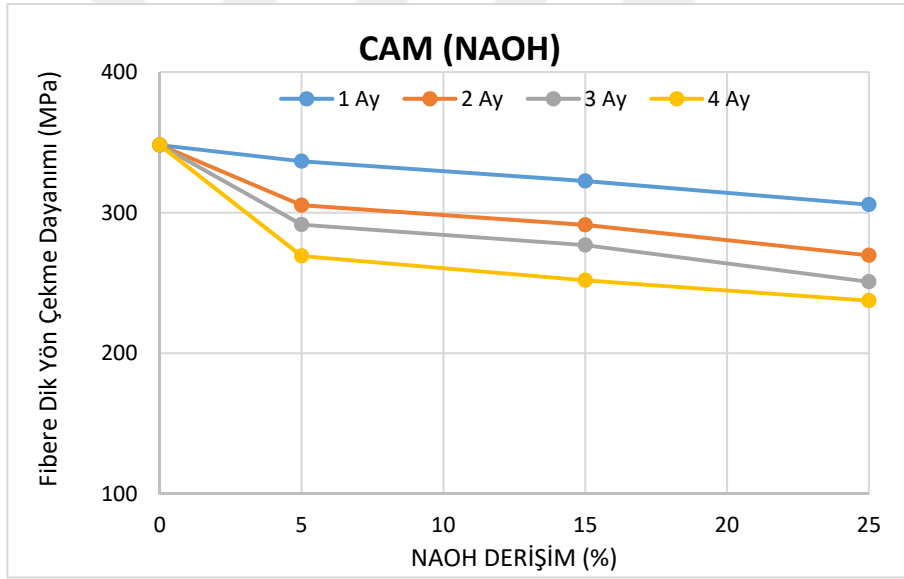
CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	348,07	-	-	-	-	-	-
	(7,59)	-	-	-	-	-	-
1	-	303,31	268,22	242,53	336,59	322,53	305,72
	-	(43,49)	(39,85)	(8,32)	(15,15)	(23,28)	(24,49)
2	-	269,73	251,60	217,66	305,35	291,33	269,68
	-	(21,27)	(33,80)	(6,14)	(9,00)	(9,39)	(15,54)
3	-	231,77	220,24	195,42	291,58	276,98	250,91
	-	(47,70)	(5,12)	(4,77)	(11,35)	(14,55)	(4,53)
4	-	188,47	188,90	158,25	269,24	251,98	237,47
	-	(15,59)	(15,41)	(5,68)	(7,77)	(5,30)	(6,64)

\*(standart sapma)

Şekil 6.7’de farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamların ve bu ortamlardaki bekleme sürelerinin cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme dayanımları üzerindeki etkileri ifade edilmiştir. Bekleme süresi ve çözelti derişimi artıkça dayanım değerleri azalmaktadır. Öyle ki; sade numunelerin fibere dik yön çekme dayanımı değeri ile asit ortamında bekleyen numunelerin aynı değerleri kıyaslandığında maksimum değer kaybı %54,53 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değer %31,77 olduğu gözükmektedir. Asit ve bazda bekleyen cam/epoksi numunelerin fibere dik yön çekme dayanımları karşılaştırıldığında asitte bekleyen numunelerde aside göre daha net düşüşler olduğu görülmektedir. Aynı ortam şartlarında eşit sürelerde bekleyen numunelerin fiber yönü çekme dayanımları kıyaslandığında bazda bekleyen numunelerin değerlerinin %50,6’ya kadar daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.7 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme testlerinden elde edilen fibere dik yön çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri Çizelge 6.8’de verilmiştir. Buna göre karbon/epoksi numunelerin maksimum fibere dik yön çekme dayanım değeri 596,76MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum fibere dik yön çekme mukavemeti değeri ise 434,68MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

Çizelge 6.8 Karbon/epoksi fibere dik yön çekme mukavemeti ve standart sapma değerleri

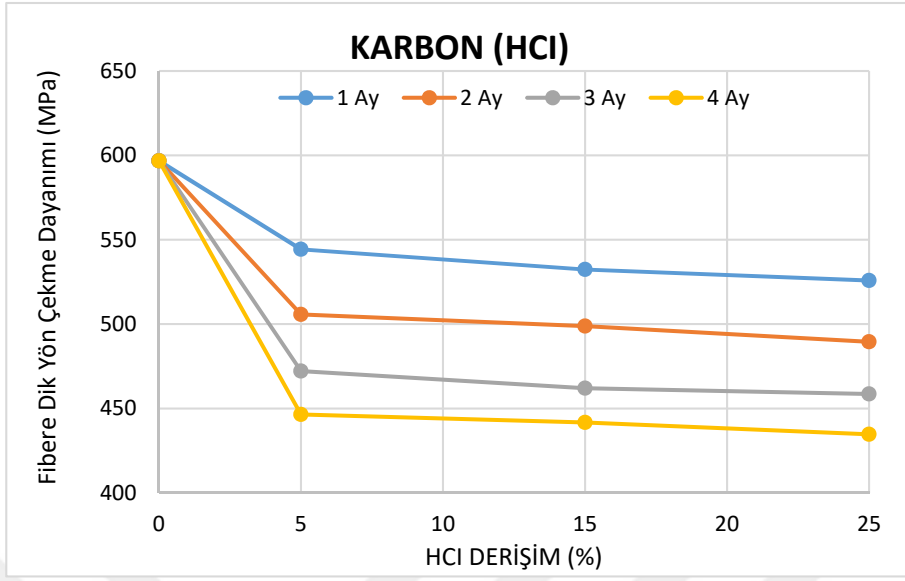
KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	596,76	-	-	-	-	-	-
	(135,09)	-	-	-	-	-	-
1	-	544,30	532,36	525,85	582,63	573,08	561,61
	-	(14,96)	(6,50)	(3,57)	(8,00)	(10,65)	(7,40)
2	-	505,78	498,79	489,50	542,90	537,95	526,42
	-	(17,46)	(6,54)	(10,13)	(7,16)	(6,73)	(4,32)
3	-	472,18	461,97	458,62	507,30	495,40	488,78
	-	(11,86)	(4,19)	(4,05)	(82,77)	(9,36)	(8,13)
4	-	446,48	441,74	434,68	489,61	468,49	462,03
	-	(6,64)	(14,50)	(15,05)	(31,16)	(10,01)	(4,71)

\*(standart sapma)

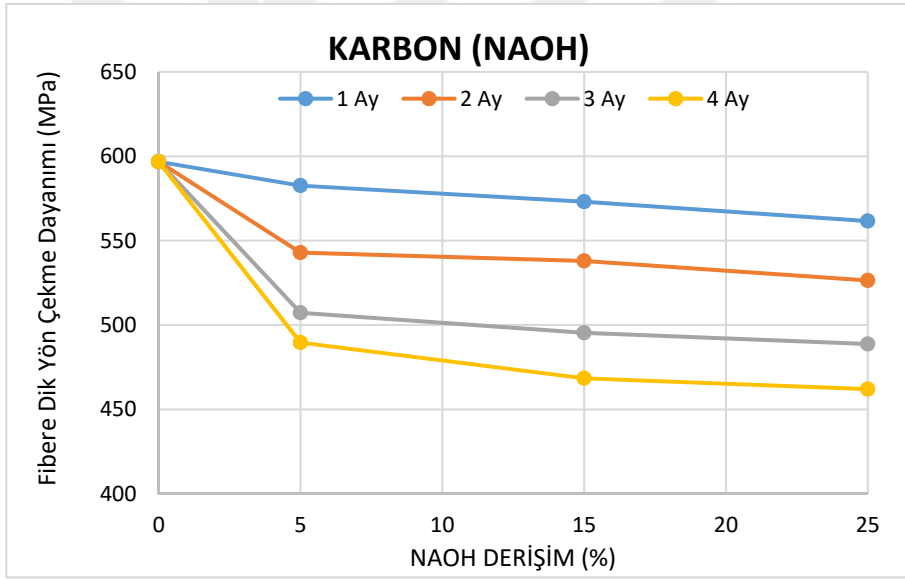
Çözelti derişiminin ve bekleme süresinin karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 6.8’de verilmiştir. Buna göre çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça fibere dik yön çekme mukavemeti değeri düşmektedir. Eşit sürelerde ve derişimlerde bekleyen karbon/epoksi numunelerin fibere dik yön çekme dayanımları kıyaslandığında bazda bekleyen numunelerin fibere dik yön çekme dayanımları %9,66’ya kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Herhangi bir çözelti ortamında bekletilmemiş numunelerin fibere dik yön çekme mukavemeti değerleri ile asit ortamında bekleyen numunelerin fibere dik yön çekme mukavemeti değerleri kıyaslandığında, maksimum %27,16 değer kaybı görülmektedir. Bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değer %22,58 olduğu görülmektedir.





(a)



(b)

Şekil 6.8 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön çekme mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

### 6.1.1.5. Kayma Modülü Değeri ( $G_{12}$ )

Çekme testi ile belirlenen cam/epoksi tabakalı kompozitlerin çapraz fiber yönündeki ( $45^\circ$ ) elastisite modül ( $E_{45}$ ) ve standart sapma değerleri Çizelge 6.9’da verilmiştir. İzelge incelendiğinde maksimum elastisite modül değeri olan 10128,03MPa değerinin hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edildiği, minimum elastisite modül değeri ise 6167,51MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 6.9 Cam/epoksi çapraz yön ( $45^\circ$ ) elastisite modül ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	10128,03	-	-	-	-	-	-
	(324,09)	-	-	-	-	-	-
1	-	9091,14	8827,30	8633,20	9668,07	9468,55	9282,82
	-	(158,75)	(228,67)	(117,01)	(156,14)	(96,56)	(133,51)
2	-	8260,97	8070,52	7908,67	8860,27	8779,40	8667,70
	-	(121,73)	(153,58)	(314,14)	(55,70)	(91,67)	(4,38)
3	-	7558,17	7367,95	7114,71	8186,92	8051,18	7933,81
	-	(81,42)	(65,33)	(66,82)	(112,16)	(78,40)	(141,93)
4	-	6789,64	6393,46	6167,51	7547,81	7290,16	7149,88
	-	(121,79)	(279,03)	(60,46)	(139,92)	(110,66)	(105,64)

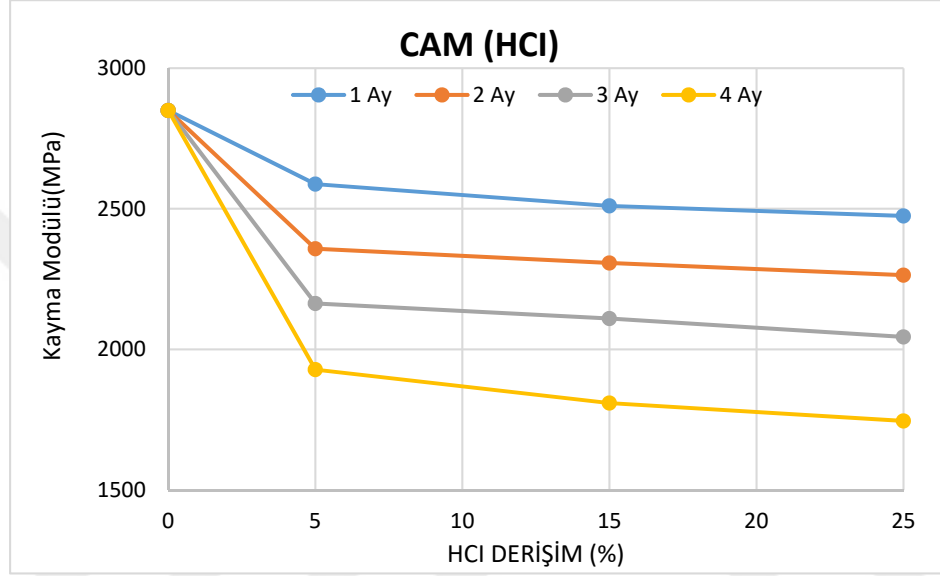
\*(standart sapma)

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin Denklem 5.1’den elde edilen kayma modül değerleri ( $G_{12}$ ) Çizelge 6.10’da verilmiştir. Buna göre maksimum kayma modül değeri 2849,50MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. En düşük kayma modül değeri ise 1745,61MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

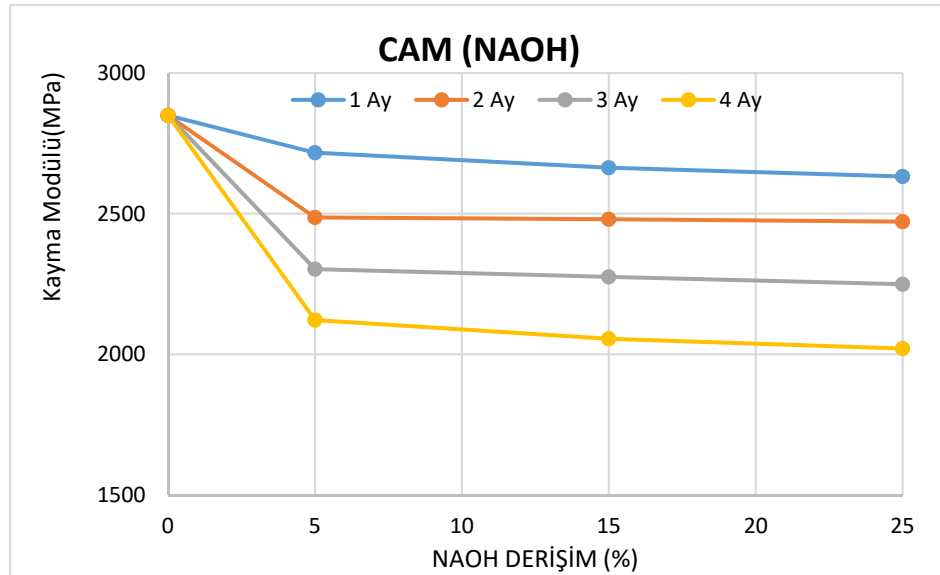
Çizelge 6.10 Cam/epoksi kayma modülü

CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	2849,50	-	-	-	-	-	-
1 Ay	-	2587,92	2510,30	2474,79	2716,91	2663,78	2632,01
2 Ay	-	2357,93	2307,15	2263,85	2486,55	2480,43	2471,78
3 Ay	-	2163,06	2109,81	2044,26	2302,44	2275,33	2249,21
4 Ay	-	1927,98	1809,07	1745,61	2121,63	2055,25	2020,56

Şekil 6.9’da cam/epoksi tabakalı kompozitlerin kayma modüllerinin çözelti derişimine ve bekleme süresine göre değişimleri ifade edilmiştir. Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin kayma modül değerleri ile kıyaslandığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %38,74 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değerin %29,09 olduğu gözükmeğtedir. Asitte bekleyen numunelerde zamana bağlı olarak kayma modülündeki değer kayıpları Şekil 6.9’da görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.9 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin kayma modülü değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin çekme testlerinden elde edilen çapraz fiber yönü (45°) elastisite modül ( $E_{45}$ ) ve standart sapma değerleri Çizelge 6.11’de verilmiştir. Buna göre maksimum çapraz yön elastisite modül değeri 13120,85MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum çapraz yön elastisite modül değeri ise 10751,92MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

Çizelge 6.11 Karbon/epoksi çapraz yön (45°) elastisite modül ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	13120,85	-	-	-	-	-	-
	(607,14)	-	-	-	-	-	-
1	-	12402,83	12277,25	12162,86	12845,06	12752,35	12624,06
	-	(81,28)	(140,88)	(650,39)	(392,52)	(268,83)	(366,03)
2	-	11994,04	11820,33	11655,18	12338,78	12210,97	12138,96
	-	(227,70)	(157,67)	(113,03)	(12,56)	(136,13)	(78,59)
3	-	11389,01	11305,32	11230,73	11904,36	11809,66	11731,60
	-	(216,35)	(270,93)	(176,96)	(565,29)	(315,27)	(494,12)
4	-	10932,19	10877,31	10751,92	11554,68	11449,37	11395,70
	-	(147,09)	(144,61)	(137,18)	(502,85)	(97,55)	(162,21)

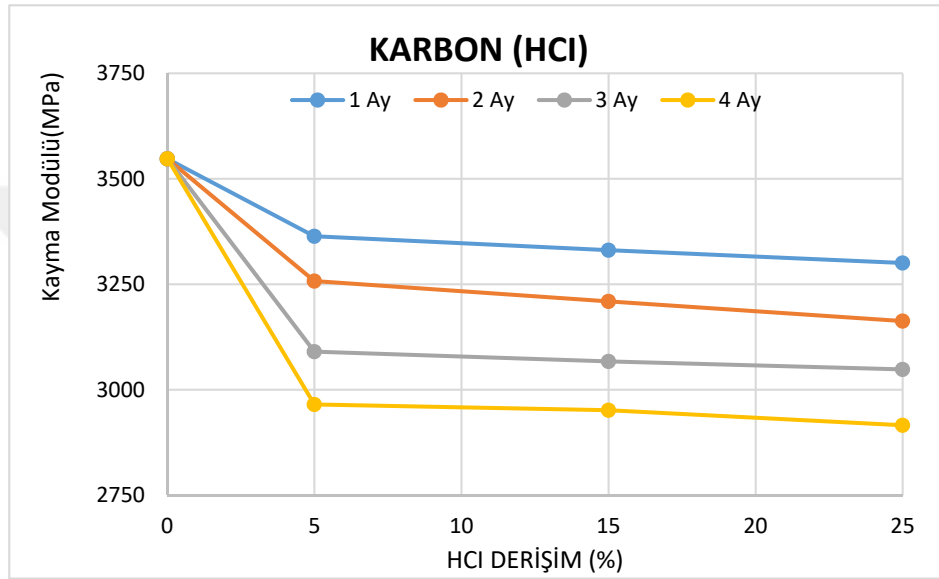
\*(standart sapma)

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerinde kayma modül değerleri Denklem 5.1’de verilen denkleme göre hesaplanmış elde edilen kayma modül değeri ( $G_{12}$ ) Çizelge 6.12’da verilmiştir. Karbon/epoksi için en yüksek kayma modül değeri 3547,32MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. En düşük kayma modül değeri ise 2915,78MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

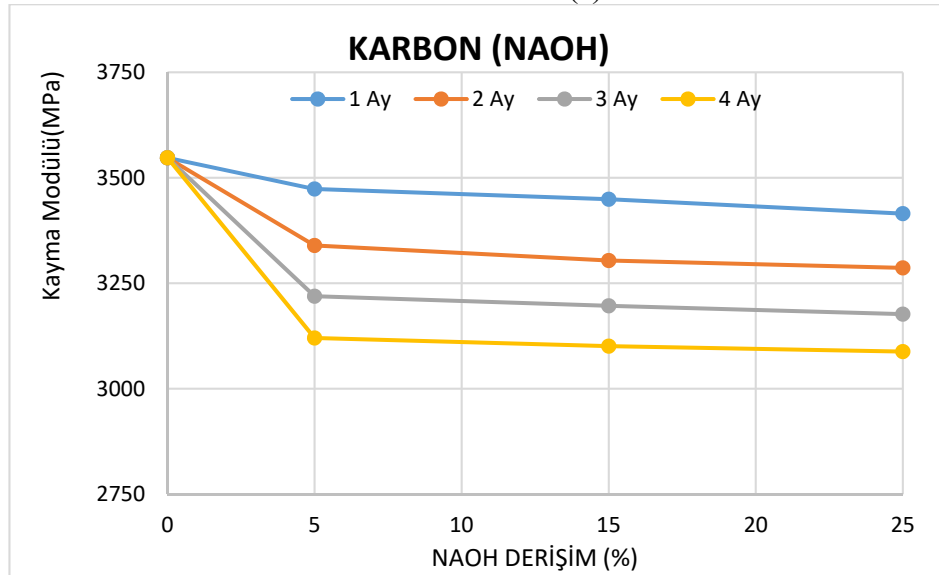
Çizelge 6.12 Karbon/epoksi kayma modülü

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	3547,32	-	-	-	-	-	-
1 Ay	-	3363,50	3330,49	3300,23	3473,40	3449,16	3415,01
2 Ay	-	3257,63	3209,24	3162,61	3339,26	3303,56	3286,21
3 Ay	-	3090,12	3067,04	3048,00	3219,03	3196,39	3176,55
4 Ay	-	2965,10	2951,16	2915,78	3120,10	3100,70	3087,79

Şekil 6.10’da karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin kayma modüllerinin çözelti derişimine ve bekleme süresine göre değişimleri ifade edilmiştir. Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin kayma modül değerleri ile kıyaslandığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %22,16 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değerin %16,13 olduğu gözükmetedir. Eşit süre ve değişimde bekleyen numunelerde kayma modülü değer kaybı davranışları benzer niteliktedir.



(a)



(b)

Şekil 6.10 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin kayma modülü değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

## 6.1.2. Tabakalı Kompozitlerin Basma Dayanımları

### 6.1.2.1. Fiber Yönü Basma Dayanım Değerleri ( $X_c$ )

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin basma testlerinden elde edilen fiber yönü basma mukavemeti ve standart sapma değerleri Çizelge 6.13’de verilmiştir. Çizelgeye göre maksimum basma mukavemeti değeri 244,56MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edildiği görülmektedir. Minimum basma mukavemeti değeri ise 126,42MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

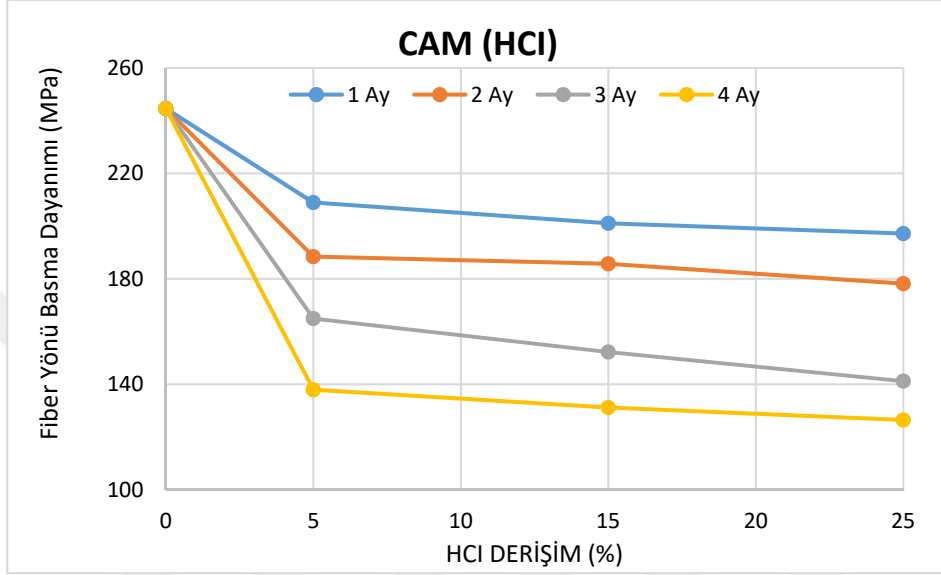
Çizelge 6.13 Cam/epoksi fiber yönü basma mukavemeti ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	244,56	-	-	-	-	-	-
	(15,44)	-	-	-	-	-	-
1	-	208,92	201,02	197,19	239,75	237,61	232,97
	-	(6,38)	(30,54)	(36,64)	(2,42)	(22,75)	(10,46)
2	-	188,44	185,67	178,15	230,43	227,63	213,25
	-	(9,00)	(4,99)	(7,33)	(5,64)	(13,46)	(2,91)
3	-	164,90	152,27	141,20	205,37	199,41	189,35
	-	(1,79)	(17,55)	(19,87)	(15,75)	(3,43)	(6,25)
4	-	137,90	131,18	126,42	196,58	191,48	161,16
	-	(14,16)	(27,18)	(8,36)	(5,79)	(12,44)	(7,27)

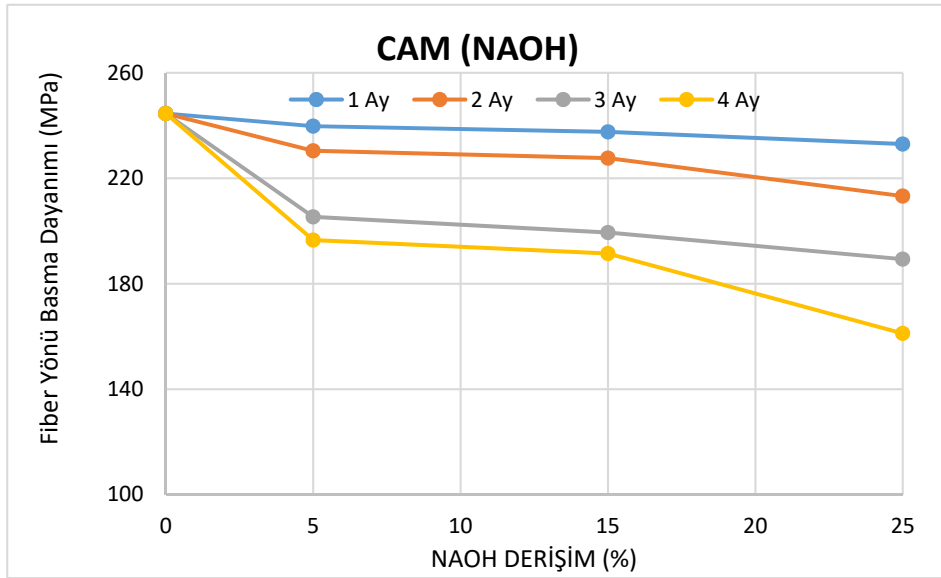
\*(standart sapma)

Şekil 6.11’de cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma mukavemetlerinin farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamlardaki zamana bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde, çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça fiber yönü basma mukavemeti değerinin düştüğü görülmektedir. Cam/epoksi numunelerin asidik ve bazik ortamdaki fiber yönü basma dayanımı davranışları benzer nitelikte olsa da asidik ortamdaki değer kayıplarının daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Eşit derişim ve bekleme sürelerinde bekleyen numunelerin fiber yönü basma dayanımları kıyaslandığında bazik ortamda bekleyen numunelerin fiber yönü basma dayanım değerleri %45,98’e kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin fiber yönü basma mukavemeti değerleri, asit ortamında bekleyen numunelerin fiber yönü basma mukavemeti değerleri ile kıyaslandığında %48,31'e kadar bir değer kaybı olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu kayıp değerinin %34,10 olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6.11 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma mukavemetleri değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma mukavemeti ve standart sapma değerleri Çizelge 6.14’de verilmiştir. Buna göre, karbon/epoksi için maksimum basma mukavemeti değeri 288,95MPa ve minimum basma mukavemeti değeri ise 215,43MPa’dır.

Çizelge 6.14 Karbon/epoksi fiber yönü basma mukavemeti ve standart sapma değerleri

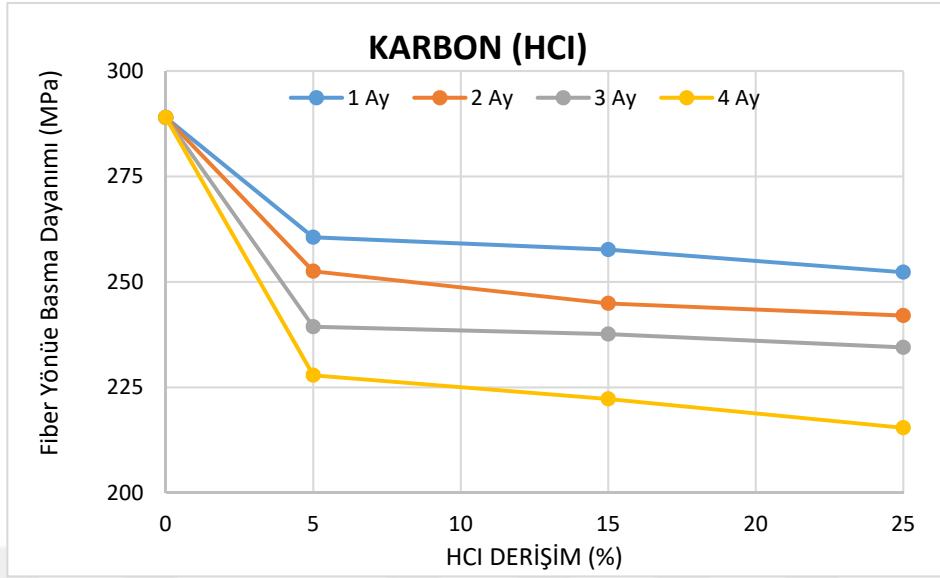
KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	288,95	-	-	-	-	-	-
	(4,69)	-	-	-	-	-	-
1	-	260,57	257,66	252,31	277,12	273,93	270,39
	-	(31,50)	(2,27)	(145,79)	(6,61)	(3,39)	(5,26)
2	-	252,54	244,92	242,03	259,90	256,16	253,85
	-	(5,27)	(13,25)	(11,69)	(14,50)	(5,51)	(9,13)
3	-	239,38	237,63	234,48	251,74	247,04	243,22
	-	(19,84)	(21,51)	(16,13)	(17,53)	(35,35)	(3,81)
4	-	227,89	222,26	215,43	244,45	234,81	228,94
	-	(13,07)	(17,96)	(7,07)	(12,22)	(9,34)	(8,22)

\*(standart sapma)

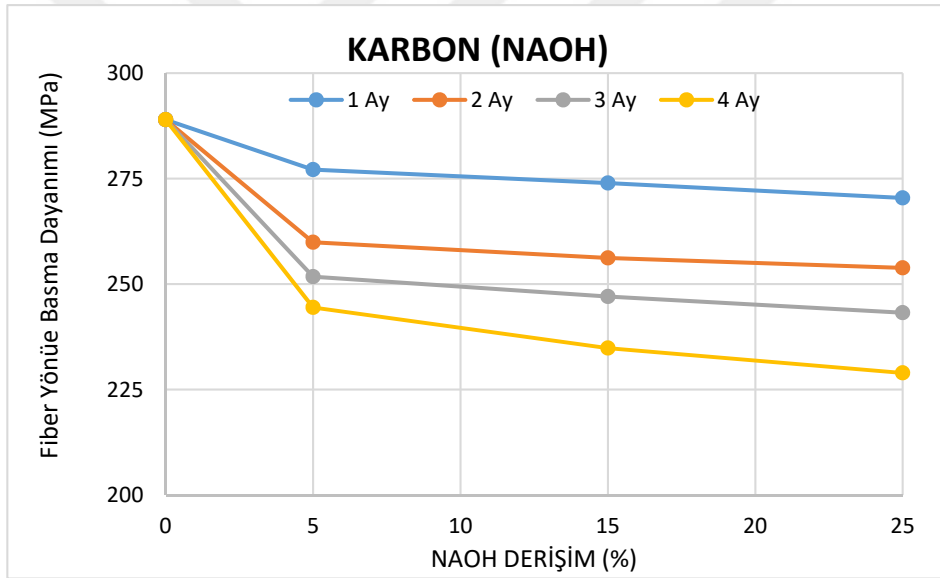
Şekil 6.12’de farklı derişime sahip asidik ve bazik çözeltilerin ve bu çözeltilerde bekleme sürelerinin karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma dayanımları üzerindeki etkileri verilmiştir. Karbon/epoksi numuneler asit ve baz ortamında benzer şekilde fiber yönü basma dayanımlarını kaybetmeler de, değişim yüzdeleri farklılık göstermektedir. Öyle ki; eşit derişimde ve bekleme süresinde asit ve baz ortamında bekleyen numunelerin fiber yönü basma dayanımları kıyaslandığında baz ortamında bekleyen numuneler %7,26’ya kadar daha fazla dayanıma sahip oldukları belirlenmiştir.

Her iki çözeltili türü içinde maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmektedir. Sade (%0) numunelerin fiber yönü basma dayanım değerleri ile asit ortamında bekleyen numunelerin basma dayanım değerleri kıyaslandığında maksimum değer kaybı %25,44’tir. Bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değer %20,77 olduğu gözükmektedir..





(a)



(b)

Şekil 6.12 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fiber yönü basma mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

### 6.1.2.2. Fibere Dik Yön Basma Dayanım Değerleri ( $Y_c$ )

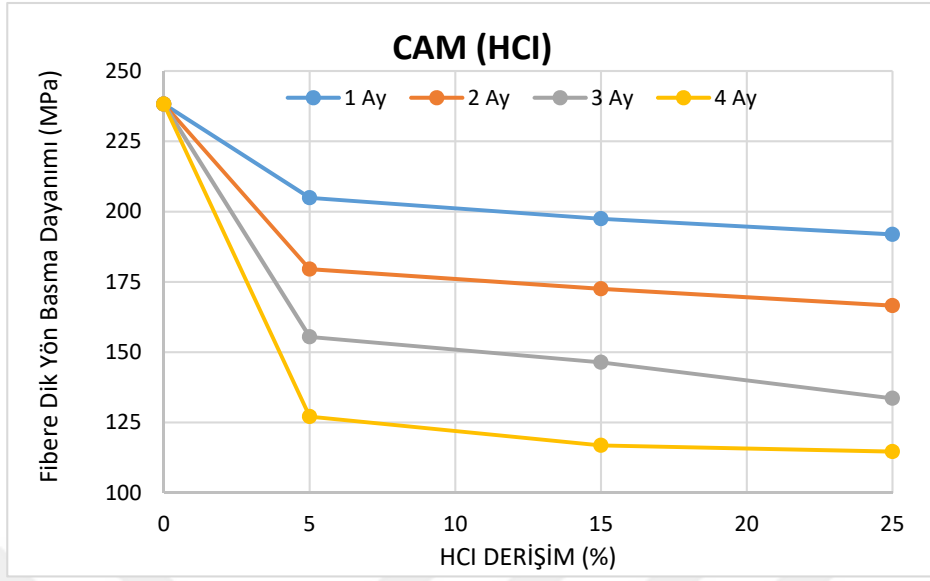
Çizelge 6.15’de cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemeti ve standart sapma değerleri Çizelge 6.15’de verilmiştir. Buna göre maksimum basma mukavemeti değeri 238,23MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. En düşük basma mukavemeti değeri ise 114,69MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

Çizelge 6.15 Cam/epoksi fibere dik yön basma mukavemeti ve standart sapma değerleri

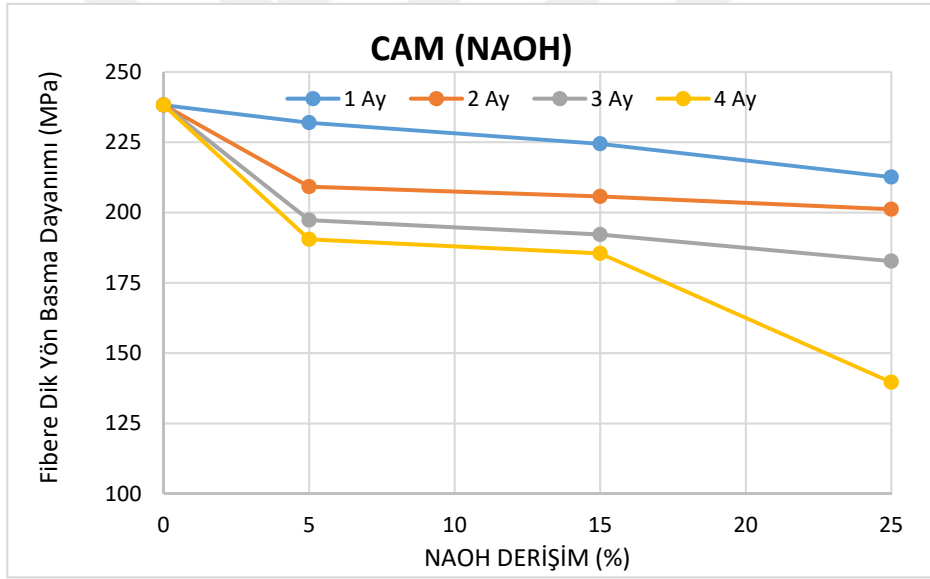
CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	238,23	-	-	-	-	-	-
	(20,70)	-	-	-	-	-	-
1	-	204,91	197,47	191,88	231,95	224,45	212,62
	-	(24,14)	(15,13)	(31,70)	(14,64)	(12,73)	(13,94)
2	-	179,53	172,56	166,56	209,18	205,71	201,18
	-	(9,02)	(12,50)	(6,04)	(15,19)	(20,11)	(6,19)
3	-	155,49	146,41	133,64	197,29	192,20	182,73
	-	(6,95)	(23,38)	(12,94)	(21,88)	(3,62)	(13,04)
4	-	127,16	116,92	114,69	190,47	185,48	139,64
	-	(6,74)	(1,50)	(12,51)	(11,00)	(16,99)	(31,17)

\*(standart sapma)

Çözelti derişiminin ve bekleme süresinin cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 6.13’de verilmiştir. Aynı derişimde ve bekleme süresinde işlem gören numunelerin fibere dik yön basma dayanımları karşılaştırıldığında baz ortamında bekleyen numunelerin fiber yönü basma dayanımları %58,64’e kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, sade numunelerin fibere dik yön basma dayanım değerleri, asit ve baz çözeltilerinde bekleyen numunelerin fibere dik yön basma dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında, asitte bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %51,86 değer kaybı görülürken, bazda bekleyen numuneler için maksimum kayıp değeri, %41,38 olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6.13 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemeti ve standart sapma değerleri Çizelge 6.16’da verilmiştir. Buna göre karbon/epoksi numunelerin maksimum basma mukavemeti değeri 275,57MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum basma mukavemeti değeri ise 211,14MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

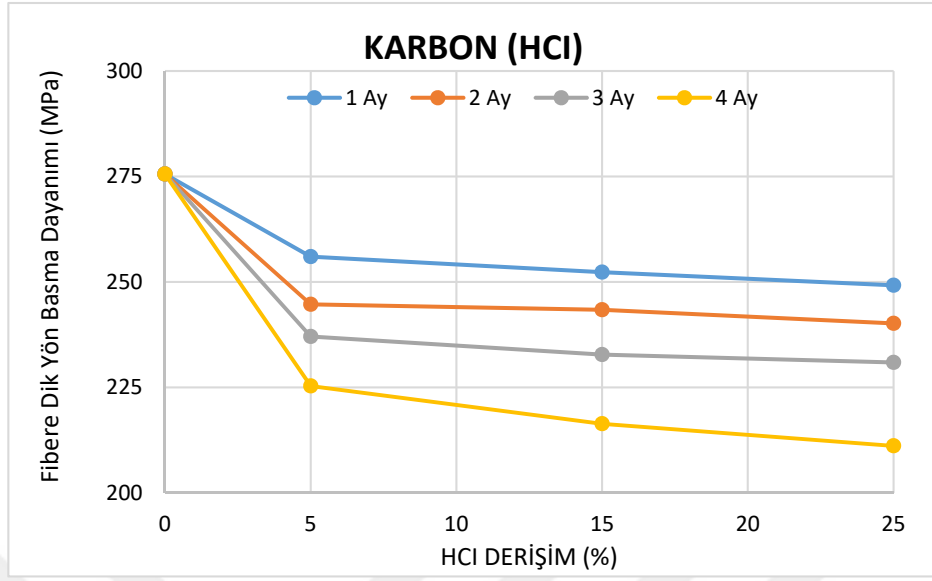
Çizelge 6.16 Karbon/epoksi fibere dik yön basma mukavemeti ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	275,57	-	-	-	-	-	-
	(14,18)	-	-	-	-	-	-
1	-	255,99	252,30	249,18	262,93	261,66	256,84
	-	(14,74)	(25,19)	(27,33)	(29,43)	(25,09)	(17,23)
2	-	244,68	243,39	240,18	253,91	251,01	249,37
	-	(15,52)	(13,27)	(7,14)	(20,41)	(1,95)	(14,10)
3	-	237,06	232,76	230,91	246,67	241,12	237,58
	-	(7,63)	(28,21)	(25,68)	(13,08)	(11,50)	(11,93)
4	-	225,33	216,38	211,14	237,39	230,80	220,54
	-	(49,44)	(12,18)	(26,70)	(5,04)	(28,81)	(3,00)

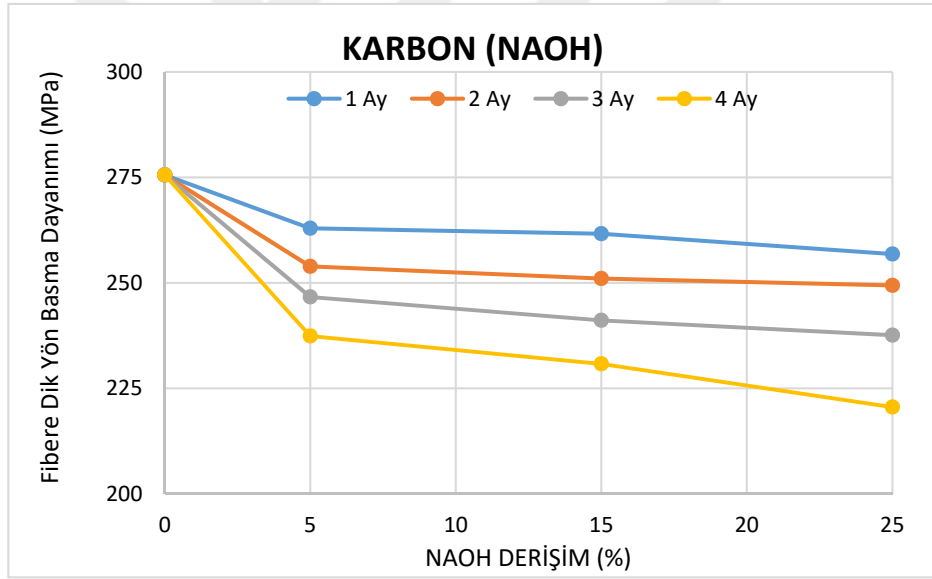
\*(standart sapma)

Farklı asidik ve bazik çözeltilerinin zamana bağlı olarak karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemeti üzerindeki etkileri Şekil 6.14’de verilmiştir. Çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça fibere dik yön basma mukavemeti değeri düşmektedir. Asit ve baz ortamında bekleyen karbon/epoksi numunelerin fiber yönü basma dayanımlarının değer kaybı davranışları benzerlik göstermektedir. Fakat asit ve baz ortamında eşit şartlarda bekleyen numunelerin fibere dik yön basma dayanımları kıyaslandığında baz ortamında bekleyen numunelerdeki fibere dik yön basma dayanım değeri %6,67’ye kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Her iki çözelti türü içinde maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmektedir. Herhangi bir ortamda bekletilmemiş numunelerin fibere dik yön basma mukavemet değerleri ile asit ortamında bekleyen numunelerin aynı değerleri kıyaslandığında maksimum değer kaybı %23,38 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu kayıp değerinin %19,97’ye kadar yükseldiği görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 6.14 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin fibere dik yön basma mukavemetleri değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

### 6.1.3. Tabakalı Kompozitlerin Eğilme Dayanımları

#### 6.1.3.1. 3 Nokta Eğilme Modül Değerleri ( $E_f$ )

3 nokta eğilme testinden elde edilen, cam/epoksi tabakalı kompozitlerin eğilme modülü ve standart sapma değerleri Çizelge 6.17’de verilmiştir. Buna göre cam/epoksi kompozitin en yüksek eğilme modülü değeri 30952,65MPa olarak bulunmuştur. Cam/epoksi için en düşük eğilme modül değeri ise 12999,87MPa’dır.

Çizelge 6.17 Cam/epoksi 3 nokta eğilme modülleri ve standart sapma değerleri

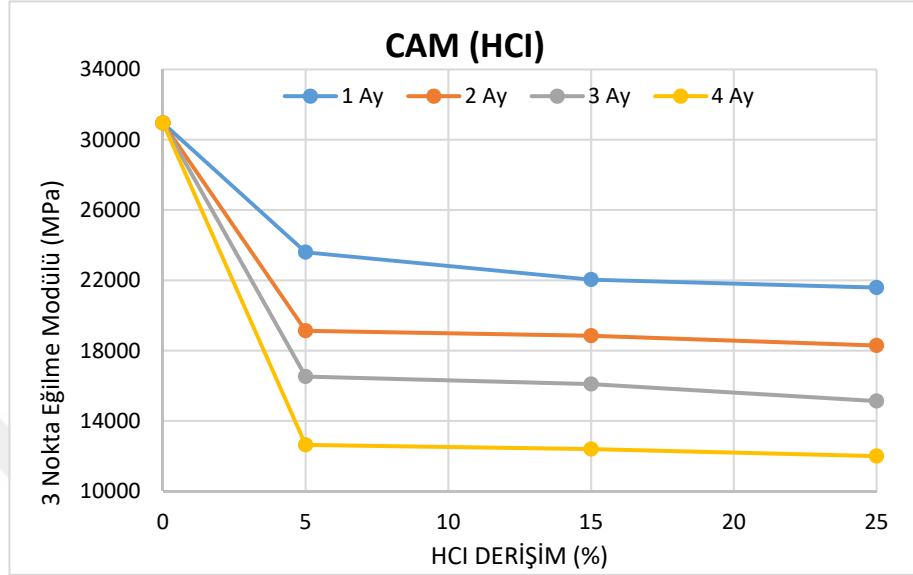
CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	30952,65	-	-	-	-	-	-
	(2823,26)	-	-	-	-	-	-
1	-	23597,83	22046,67	21585,77	29022,41	28274,09	27683,83
	-	(2726,37)	(2013,30)	(615,02)	(1779,43)	(3867,94)	(1282,28)
2	-	19134,17	18845,41	18291,02	25387,28	24725,58	23546,64
	-	(2752,99)	(1295,92)	(49,89)	(2422,49)	(3142,97)	(444,29)
3	-	16526,42	16097,99	15136,26	21709,82	20878,52	20523,71
	-	(2660,88)	(2010,71)	(2198,18)	(2287,08)	(1109,92)	(4539,70)
4	-	12638,75	13482,18	12999,87	18129,52	17630,13	16827,35
	-	(2266,82)	(1433,04)	(1027,94)	(673,13)	(506,54)	(1652,49)

\*(standart sapma)

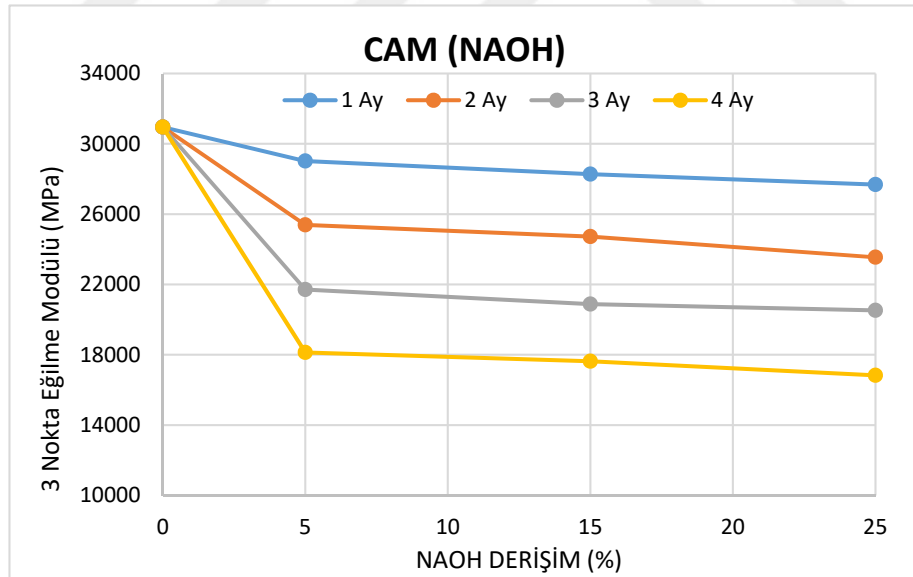
Farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamlarda bekleyen cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modül değerleri zamanla değer kaybetmişlerdir. Her iki çözelti türü içinde maksimum değer kaybı %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmüştür. Şekil 6.15’de zamana bağlı olarak bu değer kayıpları ifade edilmiştir. Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin 3 nokta eğilme modül değerleri, asit ve baz çözeltilerinde bekleyen numunelerin eğilme modül değerleri ile kıyaslandığında asit çözeltisi için maksimum değer kaybı %58,00 ve baz çözeltisi için ise maksimum değer kaybı %45,64 olduğu gözükmektedir..

Asit ve bazda bekleyen cam/epoksi numunelerdeki eğilme modülü kayıpları farklı oranlarda olsa da, benzer formda gerçekleşmiştir. Eşit sürelerde asit ve baz ortamlarında bekleyen cam/epoksi tabakalı kompozitlerin eğilme modülleri kıyaslandığında baz ortamında bekleyen

numunlerden asit ortamındakilere göre %43,44 daha fazla eğilme modülü değeri olduğu belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.15 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modül değışimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Diğer bir malzememiz olan karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modülü ve standart sapma değerleri Çizelge 6.18’de verilmiştir. Karbon/epoksi için, maksimum eğilme modülü değeri 51327,07MPa ve minimum eğilme modülü değeri ise 39729,41MPa’dır.

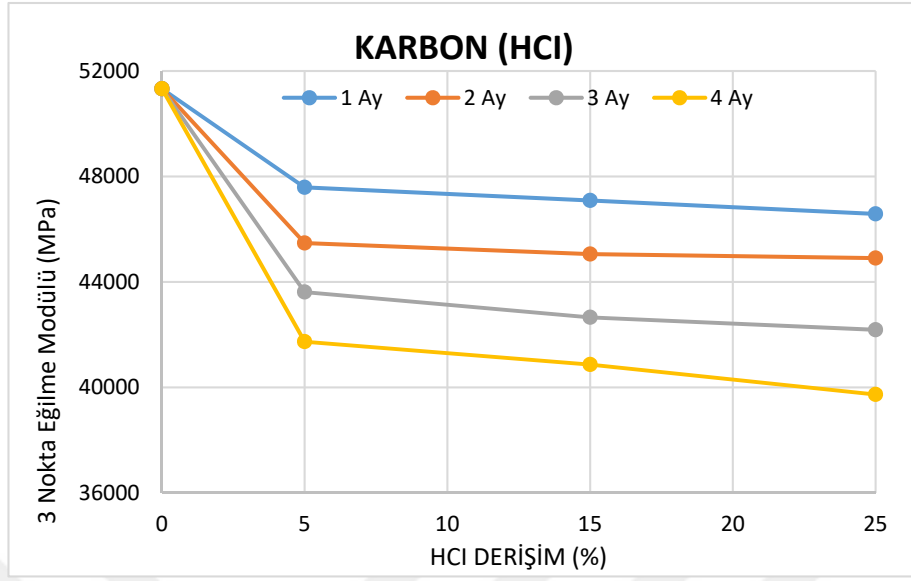
Çizelge 6.18 Karbon/epoksi 3 nokta eğilme modülleri ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	51327,07	-	-	-	-	-	-
	(2635,50)	-	-	-	-	-	-
1	-	47584,46	47087,08	46579,34	50070,02	49273,44	48407,75
	-	(2723,00)	(3553,28)	(1993,68)	(4817,89)	(5938,86)	(5406,40)
2	-	45474,28	45053,78	44905,36	47394,55	47016,26	46549,59
	-	(3199,11)	(1722,00)	(4078,47)	(4258,47)	(2004,34)	(1701,06)
3	-	43616,46	43004,23	42933,95	44947,76	44428,21	43901,83
	-	(543,52)	(2949,95)	(3099,29)	(830,07)	(3502,83)	(545,66)
4	-	41733,71	40866,12	39729,41	42443,73	42366,14	41654,62
	-	(3776,12)	(700,79)	(5207,27)	(2164,99)	(1434,77)	(1164,43)

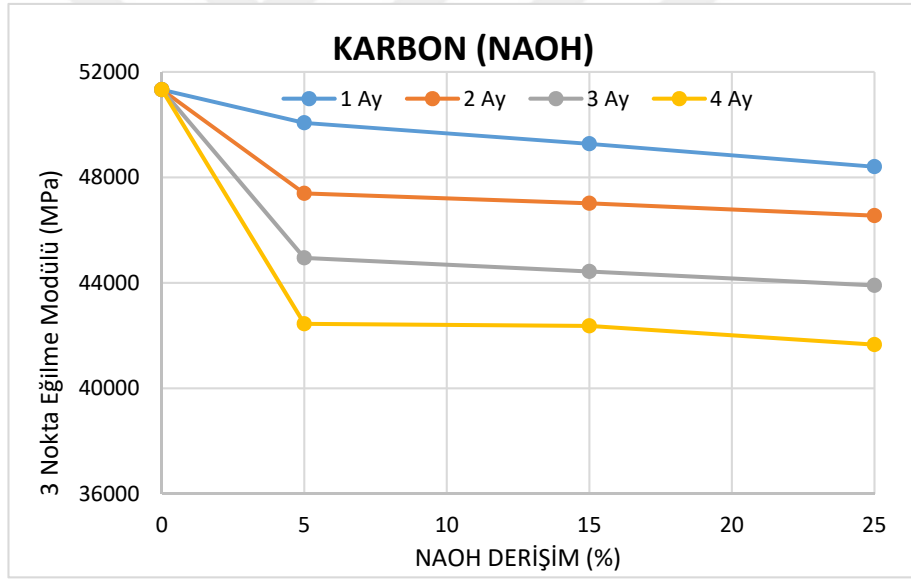
\*(standart sapma)

Çözelti derişiminin ve bekleme süresinin karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modülü üzerindeki etkileri Şekil 6.16’da ifade edilmiştir. Grafikler incelendiğinde, asit ve baz ortamında eşit şartlarda bekleyen numunlerin 3 nokta eğilme modülleri kıyaslandığında baz ortamında bekleyen numunlerdeki 3 nokta eğilme modülleri %5,22’ye kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, sade karbon/epoksi numunelerin 3 nokta eğilme modül değerleri asit ortamında bekleyen numunelerin 3 nokta eğilme modül değerleri ile karşılaştırılırsa, asit ortamında bekleyen numunelerde %22,60’a varan bir değer kaybı olduğu görülür. Benzer karşılaştırma bazik ortamda bekleyen numuneler ile yapıldığında bu sefer maksimum %18,84’e kadar 3 nokta eğilme modül değerlerinde bir düşüş yaşandığı görülebilir.





(a)



(b)

Şekil 6.16 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme modül değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

### 6.1.3.2. 3 Nokta Eğilme Dayanım Değerleri ( $\sigma_f$ )

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin maksimum 3 nokta eğilme dayanım değeri 494,45MPa, sade numunelerden elde edilmiştir. Minimum 3 nokta eğilme dayanım değeri 270,72MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir. Diğer malzeme yapılarına ait eğilme dayanım değerleri ve tetslere ait standart sapma değerleri Çizelge 6.19'de verilmiştir.

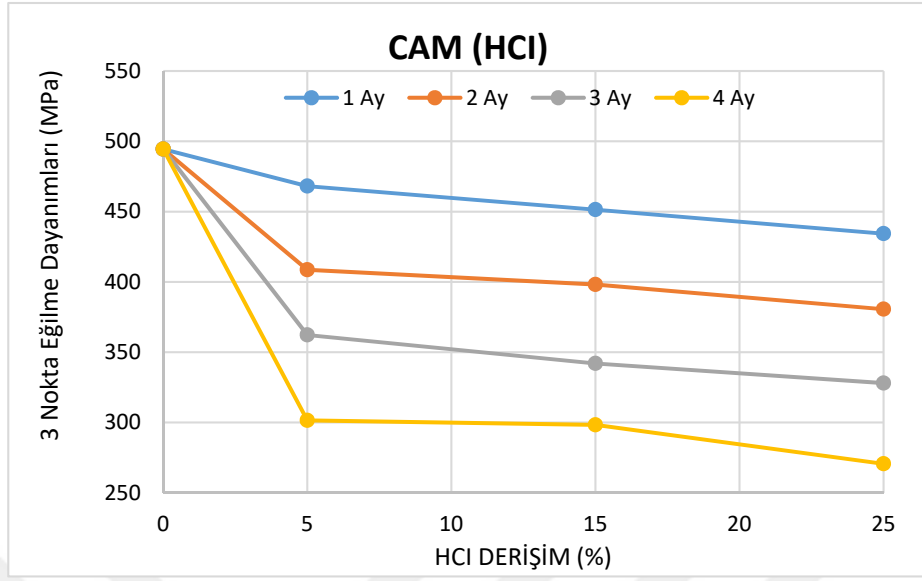
Çizelge 6.19 Cam/epoksi 3 nokta eğilme mukavemetleri ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	494,45	-	-	-	-	-	-
	(11,34)	-	-	-	-	-	-
1	-	468,15	451,46	434,30	487,41	476,84	459,78
	-	(13,21)	(16,91)	(7,55)	(7,36)	(22,88)	(11,62)
2	-	408,58	398,21	380,68	437,84	416,20	401,63
	-	(4,47)	(7,55)	(4,56)	(12,58)	(13,85)	(11,87)
3	-	362,30	342,08	328,02	385,89	362,92	354,93
	-	(8,21)	(6,17)	(6,76)	(7,85)	(17,08)	(7,96)
4	-	301,53	298,36	270,72	331,97	326,36	311,17
	-	(19,00)	(6,78)	(7,10)	(7,03)	(3,78)	(4,58)

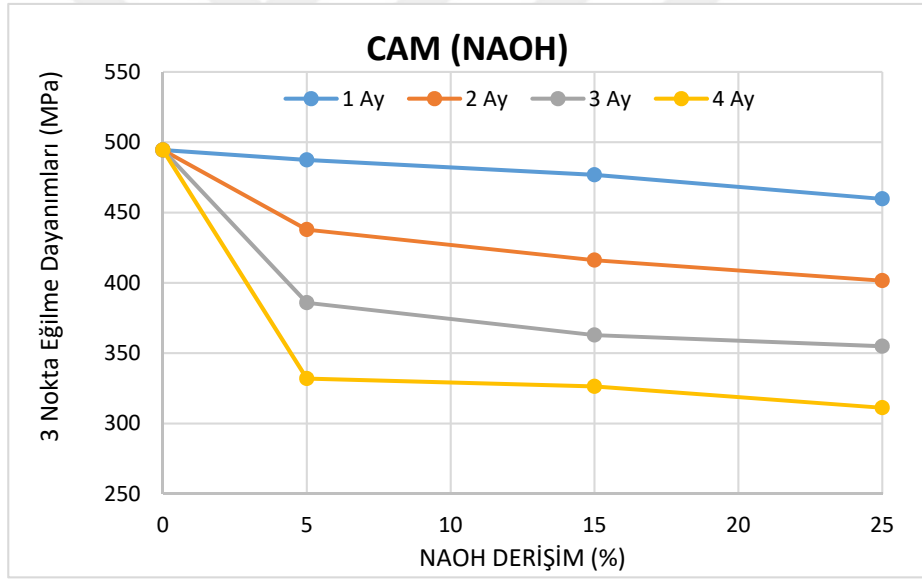
\*(standart sapma)

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme dayanımlarının asit ve baz ortam derişimine ve bekleme süresine göre değişimleri Şekil 6.17'de grafik olarak ifade edilmiştir. Aynı derişime sahip asidik ve bazik çözeltilerde eşit sürelerde bekleyen cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme dayanımları kıyaslandığında bazik ortamda bekleyen numunelerin eğilme dayanım değerlerinin %14,94'e kadar daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Sade cam/epoksi numunelerin 3 nokta eğilme dayanım değerleri ile asit ve baz ortamlarında bekleyen numunelerin aynı değerleri ile kıyaslandığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %45,25 ve bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değerin %37,07 olduğu gözükmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.17 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme mukavemet değişimleri  
(a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme dayanımları ve standart sapma değerleri Çizelge 6.20’de verilmiştir. Karbon/epoksi için maksimum eğilme mukavemeti değeri 627,06MPa hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum 3 nokta eğilme mukavemeti değeri ise 459,07MPa olarak %25 derişime sahip HCl asitte bekletilmiş numunelerden elde edilmiştir.

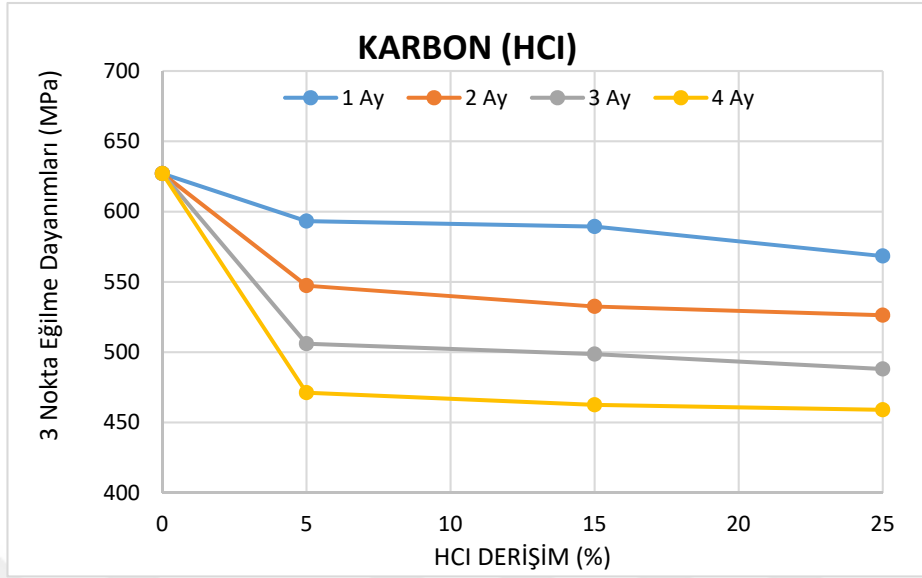
Çizelge 6.20 Karbon/epoksi 3 nokta eğilme mukavemetleri ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ							
Süre	Sade	HCl (MPa)			NaOH (MPa)		
(Ay)	0%	5%	15%	25%	5%	15%	25%
0	627,06	-	-	-	-	-	-
	(3,30)	-	-	-	-	-	-
1	-	593,24	589,38	568,39	621,47	618,47	603,51
	-	(26,57)	(12,42)	(5,64)	(26,43)	(10,11)	(6,80)
2	-	547,36	532,62	526,32	583,79	571,75	566,07
	-	(2,08)	(6,92)	(4,72)	(12,37)	(8,16)	(6,01)
3	-	506,10	498,63	488,07	544,27	526,19	511,30
	-	(7,52)	(3,31)	(10,14)	(8,66)	(9,59)	(6,82)
4	-	471,23	462,60	459,07	494,29	491,30	487,57
	-	(11,79)	(4,11)	(10,02)	(3,45)	(10,45)	(6,71)

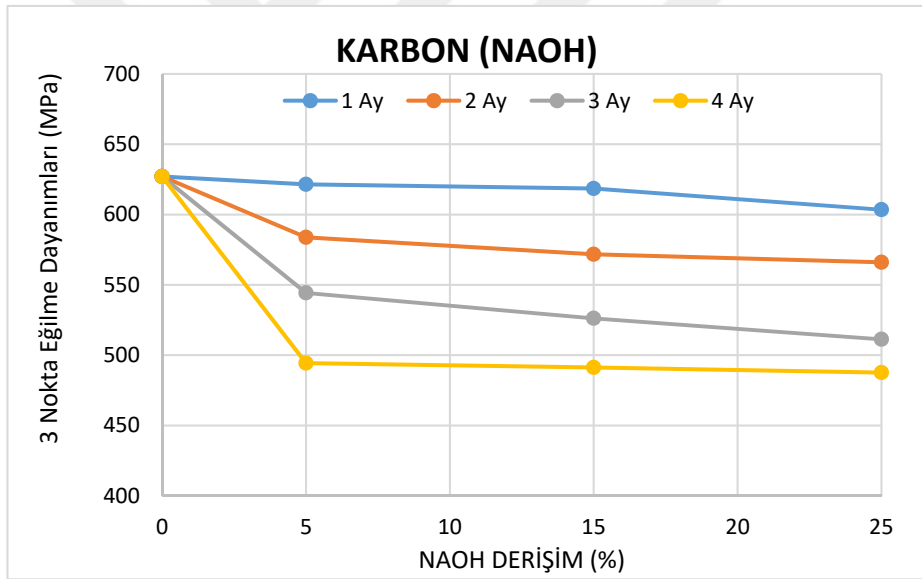
\*(standart sapma)

Şekil 6.18’de farklı derişime sahip asidik ve bazik ortamların ve bu ortamlardaki bekleme sürelerinin karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme mukavemetleri üzerindeki etkileri verilmiştir. Her iki çözelti türü içinde maksimum düşüş değeri %25 derişimde 4 ay süresince bekleyen numunelerde görülmektedir.

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin asit ve bazik ortamdaki 3 nokta eğilme dayanım kaybı değerleri farklı değer kaybı yüzdesinde fakat benzer formda olduğu görülmektedir. Eşit ortam koşulları ve bekleme süreleri için karbon/epoksi numunelerin 3 nokta eğilme dayanımları kıyaslandığında bazik ortamda bekleyen numunelerin %7.55’e kadar dahay yüksek eğilme dayanım değerine sahip oldukları tespit edilmiştir. Hiçbir ortamda bekletilmemiş numunelerin 3 nokta eğilme dayanımları asit çözeltisinde bekleyen numuneler ile kıyaslandığında asit ortamında bekleyen numunelerde maksimum değer kaybı %26,79’dur. Bazik ortamda bekleyen numuneler için ise bu değer %22,24 olduğu gözükmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.18 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin 3 nokta eğilme mukavemet değişimleri (a) HCl, (b) NaOH ortamlarında bekleyen

Statik testler kapsamında farklı ortamda ve farklı sürelerde bekleyen cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitin çekme, basma, kayma ve eğilme davranışları belirlenmiştir. Deneysel bulgular çizelge ve grafikler halinde ifade edilmiş ve sonuçlar ortam türü, derişim yüzdesi ve bekleme süresi açısından yorumlanmıştır.

Test sonuçları karbon/epoksi numunelerin cam/epoksi numunelere oranla daha yüksek dayanım değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında karbon fiber takviyeli numunler asit ve baz ortamından cam fiber takviyeli numunelere oranla daha az etkilenmiştir. Aynı matris malzemesine sahip olmalarından dolayı böyle bir sonuçta takviye fazının etkili olduğu söylenebilir. Karbon fiberi meydana getiren kimyasal bileşimin asidik ve bazik ortamdaki performansı cama göre daha iyidir. Burada konunun detayına girilmeyip, kapsamlı sonuçlar Bölüm 7’de ifade edilecektir.

## 6.2. Dinamik Testler

### 6.2.1. Cam/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Davranışları

Hiçbir ortamda bekletilmemiş (%0) cam/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma karakteristiğini ifade eden S-N eğrilerine ait yorulma mukavemeti-yorulma ömrü değerleri Çizelge 6.21’de verilmiştir. Verilen çizelge incelendiğinde, yorulma için uygulanan gerilme genliği arttığında, test numunesinin yorulmasına sebep olan yorulma gerilmesi değeri artmakta buna karşın yorulma ömrü düşmektedir. Farklı çevresel şartlarda ve farklı sürelerde bekletilmiş cam/epoksi tabakalı kompozitlere ait S-N eğri değerleri ise 8. Bölümde yer alan “8.1. Cam/Epoksi Numunelerin Asidik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti Çevrim Değerleri” başlığı altında verilmiştir.

Çizelge 6.21 Sade (%0) ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	212,41	360000	277,12	238500	278,41	169200	394,93	114500	374,58	56000
2	203,05	320000	264,48	283500	345,51	156600	344,15	118500	388,78	54200
3	256,32	388000	229,46	286000	305,71	166500	337,53	74500	425,01	46400
4	219,06	342000	260,60	276000	323,58	168300	370,34	127500	427,39	54400
5	202,36	364000	252,26	271500	288,58	165600	389,72	133500	412,74	59000
ORT.	<b>218,64</b>	<b>354800</b>	<b>256,78</b>	<b>271100</b>	<b>308,36</b>	<b>165240</b>	<b>367,34</b>	<b>113700</b>	<b>405,70</b>	<b>54000</b>

Farklı derişimlere sahip asidik ve bazik ortamlarda bekleyen numunelerin zaman içerisindeki yorulma davranışları ele alındığında, hiçbir ortamda beklemeyen sade (%0) yorulma numunelerinin yorulma davranışlarına kıyasla hem yorulma gerilmesi değerlerinin hemde ömür değerlerinin azaldığını belirlenmiştir. Her iki ortam içinde maksimum düşüş değerleri %25 derişimlerde 4 ay süresince beklemiş ve 3 nokta eğilme mukavemetinin %80’indeki gerilme değerlerinde yorulmaya zorlanan numunelerden elde edilmiştir. Numuneyi yorulmaya zorlayan gerilme değeri arttıkça malzemenin malzemenin elastite modülü daha hızlı düşmektedir. Bu da malzemenin düşük gerilme değerlerinde dahi kolaylıkla şekil değiştirmesine neden olmaktadır. Çizelge 6.22’de cam/epoksi tabakalı kompozitlere ait maksimum mukavet ve ömür kayıpları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Diğer ortam ve gerilme türleri için mukavemet ve ömür kayıp yüzdeleri Ekler bölümünde yer alan “8.5. Çözelti Derişimine ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Cam/Epoksi Kompozitlerin Yorulma Dayanım ve Ömür Değerlerinin Değişim Yüzdeleri” başlığı altında verilmiştir.

Asidik ortamda kalan numunelerin yorulma ömürlerindeki kayıp değerleri incelendiğinde, çözeltinin yüzde derişiminin artması, cam/epoksi kompozitlerin yorulma ömürleri üzerinde bekleme süresine göre daha yıpratıcı etkisi vardır. Bazik ortamda kalan numuneler için böyle bir ifade net olarak söylenemese de bekleme süresinin çözelti derişimine oranla cam/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma ömürleri üzerinde daha yıpratıcı bir etkiye sahip olduğu bazı durumlar için görülebilir. Yorulma testine tabi tutulan sade (%0) ve 4 ay süresince %25'lik asit ortamında bırakılmış numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürleri karşılaştırıldığında derişim ve bekleme süresi cam/epoksi numunenin yorulma mukavemetinin %41,95'ini ve ömrünün %97,19'unu kaybetmesine neden olmuştur. Aynı değerler 4 ay süresince %25'lik bazik ortamda bekleyen numuneler için mukavemette %21,36 ve ömür için %62,38'dir.

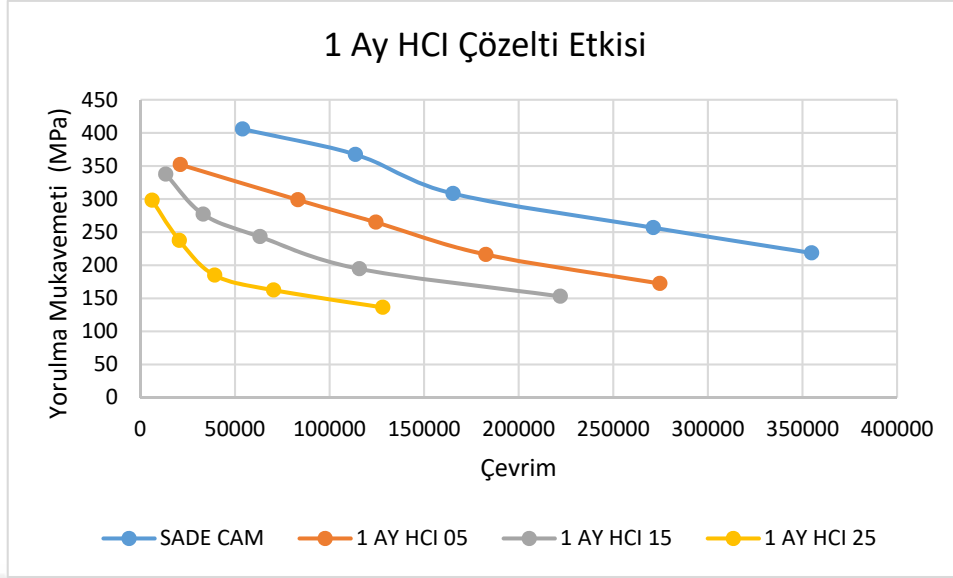
Çizelge 6.22 Cam/epoksi numunelerdeki maksimum yorulma mukavemeti ve ömür kayıpları

	<b>Yorulma Mukavemeti (MPa)</b>	<b>Yorulma Ömrü (Çevrim)</b>	<b>Yorulma Mukavemeti Kayıp (%)</b>	<b>Yorulma Ömür Kayıp (%)</b>
<b>Sade (%0)</b>	405,70	54000	-	-
<b>HCl25</b>	235,50	1515	41,95	97,19
<b>NaOH25</b>	319,03	20313	21,36	62,38

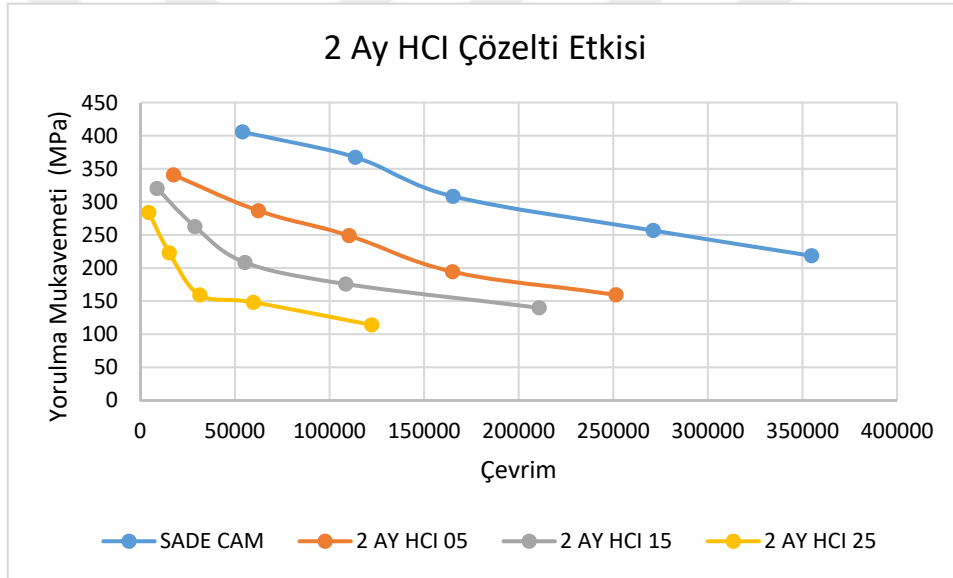
Şekil 6.19'da asidik ortamlarda bekleyen ve Şekil 6.21'de bazik ortamlarda bekleyen yorulma numuneleri için S-N eğrilerinin çözelti derişim ile olan ilişkisini ifade eden grafikler verilmiştir. Benzer olarak Şekil 6.20 asidik ortamlarda bekleyen ve Şekil 6.22'de bazik ortamlarda bekleyen yorulma numuneleri için S-N eğrileri ve bekleme süreleri arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikler verilmiştir.

Şekil 6.19 S-N eğri karşılaştırmaları incelendiğinde, bekleme süresi arttıkça hasar şekilleri numune kırılması olarak meydana gelmektedir. Asitte bekleyen cam/epoksi numunelerin dinamik yük altındaki mukavemet kayıpları hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Öyleki %50'lik bir gerilme genliğinde bile HCl asit ortamında bekleyen numuneler 50000 çevrim sayısına ulaşamamışlardır. Şekil 6.20'de asit ortamındaki bekleme süresinin cam/epoksi numunelerin S-N eğrisi üzerindeki etkisine baktığımızda rijitlik kaybından daha çok ömür kayıpları göze çarpmaktadır. Bekleme süresi arttıkça numunedeki yıpranma seviyesinin artması cam/epoksi numunelerin daha düşük çevrim sayılarında yorulmasına neden olmuştur.



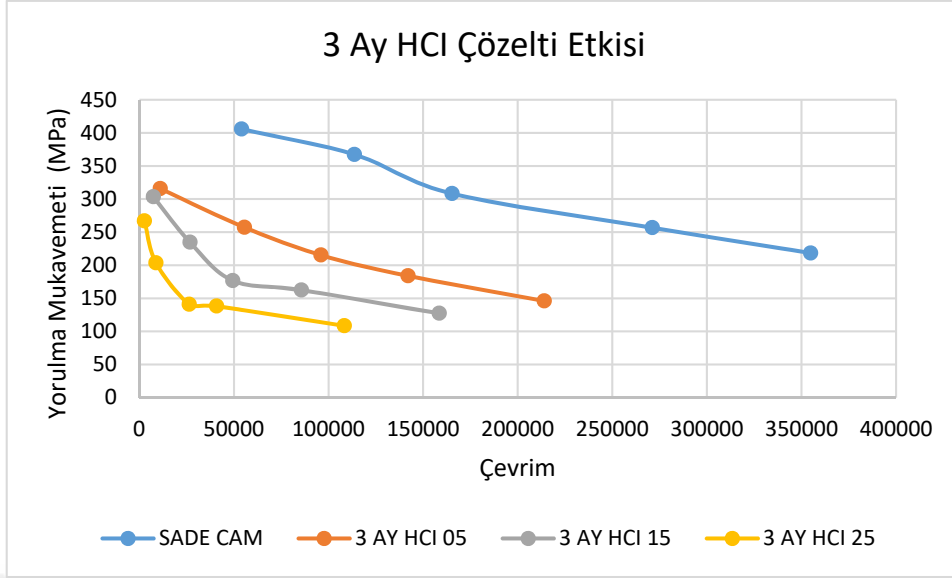


(a)

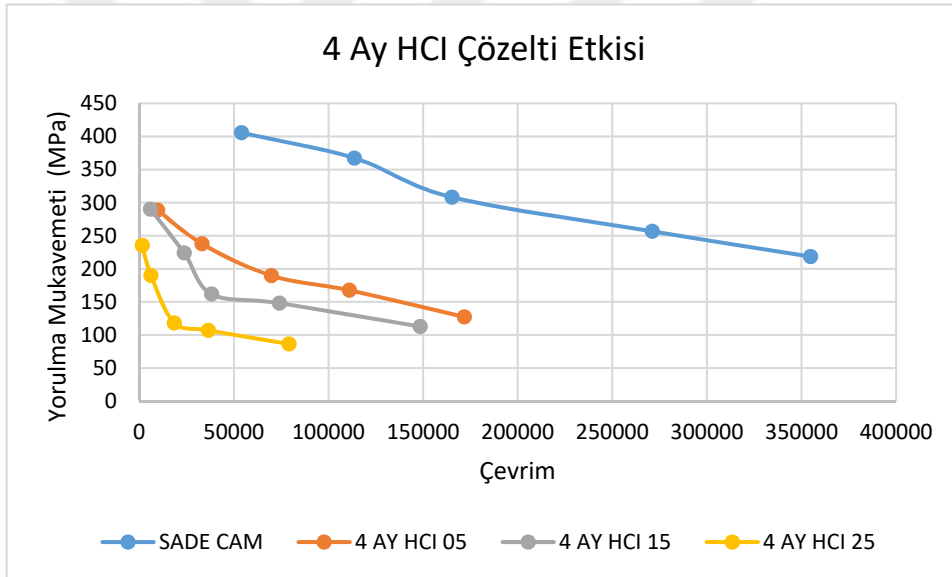


(b)

Şekil 6.19 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay

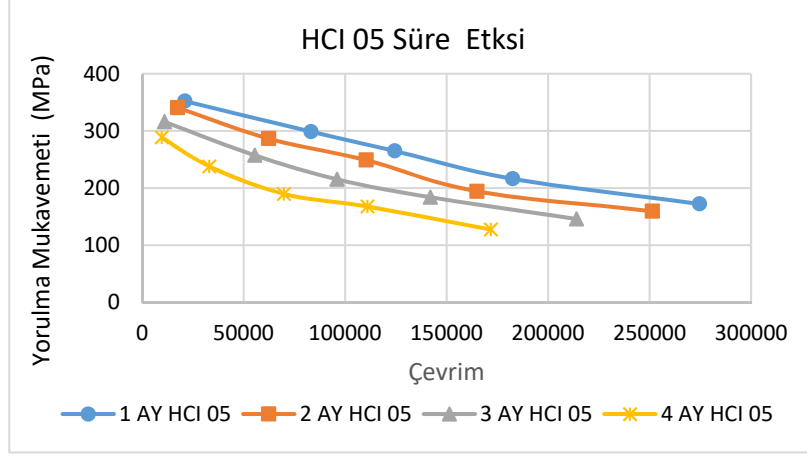


(c)

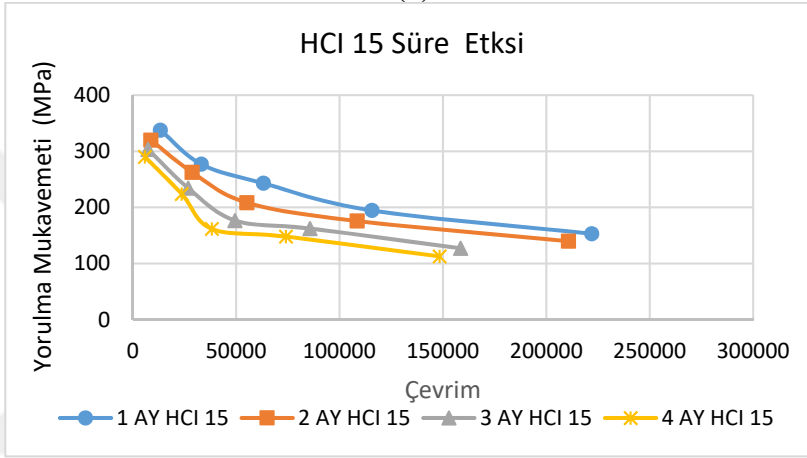


(d)

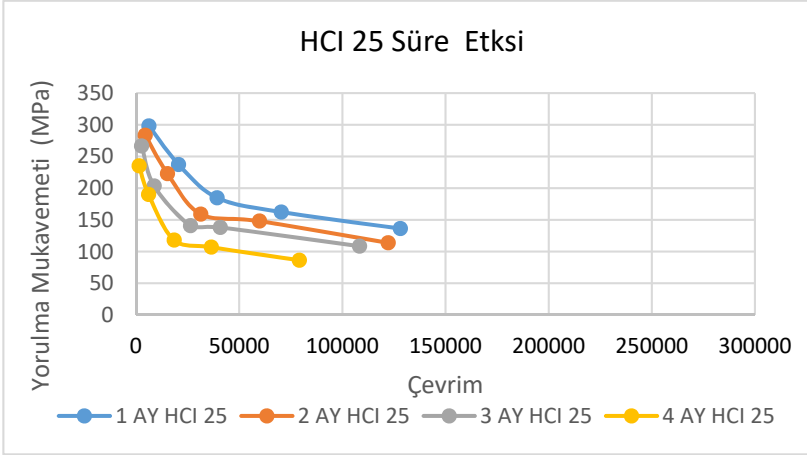
Şekil 6.19 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı)



(a)

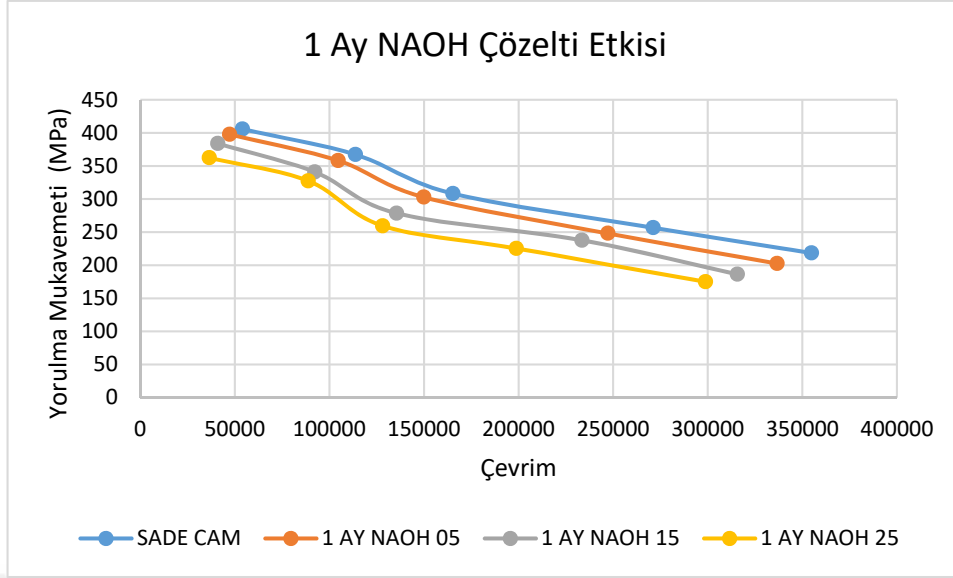


(b)

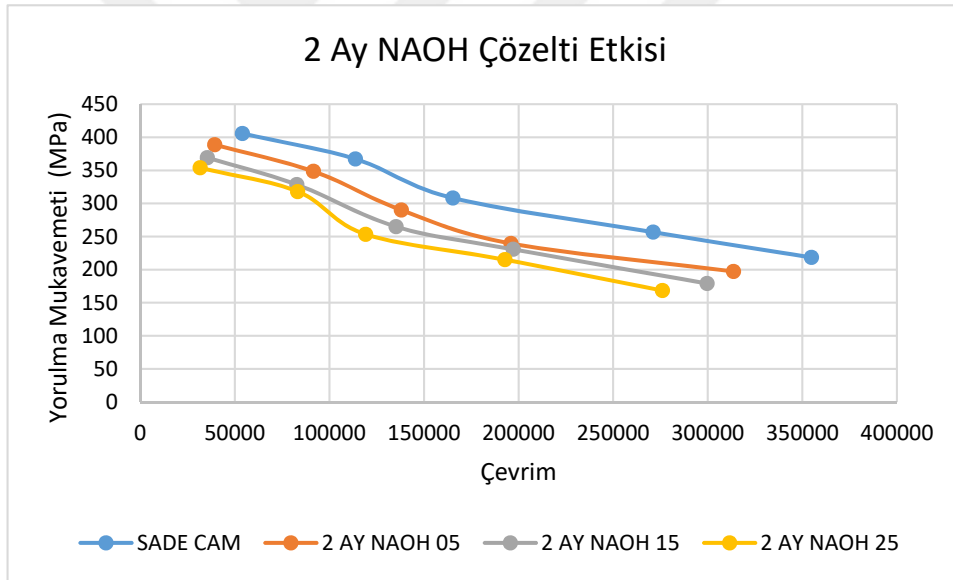


(c)

Şekil 6.20 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25

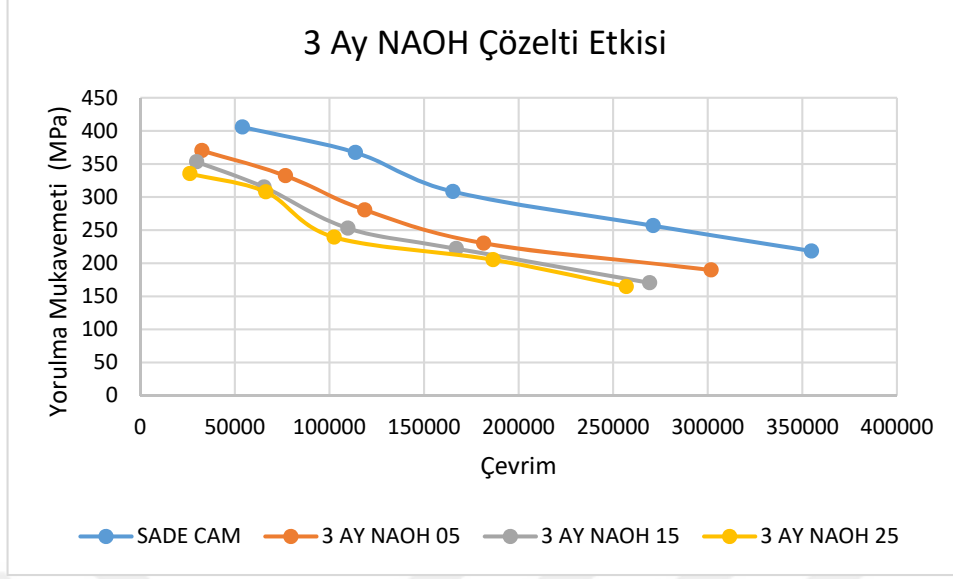


(a)

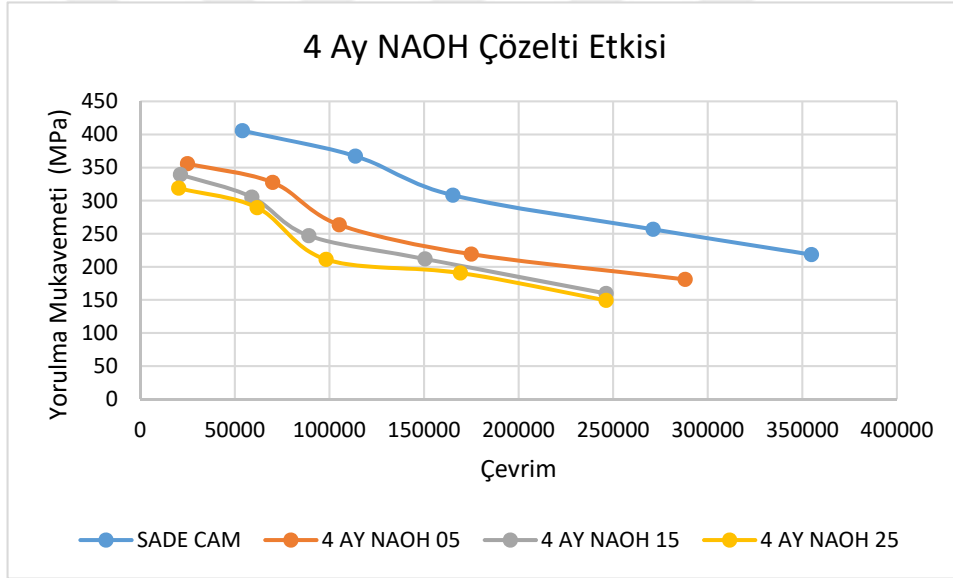


(b)

Şekil 6.21 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay

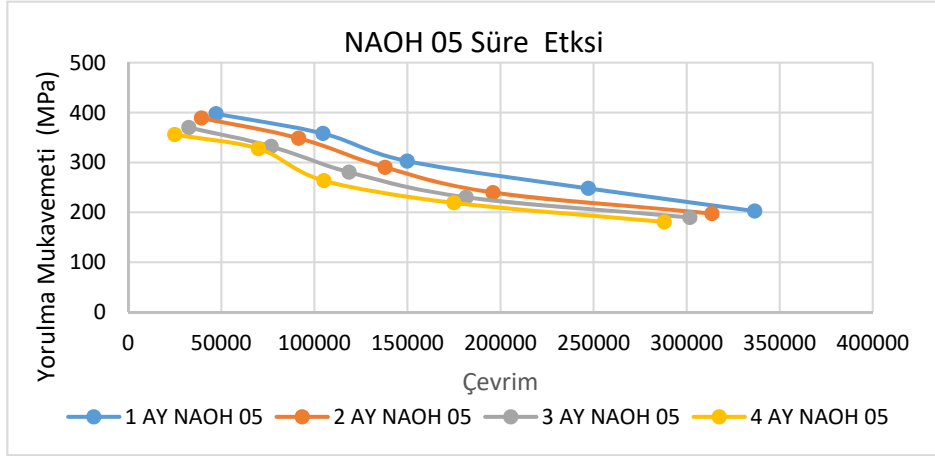


(c)

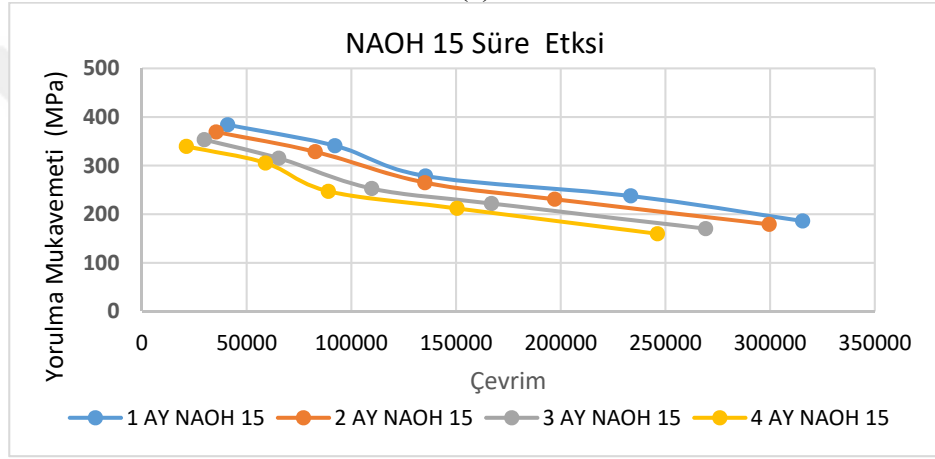


(d)

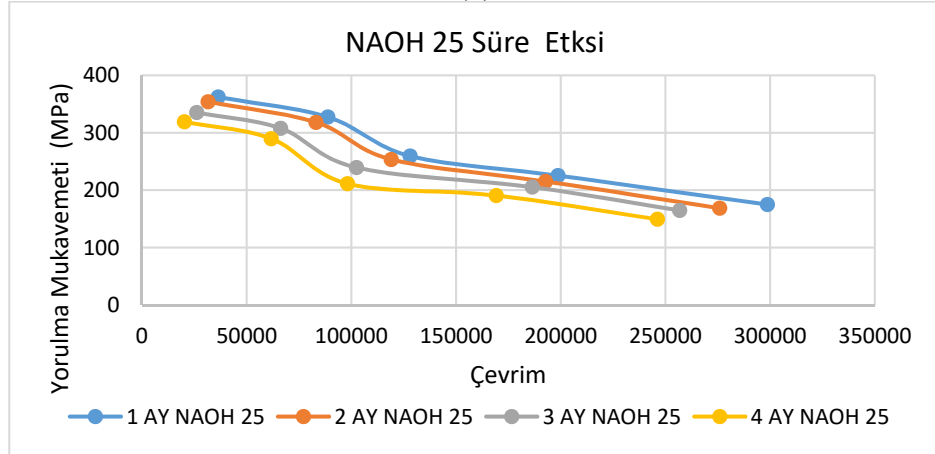
Şekil 6.21 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı)



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.22 Cam/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25

Bazik ortamlarda bekleyen cam/epoksi numunelerde hasar yüksek genlikte kırılma (%80), düşük genlikler için delaminasyon şeklinde meydana gelmiştir. Şekil 6.21'deki S-N eğrileri incelendiğinde rijitlik kayıpları asitte bekleyen numunelere oranla daha yatay bir seyirde değiştiği görülmektedir. Ayrıca aside oranla, bazik ortamda bekleyen numuneler daha yüksek yorulma gerilmesi altında, daha uzun yorulma ömrüne sahip oldukları görülmektedir. Aynı derişime sahip bazik ortamda bekleyen numunelerin farklı sürelerdeki S-N eğrileri kıyaslandığında yorulma davranışlarının benzer olduğu söylenebilir. Rijitlik ve ömür kayıplarının asit ortamına göre çok küçük değerlerde değiştiği gözlenmiştir.

Şekil 6.19-6.22'deki rijitlik ve ömür kayıpları beraber ele alındığında bekleme süresinden ziyade ortam derişiminin cam/epoksi numunelerin yorulma davranışları üzerinde daha olumsuz etkilere sahip olduğu söylenebilir.

Çalışma kapsamında cam/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma karakteristiğini belirlemek için eğilmeli yorulma testlerinden elde edilen veriler S-N eğrilerinde ifade edilmiştir. Yorulma ömrünü belirlemede esas alınan kriterler gerekçeleri ile beraber “5.5.1 Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Dayanımları ve Ömürlerinin Belirlenmesi” başlığı altında anlatılmıştı. Kırılma hasarına veya %20'lik rijitlik kaybına uğramayan numuneler için ise yine literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak teorik ömür  $10^6$  çevrim sayısı olarak kabul edilmiştir. Denklem 5.7'de ifade edildiği gibi S-N eğrileri Power Law fonksiyonu ile matematiksel olarak ifade edilebilirler. Cam/epoksi numunelerin yorulma davranışları için Power Law fonksiyonunun gerçek değerleri belirlemede performansı Çizelge 6.23'te bazı cam/epoksi numunelerin deneysel değerleri ile kıyaslanarak verilmiştir. Burada sadece Power Law fonksiyonunun gerçeği tahmin etmedeki performansı hakkında görüş sahibi olmak amaçlanmıştır. Buna göre fonksiyonun  $R^2$  (regresyon katsayısı) değeri 1'e ne kadar yakınsa gerçeğe yakınsamadaki hata oranıda o kadar az olmaktadır.

Çizelge 6.23 Cam/epoksi numuneler için gerçek ve Power Law fonksiyonu yorulma mukavemeti karşılaştırması

Çevrim	Power Law Fonk.	$R^2$	Yorulma Mukavemeti (Gerçek)	Yorulma Mukavemeti (Power Law)	Hata Oranı (%)
165600	$15791(N)^{-0,33}$	0,9384	315,26	299,31	5,06
111000	$3809,9(N)^{-0,255}$	0,9084	167,73	196,95	17,42
222000	$4994,5x^{-0,279}$	0,9778	154,26	161,01	4,38
138000	$14616x^{-0,336}$	0,9276	301,25	274,05	9,03

Cam/epoksi numunlerin teorik ömür değerlerine ( $10^6$  çevrim) kadar kırılmadığı varsayılarak, teorik ömürlerine karşılık gelen yorulma gerilme değerleri, Çizelge 6.24'te verilmiştir.

Çizelge 6.24 Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrilerine göre  $N_f=10^6$  çevrim sayısına karşılık gelen maksimum gerilme değerleri

CAM/EPOKSİ						
		R <sup>2</sup>	A	B	N <sub>f</sub>	S <sub>a</sub>
<b>Sade</b>		0,9389	15791,00	-0,330	1000000	165,35
<b>HCl05</b>	1AY	0,8562	5188,60	-0,262	1000000	139,01
	2AY	0,8900	5517,10	-0,277	1000000	120,15
	3AY	0,8438	3520,80	-0,241	1000000	126,08
	4AY	0,9084	3809,90	-0,255	1000000	112,44
<b>HCl15</b>	1AY	0,9778	4994,50	-0,279	1000000	105,80
	2AY	0,9800	3657,40	-0,263	1000000	96,64
	3AY	0,9963	3815,30	-0,271	1000000	90,27
	4AY	0,9604	3259,90	-0,261	1000000	88,55
<b>HCl25</b>	1AY	0,9869	3057,10	-0,263	1000000	80,78
	2AY	0,9755	2986,90	-0,277	1000000	65,05
	3AY	0,9949	2065,40	-0,249	1000000	66,22
	4AY	0,9841	1559,50	-0,229	1000000	65,92
<b>NaOH05</b>	1AY	0,9236	16973,00	-0,342	1000000	150,58
	2AY	0,9276	14616,00	-0,333	1000000	146,83
	3AY	0,9423	10916,00	-0,314	1000000	142,58
	4AY	0,9259	7123,60	-0,284	1000000	140,83
<b>NaOH15</b>	1AY	0,9269	15960,00	-0,344	1000000	137,73
	2AY	0,9278	13275,00	-0,335	1000000	129,73
	3AY	0,9506	11624,00	-0,328	1000000	125,13
	4AY	0,9253	7483,00	-0,296	1000000	125,34
<b>NaOH25</b>	1AY	0,9112	14868,00	-0,346	1000000	124,81
	2AY	0,8988	12871,00	-0,337	1000000	122,35
	3AY	0,9162	9715,50	-0,317	1000000	121,75
	4AY	0,8947	6907,80	-0,293	1000000	120,60

Çizelge 6.24'te anlaşılabileceği üzere teorik ömür değeri içinde bekleme süresi ve ortam derişimi arttıkça cam/epoksi numunelerin yorulma mukavemet değerleri azalmaktadır. Ayrıca asidik ve bazik ortamdaki mukavemet kayıpları incelendiğinde asidik ortamdaki kayıpların bazik ortamdakine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu yorumlara göre teorik sonuçların deneysel sonuçlara benzerlik gösterdiği söylenebilir.



### 6.2.2. Karbon/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Yorulma Davranışları

Hiçbir ortamda bekletilmemiş (%0) karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma karakteristiğini ifade eden S-N eğrilerine ait yorulma mukavemeti-yorulma ömrü değerleri Çizelge 6.25’de verilmiştir. Farklı çevresel şartlarda ve farklı sürelerde bekletilmiş cam/epoksi tabakalı kompozitlere ait S-N eğri değerleri ise 8. Bölümde yer alan “8.2. Karbon/Epoksi Numunelerin Asidik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti Çevrim Değerleri” başlığı altında verilmiştir.

Çizelge 6.25 Sade (%0) ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	343,32	1026250	453,07	944000	622,50	927000	588,08	782000	742,32	648000
2	373,70	1111250	380,05	956000	543,04	847500	677,33	772000	661,85	652000
3	353,20	1097500	482,78	972000	458,07	932500	593,65	754000	646,52	681000
4	330,00	1163750	387,23	936000	520,58	792500	583,25	712000	661,30	689000
5	336,54	1105000	415,18	968000	538,32	911000	542,25	786000	631,03	678000
<b>ORT.</b>	<b>347,35</b>	<b>1100750</b>	<b>423,66</b>	<b>955200</b>	<b>536,50</b>	<b>882100</b>	<b>596,91</b>	<b>761200</b>	<b>668,60</b>	<b>669600</b>

Karbon/epoksi numunelerin asit ve bazdaki yorulma mukavemeti ve ömür değerlerindeki en fazla kayıp 4 ay süresince %25’lik derişimde bekleyip %80 genlikte zorlanan numunelerde görülmüştür. Bu şartlar cam/epoksi numunler içinde en zor olan koşullardır. Asit ve baz ortamlarında bekleyen karbon/epoksi numunelerdeki maksimum mukavemet ve ömür kayıpları Çizelge 6.26’da verilmiştir. Buna göre 4 ay süresince %25’lik asit ortamında bırakılan karbon/epoksi numunelerin yorulma mukavemeti ve ömründeki düşüş değeri sırasıyla %18,34 ve %25,33’tür. Aynı değerler 4 ay süresince %25’lik bazik ortamda bekleyen karbon/epoksi numuneler için sırasıyla 11,90 ve %19,81’dir.

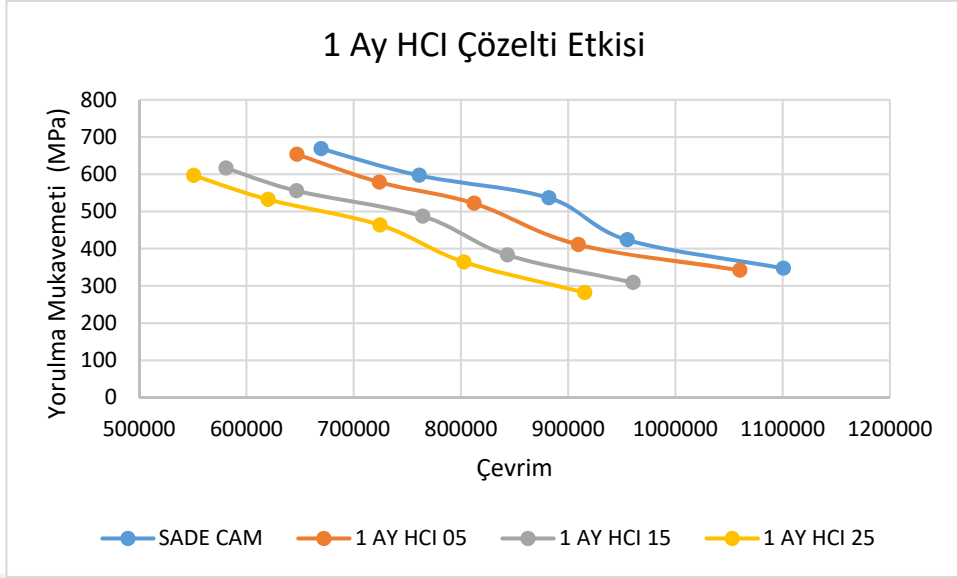
Çizelge 6.26 Karbon/epoksi numunelerdeki maksimum yorulma mukavemeti ve ömür kayıpları

	Yorulma Mukavemeti (MPa)	Yorulma Ömrü (Çevrim)	Yorulma Mukavemeti Kayıp (%)	Yorulma Ömür Kayıp (%)
<b>Sade (%0)</b>	668,60	669600	-	-
<b>HCl25</b>	545,99	508400	18,34	25,33
<b>NaOH25</b>	589,06	552800	11,90	19,81

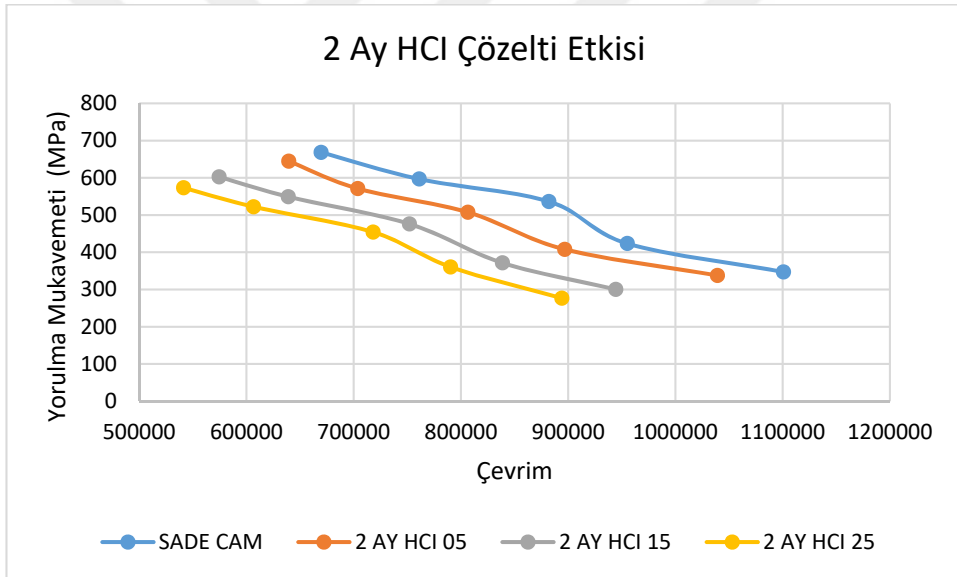
Diğer ortam ve gerilme türleri için mukavemet ve ömür kayıp yüzdeleri Ekler bölümünde yer alan “8.6. Çözelti Derişimine ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Karbon/Epoksi Kompozitlerin Yorulma Dayanım ve Ömür Değerlerinin Değişim Yüzdeleri” başlığı altında verilmiştir. Asidik ortamda kalan numunelerin yorulma ömürlerindeki kayıp değerleri incelendiğinde, çözeltinin yüzde derişim artışının karbon/epoksi kompozitlerin yorulma ömürleri üzerinde bekleme süresine göre daha yıpratıcı etkisi vardır. Bazik ortamda kalan numuneler için bekleme süresinin çözelti derişimine oranla karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma ömürleri üzerinde daha yıpratıcı bir etkiye sahip olduğu görülebilir.

Asidik ortamlarda bekleyen karbon/epoksi numuneler için S-N eğrilerinin çözelti derişimine göre ilişkileri ifade eden grafikler Şekil 6.24’de ve bazik ortamda bekleyenler için Şekil 6.26’da verilmiştir. Benzer olarak Şekil 6.25’de asidik ortamlarda bekleyen ve Şekil 6.27’de bazik ortamlarda bekleyen yorulma numuneleri için yorulma mukavemeti, yorulma ömrü ve bekleme süreleri arasındaki ilişkiyi ifade eden grafikler verilmiştir. Grafiklere göre derişim ve bekleme süresinin karbon/epoksi numunelerin yorulma mukavemet ve ömür değeri üzerinde olumsuz etkileri olduğu söylenebilir.

Asit ortamında bekleyen karbon/epoksi numunelerde yorulma mukavemet ve yorulma ömür kayıpları gözlemlense de bu kayıplar cam/epoksi de olduğu kadar net değildir. Zaten karbon fiber yapı olarak cam fiberden üstün mekank özelliklere sahip olduğundan dolayı %80 gerilme genlik değerlerinde zorlanmasında bile yorulma ömrü 500000 çevrim sayısına kadar ulaşabilmektedir. Karbon fiber yapının sahip olduğu bu üstün özellikler onu çevresel etkilere karşı daha dirençli kılmıştır. Asit ortamında bekleyen karbon/epoksi numunelerin S-N eğrileri kıyaslandığında rijitlik ve ömür kayıplarının zamanla değişimlerinin yüksek olmadığı görülebilir. Bazik ortamda bekleyen karbon/epoksi numuneler yorulma davranışları ile asit ortamında bekleyen numunelere göre fazla bir fark olmadığı söylenebilir.

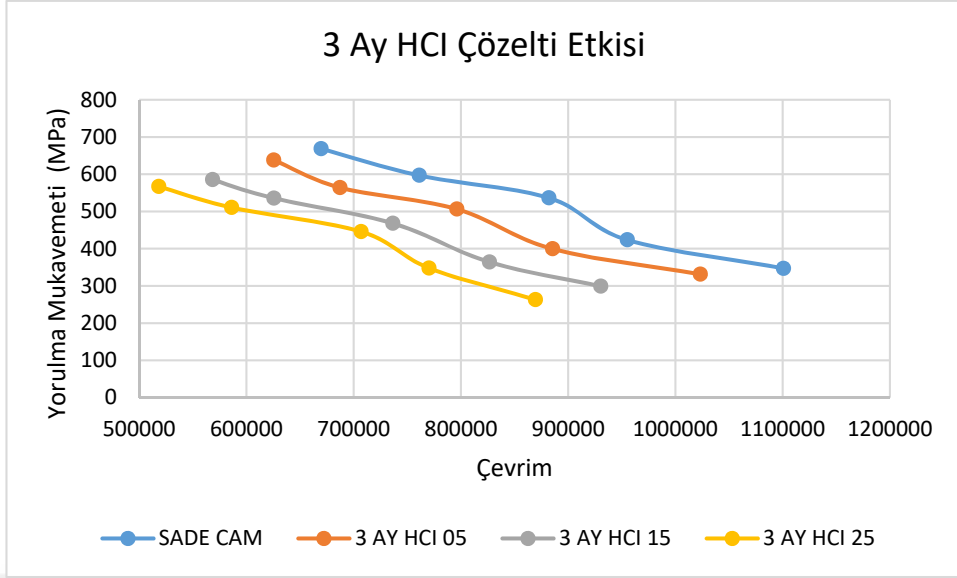


(a)

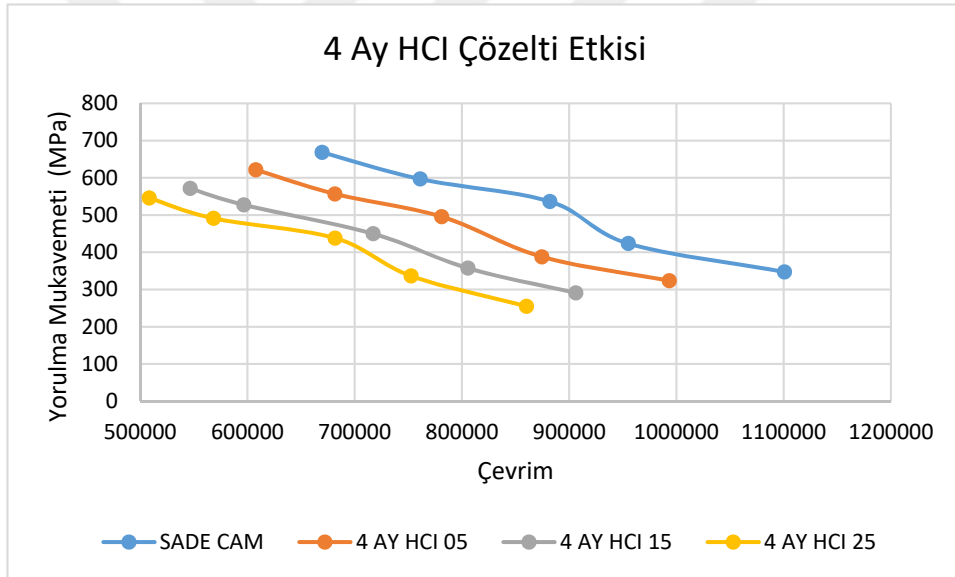


(b)

Şekil 6.24 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay

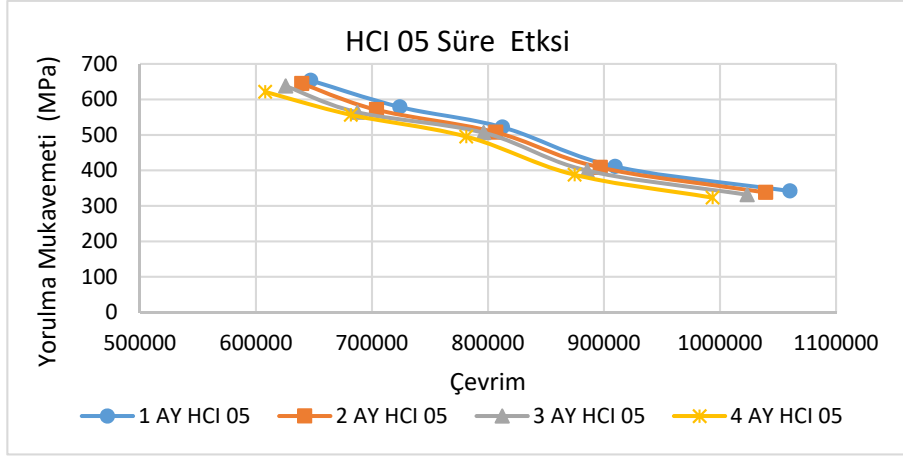


(c)

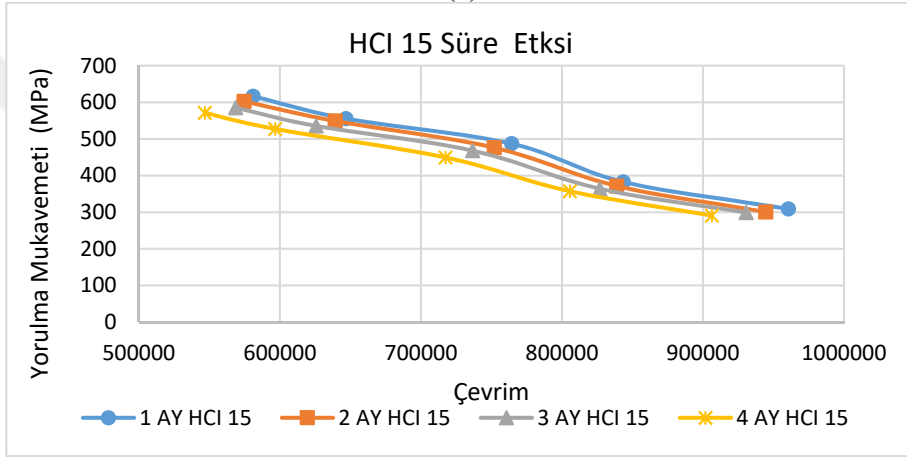


(d)

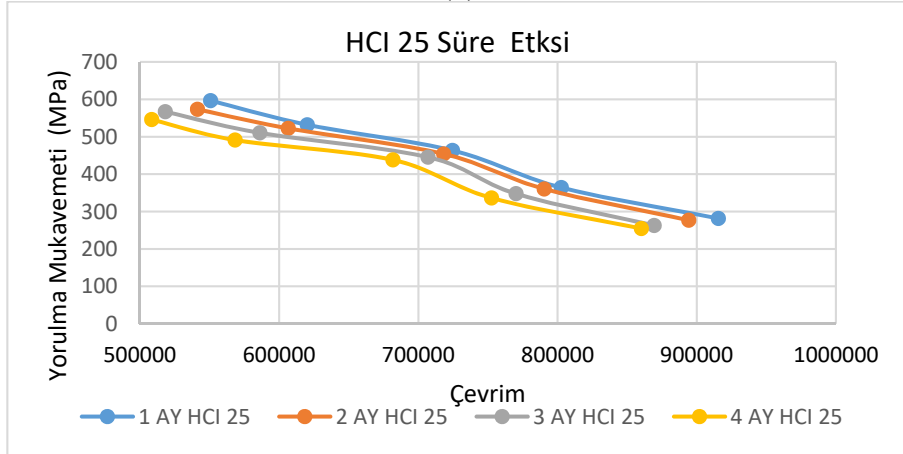
Şekil 6.23 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCl çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı)



(a)

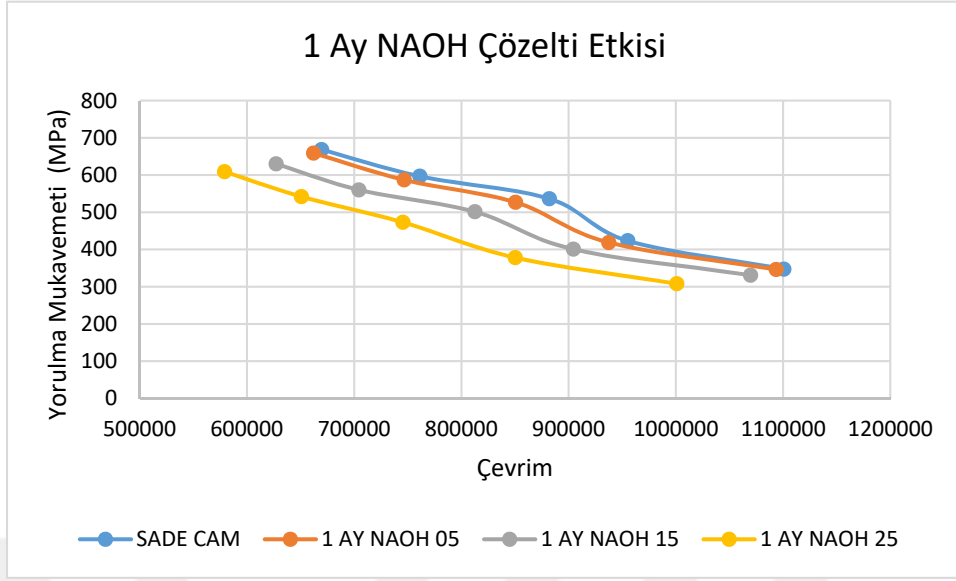


(b)

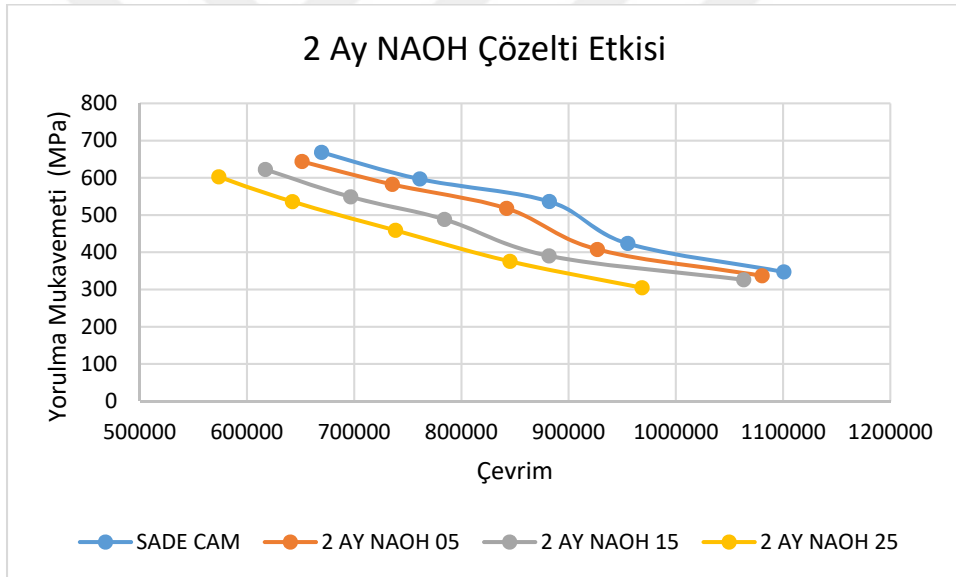


(c)

Şekil 6.24 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin HCI çözeltisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25

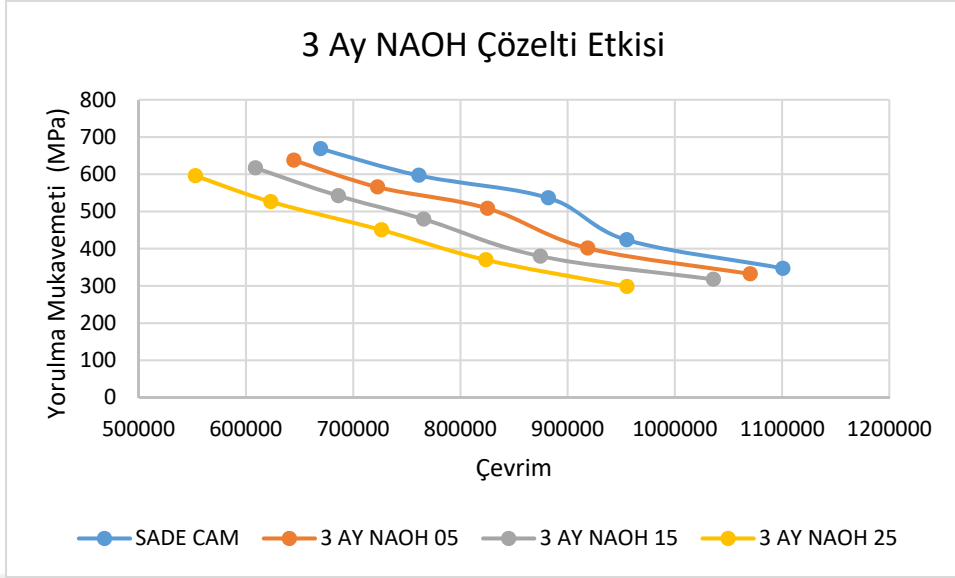


(a)

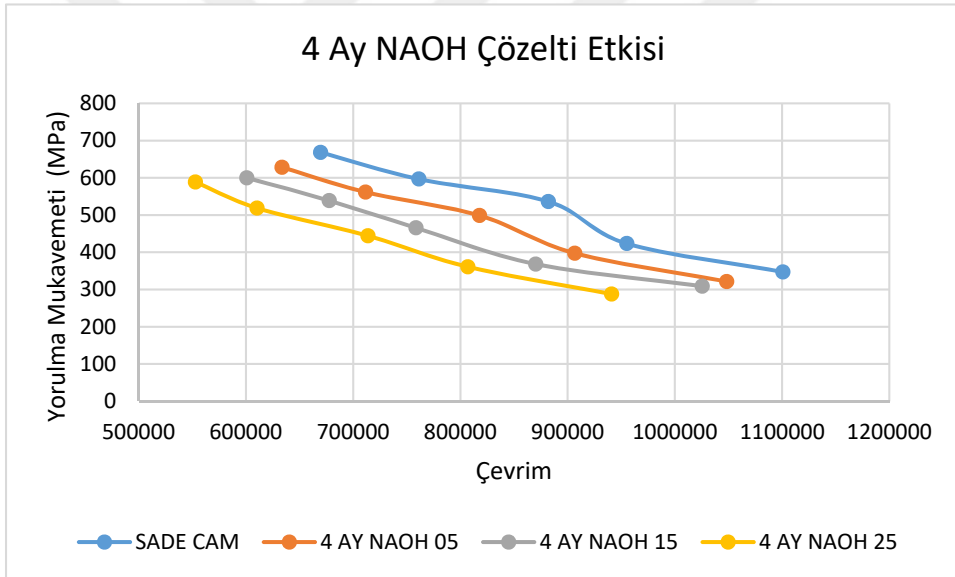


(b)

Şekil 6.26 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay

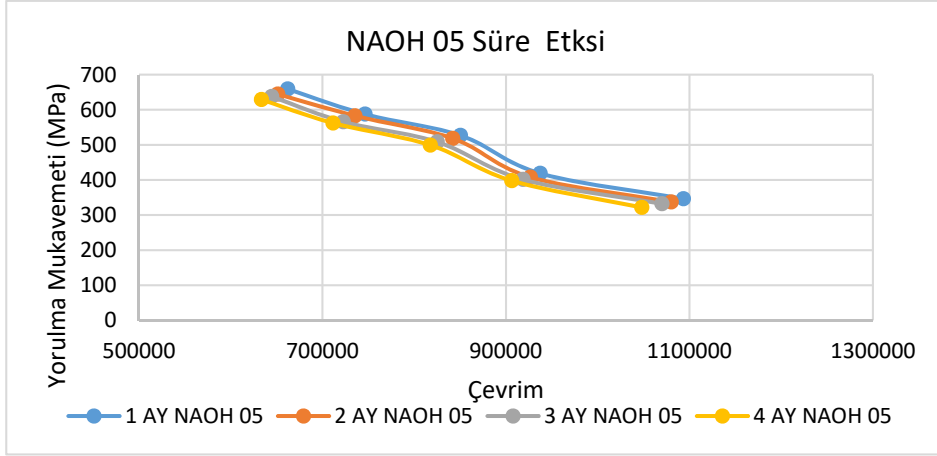


(c)

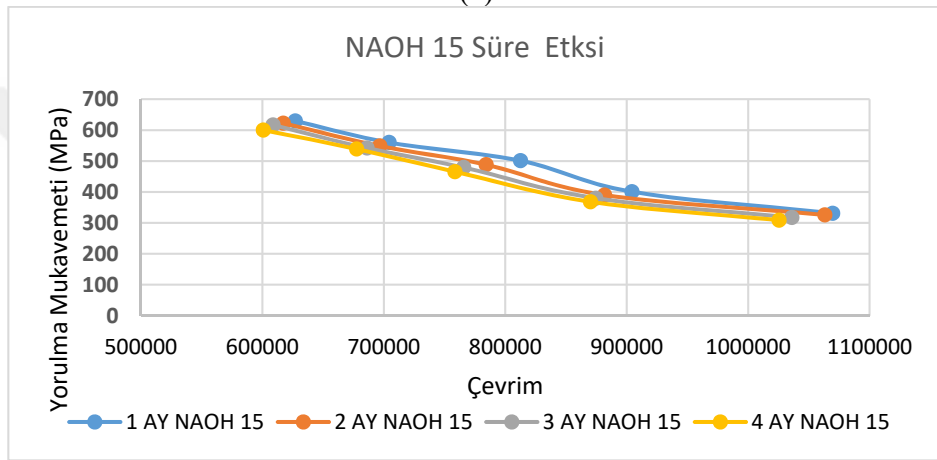


(d)

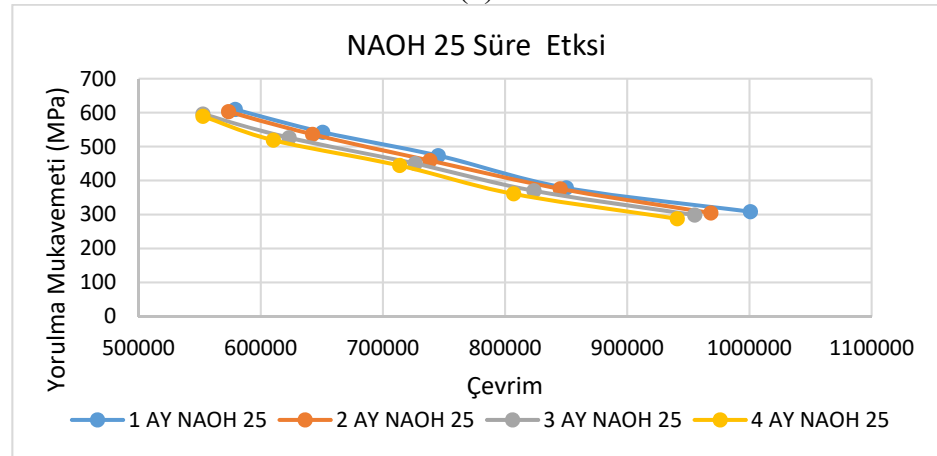
Şekil 6.25 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözelti derişimine göre değişimleri (a) 1Ay, (b) 2Ay, (c) 3Ay ve (d) 4Ay (Devamı)



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.26 Karbon/epoksi kompozit numunelerin yorulma mukavemeti ve ömürlerinin NaOH çözeltilisinde bekleme sürelerine göre değişimleri (a) %5, (b) %15 ve (c) %25



Karbon/epoksi numunelerin yorulma davranışları için Power Law fonksiyonunun gerçek değerleri belirlemede performansı Çizelge 6.27’de bazı karbon/epoksi numunelerin deneysel değerleri ile kıyaslanarak verilmiştir. Burada sadece Power Law fonksiyonunun gerçeği tahmin etmedeki performansı hakkında görüş sahibi olmak amaçlanmıştır.

Çizelge 6.27 Karbon/epoksi numuneler için gerçek ve Power Law fonksiyonu yorulma mukavemeti karşılaştırması

Çevrim	Power Law Fonk.	R <sup>2</sup>	Yorulma Mukavemeti (Gerçek)	Yorulma Mukavemeti (Power Law)	Hata Oranı (%)
1000000	4E+10x <sup>-1,332</sup>	0,9473	381,23	407,44	6,87
1000000	5E+10x <sup>-1,35</sup>	0,9827	385,62	397,16	2,99
1000000	4E+10x <sup>-1,341</sup>	0,9852	351,25	359,80	2,43
1000000	3E+10x <sup>-1,32</sup>	0,9675	345,87	360,68	4,28

Çizelge 6.28’de karbon epoksi tabakalı kompozitlere ait S-N eğrilerini matematiksel olarak ifade eden Power Law fonksiyonu katsayıları teorik ömürlerine karşılık gelen yorulma mukavemet değerleri, teorik ömür değerlerine (10<sup>6</sup> çevrim) kadar kırılmadığı varsayılarak, Çizelge 6.24’te verilmiştir.

Çizelge 6.28 incelendiğinde bekleme süresi ve ortam derişimi arttıkça karbon/epoksi numunelerin teorik yorulma mukavemet değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun yanında asidik ve bazik ortamdaki mukavemet kayıpları incelendiğinde asidik ortamdaki kayıpların bazik ortamdakine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu yorumlara göre teorik sonuçların deneysel sonuçlara benzerlik gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 6.28 Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin S-N eğrilerine göre  $N_f=10^6$  çevrim sayısına karşılık gelen maksimum gerilme değerleri

KARBON/EPOKSİ						
		R <sup>2</sup>	A	B	N <sub>f</sub>	S <sub>a</sub>
Sade		0,9473	4,00E+10	-1,332	1000000	407,44
HCI05	1AY	0,9827	5,00E+10	-1,350	1000000	397,16
	2AY	0,9852	4,00E+10	-1,337	1000000	380,24
	3AY	0,9824	3,00E+10	-1,317	1000000	375,94
	4AY	0,9794	3,00E+10	-1,320	1000000	360,68
HCI15	1AY	0,9577	5,00E+10	-1,361	1000000	341,17
	2AY	0,9591	7,00E+10	-1,386	1000000	338,14
	3AY	0,9655	7,00E+10	-1,387	1000000	333,50
	4AY	0,9604	3,00E+10	-1,326	1000000	331,99
HCI25	1AY	0,9571	2,00E+11	-1,463	1000000	333,45
	2AY	0,9387	9,00E+10	-1,406	1000000	329,79
	3AY	0,9732	3,00E+10	-1,328	1000000	322,94
	4AY	0,9419	3,00E+10	-1,329	1000000	318,51
NAOH05	1AY	0,9721	3,00E+10	-1,312	1000000	402,83
	2AY	0,9645	3,00E+10	-1,313	1000000	397,30
	3AY	0,9732	3,00E+10	-1,315	1000000	386,47
	4AY	0,9675	3,00E+10	-1,315	1000000	386,47
NAOH15	1AY	0,9786	8,00E+09	-1,218	1000000	393,63
	2AY	0,9869	8,00E+09	-1,219	1000000	388,23
	3AY	0,9926	1,00E+10	-1,237	1000000	378,44
	4AY	0,9934	9,00E+09	-1,231	1000000	370,03
NAOH25	1AY	0,9905	1,00E+10	-1,238	1000000	373,25
	2AY	0,9923	2,00E+10	-1,290	1000000	363,94
	3AY	0,9894	1,00E+10	-1,242	1000000	353,18
	4AY	0,9930	1,00E+10	-1,241	1000000	358,10

### 6.3. Tabakalı Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Sonuçları

#### 6.3.1. Cam/Epoksi Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Sonuçları

Cam/epoksi tabakalı kompozitlerin farklı derişimlere sahip asidik ve bazik ortamlardaki farklı bekleme süreleri sonucunda aldıkları %nem miktarı Denklem 5.6'daki formüle göre hesaplanmıştır. Her bir yapıya ait deneysel %nem alma miktarı ve standart sapma değerleri Çizelge 6.29.'da verilmiştir. Yüzde nem alma değerleri belirlenirken olarak numunenin ilk ağırlığı referans alınmıştır. Asidik ve bazik ortamlar için çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça % nem alma değeri artmaktadır. Asitte bekleyen numuneler için numune

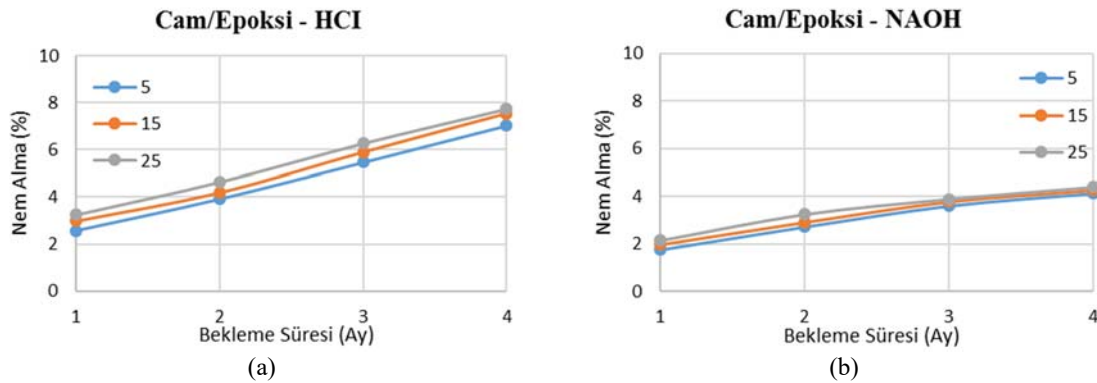
ağırlığına oranla maksimum nem alma miktarı %7,75 civarındadır. Bazik ortamlarda bekleyen numuneler için bu değer %4,39 civarındadır.

Asit ortamında bekleyen numuneler, bazik ortamdakilere göre daha fazla nem almıştır. Bu da asidin fiber ve matris fazı üzerinde daha yıpratıcı olduğunu ve böylece malzeme bünyesine daha çok nüfus ettiğini göstermektedir. Bu sonuç mekanik ve dinamik testlerden elde edilen sonuçlarla da uyumludur. Öyle ki asidin sahip olduğu bu yıpratıcı etki matris ve fiberde korozif aşınmaya neden olmuştur. Böylece cam/epoksi kompozit malzeme mukavemetini kaybetmiştir. Şekil 6.29’da nem alma miktarının bekleme süresi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.29 Cam/epoksi kompozitlerin nem alma yüzdeleri ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ YÜZDE NEM ALMA (%)						
Süre (Ay)	HCl			NaOH		
	5%	15%	25%	5%	15%	25%
1	2,5744	2,9887	3,2579	1,7500	1,9765	2,1600
	(0,2339)	(0,2866)	(0,2888)	(0,4380)	(0,4805)	(0,8209)
2	3,9195	4,1950	4,6492	2,7230	2,9124	3,2530
	(0,1770)	(0,4212)	(1,4835)	(0,0750)	(0,0844)	(1,5528)
3	5,4628	5,9049	6,2798	3,6078	3,7733	3,8874
	(0,3174)	(0,5323)	(0,8013)	(0,1064)	(0,3837)	(0,1652)
4	7,0260	7,5468	7,7446	4,1386	4,2575	4,3876
	(0,3514)	(0,4870)	(0,6993)	(0,2990)	(0,2590)	(0,0960)

\*(Standart sapma)



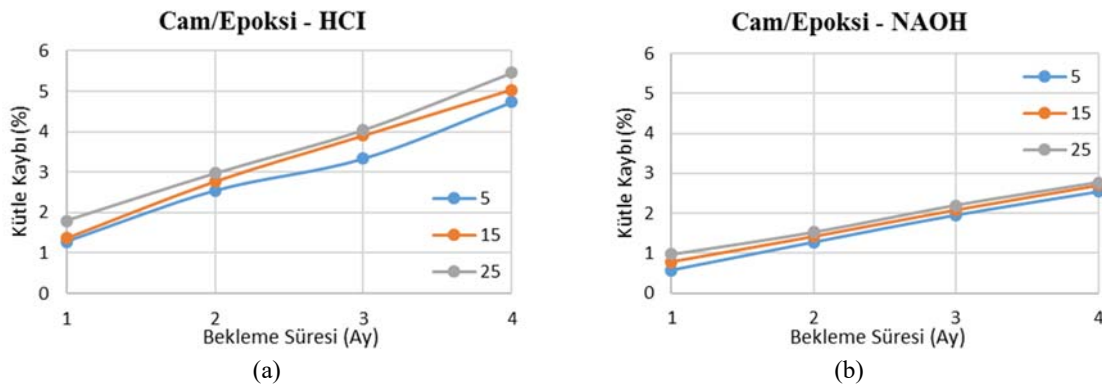
Şekil 6.27 Cam/epoksi kompozitlerin nem alma yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen

Çizelge 6.30'da cam/epoksi kompozitlerin deneysel kütle kaybı yüzdeleri ve standart sapma değerleri verilmiştir. Kütle kaybı değerleri Denklem 5.7'deki formüle göre hesaplanmıştır. Asidik ortamda bekleyen cam/epoksi numuneler bazik ortamda bekleyenlere göre daha fazla kütle kaybı yaşamışlardır. Asidik ortamda bekleyen numuneler için maksimum kütle kaybı değeri %5.46 ile %25 HCl asitte 4Ay süre boyunca bekleyen numunelerde olduğu görülmektedir. Bazik ortamda bekleyen numuneler için maksimum kütle kaybı değeri %2,76 civarındadır.

Çizelge 6.30 Cam/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzdeleri ve standart sapma değerleri

CAM/EPOKSİ % KÜTLE KAYBI						
Süre (Ay)	HCl			NaOH		
	5%	15%	25%	5%	15%	25%
1	1,2716	1,3722	1,7976	0,5725	0,7836	0,9774
	(0,1616)	(0,4768)	(0,3470)	(0,0361)	(0,0316)	(0,3783)
2	2,5377	2,7695	2,9698	1,2778	1,4199	1,5270
	(0,2471)	(0,6829)	(0,6101)	(0,0745)	(0,0745)	(0,4546)
3	3,3327	3,8992	4,0430	1,9592	2,0860	2,1952
	(0,3077)	(1,1881)	(1,3219)	(0,1597)	(1,3193)	(0,3254)
4	4,7389	5,0309	5,4616	2,5474	2,7011	2,7603
	(0,2400)	(1,1658)	(1,0900)	(0,7914)	(0,2342)	(0,2028)

\*(Standart sapma)

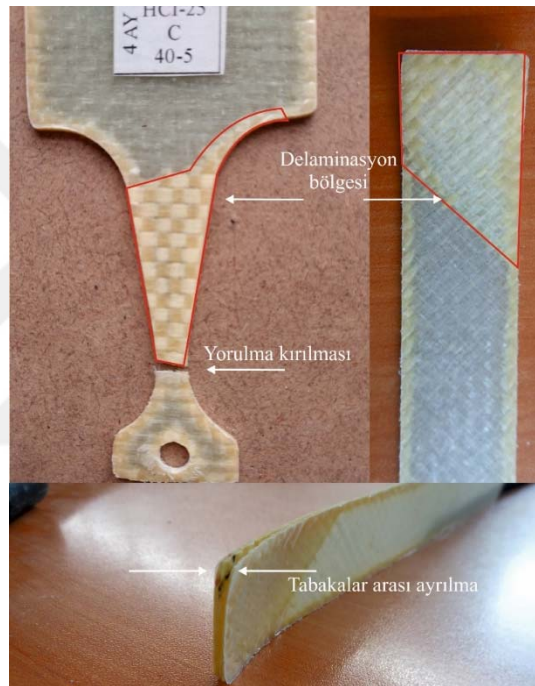


Şekil 6.28 Cam/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen

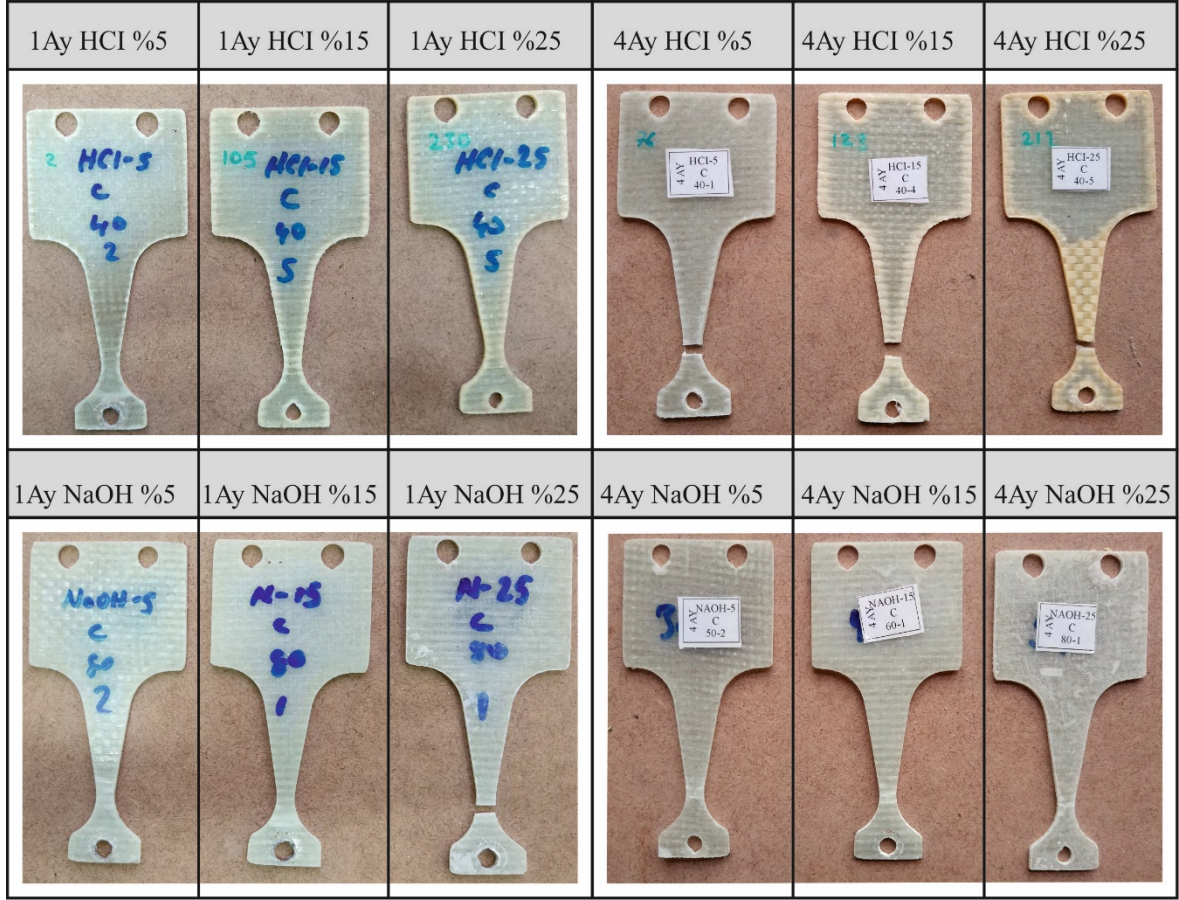
Resim 6.1'de HCl asit ortamının sebep olduğu hasarlar gösterilmiştir. Kimyasal korozyona bağlı olarak oluşan delaminasyon hasarlarının kenarlarda daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu durum asidin kompozit yapının içerisine kenarlardan nüfuz ettiğini göstermektedir. Asit

nüfuziyetinin tabakalar arasında ilerlerken epoksi matris malzemesini aşındırdığı ve bunun neticesinde tabakalar arasındaki ayrılmanın bariz şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.

Resim 2’de 1Ay ve 4Ay süresi boyunca farklı derişimlere sahip HCl ve NaOH çözeltilisinde beklemiş cam/epoksi kompozitlerin görünüşlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Asitte bekleyen numunelerde çözelti derişimi arttıkça rengin sarıya döndüğü görülmüştür. Bu durum HCl asitin yüzeyi hidrolize ederek numune bünyesinde kütle kaybı meydana getirdiğini göstermektedir. Bekleme süresi arttıkça bu tahribatında ne boyutlara ulaştığı açıkça görülmektedir.

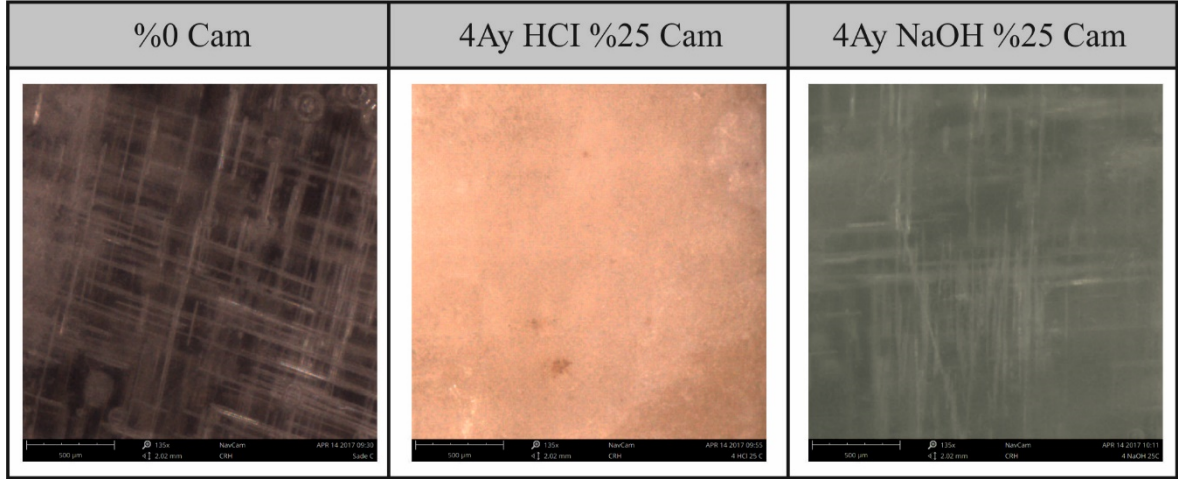


Resim 6.1 Asit ortamının cam/epoksi kompozitte sebep olduğu hasarlar



Resim 6.2 1Ay ve 4Ay süresi boyunca HCl ve NaOH çözeltilisinde beklemiş cam/epoksi kompozitlerin görünüşlerinin karşılaştırılması

Bazık ortamda bekleyen numunelerin görünüşleri karşılaştırıldığında renk değişiminin asitte bekleyen numunelerde olduğu gibi açıkça görülmemektedir. Fakat nispeten bazık ortamda bekleyen numunelerde renkte beyaza doğru bir dönme eğiliminde olduğu görülmektedir. Resim 6.3'te hiçbir ortamda beklemeyen, 4 ay süresince %25'lik HCl ortamında bekleyen (%0) ve 4 ay süresince %25'lik NaOH ortamında bekleyen cam numunelere ait mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yüzeylerin karşılaştırılmasını daha iyi yapılabilmesi için bütün görüntüler aynı ölçekte çekilmiştir. Hiçbir ortamda beklemeyen numunenin görüntüleri incelendiğinde matrisin içinde 0/90° açıyla yönlendirilmiş cam fiberler rahatça görülebilmektedir. Fakat asitte bekleyen numuneler için böyle bir durum söz konusu değildir. Görüntüde sadece asidin etkisiyle sararmış yüzeyin görüntüsü vardır. Bazık ortamda bekleyen numunenin görüntüsü incelendiğinde fiber dağılımları seçilse de yüzeyin bulanık beyaz rengini aldığı görülmektedir.



Resim 6.3 Asidik, bazik ve hiçbir ortamda beklemeyen numunelerin mikroskop görüntüleri karşılaştırması

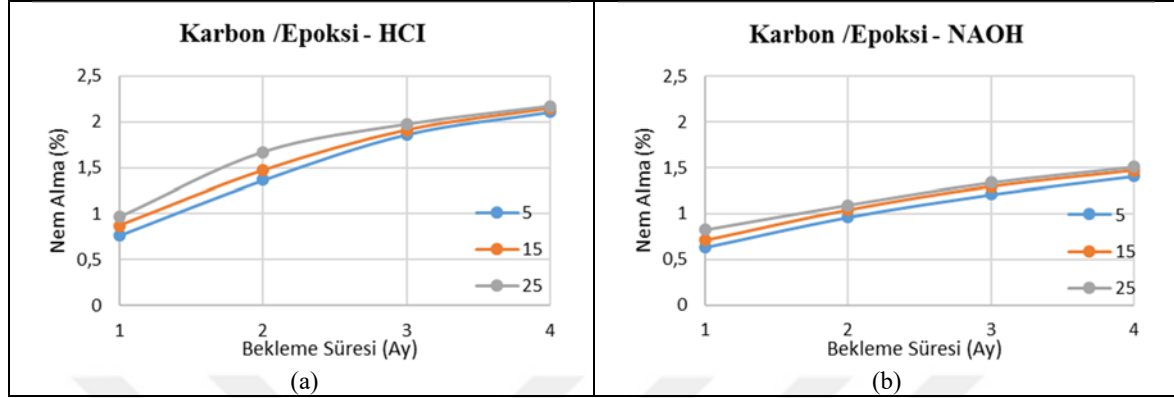
### 6.3.2. Karbon/Epoksi Kompozitlerin Nem Alma ve Kütle Kaybı Sonuçları

Farklı derişimlere sahip asidik ve bazik ortamlarda bekleyen karbon/epoksi tabakalı kompozit numunelerin bekleme süresine göre %nem miktarı Denklem 5.6'daki formüle göre hesaplanmıştır. Çizelge 6.31'de karbon/epoksi numunelerin test sonuçlarından elde edilen deneysel %nem alma miktarı ve standart sapma değerleri verilmiştir. Her iki ortam türü için de çözelti derişim miktarı ve bekleme süresi arttıkça % nem alma değeri artmaktadır. Asitte bekleyen numuneler için numunenin ilk ağırlığına oranla maksimum nem alma miktarı %2,17 civarındadır. Bazik ortamlarda bekleyen numuneler için bu değeri %1,51 civarındadır.

Çizelge 6.31 Karbon/epoksi kompozitlerin nem alma yüzdeleri ve standart sapma değerleri

KARBON/EPOKSİ % NEM ALMA						
Süre (Ay)	HCl			NaOH		
	5%	15%	25%	5%	15%	25%
1	0,7627	0,8690	0,9646	0,6297	0,7126	0,8226
	(0,0112)	(0,0993)	(0,0492)	(0,0290)	(0,0859)	(0,3475)
2	1,3637	1,4692	1,6714	0,9617	1,0438	1,0931
	(0,1058)	(0,3630)	(0,0193)	(0,1180)	(0,0450)	(0,3947)
3	1,8627	1,9104	1,9747	1,2104	1,2967	1,3358
	(0,2621)	(0,6366)	(0,4255)	(0,2252)	(0,1575)	(0,2964)
4	2,1090	2,1489	2,1734	1,4092	1,4722	1,5069
	(0,3071)	(0,4533)	(0,5248)	(0,1632)	(0,2582)	(0,3130)

Şekil 6.31’de karbon/epoksi numunelerin asidik ve bazik ortamdaki %nem alma değerleri grafik olarak ifade edilmiştir. Aynı derşime sahip asidik ve bazik ortamın etkileri göz önüne alındığında %nem alma değeri zamanla doğrusala yakın bir artış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 6.29 Karbon/epoksi kompozitlerin nem alma yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen

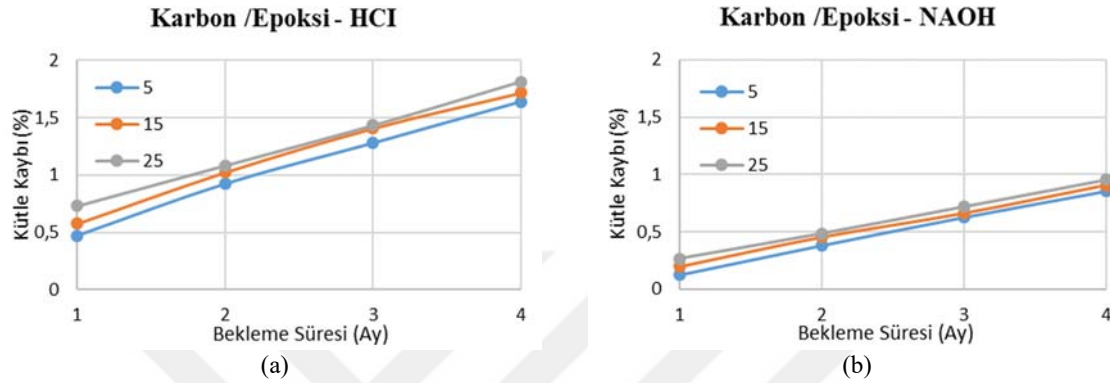
Çizelge 6.32’de karbon/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzdeleri ve standart sapma değerleri verilmiştir. Denklem 5.10’daki formüle göre % kütle kaybı değerleri deneysel olarak hesaplanmıştır. %nem alam değerlerinde olduğu gibi, asidik ortamda bekleyen karbon/epoksi numuneler bazik ortamda bekleyenlere göre daha fazla kütle kaybı olduğu görülmüştür. Asidik ortamda bekleyen numuneler için maksimum kütle kaybı değeri %1,81 ile %25 HCl asitte 4Ay süre boyunca bekleyen numunelerde olduğu görülmektedir. Bazik ortamda bekleyen numuneler için maksimum kütle kaybı değeri 4Ay süre boyunca %25’lik NaOH çözeltisinde bekleyen numunelerde görülmüştür ve değeri %0,96 civarındadır.

Çizelge 6.32 Karbon/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzdeleri ve standart sapma değerleri

KARBON /EPOKSİ % KÜTLE KAYBI						
Süre (Ay)	HCl			NaOH		
	5%	15%	25%	5%	15%	25%
1	0,4726	0,5752	0,7307	0,1269	0,1986	0,2645
	(0,2045)	(0,0141)	(0,0452)	(0,0547)	(0,0887)	(0,1497)
2	0,9234	1,0227	1,0828	0,3838	0,4546	0,4854
	(0,1473)	(0,0473)	(0,1805)	(0,0380)	(0,0380)	(0,3232)
3	1,2784	1,4071	1,4330	0,6290	0,6618	0,7211
	(0,2422)	(0,1047)	(0,1347)	(0,1035)	(0,0415)	(0,2905)
4	1,6392	1,7168	1,8142	0,8565	0,9047	0,9577
	(0,0414)	(0,0997)	(0,0953)	(0,0860)	(0,0991)	(0,1937)



Şekil 6.32’de karbon/epoksi numunelerin asidik ve bazik ortamlardaki zamana bağlı olarak kütle kayıpları grafik olarak ifade edilmiştir. %nem alma değerlerinden de anlaşılacağı üzere numune içerisine giren asit ve baz çözeltisi matris ve fiber malzemesini aşındırarak numunenin zamanla kütle kaybetmesine neden olmuştur. Bekleme süresi ile kütle kaybı arasında lineer bir ilişki söz konusudur.



Şekil 6.30 Karbon/epoksi kompozitlerin kütle kaybı yüzde değişimleri (a) HCl ve (b) NaOH çözeltilerinde bekleyen

Statik ve dinamik testlerden elde edilen verilere ek olarak %nem alma ve %kütle kaybı sonuçlarına bakıldığında asit ortamının epoksi matris malzemesi üzerinde baz ortamına göre daha yıpratıcı olduğu söylenebilir. Asit ve baz çözelti test numunelerinin kalınlık kesitlerinden numune içerisine doğru nüfuz ederek matris ve fiber fazını korozyon olarak aşındırmıştır. Resim 6.4’te numunenin kalınlık kesiti incelendiğinde kesitte korozyon aşınmaya bağlı olarak delaminasyon hasarının meydana geldiği görülmektedir. Asit, tabakalar arasında yapışmayı sağlayan epoksi matris malzemesini aşındırarak tabakaların birbirinden ayrılmasına neden olmuştur.

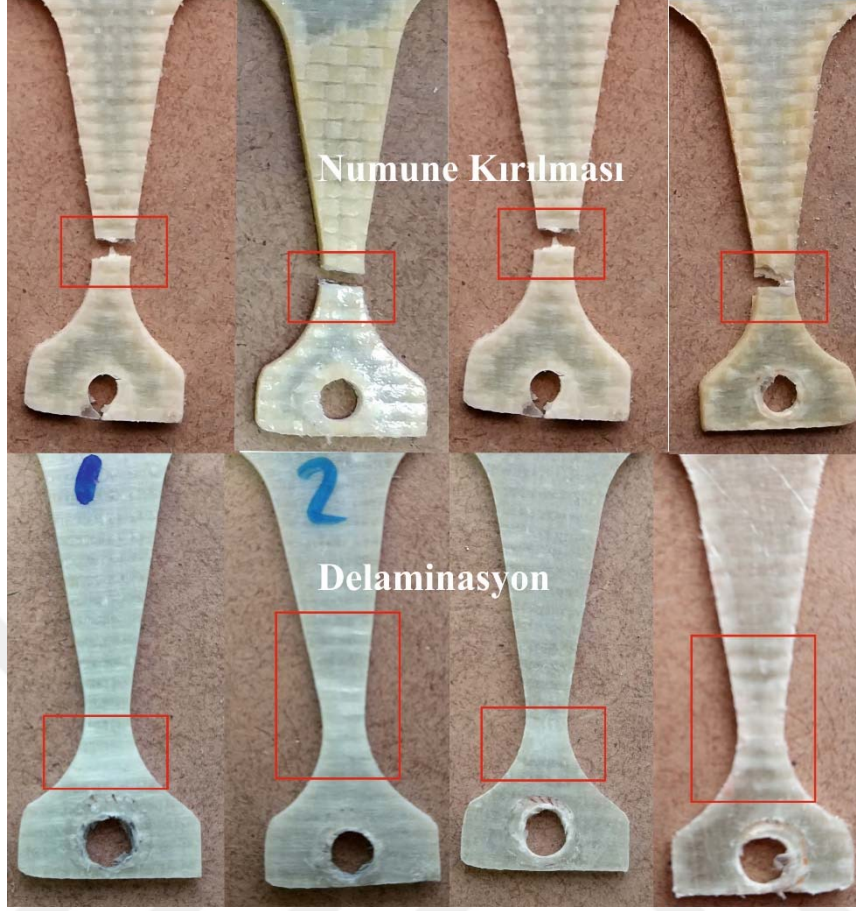


Resim 6.4 Asit ortamının karbon/epoksi kompozitte sebep olduğu hasarlar

#### 6.4. Yorulma Testleri Sonrası Hasar Analizleri

Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde tekrarlı yüklemeler neticesinde matris kırılması, fiber matris ayrılması, fiber kırılması, numune kırılması ve delaminasyon gibi hasarlar meydana gelmiştir. Numune kırılması ve delaminasyon hasarı makro boyutta meydana geldiği için gözle fark etmek mümkündür. Fakat diğer hasar türleri mikro boyutta gerçekleştiği için bu tip hasarları gözlemek için elektron mikroskobundan yararlanılmıştır. Resim 6.5'te cam/epoksi tabakalı kompozitlerde yorulma sonucu oluşan numune kırılması ve delaminasyon hasarları verilmiştir. Yorulmaya bağlı numune kırılması ve delaminasyon hasarları ekseriyetle numune kesit alanının dar ve eğilme kuvvetinin uygulandığı yere yakın bölgelerde oluşmuştur. Kırılma sonucu oluşan hasarların genellikle asit ortamında bekletilmiş numunelerde olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında bazik ortamda bekleyip, yüksek genliklerde eğilme yorulmasına zorlanan numunelerde de kırılmalar meydana gelmiştir. Delaminasyon hasarları ise çoğunlukla bazik ortamda bekleyen cam/epoksi tabakalı kompozitlerde meydana gelmiştir. Benzer şekilde düşük gerilme genliklerinde yorulmaya zorlanan asitte beklemiş numunelerin bazılarında da delaminasyon hasarları gözlenmiştir. Yorulma sonucu oluşan tabakalar arası ayrılma genellikle üst yüzeylerde başlamıştır. Çünkü tekrarlı eğilme yüklemesi sonucu maksimum çeki-bası gerilmeleri numunenin üst yüzeylerinde oluşmaktadır. Bu da zamanla tabakalar arası mukavemetin zayıflayarak yüzeye yakın bölgelerde delaminasyon hasarı oluşmasına neden olmaktadır.

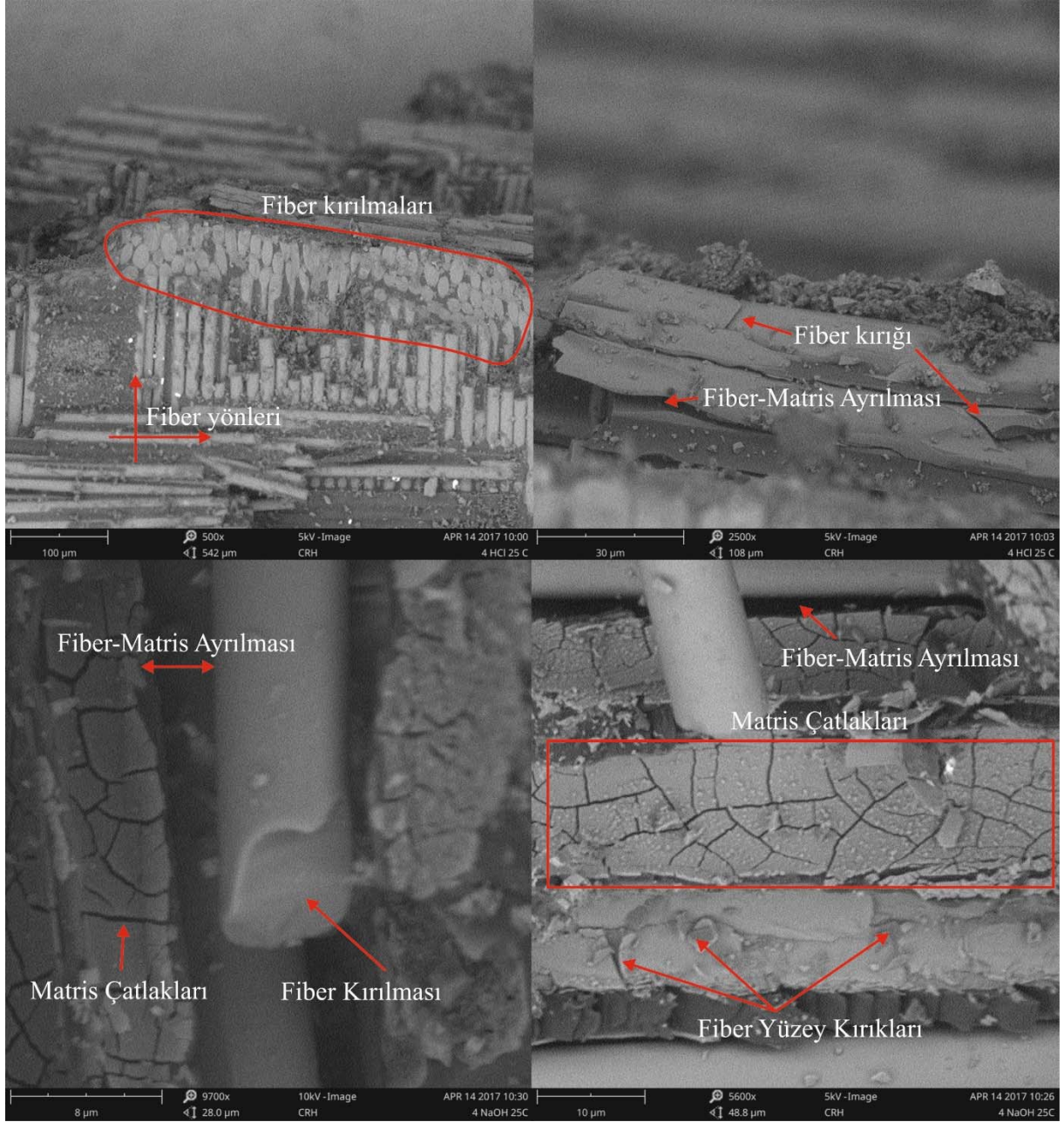
Yorulma sonucu elde edilen hasarlar, Şekil 5.7'de sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen gerilme dağılımı ile paralel sonuçlar göstermektedir. Öyle ki Şekil 5.7'ye göre gerilme dağılımının yoğun olduğu bölgeler ile Resim 6.5'de numune kırılması ve delaminasyon hasarlarının meydana geldiği bölgeler aynıdır.



Resim 6.5 Cam/epoksi kompozitlerde yorulma sonucu oluşan delaminasyon hasarları

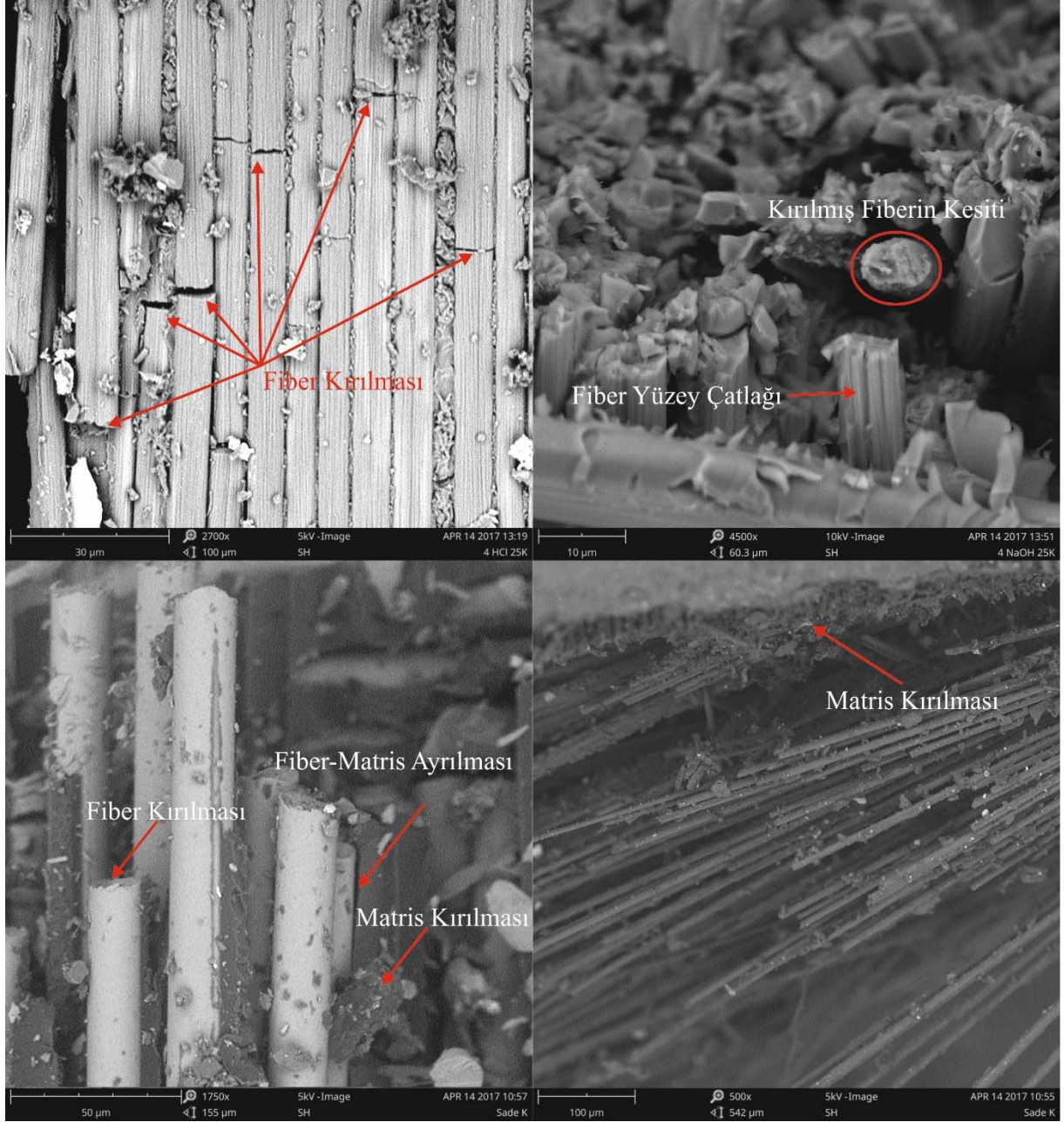
Cam epoksi tabakalı kompozitlerde yorulmaya bağlı diğer hasar mekanizmaları için Uşak Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan Phenom ProX marka elektron mikroskobu kullanılmıştır. Cihazda optik mikroskop ve elektron mikroskobu olmak üzere iki adet mikroskop vardır.

Resim 6.6'da yorulma sonucu cam/epoksi tabakalı kompozitlerde meydana gelen hasarların elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir. Yorulma hasarına bağlı olarak kompozit numunede fiber kırıkları, matris çatlakları ve fiber matris ara yüzeyinde ayrılmalar olduğu görülmektedir.



Resim 6.6 Cam/epoksi kompozitlerde meydana gelen yorulma hasarları

Karbon/epoksi tabakalı kompozitler için gözlenebilir bir delaminasyon hasarı tespit edilememiştir. Burada karbon fiberlerin renginin siyah oluşu gözle görülebilir bir hasar algısının önüne geçmektedir. Bu sebeple karbon/epoksi tabakalı kompozitlerde yorulmaya bağlı hasarlar elektron mikroskobu yardımıyla gözlemlenmiştir.



Resim 6.7 Karbon/epoksi kompozitlerde meydana gelen yorulma hasarları

Karbon epoksi tabakalı kompozitlerin elektron mikroskobundan elde edilen yorulma hasar görüntüleri Resim 6.7’de verilmiştir. Karbon/epoksi numunelerde de cam/epoksi numunelere benzer hasar mekanizmalarının geliştiği görülmektedir.

Resim 6.6 ve 6.7’de görülen fiber matris ayrılması, yorulma çatlaklarının başladığı bölgedir. Ayrıca burası numunenin en zayıf bölgesi olarak da düşünülebilir. Yorulma çatlakları en zayıf bölgede olduğundan matris ve fiberi birbirinden ayırıp numune de büyük hasarlar meydana

gelinceye kadar devam etmektedir. Bir matrisin boş lif yatakları ve çıplak fiberlerin fiber-matris ara yüzeyinde zayıflık işareti olduğu önemle dikkate alınmalıdır.

## 6.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

### 6.5.1. Çekme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

#### 6.5.1.1. Fiber Yönü Elastisite Modülü ( $E_1$ )

- Maksimum fiber yönü elastisite modülü; cam/epoksi numuneler için 32636,45MPa ve karbon/epoksi numuneler için 61954,47MPa olarak bulunmuştur. Buna göre karbon/epoksi numunelerin fiber yönü elastisite modülü cam/epoksi numunelere göre %89,83 daha yüksektir.
- Minimum fiber yönü elastisite modülü; cam/epoksi için 18986,46MPa ve karbon/epoksi numuneler için 50074,04MPa olarak bulunmuştur. Buna göre fiber yönü elastisite modülü için cam epoksi numunelerde %41,82'lik değer kaybı yaşanırken karbon/epoksi numuneler için bu değer %19,18'dir.
- 4Ay süresince %25'lik asidik ve bazik çözeltide bekleyen karbon/epoksi kompozit numuneler, cam/epoksi kompozite göre %163,74 daha büyük fiber yönü elastisite modül değerine sahiptir.
- Aynı derişime sahip asidik ve bazik ortamlarda aynı sürelerde beklemiş cam/epoksi numunelerin fiber yönü elastisite modülleri birbirleri ile kıyaslandığında asidik ortamdaki yıpranma bazik ortama göre en fazla %21,24 seviyesine kadar çıkmaktadır. Aynı kıyaslama karbon/epoksi numuneler için yapıldığında bu yıpranma değerinin %5,86'ya kadar ulaştığı görülmüştür.

#### 6.5.1.2. Fiber Yönü Çekme Dayanımı ( $X_t$ )

- Cam/epoksi numuneler için, maksimum fiber yönü çekme mukavemeti 360,67MPa olarak belirlenmiştir. Karbon/epoksi numuneler için ise aynı değer 654,98MPa olarak bulunmuştur. Buna göre karbon/epoksi numunelerin fiber yönü çekme mukavemeti cam/epoksi numunelere göre %81,67 daha yüksektir.

- Cam/epoksi için minimum fiber yönü çekme mukavemeti; 166,77MPa ve karbon/epoksi numuneler için aynı değer 483,15MPa olarak bulunmuştur. Fiber yönü çekme mukavemetinin maksimum ve minimum değerleri kıyaslandığında, cam epoksi numunelerde %53,76'lık değer kaybı yaşanırken karbon/epoksi numuneler için bu değer %26,23'dür.
- 4Ay süresi boyunca %25'lik asidik ve bazik koşullarda bekleyen cam/epoksi ve karbon/epoksi numunelerin fiber yönü çekme mukavemetleri kıyaslandığında, karbon/epoksi, cam/epoksi kompozite göre %189,71 daha büyük fiber yönü çekme mukavemeti değerine sahiptir.
- Eşit bekleme süresine ve eşit derişime sahip asidik ve bazik çözeltilerde bekleyen cam/epoksi numunelerin fiber yönü çekme mukavemetleri birbirleri arasında kıyaslandığında asidik ortamdaki yıpranma bazik ortama göre en fazla %48,72 seviyesine kadar çıkmaktadır. Aynı kıyaslama değeri karbon/epoksi numuneler için yapıldığında bu yıpranma değerinin %13,05'e kadar ulaştığı görülmüştür.

#### 6.5.1.3. *Fibere Dik Yön Elastisite Modülü ( $E_2$ )*

- Fibere dik yön elastisite modülünün maksimum değeri; cam/epoksi numuneler için 30326,93MPa ve karbon/epoksi numuneler için 58327,98MPa olarak belirlenmiştir. Karbon/epoksi numunelerin fibere dik yön elastisite modülü cam/epoksi numunelere göre %92,33 daha yüksektir.
- Fibere dik yön elastisite modülünün minimum değeri; cam/epoksi için 17626,37MPa ve karbon/epoksi numuneler için 45713,31MPa olarak bulunmuştur. Maksimum ve minimum fibere dik yön elastisite modül değerleri kıyaslandığında, cam epoksi numunelerde %41,88'lik değer kaybı görülürken, karbon/epoksi numuneler için bu değer %21,63 olduğu belirlenmiştir.
- %25 derişime sahip asit ve baz ortamında 4 ay süresince bekleyen karbon/epoksi, cam/epoksi kompozite göre %159,35 daha büyük fibere dik yön elastisite modülü değerine sahiptir.

- Aynı derişime sahip asidik ve bazik çözeltide eşit sürelerde bekleyen cam/epoksi numunelerin fibere dik yön elastisite modülleri birbirleri arasında kıyaslandığında asidik ortamdaki yıpranma bazik ortama göre en fazla %26,72 seviyesine kadar çıkmaktadır. Benzer kıyaslama karbon/epoksi kompozit numuneler için yapıldığında bu yıpranma değerinin %13,86'ya kadar ulaştığı görülmüştür.
- Cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozit numunelerin fiber ve fibere dik yön elastisite modül değerleri karşılaştırıldığında sonuçlar birbirine yakın gibi gözükse de cam/epoksi için maksimum %7,07 ve karbon/epoksi için maksimum %6,21'lik bir fark söz konusudur. Bu duruma takviye kumaşın üretimi sırasında kullanılan fiber ve fibere dik doğrultuda yönelen fiberlerin niteliği sebep olmaktadır. Kompozit malzeme üreticilerinin üretimleri sırasında dikkat etmeleri gereken husus; kumaşın fiber doğrultusu ile malzeme üzerine maksimum gerilmelerin aynı doğrultuda olmasıdır.

#### 6.5.1.4. Fibere Dik Yön Çekme Dayanımı ( $Y_t$ )

- Maksimum fibere dik yön çekme mukavemeti; cam/epoksi kompozit numuneler için 348,07MPa olarak bulunmuştur. Aynı değer karbon/epoksi numuneler için 596,76MPa'dır. Karbon/epoksi numunelerin fibere dik yön çekme mukavemeti cam/epoksi numunelere göre %71,45 daha yüksektir.
- Minimum; cam/epoksi için 158,25MPa olarak bulunmuştur. Minimum fibere dik yön çekme mukavemeti karbon/epoksi numuneler için ise 434,68MPa olarak bulunmuştur. Fibere dik yön çekme mukavemetinin maksimum ve minimum değerleri karşılaştırılırsa cam epoksi numunelerde %54,53'lük değer kaybı yaşanırken karbon/epoksi numuneler için bu değer %27,16'dır.
- 4Ay süresince %25'lik asidik ve bazik çözeltide bekleyen karbon/epoksi kompozit, cam/epoksi kompozite göre %174,68 daha büyük fibere dik yön çekme mukavemeti değerine sahiptir.
- Aynı derişime sahip asidik ve bazik ortamlarda aynı sürelerde beklemiş cam/epoksi numunelerin fibere dik yön çekme mukavemetleri birbiri arasında karşılaştırıldığında asidik ortamdaki değer kaybı bazik ortama göre maksimum %50,06 seviyesine kadar



çıkılmaktadır. Aynı kıyaslama karbon/epoksi numuneler için yapıldığında değer kaybının %9,66'ya kadar ulaştığı görülmüştür.

- Cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozit numunelerin fiber ve fibere dik yön çekme mukavemeti değerleri karşılaştırıldığında sonuçlar birbirine yakın gibi gözükse de cam/epoksi için %3,49 ve karbon/epoksi için %3,83'lük bir fark söz konusudur.

#### 6.5.1.5. Kayma Modülü ( $G_{12}$ )

- Çapraz fiber yönü ( $45^\circ$ ) elastisite modülünün en yüksek değeri; cam/epoksi numuneler için 10128,03MPa ve karbon/epoksi numuneler için 13120,85MPa olarak bulunmuştur. Buna göre karbon/epoksi numunelerin çapraz yön elastisite modülü cam/epoksi numunelere göre %29,54 daha yüksektir.
- Çapraz fiber yönü ( $45^\circ$ ) elastisite modülünün en düşük değeri; cam/epoksi için 6167,51MPa ve karbon/epoksi numuneler için 10751,92MPa olarak bulunmuştur. Aynı malzeme türü için en yüksek ve en düşük çapraz yön elastisite modülü değerleri kıyaslanırsa, cam/epoksi numunelerde maksimum %39,10'luk değer kaybı görülürken karbon/epoksi numuneler için bu değer maksimum %18,05'dir.
- 4Ay süresince %25'lik asidik ve bazik koşullarda bekleyen karbon/epoksi, cam/epoksi kompozite göre %74,33 daha fazla çapraz yön elastisite modülü değerine sahiptir.
- Aynı süre zarfında ve eşit derişimlerdeki asidik ve bazik çözeltide bekleyen cam/epoksi numunelerin çapraz yön elastisite modülleri birbirleri arasında kıyaslandığında asidik ortamdaki değer kaybı bazik ortama göre en fazla %15,93 seviyesine kadar çıkmaktadır. Karbon/epoksi kompozit numuneler için aynı kıyaslama yapıldığında değer kaybının %5,99'a kadar ulaştığı görülmüştür.
- Cam/epoksi ve karbon epoksi tabakalı kompozitler için fiberlerin yönlendiği doğrultulardan elde edilen elastisite modül değerleri kıyaslandığında ( $E_1$  ve  $E_2$ ), elde edilen elastisite modül değerlerinin farklarının daha fazla olduğu görülmüştür. Fakat çapraz yön modülünde ise cam ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin arasındaki fark nispeten daha azdır. Fiberlerin yönlendiği doğrultularda çekme yapıldığında hasar mekanizması matris çatlağı, fiber-matris ara yüz ayrılması ve fiber kırılması şeklinde

gerçekleşmektedir. Yani nihai mukavemet değerinde fiberin niteliği önemli rol oynamaktadır. Çapraz yönde çekilen numunelerde ise matris çatlakları sonucu ağırlıklı hasarın fiber-matris ara yüzeyinde gerçekleştiği görülmektedir. Fiber doğrultusunun değişimi hasar mekanizmasını ve mukavemet değerini doğrudan etkilemektedir.

- Maksimum kayma modülü; cam/epoksi numuneler için 2849,50MPa ve karbon/epoksi numuneler için 3547,32MPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre karbon/epoksi numunelerin kayma modülü, cam/epoksi numunelere göre %24,50 daha yüksektir.
- Minimum kayma modülü; cam/epoksi için 1745,61MPa ve karbon/epoksi numuneler için 2915,78MPa olarak hesaplanmıştır. Maksimum ve minimum kayma modül değerleri aynı malzeme türü için karşılaştırıldığında, cam/epoksi numuneler de kayma modülü değer kaybı en fazla %38,74 iken bu değer karbon/epoksi numunelerde en fazla %17,80 olarak hesaplanmıştır.

## 6.5.2. Basma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

### 6.5.2.1. Fiber Yönü Basma Dayanımı ( $X_c$ )

- Cam/epoksi numuneler için, maksimum fiber yönü basma mukavemeti; 244,56MPa olarak bulunmuştur. Aynı değer karbon/epoksi numuneler için 288,95MPa'dır. Karbon/epoksi numunelerin fiber yönü basma mukavemeti cam/epoksi numunelere göre %18,15 daha yüksektir.
- Cam/epoksikompozit numuneleri için, minimum fiber yönü basma mukavemeti; 126,42MPa'dır. Aynı değer karbon/epoksi numuneler için 215,43MPa olarak bulunmuştur. Buna göre, maksimum ve minimum fiber yönü basma mukavemet değerleri kıyaslandığında, cam epoksi numunelerde %48,31'lik değer kaybı yaşanırken, karbon/epoksi numuneler için bu değer %25,44'dir.
- %25 derişime sahip asit ve baz ortamında 4 ay süresince bekleyen karbon/epoksi kompozit numuneler, cam/epoksi kompozit numunelere oranla %70,63 daha büyük fiber yönü basma mukavemeti değerine sahiptir.

- Aynı derişime sahip asidik ve bazik çözeltide eşit süre boyunca bekleyen cam/epoksi numunelerin fiber yönü basma mukavemetleri birbiri arasında kıyaslandığında asidik ortamdaki değer kaybı bazik ortama göre en fazla %45,98 seviyesine kadar çıkmaktadır. Benzer kıyaslama karbon/epoksi numuneler için yapıldığında bu değerinin %7,26'ya kadar ulaştığı görülmüştür.

#### 6.5.2.2. *Fibere Dik Yön Basma Dayanımı ( $Y_c$ )*

- En fazla fibere dik yön basma mukavemeti; cam/epoksi numuneler için 238,73MPa ve karbon/epoksi numuneler için 275,57MPa olarak bulunmuştur. Buna göre karbon/epoksi numunelerin fibere dik yön basma mukavemeti cam/epoksi numunelere oranla %15,54 daha yüksektir.
- En az fiber yönü basma mukavemeti; cam/epoksi için 114,69MPa ve karbon/epoksi numuneler için 211,14MPa olarak bulunmuştur. Fiber yönü basma mukavemeti için en fazla ve en az değerler karşılaştırıldığında, cam epoksi numunelerde %51,86'lık değer kaybı olduğu görülürken, karbon/epoksi numuneler için bu kayıp değeri %23,38'dir.
- En ağır çevresel koşullarda (%25 derişim) en uzun süre bekleyen (4Ay) karbon/epoksi numuneler, cam/epoksi numunelere göre %85,09 daha büyük fibere dik yön basma mukavemeti değerine sahiptir.
- Aynı bekleme süresine ve aynı derişime sahip asidik ve bazik çözeltide bekleyen cam/epoksi numunelerin fibere dik yön basma mukavemetleri birbiri içerisinde kıyaslandığında asidik ortamdaki dayanım kaybı bazik ortama göre en fazla %58,64 seviyesine kadar çıkmaktadır. Benzer kıyaslama karbon/epoksi numuneler için yapıldığında dayanım kayıp değerinin %6,67'ye kadar ulaştığı görülmüştür.
- Cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozit numunelerin fiber ve fibere dik yön basma mukavemeti değerleri karşılaştırıldığında sonuçlar birbirine yakın gibi gözükse de cam/epoksi için maksimum %2,52'lik ve karbon/epoksi için maksimum %4,51'lik bir fark söz konusudur.

- Basma testinde elde edilen veriler ışığında basma mukavemetinde fiberin niteliği basma mukavemeti üzerinde çekme testinde olduğu kadar etkili olmadığı söylenebilir. Özellikle bası yüküne maruz kalan inci cidarlı tabakalı kompozit yapıların daha rijit yapılarla desteklenip, hibrit tasarımlar oluşturulmalıdır. Örneğin bası yüküne maruz kalan tabakalı bir kompozit, daha rijit olan metal bir yapı ile desteklenmelidir. Benzer şekilde birim kesit alanına düşen kuvvet değerini azaltmak için sandviç kompozit yapılar kullanılmalıdır.

### 6.5.3. Eğilme Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

#### 6.5.3.1. 3 Nokta Eğilme Modülü ( $E_f$ )

- Maksimum üç nokta eğilme modülü; cam/epoksi numuneler için 30952,65MPa ve karbon/epoksi numuneler için 51327,07MPa olarak bulunmuştur. Buna göre karbon/epoksi numunelerin maksimum üç nokta eğilme modülü cam/epoksi numunelerinkine göre %85,82 daha yüksektir.
- Minimum üç nokta eğilme modülü; cam/epoksi için 12999,87MPa ve karbon/epoksi numuneler için 39729,41MPa olarak bulunmuştur. Buna göre üç nokta eğilme modülü için cam epoksi numunelerde %58,00'lık değer kaybı yaşanırken karbon/epoksi numuneler için bu değer %22,60'dir.
- %25 derişime sahip asit ve baz ortamında 4 ay süresince bekleyen karbon/epoksi, cam/epoksi kompozite göre %205,63 daha büyük üç nokta eğilme modülü değerine sahiptir.
- Aynı süre boyunca ve eşit derişimlerdeki asidik ve bazik çözeltide bekleyen cam/epoksi numunelerin eğilme modülleri kıyaslandığında asidik ortamdaki eğilme modülü değer kayıpları, bazik ortama göre en fazla %43,44 seviyesine kadar çıkmaktadır. Aynı kıyaslama karbon/epoksi numuneler için yapıldığında bu kayıp değerinin %5,22'ye kadar ulaştığı görülmüştür.

### 6.5.3.2. 3 Nokta Eğilme Dayanımı ( $\sigma_f$ )

- Üç nokta eğilme dayanımının maksimum değeri; cam/epoksi kompozit numunelerde 494,45MPa ve karbon/epoksi numuneler de ise 627,06MPa olarak bulunmuştur. Buna göre karbon/epoksi numunelerin üç nokta eğilme dayanımı cam/epoksi numunelere göre %26,92 daha fazladır.
- Üç nokta eğilme dayanımının minimum değeri; cam/epoksi kompozit numunelerde 270,72MPa ve karbon/epoksi numuneler de ise 399,49MPa olarak bulunmuştur. Aynı tür malzemeler için maksimum ve minimum üç nokta eğilme dayanımları kıyaslandığında, cam epoksi numunelerde %45,25'lik değer kaybı görülürken, karbon/epoksi numuneler de ise %26,79'luk değer kaybı görülmüştür
- %25 derişime sahip asit ve baz çözeltilerinde 4 ay boyunca bekleyen karbon/epoksi, cam/epoksi kompozite göre %47,78 daha büyük üç nokta eğilme dayanımı değerine sahiptir.
- Eşit bekleme süresine ve eşit derişime sahip asidik ve bazik ortamlarda bekleyen cam/epoksi numunelerin eğilme mukavemetleri birbiri içersinde karşılaştırdığında asidik ortamdaki dayanım kaybı, bazik ortama göre en fazla %14,49 seviyesine kadar çıkmaktadır. Benzer kıyaslama karbon/epoksi numuneler için yapıldığında dayanım değerindeki kaybın en fazla %7,55'e kadar ulaştığı görülmüştür.
- 3 nokta eğilme testinde test numunesinin üst tarafı basıya zorlanırken alt tarafı çekiye zorlanmaktadır. Bası gerilmesinde karşı fiberlerin fazla bir rolü olmamasına karşı çekme gerilmesi altında fiberlerin niteliği önem kazanmaktadır. Bu sebeple üç nokta eğilme yüklemesinde hasar fiberlerin kırılmasına kadar devam etmektedir. Bu sebeple karbon/epoksi kompozit numunelerin üç nokta eğilme dayanımları cam/epoksi numunelere oranla bariz şekilde üstündür.

#### 6.5.4. Yorulma Testi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

- Yorulma testleri sonucunda çalışma kapsamında geliştirilen deplasman kontrollü eğilme yorulması yapabilen cihazın özellikle plastik ve kompozit malzemelerin yorulma deneyleri için kullanılabilir olduğu görülmüştür. Yorulma cihazının asıl özelliği aynı anda 10 adet numuneyi eğilme yorulmasına zorlaması ve her bir numuneye ait yorulma verilerinin bilgisayar tarafından takip edilip kaydedilmesidir. Testler süresince bu açıdan hiçbir problemle karşılaşılmamıştır.
- Yorulma testi için numunelere uygulanan gerilme genliği değeri deplasman kontrolü ile sağlanmıştır. Deplasman değeri arttıkça uygulanan gerilme değeri de artmıştır. Tüm numuneler için gerilme değeri arttıkça yorulma çevrim sayısı azalmıştır.
- Yüksek gerilmelerde yorulmaya zorlanan numunelerde yorulma hasarı numune kırılması şeklinde gerçekleşirken, düşük gerilmelerde yorulmaya zorlanan numunelerde hasar delaminasyonlara bağlı olarak meydana gelen rijitlik kaybı şeklinde gerçekleşmiştir.
- Asidik ortamda bekletilen cam/epoksi numuneler yorulma testlerinde bazik ortamda bekleyen numunelere göre daha fazla sayıda numune kırılmışlardır. Bazik ortamda bekleyen cam/epoksi numunelerde delaminasyon daha fazla sayıda gerçekleşmiştir.
- Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerde yorulma testleri sırasında herhangi bir numune kırılmamıştır. Karbon/epoksi numunelerde hasar delaminasyonlara bağlı olarak meydana gelen rijitlik kaybı şeklinde gerçekleşmiştir.
- Yorulma testlerinde, statik çekme ve eğilme mukavemeti yüksek olan kompozit yapıların yorulma mukavemetlerinin de yüksek olduğu görülmüştür.
- Cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozit için maksimum yorulma dayanım ve ömür değerleri hiçbir ortamda beklememiş numunelerden elde edilmiştir. Minimum yorulma dayanım ve ömür değerleri ise %25'lik HCl asit çözeltisinde 4AY süre boyunca bekleyen numunelerden elde edilmiştir.
- Asit ortamının cam fiber takviyeli kompozitler üzerindeki yıpratıcılığına bakacak olursak, %25'lik HCl asit çözeltisinde 4AY süre boyunca bekleyen cam/epoksi

tabakalı, hiçbir ortamda beklemeyen numunelere göre yorulma mukavemetinin %61,69'unu yorulma ömrünün ise %97,19'unu kaybetmiştir. Aynı süre ve derişim değerinde bazik ortamda bekleyen cam/epoksi numuneler yorulma mukavemetinin %31,71'ini yorulma ömrünün ise %62,38'ini kaybetmiştir.

- Asit ortamının karbon fiber takviyeli kompozitler üzerindeki yıpratıcılığına bakacak olursak, %25'lik HCl asit çözeltisinde 4AY süre boyunca bekleyen karbon/epoksi tabakalı, hiçbir ortamda beklemeyen numunelere göre yorulma mukavemetinin %26,68'ini yorulma ömrünün ise %25,33'ünü kaybetmiştir. Aynı süre ve derişim değerinde bazik ortamda bekleyen karbon/epoksi numuneler yorulma mukavemetinin %17,17'sini yorulma ömrünün ise %19,81'ini kaybetmiştir.
- Yorulma testleri malzemelerin statik üç nokta eğilme mukavemetlerinin %40, %50, %60, %70 ve %80'ine karşılık gelen gerilme değerlerinde yapılmıştır. Hiçbir ortamda beklememiş cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit numunelerin aynı gerilme seviyesi için elde edilen yorulma dayanım ve ömür değerleri karşılaştırıldığında karbon/epoksi numuneler cam/epoksi numunelere göre %64,80 daha büyük yorulma dayanımına ve %1140 daha uzun yorulma ömrüne sahiptir.
- En kuvvetli asidik ortamda yıpranmaya bırakılmış cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma mukavemeti ve yorulma ömür değerlerini kıyaslarsak, karbon/epoksi numuneler cam/epoksi numunelere göre %270,82 daha büyük yorulma mukavemetine ve %33457,76 daha uzun yorulma ömrüne sahiptirler.
- En kuvvetli bazik ortamda yıpranmaya bırakılmış cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma mukavemeti ve yorulma ömür değerlerini kıyaslarsak, karbon/epoksi numuneler cam/epoksi numunelere göre %110,43 daha büyük yorulma mukavemetine ve %2621,48 daha uzun yorulma ömrüne sahiptirler.
- Sade, asidik ve bazik ortamda bekletilmiş cam ve karbon fiber takviyeli kompozitlerdeki yorulma mukavemet ve ömür değer karşılaştırmalarına göre asit cam/epoksi kompozitler üzerinde daha yıpratıcı etkiye sahiptirler. Bu sebeple yüksek derişime ait ortamında tekrarlı yüklere maruz kalacak yapılar kesinlikle karbon fiber takviyeli olarak üretilmelidirler.

#### 6.5.5. Nem Alma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

- Asidik ve bazik çözeltiler için çözelti derişim yüzdesi ve bekleme süresi arttıkça cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin % nem alma ve %kütle kaybı değerleri artmıştır.
- Cam ve karbon fiber takviyeli numunelerin ikisi de asit ortamında bekleyen numuneler bazik ortamda bekleyen numunelere göre daha fazla nem almışlar ve kütle kaybı yaşamışlar.
- %25'lik asidik ortamda bekleyen cam/epoksi numuneler, aynı koşullarda bekleyen karbon/epoksi numunelere göre %256,68 daha fazla nem almışlardır.
- %25'lik bazik ortamda bekleyen cam/epoksi numuneler, %25'lik bazik ortamda bekleyen karbon/epoksi numunelere göre %192 daha fazla nem almışlardır.
- %25'lik asit çözeltilisinde bekleyen cam/epoksi numuneler, aynı çözeltilide bekleyen karbon/epoksi numunelere göre %201,66 daha fazla kütle kaybı yaşamışlardır.
- %25'lik baz çözeltilisinde bekleyen cam/epoksi numuneler, aynı çözeltilide bekleyen karbon/epoksi numunelere göre %190,52 daha fazla kütle kaybı yaşamışlardır.



## 7. BÖLÜM GENEL DEĞERLENDİRMELER

Tez çalışması kapsamında cam/epoksi ve karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin farklı derişimlerdeki asidik ve bazik ortamlardaki statik ve dinamik davranışları ve bu ortamlardaki dayanım değerleri belirlenmiştir. Ayrıca dinamik çalışmalar kapsamında aynı anda 10 adet yorulma numunesini eğilmeli yükleme altında yorabilen test cihazı geliştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen en genel değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Statik testlerden elde edilen verilere göre fiber yönü malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Malzeme üreticileri tasarımlarını kuvvetin geleceği yönü fiber karşılayacak şekilde yapmalıdırlar.
- Statik testlerden elde edilen verilerin standart sapma değerleri incelendiğinde aynı deney türü için verilerin saçılımı değerlerinin kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. Bu durum malzeme üretimi ile doğrudan ilişkilidir. Tabakalı kompozit üretiminde fiberlerin matris ile tam ıslatılmaması ya da gereğinden fazla ıslatılması uygun olmayan kompozitlerin üretilmesine neden olmaktadır. Düzgün olmayan üretimden elde edilen test numuneleri aynı şartlarda teste tabi tutulsalar dahi test sonuçlarının geniş bir aralıkta saçılacak ve yüksek standart sapma değerleri görülecektir. Standart sapma sonuçları tabakalı kompozitler için el yatırması yönteminin uygun olduğunu göstermiştir.
- Tüm statik testlerden elde edilen verilere göre, hiçbir ortamda kalmamış karbon/epoksi tabakalı kompozit malzeme her mekanik özellik türünde en yüksek dayanım değerine sahip olduğu görülmüştür. 4 ay süresince HCI asit ortamına maruz kalan cam/epoksi tabakalı kompozitler ise her mekanik özellik türü için en düşük dayanım değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum fiber takviyeli ve polimer matrisli kompozit yapıların çevresel şartlardan etkilendiğini ve zamanla mukavemetini yitirdiğini göstermektedir. Ortam derişimin artması malzemenin mukavemet üzerinde olumsuz olarak etkilidir. Uygulanan yüklemenin türüne göre bu mukavemet kaybı bazen doğrusal (statik testlerde olduğu gibi), bazen de parabolik (dinamik testlerde olduğu gibi) değişmektedir.

- Statik testlerden elde edilen verilere göre, asit ve baz çözeltilerinde bekleme süresi arttıkça test numunelerinin mekanik dayanımlarının azaldığı görülmüştür.
- Statik ve dinamik testlerden elde edilen verilere göre asit ortamı cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit numuneleri bazik ortama göre daha çok yıpratmıştır. Bu durum çözeltilerden çıkarıldıktan sonra numune üzerinde oluşan hasar görüntüleri incelendiğinde de görülebilir. Asidik ortam, polimer matrisli kompozitleri bazik ortama göre daha çok yıpratmaktadır. Test sonuçlarında asidik ve bazik ortamlardaki mukavemet kayıpları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu veriler ışında malzeme üreticileri asidik ortamda kullanılacak polimer matrisli kompozitleri korumak için kaplama, boyama vb. gibi önlemlere başvurmalıdırlar.
- Asit ve baz ortamlarında bekleyen cam/epoksi ve karbon/epoksi numunelerin statik ve dinamik testlerine bakıldığında, tüm durumlar için karbon/epoksi malzemenin cam/epoksiye üstün gelmiştir. Aynı matris malzemelerine sahip olmalarına karşın böyle bir sonucun ortaya çıkması, karbon ve cam fiberin yapı malzemelerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Cam fiberler, silisli kum, kireçtaşı, asit borik, alüminyum ve magnezyum karışımından elde edilir. Karbon fiberler ise poli akrilo nitril karbonizasyonu ile yani akrilik fiberlerin karbonlaştırılması ile üretilmektedir. Karbon fiber üretimindeki üstün teknoloji test sonuçlarına da olumlu yansımıştır. Yüksek derişime asit ortamında çalışıp çekme, basma ve eğilme yüklemesine maruz kalacak yapıları karbon fiber malzemedan yapılması çok daha uygundur. Bazik ortamda çalışacak yapılar cam fiber takviyeli kompozitlerden yapılabilir fakat güvenlik faktörünün yüksek olduğu tasarımda yine karbon fiber takviyeli kompozit elemanlar kullanılmalıdır. Karbon fiberi statik ve dinamik özellikler bakımında cam fiberden üstün olsa da maliyeti bakımında fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde cam fibere kıyasla fazla kullanılmaz. Yüksek derişimlerdeki asit ve baza maruz kalan cam fiber takviyeli kompozitler, karbon fiberler ile desteklenerek hibrit yapılar kullanılmalıdır. Böylece mukavemet artışı sağlanırken, yapının hepsini karbondan imal etmeye göre daha ekonomik bir çözüm bulunmuş olur.

- Statik ve dinamik testlerden elde edilen verilere göre bekleme süresinden ziyade, çözelti derişiminin malzemenin statik ve dinamik dayanımları üzerinde daha olumsuz etkilere sahiptir.
- Statik ve dinamik test verileri karşılaştırıldığında, statik yükler karşısında dayanımı yüksek olan malzemelerin, yorulma mukavemeti ve yorulma ömrü gibi dinamik dayanımlarının da yüksek olduğu görülmüştür.
- Dinamik testlerden elde edilen sonuçlara göre, özellikle plastik ve kompozitlerin yorulma deneyi gibi düşük frekans ve düşük gerilme uygulanması gereken deneyler için tez kapsamında tasarım ve imalatı yapılan eğilmeli yorulma cihazının kullanılabilir olduğu görülmüştür.
- Aynı anda 10 adet numuneyi yorulma testine tabi tutma yeteneğinden ve hızlı ve kullanışlı bir yazılım ara yüzüne sahip olmasından dolayı birim numune başına düşen test süresi kısaltılmıştır.
- Yorulma testlerinden elde edilen tecrübe neticesinde, test frekansı arttıkça makinenin kütesinden kaynaklanan titreşim etkilerini bertaraf etmek için ayaklara sönümleyici tamponlar konulmalı ve makine bağlantı elemanları vasıtasıyla zemine sabitlenmelidir.
- Dinamik testlerinden elde edilen sonuçlara göre karbon/epoksi malzemenin yorulma ömrü ve yorulma mukavemeti cam/epoksiye göre bariz bir üstünlük sağlamıştır.
- Dinamik testlerinden elde edilen sonuçlara göre malzemenin yorulma mukavemet değeri arttıkça, yorulma ömrü azalmaktadır. Yüksek gerilmeler malzemeyi daha fazla şekil değişimine zorlamaktadır. Deformasyon miktarı arttıkça kompozit yapının fiber-matris ara yüzeyindeki bağların zayıflaması neden olmaktadır. Matristen başlayan çatlaklar zamanla ilerleyerek malzemenin daha erken yorulmasına neden olmaktadır.
- Dinamik testlerinden elde edilen sonuçlara göre, yorulma hasarı malzemeyi yorulmaya zorlayan gerilme ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek gerilme değerlerinde yorulma hasarı kırılma şeklinde meydana gelirken, düşük gerilme değerlerinde delaminasyon oluşumları gözlenmiştir.

- Çözeltide bekleme süresi arttıkça malzemenin %nem alma ve % kütle kaybı değerleri artmaktadır. Bu durum çözeltinin malzeme içerisinde durağan olmayıp, sürekli malzemenin içerisine doğru ilerlediğini göstermektedir. Çözelti hasar resimleri incelendiğinde bu ilerlemenin numunenin kalınlık kesitinden içeriye doğru olduğu görülmektedir.
- Çözelti derişimi artıkça malzemenin %nem alma ve % kütle kaybı değerleri artmaktadır. Yüksek derişimde epoksi matris malzemesi kimyasal korozyona uğramaktadır. HCl asit ve NaOH bazik çözeltileri polar yapılıdır. Epoksi matris malzemesinin bu bu sıvılarda aşınmaya uğraması onuda polar yapıda olduğunu göstermektedir. Bu yüzden epoksi matrisli kompozit yapıların polar yapıya sahip derişimlerden uzak tutulmalıdır.

## 8. EK-1

### 8.1. Cam/Epoksi Numunelerin Asidik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri

Çizelge 8.1 1 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	133,04	260568	190,90	186500	264,57	139500	285,93	79500	291,07	19500
2	181,42	303996	219,28	202000	266,56	120000	280,58	75750	446,35	20000
3	167,66	316404	227,17	162000	250,35	117750	313,99	88500	376,36	21000
4	193,67	223344	224,78	190000	273,79	96750	321,27	83250	317,77	22000
5	185,76	268840	218,89	172500	269,38	148500	292,07	89250	328,94	23000
ORT.	<b>172,31</b>	<b>274630</b>	<b>216,20</b>	<b>182600</b>	<b>264,93</b>	<b>124500</b>	<b>298,77</b>	<b>83250</b>	<b>352,10</b>	<b>21100</b>

Çizelge 8.2 2 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	176,91	238000	205,93	155000	229,21	114000	251,72	57750	374,85	18900
2	156,29	241000	162,83	177500	238,60	90000	335,66	66750	338,10	16200
3	145,63	262000	249,80	160000	240,98	120000	240,45	63000	314,67	19500
4	173,58	268000	166,37	152500	262,63	104000	254,19	72750	308,79	14400
5	144,74	248000	186,53	180000	273,68	124000	351,05	51750	367,54	18600
ORT.	<b>159,43</b>	<b>251400</b>	<b>194,29</b>	<b>165000</b>	<b>249,02</b>	<b>110400</b>	<b>286,61</b>	<b>62400</b>	<b>340,79</b>	<b>17520</b>

Çizelge 8.3 3 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	125,75	216000	180,20	136000	214,98	92000	239,47	57000	297,24	10800
2	166,78	208000	196,99	128000	196,07	100000	218,57	61500	383,25	17400
3	147,35	214000	204,00	144000	218,07	105000	289,01	54000	357,96	8400
4	143,83	218000	154,82	160000	230,61	86000	270,44	45000	194,87	7800
5	-	-	-	-	216,86	97000	269,37	60000	346,23	10800
ORT.	<b>145,93</b>	<b>214000</b>	<b>184,00</b>	<b>142000</b>	<b>215,32</b>	<b>96000</b>	<b>257,37</b>	<b>55500</b>	<b>315,91</b>	<b>11040</b>

Çizelge 8.4 4 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	142,20	180000	167,84	106250	200,05	78750	250,73	28650	298,38	9900
2	152,97	174000	185,04	107500	221,08	63750	279,30	29500	333,61	8700
3	121,00	156000	196,63	115000	173,48	66000	211,98	38450	326,53	12600
4	105,47	161000	130,66	120000	143,57	69000	207,04	33600	222,38	8100
5	115,64	188000	158,47	106250	210,51	71500	240,94	35250	262,96	9000
ORT.	<b>127,45</b>	<b>171800</b>	<b>167,73</b>	<b>111000</b>	<b>189,73</b>	<b>69800</b>	<b>238,00</b>	<b>33090</b>	<b>288,77</b>	<b>9660</b>

Çizelge 8.5 1 Ay %15 HCI ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	165,09	222000	210,11	95000	255,67	60000	241,35	30000	354,16	13000
2	148,82	229500	152,41	153750	257,75	63750	294,79	30000	288,00	18000
3	130,73	226500	205,75	118750	224,35	67500	297,75	40000	372,33	12000
4	153,63	216000	206,97	98750	250,33	61250	272,24	27500	361,12	12000
5	167,26	216000	198,18	112500	227,52	63750	279,38	38500	312,68	12000
ORT.	<b>153,11</b>	<b>222000</b>	<b>194,68</b>	<b>115750</b>	<b>243,12</b>	<b>63250</b>	<b>277,10</b>	<b>33200</b>	<b>337,66</b>	<b>13400</b>

Çizelge 8.6 2 Ay %15 HCI ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	163,14	228000	150,45	117000	201,46	56750	294,75	31000	328,99	10000
2	137,60	210000	199,81	114000	208,96	57750	255,96	24000	320,54	7000
3	160,75	216000	156,83	111000	228,42	54000	263,67	32000	295,20	8250
4	114,13	198000	197,56	102000	207,96	54000	247,79	24000	335,69	10000
5	124,22	202000	174,62	99000	195,49	54000	251,05	33000		
ORT.	<b>139,97</b>	<b>210800</b>	<b>175,86</b>	<b>108600</b>	<b>208,46</b>	<b>55300</b>	<b>262,64</b>	<b>28800</b>	<b>320,11</b>	<b>8813</b>

Çizelge 8.7 3 Ay %15 HCI ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	145,29	158000	148,10	87000	174,70	40800	246,56	26000	347,61	6600
2	90,97	164000	172,43	89250	171,63	50400	196,62	28000	316,22	5000
3	145,47	158000	151,03	84750	184,07	56400	218,51	35000	278,50	8800
4	127,61	154000	178,29	81750	176,98	49800	276,96	18000	302,04	8000
5	-	-	-	-	-	-	-	-	273,56	8400
ORT.	<b>127,33</b>	<b>158500</b>	<b>162,46</b>	<b>85688</b>	<b>176,84</b>	<b>49350</b>	<b>234,66</b>	<b>26750</b>	<b>303,59</b>	<b>7360</b>

Çizelge 8.8 4 Ay %15 HCI ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	100,60	166000	163,09	73500	188,57	37200	212,11	24900	277,08	6100
2	111,49	140000	132,00	75750	120,52	38400	198,65	21700	295,90	6200
3	102,50	143500	134,49	78750	114,42	37500	257,90	23200	278,45	5100
4	135,92	146500	168,09	76500	226,57	39900	230,92	25100	325,95	6000
5	114,10	146000	143,39	66000	159,38	38100	220,64	23500	273,74	6000
ORT.	<b>112,92</b>	<b>148400</b>	<b>148,21</b>	<b>74100</b>	<b>161,89</b>	<b>38220</b>	<b>224,04</b>	<b>23680</b>	<b>290,22</b>	<b>5880</b>

Çizelge 8.9 1 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	127,21	119250	161,15	78000	180,16	41000	211,54	20500	283,31	4000
2	134,64	130500	136,51	72000	217,56	33000	284,62	17000	332,56	5000
3	143,64	131250	185,94	69000	177,05	42500	182,60	24500	270,07	7000
4	120,60	125250	176,81	63000	157,35	38000	273,93	22000	325,09	9000
5	155,86	134250	151,93	70000	192,34	42000	234,81	19000	280,16	6000
ORT.	<b>136,39</b>	<b>128100</b>	<b>162,47</b>	<b>70400</b>	<b>184,89</b>	<b>39300</b>	<b>237,50</b>	<b>20600</b>	<b>298,24</b>	<b>6200</b>

Çizelge 8.10 2 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	99,75	133750	143,06	63500	168,26	35500	230,62	15000	289,74	5500
2	121,21	116250	155,12	67000	143,24	11500	240,73	13000	282,57	5100
3	110,62	123750	148,17	34500	159,00	38000	209,17	16000	270,80	1300
4	122,98	112500	163,20	69000	166,26	40500	211,61	17000	293,57	5200
5	115,42	125000	131,70	65000	-	-	-	-	282,26	5100
ORT.	<b>114,00</b>	<b>122250</b>	<b>148,25</b>	<b>59800</b>	<b>159,19</b>	<b>31375</b>	<b>223,03</b>	<b>15250</b>	<b>283,79</b>	<b>4440</b>

Çizelge 8.11 3 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	91,92	109750	136,25	40000	118,22	27500	156,37	6000	276,57	2800
2	119,46	111250	151,46	32000	143,59	30500	239,71	11000	297,77	2500
3	94,31	99250	141,85	54000	167,49	21250	232,15	8000	251,08	2700
4	113,30	113500	128,91	38000	134,73	26250	186,14	10000	241,98	2600
5	123,40	107750	132,31	40000	-	-	-	-	-	-
ORT.	<b>108,48</b>	<b>108300</b>	<b>138,16</b>	<b>40800</b>	<b>141,01</b>	<b>26375</b>	<b>203,59</b>	<b>8750</b>	<b>266,85</b>	<b>2650</b>

Çizelge 8.12 4 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	98,27	78500	103,56	32000	126,90	17500	183,68	6100	260,45	900
2	66,62	68500	112,92	49000	100,97	21250	207,27	5300	254,89	1350
3	81,30	81000	89,16	19000	107,74	18750	161,93	6100	244,53	1350
4	95,49	74250	-	-	136,88	16250	207,63	6800	169,76	1725
5	90,61	93500	122,42	46000	-	-	-	-	247,85	2250
ORT.	<b>86,46</b>	<b>79150</b>	<b>107,01</b>	<b>36500</b>	<b>118,12</b>	<b>18438</b>	<b>190,13</b>	<b>6075</b>	<b>235,50</b>	<b>1515</b>

## 8.2. Cam/Epoksi Numunelerin Bazik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri

Çizelge 8.13 1 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	164,03	321000	262,41	246000	326,16	154500	364,31	118000	417,08	43000
2	224,59	354000	282,32	237000	280,81	148500	375,11	94500	432,77	47000
3	202,81	343000	237,70	261000	339,44	151500	345,99	109500	368,90	45500
4	187,23	330000	211,68	241000	259,28	145500	347,91	108000	373,72	47500
5	234,75	335000	246,99	251000	308,79	149500	357,87	93000	396,80	53000
ORT.	<b>202,68</b>	<b>336600</b>	<b>248,22</b>	<b>247200</b>	<b>302,89</b>	<b>149900</b>	<b>358,24</b>	<b>104600</b>	<b>397,85</b>	<b>47200</b>

Çizelge 8.14 2 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	160,53	310000	243,65	202000	286,62	132000	334,66	99000	393,96	39300
2	176,76	333000	263,48	188000	291,69	150000	331,05	89000	373,27	41100
3	166,72	281000	256,97	223000	305,61	136500	325,80	91000	418,93	35100
4	250,41	357000	214,36	172000	295,84	129000	373,28	85000	345,45	38400
5	232,43	287000	219,99	195000	271,06	142500	378,20	94000	412,87	42900
ORT.	<b>197,37</b>	<b>313600</b>	<b>239,69</b>	<b>196000</b>	<b>290,17</b>	<b>138000</b>	<b>348,60</b>	<b>91600</b>	<b>388,89</b>	<b>39360</b>

Çizelge 8.15 3 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	189,04	312500	228,26	184500	287,25	122000	359,88	71500	384,95	45500
2	183,56	292000	224,72	186000	282,11	124000	333,74	81000	392,21	24500
3	206,20	295000	227,35	183000	269,39	115000	328,09	78500	397,40	19250
4	180,07	307500	240,72	172500	283,54	113500	307,41	76000	316,49	49000
5	-	-	-	-	-	-	-	-	359,78	24500
ORT.	<b>189,72</b>	<b>301750</b>	<b>230,26</b>	<b>181500</b>	<b>280,57</b>	<b>118625</b>	<b>332,28</b>	<b>76750</b>	<b>370,17</b>	<b>32550</b>

Çizelge 8.16 4 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	208,23	277000	238,17	174500	280,30	99000	335,95	76500	367,80	24900
2	173,64	297500	247,51	184000	222,66	110700	315,09	72750	379,72	25350
3	162,14	291000	198,44	172500	272,78	98100	353,68	63450	381,39	27750
4	193,90	290500	193,07	162500	282,72	111900	305,83	67200	318,60	24300
5	166,88	284000	219,04	181500	259,59	106200	-	-	332,49	22650
ORT.	<b>180,96</b>	<b>288000</b>	<b>219,25</b>	<b>175000</b>	<b>263,61</b>	<b>105180</b>	<b>327,63</b>	<b>69975</b>	<b>356,00</b>	<b>24990</b>



Çizelge 8.17 1 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	175,86	325500	234,06	247500	268,32	131250	341,46	98000	394,86	40400
2	212,27	334500	219,54	230000	273,89	126250	300,01	94000	349,82	42800
3	186,20	298500	243,02	227500	296,58	137500	351,61	89000	426,33	43600
4	190,01	304500	228,45	245000	281,90	138750	347,55	93000	359,65	37200
5	167,19	315000	263,55	217500	272,31	143750	364,16	87000	389,06	40800
ORT.	<b>186,31</b>	<b>315600</b>	<b>237,72</b>	<b>233500</b>	<b>278,60</b>	<b>135500</b>	<b>340,96</b>	<b>92200</b>	<b>383,95</b>	<b>40960</b>

Çizelge 8.18 2 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	156,07	311000	196,90	193000	235,47	137000	336,42	78000	372,03	39600
2	166,00	319000	226,51	190500	264,34	147000	309,50	84000	359,88	33200
3	184,33	303000	258,38	174000	282,71	128000	366,12	98000	364,32	35600
4	200,66	291000	236,83	199500	245,91	140000	299,45	72000	358,81	26800
5	188,65	274000	235,38	229000	296,34	124000	331,38	82000	391,48	42000
ORT.	<b>179,14</b>	<b>299600</b>	<b>230,80</b>	<b>197200</b>	<b>264,96</b>	<b>135200</b>	<b>328,58</b>	<b>82800</b>	<b>369,31</b>	<b>35440</b>

9.

Çizelge 8.19 3 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	155,18	282000	224,12	154000	227,76	120000	334,65	65000	302,20	25500
2	171,64	255000	217,10	134000	251,43	114000	305,06	70000	347,74	34000
3	182,89	261000	214,94	188000	257,50	98000	323,33	61000	368,88	32500
4	172,26	279000	232,69	192000	275,17	107000	287,73	69000	353,90	29000
5	-	-	-	-	-	-	324,80	62000	394,19	28000
ORT.	<b>170,49</b>	<b>269250</b>	<b>222,22</b>	<b>167000</b>	<b>252,97</b>	<b>109750</b>	<b>315,12</b>	<b>65400</b>	<b>353,38</b>	<b>29800</b>

Çizelge 8.20 4 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	145,61	243500	201,92	161000	247,34	73750	341,70	55000	348,43	18400
2	164,62	246000	217,71	142000	256,74	90000	267,99	58750	357,29	21200
3	187,80	252000	204,61	153000	257,58	98000	318,45	75250	314,38	35200
4	147,20	242250	224,09	146000	233,48	93750	290,66	51750	322,36	18000
5	153,92	247500	-	-	240,94	90000	308,05	54250	354,86	13600
ORT.	<b>159,83</b>	<b>246250</b>	<b>212,08</b>	<b>150500</b>	<b>247,22</b>	<b>89100</b>	<b>305,37</b>	<b>59000</b>	<b>339,46</b>	<b>21280</b>

Çizelge 8.21 1 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	179,03	303000	220,42	201000	274,70	121500	259,98	84000	369,97	28800
2	194,90	312000	224,83	188000	293,20	109500	313,21	93000	342,80	39200
3	160,39	306000	231,06	192000	228,34	126000	344,66	87000	350,21	38000
4	169,44	279000	229,71	237000	264,59	145500	358,19	89000	389,67	36400
5	170,84	294000	221,15	176000	236,70	138000	361,28	91000	359,52	40000
ORT.	<b>174,92</b>	<b>298800</b>	<b>225,43</b>	<b>198800</b>	<b>259,51</b>	<b>128100</b>	<b>327,46</b>	<b>88800</b>	<b>362,43</b>	<b>36480</b>

Çizelge 8.22 2 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	156,66	280000	186,32	178000	257,38	112500	274,86	90000	377,84	29250
2	184,45	287500	204,76	186000	250,91	115000	327,43	78000	346,26	38250
3	175,87	247500	246,88	202000	249,62	126500	342,50	91000	353,25	30750
4	150,99	275000	227,40	182000	256,00	122500	334,40	78000	330,69	27000
5	174,74	290000	210,64	216000	-	-	311,19	79000	361,42	33000
ORT.	<b>168,54</b>	<b>276000</b>	<b>215,20</b>	<b>192800</b>	<b>253,47</b>	<b>119125</b>	<b>318,08</b>	<b>83200</b>	<b>353,89</b>	<b>31650</b>

Çizelge 8.23 3 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	158,94	265000	198,04	198000	293,84	97500	320,31	69500	326,13	25250
2	155,55	257500	197,33	184500	243,65	93750	295,52	64500	354,54	27500
3	181,62	278000	221,87	189000	233,36	102500	308,65	66000	326,56	29500
4	165,33	235000	209,91	169000	211,59	105000	306,66	65250	334,41	22750
5	161,68	249000	199,68	192000	214,77	113750				
ORT.	<b>164,63</b>	<b>256900</b>	<b>205,37</b>	<b>186500</b>	<b>239,44</b>	<b>102500</b>	<b>307,78</b>	<b>66313</b>	<b>335,41</b>	<b>26250</b>

Çizelge 8.24 4 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış cam/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	156,72	253000	203,63	156000	201,80	97000	286,16	63200	309,16	18250
2	142,26	241000	192,79	169000	206,18	89000	280,65	60800	319,32	21250
3	145,97	249000	181,31	187000	217,23	105000	300,45	62000	313,76	19000
4	152,26	242000	185,12	165000	219,55	102000	290,75	61200	333,87	22750
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ORT.	<b>149,30</b>	<b>246250</b>	<b>190,71</b>	<b>169250</b>	<b>211,19</b>	<b>98250</b>	<b>289,50</b>	<b>61800</b>	<b>319,03</b>	<b>20313</b>

### 8.3. Karbon/Epoksi Numunelerin Asidik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri

Çizelge 8.25 1 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	362,31	1066250	392,19	944000	585,17	792000	530,74	720000	642,00	660000
2	361,83	1113750	414,74	924000	482,09	824000	622,94	760000	681,23	645000
3	322,57	1052500	406,10	868000	506,38	816000	636,31	697500	678,86	690000
4	342,24	987500	430,40	916000	545,88	820000	539,10	767500	641,13	627000
5	320,68	1081250	410,94	896000	488,99	810000	565,07	675000	624,59	614000
ORT.	<b>341,93</b>	<b>1060250</b>	<b>410,87</b>	<b>909600</b>	<b>521,70</b>	<b>812400</b>	<b>578,83</b>	<b>724000</b>	<b>653,56</b>	<b>647200</b>

Çizelge 8.26 2 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	339,23	1052600	392,63	871000	482,81	843000	569,31	712000	671,47	645000
2	369,38	1081000	439,11	945000	531,40	834000	589,72	720000	662,02	609000
3	301,91	995600	375,93	961000	530,91	774000	519,38	710000	626,35	638250
4	340,71	1028000	429,85	771000	517,76	803000	608,25	682000	674,12	647500
5	-	-	402,91	936000	474,70	779000	569,15	695000	589,76	657500
ORT.	<b>337,81</b>	<b>1039300</b>	<b>408,09</b>	<b>896800</b>	<b>507,52</b>	<b>806600</b>	<b>571,16</b>	<b>703800</b>	<b>644,74</b>	<b>639450</b>

Çizelge 8.27 3 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	337,63	1049400	374,28	833250	548,74	812500	569,73	682000	602,03	657000
2	333,22	1057400	400,41	899250	501,36	784250	554,86	709000	686,08	588000
3	297,60	1017500	427,92	874500	478,69	816750	531,36	695000	630,91	618000
4	357,59	969100	395,69	935000	496,94	771250	600,30	663000	632,33	639000
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ORT.	<b>331,51</b>	<b>1023350</b>	<b>399,57</b>	<b>885500</b>	<b>506,43</b>	<b>796188</b>	<b>564,06</b>	<b>687250</b>	<b>637,84</b>	<b>625500</b>

Çizelge 8.28 4 Ay %5 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	303,61	1003750	373,77	849000	456,77	774000	574,57	708000	562,60	567000
2	359,11	1042250	412,89	896000	471,93	746000	561,72	633000	609,52	591000
3	294,87	957000	359,73	834000	544,13	756000	519,14	654000	659,83	627000
4	336,48	970750	392,15	906000	531,08	831000	619,06	717000	645,62	636000
5	-	-	400,84	888000	473,68	799000	509,74	696000	630,37	618000
ORT.	<b>323,52</b>	<b>993438</b>	<b>387,88</b>	<b>874600</b>	<b>495,52</b>	<b>781200</b>	<b>556,84</b>	<b>681600</b>	<b>621,59</b>	<b>607800</b>

Çizelge 8.29 1 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	288,62	966000	414,99	817500	455,42	757000	535,19	633500	637,44	590000
2	285,14	897000	370,32	842500	507,33	675000	588,84	621000	611,31	580000
3	357,37	1008000	349,63	887500	474,96	811000	547,50	647500	648,83	610000
4	308,48	984000	416,99	837500	519,44	773000	563,95	681000	594,77	570000
5	304,76	948000	362,15	832500	478,13	806000	542,56	651000	590,80	555000
ORT.	<b>308,87</b>	<b>960600</b>	<b>382,82</b>	<b>843500</b>	<b>487,06</b>	<b>764400</b>	<b>555,61</b>	<b>646800</b>	<b>616,63</b>	<b>581000</b>

Çizelge 8.30 2 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	291,69	933000	383,59	879000	433,37	728000	574,33	607500	577,56	595000
2	322,99	963000	391,69	834000	506,10	742000	558,48	617500	586,55	582500
3	271,94	956000	353,14	885000	517,81	775000	533,42	645500	628,32	567550
4	315,26	926000	387,92	813000	493,00	753000	564,09	672500	619,59	552500
5	-	-	341,58	783000	430,79	762000	516,15	652500	601,15	575000
ORT.	<b>300,47</b>	<b>944500</b>	<b>371,59</b>	<b>838800</b>	<b>476,21</b>	<b>752000</b>	<b>549,30</b>	<b>639100</b>	<b>602,63</b>	<b>574510</b>

Çizelge 8.31 3 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	269,61	873000	366,09	856000	487,01	712500	516,45	642500	561,42	562500
2	287,11	945000	384,21	823000	448,69	757500	571,45	595000	552,38	585000
3	325,68	966000	332,85	786000	472,54	748000	546,63	647500	618,04	591500
4	314,37	938000	373,43	842000	465,09	728000	508,22	617500	610,42	535000
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ORT.	<b>299,19</b>	<b>930500</b>	<b>364,14</b>	<b>826750</b>	<b>468,33</b>	<b>736500</b>	<b>535,69</b>	<b>625625</b>	<b>585,56</b>	<b>568500</b>

Çizelge 8.32 4 Ay %15 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	291,23	873000	363,44	817000	419,66	722500	524,67	579000	584,11	567000
2	271,84	946000	329,60	807500	495,80	736000	534,71	559000	557,68	525000
3	320,67	882000	397,22	822500	429,19	698000	544,69	615000	568,39	559000
4	280,44	924000	372,74	785000	497,51	745000	511,74	609000	559,16	533000
5	-	-	324,30	796000	407,29	685000	521,79	621000	589,72	549000
ORT.	<b>291,04</b>	<b>906250</b>	<b>357,46</b>	<b>805600</b>	<b>449,89</b>	<b>717300</b>	<b>527,52</b>	<b>596600</b>	<b>571,81</b>	<b>546600</b>

Çizelge 8.33 1 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	270,60	879000	376,03	758000	482,01	726000	473,11	636000	553,30	536000
2	312,93	906000	382,53	816000	465,02	669000	528,42	591000	603,62	527000
3	259,11	945000	361,26	796000	438,85	717000	577,44	654000	556,08	569000
4	286,69	936000	356,44	826000	478,42	762000	585,25	575000	689,95	547000
5	279,52	912000	345,14	818000	453,19	749000	496,25	645000	579,72	575000
ORT.	<b>281,77</b>	<b>915600</b>	<b>364,28</b>	<b>802800</b>	<b>463,50</b>	<b>724600</b>	<b>532,10</b>	<b>620200</b>	<b>596,53</b>	<b>550800</b>

Çizelge 8.34 2 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	270,38	879000	396,07	762000	470,71	738000	551,10	647000	565,52	542000
2	261,86	868000	339,76	821000	392,80	683500	551,20	628000	612,00	568000
3	282,07	903000	354,79	803000	468,45	742000	486,07	576000	537,73	518000
4	292,39	927000	378,40	754000	481,28	698500	539,56	594000	584,05	528000
5	-	-	333,45	812000	457,44	729000	484,02	588000	567,50	551000
ORT.	<b>276,67</b>	<b>894250</b>	<b>360,50</b>	<b>790400</b>	<b>454,14</b>	<b>718200</b>	<b>522,39</b>	<b>606600</b>	<b>573,36</b>	<b>541400</b>

Çizelge 8.35 3 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	240,60	828000	377,46	759000	447,24	739000	513,22	579000	573,16	496000
2	283,90	916000	360,39	793000	428,01	687500	498,99	545000	562,22	522000
3	243,29	875000	314,30	746000	440,96	703500	509,10	603000	594,72	536000
4	283,59	859000	338,90	783000	466,60	698000	521,43	618000	538,59	519000
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ORT.	<b>262,84</b>	<b>869500</b>	<b>347,76</b>	<b>770250</b>	<b>445,70</b>	<b>707000</b>	<b>510,69</b>	<b>586250</b>	<b>567,17</b>	<b>518250</b>

Çizelge 8.36 4 Ay %25 HCl ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	267,16	887000	332,68	775000	467,10	675000	470,26	594000	515,07	537000
2	242,38	836000	345,50	762000	448,51	689000	508,80	582000	568,51	498000
3	244,29	876000	353,72	740000	439,25	639000	523,92	545000	558,61	481000
4	264,84	842000	349,46	723000	417,83	695000	483,25	552000	555,30	509000
5	-	-	300,34	763000	417,41	711000	470,24	569000	532,46	517000
ORT.	<b>254,67</b>	<b>860250</b>	<b>336,34</b>	<b>752600</b>	<b>438,02</b>	<b>681800</b>	<b>491,29</b>	<b>568400</b>	<b>545,99</b>	<b>508400</b>

#### 8.4. Karbon/Epoksi Numunelerin Bazik Ortamdaki Yorulma Mukavemeti-Çevrim Değerleri

Çizelge 8.37 1 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	339,39	1113000	422,63	936000	505,24	816000	602,89	764000	695,83	648000
2	327,60	1167000	472,09	978000	545,79	848000	597,01	771000	625,31	677000
3	352,85	1050000	411,21	955000	534,10	885000	571,42	715000	619,78	663000
4	344,32	1080000	386,63	903000	560,27	868000	626,41	747000	667,38	638000
5	367,17	1058000	401,64	915000	488,71	836000	538,10	736000	686,71	685000
ORT.	346,27	1093600	418,84	937400	526,82	850600	587,16	746600	659,00	662200

Çizelge 8.38 2 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	352,53	1104000	421,79	882000	503,11	809000	571,04	696000	678,61	619000
2	344,44	1091000	386,54	941000	548,08	816000	587,53	749000	623,97	659000
3	317,93	1076000	445,09	952000	517,23	852000	596,65	742000	659,85	667000
4	340,52	1068000	379,71	926000	544,30	863000	564,48	763000	622,71	636000
5	328,69	1063000	405,06	933000	477,00	871000	592,68	728000	635,43	676000
ORT.	336,82	1080400	407,64	926800	517,94	842200	582,48	735600	644,12	651400

Çizelge 8.39 3 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	329,53	1043000	409,93	951000	489,33	811000	559,68	741000	659,27	626000
2	343,41	1056000	415,17	895000	505,53	823000	578,96	718000	633,25	668000
3	319,28	1097000	387,18	923000	523,82	839000	551,68	731000	610,11	652000
4	336,05	1085000	392,94	906000	514,33	828000	572,20	701000	647,07	633000
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ORT.	332,07	1070250	401,31	918750	508,25	825250	565,63	722750	637,43	644750

Çizelge 8.40 4 Ay %5 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	323,08	1035000	346,80	882000	502,96	825000	580,11	720000	604,77	652000
2	340,12	1079000	461,81	936000	490,06	836000	536,72	728000	633,96	645000
3	302,80	1053000	403,97	912000	521,49	801000	582,71	691000	647,60	623000
4	320,10	1026000	378,10	927000	531,31	816000	587,85	705000	635,33	612000
5	-	-	397,96	876000	449,26	811000	522,21	714000	621,59	636000
ORT.	321,53	1048250	397,73	906600	499,02	817800	561,92	711600	628,65	633600

Çizelge 8.41 1 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	323,08	1035000	346,80	882000	502,96	825000	580,11	720000	604,77	652000
2	340,12	1079000	461,81	936000	490,06	836000	536,72	728000	633,96	645000
3	302,80	1053000	403,97	912000	521,49	801000	582,71	691000	647,60	623000
4	320,10	1026000	378,10	927000	531,31	816000	587,85	705000	635,33	612000
5	-	-	397,96	876000	449,26	811000	522,21	714000	621,59	636000
ORT.	321,53	1048250	397,73	906600	499,02	817800	561,92	711600	628,65	633600

Çizelge 8.42 2 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	323,08	1035000	346,80	882000	502,96	825000	580,11	720000	604,77	652000
2	340,12	1079000	461,81	936000	490,06	836000	536,72	728000	633,96	645000
3	302,80	1053000	403,97	912000	521,49	801000	582,71	691000	647,60	623000
4	320,10	1026000	378,10	927000	531,31	816000	587,85	705000	635,33	612000
5	-	-	397,96	876000	449,26	811000	522,21	714000	621,59	636000
ORT.	321,53	1048250	397,73	906600	499,02	817800	561,92	711600	628,65	633600

Çizelge 8.43 3 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	323,08	1035000	346,80	882000	502,96	825000	580,11	720000	604,77	652000
2	340,12	1079000	461,81	936000	490,06	836000	536,72	728000	633,96	645000
3	302,80	1053000	403,97	912000	521,49	801000	582,71	691000	647,60	623000
4	320,10	1026000	378,10	927000	531,31	816000	587,85	705000	635,33	612000
5	-	-	397,96	876000	449,26	811000	522,21	714000	621,59	636000
ORT.	321,53	1048250	397,73	906600	499,02	817800	561,92	711600	628,65	633600

Çizelge 8.44 4 Ay %15 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	323,08	1035000	346,80	882000	502,96	825000	580,11	720000	604,77	652000
2	340,12	1079000	461,81	936000	490,06	836000	536,72	728000	633,96	645000
3	302,80	1053000	403,97	912000	521,49	801000	582,71	691000	647,60	623000
4	320,10	1026000	378,10	927000	531,31	816000	587,85	705000	635,33	612000
5	-	-	397,96	876000	449,26	811000	522,21	714000	621,59	636000
ORT.	321,53	1048250	397,73	906600	499,02	817800	561,92	711600	628,65	633600

Çizelge 8.45 1 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	302,07	981000	381,27	804000	491,58	722000	527,83	666000	624,85	595000
2	287,28	1013000	418,04	864000	512,24	736000	553,06	682000	610,24	566000
3	306,63	996000	360,83	882000	429,93	768000	563,26	632000	593,04	573000
4	351,52	1023000	369,39	845000	457,79	745000	525,08	627000	621,12	588000
5	293,91	991000	362,28	856000	475,33	756000	542,00	647000	596,60	574000
ORT.	<b>308,28</b>	<b>1000800</b>	<b>378,36</b>	<b>850200</b>	<b>473,37</b>	<b>745400</b>	<b>542,24</b>	<b>650800</b>	<b>609,17</b>	<b>579200</b>

Çizelge 8.46 2 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	304,76	953000	358,48	829000	449,36	731000	524,94	629000	625,01	591000
2	321,30	981000	366,87	851000	413,19	728000	550,86	656000	608,57	579000
3	299,59	976000	382,78	859000	497,36	752000	515,39	647000	583,66	556000
4	292,97	964000	395,15	842000	476,08	743000	552,80	638000	593,89	569000
5										
ORT.	<b>304,65</b>	<b>968500</b>	<b>375,82</b>	<b>845250</b>	<b>459,00</b>	<b>738500</b>	<b>536,00</b>	<b>642500</b>	<b>602,79</b>	<b>573750</b>

Çizelge 8.47 3 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	321,72	964000	354,59	815000	432,98	741000	515,35	618000	552,35	563000
2	274,92	936000	370,01	836000	416,96	721000	535,57	627000	624,55	574000
3	284,22	950000	373,45	825000	478,99	712000	520,71	639000	589,39	543000
4	312,58	971000	381,99	819000	472,23	732000	533,21	609000	644,57	557000
5									568,84	527000
ORT.	<b>298,36</b>	<b>955250</b>	<b>370,01</b>	<b>823750</b>	<b>450,29</b>	<b>726500</b>	<b>526,21</b>	<b>623250</b>	<b>595,94</b>	<b>552800</b>

Çizelge 8.48 4 Ay %25 NaOH ortamda bırakılmış karbon/epoksi yorulma-ömür davranışları

Numune	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim	Gerilme (MPa)	Çevrim
1	298,25	939000	378,94	783000	425,45	737000	517,48	611000	597,76	561000
2	301,30	952000	343,08	826000	446,87	712000	512,80	594000	571,44	544000
3	260,67	926000	377,51	803000	484,22	718000	545,44	624000	621,61	551000
4	291,19	947000	341,29	815000	428,59	691000	493,57	608000	591,31	571000
5			364,55	808000	436,93	711000	525,27	615000	563,16	537000
ORT.	<b>287,85</b>	<b>941000</b>	<b>361,07</b>	<b>807000</b>	<b>444,41</b>	<b>713800</b>	<b>518,91</b>	<b>610400</b>	<b>589,06</b>	<b>552800</b>



### 8.5.Çözelti Derişimine ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Cam/Epoksi Kompozitlerin Yorulma Dayanım ve Ömür Değerlerinin Değişim Yüzdeleri

Çizelge 8.49 Sade numunelere göre HCI %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	21,19	22,60	15,80	32,64	14,08	24,66	18,67	26,78	13,21	60,93
2Ay	27,08	29,14	24,34	39,14	19,24	33,19	21,98	45,12	16,00	67,56
3Ay	33,26	39,68	28,34	47,62	30,17	41,90	29,94	51,19	22,13	79,56
4Ay	41,71	51,58	34,68	59,06	38,47	57,76	35,21	70,90	28,82	82,11

Çizelge 8.50 Sade numunelere göre HCI %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	29,97	37,43	24,18	57,30	21,16	61,72	24,56	70,80	16,77	75,19
2Ay	35,98	40,59	31,52	59,94	32,40	66,53	28,50	74,67	21,10	83,68
3Ay	41,76	55,33	36,73	68,39	42,65	70,13	36,12	76,47	25,17	86,37
4Ay	48,35	58,17	42,28	72,67	47,50	76,87	39,01	79,17	28,46	89,11

Çizelge 8.51 Sade numunelere göre HCI %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	37,62	63,90	36,73	74,03	40,04	76,22	35,34	81,88	26,49	88,52
2Ay	47,86	65,54	42,27	77,94	48,38	81,01	39,28	86,59	30,05	91,78
3Ay	50,38	69,48	46,20	84,95	54,27	84,04	44,58	92,30	34,23	95,09
4Ay	60,46	77,69	58,33	86,54	61,69	88,84	48,24	94,66	41,95	97,19

Çizelge 8.52 Sade numunelere göre NaOH %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	7,30	5,13	3,34	8,82	1,77	9,28	2,48	8,00	1,93	12,59
2Ay	9,73	11,61	6,66	27,70	5,90	16,49	5,10	19,44	4,14	27,11
3Ay	13,23	14,95	10,33	33,05	9,01	28,21	9,54	32,50	8,76	39,72
4Ay	17,24	18,83	14,62	35,45	14,51	36,35	10,81	38,46	12,25	53,72

Çizelge 8.53 Sade numunelere göre NaOH %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	14,79	11,05	7,42	13,87	9,65	18,00	7,18	18,91	5,36	24,15
2Ay	18,06	15,56	10,12	27,26	14,08	18,18	10,55	27,18	8,97	34,37
3Ay	22,02	24,11	13,46	38,40	17,96	33,58	14,22	42,48	12,90	44,81
4Ay	26,90	30,59	17,41	44,49	19,83	46,08	16,87	48,11	16,33	60,59

Çizelge 8.54 Sade numunelere göre NaOH %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	20,00	15,78	12,21	26,67	15,84	22,48	10,86	21,90	10,66	32,44
2Ay	22,91	22,21	16,19	28,88	17,80	27,91	13,41	26,82	12,77	41,39
3Ay	24,70	27,59	20,02	31,21	22,35	37,97	16,21	41,68	17,33	51,39
4Ay	31,71	30,59	25,73	37,57	31,51	40,54	21,19	45,65	21,36	62,38

## 8.6.

### 8.6.Çözelti Derişimine ve Bekleme Süresine Bağlı Olarak Karbon/Epoksi

#### Kompozitlerin Yorulma Dayanım ve Ömür Değerlerinin Değişim Yüzdeleri

Çizelge 8.55 Sade numunelere göre HCI %5 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kaybı yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	1,56	3,68	3,02	4,77	2,76	7,90	3,03	4,89	2,25	3,35
2Ay	2,75	5,58	3,68	6,11	5,40	8,56	4,31	7,54	3,57	4,50
3Ay	4,56	7,03	5,69	7,30	5,61	9,74	5,50	9,71	4,60	6,59
4Ay	6,86	9,75	8,45	8,44	7,64	11,44	6,71	10,46	7,03	9,23

Çizelge 8.56 Sade numunelere göre HCI %15 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kaybı yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	11,08	12,73	9,64	11,69	9,22	13,34	6,92	15,03	7,77	13,23
2Ay	13,50	14,19	12,29	12,19	11,24	14,75	7,98	16,04	9,87	14,20
3Ay	13,86	15,47	14,05	13,45	12,71	16,51	10,26	17,81	12,42	15,10
4Ay	16,21	17,67	15,63	15,66	16,14	18,68	11,63	21,62	14,48	18,37

Çizelge 8.57 Sade numunelere göre HCI %25 çözeltide bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kaybı yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	18,88	16,82	14,02	15,95	13,61	17,86	10,86	18,52	10,78	17,74
2Ay	20,35	18,76	14,91	17,25	15,35	18,58	12,48	20,31	14,24	19,15
3Ay	24,33	21,01	17,91	19,36	16,92	19,85	14,45	22,98	15,17	22,60
4Ay	26,68	21,85	20,61	21,21	18,36	22,71	17,69	24,07	18,34	25,33

Çizelge 8.58 Sade numunelere göre NaOH %5 çözeltilerde bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	0,31	0,65	1,14	1,86	1,80	3,57	1,63	1,92	1,44	1,11
2Ay	3,03	1,85	3,78	2,97	3,46	4,52	2,42	3,36	3,66	2,72
3Ay	4,40	2,77	5,28	3,82	5,27	6,44	5,24	5,05	4,66	3,71
4Ay	7,44	4,77	6,12	5,09	6,99	7,29	5,86	6,52	5,98	5,38

Çizelge 8.59 Sade numunelere göre NaOH %15 çözeltilerde bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	4,66	2,83	5,38	5,32	6,53	7,88	6,15	7,46	5,77	6,33
2Ay	6,11	3,41	7,86	7,69	8,95	11,09	8,06	8,47	6,90	7,82
3Ay	8,57	5,88	10,39	8,45	10,63	13,19	9,18	9,85	7,74	9,08
4Ay	11,03	6,84	13,02	8,90	13,18	14,00	9,69	10,98	10,25	10,27

Çizelge 8.60 Sade numunelere göre NaOH %25 çözeltilerde bekleyen numunelerin yorulma dayanım ve ömür kayıp yüzdeleri

Bekleme Süresi	40%		50%		60%		70%		80%	
	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim	Gerilme	Çevrim
1Ay	11,25	9,08	10,69	10,99	11,77	15,50	9,16	14,50	8,89	13,50
2Ay	12,29	12,01	11,29	11,51	14,45	16,28	10,20	15,59	9,84	14,31
3Ay	14,11	13,22	12,66	13,76	16,07	17,64	11,84	18,12	10,87	17,44
4Ay	17,13	14,51	14,77	15,52	17,17	19,08	13,07	17,44	11,90	19,81

## 9. KAYNAKLAR

- [1] Banakar P, Shivananda HK, Niranjana HB. Influence of fiber orientation and thickness on tensile properties of laminated polymer composites. *Int J Pure Appl Sci Technol* 2012;9:61–68.
- [2] Tarfaoui M, Choukri S, Neme A. Effect of fibre orientation on mechanical properties of the laminated polymer composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings. *Compos Sci Technol* 2008;68:477–85. doi:10.1016/j.compscitech.2007.06.014.
- [3] Barile C, Casavola C, Pappalettere C. The influence of stitching and unconventional fibres orientation on the tensile properties of CFRP laminates. *Compos Part B Eng* 2017;110:248–54. doi:10.1016/j.compositesb.2016.11.033.
- [4] Rajesh M, Pitchaimani J. Mechanical Properties of Natural Fiber Braided Yarn Woven Composite: Comparison with Conventional Yarn Woven Composite. *J Bionic Eng* 2017;14:141–50. doi:10.1016/S1672-6529(16)60385-2.
- [5] Naito K, Oguma H. Tensile properties of novel carbon/glass hybrid thermoplastic composite rods. *Compos Struct* 2017;161:23–31. doi:10.1016/j.compstruct.2016.11.042.
- [6] Carozzi FG, Poggi C. Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. *Compos Part B Eng* 2015;70:215–30. doi:10.1016/j.compositesb.2014.10.056.
- [7] Attia M, Abd El-baky M, Alshorbagy A. Mechanical performance of intraply and inter-intraply hybrid composites based on e-glass and polypropylene unidirectional fibers. *J Compos Mater* 2017;51:381–94. doi:10.1177/0021998316644972.
- [8] Cai D'an, Zhou G, Wang X, Li C, Deng J. Experimental investigation on mechanical properties of unidirectional and woven fabric glass/epoxy composites under off-axis tensile loading. *Polym Test* 2017;58:142–52. doi:10.1016/j.polymertesting.2016.12.023.
- [9] Frey M, Brunner AJ. Assessing glass-fiber modification developments by comparison of glass-fiber epoxy composites with reference materials: Some thoughts on relevance. *Proc Inst Mech Eng Part J Mater Des Appl* 2017;231:49–54. doi:10.1177/1464420716664199.
- [10] Huda MS, Drzal LT, Mohanty AK, Misra M. Effect of chemical modifications of the pineapple leaf fiber surfaces on the interfacial and mechanical properties of laminated biocomposites. *Compos Interfaces* 2008;15:169–91. doi:10.1163/156855408783810920.

- [11] Kuzmin KL, Timoshkin IA, Gutnikov SI, Zhukovskaya ES, Lipatov YV, Lazoryak BI. Effect of silane/nano-silica on the mechanical properties of basalt fiber reinforced epoxy composites. *Compos Interfaces* 2017;24:13–34. doi:10.1080/09276440.2016.1182408.
- [12] Jiang J, Yao X, Xu C, Su Y, Zhou L, Deng C. Influence of electrochemical oxidation of carbon fiber on the mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide/epoxy composites. *Compos Part Appl Sci Manuf* 2017;95:248–56. doi:10.1016/j.compositesa.2017.02.004.
- [13] Xu H, Tong X, Zhang Y, Li Q, Lu W. Mechanical and electrical properties of laminated composites containing continuous carbon nanotube film interleaves. *Compos Sci Technol* 2016;127:113–8. doi:10.1016/j.compscitech.2016.02.032.
- [14] Eskizeybek V, Avcı A, Gülce A. Preparation and mechanical properties of carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composites. *Adv Compos Mater* 2017;26:169–80. doi:10.1080/09243046.2015.1052188.
- [15] Heshmati M, Astinchap B, Heshmati M, Yas MH, Amini Y. An integrated numerical–experimental study on the optimum utilization of carbon nanotubes in laminated composites. *J Sandw Struct Mater* 2017;19:231–58. doi:10.1177/1099636215615872.
- [16] Teja MS, Ramana MV, Sriramulu D, Rao CJ. Experimental Investigation of Mechanical and Thermal properties of sisal fibre reinforced composite and effect of sic filler material. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2016;149:012095. doi:10.1088/1757-899X/149/1/012095.
- [17] Bajracharya RM, Manalo AC, Karunasena W, Lau K. Durability characteristics and property prediction of glass fibre reinforced mixed plastics composites. *Compos Part B Eng* 2017;116:16–29. doi:10.1016/j.compositesb.2017.02.027.
- [18] Boubakri A, Haddar N, Elleuch K, Bienvenu Y. Impact of aging conditions on mechanical properties of thermoplastic polyurethane. *Mater Des* 2010;31:4194–201. doi:10.1016/j.matdes.2010.04.023.
- [19] Fang Y, Wang K, Hui D, Xu F, Liu W, Yang S, et al. Monitoring of seawater immersion degradation in glass fibre reinforced polymer composites using quantum dots. *Compos Part B Eng* 2017;112:93–102. doi:10.1016/j.compositesb.2016.12.043.
- [20] Hristozov D, Wroblewski L, Sadeghian P. Long-term tensile properties of natural fibre-reinforced polymer composites: Comparison of flax and glass fibres. *Compos Part B Eng* 2016;95:82–95. doi:10.1016/j.compositesb.2016.03.079.

- [21] Cordeiro GC, Vieira JD, C6 CM. Tensile properties and color and mass variations of GFPR composites under alkaline and ultraviolet exposures. *Mat6r Rio Jan* 2016;21:1–10. doi:10.1590/S1517-707620160001.0001.
- [22] Feng P, Wang J, Wang Y, Loughery D, Niu D. Effects of corrosive environments on properties of pultruded GFRP plates. *Compos Part B Eng* 2014;67:427–33. doi:10.1016/j.compositesb.2014.08.021.
- [23] Amaro AM, Reis PNB, Neto MA, Louro C. Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites. *Polym Degrad Stab* 2013;98:853–62. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2012.12.029.
- [24] Khashaba UA. Fatigue and reliability analysis of unidirectional GFRP composites under rotating bending loads. *J Compos Mater* 2003;37:317–331.
- [25] Khashaba UA, Selmy AI, El-Sonbaty IA, Megahed M. Behavior of notched and unnotched [0/±30/±60/90]s GFR/EPOXY composites under static and fatigue loads. *Compos Struct* 2007;81:606–13. doi:10.1016/j.compstruct.2006.11.005.
- [26] Sakin R, Ay İ. Statistical analysis of bending fatigue life data using Weibull distribution in glass-fiber reinforced polyester composites. *Mater Des* 2008;29:1170–81. doi:10.1016/j.matdes.2007.05.005.
- [27] Borrego LP, Costa JDM, Ferreira JAM, Silva H. Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composites enhanced with nanoparticles. *Compos Part B Eng* 2014;62:65–72. doi:10.1016/j.compositesb.2014.02.016.
- [28] Ferreira JM, Pires JTB, Costa JD, Zhang ZY, Errajhi OA, Richardson M. Fatigue damage analysis of aluminized glass fiber composites. *Mater Sci Eng A* 2005;407:1–6. doi:10.1016/j.msea.2005.07.009.
- [29] Bedi R, Chandra R. Fatigue-life distributions and failure probability for glass-fiber reinforced polymeric composites. *Compos Sci Technol* 2009;69:1381–7. doi:10.1016/j.compscitech.2008.09.016.
- [30] Koricho EG, Belingardi G, Beyene AT. Bending fatigue behavior of twill fabric E-glass/epoxy composite. *Compos Struct* 2014;111:169–78. doi:10.1016/j.compstruct.2013.12.032.
- [31] Manjunatha CM, Taylor AC, Kinloch AJ, Sprenger S. The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite. *Compos Sci Technol* 2010;70:193–9. doi:10.1016/j.compscitech.2009.10.012.

- [32] Daggumati S, De Baere I, Van Paepegem W, Degrieck J, Xu J, Lomov SV, et al. Fatigue and post-fatigue stress–strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite. *Compos Sci Technol* 2013;74:20–7. doi:10.1016/j.compscitech.2012.09.012.
- [33] Khan SU, Munir A, Hussain R, Kim J-K. Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites containing nanoclay. *Compos Sci Technol* 2010;70:2077–85. doi:10.1016/j.compscitech.2010.08.004.
- [34] Wang W, Wu S, Dai H. Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading. *Mater Sci Eng A* 2006;434:347–51. doi:10.1016/j.msea.2006.07.080.
- [35] Makeev A. Interlaminar shear fatigue behavior of glass/epoxy and carbon/epoxy composites. *Compos Sci Technol* 2013;80:93–100. doi:10.1016/j.compscitech.2013.03.013.
- [36] Belingardi G, Cavatorta MP, Frasca C. Bending fatigue behavior of glass–carbon/epoxy hybrid composites. *Compos Sci Technol* 2006;66:222–32. doi:10.1016/j.compscitech.2005.04.031.
- [37] Burks B, Middleton J, Kumosa M. Micromechanics modeling of fatigue failure mechanisms in a hybrid polymer matrix composite. *Compos Sci Technol* 2012;72:1863–9. doi:10.1016/j.compscitech.2012.07.017.
- [38] Dai G, Mishnaevsky L. Fatigue of hybrid glass/carbon composites: 3D computational studies. *Compos Sci Technol* 2014;94:71–9. doi:10.1016/j.compscitech.2014.01.014.
- [39] Kar NK, Hu Y, Barjasteh E, Nutt SR. Tension–tension fatigue of hybrid composite rods. *Compos Part B Eng* 2012;43:2115–24. doi:10.1016/j.compositesb.2012.03.006.
- [40] Khalid YA, Mutasher SA, Sahari BB, Hamouda AMS. Bending fatigue behavior of hybrid aluminum/composite drive shafts. *Mater Des* 2007;28:329–34. doi:10.1016/j.matdes.2005.05.021.
- [41] Murri G, Schaff J. Fatigue life methodology for tapered hybrid composite flexbeams. *Compos Sci Technol* 2006;66:499–508. doi:10.1016/j.compscitech.2005.06.010.
- [42] Lee S-H, Noguchi H, Cheong S-K. Tensile properties and fatigue characteristics of hybrid composites with non-woven carbon tissue. *Int J Fatigue* 2002;24:397–405.
- [43] Shan Y, Liao K. Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass–carbon/epoxy hybrid composites. *Int J Fatigue* 2002;24:847–859.



- [44] Belingardi G, Cavatorta M. Bending fatigue stiffness and strength degradation in carbon–glass/epoxy hybrid laminates: Cross-ply vs. angle-ply specimens. *Int J Fatigue* 2006;28:815–25. doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.11.009.
- [45] Burianek DA, Spearing SM. Fatigue damage in titanium-graphite hybrid laminates. *Compos Sci Technol* 2002;62:607–617.
- [46] Wu Z, Wang X, Iwashita K, Sasaki T, Hamaguchi Y. Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets. *Compos Part B Eng* 2010;41:396–402. doi:10.1016/j.compositesb.2010.02.001.
- [47] El-Galy IM, Ahmed MH, Bassiouny BI. Characterization of functionally graded Al-SiC p metal matrix composites manufactured by centrifugal casting. *Alex Eng J* 2017. doi:10.1016/j.aej.2017.03.009.
- [48] Chelliah NM, Singh H, Surappa MK. Microstructural evolution and strengthening behavior in in-situ magnesium matrix composites fabricated by solidification processing. *Mater Chem Phys* 2017;194:65–76. doi:10.1016/j.matchemphys.2017.03.025.
- [49] Chung DDL. Processing-structure-property relationships of continuous carbon fiber polymer-matrix composites. *Mater Sci Eng R Rep* 2017;113:1–29. doi:10.1016/j.mser.2017.01.002.
- [50] Eker A. *Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri* 2008.
- [51] Eker A. *Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretimleri* 2008.
- [52] Bulut M. *Türkiyede Kompozit Malzeme Üretimi Ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [53] Schütz W. A history of fatigue. *Eng Fract Mech* 1996;54:263–300.
- [54] Rankine WJM. On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles; and on the mean of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. *J Frankl Inst* 1843;36:178–180.
- [55] Ünal E. *Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmiş AISI 4340 Çeliği ile Paslanmaz Çeliklerin Yorulma Dayanımlarının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [56] Harris B. *Fatigue in composites Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. vol. First Edition. North America: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC; 2013.

- [57] Zhang P, Qu S, Duan QQ, Wu SD, Li SX, Wang ZG, et al. Low-cycle fatigue-cracking mechanisms in fcc crystalline materials. *Philos Mag* 2011;91:229–49. doi:10.1080/14786435.2010.518169.
- [58] Kumru, Nurcan. Etial-141, 145 Ve 160 Tipi Dokum Alüminyum İle Plaka Tipi Alüminyum Malzemeler İçin Yorulma Makinası Tasarımı Ve Eğilmeli Yorulma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [59] Sakin R. Bilgisayar Destekli Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı ve Cam Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
- [60] Nonaka I, Setowaki S, Ichikawa Y. Effect of load frequency on high cycle fatigue strength of bullet train axle steel. *Int J Fatigue* 2014;60:43–7. doi:10.1016/j.ijfatigue.2013.08.020.
- [61] Guennec B, Ueno A, Sakai T. Effect of loading frequency in fatigue properties and micro-plasticity behavior of JIS S15C low carbon steel. *ICF13*, 2013.
- [62] Mann T. The influence of mean stress on fatigue crack propagation in aluminium alloys. *Int J Fatigue* 2007;29:1393–401. doi:10.1016/j.ijfatigue.2006.11.010.
- [63] Balda M. Identification of low cycle fatigue parameters. *Appl Comput Mech* 2010;3.
- [64] Akarsu C. Ticari Bir Kamyon Şasisine Bağlı Parçaların Titreşim Kaynaklı Yorulma Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [65] Coffin LF. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal 1954;76:931–50.
- [66] Manson SS. Behavior of materials under conditions of thermal stress. Cleveland, Ohio: National Advisory Committee for Aeronautics; 1954.
- [67] Morrow J. Fatigue Design Handbook Advances in Engineering. Soc. Automot. Eng., vol. 4, 1968: n.d., p. 22–39.
- [68] Manson SS, Halford GR. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. *Int J Fract* 1981;17:169–192.
- [69] Vassilopoulos AP, Keller T. Fatigue of Fiber-reinforced Composites. London: Springer London; 2011. doi:10.1007/978-1-84996-181-3.

- [70] Chou PC, Croman R. Degradation and sudden-death models of fatigue of graphite/epoxy composites. vol. 674, ASTM International: 1979, p. 431–454.
- [71] Yan L, Chou N, Yuan X. Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. *J Reinf Plast Compos* 2012;31:425–37. doi:10.1177/0731684412439494.
- [72] Kumar MS, Raghavendra K, Venkataswamy MA, Ramachandra HV. Fractographic analysis of tensile failures of aerospace grade composites. *Mater Res* 2012;15:990–997.
- [73] Megel M, Kumosa L, Ely T, Armentrout D, Kumosa M. Initiation of stress-corrosion cracking in unidirectional glass/polymer composite materials. *Compos Sci Technol* 2001;61:231–246.
- [74] Botelho EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Mater Res* 2006;9:247–256.
- [75] Sendekyj GP. Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials. *Fatigue Compos. Mater.*, Amsterdam: Elsevier; 1991, p. 431–83.
- [76] Hwang W, Han KS. Fatigue of Composites--Fatigue Modulus Concept and Life Prediction. *J Compos Mater* 1986;20:154–65. doi:10.1177/002199838602000203.
- [77] Schaff JR, Davidson BD. Life Prediction Methodology for Composite Structures. Part I--Constant Amplitude and Two-Stress Level Fatigue. *J Compos Mater* 1997;31:128–57. doi:10.1177/002199839703100202.
- [78] Mokhtarnia B, Layeghi M, Rasouli SH, Soltangheis B. Development of a New Device for Bending Fatigue Testing. *J Test Eval* 2016;44:20140347. doi:10.1520/JTE20140347.
- [79] Ben Zineb T, Sedrakian A, Billoet JL. An original pure bending device with large displacements and rotations for static and fatigue tests of composite structures. *Compos Part B Eng* 2003;34:447–58. doi:10.1016/S1359-8368(03)00017-9.
- [80] Kolluri M, Thissen MHL, Hoefnagels JPM, Dommelen JAW, Geers MGD. In-situ characterization of interface delamination by a new miniature mixed mode bending setup. *Int J Fract* 2009;158:183–95. doi:10.1007/s10704-009-9356-1.
- [81] Hoefnagels JPM, Kolluri N, Thissen MHL, van Dommelen JAW, Geers MGD. Advanced miniature mixed mode bending setup for in-situ interface delamination characterization. *Proc. 11th Int. Congr. Exhib. Exp. Appl. Mech.*, vol. 2, 2008, p. 5.

- [82] George T. Development of a novel vibration-based fatigue testing methodology. *Int J Fatigue* 2004;26:477–86. doi:10.1016/j.ijfatigue.2003.10.012.
- [83] Yun GJ, Abdullah ABM, Binienda W. Development of a Closed-Loop High-Cycle Resonant Fatigue Testing System. *Exp Mech* 2012;52:275–88. doi:10.1007/s11340-011-9486-z.
- [84] Foong C-H, Wiercigroch M, Deans WF. Novel dynamic fatigue-testing device: design and measurements. *Meas Sci Technol* 2006;17:2218–26. doi:10.1088/0957-0233/17/8/023.
- [85] Xue H-Q, Hua TAO, Shao R-P, Claude B. Effect of stress ratio on long life fatigue behavior of Ti-Al alloy under flexural loading. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2008;18:499–505.
- [86] Stanzl-Tschegg S. Very high cycle fatigue measuring techniques. *Int J Fatigue* 2014;60:2–17. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.016.
- [87] Lai F-M, Yang S-H, Wu J-H, Hsueh C-T, Yang C-C, Wang B-H, et al. Development of Fatigue Test System for Small Composite Wind Turbine Blades. *Procedia Eng* 2011;14:2003–13. doi:10.1016/j.proeng.2011.07.252.
- [88] Ghielmetti C, Ghelichi R, Guagliano M, Ripamonti F, Vezzù S. Development of a fatigue test machine for high frequency applications. *Procedia Eng* 2011;10:2892–7. doi:10.1016/j.proeng.2011.04.480.
- [89] Di Benedetto H, De La Roche C, Baaj H, Pronk A, Lundström R. Fatigue of bituminous mixtures. *Mater Struct* 2004;37:202–216.
- [90] Ay İ, Sakin R, Okoldan G. An improved design of apparatus for multi-specimen bending fatigue and fatigue behaviour for laminated composites. *Mater Des* 2008;29:397–402. doi:10.1016/j.matdes.2007.01.017.
- [91] Sakin R, Ay İ, Yaman R. An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials. *Mater Des* 2008;29:212–7. doi:10.1016/j.matdes.2006.11.006.
- [92] Waring G, Hofer KE, Brown I, Trabocco RE. Design and operation of multi-specimen fully reversed fatigue systems for advanced composite materials. *Exp Mech* 1980;20:153–161.
- [93] Sakin R. Fatigue-life estimation and material selection for commercial-purity aluminum sheets. *Res Eng Struct Mater* 2016. doi:10.17515/resm2015.30me1205.

- [94] Sakin, Raif, Kumru, Nurcan, Ay, İrfan. GERİLME-KONTROLLÜ, ÇOK NUMUNELİ EĞİLME YORULMA TEST CİHAZI TASARIMI VE KOMPOZİTLER İÇİN UYGULAMA. Proc 12th Int Mater Symp 2008:531–41.
- [95] Wu JD, Ho SH, Zheng PJ, Liao CC, Hung SC. An experimental study of failure and fatigue life of a stacked CSP subjected to cyclic bending. Electron. Compon. Technol. Conf. 2001 Proc. 51st, IEEE; 2001, p. 1081–1086.
- [96] Filatov MY. A machine for fatigue testing of composite materials in pure bending. Strength Mater 1989;21:554–556.
- [97] Di Franco G, Marannano G, Pasta A, Mariotti GV. Design and use of a fatigue test machine in plane bending for composite specimens and bonded joints. Adv. Compos. Mater.-Ecodesign Anal., InTech; 2011.
- [98] Bura V, Dvr P. Testing The Flexural Fatigue Behavior Of E-Glass Epoxy Laminates 2014.
- [99] Babu BS, Srinivas P. Measurement Of Shear Fatigue Strength Of Fiber Glass Epoxy Laminates & Carbon Chapstan Laminates Using Fatigue Test Rig. Measurement 2014;4.
- [100] Azzam A, Li W. An experimental investigation on the three-point bending behavior of composite laminate. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 2014;62:012016. doi:10.1088/1757-899X/62/1/012016.
- [101] Mini KM, Lakshmanan M, Mathew L, Mukundan M. Effect of fibre volume fraction on fatigue behaviour of glass fibre reinforced composite: VOLUME FRACTION ON FATIGUE OF GFRP. Fatigue Fract Eng Mater Struct 2012;35:1160–6. doi:10.1111/j.1460-2695.2012.01709.x.
- [102] Abo-Elkhier M, Hamada AA, Bahei El-Deen A. Prediction of fatigue life of glass fiber reinforced polyester composites using modal testing. Int J Fatigue 2014;69:28–35. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.10.002.
- [103] Yamamoto T, Kokubu A, Sakai T. Development and several additional performances of dual spindle rotating bending fatigue testing machine GIGA QUAD. ICF13, 2013.
- [104] Pach E, Korin I, Ipiña JP. Simple Fatigue Testing Machine for Fiber-Reinforced Polymer Composite. Exp Tech 2012;36:76–82. doi:10.1111/j.1747-1567.2011.00713.x.
- [105] Shokrieh MM, Esmkhanian M, Taheri-Behrooz F. Fatigue modeling of chopped strand mat/epoxy composites. Struct Eng Mech 2014;50:231–40. doi:10.12989/sem.2014.50.2.231.

- [106] Degallaix G, Hassaïni D, Vittecoq E. Cyclic shearing behaviour of a unidirectional glass/epoxy composite. *Int J Fatigue* 2002;24:319–326.
- [107] Philippidis TP, Vassilopoulos AP. Complex stress state effect on fatigue life of GRP laminates.: part I, experimental. *Int J Fatigue* 2002;24:813–823.
- [108] Roudet F. Fatigue of glass/epoxy composite in three-point-bending with predominant shearing. *Int J Fatigue* 2002;24:327–37. doi:10.1016/S0142-1123(01)00088-3.
- [109] ASTM D7264/D7264M – 07. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International: 2015.
- [110] ASTM D671-93. Standard Test Method for Flexural Fatigue of Plastics by Constant-Amplitude-of- Force 1993.
- [111] Selmy AI, Azab NA, Abd El-baky MA. Flexural fatigue characteristics of two different types of glass fiber/epoxy polymeric composite laminates with statistical analysis. *Compos Part B Eng* 2013;45:518–27. doi:10.1016/j.compositesb.2012.08.017.
- [112] Zaman W, Li K, Li W, Zaman H, Ali K. Flexural strength and thermal expansion of 4D carbon/carbon composites after flexural fatigue loading. *New Carbon Mater* 2014;29:169–75. doi:10.1016/S1872-5805(14)60132-3.
- [113] Van Paepegem W, Degrieck J. A new coupled approach of residual stiffness and strength for fatigue of fibre-reinforced composites. *Int J Fatigue* 2002;24:747–762.
- [114] Sakin R. Relationship between Barcol hardness and flexural modulus degradation of composite sheets subjected to flexural fatigue. *Steel Compos Struct* 2015;19:1531–48. doi:10.12989/scs.2015.19.6.1531.
- [115] Bohuslav M. Technical approach to glass. Elsevier Science Pub. Co: 1990.
- [116] 3K A-38 TECHNICAL DATA SHEET 2017. <http://www.dowaksa.com/wp-content/uploads/2016/03/3K-A-38.pdf>.
- [117] DURATEK DTE1000 DTS1100 Epoksi Resin.pdf 2017. [https://company.metstrade.com/Image/Download?docid=33531&dl=MIJNRAI\\_TOP\\_LIBRARY&ltc=MIJNRAI\\_LOGIN\\_PRIVATEFILE](https://company.metstrade.com/Image/Download?docid=33531&dl=MIJNRAI_TOP_LIBRARY&ltc=MIJNRAI_LOGIN_PRIVATEFILE).
- [118] ASTM I. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. PA 19428-2959, United States: ASTM International; 2008.
- [119] ASTM I. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. Pennsylvania 19428-2959, United States: ASTM International; 2003.

- [120] Arasan Ş, Aktaş M, Balcioğlu HE. Fracture toughness of woven glass and carbon reinforced hybrid and non-hybrid composite plates. *Polym Compos* 2016;n/a-n/a. doi:10.1002/pc.23999.
- [121] Balcioğlu HE, Aktaş M. An investigation on lateral buckling of laminated composites with delamination 2013.
- [122] Daniel MI, Ishai O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. vol. Second Edition. Oxford University Press; 2006.
- [123] Kaman MO. Effect of fiber orientation on fracture toughness of laminated composite plates  $[0^\circ/\theta^\circ]_s$ . *Eng Fract Mech* 2011;78:2521–34. doi:10.1016/j.engfracmech.2011.06.005.
- [124] Kaman MO. Stress Intensity Factor Analysis of Antisymmetrically Carbon/Epoxy Laminated Composite Plates with Different Orientations. *Turk J Sci Technol* 2011;6.
- [125] Neubert H, Schulte K, Harig H. Evaluation of the fatigue behavior by monitoring continuously temperature development in CFRP-laminates. *ASTM-STP* 1990;1059:435–53.
- [126] Vavouliotis A, Paipetis A, Kostopoulos V. On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the electrical resistance change method. *Compos Sci Technol* 2011;71:630–642.
- [127] Abry JC, Choi YK, Chateauminos A, Dalloz B, Giraud G, Salvia M. In-situ monitoring of damage in CFPR laminates by means of AC and DC measurements. *Compos Sci Technol* 2001;61:855–64.
- [128] Weber I, Schwartz P. Monitoring bending fatigue in carbon-fibre/epoxy composite strands: a comparison between mechanical and resistance techniques. *Compos Sci Technol* 2001;61:849–853.
- [129] Allah MA, Abdin EM, Selmy AI, Khashaba UA. Effect of mean stress on fatigue behaviour of GFRP pultruded rod composites. *Compos Part Appl Sci Manuf* 1997;28:87–91.
- [130] Catangiu A, Dumitrescu AT, Ungureanu D. Experimental Results For Bending Fatigue Behaviour Of Glass-Epoxy Composite Materials. *Sci Bull Valahia Univ Mater Mech* 2011;6:47–51.

- [131] Van Paepegem W, Degrieck J. Simulating in-plane fatigue damage in woven glass fibre-reinforced composites subject to fully reversed cyclic loading. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 2004;27:1197–1208.
- [132] Liu Z, Li P, Srikanth N, Liu T, Chai GB. Quantification of flexural fatigue life and 3D damage in carbon fibre reinforced polymer laminates. *Compos Part Appl Sci Manuf* 2016;90:778–85. doi:10.1016/j.compositesa.2016.09.008.
- [133] Selmy AI, Azab NA, Abd El-baky MA. Flexural fatigue characteristics of two different types of glass fiber/epoxy polymeric composite laminates with statistical analysis. *Compos Part B Eng* 2013;45:518–27. doi:10.1016/j.compositesb.2012.08.017.

