

T.C.  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TABAKALI KOMPOZİTLERDE FİBER AÇILARININ  
YORULMA DAYANIMINA ETKİSİ

10293848

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZLEM DURMUŞ

BOLU, EYLÜL – 2019

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Özlem Durmuş** tarafından hazırlanan “**Tabakalı Kompozitlerde Fiber Açılarının Yorulma Dayanımına Etkisi**” adlı tez çalışması 16/09/2019 tarihinde **BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'NDA** Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

Danışman  
Prof. Dr. Murat PAKDİL  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

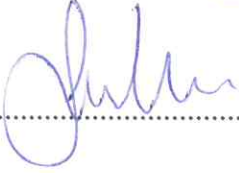
Üye  
Doç. Dr. Gürcan YILDIRIM  
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DAL  
Sakarya Üniversitesi

### İmza

  
.....

  
.....

  
.....

Prof. Dr. Ömer ÖZYURT

  
.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



**Hayatıma dokunan herkese,**

## ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

1. Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
2. Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
3. Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
4. Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
5. Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

  
**Ozlem DURMUŞ**

## ÖZET

**TABAKALI KOMPOZİTLERDE FİBER AÇILARININ YORULMA  
DAYANIMINA ETKİSİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÖZLEM DURMUŞ  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT PAKDİL)**

**BOLU, EYLÜL-2019**

Bu çalışmada 8 tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak cam-elyaf kullanılırken, matris malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır.  $[0^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip ve  $[90^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip çentikli ve çentiksiz numuneler üzerinde deneyler yapıldı. Deneysel çalışmada çekme gerilmesi altındaki yorulma analizleri yapılmıştır. Deneylerin ardından numuneler ANSYS programında modellenmiş ve yorulma analizi yapılmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerde; tabaka dizilim açılarının ve çentiğin yorulma dayanımına etkileri gözlenmiştir. ANSYS programı ile yapılan analizler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak sonuçlar arasındaki tutarlılıklar incelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Kompozit Malzeme, Tabakalı Kompozit Malzeme, Yorulma, Fiber Açısı, Sonlu Elemanlar Metodu.

## **ABSTRACT**

**EFFECT OF FIBER ANGLES ON FATIGUE STRENGTH OF  
LAMINATED COMPOSITES  
MSC THESIS  
ÖZLEM DURMUŞ  
BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. MURAT PAKDİL)**

**BOLU, SEPTEMBER–2019**

In this study, 8-layered composite material was used. Fiber-glass was used as the reinforcing element and epoxy was used as the matrix material. Experiments were performed on notched and notched samples having  $[0^{\circ}]_8$  fiber array and  $[90^{\circ}]_8$  fiber array. In the experimental study, fatigue analysis under tensile stress was performed. After the experiments, the samples were modeled in ANSYS program and fatigue analysis was performed. In layered composite materials; The effects of layer arrangement angles and notch on fatigue strength was observed. ANSYS program was compared with the results of the analyzes and the consistency between the results were examined.

**KEYWORDS :** Composite Material, Laminated Composite Material Fatigue, Fibre Angles, Finite Element Method.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ .....	ix
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ .....	xiii
TEŞEKKÜR .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER .....	2
2.1 Tarihçe .....	2
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları .....	4
2.2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	5
2.2.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları .....	7
2.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	8
2.4 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri.....	9
2.4.1 Matris Malzemeleri .....	9
2.4.1.1 Metal Matrisler .....	10
2.4.1.2 Seramik Matrisler .....	10
2.4.1.3 Polimer Matrisler .....	11
2.4.2 Takviye Elemanları .....	12
2.4.2.1 Cam Elyafar.....	13
2.4.2.2 Bor Elyafar .....	15
2.4.2.3 Silisyum Karbür Elyafar.....	15
2.4.2.4 Alumina Elyafar .....	15
2.4.2.5 Grafit (Karbon) Elyafar .....	16
2.4.2.6 Kevlar (Aramid) Elyafar .....	16
2.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	18
2.5.1 Yapılarını Oluşturan Malzemeye Göre .....	18
2.5.1.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler .....	19
2.5.1.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	19
2.5.1.3 Tabakalı Kompozitler.....	20
2.5.1.4 Hibrit (Karma) Kompozitler .....	21
2.5.2 Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre.....	21
2.5.2.1 Polimer Kompozitler .....	22
2.5.2.2 Metal Kompozitler .....	22
2.5.2.3 Seramik Kompozitler .....	22
2.6 Tabakalı Kompozitler .....	23

2.6.1 Tabakalı Kompozit Malzemenin Üretiminde Kullanılan Malzeme ve Tabakalı Kompozit Malzemeler .....	23
2.6.1.1 Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler .....	24
2.6.1.2 Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	24
2.6.1.3 Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler .....	25
2.6.1.4 Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler .....	25
2.6.1.5 Tabakalı Lifli Kompozit Malzeme .....	25
2.6.1.6 Diğer Tabakalı Kompozit Malzemeler .....	26
2.6.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Adlandırılması .....	26
3. YORULMA.....	27
3.1 Giriş.....	27
3.2 Yorulma Testi.....	29
3.2.1 Yorulma Dayanımına Ortalama Gerilmenin Etkisi .....	31
3.2.2 Kapalı Döngü Yorulma Testi.....	31
3.2.3 Gerilme – Çevrim Sayısı (S/N) Eğrisi (Wöhler) .....	32
3.3 Kompozitlerde Yorulma .....	32
3.3.1 Kompozitlerde Yorulma Modları .....	34
3.3.2 Kompozitlerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler .....	37
3.3.2.1 Fiber Özelliğinin Etkileri.....	37
3.3.2.3 Yönelme Etkileri .....	38
3.3.2.2 Matris Özelliğinin Etkileri .....	39
3.3.2.4 Fiber Hacminin Etkileri .....	40
3.3.2.5 Tabaka Ayrılmasının (Delaminasyon) Etkileri.....	40
3.4 Yorulma Deneyleri .....	41
3.4.1 Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	42
3.4.2 Eğilme Gerilmeli Yorulma Deneyi .....	43
3.4.3 Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi .....	43
3.4.4 Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi.....	43
3.5 Yorulma Hasarı Oluşumu .....	43
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (MATERYAL VE YÖNTEM).....	45
4.1 Numunelerin Hazırlanması .....	45
4.2 Yorulma Deneylerinin Yapılması.....	53
4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analiz Yapılması.....	59
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	65
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	72
7. KAYNAKLAR .....	73
8. ÖZGEÇMİŞ .....	76



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Kompozit Malzeme – Zaman Skalası (Zaman skalası doğrusal değildir) (Beşergil, 2016).....	3
Şekil 2.2. Yıllara Göre Malzemelerin Dayanım / Yoğunluk Oranlarının Gelişimi (Ateş, 2002).....	4
Şekil 2.3. Kompozit Malzemeler (Bulut, 2014).....	9
Şekil 2.4. Fiber ve matrislerin çekme gerilmesi-uzama diyagramı (Ünal, 2004). .....	17
Şekil 2.5. Yapılarını Oluşturan Malzemeye Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (Ünal, 2004).....	18
Şekil 2.6. Tabakalı Kompozit Malzemelerin İç Yapılarının Sembolik Gösterimi (a) İzotropik (b) Ortotropik yapı (Şahin, 2006).....	20
Şekil 2.7. Kompozitlerin Yapı Bileşenlerine Göre Sınıflandırılması (Şahin, 2011). .....	21
Şekil 3.1. Yorulma olayını etkileyen faktörler (Sakin, 2004).....	28
Şekil 3.2. Yorulma Testi İçin Kullanılan Sinüzoidal Yüklemenin ve Diğer Parametrelerin Şematik Gösterimi (Aydın, 2018).....	30
Şekil 3.3. Belirtilen Malzemelerdeki Uygulanan En Yüksek Gerilim Sayısına Karşılık Gelen Çökme Çevrim Sayıları Eğrileri (Beşergil, 2016) .	33
Şekil 3.4. Değişik Kompozit Yorulma Hasar Biçimleri İçin S/N Diyagramı (M. Günaydın, 2003).....	35
Şekil 3.5. Kompozit Malzemelerdeki Yorulma Hasarı Boyunca Çatlak Yayılması Olayları (Sakin, 2004). ....	36
Şekil 3.6. Ara Tabaka Vasıtasıyla Çatlak Yayılması (Sakin, 2004). ....	37
Şekil 3.7. Fiber Tipinin Kompozit Malzemenin Yorulma Dayanımına Etkisi.	38
Şekil 3.8. Değişik Matrisli Malzemelerin Gerilme ve Ömür Eğrileri (Aydın, 2018).....	39
Şekil 3.9. Kompozit Malzemelerin Yorulmasında Fiber Hacminin (Oranınin) Etkisi (Aydın, 2018).....	40
Şekil 3.10. Başlangıç delaminasyonunun gösterimi (Aydın, 2018).....	41
Şekil 3.11. İntralayer Delaminasyonun Gösterimi (Aydın, 2018). ....	41
Şekil 3.12. Yorulma Deneylerinde Kullanılan Çevrimsel Yükleme Tipleri(Aydın, 2018).....	42
Şekil 3.13. Çeşitli Malzemelerin Hasar Oranı-Çevrim Sayısı Oranları ve Karşılaştırılması (Aydın, 2018).....	44
Şekil 4.1. Çentikli Numunenin Ölçüleri.....	45
Şekil 4.2. Çentiksiz Numunenin Ölçüleri .....	46
Şekil 4.3. G kodları (Çentikli numunenin).....	47
Şekil 4.4. Numunelerin Çıkarılması İçin Kullanılan Aşındırıcılı Su Jeti (Streamline SL-V 50S Classic ) .....	48

<b>Şekil 4.5.</b> Numunelerin Dayamalar Yardımıyla Gönyelenmesi ve Sabit Konuma Getirilmesi.....	48
<b>Şekil 4.6.</b> Numuneler Arasındaki Offset değerlerinin Ayarlanması .....	49
<b>Şekil 4.7.</b> Kesilen Örnek Numunelerde Ölçü Kontrollerinin Yapılması.....	49
<b>Şekil 4.8.</b> Aşındırıcılı Su Jetinde Kullanılan Kumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	51
<b>Şekil 4.9.</b> Kumun Mikroskop Altındaki Görüntüsü (12X büyütülmüş görüntü).51	
<b>Şekil 4.10.</b> Aşındırıcılı Su Jeti ile Numunelerin Kesilmesi.....	52
<b>Şekil 4.11.</b> Çıkarılan Numuneler.....	52
<b>Şekil 4.12.</b> Çıkarılan Numunelerin Gösterimi (a: Çentikli Numune b: Çentiksiz Numune).....	53
<b>Şekil 4.13.</b> Numunenin Hazırlanması. ....	54
<b>Şekil 4.14.</b> Yorulma Cihazı .....	54
<b>Şekil 4.15.</b> Numunenin Yorulma Cihazına Bağlanması .....	55
<b>Şekil 4.16.</b> Test Kontrol Paneli. ....	56
<b>Şekil 4.17.</b> Makine Kontrol Paneli ve Düğmelerin Gösterimi. ....	56
<b>Şekil 4.18.</b> Cihaz Üzerinde Test Standartının Seçilmesi.....	57
<b>Şekil 4.19.</b> Deneyde Kullanılacak Olan Parametrelerin Girildiği Ekran. ....	58
<b>Şekil 4.20.</b> Deney Sonucu İzleme Ekranı.....	58
<b>Şekil 4.21.</b> Numunenin CAD modelinin oluşturulması. ....	60
<b>Şekil 4.22.</b> Tabakaların ve Fiber Açılarının Girilmesi. ....	60
<b>Şekil 4.23.</b> Numunenin Mesh Özelliklerinin Girilmesi. ....	61
<b>Şekil 4.24.</b> Mesh Yapılmış Modelin Görünümü . ....	62
<b>Şekil 4.25.</b> Modelin Sabitlemesi. ....	62
<b>Şekil 4.26.</b> Modelin Çekme Yüzeyinin Belirlenmesi ve Çekme Gerilmelerinin Girilmesi.....	63
<b>Şekil 4.27.</b> Eşdeğer Gerilmenin Görüntülenmesi.....	64
<b>Şekil 5.1.</b> Yorulma Deneyi Sırasında Çentikte Görülen Hasar (ANSYS). ....	67
<b>Şekil 5.2.</b> Yorulma Deneyi Sırasında Çentikte Başlayan Hasar (Deneysel). 68	
<b>Şekil 5.3.</b> Yorulma Deneyi Sırasında Çentiksiz Numunede Başlayan Hasar (Deneysel). ....	69
<b>Şekil 5.4.</b> $[0^{\circ}]_8$ ve $[90^{\circ}]_8$ Fiber Dizilimine Sahip Çentikli Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a: $[0^{\circ}]_8$ fiber dizilimine sahip çentikli numune b: $[0^{\circ}]_8$ fiber dizilimine sahip çentikli numune) .....	70
<b>Şekil 5.5.</b> $[0^{\circ}]_8$ ve $[90^{\circ}]_8$ Fiber Dizilimine Sahip Çentiksiz Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a: $[0^{\circ}]_8$ fiber dizilimine sahip çentiksiz numune b: $[0^{\circ}]_8$ fiber dizilimine sahip çentiksiz numune) .....	70
<b>Şekil 5.6.</b> $[0^{\circ}]_8$ Fiber Dizilimine Sahip Çentikli ve Çentiksiz Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a: Çentikli Numune b: Çentiksiz Numune) .....	71
<b>Şekil 5.7.</b> $[0^{\circ}]_8$ Fiber Dizilimine Sahip Çentikli ve Çentiksiz Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a: Çentikli Numune b: Çentiksiz Numune) .....	71

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1.</b> Polimer kompozit malzemeler ile yaygın kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Bulut, 2014).....	5
<b>Çizelge 2.2.</b> Kompozitlerin Sektörler Arasındaki Dağılımlarının Global Bazda Dağılımı.....	8
<b>Çizelge 3.1.</b> Yorulma Yük Oranlarına Karşılık Gelen Yorulma Yük Biçimleri (Aydın, 2018). ....	31
<b>Çizelge 3.2.</b> m ve b sabitleri için tipik değerler (Şahin, 2011) . ....	34
<b>Çizelge 4.1.</b> Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özellikleri .....	59

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> Metal, Seramik ve Plastik Matris Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin Kıyaslanması (Aydın, 2018). .....	12
<b>Tablo 2.2.</b> Cam elyafların harf gösterimleri ve karakteristik özellikleri (Okutan, 2009).....	14
<b>Tablo 2.3.</b> Cam elyaf takviyeli malzemelerin özellikleri ve içerikleri (Yapıcı, 2012).....	14
<b>Tablo 2.4.</b> Grafit ve karbon içerikli elyafların kıyaslanması (Ünal, 2004). ....	16
<b>Tablo 3.1.</b> Yorulma Deneyleri Sırasında Oluşan Yüklemelerin Tipleri.....	42
<b>Tablo 4.1.</b> Kesim İçin Kullanılan Parametreler.....	50
<b>Tablo 5.1.</b> $[0^0]_8$ ve $[90^0]_8$ Dizilimlerine Sahip Çentikli ve Çentiksiz Numunelerin Yorulma Ömürlerinin Gösterilmesi ve Gerilme Dayanımlarının Deneysel Sonuçları ile Ansys Modellemesinin Sonuçlarının Kıyaslanması .....	65
<b>Tabl 5.2.</b> $[0^0]_8$ ve $[90^0]_8$ Dizilimlerine Sahip Olan Çentikli Numunelerin Yorulma Ömürlerinin Gösterilmesi ve Gerilme Dayanımlarının Deneysel Sonuçları ile Ansys Modellemesinin Sonuçlarının Kıyaslanması. ....	66

## KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

<b>Ex</b>	: X Ekseni Doğrultusundaki Elastisite Modülü
<b>Ey</b>	: Y Ekseni Doğrultusundaki Elastisite Modülü
<b>Ez</b>	: Z Ekseni Doğrultusundaki Elastisite Modülü
<b>DTKM</b>	: Diğer Tabakalı Kompozit Malzeme



## TEŞEKKÜR

Öncelikle Tez çalıőmam boyunca her türlü yardımda bulunarak yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Murat PAKDİL'e ve değerli hocam Doç. Dr. Gürcan YILDIRIM' a en içten Őükran ve minnetimi sunarım.

Yüksek lisans yaptığım süre boyunca beni destekleyen kıymetli Őirketim YORGLASS' a, değerli müdürlerim Serkan SÜZGEN ve Çağrı CİNT' e, en içten Őükran ve minnetimi sunarım.

Bu süreçte her zaman desteğini hissettiren kıymetli anneme ve her türlü sıkıntıda yardımcı olan çok değerli arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler geleneksel mühendislik malzemeleriyle karşılaştırıldığında, mukavemetlerinin yüksek ve yoğunluklarının düşük olması gibi avantajlarıyla hafifliğin önemli olduğu havacılık sektörü (uzay-uçak sanayi gb.) ve otomotiv sanayideki yerini giderek arttırmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımı bu alanlarla sınırlı değildir aynı zamanda ev aletleri, spor aletleri, iş makinaları, elektrik ve elektronik sanayi, inşaat sektörü ve tarım sektörü gibi birçok alandaki kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Kompozit malzemelerin bu alanlarda kullanılmasının nedenleri; yüksek mukavemet, rijitlik, hafiflik, yüksek korozyon ve aşınma direnci, estetik görünüm, yüksek yorulma dayanımı, kolay şekillendirilebilme, titreşim sönümlleme, ısıl direnç, akustik izolasyon ve elektrik izolasyonu gibi üstün özelliklere sahip olmalarıdır (Şahin, 2006).

Kompozit malzemelerin birçok avantajı olmasına karşın özellikle tabakalı kompozit malzemeleri oluşturan tabakalar arasında mukavemet nispeten düşüktür. Düşük mukavemet gösteren bu alanlarda meydana gelen hasarlar tabakalar arası kırılmaya neden olabilir.

Bu hasarın önüne geçebilmek ve/veya ne zaman oluşabileceğini öngörmek adına malzemenin hasara uğrayacağı gerilimin ve yorulma ömrünün bilinmesi malzeme üzerindeki çentiklerin ne kadar nasıl etkilediğinin bilinmesi son derece önemlidir.

Bu çalışmada hem çentik etkisi hem de fiber dizilim açılarının etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmanın yanı sıra ANSYS ile modellemesi yapılarak karşılaştırılmış ve programın bize ne kadar yaklaşık bir değer verdiği hesaplanmış ve gösterilmiştir.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Teknolojinin hızla gelişmesi, giderek artış gösteren malzeme ihtiyacına sebep olmuştur ancak kaynakların yetersiz hale gelmesiyle hızla gelişen teknolojiye ayak uydurabilecek yeni malzeme arayışı hızla artmış ve giderek önem kazanmıştır (Çelik & Turan, 2015). Dolayısıyla bu durum, birbirinden farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip en az iki farklı malzemenin özel yöntemlerle birleştirilmeleriyle elde edilen kompozit malzemelerin önemini giderek arttırmaktadır.

Günümüzde kullanımı giderek artmakta olan kompozit malzeme, en az iki farklı malzemenin istenen özellikleri sağlayabilecek malzemeyi oluşturmak amacıyla makro seviyede birleştirilmesiyle meydana gelen yeni bir malzemedir (Şahin, 2006). Kısaca, elde edilmek istenilen sonuç bileşenlerinden üstün özellikleri olan yeni bir malzeme elde etmektir.

Kompozit malzemeler, şekil ve/veya kimyasal bileşimleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla makro bileşenin kombinasyonundan oluşan malzemeler şeklinde de tanımlanabilir.

Genellikle kompozit malzemelerde iki özellik istenmektedir, bunlar;

- Şekil ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı, belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki farklı malzemenin birleştirilmiş olması (Okutan, 2009).

- Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin birbirleri ile reaksiyona girmemesi veya alaşım oluşturmaması.

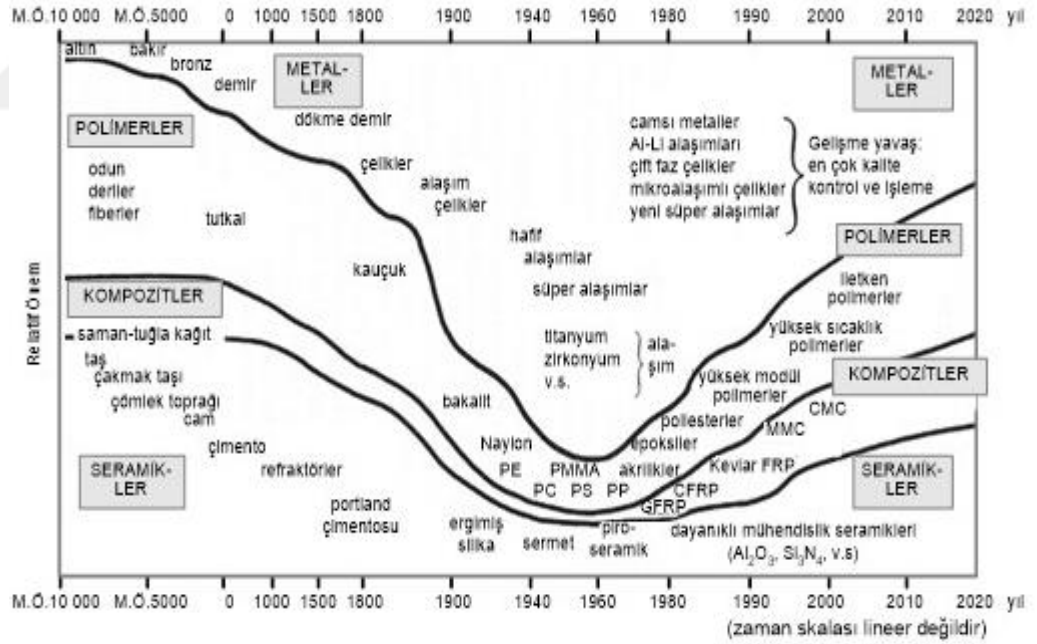
### 2.1 Tarihçe

Kompozitlerin tarihi malzeme tarihi kadar eskidir. Yapılan bazı araştırmalarda ilk takviyeli ve polimerik esaslı malzemelerin Babil'de M.Ö. 4000 ile 2000 yılları arasında kullanıldığına dair kanıtlara rastlandığı belirtilmektedir (Beşergil, 2016).



Bazı araştırmalarda ise M.Ö. 3000 yılından önce: avcılıkta kullanılan yayların kompozit malzemelerden yapıldığına rastlanmaktadır. M.Ö. 2500’lerde ise Mısır’da mumyalama prosesi esnasında kullanılan keten teyplerde kullanıldığına rastlanmıştır ve yine aynı dönemde suni olmayan kauçuk ile yapılan filament sarma işlemi uygulandığına rastlanmıştır. M.Ö. 1000 yıllarına gelindiğinde ise Hindistan ve Çin’de uzun bir dönem lak kullanıldığına ardından M.Ö. 500’lü yıllarda Yunanlıların özel gemilerinin inşasında kullandıklarına rastlanmıştır. Bütün bunlardan anlaşılacağı üzere kompozit malzemelerin tarihinin insanlık tarihi kadar eskidir denilebilir (Beşergil, 2016).

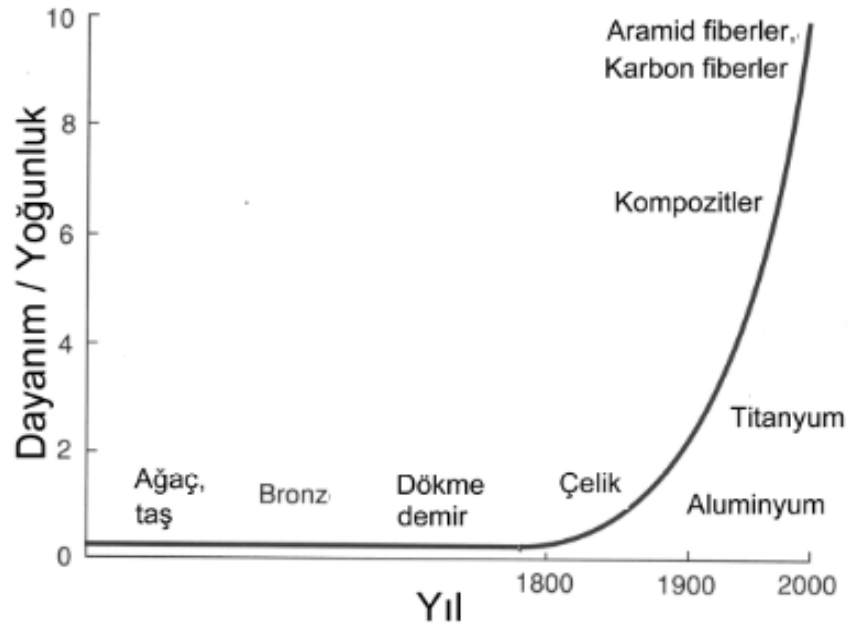
Kompozit malzemelerdeki geliştirme faaliyetleri; havacılığın (uçak, roket, helikopter) gelişmesiyle yüksek mukavemete sahip ve nispeten hafif malzemelere ihtiyacın artmasıyla birlikte 1940’lı yıllardan artış göstermiştir.



Şekil 2.1. Kompozit Malzeme – Zaman Skalası (Zaman skalası doğrusal değildir) (Beşergil, 2016)

Ülkemizde cam elyafların kullanımı 1960 yılında bazı alanlarda (inşaat ve denizcilik gb.) başlamıştır. Anadol' un kaportası da cam elyaf malzemeden imal edilmiştir (Taner, 2006).

Tarih boyunca malzemelerin dayanım / yoğunluk oranlarındaki artış Şekil 2.2.'de açıkça görüleceği üzere 20. yüzyılda kompozit malzemelerin gelişmesiyle dayanım / yoğunluk oranında ivmeli bir artış göstermiştir. Bu da kompozit malzemelerinin havacılık(roket, uçak, helikopter) gibi önemi giderek artan uygulamalardaki ihtiyacını açıkça göstermektedir (Ateş, 2002). Şekil 2.1. ve Şekil 2.2. karşılaştırıldığında dayanım/yoğunluk ve gelişimim artışı birbirini doğrular niteliktedir.



Şekil 2.2. Yıllara Göre Malzemelerin Dayanım / Yoğunluk Oranlarının Gelişimi (Ateş, 2002).

## 2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerdeki gelişim hızla devam etmekte ve avantajlı yönleri giderek iyileşmektedir bunun yanı sıra dezavantajlı yanlarını da ortadan kaldırmak için teorik çalışmalar devam etmektedir. Aşağıda iki başlık altında kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

### 2.2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemeler, mevcutta kullanılan mühendislik malzemelerinden bariz farklılıklara sahiptir. Bu farklılıklar kompozit malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinden gelir.

Kompozit malzemelerin avantajları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Yüksek Mukavemet: Mühendislik malzemeleri için son derece önemli olan çekme ve eğme mukavemet değerleri kompozit malzemelerde yüksek olması sebebiyle diğer malzemelerden daha avantajlı konuma gelmektedir. Kompozitlerin tamamı yerine sadece gerekli bölgelerde gerektiği kadar mukavemet verilebilecek şekilde kalıplanabilir. Bu özellik ise diğer malzemelere karşı maddi rekabette avantaj sağlamaktadır(Bulut, 2014). Tablo2.1.' de polimer kompozit malzemelerin yaygın kullanılan diğer malzemeler ile mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yer almaktadır.

**Çizelge 2.1.** Polimer kompozit malzemeler ile yaygın kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Bulut, 2014).

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlığı ( $\rho$ , gr/cm <sup>3</sup> )	Çekme Dayanımı ( $\sigma$ ,MPa)	Elastik Modül (E, GPa)	Özgül Çekme Dayanımı ( $\sigma/\rho$ )	Özgül Modül (E/ $\rho$ )	Uzama (%)
Alüminyum	2.8	84	71	30	25	---
Al-2024	2.8	247	89	98	25	20
Al alaşımı	2.8	600	71	210	25	---
Titanyum	4.51	700	117	192	25.1	20
Ni Alaşımı	8.18	450-1200	204	147	24,90	26-45
Alaşimsız Çelik	7.86	460	210	60	27	20
Düşük Alaşımlı Çelik	7.8	600	207	80-250	26.5	20
Pirinç %30Zn	8.5	550	100	60	12	---
Karbon/epoxy %60	1.62	1400	220	865	135	0.8
Kevlar/epoxy	1,38	1310	83	950	60	---
Cam/epoxy %60	1.66	1510	165	910	99	---
Cam/polyester %50	1.9	750	38	390	19,8	1,8

Hafiflik: Kompozitler düşük özgül ağırlıklarda diğer mühendislik malzemelerinden daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşmaktadır. Bu özellikle havacılık sektöründe tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden birisidir.

Tasarım kolaylığı: Kompozitler çeşitli kompleks biçimlere girebilirler. Kompozit malzemelerle tasarım yapan tasarımcılar prototip (numune) tasarımlarda başarı gösterdikçe bu tasarımlar dizi üretime geçmeye başlamışlardır.

Kolay şekil alma: Kompleks yapılar birden fazla işleme gerek kalmadan sadece bir işlemle yekpare kalıplanabilir. Bu malzeme ve işçilikten masrafının azalmasıyla ekonomik rekabette avantaj sağlar.

Elektriksel özellikler: İstenen amaca uygun en az iki malzemenin birleştirilmesiyle üstün elektriksel özellikleri olan yapılar üretilebilir. Ancak asıl avantajı; bir araya getirilen malzemelerin seçimiyle ister iyi bir iletken ister iyi bir yalıtkan özellik göstererek kompozit malzemeler elde edilebilir. Yani kompozit malzemeler istenildiğinde iyi bir yalıtkan olabilirken istenildiğinde iyi bir iletken olabilir.

Boyutsal stabilite: Farklı mekaniksel koşullar ve zor çevresel koşullarda termoset kompozitler biçimlerini bozmadan buldukları durumu koruyabilmektedir. Kompozit malzemeler için sünme noktası incelendiğinde genellikle kırılma noktalarına denk gelmektedir (Bulut, 2014).

Korozyon ve kimyasal etkilere direnç: Kompozit malzemeler genellikle atmosferin olumsuz etkilerinden, korozyondan ve aynı zamanda olumsuz kimyasal etkilerden etkilenmezler. Kimyasal yapılarındaki bu avantajlar nedeniyle; kimyasal maddelerin taşındığı ve depolandığı tankların yapımında, havacılık sektöründe, deniz araçlarının imalatında kullanmakta herhangi bir risk olmaması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir.

Kalıcı renklendirme: Kompozit malzemeye ek bir işlem gerektirmeden masrafsız bir şekilde, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentleri renklendirme yapılabilmektedir.

Isıya ve ateşe dayanıklılık: Özel katkı bileşenleri eklenerek kompozit malzemelerin ısıya dayanımı artırılabilir bu sayede kompozit malzemelere yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde kullanılabilir.

Titreşim sönümlendirme kabiliyeti: Kompozit malzemeler sünek olduklarından dolayı titreşimi sönümlemede ve şok etkilerini absorbe edebilmeden son derece başarılıdır(Bulut, 2014)

### **2.2.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları**

Kompozit malzemeler, kendilerini oluşturan bileşenlerin her hangi bir tanesinin özelliklerinde bulunan bir olumsuz özellikten olumsuz şekilde etkilenirler. Örneğin; kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerden bir tanesi sıcaklıktan etkileniyor ve yüksek sıcaklığa dayanıklı değilse bu malzeme ile oluşturulan kompozit malzeme yüksek sıcaklığa dayanımda yüksek direnç gösteremez bu sebeple yüksek sıcaklıkta kullanılamaz. Bu diğer hem kimyasal hem de fiziksel özellikler ( nem, korozyon gb.) için aynı şekilde geçerlidir.

Kompozitlerin diğer dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- Kompozit malzemelerin üretimi sırasında malzemenin içinde kalan hava zerrecikleri sebebiyle yapının yorulma dayanımı oldukça düşmektedir (İşikli, 2012).
- Kompozitlerin farklı özellikleri farklı doğrultulardan etkilenebilmektedir (İşikli, 2012). Çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet gibi malzeme için önemli olan bazı değerler malzemedeki heterojen bir yayılım göstermektedir (Sakin, 2004).
- Kimyasal ve fiziksel bazı özelliklerinden dolayı hassas imalat yapılamaz (Sakin, 2004).
- İmalatın verimli olabilmesi için tasarım parametrelerinin iyi tanımlanması ve standartlaştırılması gerekmektedir.
- Üretim maliyetleri yüksektir.

- Mekanik özellikleri öngörülememektedir. Aynı kompozit malzemeler farklı mekanik özellikler sergileyebilmektedirler.

### 2.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Kompozitlerin, yüksek avantaj sağlayan özellikleri nedeniyle kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. Kullanımı arttıkça kompozit malzemelerin gelişmesi hızla ilerlemektedir.

Kompozit malzemelerinin uygulama alanları başta havacılık (uzay endüstrisi, helikopter, uçak gibi teknolojik hava araçları olmak üzere otomotiv, teknik tekstil, tıp, denizcilik ve giderek önemi artan temiz enerji üretimi gibi) kullanımı giderek artmaktadır. Çizelge 2.2' de bu dağılımı görmemiz mümkündür.

**Çizelge 2.2.** Kompozitlerin Sektörler Arasındaki Dağılımlarının Global Bazda Dağılımı

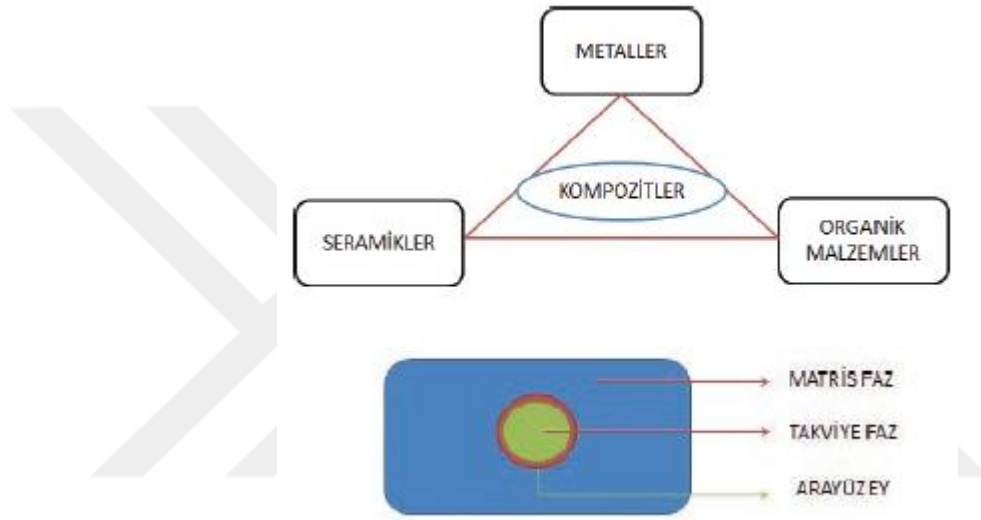
SEKTÖRLER	DÜNYA (%)	AVRUPA (%)	TÜRKİYE (%)
Yapı ve İnşaat	24,5	20	22
Taşımacılık ve Otomotiv	21	30	20
Elektrik ve Elektronik	19	14	3
Tüketim Malları	6	3	2
Rüzgar Enerjisi	7	12	5
Boru ve Tank	14	13,5	45
Uzay ve Havacılık	0,5	0,5	-
Denizcilik	4	5	2
Diğer	4	2	1

Bu tablonun haricinde birçok sektörde daha kullanılmaktadır ve kullanım alanı kompozit malzemelerdeki gelişmeler ile birlikte artmaktadır.

## 2.4 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri

Kompozitler matris ve fiber olarakta adlandırılan takviye elemanı adı verilen iki malzemenin birleştirilmesi ile elde edilir. Burada kompozit malzemelerin davranışının anlaşılabilmesi için matris ve takviye elemanlarının görevlerinin ve özelliklerinin bilinmesi çok önemlidir.

Şekil 2.3.' te kompozit malzemeler görsel olarak şematize edilmiştir ve matris ve takviye faz (fiber) gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Kompozit Malzemeler (Bulut, 2014).

### 2.4.1 Matris Malzemeleri

Matrisler; fiberleri yani takviye elemanlarını ayrılmayacak şekilde birleştirerek, takviye elemanları arasında oluşacak olan gerilim kuvvetinin aktarılmasını ve yapının çevresel koşullardan etkilenmemesini destekleyen yapısal bileşenlerinden birisidir. (Aydın, 2018).

Kompozit malzemelerin yapısında yer alan matris bileşeninin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Matris bileşenleri, malzeme üzerine etkiyen kuvveti fiberlere taşıyarak yapının rijit olmasını sağlar.

- Kompozit malzemelerin yapısındaki matris bileşenleri; fiberlerin ayrılmadan bir arada kalmasını sağlayarak malzemede oluşabilecek olan çatlakların daha yavaş ilerlemesini sağlar (Aydın, 2018).

- Matrisler, malzemelerde istenilen yüzey kalitesine ulaşılmasını sağlar(Aydın, 2018).

- Fiberleri çevresel etkenlere karşı korurlar (Aydın, 2018).

- Darbe dayanımının yüksek olmasını destekler. (Aydın, 2018).

#### **2.4.1.1 Metal Matrisler**

Orta ve yüksek yoğunluğa sahip olan metal malzemeler mühendislik malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Metaller saf haldeyken yumuşaktır ve dayanımları düşüktür ancak plastik şekil değişimi ve ısı işlem ile dayanımı ve sertliği arttırmak mümkündür. Metal malzemelerin yüksek yükler altında ya da şok etkilerinde kırılmaması, bunun yerine akıp yükü tüm sisteme yayması kullanıldığı sistemlerin güvenilirliğini artırır. Özgül ağırlıklarının fazla olması, korozyon ve kimyasal etkilere karşı dirençsiz olması onları mühendislik malzemeleri arasında dezavantajlı kılmaktadır. Ancak matrisinde bazı metal malzemeler kullanılarak elde edilen kompozit malzemelerde vardır. Bu tür malzemeler metal matrisli kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadırlar.(Aydın, 2018).

#### **2.4.1.2 Seramik Matrisler**

Seramik malzemeler genellikle kırılğan ve sert özellik gösteren malzemeler olarak bilinmektedirler. Düşük özgül ağırlık ve tokluk değerleri göstermektedirler. Malzemelerin kullanımları esnasında aniden hasar oluşur ve hızla ilerleyerek hasara yol açar. Seramik malzemeler sıcaklığa dayanıklıdır bu sebeple yüksek sıcaklıkta çalışan parçaların imalatında kullanılabilirler ancak kırılma dirençleri burada bir kısıttır. Bu kısıtı aşabilmek adına seramik liflerle desteklenebilirler. Seramik liflerle desteklenmiş olan malzemeler yüksek



sıcaklıklara karşı dayanıklı olurlar ve ani kırılmaya karşı direnç gösterebilirler (Aydın, 2018).

### **2.4.1.3 Polimer Matrisler**

Polimer malzemeler, nispeten ucuzdurlar ve onlarla çalışmak kolaydır. Kendi içlerinde ve başka malzemelerle birleşmeleri oldukça kolaydır. Bu özellikleri sayesinde talaş kaldırmak kolaylaşır. Aynı zamanda üretimi kompleks olan yapıları üretmekte kolay bir hal alır (Aydın, 2018).

Polimer esaslı kompozit malzemelerin özellikleri incelendiğinde elastik modülü ve ısı dayanımının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Çevresel etkilere karşı dayanıksızdırlar. (Aydın, 2018).

Polimer matrisler, aşağıdaki gibi iki başlık altında incelenebilirler;

Termoplastikler: Bu yapılar düşük sıcaklıklarda katı fazda bulunmalarına karşın ısıya maruz kalmaları yumuşamalarına sebep olur. Isı maruziyetinin ardından yarı sıvı-katı bir hal aldıklarında ise şekillendirilebilir ve kolay kalıplandırılabilir bir hal alırlar. Bu malzemeler yüksek sertlik ve darbe dayanımına sahiptirler. Ham madde raf ömürlerinin uzundur (Aydın, 2018).

Termosetler: matris olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Termoplastiklerle karşılaştırıldıklarında en bariz farkları düşük sıcaklıklarda sıvı halde bulunmaları denebilir. Bazı kimyasal işlemlerle ve aynı zamanda yüksek ısıya maruz bırakılarak sert bir yapıya geçişleri sağlanabilir. Ancak yapılan bu işlem geri dönüşümsüzdür (Aydın, 2018).

Termosetler: epoksi reçineler, polyester reçineler, fenolik reçineler, silikon, poliamid, poliüretan ve siyanet ester olarak sınıflandırılabilirler. Bu malzemelerin her biri ayrı bir özellik taşır ve bileşiminde bulunduğu kompozit malzemelere farklı özellikler katar.

**Tablo 2.1.** Metal, Seramik ve Plastik Matris Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin Kıyaslanması (Aydın, 2018).

	Metal	Seramik	Plastik
<b>Fiziksel Özellik</b>			
Yoğunluk	Yüksek	Orta	Düşük
Elektriksel Direnç	Çok Düşük	Çok Yüksek	Yüksek
Termal İletkenlik	Çok Yüksek	Çok Düşük	Düşük
Dayanıklılık	Orta-Çok Yüksek	Çok Yüksek	Düşük-Orta
<b>Mekanik Özellik</b>			
Gerilme Direnci	Yüksek	Düşük	Düşük-Orta
Sertlik	Yüksek	Çok Yüksek	Düşük-Orta

#### 2.4.2 Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerin bileşenlerinden ve takviye elemanları olarak adlandırılan yapılar çeşitli şekillerde yapının içerisine gömülürler. Bu şekiller tabaka, pul ya da elyaf gibi yapılar olabilir. Malzemeye etkileyen yükü taşımak ve bu sayede yapının rijit özelliğini arttırmak matris malzemelerin en esas görevidir denilebilir başka bir deyişle yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Özgül ağırlıkları düşük ve elastik modülleri yüksektir. Takviye elemanlarının korozyon dirençleri ve kimyasal etkilere karşı dayanımları oldukça yüksektir.

Fiberlerin yarıçapı yaklaşık olarak ortalama 0,005 mm civarındadır. Narinlik oranları incelendiğinde ise bu oranın 10.000'e kadar çıktığı bilinmektedir (Çoban, 2007).

Kompozit malzemelerde takviye elemanları farklı formlarda bulunabilirler. Bu formlar parçacık, sürekli ve süreksiz elyaf şeklinde olabilir. Günümüzde kompozit yapılarda çoğunlukla sürekli elyaflar kullanılmaktadır.

### 2.4.2.1 Cam Elyaf lar

Cam elyaf ların özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Çekme mukavemetleri oldukça yüksektir. Aynı zamanda çelik ile kıyaslandığında birim ağırlık başına düşen çekme mukavemet değeri oldukça yüksektir.

- Cam elyaf ların ısı dirençlerinin ise oldukça düşük olduğu bilinmektedir.

- Kimyasal ve çevresel koşullara karşı koyma kabiliyetleri oldukça iyidir (Yapıcı, 2012).

- Nem sönümlenme kabiliyetinin iyi olmaması ve bundan kaynaklanan olumsuz etkilerine karşın ancak elyaf kaplama işlemleri uygulandığında bu dezavantaj elimine edilebilir (Yapıcı, 2012).

- Elektriği iletkenlikleri yoktur bu sayede yalıtım istenen durumlarda rahatlıkla kullanılabilirler (Yapıcı, 2012).

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan elyaf türleri arasında cam elyaf ı önemlidir. Camın farklı türleri vardır bu türler sahip oldukları mekanik özellikler sayesinde farklı kullanım alanlarına sahip olurlar. Cam elyaf türlerinin harf gösterimleri ve karakteristik özellikleri Tablo 2.2.'de ve bu cam elyaf ların en çok kullanılanları olan A-Alkali, C-Kimyasal, E-Elektriksel ve S-Dayanım tiplerin mekanik özelliklerinin ( özgül ağırlık, elastik modül gb.) ve içeriğindeki malzemeleri ve bunların oranlarının (%'sel bileşimlerinin) karşılaştırması Tablo 2.3.' te yapılmıştır.

**Tablo 2.2.** Cam elyafların harf gösterimleri ve karakteristik özellikleri (Okutan, 2009).

Harf, Gösterim	Karakteristik Özellik
E- elektriksel	Düşük elektriksel iletkenlik
S- dayanım	Yüksek dayanım
C- kimyasal	Yüksek kimyasal dayanıklılık
M- modül	Yüksek modül
A- alkali	Yüksek alkali cam
D- dielektrik	Düşük dielektrik sabiti

**Tablo 2.3.** Cam elyaf takviyeli malzemelerin özellikleri ve içerikleri (Yapıcı, 2012).

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genişleme katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı	727.0	749.0	841.0	970.0
Katki Malzemeleri (%)				
SiO <sub>2</sub>	72.0	64.4	52.4	64.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	14.2	9.6	0.8	0.3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

#### **2.4.2.2 Bor Elyaf lar**

Bor elyaf ı oda sıcaklığında katı halde bulunur ve oldukça hafiftir. Bu malzemeler esasen kendi iç bileşenleri incelendiğinde kompozit bir yapıya sahiptirler.

Çok seyrek oldukları için klasik yöntemlerle üretilemezler. Çekirdek olarak adlandırılan tungsten ya da karbon ince bir telin üzerine çökeltme yöntemiyle bor kaplanarak elde edilir. Bu proseste çekirdek olarak karbon kullanılması yoğunlukta düşüşe sebep olur (Asi, 2018).

#### **2.4.2.3 Silisyum Karbür Elyaf lar**

Silisyum karbür elyaf malzemelerin eldesi silisyum karbürün wolfram çekirdek ile kaplanmasıyla gerçekleşir. 0,05 mm ile 0,28 mm yarıçaplar arasında elde edilebilirler. Yüksek sıcaklıklara karşı bor elyaf lardan daha çok direnç gösterebilirler. Bor elyaf lar mukavemetlerinin %30'unu 640 °C'de kaybederlerken silisyum karbür elyaf lar 1370 °C' de kaybederler. Silisyum karbür elyaf lar çoğunlukla titanyum matrisle kullanılırlar.

Karbon çekirdeklerin silisyum karbür ile kaplanması yoluyla elde edilen fiberlerin yoğunluğunun az olmasına karşın silisyum karbür elyaf ların yoğunlukları bor elyaf lara nispeten daha yüksektir (Yapıcı, 2012).

#### **2.4.2.4 Alumina Elyaf lar**

Alüminyum oksitler alumina olarak adlandırılmaktadırlar. 0.04 mm yarıçapındaki alumina flamanın SiO<sub>2</sub> kaplanmasıyla elde edilmektedir. Bu malzemelerin basma mukavemetlerinin oldukça yüksek olmalarına karşın çekme mukavemetleri nispeten düşük değ erlerdedir. Buna ek olarak, ısıya dayanımları oldukça iyidir bu havacılık sektöründe (uçak motorlarında, türbinlerde) sıklıkla kullanılmaktadır ve kullanımları giderek artmaktadır (Yapıcı, 2012).

### 2.4.2.5 Grafit (Karbon) Elyaf lar

Karbon elementinin yapısı kristal bir yapıdır. Yoğunluğu ise yoğunluğu 2.268 gr/cm<sup>3</sup> tür. Karbon elyaf ların kullanıldığı kompozit malzemelere sıklıkla rastlanabilir (B. Günaydın, 2010).

Karbon ve grafit elyaf ların; saflık yüzdelerinin, işlem sıcaklıklarının ve elastise modüllerinin karşılaştırılması Tablo 2.4.' te verilmiştir.

**Tablo 2.4.** Grafit ve karbon içerikli elyaf ların kıyaslanması (Ünal, 2004).

Özellik	Grafit	Karbon
Saflık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastisite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon elyaf ların önemli özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Yoğunlukları düşüktür,
- Mukavemetleri yüksek ve tokurlar,
- Neme karşı dirençleri oldukça yüksektir,
- Sürünme hasarına karşı oldukça dirençlidirler,
- Yorulma ve aşınma hasarlarına karşı dirençleri oldukça iyidir (Yapıcı, 2012).

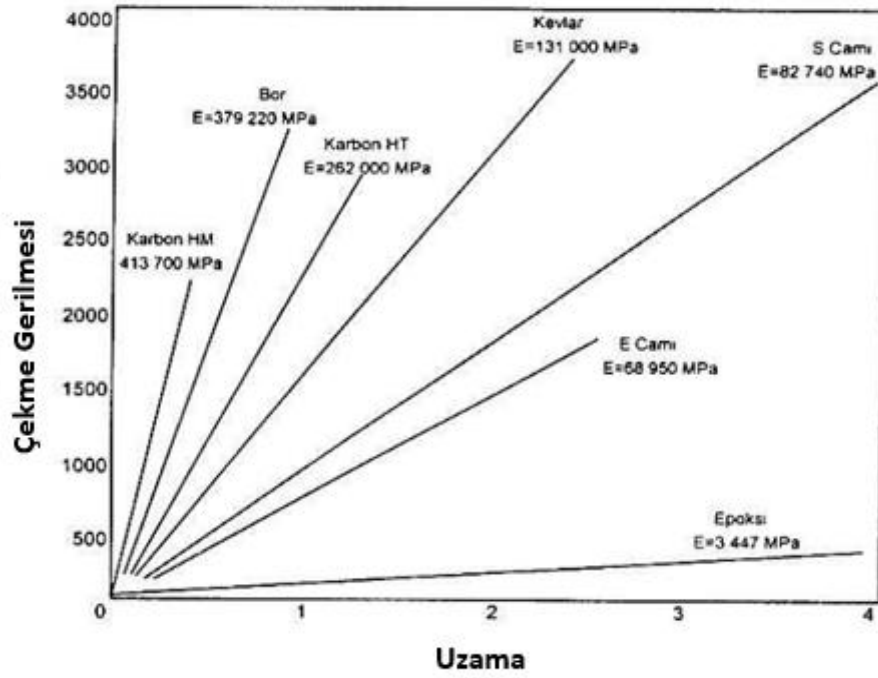
### 2.4.2.6 Kevlar (Aramid) Elyaf lar

Aramid olarak adlandırılan kevlar malzemesinin adı “Aromatik polyamid” malzemesinin kısaltılmasından gelmektedir (Sakin, 2004).

Aramid elyaf ı adı verilen takviye elemanı endüstride sıklıkla daha çok Kevlar ve Twaron isimleriyle de anılmaktadırlar.

Aramid elyafların bazı türlerinin ultraviyole ışın, asit ve tuzlara karşı hassastırlar, aramid elyaf takviyeli kompozit malzemenin kumaş ya da lif halinde iken kesme ve katlama gibi işlenmesinin zor olması, matris malzemesi ile iyi birleşme olmaması durumunda ise oluşan mikro çatlakların malzemenin su emmesine neden olmasıdır (Asi, 2018).

Aramid elyaf malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük olması ve yüksek çekme kuvvetlerine karşı dayanımlarının yüksek olmasına karşın maliyetlerinin nispeten düşük olması onları oldukça avantajlı kılmaktadır. Darbe dirençleri oldukça iyidir, gevreklik değeri ise grafitin gevreklik değerinin neredeyse yarısına tekabül etmektedir. Bundan dolayı kolayca şekillendirilebilir (Yapıcı, 2012).



Şekil 2.4. Fiber ve matrislerin çekme gerilmesi-uzama diyagramı (Ünal, 2004).

Aramid elyaflar yani bir diğer deyişle kevlarlar özellikle yüksek sıcaklık istenen yerlerde kullanılırlar örneğin; temper fırınlarının merdanelerine sarılması için ya da yanmaz kıyafetlerde sıklıkla kullanılmaktadırlar.

## 2.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

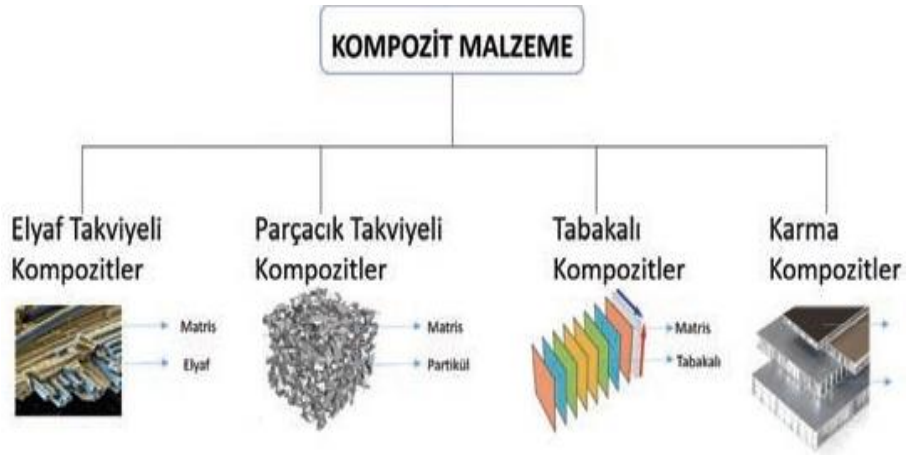
Kompozit malzemeleri gruplandırırken net sınırlar çizmek mümkün değildir bu sebeple genellikle yapılarını oluşturan malzemelere göre ve yapı bileşenlerinin şekline göre olmak üzere iki ana başlık altında gruplanabilmektedir. Ancak bu tek yöntem değildir çok çeşitli kompozit malzeme sınıflandırmaları mümkündür (Gençoğlu, 2011).

Bu çalışmada yapılarını oluşturan malzemeye ve yapı bileşenlerinin şekline göre olarak iki ana başlık altında incelenmiştir.

### 2.5.1 Yapılarını Oluşturan Malzemeye Göre

Kompozit malzemeler genellikle yapılarını oluşturan malzemeye yani takviye elemanlarının şekil veya yerleştirilme biçimine göre sınıflandırılırlar bu sınıflandırma kendi arasında dörde ayrılır.

Şekil 2.5.' te kompozitlerin yapılarını oluşturan malzemeye göre sınıflandırılması temsili görselleri ile birlikte yer almaktadır.



Şekil 2.5. Yapılarını Oluşturan Malzemeye Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (Ünal, 2004).



### **2.5.1.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler**

Bu kompozit tipi elyafların bir diğer değişle liflerin matris malzemenin yapıya yerleşmesiyle elde edilmektedir (Yapıcı, 2012). Mukavemet elyafların yerleşim yönüyle değişmektedir; eğer birbirine paralel yerleşirseler yüksek mukavemet ancak dikine yerleşirseler düşük mukavemet özellikleri gösterir. Elyafların mukavemeti ile kompozit malzemenin mukavemeti ile doğru orantılıdır. Kompozit yapının mukavemetinde elyaf matris arasındaki bağın yapısı son derece önemlidir.

Takviye elemanı olarak elyaf kullanılmayan kompozit malzemelerde basma dayanımı iyidir ancak çekme, eğme, çentik darbe dayanımı gibi birçok mekanik özelliklerinin düşük olması sebebiyle dezavantajlıdır. Bu dezavantajlardan kurtulmak ve kompozit malzemenin özellikleri iyileştirmek amacıyla takviye elemanı olarak elyaf kullanılır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matris malzemesi elyaf takviye elemanını bir arada tutarak kompozit malzemeye rijitlik özelliği ekler. Elyaf ve matris malzemesinin kompozit malzemedeki hacimsel oranları kompozit malzemenin mekaniksel özelliklerin etkiler. Kompozit malzemedeki elyaf oranı belli bir orana kadar arttıkça malzemenin mekanik özellikleri artar ancak bir sınırdan sonra elyaf oranı daha da arttırılırsa kompozit malzemedeki matris malzeme miktarı düşeceğinden matris malzemesi elyafları birbirine bağlayamaz ve tam tersi mukavemeti düşürücü bir etki yaratır (Asi, 2018).

### **2.5.1.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler**

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler matris malzemesi ile parçacık halinde bulunan takviye elemanından oluşan izotrop yapılardır. Takviye malzemeleri birbiri içinde çözünmez.

Parçacık takviyesi kompozit malzemeler elektrik iletkenliği, sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmede tercih edilir. Mukavemetleri takviye edilen parçacıkların sertliğiyle değişmektedir (Yapıcı, 2012).

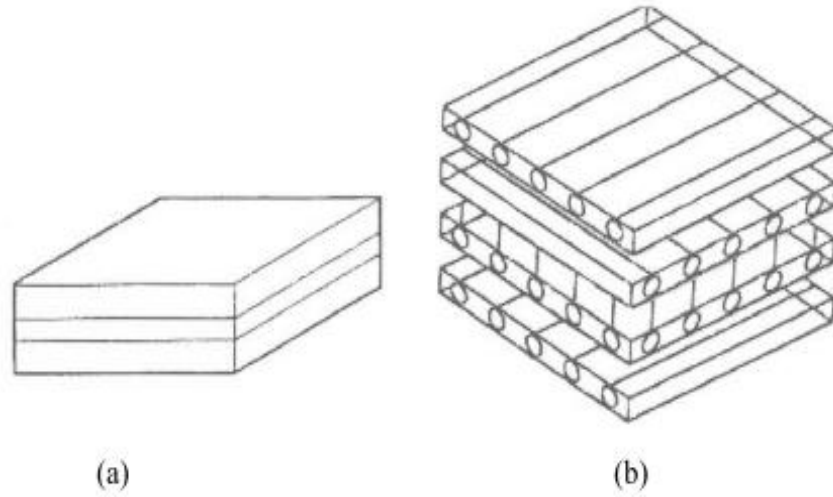
Plastik matris içinde metal parçacık takviyeli kompozitler sıklıkla kullanılmaktadır ve içindeki metal parçacıklar sayesinde ısı ve elektrik iletkenlikleri yüksektir. Takviye malzemesi seramik olanları ise yüksek sıcaklık dayanımları ve iyi mukavemet özellikleri nedeniyle havacılık sanayide sıklıkla tercih edilmektedir (Yapıcı, 2012).

### 2.5.1.3 Tabakalı Kompozitler

Bu malzemeler en eski ve kullanım alanı en yaygın olan sahip olan kompozit malzemelerdir (Yapıcı, 2012).

Elyafların farklı yönlenmesiyle çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmek mümkündür (Yapıcı, 2012) .

Çevresel etkilere karşı oldukça dirençlidirler. Metal malzemelerle kıyaslandığında oldukça hafif ve yüksek mukavemetlidirler. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler havacılık sanayide sıklıkla kullanılmaktadır.



**Şekil 2.6.** Tabakalı Kompozit Malzemelerin İç Yapılarının Sembolik Gösterimi (a) İzotropik (b) Ortotropik yapı (Şahin, 2006).

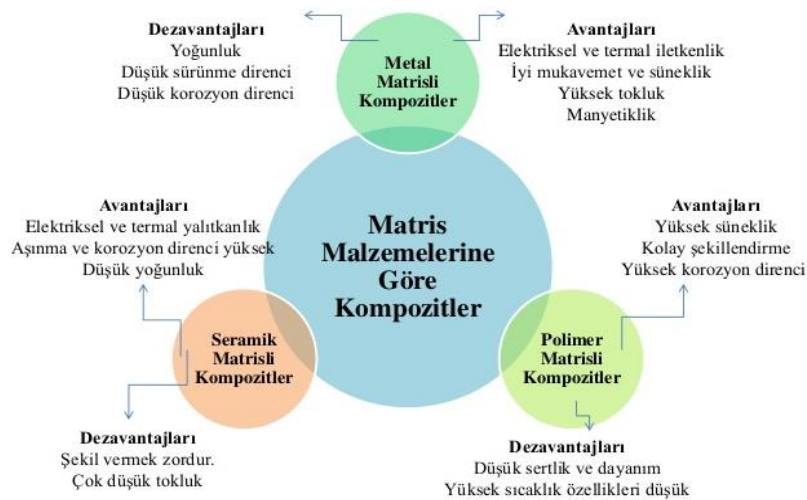
### 2.5.1.4 Hibrit (Karma) Kompozitler

Tek bir kompozit malzeme içinde en az iki farklı fiber yapısı içermesi durumundaki kompozit malzemelere karma (hibrit) kompozitler denir.

Örnek vermek gerekirse, kevlar maliyeti düşük ve tokluk değeri yüksek bir fiber olmasına karşın basma kuvvetine karşın gösterdiği mukavemet değeri düşüktür. Grafit malzemenin düşük tokluk değerine karşın maliyeti oldukça yüksektir buna karşılık basma mukavemeti ise oldukça yüksek bir malzemedir. Kevlar ve grafit elyafın birlikte kullanıldığı hibrit yani karma kompozit malzemenin tokluğu grafit kompozit ile karşılaştırıldığında yüksek, maliyeti açısından oldukça uygun aynı zamanda basma mukavemeti de kevlar fiberli kompozit ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olmaktadır (Aydın, 2018).

### 2.5.2 Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasındaki bir diğer yöntem ise yapı bileşenlerinin şekline göre yani matrislerine göre sınıflandırmaktır. Kompozit malzemeler parçanın kullanım yerinin özellikleri ve üretim amacına hizmet edecek şekilde seçilebilir. Şekil 2.6.' da kompozit malzemelerin yapı bileşenlerine göre sınıflandırılması temsili görselleri ile birlikte yer almaktadır.



Şekil 2.7. Kompozitlerin Yapı Bileşenlerine Göre Sınıflandırılması (Şahin, 2011).

### **2.5.2.1 Polimer Kompozitler**

Polimer kompozit malzemeler, sağlam olmaları, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları, hafif olmaları gibi sebeplerden dolayı oldukça avantajlıdır bu nedenle son yıllarda gelişmeler göstererek günlük yaşamda ve endüstrinin birçok alanında sıklıkla kullanılabilirlerdir. Takviye malzemesi olan plastik üstün bir yük taşıma özelliği gösteriyor olmasına karşın matris malzemesi olan plastik ise darbe sönümleyici bir özelliği sahiptir ve aynı zamanda malzemenin esneklik kazanmasına yardımcı olur (Sakin, 2004).

Çeşitli mühendislik uygulamalarında polimer kompozit malzemeler metallerin yerini almaya başlamıştır.

Polimer kompozit malzemeler insan dokusuyla uyumlu çalıştığından tıp camiası tarafından da sıklıkla tercih edilmektedir.

### **2.5.2.2 Metal Kompozitler**

İleri imalat teknikleri kullanılarak oluşturulan yapılardır. Bu yapıya sahip kompozit malzemeler sıklıkla yüksek dayanımın önemli olduğu havacılık sektöründe (uçak, uzay araçlar gb.) sıklıkla tercih edilmektedir (Aydın, 2018).

Metal matrisli kompozit malzemelerin elastik modülleri yüksektir bu sebeple yüksek mukavemet gösterirler, aşınma dirençleri yüksektir, özgül ağırlıkları düşüktür, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler ve özellikle kaynakla birleştirilebilmeleri avantajlı hale getirmektedir.

### **2.5.2.3 Seramik Kompozitler**

Genellikle özgül ağırlıkları düşük ve sıcaklık dayanımları oldukça yüksek oldukları için sıklıkla tercih edilmektedir. Bu sebeple yüksek sıcaklıkla çalışması gereken malzemeler için sıklıkla kullanılmaktadır. Seramik malzemeler sert ve kırılabilir malzemelerdir. Ancak tokluk değerleri oldukça yüksek ve ısı

değişkenliklere karşı dirençleri düşüktür. Bazı elyaf malzemeler ile takviye edilerek güçlendirilmeleri mümkündür.

Elektrik iletkenlikleri araştırıldığında elektrik iletkenliklerinin oldukça düşük olduğu yani iyi bir yalıtkan olduğu görülmüştür bu durum onların oldukça avantajlı hale getirir (Bulut, 2014).

## **2.6 Tabakalı Kompozitler**

Tabakalı kompozitler en az iki tabakanın birleştirilmesiyle (genellikle bir yapıştırıcı malzeme ile) elde edilmektedir ve aynı zamanda lamine kompozit malzemeler olarakta bilinmektedirler.

Bu malzemeler diğer kompozit malzemelerle kıyaslandığında oldukça farklı oldukları açıkça görülmektedir. İçerisinde bulunan fazlardan bir tanesi sürekli faz olarak adlandırılırken, diğer faz bahsedilen sürekli fazı elde etmeye yarayan bağlayıcı faz olarak bilinmektedir (Llobet, Maimí, Mayugo, Essa, & Martin de la Escalera, 2017).

Tabakalı kompozit malzemeler genellikle birbirlerinden farklı özellikler gösteren tabakaların bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir (Gençoğlu, 2011) .

### **2.6.1 Tabakalı Kompozit Malzemenin Üretiminde Kullanılan Malzeme ve Tabakalı Kompozit Malzemeler**

Tabakalı kompozit malzemelerin üretiminde farklı veya tek tip bileşen yer almaktadır.

Bu yapılarının elde edilmesinde kullanılan bileşenlerin türlerinden yola çıkarak,

- Birbirine benzemeyen bileşenlerden elde edilen oluşun ve
- Aynı bileşenlerden elde edilen yapılar,

olarak iki farklı grup altında incelenebilirler (Gençoğlu, 2011) .

### **2.6.1.1 Metal Tabakalı Kompozit Malzemeler**

Metal tabakalı malzemeler bir metalin başka bir metal tabaka ile örtülmesi ile oluşmaktadır. Yapısında bulunan malzemelerin özelliklerinden de yararlanılabilmektedir.

Örneğin, saf alüminyum ve bazı alüminyum alaşımları korozyona karşı oldukça dirençlidirler ancak, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları korozyon yönünden oldukça dezavantajlıdır. Bu malzemeleri korozyondan etkilenmemesi için korozyona dirençli bir alüminyum alaşımı veya saf alüminyum ile kaplanmakta, böylelikle korozyona dayanıklı ve yüksek mukavemetli bir alüminyum malzeme elde edilebilmektedir (Gençoğlu, 2011).

### **2.6.1.2 Cam Tabakalı Kompozit Malzemeler**

Lamine cam olarak adlandırılabilen bu yapılar endüstrinin birçok alanında sıklıkla kullanılmaktadır.

Cam, saydam olmasının ve çevresel etmenlere oldukça yüksek direnç gösteren amorf özellik gösteren yapı olmasına karşın darbe ve kırılma hasarına karşın iyi direnç göstermemesi bu malzemeyi dezavantajlı konuma gelmektedir. Oldukça tehlikeli olan bu özellik giderilmedir (Gençoğlu, 2011) .

Cam tabakalı kompozit malzemeler kabaca, tabakaların içerisine PVB (polivinilbütural) tabaka yerleştirilerek, birleştirilme için uygun çevresel koşullarda bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. PVB' nin özellikleri incelendiğinde kırılmadan oldukça yüksek oranda şekil değişikliği gösterebilen bir malzeme olduğu görülmektedir (Gençoğlu, 2011).

Lamine camlar bu özellikleri ile genellikle güvenlik camı da denilen kurşungeçirmez camlarda kullanılabilmektedir.

### **2.6.1.3 Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler**

Polimer esaslı kompozit malzemelerin ithal edilmesi ülkemizde 1900'li yıllarından ikinci yarısında başlamıştır. İlk olarak yurtdışından alınan malzeme formica olarakta bilinmektedir.

Değişik renk, desen ve dokuya sahip olabilirler. Kraft kağıdı tabakasıyla dekoratif tabaka arasına alüminyum bir ince tabaka daha eklenmesiyle, yanan sigara, kibrit teması gibi tahrip edici unsurlara da daha dayanıklı ürünler elde edilebilmektedir (Gençoğlu, 2011) .

### **2.6.1.4 Ahşap Tabakalı Kompozit Malzemeler**

Ahşap tabakalı kompozit malzemeler odunların, sentetik lifler, tutkal, dolgu maddeleri ile takviye edilmesiyle elde edilirler ve kullanımı en eski malzemelerden birisidir.

Günümüzde de bu alanda en yaygın kullanılan malzeme ahşaptır ve tabakalar halinde Eski Mısır'da bile kullanıldığı düşünülmektedir. Bu malzeme çeşitli yönlerden gelen mekanik etkilere değişken mukavemet göstermektedir. Aynı zamanda su ve neme karşı direnç gösterememektedir. Doğal ahşaptan büyük boyutlu levhalar, panolar üretilemediği bilinmektedir. Ayrıca, genel olarak doğal ahşap günümüzde artık nispeten pahalı bir malzeme haline gelmiştir ve bu sebeple kullanım alanı mobilya üretimiyle sınırlanmakta, diğer alanlarda alternatif malzemeler ve yapay ahşap her geçen gün daha fazla oranda kullanılmaktadır (Gençoğlu, 2011).

### **2.6.1.5 Tabakalı Lifli Kompozit Malzeme**

Tabakalı lifli kompozitler için liflerle donatılı kompozitler ve tabakalı kompozitlerin harmanlanmış biçimidir denilebilir.

Bu malzemelerde tabakalar birbirinden değişik yönlenmelerle birlikte çeşitli mukavemet özellikleri kazandıran takviye malzemeyi de kapsamaktadır (Van Der Sypt, Chérif, & Bois, 2017a).

### 2.6.1.6 Diğer Tabakalı Kompozit Malzemeler

Üretimde kullanılan malzemeye göre yapılan sınıflandırmaya girmeyen bazı tabakalı kompozitler üzerinde, ana hatlarıyla durulmaktadır. Dış yüzeyi birçok farklı uygulamaya uygun özelliklere sahip, çekme dayanımı oldukça yüksek bir malzemeyle kaplı olduğundan, alçı karton plakların her iki yönde de eğilme dayanımı uygulamada kullanımına olanak verecek düzeye ulaşmaktadır (Gençoğlu, 2011).

### 2.6.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Adlandırılması

Tabakalı kompozitlerde adlandırmanın bazı kuralları vardır. Yapı içindeki bir tabakanın fiber dizilimi x-ekseniyle çakışarak yerleşim açısı  $0^\circ$  kabul edilecek şekilde yerleştirildikten sonra, diğer katmanlar buna göre yerleştirilebilir. Saat yönü pozitif (+), saatin tersi yönse negatif (-) açığı işaret eder. Açılar köşeli parantez içinde yazılır. Açılar birden fazla ise aralarına virgöl koyulur (Kaçar, 2009).

Tabakalı kompozit malzeme içindeki tabakaların tamamının açıları belirtildiğinde köşeli parantezin alt köşesine toplam tabaka sayısını belirten T indisi gelir (Kaçar, 2009):

$$[0, 45, 45, 90, 30, 30]_T$$

Ancak kompozit malzeme içindeki tabakalar orta noktasından simetrikse, orta düzleme kadar olan açılar listelenerek simetriyi belirten S indisi konulur (Kaçar, 2009):

$$[0, 45, 45, 90, 90, 45, 45, 0]_T \rightarrow [0, 45, 45, 90]_S$$



### 3. YORULMA

Yorulma hasarı, malzemenin uzamalar ve/veya tekrar eden gerilmeler altındaki tepkilerini belirlemektedir. Hasarın oluşması için malzemenin tekrar eden gerilme yüklemeler altında çalışması gerekmektedir. Olay sürekli olarak devam etmektedir. Hasarın bölgesel olarak gelişmesi ve çatlak ilerlemesiyle birlikte kopmanın olayının gerçekleşmesidir (Kamal & Rahman, 2018).

#### 3.1 Giriş

Yorulma hasarının ehemmiyeti 8 Mayıs 1842' de Versailles tren kazasının ardından artmıştır. Bu kazada 75' ten kişiden fazla insan ölmüştür. Daha sonra kaza detaylı incelendiğinde yorulma kavramı tekrarlı yüklemelerde meydana gelen ani kırılma olayı için kullanılmaktadır (Aydın, 2018). Kazayı takip eden senelerde bu hasarı detaylı incelemek adına bazı önemli araştırmalar yapılmıştır.

Kazanın oluşmasından yaklaşık 8 sene geçtikten sonra Wöhler kazayla ilgili gerçekleştirdiği araştırmalarda bazı sonuçlara ulaşmıştır.(Aydın, 2018).

Bu sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yapılar akma gerilmesinden düşük bir değerde tekrar eden yükler altında aniden kırılabilmektedir (Aydın, 2018).
- Yapıların ömrünü belirlemede önemli olan gerilme değil de gerilme aralığıdır (Aydın, 2018).
- Tanımlı olan gerilme aralığında malzeme sonsuz ömürlü olabilir (Aydın, 2018).

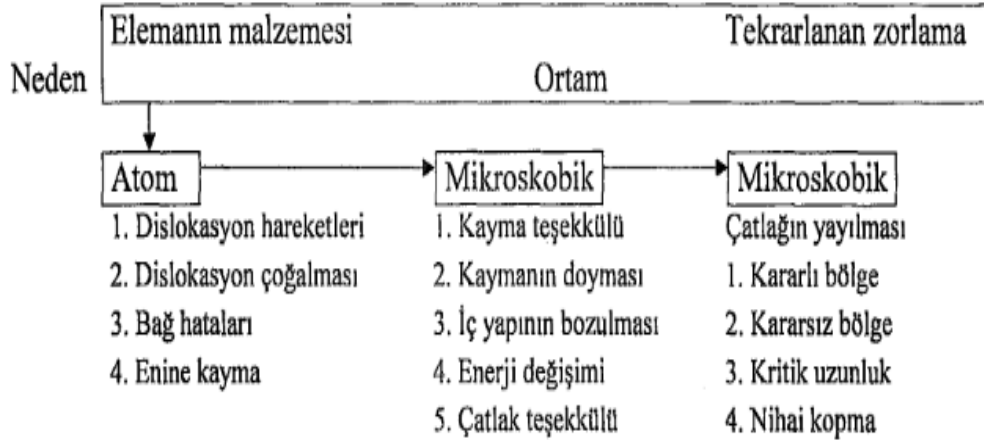
Yük değişme sayısı 'N' ile gösterilmektedir. İyapıda oluşan değişiklikler bu değere bağlıdır. Alçak ve yüksek yük değişme sayısına karşılık gelen değişken zorlamalar iki bölgeye ayrılarak incelenmektedir. Kesin bir değer olmamakla birlikte  $N \leq 10^4$  olduğu bölge yüksek yük değişme sayılarını (high cycle)  $N \geq 10^4$

olduğu bölge alçak yük değişme sayılarını (low cycle) kapsar. Alçak yük değişme sayısında meydana gelen kopma, statik kopmaya benzer. Dolayısıyla, yukarıda bahsedilen ve statik kopmadan tamamen farklı olan yorulma, yüksek yük değişme sayılarının etkisi altında meydana gelmektedir (Sakin, 2004).

Yorulma olayı 3 aşamada meydana gelmektedir;

- Çatlağın oluşması,
- Çatlağın ilerlemesi,
- Malzemenin kopması.

Atomik düzeyde meydana gelen bir plastik şekil değişimi kayma şeritlerinin meydana gelmesine neden olmaktadır ve tersinir olmadıklarından değişken yük etkisi altında mikroskobik seviyede bir çatlak meydana getirirler. Yük sürekli olarak değiştiğinden çatlak yayılması başlar ve kalan kesit alan yükü taşıyamayacak duruma gelindiğinde kopma olayı meydana gelmektedir. Yorulma olayının başlangıcını etkileyen faktörler aşağıdaki şekilde verilmiştir (Sakin, 2004).



Şekil 3.1. Yorulma olayını etkileyen faktörler (Sakin, 2004)

### 3.2 Yorulma Testi

Malzemelerin yorulma hasarına karşı gösterdikleri dayanımları yorulma cihazlarında belirleyebiliriz. Bu cihazlarla malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişen zamana bağlı olarak değişen sinüzoidal dalgalı gerilmeler (gerilme artarak maksimum ve azalarak minimumuna ulaşabilen) uygulanmaktadır. En yüksek ve en düşük gerilme yüklemeleri içerisinde kalacak bir yük ile yükleme işlemi gerçekleştirilir (Van Der Sypt, Chérif, & Bois, 2017b).

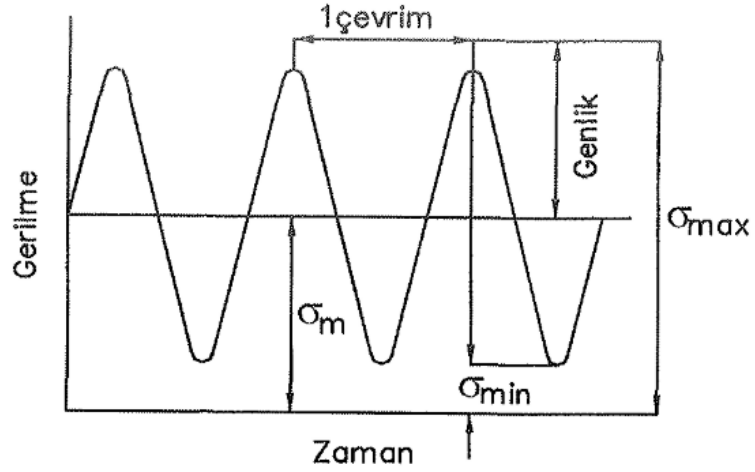
Değişken gerilmeler etkisindeki malzemelerde tekrar sayıları oldukça kritiktir. Kopma olayı, statik sınırların altında gerçekleşir. Statik sınırların oldukça altında gerçekleşen kopma hasarı malzemenin mikro yapısındaki ağır hasarlara ve ayrılmalara neden olmaktadır (Aydın, 2018). Gerilmelerin etkidiği yapının iç bünyesindeki farklılıklara yorulma, malzeme kopana kadar dayandığı çevrim sayısına ise malzemenin yorulma ömrü denir (Aidi, Philen, & Case, 2015).

Yorulma zorlaması; büyüklüğü ve yükleme yönü muntazam olan veya muntazam olmayan şekilde devamlı değişiklik gösteren moment ve kuvvetlerin göstermiş olduğu değişimdir (Yudhanto, Iwahori, Watanabe, & Hoshi, 2012).

Kuvvet ve ya moment aynı büyüklükte birbirine ters işaretli iki sınır arasında değişkenlik gösteriyorsa buna dalgalı yorulma denir (Şahin, 2011).

Yorulma testi sıklıkla sinüzoidal yük kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Aydın, 2018).

En yüksek gerilme değeri ile en düşük gerilme değeri arasındaki maksimum ve minimum gerilmeyi belirterek diğer yorulma için kritik olan diğer gerilme parametreleri belirlenebilmektedir (Aydın, 2018).



**Şekil 3.2.** Yorulma Testi İçin Kullanılan Sinüzoidal Yüklemenin ve Diğer Parametrelerin Şematik Gösterimi (Aydın, 2018).

Şekil 3.2' de gösterilen bu parametreler;

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.4)$$

R değeri, yorulma yük biçiminin bir göstergesidir, Çizelge 4.1' de önemli yükleme biçimleri özetlenmiştir (Şahin, 2011).

**Çizelge 3.1.** Yorulma Yük Oranlarına Karşılık Gelen Yorulma Yük Biçimleri (Aydın, 2018).

Yorulma Yük Oranı	Yorulma Yük Biçimi
$R = 1$	Sabit Yükleme
$R = 0$	Çekme - Yük Boşaltma
$0 < R < 1$	Çekme - Çekme
$R = -1$	Çekme - Basma ( $\sigma_m = 0$ )
$-1 < R < 0$	Çekme - Basma

### 3.2.1 Yorulma Dayanımına Ortalama Gerilmenin Etkisi

Rastgele yük genliği alındığında, verilen çevrim ömrü için yorulma mukavemeti, ortalama gerilme ( $\sigma_m$ ) değerine bağlı olarak değişmektedir (Aydın, 2018). Ortalama gerilme arttıkça gerilme genliği azaltılmalıdır bunun sebebi bu değerlerin bir biri ile ters orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Olabilecek bütün yüklemeler için tek tek yorulma ömrünü hesaplamak yerine “Goodman” olarak isimlendirilen ve ampirik bir yöntem olan eğri kullanılır (Aydın, 2018).

Goodman çizgisi olarak isimlendirilen bu değer, yorulma mukavemetine (belirlenen yorulma ömrü için gerilme genliği) ortalama gerilme oranı ile lineer bir azalma eğilimi gösterir (Sakin, 2004) .

Çelik gibi metal malzemeler için yorulma ömrünün sonsuz olduğu ve gerilme altındayken yorulma ile hasara uğramadığı bir gerilme değeri vardır. Böyle durumlarda dayanım sınırı adı verilen bir değere başvurulur. Alüminyum alaşımı gibi diğer metallerde bu dayanım sınırı bulunmamaktadır, bu sebeple yaklaşık bir yorulma ömrü seçilmelidir (10 milyon devir, 1 milyon devir, 100.000 devir gb.) (Şahin, 2011) .

### 3.2.2 Kapalı Döngü Yorulma Testi

Yorulma cihazlarının dönen kütleler kullanması veya sinüzoidal yüklemeye sonuçlanan örnekler kullanılması nedeniyle tasarım için kullanılan yorulma dataları, genellikle bir sinüzoidal yük çevrimleriyle elde edilir. Bu

cihazlar ile kompozitlerin yorulma testleri için farklı yükleme frekansları elde edilebilir ancak ısı etkisinin minimize etmek için genellikle 10 Hz veya daha az frekanslarda test gerçekleştirilir (Sakin, 2004).

Kapalı döngü yorulma testlerinde sabit yükleme veya sabit şekil değiştirme kontrolü kolayca sağlanabilmektedir. Yükleme kontrolünde test numunesi belirlenen en yüksek ve en düşük yüklemeler arasında çevrimin gerçekleştirilmesiyle değişken olmayan bir gerilme genliği değeri sağlanmış olur (Sakin, 2004) .

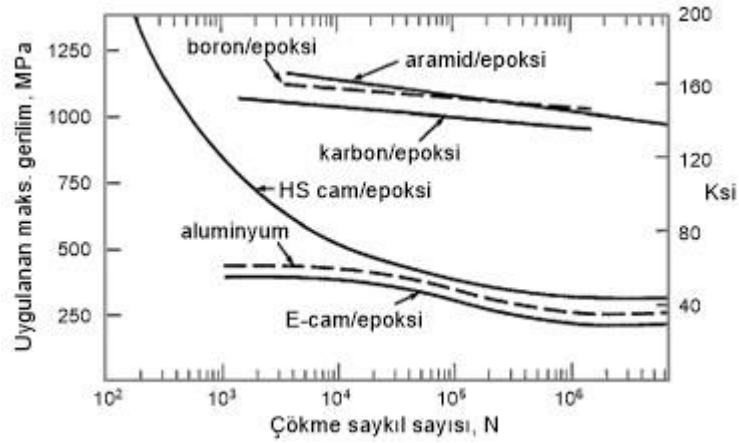
### **3.2.3 Gerilme – Çevrim Sayısı (S/N) Eğrisi (Wöhler)**

Kompozit malzemelerde yorulma performansı, verilen maksimum gerilme seviyesinde numunenin kırılması için gerekli çevrim sayısına bağlı olarak izah edilir. Yorulma performansı aynı zamanda ortalama gerilme veya yorulma gerilmesi oranı (R) ile de açıklanabilir. Bu tip deneylerin sonuçları ele alınarak en yüksek yorulma gerilme değerine karşılık yarı logaritmik ölçekli yorulma ömürleri olarak tanımlanabilir. Bu çizime S/N eğrisi denir, burada S gerilme genliği, N ise çevrim sayısıdır (Şahin, 2011) .

### **3.3 Kompozitlerde Yorulma**

Metal malzemelerde yorulma kırılması sonucunda plastik deformasyon görülmez fakat yüzey detaylı incelendiğinde plastik deformasyonun izlerine rastlanabilir. Yorulma ömrü gerilmenin büyüklüğüne, gerilme durumuna, yükleme durumuna, yükleme geçmişine ve çevre şartlarına bağlıdır (Şahin, 2011) .

Yorulma ömrü genellikle belli bir gerilme değeri için hasar oluşana kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Düşük gerilme yüklerinde yorulma ömrü artarken bazı durumlarda sonsuz olabilir ve bu durumlarda genellikle yüksek çevrimli yorulmadan söz edilir. Bu durumda oluşan gerilme yorulma dayanım sınırı olarak adlandırılmaktadır. Kevlar/Epoksi için S/N eğrisi yüksek yorulma mukavemetine sahip olan bir metal malzeme ile benzeşim göstermektedir (Sakin, 2004) .



**Şekil 3.3.** Belirtilen Malzemelerdeki Uygulanan En Yüksek Gerilim Sayısına Karşılık Gelen Çökme Çevrim Sayıları Eğrileri (Beşergil, 2016) .

E-cam/epoksi malzemelerin yorulma davranışları metal malzemelerinkiler ile benzer özellikler göstermektedir her ikisi de düşük gerilme değerlerinde çok yüksek çevrim sayılarına çıkabilmektedir ( Şahin, 2011) .

S/N eğrisi aşağıdaki formülüzasyon ile ifade edilebilir:

$$S = \sigma_m \cdot (m \log N + b) \quad (3.5)$$

S: En yüksek yorulma gerilmesi değeri

$\sigma_m$ : Ortalama statik mukavemet değeri

N: Kritik (hasarın başladığı) döngü sayısı

m: Eğim (sabit)

b: S/N eğrisinin kestiği gerilme (sabit) (Sakin, 2004)

$m$ ' nin düşük ve  $b$ 'nin yüksek değeri yüksek yorulma mukavemetini tariflemektedir.  $m$  ve  $b$  sabitleri için tipik değerler sık kullanılan kompozit malzemeler için Çizelge 3.2' de yer almaktadır. Aynı R oranındaki, karbon fiber ve E-camı fiber kompozit malzemeler için  $m$  ve  $b$  değerleri kıyaslandığında,

karbon fiber kompozit malzemelerin daha yüksek bir yorulma dayanımı göstermektedir. b katsayısı statik mukavemetten daha çok etkilenmektedir (Sakin, 2004).

S/N grafiğinin üstel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{S}{\sigma m} N^d = c \quad (3.6)$$

Burada c ve d sabitlerdir.

**Çizelge 3.2.** m ve b sabitleri için tipik değerler (Şahin, 2011).

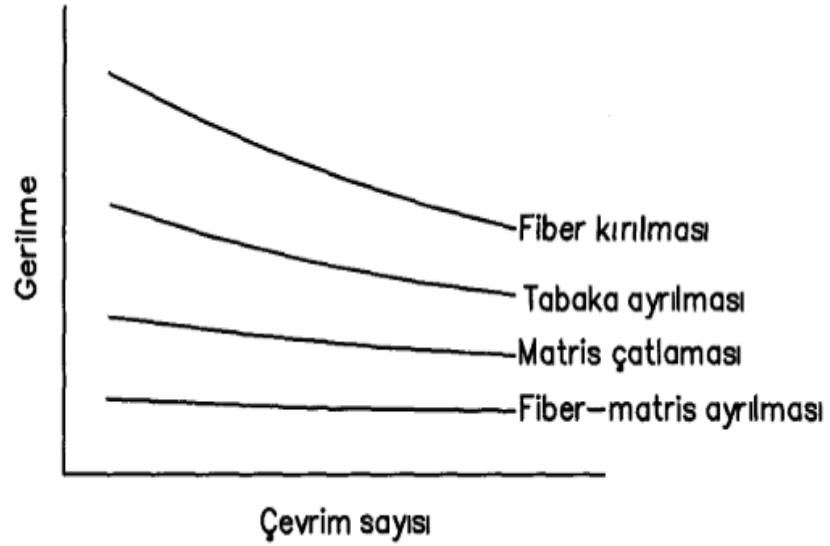
Malzeme	R	m	b
E-camı / sünek epoxy 0°	0.1	-0.1573	1.3743
T300 karbon / sünek epoxy 0°	0.1	-0.0542	1.0420
E-camı / gevrek epoxy 0°	0.1	-0.1110	1.0935
T300 karbon / gevrek epoxy 0°	0.1	-0.0873	1.2103
E-camı / epoxy [0/90°] <sub>s</sub>	0.05	-0.0815	0.934

### 3.3.1 Kompozitlerde Yorulma Modları

Tek yönlü, tek tabakalı kompozit malzemelerin yorulma hasarları üç modda meydana gelmektedir, bu üç mod Fiber-Matris Ayrılması, Matris Çatlağı ve Fiber Kırılması olarak tanımlanmaktadır (Aydın, 2018). Fiber kırılması fiber mukavemetiyle ilişkilidir (Aydın, 2018). Yüksek rijitliğe sahip fiberlerde, şekil değiştirmenin sınırlı bir miktarının matrise aktarılmasıyla matris çatlaması geciktirilebilir. Fiber-matris ara yüzeyindeki ayrılmalar için hasar yayfı fiber/matris ara yüzey mukavemetinden kaynaklanmaktadır denilebilir (Şahin, 2011).

Bu üç hasar moduna ek dördüncü hasar modu tabaka ayrılması (delaminasyon) olarak tanımlanabilir. Delaminasyon, çok tabakalı kompozit malzemelerde yorulma yükünün sonucunda görülebilmektedir. Şekil 3.4' deki gibi her hata modu için S/N eğrileri çizilebilmektedir. Fiberlerin kırılmasına kadar tabaka ayrılması(mukavemet hasarı) meydana gelmemesine karşın tabaka hasarı meydana gelebilir. Bazı durumlarda, nem etkisinin artmasından dolayı hızlı bir fiber-matris ayrılması meydana gelebilir (Sakin, 2004).





**Şekil 3.4.** Değişik Kompozit Yorulma Hasar Biçimleri İçin S/N Diyagramı  
(M. Günaydın, 2003).

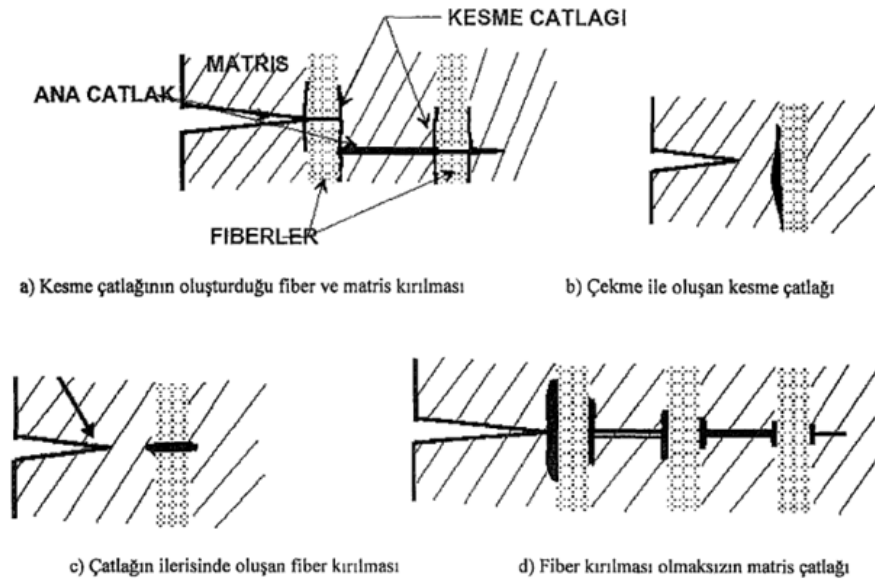
Yorulma; çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesi olarak iki bölümde meydana gelmektedir. Yorulma gerilmesinin yüksek olduğu durumlarda başlangıç aşaması çevrim yükünde erkenden meydana gelmektedir. Çatlak ilerlemesi yorulma ömrünün nispeten daha büyük bir kısmını kapsamaktadır. Yüksek çevrimli yorulmalarda, yorulma çatlaklarının başlaması için yorulma çevriminin büyük kısmı gerekmektedir (M. Günaydın, 2003).

Uygulanan değişken gerilmenin değeri ile yorulma ömrü ters orantılıdır. Değişken gerilme değeri arttıkça yorulma ömrü azalmakta ve çatlak başlama süresi kısalmaktadır. Malzemelerdeki yüzey çatlakları ve düzensizlikler, çatlak başlaması için geçen süreyi kısaltmaktadır bu da yorulma ömrünü kısaltmaktadır (Sakin, 2004).

Kayma çatlakları, tek başlarına çekme yükü ile yırtılmaya, matris çatlama olmaksızın çatlak öncesi fiber kırılması veya fiber kırılması olmaksızın matris çatlama yol açabilirler (M. Günaydın, 2003).

Fiber ve matris kırılmasını içeren bir kompozit malzemedeki yorulma çatlaklarının ilerlemesine kesme çatlakları yardımcı olur. Bazen matris çatlakları veya kesme çatlakları olmadan da çatlak oluşabilmektedir. Bu çatlaktan biraz uzakta

meydana gelen fiber kopması ve matris çatlaması henüz olmamışken meydana gelen fiber kırılması, gibi iki faktörde yorulma çatlaklarının ilerlemesi ve oluşmasına yardımcı olmaktadır. Şekil 3.5’ te bu olaylar gösterilmektedir. Kesme çatlakları boyunca kırılma yolunda artarak yorulma enerjisini absorbe ettiğinden, kesme çatlaklarının bu şekli yorulma ömrü için olumludur, yorulma çatlaklarını yavaşlatmaktadır. Kesme çatlakları, fiber ve matris arasındaki şekil değişimi farkından yani poisson oranından dolayı yorulma çatlakından daha uzak bir noktada meydana gelebilmektedir. Bu durum Şekil 3.5.b’ de görülmektedir. Fiberin uzaması, matrisle kıyaslandığında daha küçük olduğundan, fiber Şekil 3.5.c’ de görüldüğü gibi çatlaktan daha ileride de hasar meydana gelebilmektedir. Gevrek bir matris içinde sünek fiber olması durumunda, matris fiberden ayrılarak hasara neden olabilmektedir, bu durumda Şekil 3.5.d’ de görülmektedir (Sakin, 2004).

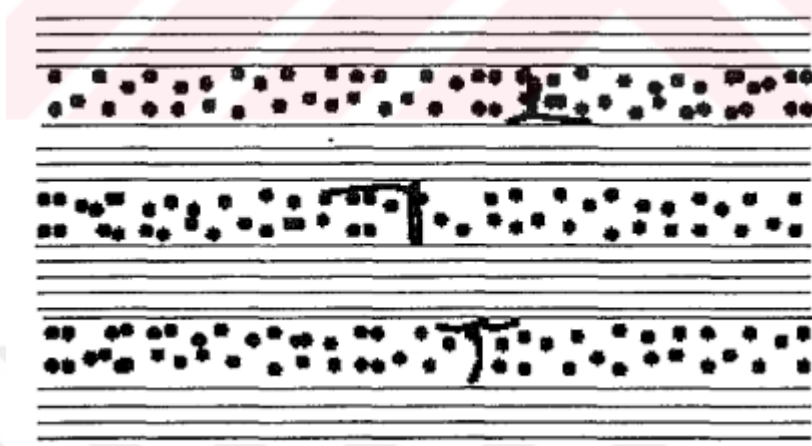


**Şekil 3.5.** Kompozit Malzemelerdeki Yorulma Hasarı Boyunca Çatlak Yayılması Olayları (Sakin, 2004).

Şekil 3.5’ de gösterilen olaylar tek yönlü ve çok tabakalı kompozit malzemelerin her ikisinde de oluşabilmektedir. Çok tabakalı kompozit malzemelerdeki tabakalardaki fiber açıları ve tabaka sayıları yorulma çatlaklarının ilerlemesinde büyük önem taşır. Çatlak yayılması genellikle fiberlere paralel yönde küçük engellemelerle ilerleyebilmektedir bu sebeple kompozit kesitindeki enine katmanlar statik yük ve yorulma yüklerinin her ikisinin altında ilk önce

hasar meydana gelecektir. Enine tabakalardaki çatlaklar, ara yüzey tabakalarındaki kesme çatlaklarını meydana getirerek ve çatlakların ölü körleştirilerek durdurulabilmektedir (Sakin, 2004).

Şekil 3.6 da ara tabaka vasıtasıyla çatlak yayılması görülmektedir.



Şekil 3.6. Ara Tabaka Vasıtasıyla Çatlak Yayılması (Sakin, 2004).

### 3.3.2 Kompozitlerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler

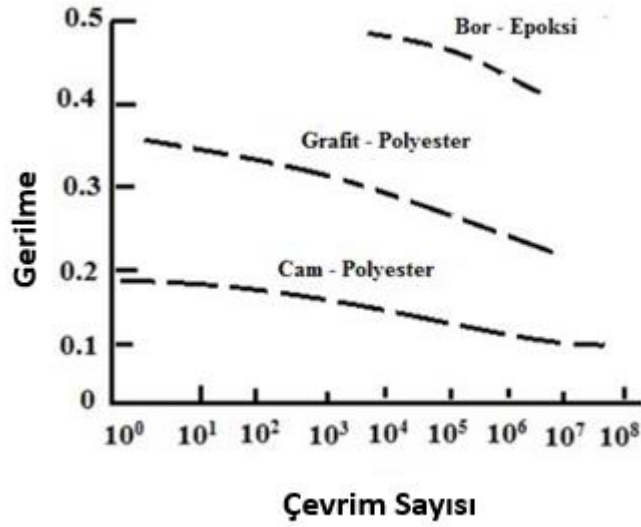
Kompozit malzemelerde yorulma hasarı aşağıdaki unsurlardan etkilenmektedir. Bunlar;

- Fiber özellikleri
- Matris özellikleri
- Yönelme etkileri
- Fiber hacmin etkileri
- Tabaka ayrılması (delaminasyon) etkileri, olarak kabaca sıralanabilmektedir.

#### 3.3.2.1 Fiber Özelliğinin Etkileri

Dayanımı ve rijitliği yüksek olan kompozit malzemelerin yorulma hasarına karşı gösterdikleri direnç değerleri oldukça yüksektir (Aydın, 2018). Rijitlik değeri yüksek olan takviye elemanları yani fiberler matriste meydana gelebilecek

olan şekil değişim değerini kısıtlar ve aynı zamanda matris malzemesinde oluşabilecek olan çatlağın ilerlemesini kısıtlar (Aydın, 2018). Yapının statik dayanımı ile yorulma hasarına gösterdiği direnç doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu sebeple malzeme ilk başta belirtildiği gibi rijitliği ve dayanımı yüksek olan takviye elemanlarından meydana geliyorsa yorulma hasarına karşı direnç yükselir (Aydın, 2018).



**Şekil 3.7.** Fiber Tipinin Kompozit Malzemenin Yorulma Dayanımına Etkisi.

Şekil 3.7’ de görülebileceği üzere en büyük yorulma dayanımı tek yönlü fiber kompozit malzemelerde görülmektedir (Şahin, 2011).

Devamlı ve devamsız fiber malzemeler arasındaki kesme çatlakları, devamlı fiberin etrafındaki dairesel bölgedeki (tümsek ve çukurlardan meydana gelen) düzensiz yüzeye doğru ilerlemektedir (Sakin, 2004).

### 3.3.2.3 Yönelme Etkileri

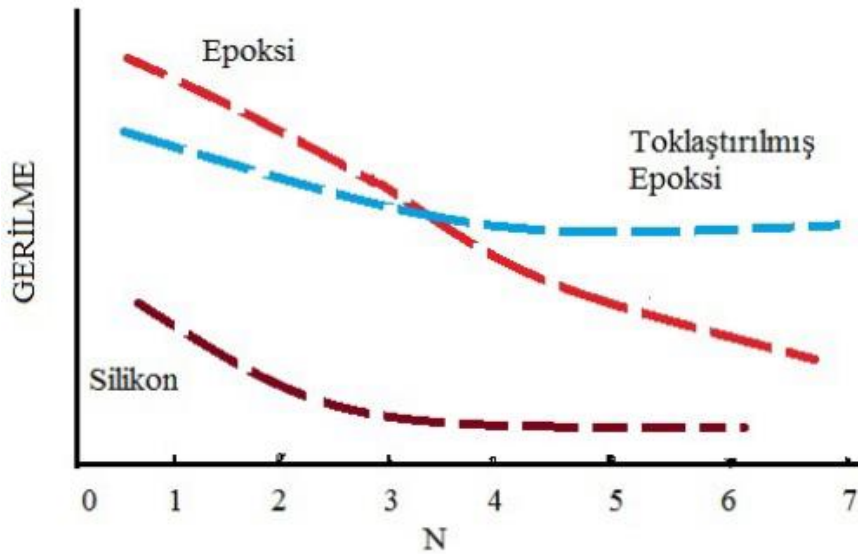
Fiberlerin oryantasyonunda, eksen yönündeki yük en büyük yorulma dayanımına sebebiyet vermektedir. Bu özellikle düşük çevrimli yorulmada

meydana gelmektedir. Eksen dışı yüklemde fiberler oryante edildiğinde boylamasına yırtılmalar çatlak ilerleme hızının düşmesine neden olmaktadır. Bu sayede, yüksek çevrimli rejimde yorulma ömründe artış meydana gelir. Bu etki, toplam yorulma dayanımı daha düşük olmasına karşın eksen dışı oryantasyonlarda daha fazla görülebilmektedir (M. Günaydın, 2003)

### 3.3.2.2 Matris Özelliğın Etkileri

Kompozit malzemelerde takviye malzemesine etkiyen yükü matris malzemesi üstlenmektedir (Aydın, 2018).

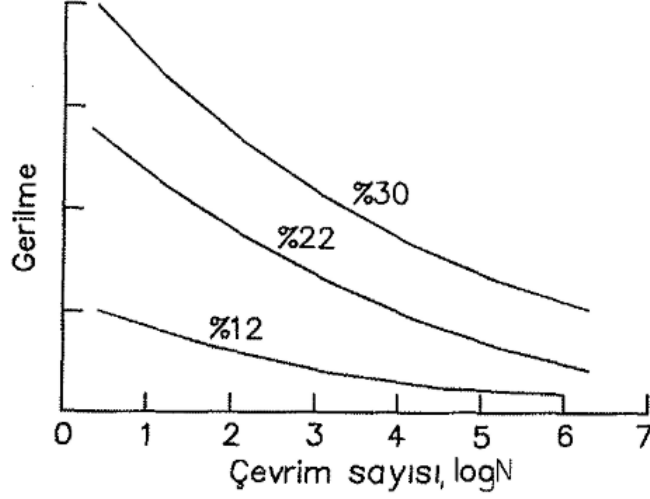
Kompozit malzemelerin üretimi sırasında takviye malzemeleri ve matris malzemeleri hacimsel bir oran ile birleştirilmelidir. Eğer matris malzemesi bu oranın altında kalırsa fiber-matris arasındaki bağın kopması beklenir buna aynı zamanda yüzey ayrılması da denilmektedir. Malzeme içerisinde bulunan matris malzemesinin tokluk değeri yükseldikçe kompozit malzemenin statik kazancı da söz konusu olmaktadır. Matris takviyesi gevrek özellik gösteren kompozit malzemeler yorulma hasarına karşı matris takviyesi sünek özellik gösteren kompozit malzemelerden daha fazla dayanım sağlamaktadır (Aydın, 2018).



Şekil 3.8. Değişik Matrisli Malzemelerin Gerilme ve Ömür Eğrileri (Aydın, 2018).

### 3.3.2.4 Fiber Hacminin Etkileri

Yorulma mukavemeti üzerine fiber oranının etkisi Şekil 3.9' da görülmektedir. Fiber oranı ne kadar yüksekse yorulma mukavemeti de aynı oranda yüksektir (Sakin, 2004).



Şekil 3.9. Kompozit Malzemelerin Yorulmasında Fiber Hacminin (Oranın) Etkisi (Aydın, 2018).

### 3.3.2.5 Tabaka Ayrılmasının (Delaminasyon) Etkileri

Delaminasyon olarak adlandırılan tabaka ayrılması hasarı kompozitlerin birbirinden ayrı tabakalarındaki ilerleyen çatlak olarak açıklanabilmektedir (Aydın, 2018).

Delaminasyonlar yani tabaka ayrılmaları 3 farklı biçimde oluşur, bunlar;

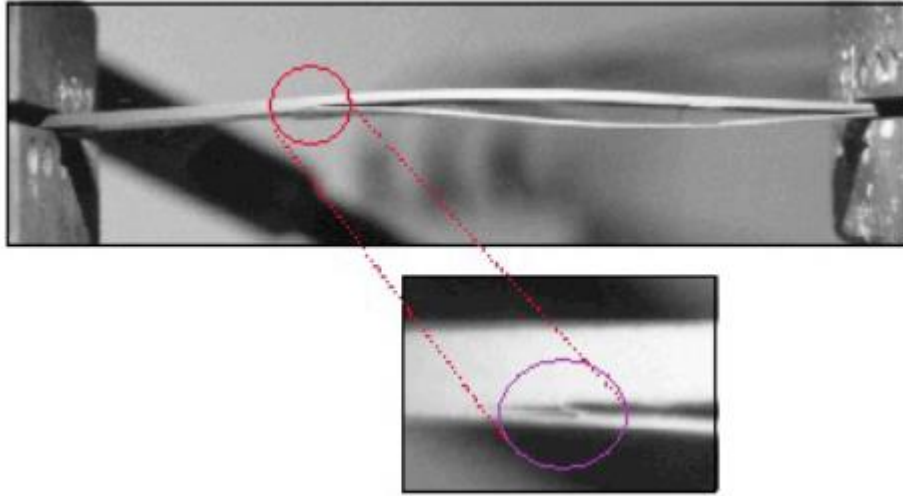
Başlangıç delaminasyonu: İç yapıda belli metriklerle tefrafloretillen şerit konumlandırılmasıyla meydana gelen çatlaklara denir (Aydın, 2018) .



**Şekil 3.10.** Başlangıç delaminasyonunun gösterimi (Aydın, 2018).

İnterlayer delaminasyon: Malzemelerdeki tabakalarında kırılma hasarı gerçekleşmeden ara yüzeylerde ilerleyen çatlak açıklanmaktadır (Aydın, 2018).

İntralayer delaminasyon : Çatlaklar ara yüzeye atlayabilir; çatlakların sıçradığı arayüzdeki katmanları kırar ve oryantasyonun değişmesine yol açar (Aydın, 2018).



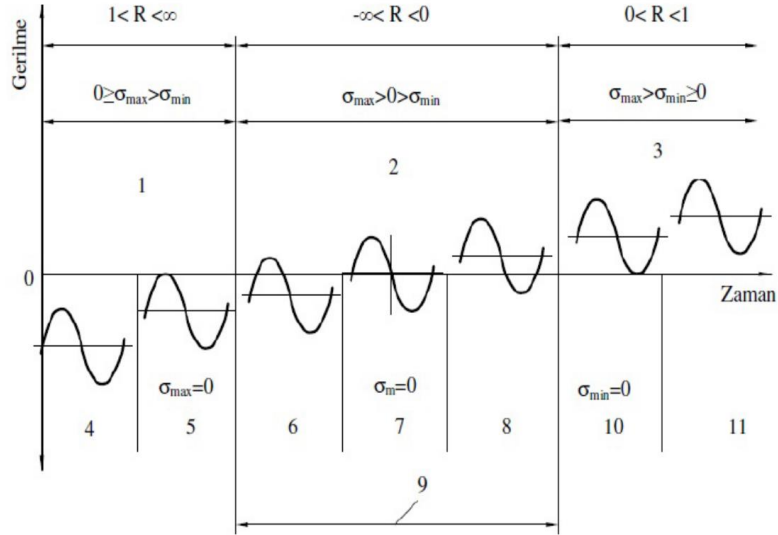
**Şekil 3.11.** İntralayer Delaminasyonun Gösterimi (Aydın, 2018).

### 3.4 Yorulma Deneyleri

Malzemelerin veya makine elemanlarının uygulanan yüklemeye karşın göstereceği performansı ve davranışı saptamak amacıyla gerçekleştirilen testlere yorulma deneyleri denir (M. Günaydın, 2003).

Yorulma deneylerinde genellikle yüklemenin sinüs dalgası şeklinde yüklemeler yapılır (Aydın, 2018).

R değerine karşılık gelen yorulma yük modları Çizelge 3.1' de gösterilmiştir. Çevrimsel yüklem tipleri ise Şekil 3.14' te gösterilmiştir.



**Şekil 3.12.** Yorulma Deneylerinde Kullanılan Çevrimsel Yüklem Tipleri(Aydın, 2018).

**Tablo 3.1.** Yorulma Deneyleri Sırasında Oluşan Yüklemelerin Tipleri

<b>1</b>	Basma - Basma Bölgesi	<b>7</b>	Tam Ters veya Alternatif Çevrim
<b>2</b>	Çekme - Basma Bölgesi	<b>8</b>	Çekme Ağırlıklı Alternatif Çevrim
<b>3</b>	Çekme - Çekme Bölgesi	<b>9</b>	Alternatif Çevrim
<b>4</b>	Basma - Basma Bölgesi	<b>10</b>	Sıfır - Çekme Çevrimi
<b>5</b>	Sıfır -Basma Bölgesi	<b>11</b>	Çekme - Çekme Çevrimi
<b>6</b>	Basma Ağırlıklı Alternatif Çevrim		

### 3.4.1 Eksenel Gerilmeli Yorulma Deneyi

Malzemenin uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmelerine maruz bırakarak uygulanan yorulma deneylerine eksenel gerilmeli yorulma deneyi denir (M. Günaydın, 2003).



### **3.4.2 Eğilme Gerilmeli Yorulma Deneyi**

Eğilme gerilmeli yorulma deneyi iki kısımda incelenebilir bunlar;

- Düzlemsel eğilme gerilmeli yorulma deneyi: Numune sabittir ancak eğilme gerilmesi uygulandığında numune harekete başlar.
- Dönen eğilme gerilmeli yorulma deneyi: Numune dönme hareketi yaparken numuneye eğilme gerilmesi uygulanır. Bu deney yükün uygulama durumuna göre, sabit eğme momentli ve ankastre kiriş şeklinde iki şekilde incelenebilir (Şahin, 2011).

### **3.4.3 Burulma Gerilmeli Yorulma Deneyi**

Numunenin tekrarlı burulma gerilmesine maruz kaldığı deneylere burulma gerilmeli yorulma deneyi denir.

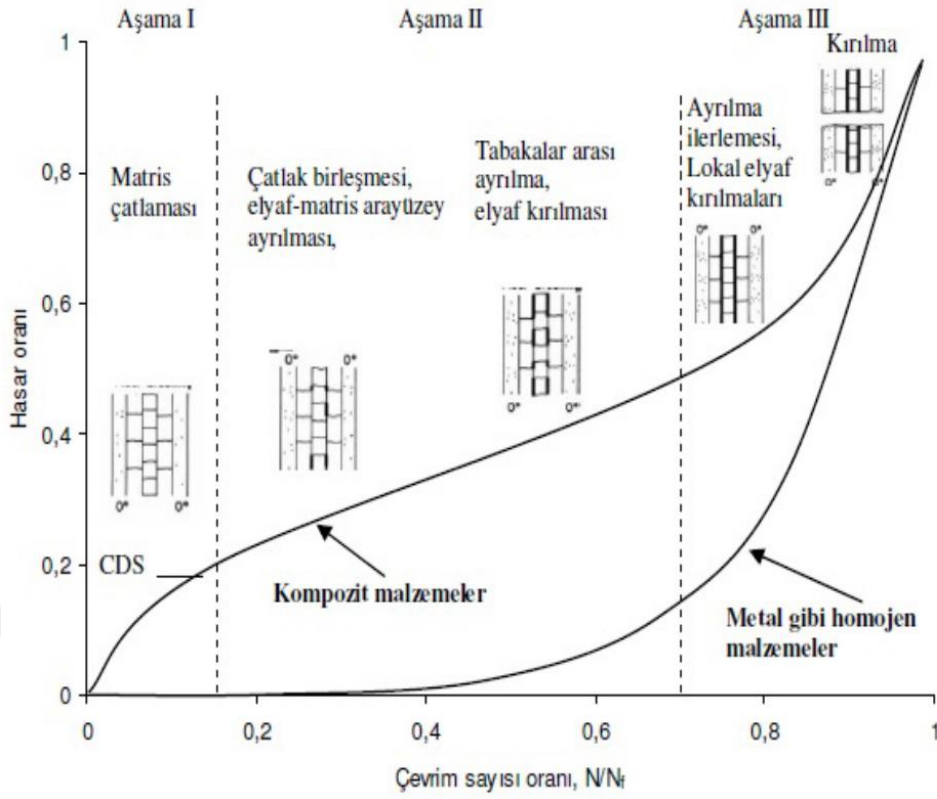
### **3.4.4 Bileşik Gerilmeli Yorulma Deneyi**

Numunenin farklı gerilme türlerine maruz kaldığı deneylere bileşik gerilmeli yorulma deneyi denir.

## **3.5 Yorulma Hasarı Oluşumu**

Bu hasarın gerçekleşebilmesinde ilgili yapının çekme gerilmesine maruz bırakılması ve gerilmenin dalgalanma veya değişim olması beklenmektedir ve bu sırada plastik şekil değişimi gerçekleşmesi de beklenmektedir. Malzemedeki çatlak çekme yüklemesindeki farklılıklar başlatmaktadır. Aynı şekilde büyümesi de çekme gerilmesinin etkisiyle gerçekleşir (Şahin, 2011).

Bu deneylerde çevrim sayısını saptamak için başlarda sabit büyüklükte değişken gerilmeler yüklenirken daha sonra yorulma hasarlarının malzemenin metalürjik özellikleri, tasarım kaynaklı ve çatlakların süreksizliklerinden başlayarak ilerlediği tespit edilmiştir. (Şahin, 2011).



**Şekil 3.13.** Çeşitli Malzemelerin Hasar Oranı-Çevrim Sayısı Oranları ve Karşılaştırılması (Aydın, 2018).

Kompozit malzemelerde hasar oluşumunun adımları Şekil 3.13’ de şematize edilmiştir bunu detaylı olarak incelemek gerekirse;

- Bu adımlar ilk kısım yorulma için geçen ömrün % 10 ila % 25’ i arasındaki alandır, ikinci kısım yorulma ömrünün %70 ila %80’ ini kapsarken üçüncü adım en çabuk gerçekleşen kısımdır (Aydın, 2018).

- İlk kısımda hasar matris çatlaklarında meydana gelirken ikinci kısımda tabalar arası ayrılmalar başlar ve ara yüzeylerde yer yer ayrılmalar görülürken üçüncü kısımda ise bir önceki kısımda ayrılma süreci başlayan tabakalardaki bu süreç tamamlanır ve elyaf kırılması süreci tamamlanır (Aydın, 2018).

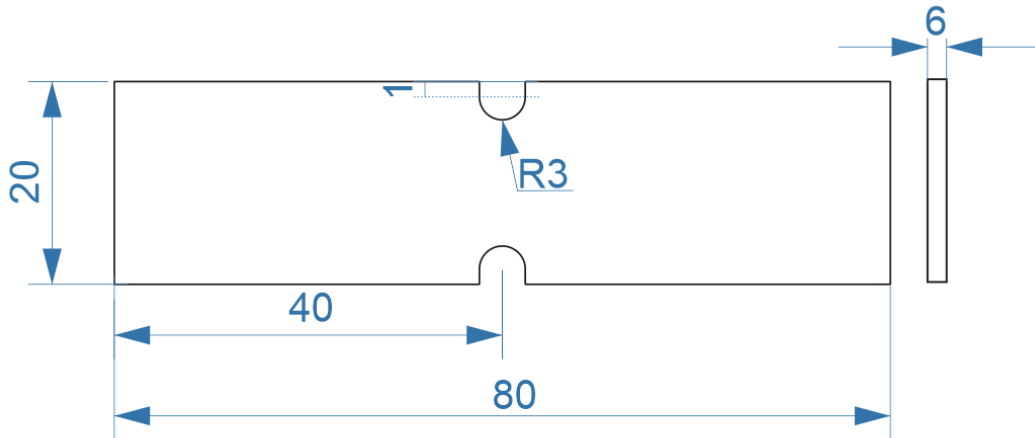
## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (MATERYAL VE YÖNTEM)

### 4.1 Numunelerin Hazırlanması

Numuneler büyük plakalardan Şekil 4.1' deki ve Şekil 4.2' deki ölçülerde alışılmamış imalat yöntemlerinden olan aşındırıcılı su jeti kullanılarak kesildi.

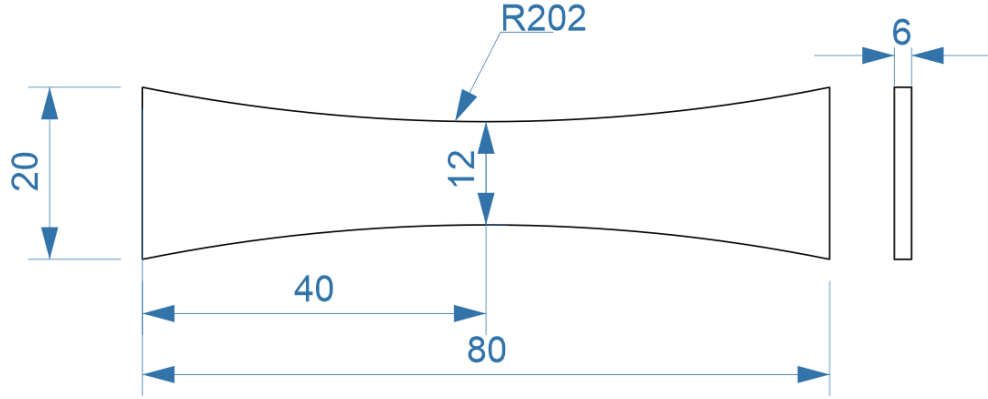
Sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulandı;

- Numunelerin su jetinde kesilebilecek şekilde makine çizimlerinin yapılması,
- Yapılan çizimlerin makineye yüklenmesi,
- Aynı kalınlıktaki başka bir malzeme üzerinde denenerek uygun parametrelerin belirlenmesi
- Plakadan max fire verilerek malzemelerin çıkarılması için ofset değerlerinin ayarlanması
- Plakanın bağlanması,
- Kesim işlemlerinin yapılması.



**ÖLÇÜLER "mm" CİNSİNDENDİR.**

Şekil 4.1. Çentikli Numunenin Ölçüleri



**ÖLÇÜLER “mm” CİNSİNDENDİR.**

**Şekil 4.2.** Çentiksiz Numunenin Ölçüleri

Çentiksiz numunenin düz olarak kesilmemesinin sebebi malzeme yorulma cihazına bağlandığında sıkışan kısımlarında kesit daralması olmasıdır. Bu kesit daralması malzemede çentik etkisi yaratır. Bu etkinin oluşmasını engellemek adına numune bu şekilde tasarlanmış ve kesilmiştir.

Numunenin çentik toleransları önemli olduğundan ve aynı zamanda kesim bölgesinin pürüzsüz olması gerektiğinden kesim işlemi için alışılmamış imalat yöntemlerinden olan aşındırıcılı su jeti ile kesim yöntemi tercih edilmiştir.

Numunelerin kesilebilmesi için aşındırıcılı su jeti makinesine uygun olarak çizimlerim Autocad programı ile çizilmiştir. Çizim sırasında makinenin dayamaları, ilerleme yönü dikkate alınmıştır.

Çizimin ardından Orwin programından yararlanılarak yapılan çizimin G kodları oluşturulmuştur. Makineye yüklenecek G kodları oluşmuştur. Bu G kodları makineye yüklenmiş ardından numune alınarak toleranslar kontrol edilmiştir.

Oluşturulan G kodları Şekil 4.3’ te görülmektedir.

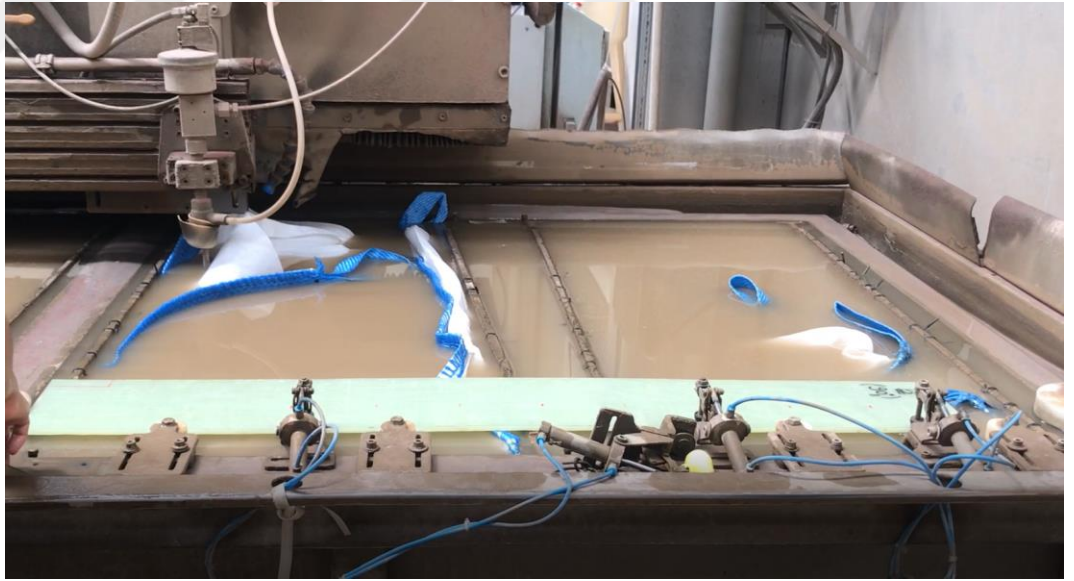
```
R3_DNM_0-6 - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
G90
G54
G641 ADIS=0.1
T1 D1
F600
G40
G0 X332.7238 Y277.8684
M51
G2 X332.2583 Y276.1859 I-0.4655 J-0.7769
G1 X294.0583 Y276.1859
G1 X294.0583 Y274.5859
G2 X289.2583 Y274.5859 I-2.4000 J0.0000
G1 X289.2583 Y276.1859
G1 X251.0583 Y276.1859
G1 X251.0583 Y254.9859
G1 X289.2583 Y254.9859
G1 X289.2583 Y256.5859
G2 X294.0583 Y256.5859 I2.4000 J0.0000
G1 X294.0583 Y254.9859
G1 X332.2583 Y254.9859
G1 X332.2583 Y276.1859
M50
```

**Şekil 4.3.** G kodları (Çentikli numunenin).

Çizimler makineye yüklendikten sonra yan yana çıkarılacak parçalar arasındaki mesafeler makine üzerinden ayarlanmış ve parametreler kaydedildikten sonra kesime başlanmıştır. Offset yani iki cisim arasındaki mesafelerin ayarı Şekil 4.6’ da görülmektedir.



**Şekil 4.4.** Numunelerin Çıkarılması İçin Kullanılan Aşındırıcılı Su Jeti (Streamline SL-V 50S Classic )



**Şekil 4.5.** Numunelerin Dayamalar Yardımıyla Gönayelenmesi ve Sabit Konuma Getirilmesi

Work offset							Further axes		
MCS	X	mm	MCS	X	mm				
	314.069	mm		82.069	mm				
	276.485	mm		131.186	mm				
	0.000	mm		0.000	mm				
	X	mm	Y	mm	Z	mm	X	Y	Z
G500	0.000		0.000		0.000		0.000	0.000	0.000
G54	-232.100		-230.000		0.000		0.000	0.000	0.000
G55	-232.000		-195.000		0.000		0.000	0.000	0.000
G56	-232.000		-170.000		0.000		0.000	0.000	0.000
G57	-232.000		-145.000		0.000		0.000	0.000	0.000
G58	-232.000		-120.000		0.000		0.000	0.000	0.000
G59	0.000		0.000		0.000		0.000	0.000	0.000
Program	0.000		0.000		0.000		0.000	0.000	0.000
Scale	1.000		1.000		1.000				
Mirror	0		0		0				
Total	-232.000		-145.000		0.000		0.000	0.000	0.000

Şekil 4.6. Numuneler Arasındaki Offset değerlerinin Ayarlanması



Şekil 4.7. Kesilen Örnek Numunelerde Ölçü Kontrollerinin Yapılması.

Örnek numune üzerinde ölçü ve offset kontrollerinin yapılmasının ardından kullanacağımız plakaya kesim işlemine başlanmıştır.

**Tablo 4.1.** Kesim İçin Kullanılan Parametreler.

Parametre	Değer	Birim
Su Basıncı	3.450	Bar
İlerleme Hızı	160	mm/dk
Nozzle apı	0.7	mm
Nozzle - Cam Arası Mesafe	1.8	mm
Kum Miktarı	310	gr/dk

Kesim sırasında kullanılan ve Tablo 4.1’de gösterilen parametrelerin yanı sıra aşındırıcılı su jetinde kullanılan suyun ve kumun özellikleri önemlidir.

Kullanılan su arıtma tesislerinde özel kum filtreleri ve aktif karbon filtrelerinden geçirilerek yumuşatılmakta ve varsa içeriğinde partiküllerden arındırılmaktadır. Bu kesim yüzey kalitesi, kesim toleransları ve yüksek basınç altında çalışan parçaların ömrü açısından son derece önemlidir.

Aşındırıcılı su jetinde kesim kalitesini etkilen en önemli bileşen içerisindeki kumdur. Kumun zellikleri Şekil 4.8’ deki garanti sertifikasında detaylı olarak verilmiştir.



QUALITY CERTIFICATE					
Customer Name	:	EKSPERT MUMESSILLIK TUR.SAN.TIC.LTD.STI	Invoice No	:	IV 1809/01236
P.O. No.	:		Qty – MT	:	25 MT
Product	:	GARNET	Packing	:	25KG BAG
Size	:	MESH 120	Bag No.	:	1-25
			Batch No	:	18020254
TESTED IN SUPPLIER LAB					
Chemical Composition		Mineralogical Content		Physical Characteristic	
Elements	%				
SiO <sub>2</sub>	37.5	Garnet	98.5%	Hardness	7.5 Mohs
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.6	Ilmenite	1.35%	Bulk Density	2.4 t/m <sup>3</sup>
FeO	28.2	Quartz	0.1 5%	Moisture	0.20%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0				
TiO <sub>2</sub>	1.6				
MnO	0.5				
CaO	1.5				
MgO	7.5				
Sieve Analysis (ISO 11127-2)			Sieve Analysis in Graphical Representation		
Mesh (ASTM)	Micron	% Retained			
60	250	0.0			
80	180	5.6			
100	150	30.2			
120	125	53.0			
140	106	7.7			
Pan		3.5			
		100 %			

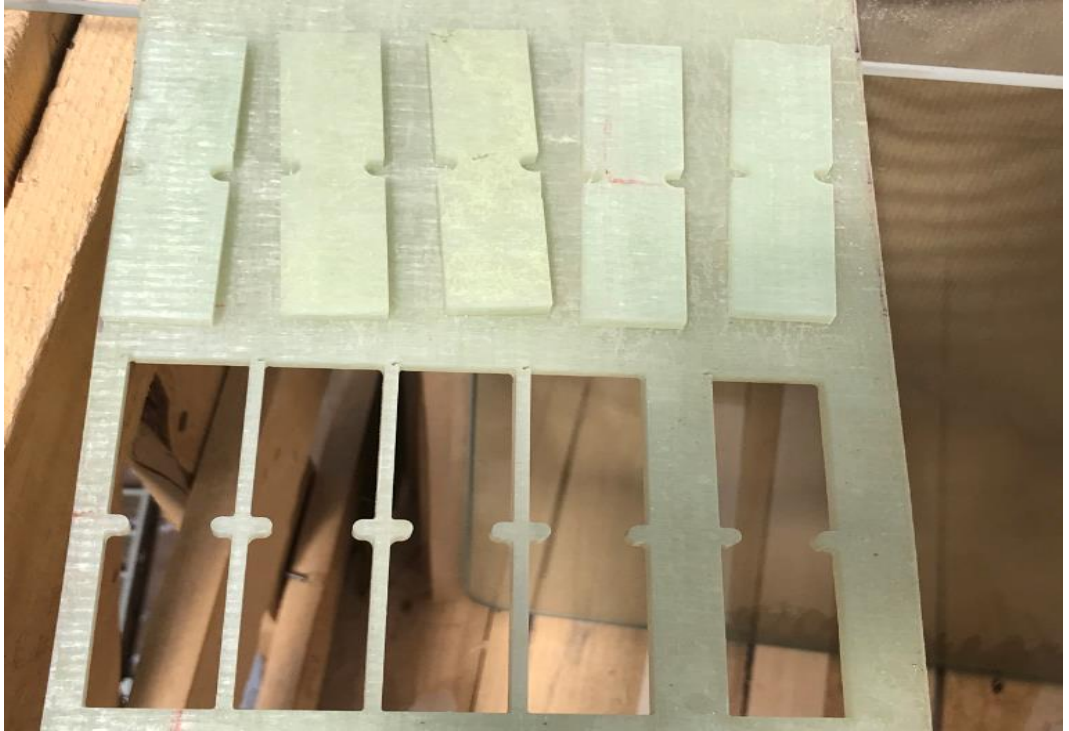
Şekil 4.8. Aşındırıcılı Su Jetinde Kullanılan Kumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.



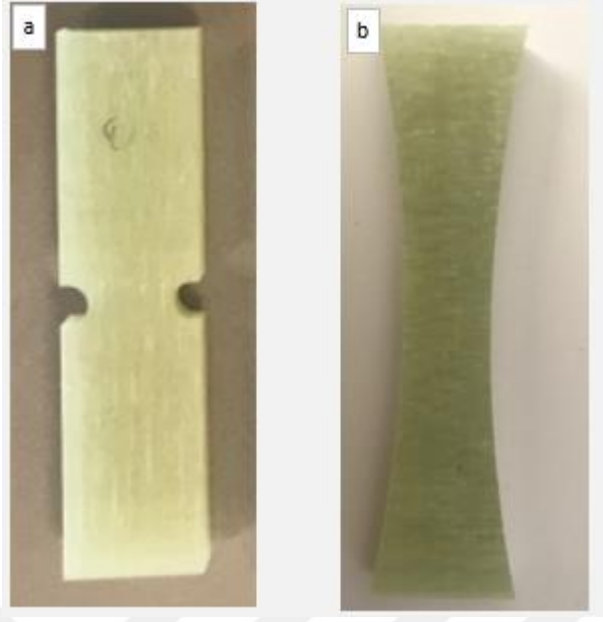
Şekil 4.9. Kumun Mikroskop Altındaki Görüntüsü (12X büyütülmüş görüntü).



**Şekil 4.10.** Aşındırıcı Su Jeti ile Numunelerin Kesilmesi.



**Şekil 4.11.** Çıkarılan Numuneler.



**Şekil 4.12.** Çıkarılan Numunelerin Gösterimi (a: Çentikli Numune b: Çentiksiz Numune).

#### 4.2 Yorulma Deneylerinin Yapılması

Deney yapılacak numuneler açıklarına ve çentik durumlarına göre seçilmişlerdir.

Yorulma deneyleri aşağıdaki sırayla gerçekleştirilmiştir;

- Numunenin test için hazırlanması,
- Numunenin yorulma cihazı çenelerine yerleştirilmesi,
- Yorulma cihazının yüklerinin sıfırlanması,
- Manuel yük kontrolünün pasif hale getirilmesi,
- Bilgisayar üzerinde test konfigürasyonlarının (deney standartı seçme, girilecek yük, hertz ve çevrim sayısı) hazırlanması,
- Deneyin başlatılması,
- Yorulma gerçekleşikten sonra verilerin kaydedilmesi.

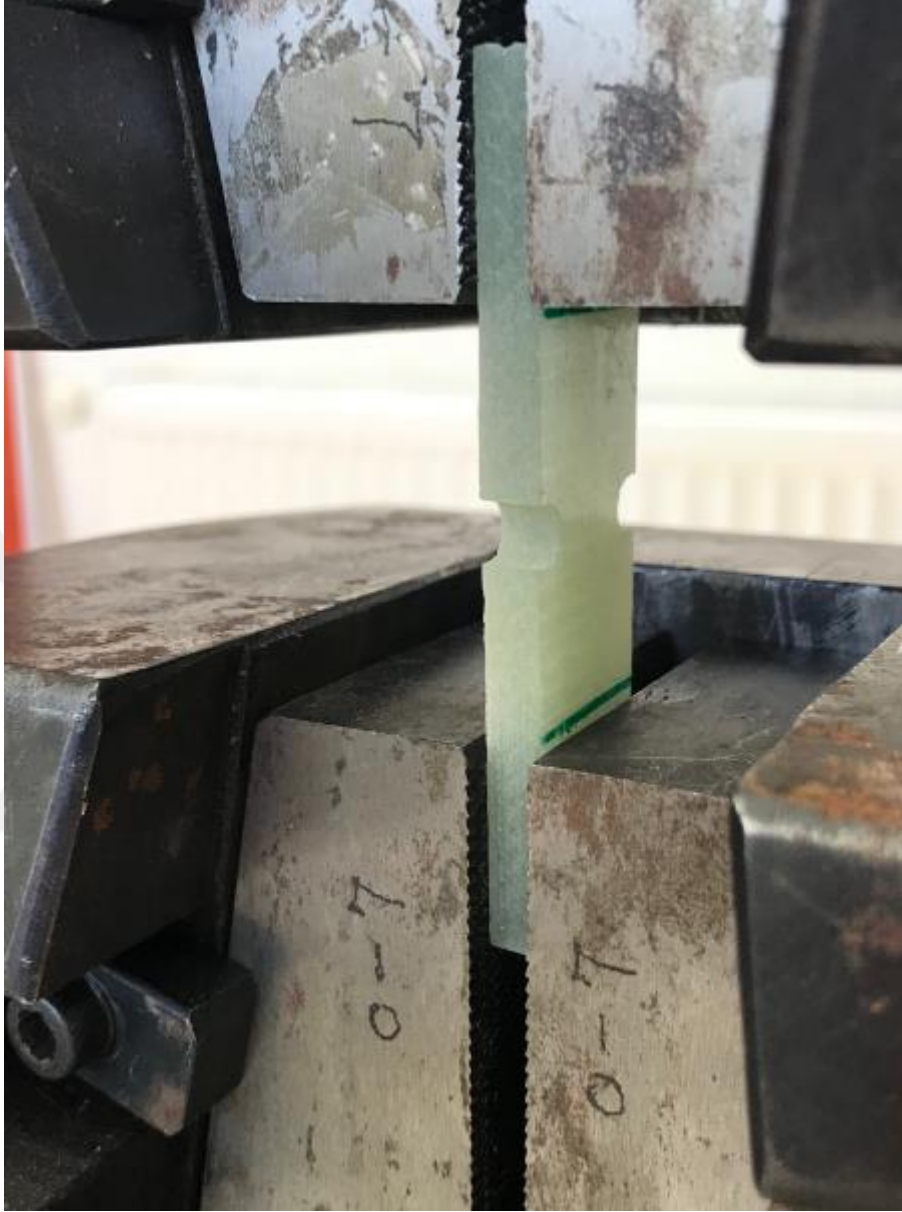
Hazırlanan numunelerin iki taraftan eşit bağlanabilmesi için üzerinde işaretlemeler Şekil 4.13’ deki gibi yapıldı.



**Şekil 4.13.** Numunenin Hazırlanması.



**Şekil 4.14.** Yorulma Cihazı



**Şekil 4.15.** Numunenin Yorulma Cihazına Bağlanması

Numune yorulma cihazına bağlandıktan sonra test kontrol ünitesindeki yüklemeler sıfırlanmalıdır. Bunları Şekil 4.16’ da gösterilen ekrandaki F4 ve F5 tuşlarına basarak yapabiliriz.



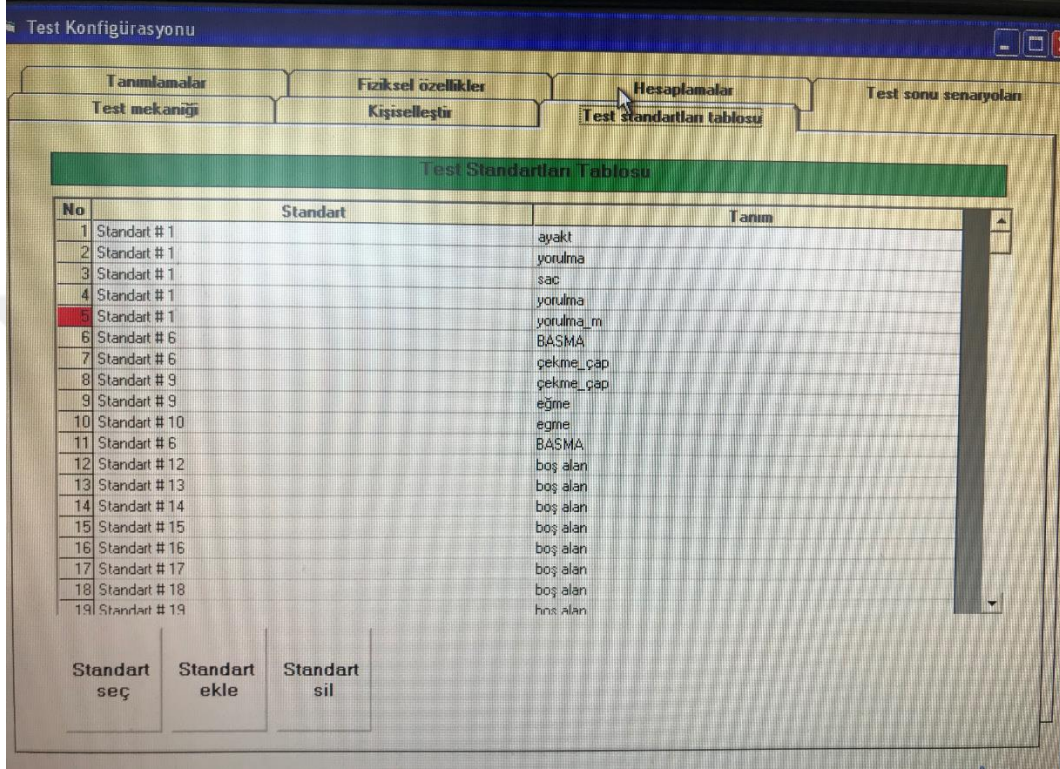
Şekil 4.16. Test Kontrol Paneli.

Yükler sıfırlandıktan sonra bilgisayar üzerinden testin ayarlanabilmesi için Şekil 4.17’de görülen manuel yükleme tuşunun kapatılması gerekmektedir.

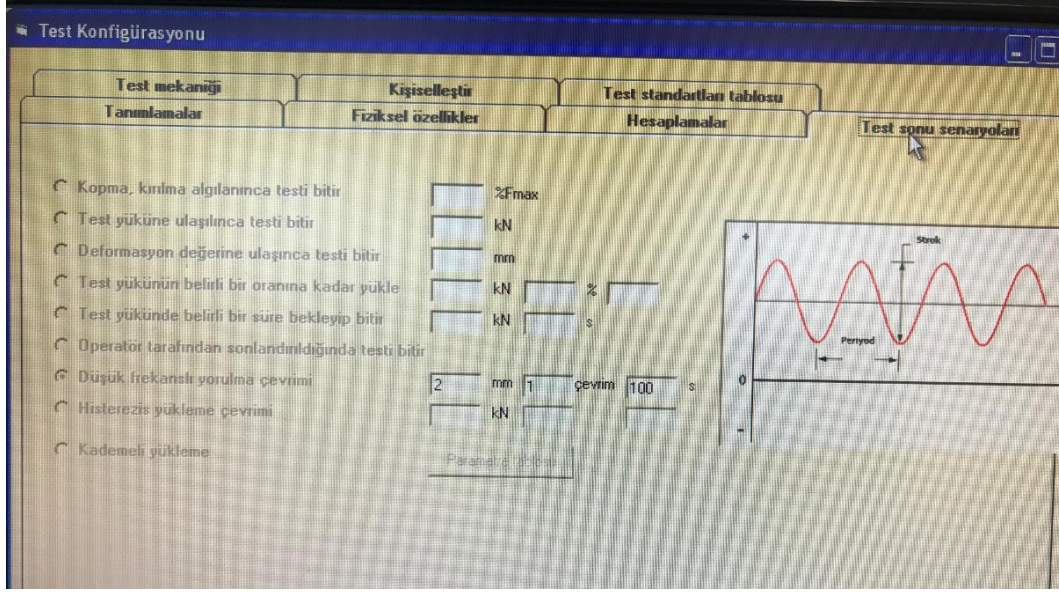


Şekil 4.17. Makine Kontrol Paneli ve Düğmelerin Gösterimi.

Manuel yükleme tuşu pasif hale getirildikten sonra Şekil 4.18’ de gözüken ekrandan 5 numaralı test standartı seçilmelidir. Bunun ardından Şekil 4.19’ deki ekrana numunenin gerçekleşeceği deney şartları girilmeli ve yeni numune ekledikten sonra deney başlatılmalıdır.



Şekil 4.18. Cihaz Üzerinde Test Standartının Seçilmesi.



Şekil 4.19. Deneyde Kullanılacak Olan Parametrelerin Girildiği Ekran.

Deney bitiminde Şekil 4.20' deki ekrandan deney sonuçları görülebilmektedir.

Hesaplanan değerler		
Deformasyon (mm)	1.895	Sertlik değeri (HRC)
Son boy (mm)		Yayıllı yük (kN/m)
Uzama oranı (%)		Yapışma day. (N/mm)
Kısalma oranı (%)		Yay sabiti k (N/m)
Agt (mm)		E modülü (N/mm <sup>2</sup> )
%Agt (%)		Biçme kuv. (N/mm <sup>2</sup> )
Max. yük (kN)	8.970	Kopma yükü (kN)
Gerilme day. (N/mm <sup>2</sup> )	373.750	Kopma uz. (mm)
Eğilme day. (N/mm <sup>2</sup> )	0.000	Kopma uz. (%)
Akma yükü (kN)		Kopma ger. (cN/tex)
Akma day. (N/mm <sup>2</sup> )	244.583	Kelici deform. (mm)
Enerji absorb. (J)		Yarıballı steb. (kN)
Akma day. %0.2 (N/mm <sup>2</sup> )		Marshall akma (mm)
E modülü (MPa)		% uzama yükü (kN)
Kopma day. (N/mm <sup>2</sup> )		% uzama day. (N/mm <sup>2</sup> )
Ort. yük (kN)		

Şekil 4.20. Deney Sonucu İzleme Ekranı.



Deney bitiminde numuneler tek tek fotoğraflanmış ve deney sonuçları kaydedilmiştir.

### 4.3 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analiz Yapılması

Deneyde fiber malzemesi cam-elyaf, matris malzemesi epoksi olan  $[0^0]_8$  (0 derece simetrik fiber dizilimine sahip 8 tabakalı yapı) ve  $[90^0]_8$  (90 derece simetrik fiber dizilimine sahip 8 tabakalı yapı) tabakalı kompozit malzemeden kesilmiş numuneler kullanılmıştır.

**Çizelge 4.1.** Cam-elyaf epoksi kompozit malzemenin teknik özellikleri

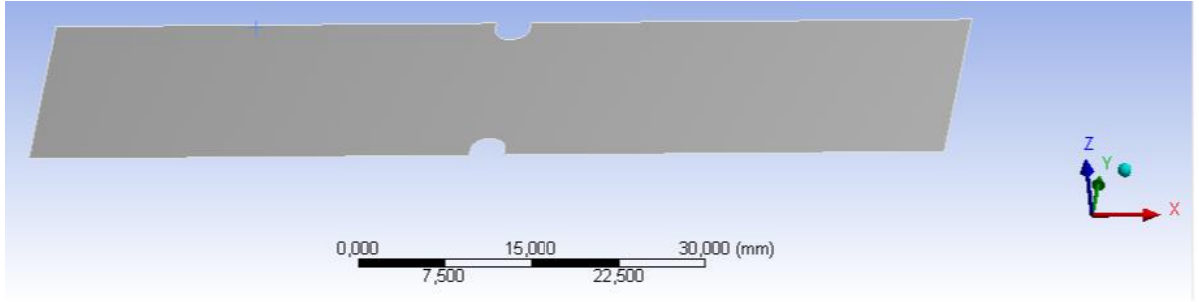
$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$\nu_{12}$	$X_t$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$X_c$ (MPa)	$Y_c$ (MPa)	$S$ (MPa)	$V_f$ (%)
36200	15400	6340	0.28	935	87	935	151	84	60

DeneySEL sonuçlar ile karşılaştırarak deneyin ve nümerik analizin doğruluğunu karşılaştırmak için her bir tabaka kalınlığı 0,75 mm olan 8 tabakalı numune oluşturulmuş malzeme özellikleri girilmiş ve ANSYS ile çekme gerilmesi altındaki yorulma analizleri yapılmıştır.

Yapılan işlemler sırasıyla;

- CAD (Computer Aided Design-Bilgisayar Destekli Tasarım) numunenin oluşturulması
- Numunenin Çizelge 4.1' de gösterilen özelliklerinin girilmesi
- Numunenin tabakalarının ve fiber açılarının girilmesi
- Modelin analiz için küçük parçalara ayrılması (Meshing)
- Modelin sabitlenmesi ve çekme için baskının ayarlanması
- Sonuçların görüntülenmesi

Malzemenin CAD çizimi eksenler dikkate alınarak çizilmiştir. Bu kısımda önemli olan aşama şekli katı cisim gibi seçmemektir. Katı cisim olarak çizilen modellerde tabaka tanımlaması yapılamamaktadır. Model şekil 4.21 de görülmektedir.



**Şekil 4.21** Numunenin CAD modelinin oluşturulması.

Engineering data sekmesinden Çizelge 4.1’ de yer alan malzeme özellikleri girilmiştir.

Geometri sekmesinden layered section seçeneğine tıklayarak worksheet sayfası açıldığından tabaka sayıları, tabaka kalınlıkları ve açılar Şekil 4.22’ te görüldüğü gibi girilebilmektedir. Malzememiz 6 mm kalınlığında ve 8 tabakalı olduğundan her bir tabaka 0,75 mm olacak şekilde girilmiştir.

Layer	Material	Thickness (mm)	Angle (°)
(+Z)			
8	Epoxy-Glass	0,75	90
7	Epoxy-Glass	0,75	90
6	Epoxy-Glass	0,75	90
5	Epoxy-Glass	0,75	90
4	Epoxy-Glass	0,75	90
3	Epoxy-Glass	0,75	90
2	Epoxy-Glass	0,75	90
1	Epoxy-Glass	0,75	90
(-Z)			

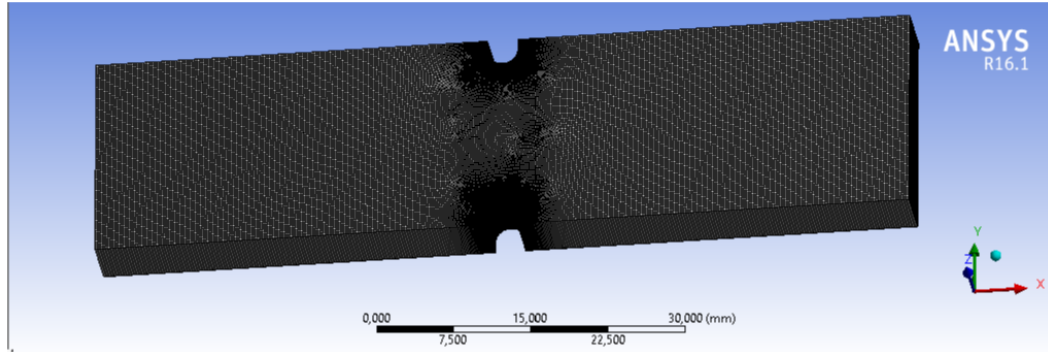
**Şekil 4.22.** Tabakaların ve Fiber Açılarının Girilmesi.

Malzemenin analizinin doğru yapılabilmesi için meshlemek denilen küçük parçalara ayırma işleminin doğru yapılması son derece önemlidir. Mesh ile yapılan parçalardaki yamulmalar dikkate alınarak olabilecek en iyi analizi yapabilecek şekilde yapılmalıdır. Bu malzemedeki çentik kısımlarında meshlerde bozulmalar olmuştur bunun için özellikle kenarlardaki parçalar dikkate alınarak

hazırlanmıştır. Malzememizin mesh özellikleri Şekil 4.23' te görülmektedir. Mesh yapıldıktan sonraki hali ise Şekil 4.24 te görülmektedir.

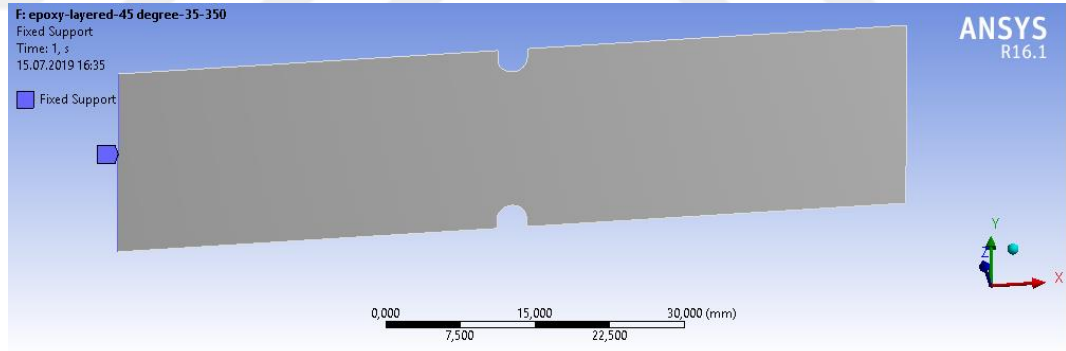
Details of "Mesh"	
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Si...	On: Proximity
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Num Cells Acr...	100
Proximity Size Fu...	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Proximity Min ...	Default (0,995920 mm)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (4,97960 mm)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
Minimum Edge L...	1,0 mm
<b>Inflation</b>	
<b>Patch Conforming Options</b>	
<b>Patch Independent Options</b>	
<b>Advanced</b>	
Number of CPUs ...	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside ...	Program Controlled
Straight Sided El...	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For ...	Yes
Rigid Body Beha...	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
<b>Defeaturing</b>	
Use Sheet Thickn...	No
Pinch Tolerance	Default (0,896330 mm)
Generate Pinch o...	No
Sheet Loop Rem...	No
Automatic Mesh ...	On
<input type="checkbox"/> Defeaturing T...	Default (0,746940 mm)
<b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	39554
<input type="checkbox"/> Elements	38881
Mesh Metric	None

Şekil 4.23. Numunenin Mesh Özelliklerinin Girilmesi.

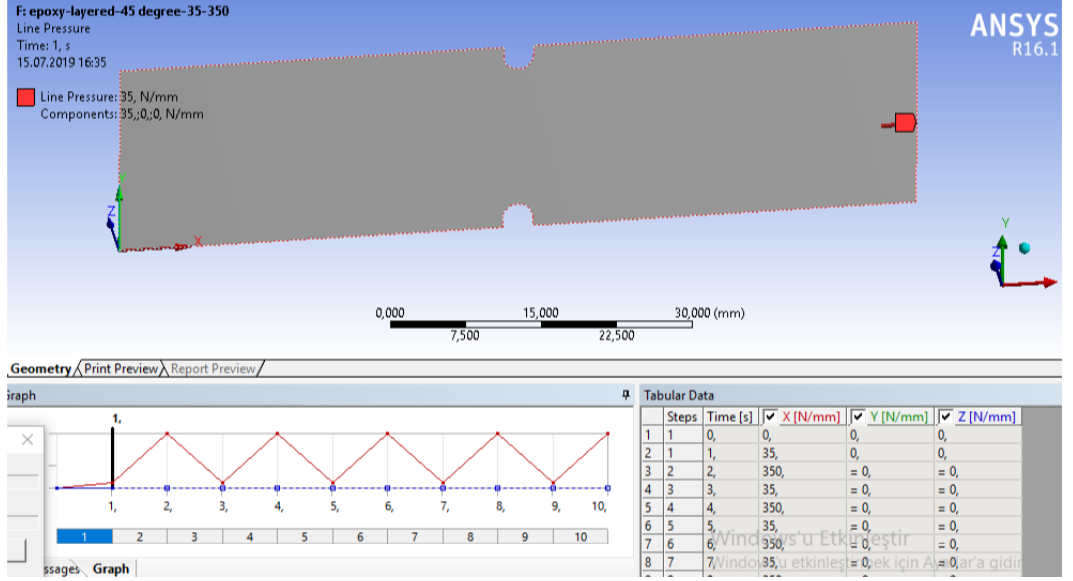


**Şekil 4.24.** Mesh Yapılmış Modelin Görünümü .

Modeli çekme gerilmesi altında analiz edebilmek için önce koordinat sistemleri tanımlamamız ve ardından sabitleneceği noktayı seçmemiz gerekmektedir. Bu işlemleri fixed support kısmından gerçekleştirebiliriz. Modelin sabitlenmiş hali Şekil 4.25’ de görülmektedir. Ardından yükün uygulanacağı kenar belirlenerek yükün uygulanacağı koordinat belirtilmiştir. Bu adım için ise Şekil 4.26’ da görüldüğü gibi line pressure kısmı kullanılmaktadır.



**Şekil 4.25.** Modelin Sabitlenmesi.

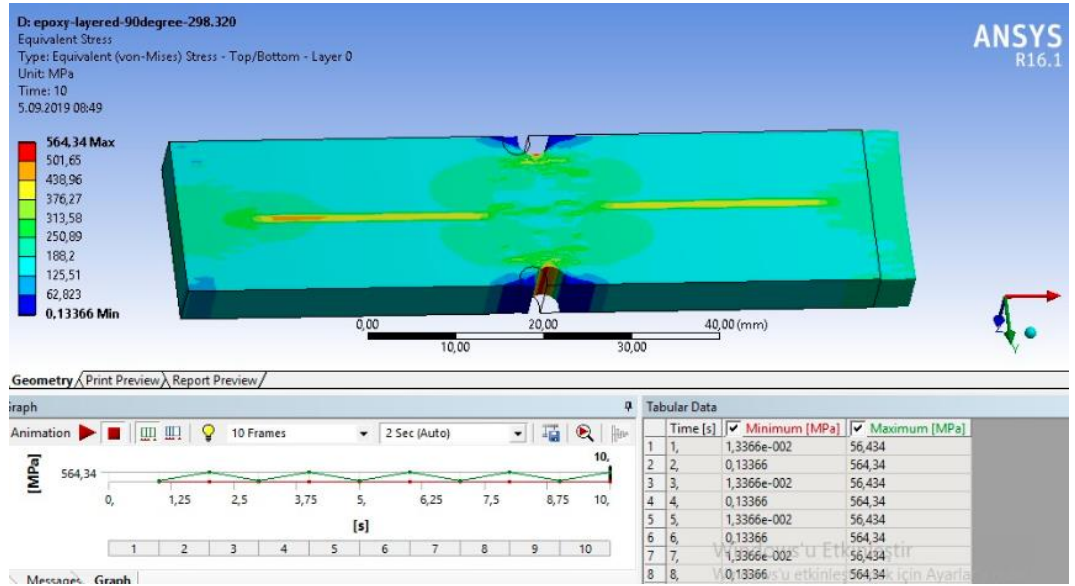


**Şekil 4.26.** Modelin Çekme Yüzeyinin Belirlenmesi ve Çekme Gerilmelerinin Girilmesi.

Model belirlenip çekmenin uygulanacağı kısım belirtildikten sonra çekme gerilmeleri ve uygulama saniyeleri altta açılan pencereden girilebilmektedir.

Analiz sonucu görmek istediğimiz verileri seçtikten sonra analizi başlatıyoruz. Bu çalışma için deformasyon ve eşdeğer gerilmeyi seçtik.

Şekil 4.27’da malzemenin deneme sonucundaki gerilme durumu ve hangi noktalarda hataların fazla gözüktüğü analiz edilebilmektedir.



Şekil 4.27. Eşdeğer Gerilmenin Görüntülenmesi.

Denemeler yapıldıktan sonra deneysel sonuçlar ve nümerik sonuçlar bir tabloya yazılmıştır.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Numuneler üzerinde yapılan deneyler ve ANSYS ile yapılan modellemelerin tamamlanılmasının ardından çıkan sonuçlar 5.1 ve Tablo 5.2’ de görülmektedir.

Tabloda yorulma ömürleri, maksimum çekme gerilmeleri ve aynı zamanda maksimum çekme gerilmelerinin deneysel ve ANSYS sonuçları ve bunların sapmaları görülmektedir.

Tablodaki veriler numunenin fiber dizilim açısı ve çentik durumuna göre gruplanmıştır.

**Tablo 5.1.**  $[0^0]_8$  ve  $[90^0]_8$  Dizilimlerine Sahip Çentikli ve Çentiksiz Numunelerin Yorulma Ömürlerinin Gösterilmesi ve Gerilme Dayanımlarının Deneysel Sonuçları ile Ansys Modellemesinin Sonuçlarının Kıyaslanması

Numune Özellikleri				Yorulma Ömrü (cycle)	Gerilme Dayanımı Karşılaştırması		
No	Fiber Açısı (derece)	Çentik	Verilen Yük (kN)	Yorulma Ömrü(Deneysel) (cycle)	Deneysel Veri (MPa)	Ansys Modellemesi (MPa)	Fark (%)
1	0	var	6,6	1.320	107,40	116,40	8,4%
2	0	var	6,6	1.350	109,00	116,40	6,8%
3	0	var	6,6	1.360	108,30	116,40	7,5%
4	0	yok	6,6	15.600	138,60	145,60	5,1%
5	0	yok	6,6	15.960	139,70	145,60	4,2%
6	0	yok	6,6	14.900	132,90	145,60	9,6%

**Tablo 5.2.**  $[0^0]_8$  ve  $[90^0]_8$  Dizilimlerine Sahip Olan Çentikli Numunelerin Yorulma Ömürlerinin Gösterilmesi ve Gerilme Dayanımlarının Deneysel Sonuçları ile Ansys Modellemesinin Sonuçlarının Kıyaslanması.

Numune Özellikleri				Yorulma Ömrü (cycle)	Gerilme Dayanımı Karşılaştırması		
No	Fiber Açısı (derece)	Çentik	Verilen Yük (kN)	Yorulma Ömrü(Deneysel) (cycle)	Deneysel Veri (MPa)	Ansys Modellemesi (MPa)	Fark (%)
1	90	var	40,4	16.530	509,20	564,34	10,8%
2	90	var	40,4	17.240	516,90	564,34	9,2%
3	90	var	40,4	16.970	512,80	564,34	10,1%

Çentikli numunelerde  $[0^0]_8$  ve  $[90^0]_8$  fiber dizilimlerine sahip numuneler karşılaştırıldığında  $[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip numune ortalama 1.350 çevrim ömre sahipken  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip numune ortalama 16.900 çevrim ömre sahiptir. Bu da demek oluyor ki  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelerde ömür  $[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelere oranla 12.5 kat daha fazladır.

Çentikli numunelerde kopma sonucunda görülen max gerilme değerleri karşılaştırıldığında  $[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelerde bu değer ortalama 108 MPa iken  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelerde bu değer ortalama 512 MPa'dır. Bu ise  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelerin  $[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelere oranla yaklaşık 4.7 kat daha fazla gerilme değerine dayanabildikleri söylenebilir.

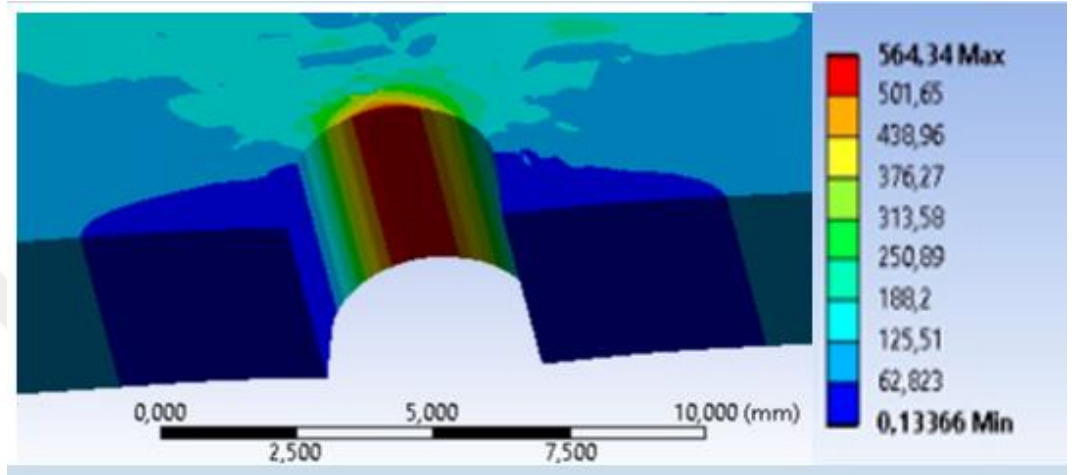
$[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip çentikli numune ile çentiksiz numune karşılaştırıldığında; çentiksiz numune çentikli numuneye oranla 11.4 kat daha geç yorulurken 1.3 kat daha fazla gerilme dayanımı göstermektedir.

$[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip çentiksiz numune 90.000 döngüden sonra makine yükü kaldırmadığından deney tamamlanamamıştır ancak ANSYS modellemesinde 240.000 döngüde 592,80 MPa max gerilmeye çıktığı görülmüştür.



Hem deneysel hem de ANSYS ile yapılan analizlerde malzemenin beklendiği gibi en çok hasarı alındığı kısım çentikler oldu ve max gerilme değerleri bu kısımda gözüktü. Şekil 5.1' de ANSYS' teki Şekil 5.2' de deneysel numunelerdeki gösterimleri görölmektedir.

Şekil 5.1' de yan tarafta bulunan renk skalasından ilgili numunenin hangi bölgesinde ne kadarlık bir çekme kuvvetine maruz kaldığı görölebilmektedir.



Şekil 5.1. Yorulma Deneyi Sırasında Çentikte Görülen Hasar (ANSYS).

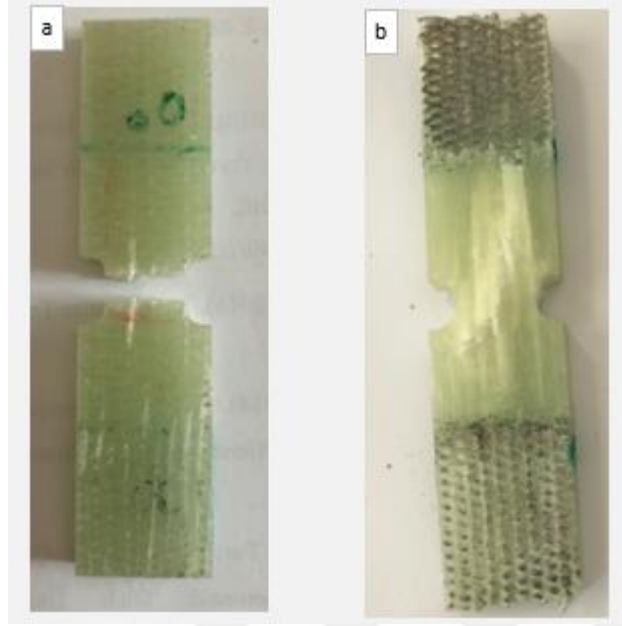


**Şekil 5.2** Yorulma Deneyi Sırasında Çentikte Başlayan Hasar (Deneysel).

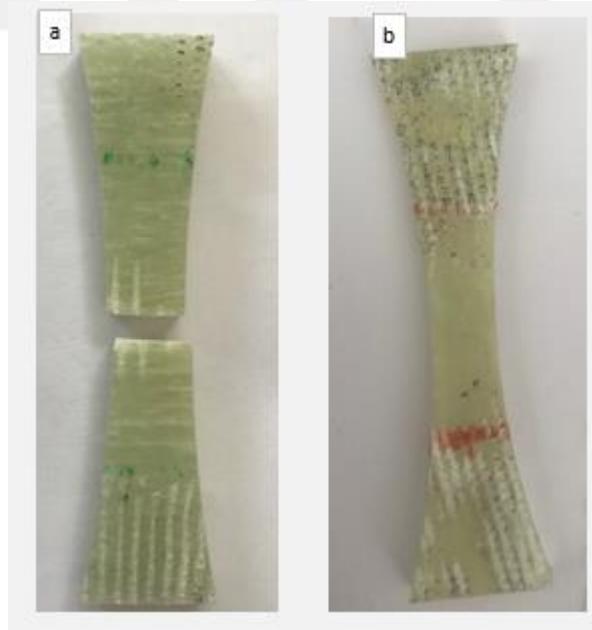


**Şekil 5.3.** Yorulma Deneyi Sırasında Çentiksiz Numunede Başlayan Hasar (DeneySEL).

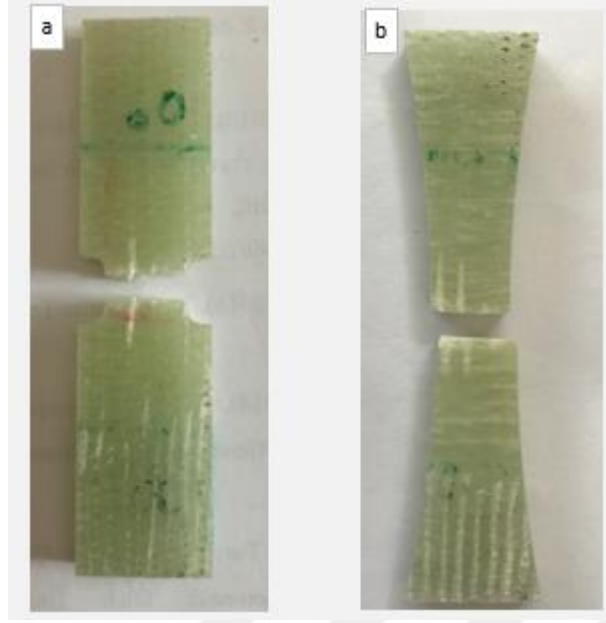
$[0^{\circ}]_8$  ve  $[90^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip çentikli numunelerde Şekil 5.2' de görüldüğü gibi hasar çentikten başlayarak ilerlemiştir. Özellikle  $[90^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip numunede tabakalar arası ayrılma açıkça görülmektedir. Numuneler fiber açıları doğrultusunda hasarı iletmişlerdir. Çentiksiz numunede ise Şekil 5.3' de görüldüğü gibi hasar malzemenin kesit alanının en az olduğu orta noktasından başlamıştır.



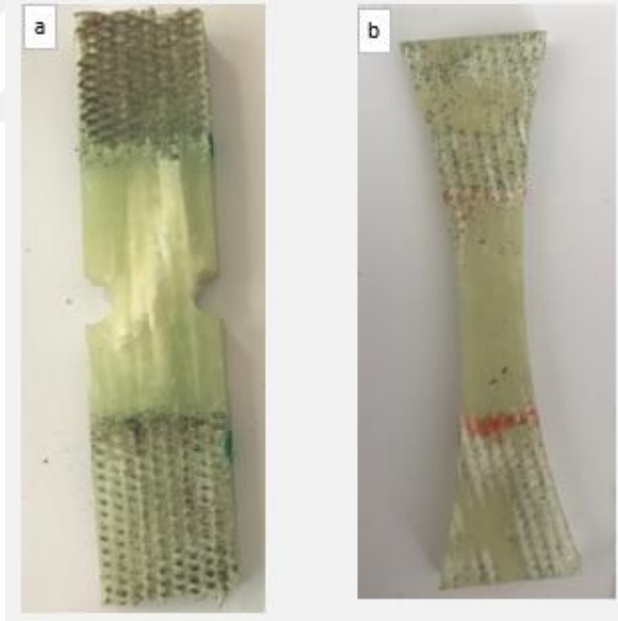
**Şekil 5.4.**  $[0^{\circ}]_8$  ve  $[90^{\circ}]_8$  Fiber Dizilimine Sahip Çentikli Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a:  $[0^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip çentikli numune b:  $[90^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip çentikli numune)



**Şekil 5.5.**  $[0^{\circ}]_8$  ve  $[90^{\circ}]_8$  Fiber Dizilimine Sahip Çentiksiz Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a:  $[0^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip çentiksiz numune b:  $[90^{\circ}]_8$  fiber dizilimine sahip çentiksiz numune)



**Şekil 5.6**  $[0^\circ]_8$  Fiber Dizilimine Sahip Çentikli ve Çentiksiz Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a: Çentikli Numune b: Çentiksiz Numune)



**Şekil 5.7.**  $[0^\circ]_8$  Fiber Dizilimine Sahip Çentikli ve Çentiksiz Numunelerde Hasar Sonrası Görünüm (a: Çentikli Numune b: Çentiksiz Numune)

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler sonucunda 8 tabakalı fiber malzemesi cam-elyaf, matris malzemesi epoksi olan tabakalı kompozit malzemelerin yorulma davranışları incelenmiştir. Bu denemeler sonucunda üzerinde çentik bulunan numuneler çentiksiz numunelerle kıyaslandığında yorulma hasarına karşı dayanımlarının düşük olduğu görülmüştür.

Çentikli numunelerin deney sırasındaki hasarı ve ANSYS ile yapılan analiz sonucu hasarı incelendiğinde hatanın çentikten başladığı çok net şekilde görülmektedir. Çentiksiz numunelerde ise hasar parçanın ortasından başlamıştır.

Tabakalar arasındaki açıların hasar etkileri incelendiğinde ise  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelerin  $[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelere nazaran yorulma hasarına karşı dayanımları yüksektir.

Bu çalışmada görüldü ki  $[0^0]_8$  fiber dizilimine sahip çentik numune en az yorulma hasar ömrüne sahipken  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip çentiksiz numune en yüksek yorulma hasarına sahiptir.

Tekrarlı yükler altında çalışılan durumlarda çentiksiz ve  $[90^0]_8$  fiber dizilimine sahip numunelerin kullanılması avantaj sağlayacaktır.

ANSYS modelleri ile deneysel sonuçlar arasındaki fark incelendiğinde ise en yüksek % 10.8 en düşük ise % 4.2' lik fark görülmüştür. Tabakalı kompozit malzemeler için bu değerlerin normal olduğu söylenebilir. ANSYS modellemesinde sistem malzemeyi kusursuz olarak görmektedir ancak numunelerin kusursuz olma durumları gerçek hayatta çok mümkün olmadığından bu farklar çıkabilmektedir. Bu sonuç bize tabakalı kompozit malzemelerin yorulması için ANSYS programının kullanılabileceğini göstermektedir.

## 7. KAYNAKLAR

- Aidi, B., Philen, M. K., & Case, S. W. (2015). Progressive damage assessment of centrally notched composite specimens in fatigue. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 74; 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.03.022>
- Asi, D. (2018). Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak. Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>
- Ateş, B. H. (2002). Çevresel Etkilerin PPS (Polifenilensülfid) Kompozitlerin mekanik özelliklerine etkileri. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydın, F. (2018). Tek Yönlü Hibrit CTP/AL Tabakalı Kompozitlerin Farklı R-Oranları İçin Yorulma Ömrünün Belirlenmesi. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman. Retrieved from <http://e-journal.uajy.ac.id/14649/1/JURNAL.pdf>
- Beşergil, B. (2016). Kompozitler Temel İlkeler (1st ed.). Gazi Kitabevi, Ankara.
- Bulut, M. (2014). Türkiyede Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çelik, A., & Turan, K. (2015). Çentikli Kompozit Levhaların Hasar Davranışlarının İncelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 00(Tip 4), 73–82.
- Çoban, O. (2007). Polimer Kompozitlerde Çevresel Etkilerin Darbe Yüklemeleri Altındaki Davranışlarına ve Kırılma Morfolojisine Etkileri. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Gençoğlu, M. (2011). Tabakalı Kompozit Levhalarda Burkulma Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Günaydın, B. (2010). Kompozit Yama ile Onarılmış Yüzey Çentikli Filaman Sarım Borularında Yorulma Davranışları. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Günaydın, M. (2003). Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Çatlak İlerlemesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

İşikli, Y. (2012). Tabakalı Kompozit Plakların Kalıp Malzemesi Olarak En Uygun Tasarımı. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kaçar, A. (2009). Katmanlı Kompozit Bir Plağın Piezoelektrik Yamalara Yardımıyla Titreşim Kontrolü. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kamal, M., & Rahman, M. M. (2018). Advances in fatigue life modeling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82;(August 2015), 940–949. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.047>

Llobet, J., Maimí, P., Mayugo, J. A., Essa, Y., & Martin de la Escalera, F. (2017). A fatigue damage and residual strength model for unidirectional carbon/epoxy composites under on-axis tension-tension loadings. *International Journal of Fatigue*, 103; 508–515. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.026>

Okutan, E. (2009). Polimer Kompozitlerin Matkapla Delinme Karakteristiklerinin ve Oluşan Mekanizmaların İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Şahin. (2011). Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Şahin, Y. (2006). Kompozit Malzemelere Giriş. Ankara: Seçkin Yayıncılık.

Sakin, R. (2004). Bilgisayar Destekli, Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Taner, Y. (2006). Polimer Matrisli Kompozitlerin Pim İle Yük Taşıma Özelliklerinin İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.



Ünal, O. (2004). Ünal, O., 2004. Yapı Malzemesi Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyon.

Van Der Sypt, P., Chérif, M., & Bois, C. (2017a). Analysis of the fatigue behaviour of laminated composite holes subjected to pin-bearing loads. *International Journal of Fatigue*, 103; 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.025>

Van Der Sypt, P., Chérif, M., & Bois, C. (2017b). Analysis of the fatigue behaviour of laminated composite holes subjected to pin-bearing loads. *International Journal of Fatigue*, 103; 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.05.025>

Yapıcı, İ. (2012). E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.

Yudhanto, A., Iwahori, Y., Watanabe, N., & Hoshi, H. (2012). Open hole fatigue characteristics and damage growth of stitched plain weave carbon/epoxy laminates. *International Journal of Fatigue*, 43; 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.02.002>

## 8. ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Özlem Durmuş

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Bolu / 10.05.1992

**Lisans Üniversite** : Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi

**Elektronik posta** : ozlemdurmus@msn.com

**İletişim Adresi (Ev)** : Beşkavaklar Mah. Işıl Sokak No:11 Merkez  
/BOLU

**İletişim Adresi (İş)** : YORGLASS – Beyaz Eşya Susuzkınık Köyü  
Susuzkınık OSB Mevkii 1. Cadde Dış Kapı No: 44 BOLU/TÜRKİYE

**Yayın Listesi** :

**Ödüller** :