

SELÇUK  
ÜNİVERSİTESİ

T.C.  
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI DARBE GÖRMÜŞ FİLAMAN  
SARIM E-CAMI/EPOKSİ BORULARIN İÇ  
BASINÇ ALTINDA YORULMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Aykut ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2011  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Aykut ŞAHİN tarafından hazırlanan “Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 08/09/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

Başkan

**Doç. Dr. Hüseyin İMREK**

Danışman

**Doç. Dr. Mesut UYANER**

Üye

**Yrd.Doç. Dr. Behcet DAĞHAN**

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Bayram SADE  
FBE Müdürü

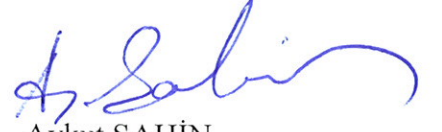
Bu tez çalışması SELÇUK ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNATÖRLÜĞÜ tarafından 10201141 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

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

## DECLARATION PAGE

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



Aykut ŞAHİN  
Tarih: 08.09.2011

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# DÜŞÜK HIZLI DARBE GÖRMÜŞ FİLAMAN SARIM E-CAMI/EPOKSİ BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDA YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Aykut ŞAHİN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mesut UYANER

2011, 100 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Hüseyin İMREK

Doç. Dr. Mesut UYANER

Yrd.Doç. Dr. Behcet DAĞHAN

Bu çalışmada filaman sarım metoduyla, E-camı/epoksi malzemeden imal edilen CTP (cam takviyeli plastik) borular kullanıldı. Deney numuneleri sekiz tabakalı olup ( $\pm 55^\circ$ ), sarım açılımlarına sahiptir. Deney numunelerine 5 J ve 10 J enerji değerlerinde darbe deneylerine tabi tutuldu. Numune tarafından yutulan enerji miktarı tespit edildi ve numunede oluşan darbe hasarları incelendi. Ayrıca deney sonucunda numunelerden elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri değerlendirildi. ASTM-D 1599' a göre patlatma deneyleri yapılarak darbe hasarsız ve hasarlandırılan boruların statik patlama mukavemetleri bulundu. Yorulma deneyleri için PLC kontrollü hidrolik iç basınç yorulma deney seti hazırlandı. Hasarlı ve darbe hasarsız numunelere ASTM-D 2992 standardına uygun olarak (R=0.05 gerilme oranı ve 0.42 Hz frekansta) yorulma testi uygulandı. Numuneler patlama mukavemetinin %30'u, %35'i ve %40' ı olmak üzere üç farklı gerilme değerinde yorulmaya tabi tutuldu. İlk sızıntı, yoğun sızıntı ve son hasarın oluştuğu çevrim sayıları kayıt edildi.

**Anahtar Kelimeler:** Düşük hızlı darbe, Filaman sarım, Hasar, Kompozit boru, Yorulma

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF FATIGUE BEHAVIOUR OF FILAMENT  
WOUND E-GLASS/EPOXY COMPOSITE TUBES AFTER LOW VELOCITY  
IMPACT UNDER INTERNAL PRESSURE

Aykut ŞAHİN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER

2011, 100 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK

Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER

Assist. Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

In this study, GRP tubes were made of E-glass/epoxy material with filament wound. Samples are including with eight layers and it has as winding angles ( $\pm 55^\circ$ ). Impact tests were realized at 5 J and 10 J energy levels. Absorbed energy was determined and damage zones were examined. Force-time and force-displacement curves were also evaluated. The burst strength of the impacted and non-impacted tubes was found in accordance with ASTM-D 1599. For fatigue tests, PLC controlled hydraulic internal-pressure, fatigue test rig were set up. Impacted and non-impacted tubes were subjected to the fatigue test in accordance with ASTM-D 2992 (R=0.05 strain rate and 0.42 Hz frequency). The examples were subjected to three different stress value %30 %35 %40 of the burst strength. Number of cycles which were occurred by droplet, leakage and final failure were recorded.

**Keywords:** Low velocity impact, Filament winding, Failure, Composite tube, Fatigue

## ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince danışmanlığımı yaparak beni yönlendiren, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Mesut UYANER'e, grup arkadaşlarım Memduh KARA ve Lokman GEMİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Yardımlarını ve desteğini esirgemeyen KONALTAŞ Alüminyum San. ve Tic. A.Ş. Genel Müdürü Arif GÖKYILDIZ'a, İşletme Müdürü Ergin Reşit SÜMER'e, Bakım Onarım ve ArGe Şefi Nusrettin Kalkan ve ekibine, Mesut Çiftçi başta olmak üzere tüm vardiya amirlerine ve tüm iş arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım sırasında yanımda olan, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mak. Müh. Aykut ŞAHİN  
KONYA-2011

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
ABSTRACT .....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xiii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>3</b>
2.1 Kompozit Borularda Yorulma.....	3
2.2 Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yorulma.....	6
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER .....</b>	<b>9</b>
3.1. Giriş.....	9
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	10
3.2.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	10
3.2.2. Tabakalı kompozitler.....	14
3.2.3. Tanecikli kompozitler.....	15
<b>4. YORULMA .....</b>	<b>16</b>
4.1. Giriş.....	16
4.2. Yorulma Testi.....	17
4.2.1. Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi.....	19
4.2.2. Gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi.....	19
4.3. Kompozitlerde Yorulma.....	19
4.4. Kompozitlerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler.....	23
4.4.1. Fiber Özellik Etkileri.....	23
4.4.2. Yönelme Etkileri.....	24
4.4.3. Matris Özellik Etkileri.....	25
4.4.4. Fiber hacminin etkileri.....	25
4.5. Yorulma Deneyleri.....	26
4.5.1. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi.....	26
4.5.2. Eğilme gerilmeli yorulma deneyi.....	26
4.5.3. Burulma gerilmeli yorulma deneyi.....	26
4.5.4. Bileşik gerilmeli yorulma deneyi.....	27

4.6. Yorulma Olayının Gelişimi .....	27
4.6.1. Yorulma çatlak başlaması.....	28
4.6.2. Yorulma çatlak ilerlemesi.....	28
<b>5. FİLAMAN SARIM YÖNTEMİ .....</b>	<b>30</b>
5.1. Takviye ve Matris Malzemeleri.....	31
5.1.1. Takviye malzemeleri .....	31
5.1.2. Matris malzemeleri .....	32
5.2. Sarım Yöntemleri .....	32
5.3. Sarım Makinaları .....	34
5.4. Mandreller .....	35
5.5. Sarım Kontrol Parametreleri.....	36
<b>6. DÜŞÜK HIZLI DARBE.....</b>	<b>38</b>
6.1 Düşük Hızlı Darbenin Mekanikliği .....	38
6.1.1. Normal temas kuvvetinin işi.....	38
6.1.2 Serbest düşme hareketi .....	39
6.1.3 Darbe enerjisi.....	39
6.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı.....	40
6.2.1 Enine darbe .....	41
6.2.2. Tabakalı kompozit malzemede darbe sonucu oluşan hasar modları .....	41
<b>7. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>45</b>
7.1. Kompozit Boruların Üretimi .....	45
7.2. Kompozit Boru Yakma Deneyi .....	46
7.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri .....	46
7.3.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı .....	47
7.3.2. CTP boru yataklaması .....	48
7.3.3. Elektronik kontrol ünitesi .....	49
7.4. Serbest Uçlu $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Statik İç Basınç Deneyleri .....	50
7.5. Serbest Uçlu $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Yorulma İç Basınç Deneyleri ....	51
7.5.1. Yorulma iç basınç deney cihazı.....	52
<b>8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>54</b>
8.1. $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Yakma Deney Sonuçları .....	54
8.2. $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları.....	54
8.2.1. Kuvvet-Zaman değişimi .....	55
8.2.2. Kuvvet-Deplasman değişimi .....	57
8.2.3. Enerji-Zaman değişimi .....	58
8.2.4. Hasar Analizi .....	59
8.3. $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Serbest Uçlu Statik İç Basınç Deney Sonuçları .....	61
8.4. $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi .....	64
8.4.1. $\pm 55^0$ Sarım Açılı Darbe Hasarsız CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi...	65
8.4.2. $\pm 55^0$ Sarım Açılı 5 J Darbe Enerjisiyle Hasarlandırılmış CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi.....	68

8.4.3. $\pm 55^0$ Sarım Açılı 10 J Darbe Enerjisiyle Hasarlandırılmış CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi.....	71
<b>9. SONUÇLAR.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>76</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>82</b>
<b>EK-1 SERBEST UÇLU <math>\pm 55^0</math> SARIM AÇILI CTP BORULARIN STATİK İÇ BASINÇ DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>82</b>
<b>EK-2 HER BİR DENEYDE KUVVETİN ZAMANA BAĞLI DEĞERLERİNDEN ELDE EDİLEN KARAKTERİSTİKLER .....</b>	<b>83</b>
<b>EK-3 . <math>\pm 55^0</math> SARIM AÇILI DARBE HASARSIZ CTP BORULARIN YORULMA DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>84</b>
<b>EK-4 . <math>\pm 55^0</math> SARIM AÇILI 5 J DARBE ENERJİSİ İLE HASARLANDIRILMIŞ CTP BORULARIN YORULMA DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>85</b>
<b>EK-5 . <math>\pm 55^0</math> SARIM AÇILI 10 J DARBE ENERJİSİ İLE HASARLANDIRILMIŞ CTP BORULARIN YORULMA DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>86</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

- $\sigma_{\max}$  :Maksimum gerilme  
 $\sigma_{\min}$  : Minumum gerilme  
 $\sigma_r$  : Gerilme aralığı  
 $\sigma_a$  : Gerilme genliği  
 $\sigma_m$  : Ortalama gerilme  
 $\sigma_{ut}$  : Ortalama statik mukavemet  
 $\sigma_T$  : Teğetsel gerilme  
P : Basınç  
R : Yorulma yük oranı  
S : Maksimum yorulma gerilmesi  
 $N_f$  : Hasara neden olan çevrim sayısı  
da/dN : Çatlak ilerleme hızı  
 $\Delta K$  : Gerilme şiddet faktörü değişimi  
D : Ortalama takviyeli dış çap  
 $t_r$  : Minimum takviyeli cidar kalınlığı  
A ve n : Yorulma çatlak ilerlemesi malzeme sabitleri  
m,b,c,d : S-N diyagramı malzeme sabitleri  
E : Elastisite modülü  
 $w_f$  : Elyafın ağırlığı  
 $w_c$  : Kompozitin ağırlığı  
 $\rho_f$  : Elyafın yoğunluğu  
 $\rho_c$  : Kompozitin yoğunluğu  
 $V_f$  : Elyafın hacimsel oranı

### Kısaltmalar

- CTP : Cam takviyeli plastik  
PLC : Programlanabilir lojik denetleyici (Programmable Logic Controller)

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler a) Tek yönlü sürekli elyafli b) Kırpılmış elyafli .. c) Ortogonal elyafli d) Açılı dizilmiş sürekli elyafli e) Rastgele dizilmiş sürekli elyafli.....	11
Şekil 4.1. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme.....	18
Şekil 4.2. İki ayrı kompozit malzeme için S-N diyagramı.....	20
Şekil 4.3. Değişik kompozit yorulma hasar biçimleri için S-N diyagramı .....	22
Şekil 4.4. Kompozitlerin yorulması boyunca çatlak ilerleme biçimleri.....	23
Şekil 4.5. Kompozitlerin yorulmasına fiber tipinin etkisi.....	24
Şekil 4.6. Kompozitlerin yorulmasına fiber oryantasyonunun etkileri .....	24
Şekil 4.7. Değişik matris malzemelere sahip E-cam fiber kompozitlerin yorulma dayanımları .....	25
Şekil 4.8. Kompozitlerin yorulmasına fiber hacminin etkileri.....	25
Şekil 5.1. Kutupsal sarım makinası.....	33
Şekil 5.2. CNC Helisel filaman sarım makinası.....	34
Şekil 5.3. 4-eksenli CNC filaman sarım makinası .....	35
Şekil 6.1 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri.....	41
Şekil 6.2 Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı.....	42
Şekil 6.3 Hasar örnekleri (a) çam ağacı görünümlü (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü.....	43
Şekil 7.1. Numune geometrisi .....	45
Şekil 7.2. Düşük hızlı darbe test cihazı .....	47
Şekil 7.3. Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı .....	48
Şekil 7.4. V yatağı üzerindeki deney numunesi .....	48
Şekil 7.5. Elektronik kontrol ünitesi.....	49
Şekil 7.6. Serbest uçlu iç basınç test aparatı .....	50
Şekil 7.7. Serbest uçlu iç basınç deneyi seti.....	51
Şeki 7.8. PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı .....	53
Şekil 8.1. Yakılmış deney numuneleri .....	54
Şekil 8.2. CTP kompozit boru numunesinde kuvvet–zaman değişimi a) 5 J darbe enerjisi için b) 10 J darbe enerjisi için.....	55
Şekil 8.3. CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet–zaman değişimi .....	56
Şekil 8.4. CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde oluşan en büyük temas kuvveti.....	56
Şekil 8.5. CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde oluşan en büyük temas süresi .....	57
Şekil 8.6. CTP kompozit boru numunesinde değişik çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet–deplasman değişimi .....	57
Şekil 8.7. CTP kompozit boru numunesinde değişik çarpma enerjileri sonucunda oluşan kalıcı deformasyon miktarları.....	58
Şekil 8.8. Enerji-Zaman değişimi.....	58
Şekil 8.9. CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde elde edilen enerji-zaman değişimi.....	59
Şekil 8.10. CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde yutulan enerji miktarları .....	59
Şekil 8.11. Düşük hızlı darbe yapılmış CTP kompozit deney numunelerinde hasar bölgeleri a) 5 J darbe enerjisi b) 10 J darbe enerjisi .....	60

Şekil 8.12. Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi .....	61
Şekil 8.13. Statik iç basınç ile patlatma deneyi yapılan numunelerde Basınç-Zaman değişimi a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış .....	61
Şekil 8.13. Statik iç basınç ile patlatma deneyi yapılan numunelerde Basınç-Zaman değişimi a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış .....	62
Şekil 8.14. CTP borularda statik iç basınç testi sonucu oluşan hasar görüntümü a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış .....	63
Şekil 8.15. $\pm 55^0$ sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların yorulma deney numunelerine ait gerilme-çevrim sayısı grafikleri a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) son hasar .....	66
Şekil 8.16. $\pm 55^0$ sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar fotoğrafları a) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %30'u kadar basınç b) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %35'i kadar basınç c) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %40'ı kadar basınç .....	67
Şekil 8.17. $\pm 55^0$ sarım açılı 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait gerilme-çevrim sayısı grafikleri a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) son hasar .....	69
Şekil 8.18. $\pm 55^0$ sarım açılı 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar fotoğrafları a) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %30'u kadar basınç b) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %35'i kadar basınç c) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %40'ı kadar basınç .....	70
Şekil 8.19. $\pm 55^0$ sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait gerilme-çevrim sayısı grafikleri a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) son hasar .....	72
Şekil 8.20. $\pm 55^0$ sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar fotoğrafları a) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %30'u kadar basınç b) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %35'i kadar basınç c) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %40'ı kadar basınç .....	73
Şekil 8.21. $\pm 55^0$ sarım açılı farklı darbe enerjileri ile hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerinde son hasar için gerilme-çevrim sayısı grafikleri.....	74

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<b>Çizelge 3.1.</b> Cam fiber özellikleri .....	13
<b>Çizelge 4.1.</b> $R$ değerleri için yorulma yük biçimleri .....	18
<b>Çizelge 4.2.</b> $n$ ve $b$ sabitleri için tipik değerler.....	21
<b>Çizelge 6.1.</b> İstenilen darbe enerjisi için hesaplanan değerler ( $m=6.35\text{kg}$ ) .....	39
<b>Çizelge 7.1.</b> Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri.....	45
<b>Çizelge 8.1.</b> $\pm 55^\circ$ sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların ortalama deney sonuçları ( $R=0.05$ $f=0.42$ Hz) .....	65
<b>Çizelge 8.2.</b> $\pm 55^\circ$ sarım açılı 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların ortalama deney sonuçları ( $R=0.05$ $f=0.42$ Hz) .....	68
<b>Çizelge 8.3.</b> $\pm 55^\circ$ sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların ortalama deney sonuçları ( $R=0.05$ $f=0.42$ Hz) .....	74

## 1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıda, aynı ya da farklı guruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesinin bulunduğu bilinmektedir.

Kompozit malzemeler genellikle kendi başlarına elde edilemeyen, bileşenlerinin en iyi özelliklerinin bir malzemedeki toplanması önemli avantajlar meydana getirir. Kompozit malzeme üretilmesi ile aşağıdaki bazı özellikler sağlanabilmektedir. Bunlar genel olarak şöyle sıralanabilmektedir;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,
- İyi termal ve ısı iletkenliği
- Düşük ağırlık,
- Çekici ve estetik görünüm vb.

Bütün bu özellikler aynı zamanda oluşmaz ve herhangi bir uygulama için böyle bir gereksinime ihtiyaç da yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak, bir kompozit malzemenin bazı özellikleri (yoğunluk, elastiklik modülleri, çekme dayanımları vb.) hesaplanabilir.

Kompozit malzemeler nispeten yeni bir alan olup II. Dünya savaşı esnasında mevcut konvansiyonel malzemeler tek başlarına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamış ve o zamandan beri de bu malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmektedir.

Bu malzemelerin üretiminde birçok üretim yöntemi kullanılmaktadır. Bunlardan biride filaman sarım metodudur. Bu metotla çok farklı çeşitlerde ürünler üretilmektedir. Bu ürünlerden biride; yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklık ve düşük yoğunluk özelliğine sahip alternatifsiz bir malzeme olan cam/epoksi kompozit borular, özellikle savunma sanayi, uzay ve havacılık alanlarında ve diğer endüstriyel alanlarda

kullanılmaktadır. Aynı zamanda kafes giriş sistemli yapılarda, askeri amaçlı köprü, launcher, lav, roketatar vb. silahların namlu yapımında depolama tankları, uçak, helikopter, rüzgâr türbini kanatları, roket motor boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pnömatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Bu sayede; gerek endüstriyel amaçlı kullanım için ve gerekse savunma sanayinde kullanım için, bu tür malzemelerin mekanik özelliklerinin ve özellikle değişken yükleme şartlarında (yorulma) hasar davranışlarının bilinmesi tasarım için çok önemlidir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1 Kompozit Borularda Yorulma

Yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu bir malzeme olan cam/epoksi kompozit borular, özellikle savunma sanayi, uzay ve havacılık alanlarında kullanılmaktadır. Stratejik bir öneme sahip, ileri kompozit malzeme sınıfına giren, cam/epoksi kompozit boruların imalat parametrelerinin ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu büyük önem arz etmektedir. Bu sayede; gerek endüstriyel amaçlı kullanım için ve gerekse savunma sanayinde kullanım için, bu tür malzemelerin mekanik özelliklerinin ve özellikle değişken yükleme şartlarında (yorulma) hasar davranışlarının bilinmesi, tasarım için çok önemlidir.

Savunma, havacılık ve diğer sanayi alanlarında yaygın olarak kullanılan cam-epoksi kompozit borular hakkında deneysel ve teorik birçok çalışma yapılmıştır. Mekanik özellikleri, elyaf sarım açısı ve üzerinde bulunması muhtemel olan yüzey hatalarının, değişken yükleme şartlarında malzeme ömrüne etkisi gibi konular incelenmiştir.

Ellyin ve Martens (2001), filaman sarım metoduyla üretilmiş olan CTP boruları iki eksenli yorulma deneyine tabi tutmuşlardır. Deneylerde farklı teğetsel/eksenel yükleme durumları için malzemenin yorulma davranışları incelenmiş, sızıntı ve hasar dayanımları belirlenirken yine Ellyin ve Martens (2000), iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişim ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Borularda yorulma olayı ASTM D2992 standardına göre yapılmıştır. Bu standarda göre deneyler 0.42 Hz frekansta ve  $R=0.05$  gerilme oranında gerçekleştirilmiştir.

+55°/-55° sarım açılına sahip cam- epoksi kompozit borular Kaynak ve Mat (2001) tarafından eksenel yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yükleme değerleri malzemenin çekme dayanımının %60, %70, %80 aralıklarında seçilerek S-N diyagramı elde edilmiştir. Tarakçioğlu ve ark.(2001), cam-epoksi filaman sarım borularda yüzey çatlaklarının mukavemete etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı sarım açılına sahip borular için kırılma tokluğu değerleri deneysel olarak elde edilirken yine Tarakçioğlu (1992), farklı sarım açılındaki cam-epoksi borularda sarım açısı parametresinin, yüzey çatlaklı ve yüzey çatlaksız malzeme özelliklerine etkisini

araştırmıştır. Deneysel numuneleri, roket çıkış namlusu olarak kullanılan filaman sarım CTP borulardan seçilmiştir.

Cam takviyeli plastiklerden yapılmış filaman sarım borular izotrop malzemelerden yapılmış olan borulardan daha büyük avantaja sahiptirler. Bununla beraber bu tip malzemelerin anizotropik karakterlerinden dolayı boruların yük altındaki davranışları, tasarım kriterleri çok daha karışıktır. Pagano ve Halpin (1968), çekme, basma iç basınç ve burulma yükleri altında anizotropik tüplerin tabakalanma analizini incelemiştir. Pagano ve Halpin (1968), anizotropik filaman sarım ince cidarlı borularda deformasyon davranışlarını analitik ve deneysel olarak araştırmıştır. Yine Pagano (1970-1971), tabakalı silindirlerin elastik gerilme bileşenlerini kabuk teorisini kullanarak incelemiştir. Cam elyaf polyester filaman sarım borularda sarım açısının deformasyon ve hasar mekanizmasına etkisini Spencer ve Hull (1978), Hull ve ark.(1978), teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir. Ayrıca iç basınca maruz CTP filaman sarım borularda deformasyon hızına sarım açısının etkisi statik ve dinamik patlama testleri ile araştırılmıştır (Coo 1985, Hashin ve Rotem 1973).

Rebiere ve ark.(2001)'nin yaptıkları çalışmada amaç yapıdaki enine ve boyuna çatlakların gerilme bölgesine etkisi, rijitlikteki düşüş ve Poisson oranındaki düşüşün incelenmesidir. Deneyler statik ve alternatif (yorulma) yükler altında yapılmıştır. Birçok araştırmacı boyuna çatlakların, statik yük değeri ve çevrim sayısı arttıkça arttığını göstermişlerdir (Boniface ve Ogin 1989, Henaff-Garden 1990).

Filaman sarım kompozit borular birçok araştırmacı tarafından tek ekseninde yorulmaya tabi tutulmuştur (Kaynak ve Mat 2001, Bredemo 1992, Conder ve Newhouse 1980).

Ferry ve arkadaşlarına (1998) göre, bir kompozit malzemenin yorulma direnci, matrisin hasara karşı direnci ile ilgilidir. O'brien ve Reisfinder'e(1981) göre, hasar başlayınca rijitlik azalır. Hwang ve Han'a (1986) göre, kompozit malzemelerde sekant modülündeki düşüş, hasarın yerel olarak toplanmasıyla belirlenir. Deneyin yapıldığı frekans düşük olursa malzeme yorulmadan çok sürünmeye maruz kalır. Çünkü düşük frekans daha uzun yükleme periyodu demektir (Reisfinder ve ark.1983).

Richard ve Perreux (2000), yaptıkları çalışmada tabakalı kompozit malzemelerde güvenilirlik yaklaşımıyla hasar mukavemetinin optimizasyonu konusunu incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada iç basınç altındaki filaman sarım CTP boruların hasar davranışını incelemişlerdir. Bu boruların sızıntı hasarının yüzeyin ıslanması ile

başladığını rapor etmişlerdir (Wang ve ark. 1997). Bu çalışmada ASTM D2992-06'ya göre (silindir teorisi) uygulanan gerilmeler hesaplanmıştır.

Smith ve Wood (1990), hasar kriteri olarak rijitlik düşüşünü değil, Poisson oranının değişimini kabul etmişlerdir. Çünkü aynı hasar oranında Poisson oranındaki değişim daha fazladır (Harris ve ark.1989). Ayrıca hasarın başlamasıyla rijitlik özellikleri düşer (O'brien ve Reisfinder 1981).

Sekant modülündeki düşüş kompozit malzemelerde hasar kriteri olarak uzun zamandan beri kullanılmaktadır (O'brien ve Reisfinder 1981, Hwang ve Han 1986, Lee 1993 ). Bu olay filaman sarım borularda mikro çatlak yoğunluğunun ölçüsü olarak kullanılabilir.

Wolodgo (1999), yaptığı çalışmada  $\pm 71^\circ$  ve  $\pm 45$  derecelik sarım açlarına sahip filaman sarım boruları, çekme yönünde yorulmaya maruz bırakmıştır. Sızıntıya sebep olacak gerilmeler, hasar noktaları, makroskobik hasar modları, yükleme oranı (R), ve yük durumuna (statik ve alternatif) göre incelemiştir. Ayrıca, matris hasarı ile sızıntı ömrü ilişkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalar bir sonlu elemanlar analiziyle doğrulanmıştır. Bu deneyler, değişik aksiyal/teğetsel gerilme oranında gerçekleştirilmiştir.

Martens (1999), yaptığı çalışmada iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişimi ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkinin belirlenmesini incelemiştir. Yine Perreux ve Joseph (1977) tarafından  $+55^\circ/-55^\circ$  borularda, frekansın yorulmaya etkisi incelenmiştir. Hashin ve Rotem (1973), değişik modlar için elyaf takviyeli malzemeler için yorulma mukavemet kriteri ortaya atmışlardır. Çok yönlü tabakalı kompozitler ele alındığında bir başka hasar türü olan tabaka ayrılması dikkate alınmalıdır (Rotem 1979).

Xia ve Ark. (2001), yaptıkları çalışmada filaman sarım kompozit borularda elastik gerilme analizinin basitleştirilmiş bir şeklini incelemiştir. Burada boru sadece iç basınca maruzdur. Bu tip borularda eğilme düşey yükleme aksiyal yükleme ve iç basınç şartları denenmiştir (Akkus ve Kawahara 2000, Alderson ve Evans 1992, Nishiwaki ve ark. 1995, Onoda 1985, Smerdov 2000).

Perreux ve Ark. (1977) yaptıkları çalışmada  $+55^\circ/-55^\circ$  açılı tabakalı kompozit filaman sarım borular kullanmıştır. Frekansın ömür ve hasara etkisini incelemiştir. Frekans arttıkça ömrün arttığını fakat belli bir noktadan sonra frekans arttıkça ömrün değişmediğini göstermişlerdir. Tong (2002), yaptığı çalışmada sabit genlikte yükler altında cam takviyeli plastik levhalarda yorulma olayını incelemiştir. Bu çalışmada

çatlak ilerleme safhaları incelenmiş ve matris kırılması sonucunda oluşan ek gerilme dağılımı ve rijitlikteki düşüş sonlu elemanlar metoduyla modellenmiştir. Bu çalışma genel olarak, yorulma yükü altında matris üzerindeki çatlakların ilerleme karakteristiklerini incelemektedir. Bu çalışmada kullanılan numuneler E-cam/Epoksi malzeme olup filaman sarım tekniği ile üretilmiştir. Reisfinder (1977), yorulma sırasında matris malzemesindeki çatlakların sürekli artmadığını ve belli bir çevrim sayısından sonra doyuma ulaşip daha fazla ilerlemediğini göstermişlerdir.

Philippidis ve ark.(2001), yaptığı çalışmada takviye açısı, R oranı, ortalama gerilme ve gerilme genliklerini kullanarak sabit ömür zarfları elde etmişlerdir. Shan ve Liao (2002), cam ve karbon takviyeli epoksi matris malzemelerin çekme-çekme durumundaki yorulma davranışlarını hem havada hem de 25 °C de saf su içinde deneylere tabi tutmuşlardır. Maksimum mukavemetin %85'inde yapılan deneylerde yorulma ömründe belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak maksimum mukavemetin %65 ve %45'inde yapılan deneylerde yorulma ömrü azalmıştır.

Çevresel kirlilik cam elyaf takviyeli plastiklerin yorulma davranışlarını değiştirmez (Jones ve ark.1984). Ayrıca, Vanpaepgem ve ark.(2001), yorulma sonucu tabaka ayrılması olayını incelemiş ve bu olayı sonlu elemanlar analizi ile doğrulamıştır.

Uçları açık ve kapalı filaman sarım CTP borular iç basınç testlerine tabi tutulmuştur (Jones ve Hull 1979, Misag-Tübitak 2001, Spencer ve Hull 1978, Tarakçıoğlu 1992). Kısa süreli deneylerde sarım açısının artışına bağlı olarak patlama basıncına yakın gerilmelerde, damlacıklar halinde sızıntının olduğu ve basıncın azaldığı gözlenmiştir. Jones ve Hull (1979) bu olayı, içten itibaren elyafa paralel oluşan enine çatlakların, katlar arasındaki elyaf kesişme noktasında bir sızıntı yolu oluşturmalarıyla açıklamışlardır. Sürünmenin, kısa süre sızıntı gerilmesinin altındaki gerilmelerde çok uzun sürelerde meydana geldiği, bu olaya aslında enine çatlamanın yol açtığı bilinmektedir.

## 2.2 Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yorulma

Erişilebilen kaynaklarda yapılan literatür araştırmasına göre düşük hızlı darbe görmüş kompozit boruların yorulmasına dair bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Darbe görmüş kompozit elemanların yorulmasıyla ilgili çalışmaların başlıcaları şunlardır;

Tai ve ark. (1998), karbon epoksi kompozitlerin yorulma davranışına, düşük enerjili darbenin etkilerini araştırmışlardır.  $[0/45/90/-45]_{2s}$  karbon/epoksi tabakalı yapıların perfore olduğu enerjinin %10'u, %25'i ve %40'ı mertebelerinde darbe enerjileri seçilmiştir. Bu numunelerin mukavemet, kalıntı mukavemet ve penetrasyon-darbe cevapları ölçülmüştür. Darbe görmüş ve görmemiş tabakalı yapıların yorulma davranışları karşılaştırılmıştır. Yorulma deneyleri 3 Hz frekansta değişik gerilme seviyelerinde çekme-çekme yüklemesinde yapılmıştır. Darbe görmüş ve görmemiş tabakalı yapıların S-N diyagramları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Nispeten düşük enerjili darbe uygulandığında çekme mukavemeti çok az azalmış fakat yüksek enerjili darbe uygulandığında çekme mukavemetinde daha geniş veri dağılımının görüldüğü ciddi bir düşüş gözlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca yorulma ömrünün de azaldığı bulunmuştur.

Yine Tai ve ark. (1999),  $[0/45/90/-45]_{ns}$  (n=2,4,6) T300/976 karbon/epoksi kompozit levhalarda düşük enerjili darbe sonrası çekme-basma yorulma davranışını ve tabaka kalınlığının etkisini araştırmışlardır.

Mitrovic ve ark. (1999), AS4/3501-6 grafit/epoksi kuazi izotrop tabakalı kompozitlerin uzun çevrimli yorulmasını çalışmışlardır. Sabit genlikte düşük hızlı darbeden kaynaklanan delaminasyonun büyümesinde yükleme parametrelerini araştırmışlardır. Yorulma dayanımının darbe sonrası basma mukavemetinin basma-basma türü yükleme için %60'ı ve değişik yükleme koşullarında için ise %65'i olduğunu bulmuşlardır.

Melin ve ark. (2002), darbe görmüş kompozit numunelerin yorulma testlerini yapıp burkulma karakteristiklerini belirlemişlerdir. 2 değişik tabaka sırasına sahip kompozit numuneler hava taşıtlarındaki hasarları temsil edecek şekilde denenmiştir. Yorulma deneyleri sabit genlikli çekme-basma yüklemesiyle gerçekleştirilmiştir. Yorulma ömrü üzerine çevrimsel yükün basma bölümünün, çekme bölümüne nazaran daha etkili olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni olarak da basma yükünün hasar bölgesi etrafında yerel burkulmaya yol açması gösterilmiştir.

Yuanjian ve Isaac (2007), keten lifi takviyeli polyester kompozitlerin darbe ve yorulma davranışlarını incelemiştir. Bu çalışma sonucunda darbe görmüş numunelerin S-N eğrilerinin darbesiz olan numunenin S-N eğrisine göre kalıntı mukavemetinin miktarıyla bir orantı arz ettiğini ve bir kompozit malzemenin hasarsız hali için S-N eğrisi ile darbe sonrası kalıntı mukavemetinin bilinmesi halinde darbe görmüş numunelerin yorulma ömürlerinin tahmin edilebileceğini önermişlerdir.

Yuanjian ve Isaac (2008), cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin düşük hızlı darbe ve çekme-çekme yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Sonuçlar düşük hızlı darbenin kompozit numunelerin çekme özelliklerini ciddi bir şekilde düşürdüğünü göstermektedir. Ayrıca çekme mukavemetindeki azalmayla bağıntılı olarak yorulma ömrü de düşük hızlı darbe nedeniyle azalmıştır.

Isa ve ark. (2011), çok zor görülebilen darbe hasarı olan Z pinli kuazi izotrop karbon epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma özelliklerini çalışmışlardır. Çalışma tamamen deneyseldir. Kompozite %4' e kadar Z-pinlerin ilavesinin zor görülebilen darbe hasarının direnci, darbe sonrası basma yorulma özellikleri ve yorulma hasar mekanizmasına etkileri araştırılmıştır. Z-pinlerin basma yorulma özelliklerini arttırmada etkisiz olduğu bunun yanında yüksek enerjili darbe hasarının yorulma performansını pin içeriğinin artırılmasıyla darbe sonrası yorulma ömrü ve yorulma dayanımını arttırmıştır. Ayrıca Z-pinlerin düşük enerjili darbe hasarı içeren kompozitlerin yorulma hasar büyümesi veya yorulma mekanizmasına bir etkisinin olmadığı da bulunmuştur.

### 3. KOMPOZİT MALZEMELER

#### 3.1. Giriş

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin istenen özellikleri sağlayacak bir malzeme oluşturmak için makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen yeni bir malzemedir.

Kompozit malzemeleri konvansiyonel malzemelerden ayıran en önemli özellik; kompozit malzemelerdeki malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Bu, oluşturulacak olan malzemenin özelliklerinin istenildiği gibi değiştirilmesi olanağını sağlar.

Kompozit malzemeler, ekonomik olmaları ve mevcut malzeme kaynaklarının daha iyi şekilde değerlendirilmesi sebebiyle geniş kullanım alanına sahiptir. Daha önceleri kompozit malzemelerin üretim maliyetlerinin oldukça yüksek olmasına rağmen, gelişen teknoloji ile bu maliyet giderek azalmaktadır.

Kompozit malzemelerin ilk kullanım tarihleri tam olarak bilinmemektedir. Saman, kerpiç tuğlalarını güçlendirmek için kullanılmıştır. Orta çağa ait kılıçlar ve zırhlar farklı malzemelerin tabakalanmasıyla yapılmıştır. Son zamanlarda ise uçak ve uzay araçları gibi ağırlığa duyarlı uygulamalarda, yüksek dayanım/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranlarına sahip olan fiberle takviye edilmiş reçineli kompozitler önemli olmuştur (Jones 1975).

Kompozit malzemelerin metal ve diğer malzemelere alternatif hale gelmelerinin en önemli nedeni, aynı ağırlıktaki metallere göre mukavemetlerinin çok daha fazla olması, yeni tasarım esneklikleri sunmaları, korozyona ve aşınmaya karşı dirençleri ile düşük ısı iletkenlikleri gibi özelliklerdir.

Kompozit malzemelerin dezavantajı ise, henüz çok iyi tanımlanmış tasarım parametrelerinin olmaması ve ham malzeme açısından en yüksek imalat verimliliğine ulaşmamış olmasıdır.

### 3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris adı verilen bir ana bileşenle yüksek mukavemet ve yüksek elastik modülüne sahip olan takviye edici (fiber, tane, tanecik, dolgu) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşur. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerden matris; kompozit malzemeye gelen yükün fiberlere dağıtılmasını sağlar ve malzemeyi zararlı çevresel etkilerden korurlar. Matrisler polimerler, seramikler ve metallere oluşurlar. Bunların içerisinde en yaygın kullanılanı reçineler olarak adlandırılan polimerlerdir. Polimer bağlayıcılar termosetler ve termoplastikler ve elastomerler olarak üç gruba ayrılırlar. Termoset ile termoplastikler arasındaki en önemli fark; termoplastiklere ısıtılarak teorik olarak sonsuz sayıda şekil verilebilmesi, termosetlerin ise sertleştikten sonra, tekrar ısıtıldıklarında bozulmalarıdır. Termosetler termoplastiklerden daha serttir ve yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.

Kompozit malzemeleri üç grupta inceleyebiliriz.

- 1.Fiber takviyeli kompozitler
- 2.Tanecikli kompozitler
- 3.Tabakalı kompozitler

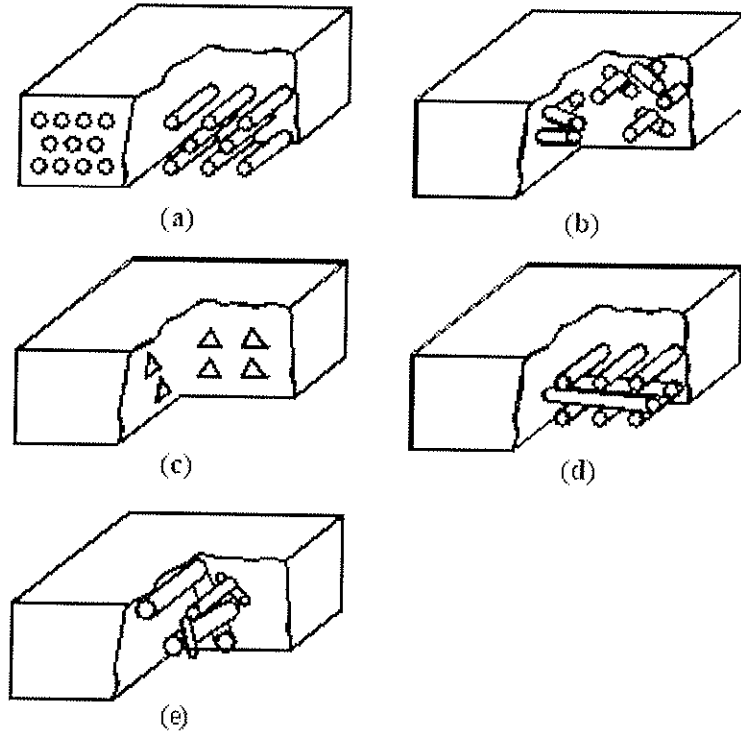
#### 3.2.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Fiber takviyeli ileri kompozit malzemelerin kullanılmaya başlaması, jet motorundan beri en büyük teknik devrim olarak bilinmektedir. İleri seviyedeki fiber takviyeli kompozit malzemelerdeki ileri kelimesi, boron ve grafit fiber gibi yeni, son derece yüksek dayanım ve rijitliğe sahip olan kompozitleri, cam fiber gibi daha bilinen kompozitlerden ayırt etmek için kullanılır (Jones 1975).

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip olan fiber ile daha düşük mukavemete sahip matrisin birleşmesiyle meydana gelir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler fiber eksenini boyunca dizilirler ve içyapı kusurları azdır. Bu iki özellik fiber takviyeli kompozit malzemelerin diğer kompozit malzemelerden daha mukavemetli ve daha sert olmasını sağlar. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber eksenini boyunca dizilmesi, bu kompozit malzemelere çekme gerilmesinin uygulanmasını sağlar, basma gerilmesi uygulanırsa burkulma meydana gelir.

Fiber takviyeli kompozitler Şekil 3.1'de görüldüğü üzere; a) Tek yönlü sürekli elyafli b) Kırpılmış elyafli c) Ortogonal elyafli d) Açılı dizilmiş sürekli elyafli e) Rastgele dizilmiş sürekli elyafli olmak üzere beş sınıfa ayrılırlar (Arıkan 1990).

Fiber takviyeli plastiklerde, bazı mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olan fiberler ve plastikler, yeni ve daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretmek için birleştirilirler. Fiberler, çok yüksek dayanım ve modüle sahiptirler. Fakat, bu yalnızca 7-15  $\mu\text{m}$  çapa sahip gevrek yapıya sahip çok ince fiberlerde gözlenmiştir. Plastikler ise sünek veya gevrek yapıya sahip olup genellikle kimyasal ortama karşı dirençlidirler. Fiberleri ve reçineyi birleştirerek, plastiğin kimyasal direnci ile fiberlerinkine yakın katılık ve dayanımda yeni bir malzeme üretilir. Ek olarak, bu yeni malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direnç sağlaması mümkündür ve deformasyon boyunca enerjiyi absorbe edebilir (Hull 1981).



Şekil 3.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler a) Tek yönlü sürekli elyafli b) Kırpılmış elyafli c) Ortogonal elyafli d) Açılı dizilmiş sürekli elyafli e) Rastgele dizilmiş sürekli elyafli

Birim ağırlık başına modül (ölgül modül) ve birim ağırlık başına dayanım (ölgül dayanım) esas alındığı zaman, kompozit malzemelerin avantajları açığa çıkar. Kompozit malzemelerin daha yüksek ölgül modül ve ölgül dayanımı, elemanlarının ağırlığının azalabileceği anlamına gelir. Bu, elemanların taşınmasında, özellikle de

ağırlıktaki azalmaların daha büyük verim ve enerji tasarrufuna sebep olduğu taşımaların bütün biçimlerinde, büyük öneme sahip bir faktördür (Günaydın 2003).

### **3.2.1.1. Fiberler**

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, kompozitler içinde en fazla kullanıma sahiptir. Bu kompozit malzemeler cam, karbon ve grafit takviyeli kompozitler olmak üzere üç grupta incelenir. Bu kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak cam, grafit ve karbona göre daha çok kullanılmaktadır. Matris malzeme olarak da plastik reçineler, bunlardan da polyester, ucuzluğu nedeniyle çok kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet ve kimyasal dayanımının yanı sıra çekme yüzdesinin düşüklüğü nedeniyle epoksi reçinenin uzay ve havacılıktan, ev ve spor aletleri yapımına kadar çok geniş bir alanda kullanılmasına rağmen, daha pahalı ve imalatının polyester reçineye göre daha zor oluşu epoksilerin daha az kullanılmasına neden olmuştur. Grafit ve kevlar elyaf-epoksi kompozitler ise ileri kompozitler olarak uzay ve havacılık sahasında temel olarak kullanılan malzemelerdir.

#### **3.2.1.1.1. Cam fiberler**

Cam, kil, dolomit, kaolin, kolemonit, kalker gibi bazı inorganik maddelerin birlikte ergitilmesi ve kristalize olmadan soğuyarak katılaşması ile elde edilir. Ergitme fırınına konulan maddelerin oranlarının belirlenmesi iyi bir cam kompozisyonunun elde edilmesi için önemlidir (Eldeniz 1992). Cam elyafın imalatında ilk adım sürekli elyafın elde edilmesidir. Elyaf, sıcak camın çok ince gözenekli (0.8-3.2 mm) platin eleklerden belirli bir hızla çekilmesiyle elde edilir. Demet, münferit liflerin birleşmesinden meydana gelir. Elyafın kalınlığı çekme hızıyla azalır. Elyaf, çekme işlemi sonrasında bir bağlayıcı maddeyle kaplanarak bobin üzerine sarılır. Bobinler kurutma fırınlarında kurutulduktan sonra, elyaf demetleri bükülerek veya bükülmeden bir arada sarılarak değişik çaplarda demetler meydana getirilir (Akdemir 1992). Bu fiberler bükülmeden fitil yapımı için, bükülerek ise iplik yapımı için kullanılır.

Cam takviyeli kompozit malzemelerde takviye elemanının görevi, kompozit malzemenin rijitliğini ve mukavemetini artırmak ve boyutlarının sabit kalmasını sağlamaktır. Kompozit malzemenin dayanımını, fiberin şekli, yerleştirilişi ve kullanılan takviye miktarı ile ilgilidir. Takviye elemanının yanında, kompozit malzemenin

dayanımını reçine malzemeler sağlar. Matris malzeme, epoksi veya polyester ile sertleştirici, bazı inceltici ve kimyasal reaksiyonu hızlandırıcı maddelerin birleşimi ile meydana gelir.

Cam takviyeli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak Çizelge 3.1'de özellikleri verilen üç tipik cam kompozisyonu kullanılır.

**Çizelge 3.1.** Cam fiber özellikleri

Özellikler	E-Cam	S-cam
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık ( $Mg/m^3$ )	2.54	2.48
Mekanik özellikler		
Çekme mukavemeti (MPa)		
22 °C'de	3448	4585
371 °C'de	2620	3758
538 °C'de	1724	2413
Çekme elastisite modülü (GPa) 22 °C'de	72.4	85.5
Akma uzaması, %	4.8	5.7
Elastik düzelme, %	400	100
Isıl özellikler		
Isıl genişleme katsayısı ( $mm/^{\circ}C$ )	5.0	5.6
Isıl iletkenlik katsayısı (W/m)	10.4	-
Özgül ısı, 22 °C'de	0.197	0.176
Elektriksel özellikler		
Yalıtkanlık sabiti, 22 °C'de		
60 Hz'de	5.9-6.4	5.0-5.4
10 Hz'de	6.3	5.1
Hacimsel direnç, 22 °C'de		
500 V'de	10	10
Yüzey direnci, 22 °C'de		
500 V'da	10	10
Optik özellikler		
Kırılma indisi	1.547	1.523
Akustik özellikler		
Ses hızı (m/sn)	5530	5850

Bunlar, E, S ve C camıdır. E camı (elektrik için) en çok kullanılan camdır. Çünkü E camı iyi dayanım, rijitlik, elektriksel yalıtkanlık ve düşük aşınma özelliklerine sahiptir. C camı (kimyasal dirençli) E camından kimyasal aşınmaya karşı daha yüksek dirençlidir, fakat daha pahalıdır ve daha düşük dayanım özelliklerine sahiptir. S camı (yüksek dayanım), E camından daha pahalıdır fakat daha yüksek Young modülüne ve ısı dayanımına sahiptir. Bu nedenle uçak endüstrisi gibi özel uygulamalarda kullanılır (Hull 1981).

Cam takviyeli kompozit malzemenin dizaynında cam elyafın kimyasal bileşimi, elyaf çapının seçimi ve takviye malzemesinin geometrisi önemli kriterlerdir. Bu yüzden

cam takviye, büzülmüş veya düz sürekli elyaf, keçe, kumaş ve kırılmış kısa elyaf (3-5 mm) gibi değişik tiplerde üretilir (Akdemir 1992).

Cam elyafın kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılmasının nedeni; diğer takviye malzemelerine göre daha ucuz olması, temin edilebilmesinin, işlenmesinin kolaylığı ve yüksek mukavemetidir. Ancak cam elyafın neme karşı duyarlı olması en büyük dezavantajıdır.

### **3.2.2. Tabakalı kompozitler**

En az iki değişik malzemenin tabakalama yoluyla birbirlerine yapıştırılmasıyla elde edilen kompozit malzemeler tabakalı kompozitlerdir.

Tabakalı kompozit malzemelerde en az iki farklı faz tabakalar halinde kompozit yapının içinde yer almaktadır. Bu fazlardan biri kompozit malzemeye özelliklerini kazandıran sürekli faz, diğeri ise sürekli fazı oluşturan tabakaları bir arada tutan bağlayıcı fazdır. Organik veya inorganik malzemeler tabakalar halindedir. Bu tür yapılara teflon ve kauçuk kaplı metalik levhaları örnek olarak verebiliriz.

Tabakalanmış fiber kompozitler, fiber kompozitler ve tabakalama tekniklerinin her ikisini gerektiren kompozitlerin melez bir sınıfıdır. Bu, tabakalanmış fiber takviyeli kompozitler olarak da isimlendirilir. Fiber takviyeli kompozit malzemenin tabakaları, değişik yönlerde farklı dayanım ve rijitlik vermesi için, farklı yönlerde konumlanmış her bir tabakanın fiber yönleriyle elde edilir (Jones 1975).

Tabakalama yoluyla; mukavemet, rijitlik, düşük ağırlık, korozyon direnci, dayanıklılık, ısı izolasyon ve görünüm gibi özellikler iyileştirilir. Fiberle takviye edilmiş kompozitlere fiberglaslı yat ve kotra tekneleri, uzay araçlarının panelleri örnek olarak verilebilir.

### 3.2.3. Tanecikli kompozitler

Bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matris malzeme ile birleştirilmesiyle tanecikli kompozitler elde edilir. Tanecikler ve matrisler metalik veya metalik olmayan malzemeler olabilir. Bunlar metalik olmayan taneciklerin metalik olmayan matrisle birleşmesiyle, metalik taneciklerin metalik olmayan matrisle birleşmesiyle ya da bunların tersiyle meydana gelen kompozit malzemelerdir. Beton, kum ve çakıl parçacıklarının çimento ve su ile birleşmesiyle oluşan tanecikli bir kompozit malzemedir (Günaydın 2003).

## 4. YORULMA

### 4.1. Giriş

Yorulma ASTM E 1823-10a 'ya göre şu şekilde tanımlanmıştır: Tekrarlı gerilme ve uzamalara maruz kalan malzemelerde belirli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine ve sonucunda da kırılmaya neden olan kalıcı yapı değişimidir.

Yorulma, malzemelerin tekrarlı gerilme veya uzamalar etkisindeki davranışını belirler. Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzemenin tekrarlı gerilmeler altında çalışması ve malzeme yüzeyinde çekme gerilmesinin etkili olması gerekmektedir. Yorulma olayının en önemli özelliği, olayın sürekli olarak devam etmesi, bölgesel gelişmesi ve çatlak büyümesinin ilerlemesiyle kopmanın olmasıdır.

Dinamik ortamlarda kullanılan malzemeler yerel gerilme konsantrasyonlarından dolayı yorulurlar. Bundan dolayı malzemelerde yorulma hasarları meydana gelir. Bu yorulma hasarlarından kaçınmak için ya malzemede oluşacak gerilme konsantrasyonları en aza indirilmeli ya da bu mümkün olmuyorsa yorulma çatlaklarının oluşumuna ve büyümesine karşı dirençli malzemeler seçilmelidir (Çep ve ark. 2002).

Kompozit malzemelerdeki fiber kırılması, delaminasyon, matris çatlaması, boşluklar gibi hatalar konvansiyonel metallerdeki çatlak gibi hatalardan daha fazla olabilir. Ancak, bir metaldeki hasar gelişimi daha beklenmediktir. Bu yüzden konvansiyonel metaller potansiyel olarak kompozit malzemelerden daha tehlikelidir.

Yorulma, değişen bir yükün uygulanması ile bir malzeme veya makina parçasının son hasarıdır.

Yorulma, tersine çevrilebilir yükleme sonucu kompozit malzemelerin yorulma dayanımını belirler. Yorulma olayı iki faktörle özellikle ilgilidir. İlki, özelliklerinde artarak azalmaya sebep olan mikro yapının genel hasarıdır. İkincisi ise, yorulma yükü altındaki çatlakların ilerleme hızıdır. Yorulma hasarı, deformasyon mekanizmaları ve malzemedeki hasarla ilgilidir.

Bir malzemenin yorulma özellikleri, onun çevrim yüküne karşı davranışdır. Yorulma dayanımı statik dayanımdan daha düşüktür. Makro seviyede yorulma hasarları, az bir plastik deformasyon meydana getirirken, yorulan yüzeyin mikro seviyede incelenmesi plastik deformasyonun oluştuğunu açığa çıkarır. Yorulma ömrü, malzemeye uygulanan gerilmenin seviyesine, biçimine, çevrim moduna, işlem ve çevresel şartlara bağlıdır.

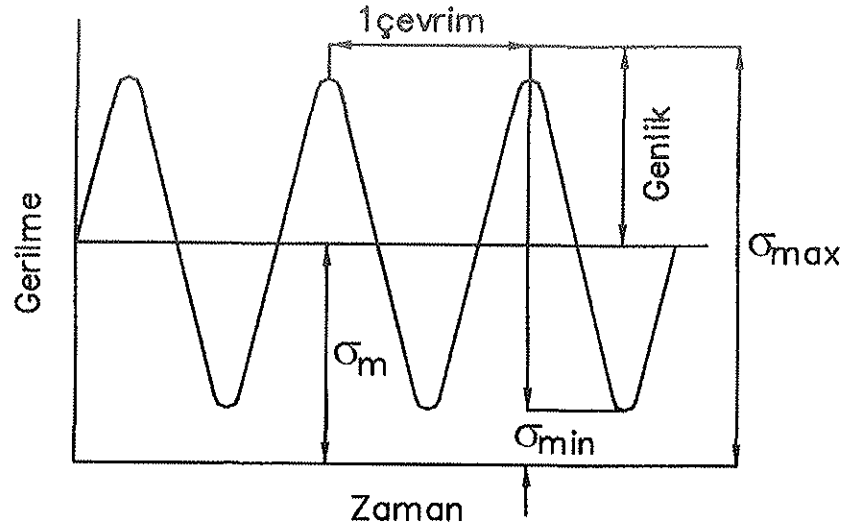
## 4.2. Yorulma Testi

Malzemelerin yorulma testi yorulma cihazı denilen makinalarda gerçekleştirilir. Bu cihazlarla malzemeye zamana bağlı olarak değişen sinüzoidal dalgalı gerilmeler uygulanır. Bu sinüzoidal dalgada gerilme artarak maksimum ve azalarak minimum değere ulaşır. Gerilmenin bu maksimum ve minimum değeri arasında bir yükleme işi yapılmış olur.

Değişken gerilmeler etkisindeki makina elemanlarında gerilmelerin maksimum değerleri ile bunların periyodik değişimi yani tekrarı önemlidir. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler elemanın iç bünyesinde yıpranmalara ve ayrılmalara sebep olduğu için kopma olayı, statik sınırların çok altında olur. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç bünyesindeki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı çevrim sayısına ise yorulma ömrü denir.

Büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz olarak sürekli değişen kuvvet ve momentlerin etkisine yorulma zorlaması denir. Zorlama sırasında yük istenildiği ölçüde tekrarlanabilir ve zorlamanın yapıldığı zaman aralıkları mevcut olabilir. Kuvvetin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Kuvvet veya moment aynı büyüklükte biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise, dalgalı yorulma mevcuttur.

Yorulma testi genellikle sinüzoidal yük kullanılarak yapılır. Böylece yorulma yükünün durumu Şekil 4.1'de gösterilen birkaç parametreyi tanımlayabilir. Maksimum ve minimum gerilmeyi belirterek diğeri gerilme parametreleri, gerilme aralığı  $\sigma_r$ , gerilme genliği  $\sigma_a$ , ortalama gerilme  $\sigma_m$  ve yorulma yük oranı  $R$  gibi parametreler kolaylıkla belirlenebilir.



Şekil 4.1. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme

Şekil 4.1' de gösterilen bu parametreler

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4.4)$$

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

Çizelge 4.1. R değerleri için yorulma yük biçimleri

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

#### 4.2.1. Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi

Herhangi bir yük genliğinde verilen bir çevrim ömür süresi için, yorulma dayanımı ortalama gerilme  $\sigma_m$ 'ye bağlıdır. Verilen aynı yorulma ömrü için, gerilme genliği  $\sigma_a$ , ortalama gerilme arttıkça azalmalıdır.

Çelik gibi metaller için, yorulma ömrünün sonsuz olduğu bir gerilme değeri vardır (malzeme yorulma ile hasara uğramaz). Bu durum için yorulma dayanımı, dayanıklılık sınırı olarak ifade edilir. Alüminyum alaşımı gibi diğer malzemeler dayanıklılık sınırına sahip değildir. Böylece herhangi bir yorulma ömrü belirlenmelidir (10 milyon çevrim, 1 milyon çevrim, 100.000 çevrim ve diğer bazı ömürler).

#### 4.2.2. Gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi

Yorulma performansı, verilen maksimum gerilme seviyesinde hasarın meydana geldiği çevrim sayısı olarak ifade edilir. Yorulma performansını tam olarak tanımlayabilmek için, ortalama gerilme veya yorulma yük oranı  $R$  'ye ihtiyaç duyulur. Böyle testlerin sonuçları, 10 logaritmik ölçekte hasarın meydana geldiği çevrime karşılık, maksimum yorulma gerilmesi olarak grafik halinde verilir. Bu grafik S-N (gerilme-çevrim sayısı) eğrisi olarak tanımlanır.

S-N eğrisi yorulmayı temsil eden genel yollardan biridir. Birbirini izleyen gerilme malzemeye uygulandığı zaman bu egride, hasar için çevrim sayısı  $N$ , gerilme genliği  $S$  nin bir fonksiyonu olarak belirlenir. S-N eğrisinin meyli, yorulan malzemenin direncinin bir ölçüsüdür ve gerçek şekil bir malzemedan diğerine değişir (Hull 1981).

#### 4.3. Kompozitlerde Yorulma

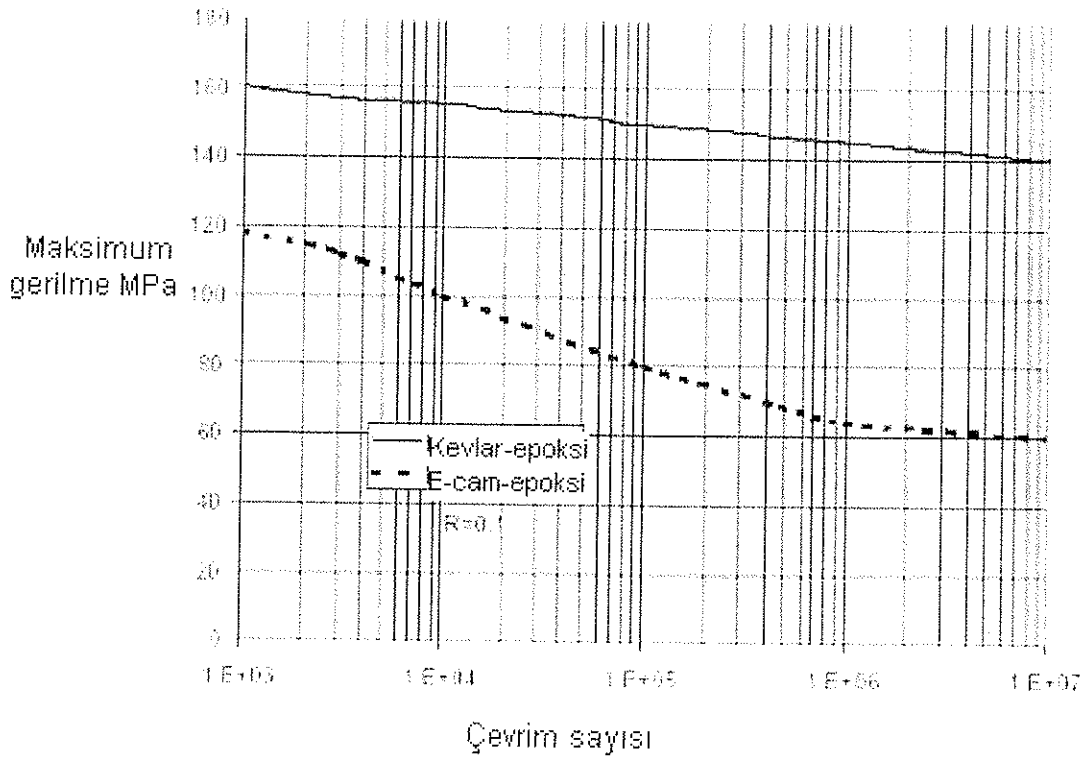
Metalik malzemelerde makro ölçekte incelendiğinde yorulma kırılması neticesinde fazla bir plastik deformasyon gözlenmez. Ancak yüzey detaylı incelendiğinde plastik deformasyon izleri gözlenebilir. Yorulma ömrü gerilmenin büyüklüğüne, gerilme durumuna, yüklemenin durumuna  $R$ , yükleme geçmişine ve çevre şartlarına bağlıdır.

Yorulma deneylerinde çoğunlukla sinüs dalgası şeklinde bir yükleme kullanılır (Şekil 4.1). Bunun sebebi, deneyleri uygulayan makinelerin genellikle dönen diskler

ya da kütleler kullanmasıdır. Ayrıca çoğu makinedeki yorulma, dalga şekliyle oluşmaktadır. Günümüze farklı birçok dalga şeklini uygulayabilen hidrolik deney cihazları mevcuttur.

ASTM D-2992-06 Standardına göre silindirik boruların iç basınç etkisi altında yorulma deneylerinde uygulanması gereken gerilme oranı  $R=0.05$  olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi, genellikle bu deneyin hidrolik tahrikli deney düzenekleri yardımıyla yapılmasıdır. Zira hidrolik düzeneklerde basıncın sıfıra inmesi mümkün olamamaktadır.

Yorulma ömrü genellikle belli bir gerilme değeri için hasara kadarki çevrim sayısı ile ifade edilir. Bu sonuçlar genellikle maksimum gerilme ve çevrim sayısının logaritması arasında çizilir. Bu diyagram S-N eğrisidir. Şekil 4.2'de iki ayrı kompozit malzeme için S-N diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.2. İki ayrı kompozit malzeme için S-N diyagramı

E-cam/epoksi malzemenin yorulma davranışı çoğu metalinkiyle aynıdır ve düşük gerilme değerlerinde çok yüksek çevrim sayılarına çıkılabilir.

S-N eğrisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$S = \sigma_m \cdot (m \log N + b) \quad (4.5)$$

Burada  $S$  maksimum yorulma gerilmesi,  $\sigma_m$  ortalama statik mukavemet,  $N$  hasara neden olan çevrim sayısı,  $m$  ve  $b$  sabitlerdir. Sabit  $m$  sayısı eğim,  $b$  sayısı ise S-N

eğrisinin kestiği gerilme olarak açıklanır.  $m$ ' nin düşük ve  $b$ ' nin yüksek değeri yüksek yorulma mukavemetini ifade eder.  $m$  ve  $b$  sabitleri için tipik değerler bazı geleneksel kompozitler için Çizelge 4.2' de verilmiştir. Aynı  $R$  oranındaki, karbon fiber ve E-camı fiber kompozitler için  $m$  ve  $b$  değerleri kıyaslandığında, karbon fiber kompozitlerin daha iyi bir yorulma mukavemetine sahip olduğu görülmektedir.  $b$  katsayısı statik mukavemetten daha fazla etkilenmektedir (Sakin 2004).

S-N grafiği üstel olarak da ifade edilebilir.

$$\frac{S}{\sigma_m} N^d = c \quad (4.6)$$

burada  $c$  ve  $d$  sabitlerdir.

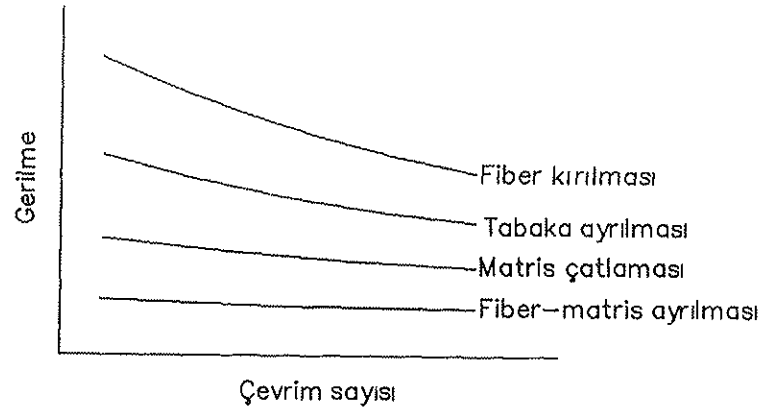
**Çizelge 4.2.**  $n$  ve  $b$  sabitleri için tipik değerler

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

Tek yönlü ve tek tabakalı bir kompozitte üç yorulma hasar biçimi meydana gelir. Bunlar, fiber kırılması, matris çatlaması ve fiber-matris ayrılmasıdır. Fiber kırılmasında fiberler güçlü bir bağlanma dayanımına sahiptirler. Matris çatlaması, eğer fiberler matrise aktarılan şekil değişim miktarını sınırlayan yüksek rijitliğe sahipse önlenebilir. Fiber-matris ara yüzeyi, fiber-matris bağlanma dayanımının azalması ile büyür ve ayrılma oluşur.

Çok tabakalı kompozitlerde ise dört hasar biçimi meydana gelir. Bunlar, fiber kırılması, matris çatlaması, fiber-matris ayrılması ve yorulma yükünün sonucu olarak tabaka ayrılmasıdır.

Bir S-N eğrisi o zaman Şekil 4.3'de gösterildiği gibi bu biçimlerin her biri için oluşturulabilir. Fiber kırılmasına kadar tabaka dayanımında önemli bir azalma meydana gelmemesine rağmen, kompozit hasar biçimlerinden en az birisi tabaka hasarını meydana getirebilir.



Şekil 4.3. Değişik kompozit yorulma hasar biçimleri için S-N diyagramı

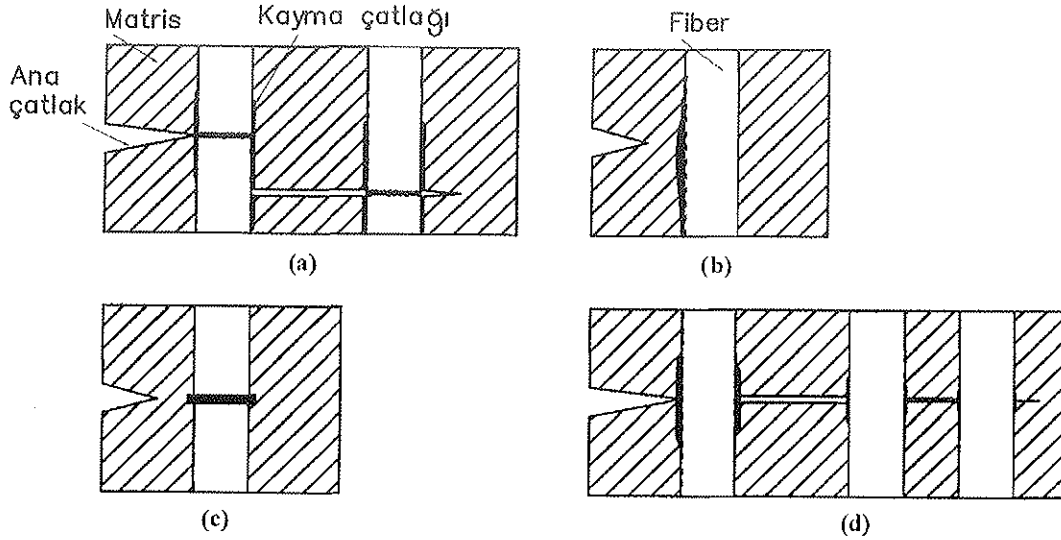
Yorulmanın iki aşamada oluştuğu kabul edilir. Bunlar, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesidir. Yüksek yorulma gerilme seviyelerinde, başlangıç aşaması çevrim yükünde çok erken meydana gelir. Ve yorulma ömrünün büyük bir kısmını çatlak ilerlemesi oluşturur.

Yüksek çevrimli yorulmada ise, yorulma çatlağının başlaması için tüm yorulma çevriminin büyük bir bölümüne ihtiyaç duyulur.

Gerilme çevrim sayısı (S-N) eğrisi yorulma ömrünü ve toplam yorulma ömrünü oluşturan çatlak başlama ve çatlak ilerleme ömürlerini gösterir. Uygulanan değişken gerilmenin değeri arttıkça yorulma ömrü kısalır ve böylece çatlağın daha kısa sürede başlamasına sebep olur. Parçaların yüzey kısımlarında çatlaklar, düzensizlikler varsa yorulma ömründeki çatlak başlaması için geçen süre ortadan kalkar ve bu şekilde toplam yorulma ömrü kısalır.

Kayma çatlakları ile meydana gelen, fiber kırılması ve matris çatlama içeren bir kompozitte yorulma çatlağının ilerlemesi boyunca mümkün sayıda olay meydana gelebilir. Kayma çatlakları, tek başlarına çekme yükü ile yırtılmaya, matris çatlama olmaksızın çatlak önü fiber kırılmasına veya fiber kırılması olmaksızın matris çatlamaına sebep olurlar.

Şekil 4.4'deki olaylar tek yönlü tek tabakalı ve çok tabakalı kompozitlerin her ikisinde de meydana gelebilir. Ancak, çok tabakalı kompozitlerde fiber açısı ve tabaka sınırları, yorulma çatlak ilerlemesinde önemli rol oynar.



Şekil 4.4. Kompozitlerin yorulması boyunca çatlak ilerleme biçimleri

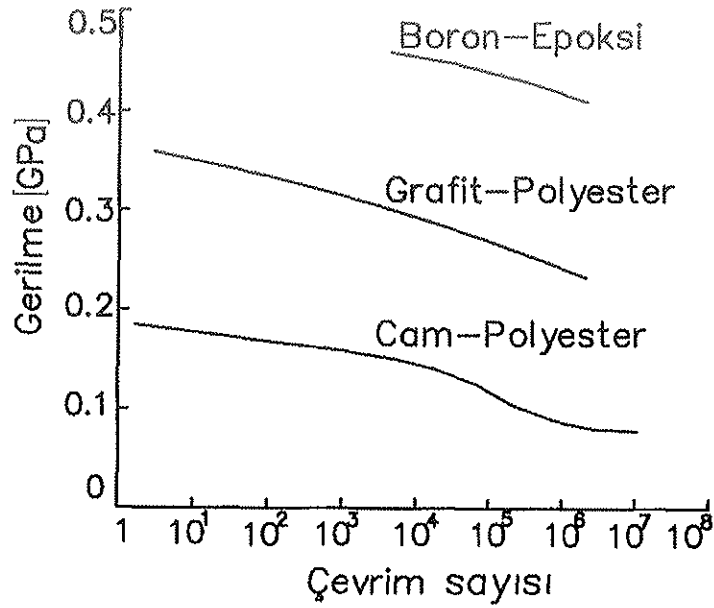
- Kayma çatlakları ile meydana gelen fiber kırılması ve matris çatlama
- Çekme ile oluşturulan kayma çatlakları
- Çatlak önü fiber kırılması
- Fiber kırılması olmaksızın matris çatlama

#### 4.4. Kompozitlerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Kompozit malzemelerde yorulmayı etkileyen özellikler; fiber özellikleri, matris özellikleri, kat (tabaka) yön tayini ve fiber hacmi gibi özelliklerdir.

##### 4.4.1. Fiber Özellik Etkileri

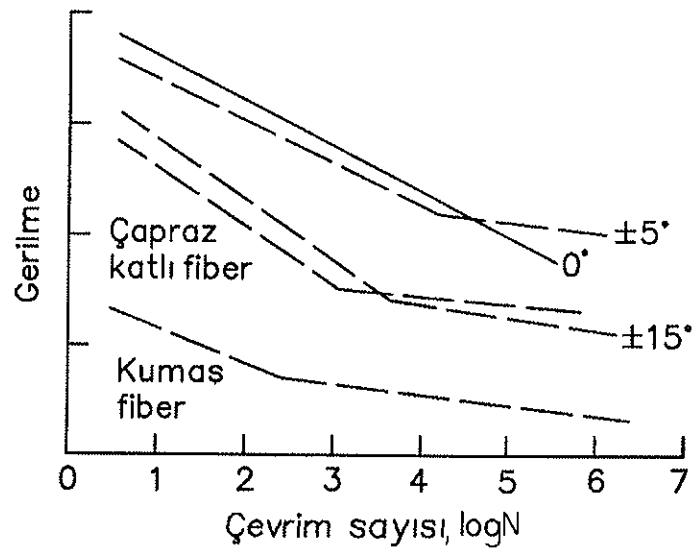
Yüksek dayanım ve rijitliğe sahip fiberler, tek yönlü fiber kompozitler için Şekil 4.5'de görüldüğü gibi en büyük yorulma dayanımına sebep olurlar. Yüksek rijitlikli fiberler, matris çatlamaını engelleyen matristeki şekil değişimini sınırlarlar, bu davranış gerilme yükseltici etkiye sahip olabilir.



Şekil 4.5. Kompozitlerin yorulmasına fiber tipinin etkisi

#### 4.4.2. Yönelme Etkileri

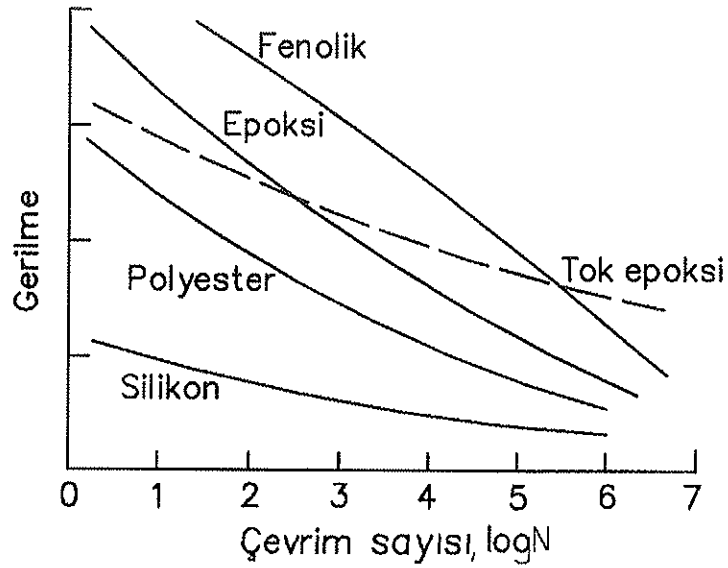
Şekil 4.6'da görüldüğü üzere fiberlerin oryantasyonunda yük, fiber asal eksen yönünde iken en büyük yorulma dayanımı elde edilir. Bu durum, özellikle düşük çevrimli yorulmada gözlenir. Eksen dışı yüklemelerde fiberler oryante edildiği zaman boylamasına yırtılma, çatlak ilerleme hızının azalmasına sebep olabilir. Böylece, yüksek çevrimli rejimde yorulma ömründe artış olur. Bu etki, toplam yorulma dayanımı daha düşük olmasına rağmen, eksen dışı oryantasyonlarda daha fazla görülebilir.



Şekil 4.6. Kompozitlerin yorulmasına fiber oryantasyonunun etkileri

#### 4.4.3. Matris Özellik Etkileri

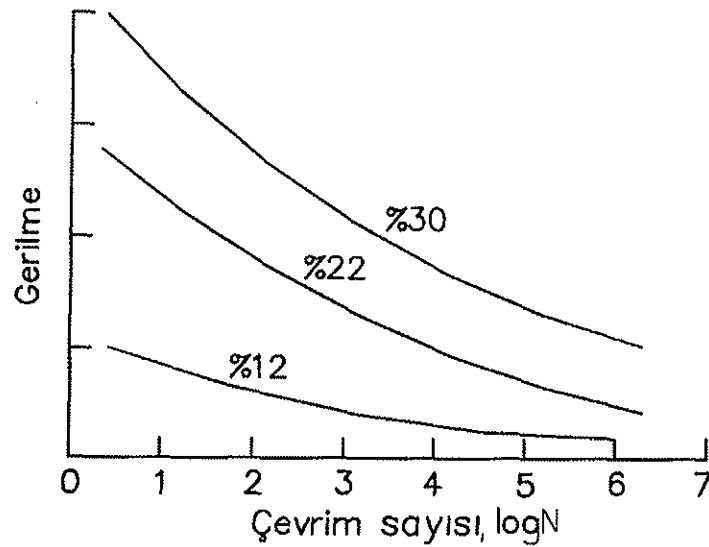
Kompozitlerin yorulma direnci, tok ve yüksek hasar şekil değişimlerine sahip Şekil 4.7'da gösterilen matris malzemeler ile iyileştirilebilir.



Şekil 4.7. Değişik matris malzemelere sahip E-cam fiber kompozitlerin yorulma dayanımları

#### 4.4.4. Fiber hacminin etkileri

Yorulma dayanımına fiber hacminin etkisi S-N eğrisinde ifade edilerek Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kompozitlerin yorulmasına fiber hacminin etkileri

#### 4.5. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri, malzemelerin veya makina parçalarının uygulanan yükleme karşısında göstereceği performansı ve davranışı belirlemek amacıyla yapılır. Yorulma deneyinde malzemeye uygulanan yükler üç gruptur. Bunlar: i) Sabit büyüklükte gerilme ii) Sabit büyüklükte şekil değişikliği iii) Rastgele veya sabit genlikte yüklemedir.

##### 4.5.1. Eksenel gerilmeli yorulma deneyi

Eksenel gerilmeli yorulma deneyinde malzemeye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır.

##### 4.5.2. Eğilme gerilmeli yorulma deneyi

Eğilme gerilmeli yorulma deneyi iki kısımda incelenir.

- i) Düzlemsel eğilme gerilmeli yorulma deneyi
- ii) Dönen eğilme gerilmeli yorulma deneyi

Düzlemsel eğilme gerilmeli yorulma deneyinde numune sabit olup eğilme gerilmesi uygulandığı zaman numune hareketlenir. Dönen eğilme gerilmeli yorulma deneyinde ise, numune dönme hareketi yaparken numuneye eğilme gerilmesi uygulanır. Bu eğilme gerilmeli yorulma deneyi yükün uygulanma durumuna bağlı olarak i) Sabit eğilme momentli ii) Ankastre kiriş türü şeklinde incelenir.

##### 4.5.3. Burulma gerilmeli yorulma deneyi

Burulma gerilmeli yorulma deneyinde numuneye tekrarlanan tarzda burulma gerilmesi uygulanır.

#### 4.5.4. Bileşik gerilmeli yorulma deneyi

Malzeme ya da makina parçasına farklı gerilme türlerinin uygulanmasıyla yorulma olayının incelendiği deneylerdir.

#### 4.6. Yorulma Olayının Gelişimi

Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzeme ya da makina parçasına çekme gerilmesinin uygulanması, bu gerilmeye değişimlerin ya da dalgalanmaların olması ve bu esnada plastik şekil değişiminin gözlenmesi gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri olmazsa yorulma çatlak başlamaz ve ilerleyemez. Çekme gerilmesinde meydana gelen değişimler ve dalgalanmalar çatlak başlatır. Çatlak ilerlemesi ise çekme gerilmesinin etkisiyle olur.

Yorulma üzerine yapılan çalışmaların başlangıç dönemlerinde çevrim sayısını belirlemek üzere sabit büyüklükte değişken gerilmelerle malzemeler yükleniyordu. Daha sonraları ise yorulma hasarlarının metalürjik hatalardan ve tasarımlardan kaynaklandığı ve çatlakların süreksizliklerden başlayıp ilerlediğinin tespit edilmesi üzerine yorulmanın bazı kademelerden geçerek meydana geldiği ve ilerlediği fikrine varıldı.

Kırılma mekaniği açısından bir yapı veya makine elemanının ömrü üç adımda incelenir. İmalattan kaynaklanan bir kusurun ya da sürünme, yorulma etkisiyle bir mikro çatlak oluşumu olan çatlak başlangıcı safhası, kırılma tokluğu ve gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilen kararlı çatlak ilerleme safhası ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın meydana geldiği kırılma safhasıdır (Güldü 1995).

Yorulma üç kademeyle meydana gelir.

- i) Çatlak başlaması
- ii) Çatlak ilerlemesi
- iii) Kırılma

#### 4.6.1. Yorulma çatlak başlaması

Malzemelerde talaşlı işleme sonucu oluşan izler, malzeme yüzeyindeki çizgiler, malzeme içindeki sert yabancı maddeler, çökelmiş sert tanecikler, ikiz sınırları ve tane sınırları gibi kristal süreksizlikler çatlak başlamasını etkileyen unsurlardır.

Mühendislik malzemelerindeki sert, metalik olmayan karbürler, borürler, nitürler ve sülfürler gibi inklüzyonlar ile döküm boşlukları, çatlaklar, dekarbürizasyon tabakaları ve kalıntı ostenit gibi kusurlar çatlağın başlamasına sebep olabilir. Kusurun büyüklüğü ve yerleştiği alanlar (tane içi ve tane sınırı) çatlağın oluşum ve ilerleme başlangıç hızını dolayısıyla da yorulma ömrünü etkiler (Çep ve ark. 2002).

Zorlamalar sonucu makina ve yapı elemanlarında oluşan gerilmeler her zaman ideal olmaz. Çekme ve basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılmayabilir, eğilme ve burulma gerilmeleri yüzeyden ortaya doğru bir azalma göstermeyebilir. Uygulamada bu gerilme dağılımlarında az veya çok sapmalar görülebilir. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletimin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenlerle yerel gerilme yığınları oluşur. Bu gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde yorulma çatlağı başlar. Aşırı zorlanan bir bölgede çatlağın başlaması durumunda ise yorulma kırılmasının önlenmesine genellikle olanak yoktur. Kırılmanın oluşması ise belirli bir çevrim sayısında çatlağın ilerlemesiyle olur. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkararak meydana gelen yüksek gerilme yığınları, çatlağın hızla ilerlemesine ve büyümesine neden olur.

#### 4.6.2. Yorulma çatlak ilerlemesi

Yorulma çatlak ilerlemesi üç safhada gerçekleşir. 1. safha, çatlağın oluşum safhası olup bu bölge, gerilme şiddet faktörü kritik değere ulaşınca kadar devam eder. 2. safha çatlağın ilerleme safhasıdır. 3. safha ise kırılmanın meydana geldiği bölgedir.

Kompozit malzemelerde çatlaklar genellikle, elyaf-matris ara yüzey ve reçine dayanımlarının düşük olması nedeniyle elyaf boyunca oluşmakta ve ilerlemektedir. Bu ilerlemeyi takiben ara yüzey ayrılması, enine çatlama, delaminasyon ve elyaf kopması meydana gelir. Elyaf sıyrılması sonucu kırık yüzey fırçamsı bir görünümündedir.

Yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu (%85-90) malzeme hatalarından dolayı değil, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkilerinden, aşırı yüklemekten, montaj hatalarından, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerden ortaya çıkmaktadır.

Çatlak ilerlemesi, çatlak uzunluğuna karşı çatlak büyüme hızı ( $da/dN$ ) olarak veya gerilme şiddetine karşı çatlak büyüme hızı olarak tanımlanır.

Çatlak ilerleme hızının hesaplanabilmesi için Lineer Elastik Kırılma Mekaniği yardımıyla hazırlanan çeşitli denklemler mevcuttur. Paris-Erdoğan denklemi de bu denklemlerden biridir. Bu denklem

$$da/dN = A(\Delta K)^n \quad (4.7)$$

şeklindedir.

Bu denklemde  $da/dN$  çatlak ilerleme hızı,  $\Delta K$  gerilme şiddet faktörü değişimi,  $n$  ve  $A$  ise malzeme sabitleridir.

## 5. FİLAMAN SARIM YÖNTEMİ

Filaman sargı tekniği sürekli takviye elemanlarının dönel bir mandrel (kalıp) üzerini sarılması ile kompozit parça üretimi gerçekleştirilen, kompozit üretim teknikleri içinde nispeten basit sayılabilecek bir üretim yöntemidir. Tasarımları özel olarak yapılmış sargı makineleriyle kafa ve mandrel dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan paternlerin bütün mandreli kaplaması halinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açıları mandrel boyuna doğru 250 gibi düşük açılardan mandrel eksenine dik açığa kadar değişebilir. Genellikle elyaf/çimentolar arasındaki yapıştırıcı reçine olarak termoset reçine malzemesi kullanılır. Yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda reçine sarım esnasında uygulanır. Alternatif metot olan kuru sarımda ise, önceden reçine emdirilmiş, prepreg elyaf/reçine sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar fırınlanır. Üretim süreci mandrelin çıkarılmasıyla tamamlanır. Gerekli durumlarda parça üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilir.

Üretim sürecinin parça tipine, tasarım özelliklerine, malzeme kombinasyonlarına ve cihazlara bağlı olarak birçok çeşidi vardır. Filaman sargı tekniği ile üretilen yapılar genel olarak dönel yüzeyler şeklindedir, bazı özel durumlarda bir takım sınırlamalarla asimetrik şekiller de üretilebilir. Ürünler, birkaç santimetreden metreler boyutuna kadar değişebilen silindirikler, borular ve tüpler olabilir. Küresel, konik şekiller özel uygulamalarla gerçekleştirilebilir, basınçlı tanklar ve depolama tankları da bu tekniğin yaygın uygulamalarındandır. Yapılar kullanılacakları alanlara ve maruz kalacakları yüklere göre özel olarak tasarlanır. Ayrıca gerekli hallerde kombine üretimler de yapılabilir, bunlara örnek olarak termoplastik boru üzerine sarım, ince metal basınçlı kap üzerine sarım verilebilir.

Filaman sarım tekniğinde hemen her tip sürekli elyaf kullanılabilmesine rağmen filaman sarım metodu esas olarak bir cam elyaf sarım metodudur. Grafit, Aramid ve Kevlar49 gibi elyaf yüksek özgül mukavemet ve elastiklik modülü gerektiren havacılık ve uzay alanlarında kullanılmaktadır. Bu teknikte kullanılan başlıca reçine malzemeleri ise epoksi, polyester ve vinilester olarak özetlenebilir. Filaman sargı makinelerden tamamen bilgisayar kontrollü üç veya dört eksenli makinalara kadar birçok çeşitleri vardır. Bu konular hakkında özel bilgiler ileriki kısımlarda verilmiştir.

## 5.1. Takviye ve Matris Malzemeleri

### 5.1.1. Takviye malzemeleri

Filaman sargı tekniğinde en yaygın takviye malzemesi olarak E-Cam elyaf kullanılmaktadır. E-Cama göre güçlü fakat daha pahalı olan S-Camı, karbon, Aramid gibi elyaflar ise genellikle havacılık sanayinde kullanılır. Her iki cam elyafta filaman sargıya uygun yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Cam elyafların diğer yapı malzemelerine göre tek dezavantajları düşük esneklik katsayısına sahip olmalarıdır. Tek yönlü kompozitlerde erişilebilecek en yüksek elastiklik modülü 42-56 GPa civarındadır. Ancak piyasada kullanılan borular, basınçlı kaplar ve tanklar çok yüksek eğilme ve burulma yüklerine maruz kaldıkları için düşük elastiklik modülü cam elyaflar bu iş için rahatlıkla kullanılabilir.

Daha yüksek elastiklik modüllü sargı malzemeleri arasında en çok ilgi görenler karbon ve aramiddir. Bu takviye malzemelerinin özgül elastiklik modülü cam elyafın özgül elastiklik modülünün yaklaşık üç-dört katı kadardır. Karbon ve aramidin diğer avantajları ise cam elyafinkine yaklaşan özgül mukavemet sağlayan düşük yoğunluklarıdır. Son yıllarda, bu malzemelerin fiyatındaki büyük düşüğe rağmen, daha çok havacılık sanayi karbon ve aramidi etkin olarak kullanmaktadır.

Cam elyafın, daha yüksek elastiklik modülüne sahip fiberlerle çeşitli kombinasyonlarından oluşan melez kompozitler ise, ağırlık ve sertliğin fiyata göre optimize edildiği yapılar için uygundur.

Filaman sargılı yapılarda kullanılmak üzere birçok başka filaman malzemesi test edilmiştir. Bunların arasında çelik tel, bor, berilyum, polyamidler, polyesterler ve asbest bulunmaktadır; fakat hiç birinin kullanımı piyasada yaygınlık kazanamamıştır.

E-camı ve S-camının tek-filaman mukavemetleri S-camınki daha yüksek olmak üzere 2.0 GPa'dan 5.0 GPa'a kadar çıkabilir. Genellikle, açıklanan mukavemet değerleri çok sayıda bireysel deney sonuçların birleşmesi ile elde edilmiş olup açıkça yüksek bir standart sapmaya sahiptir. Bu dağılım, fiberdeki çiziklerden ve çiziklerle çevresel faktörler arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Fiberlerin dayanımını azaltan çevresel faktörlerin başında nem gelir. Çekme dayanımını etkileyen diğer bir faktör de fiber çapıdır. Büyük çaplı filamanların küçük çaplı olanlara göre daha zayıf olduğu gözlemlenmiştir.

### 5.1.2. Matris malzemeleri

Filaman sarım yönteminde matris malzeme olarak epoksi, polyester veya vinilester reçineler esas alınır. Fenolikler, silikonlar, polyamidler ayrıca yüksek ısı dayanım istenen veya elektriksel uygulamalarda kullanılır. Bu üç reçinenin sertleşmesi esnasında su buharı ve solventler çıktığından ısı ve basınç etkisi gerektirir bu yüzden kullanımları zordur.

Ayrıca termoplastikleri matris malzeme olarak kullanma konusunda araştırmaları devam etmektedir. Termoplastiklerin en önemli avantajları sertleştirme işlemi gerektirmemesi ve uzun ömürlü olmalarıdır. Bununla birlikte filaman sarım işlemi için termoplastiklerle ilgili bir yöntem mevcut değildir. Termoplastik sarım için önce elyafın termoplastikle kaplanması daha sonra sarım esnasında elyaflar arasında hava boşluğu kalmayacak şekilde basınç uygulanması gerekir.

Uzay ve havacılık uygulamaları gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek mukavemet istenen yerlerde klasik olarak epoksi reçine tercih edilir. Polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri, daha iyi mekanik özellikler, yorulma dayanımı, ısı dayanım, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir. Uzay ve havacılık sanayinde epoksi reçinenin hala tercih edilme sebebi sayılan özellikleri uzun süreden beri taşıyor olması ve güvenilirliğinin denenmiş olmasıdır.

Filaman sarım için kullanılan epoksiler, levha için kullanılanların aynıdır. Ancak bazı özel uygulamalar için küçük modifikasyonlar yapılır. Epoksi reçine tipleri istenen özel önceliklere göre seçilmelidir. Mesela bromlu reçineler yüksek alevlenme direnci gereken yerlerde; esnek epoksi reçineler darbe dayanımı ve yüksek uzama kabiliyeti gereken yerlerde tercih edilmektedir.

### 5.2. Sarım Yöntemleri

Sarım işlemi kutupsal ve helisel olmak üzere iki temel guruba ayrılır. Her yöntem değişik bir sargı ortaya çıkarır.

Kutupsal sarımda; mandrel sabit kalır ve bu sırada besleme kolu mandrel eksenini etrafında önceden belirlenmiş bir açıda hareket eder. Mandrel üzerinde her harekette bir bant genişliğinde sarım olacak şekilde işlem sürdürülür. Bu tek devre kutupsal sarım

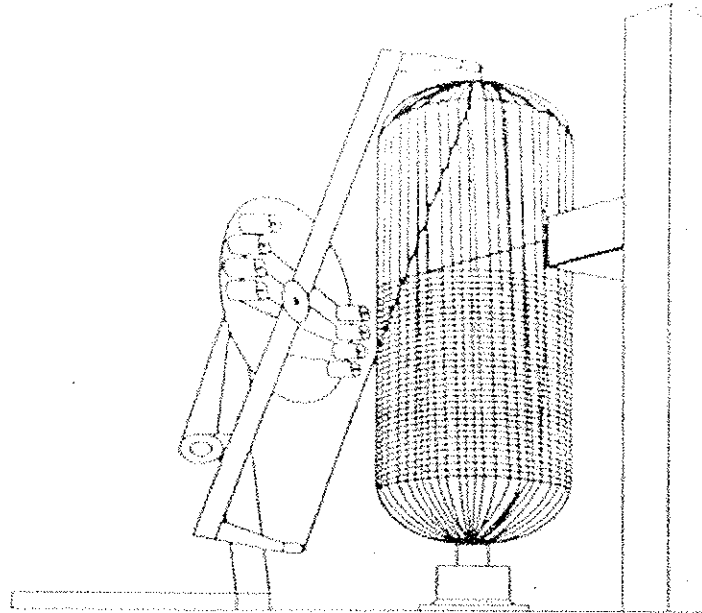
olarak tarif edilir. Elyaf bantları birbirine bitişik olarak sarılır ve bir katman artı ve eksi iki ayrı kattan meydana gelir.

Helis sarımda ise; mandrel dönerken elyaf besleme kafası ileri geri hareket eder. Mandrel dönüş hızı ile kafa hızı ayarlanarak istenilen sarım açısı elde edilir. En yaygın sarım çeşidi çok devreli sarımdır. İlk sarımdan sonra bantlar yan yana değildir. Bu işlemi defalarca tekrarlayarak ilk katmanı elde edilmesi gerekir. Bir katman iç içe geçmiş iki kattan oluşur. Sarım paternleri basit makinalarda deneme yanılma yöntemi ile ayarlanır. Bilgisayar destekli makinalarda ise paternler hesaplanarak bilgisayara girilir (Tarakçıoğlu 1992). Diğer sarım çeşitleri ise teğetsel sarım, boyuna sarım ve bileşik sarım olarak adlandırılır.

Teğetsel sarım veya çevresel sarımda; sarım açısı  $90^\circ$  ye çok yakın olduğundan mandrel her devri sonunda araba bir bant genişliği kadar ilerler. Araba hareketini tamamladığında mandrel yüzeyi elyafı kaplanarak tek kat meydana gelir. Bu sarımda elde edilen silindirik parçada kritik bölgeler ilave sarımlarla veya özel takviye parçalarıyla desteklenirler.

Boyuna sarım; çok düşük açılı, açının mandrel eksenine yakın olduğu sarımlar için kullanılır. Kapalı uçlu basınçlı kaplarda minimum sarım açısı uçlardaki delik çaplarıyla sınırlandırılmıştır (Tarakçıoğlu 1992).

Bileşik sarım; boyuna sarımın teğetsel sarımla takviye edilmesi olarak açıklanabilir. Şekil 5.1'de bir kutupsal sarım makinesi görülmektedir.



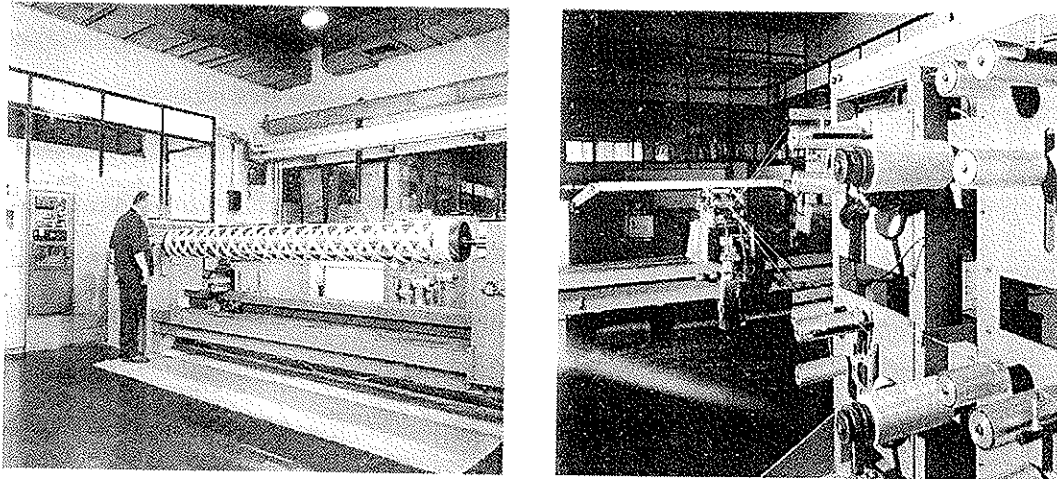
Şekil 5.1. Kutupsal sarım makinesi

### 5.3. Sarım Makinaları

Sarım makinaları kutupsal ve helisel olmak üzere üretim proseslerine göre ikiye ayrılırlar. Kutupsal sarım makinalarında, ağırlıktan ötürü oluşan sehimleri ortadan kaldırmak ve dönen elyaf besleme kolunun (kafa) sabit olarak yerleşimini sağlamak için dikey olarak sabitlenmiş mandreller kullanılmaktadır. Bu tip makinaların en büyük avantajı makine hareketlerinin kontrolünün kolayca sağlanabilmesidir (Şekil 5.1).

Üretim hızının sabit olmamasından dolayı ortaya çıkan atalet etkilerini yok etmek için besleyici kolun hareketi sürekli ve sabit hızdadır. Ancak, kutupsal makinalarda sadece önceden reçine emdirilmiş prepreg verimli olarak kullanılabilir. Çünkü ıslak sarım sisteminin kurulması oldukça zordur (Lubin 1982).

Helisel sarım makinaları; temel hareketleri mandrelin dönmesi ve kafanın ileri geri hareket etmesidir. Bunlara ek olarak, mandrel eksenine dik bir kızak kullanımıyla veya elyafi yönlendiren kılavuz halkanın düşey eksen etrafında sarım yönüne göre değişen dönme hareketi yani besleme deliğinin döndürülmesi ile dördüncü eksen yaratılmış olur. Dördüncü eksenin eklenmesi ile fiberlerin iç kısımlara daha düzgün bir şekilde yerleştirilmeleri mümkün olur. Helis sargı makinalarının kontrolü mekanik veya sayısal olarak sağlanabilir. Mekanik kontrol genellikle sürücü sistem, bağlantı zinciri ve tahrik vidalarıyla sağlanır.

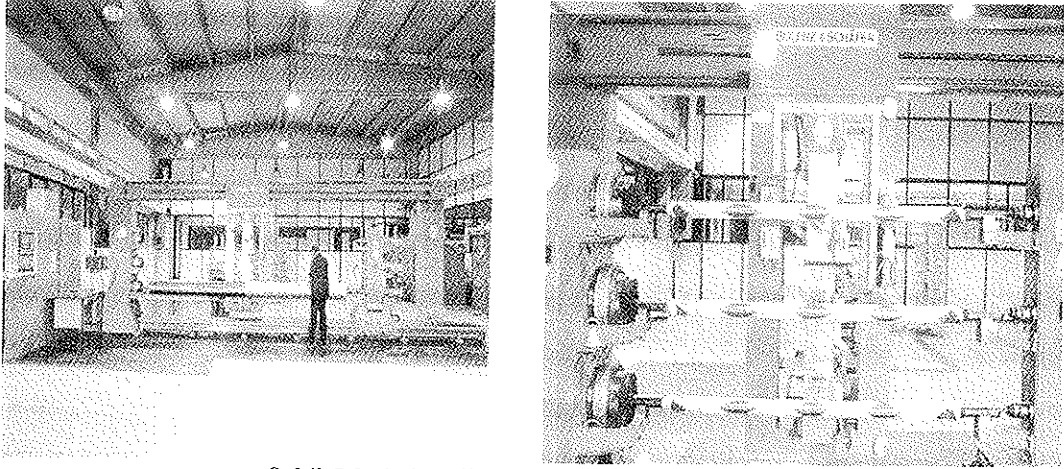


Şekil 5.2. CNC Helisel filaman sarım makinası

Sayısal kontrollü sarımda her eksenin kendi hidrolik servo motoru bulunur. Bu servo motorlar bilgisayar tarafından kontrol edilirler (Şekil 5.2). Mekanik kontrollere sınırlı sarım açısına sahiptirler. Sayısal kontrolde ise istenilen her açıda sarım

mümkündür. Bu iki tip sargı makinasına ek olarak farklı yapılar için özel olarak tasarlanmış makinalarda kullanılabilir.

CNC filaman sargı makinesi; tezgah 4-eksen bilgisayar kontrollüdür ve 3D- interpolasyon yeteneğine sahiptir (Şekil 5.3). En büyük sarım çapı: 600 mm (1 mandrel), 300 mm (3 mandrel )



Şekil 5.3. 4-eksenli CNC filaman sarım makinası

Sistem sarım sırasındaki, elyaf gerginliği, reçine banyo sıcaklığı, elyaf hızı, elyaf uzunluğu, oda sıcaklığı, nem v.b. gibi parametrelerin izlenmesi ve kaydedilmesi için kullanılan ve CAQ olarak adlandırılan bilgisayar destekli kalite yönetim birimine sahiptir.

#### 5.4. Mandreller

Açık uçlu silindirik ve konik şekilli yapılar için kullanılan, çoğunlukla çelik ve alüminyum alaşımlarından üretilen mandrellerin tasarımları oldukça basittir. Uçların kapalı olması gereken hallerde, örneğin basınçlı kaplarda, mandrel tasarımı ve uygun malzemenin seçimi çok dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Yapılan tasarım parçanın mandrelde çıkarılması sırasında meydana gelebilecek hasarları ve kalıntı gerilmeleri asgariye indirebilecek şekilde olmalıdır. Mandrel kendi ağırlığından ve sarım gerilmelerinden etkilenerek deforme olmamalıdır. Ayrıca mandrelin yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen fırınlama sırasında yeterli dayanıma sahip olması ve fırınlama işleminden sonra kolayca çıkarılabilmesi çok önemlidir.

Genel olarak mandreller iki ana grupta incelenebilir.

-Metal alaşımlarından yapılan ve çıkartıldıktan sonra defalarca kullanılabilen mandreller,

-Köpük, mum gibi malzemelerden yapılan, tahrip edilerek çıkarılıp atılan, her bir kullanım için yeniden üretilmesi gerekli olan mandreller.

İstenilen özellikleri sağlayabilecek şekilde, mandrel türleri aşağıdaki gibi sayılabilir (Lubin 1982).

**1. Parçalı küçülebilir metal mandreller:** Bunlar hem parçalıdırlar hem de 25 civarında parça ile ömürleri sınırlıdır. Mandrel çapları 0.9-1.5 m civarındadır. Sökme işlemi çok basit değildir.

**2. Düşük ergime dereceli alaşımlar:** Bu tür malzemelerin yüksek yoğunluk ve orta sarım gerilmesi altında sürünme gibi mahsurları vardır. 0.3 m çap ve uzunluğa kadar kapalı parçaların imalatına uygundur.

**3. Ötektik tuzlar:** Alaşımlara göre daha iyi olan bu malzemeler 0.6 m çapa kadar uygulanabilirler. Dağılması ve kalıplanması kolaydır.

**4. Eriyebilen macunlar (Plasterler):** Eriyebilen veya yıkanabilen bir kabuk kısmı ve iskelet kısmından meydana gelir.

**5. Kırılabilir veya dağılabilir plasterler:** Büyük çaplı imalat için en uygun mandrel malzemesidir. Fakat iç destek gerektirmesi ve kırılıp çıkartılmasında zorluk buldurması gibi mahsurları vardır. Çıkarılması esnasında hasara da yol açabilir. Ayrıca mandrelin çıkarılması için içerisine zincir yerleştirilir.

**6. Kum-PVA:** 1.5 m çapa kadar ve az sayıda imalat için en uygun malzemedir. Sıcak suyla hemen çözülebilir. Fakat kalıplanması problemdir. Kalıp mukavemetinin düşük olması da kullanım alanını sınırlandırır.

**7. Şişirilebilir mandreller:** Burulma momenti şeklindeki yükler için pek uygun olmayan bu metotta, burulma direncini iyileştirmek için mandrelin kum gibi bir malzeme ile doldurulması ve vakum uygulaması yapılabilir. Şişirilebilir mandreller, iç basınç uygulaması ile sertleşmemiş sarıma kapalı bir kalıpta özel şekil verilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.

## 5.5. Sarım Kontrol Parametreleri

Sarım işleminin esası bobin şeklindeki elyafın malafa üzerine istenen özellikleri verecek şekilde sarılmasıdır. Başarılı bir sarım için, elyaf gerilimi, reçine yüzdesi, bant

genişliği ve kat kalınlığının dikkatli kontrolü gerekir. Ayrıca optimum mekanik özellikleri ve mamulün düzgünlüğünün sağlanması ve elyaf hasarının önlenmesi için gereken özen gösterilmelidir.

Elyaf gerilimi seramik, paslanmaz çelik veya teflon kılavuz halkalarla, kampana tipi frenlerle, çapraz pimlerle veya reçine viskozitesi nedeni ile sağlanır. Genellikle elyaf gerilimi, her bir uç için 1 - 4.4 N arasında değişir.

Aşınma ve hasarı önlemek için kuru elyaf demeti reçine içine girinceye kadar gerilme asgari düzeyde tutulmalıdır. Reçine banyosundan sonra gerilme değeri sarım düzeyine çıkarılır. İçten çözülen sabit bobinlerde, kılavuz halka ile yeterli elyaf gerginliği sağlanabildiği halde, makaralı bobinlerde fren tertibatı kullanılmalıdır. Daha gelişmiş tezgâhlarda, her bir bobinin istenen elyaf gerginliği ile çözümlenmesini sağlayan adım motorlu elektronik kontrol sistemi mevcuttur. Tekstil elyafın kılavuzlanmasında seramik halkalar en iyi sonucu vermektedir.

Elyaf ıslatma tertibatının tasarımı yapılırken, elyaf uç sayısı, sarım hızı, reçine viskozitesi ve pelteleşme süresi gibi parametrelerin yanında, reçinenin veya elyafın ısıtılıp ısıtılmayacağı göz önüne alınmalıdır.

Hassas bir sarım için, düzgün bir sarımın yanında bant özelliklerinin iyi kontrolü yani bant kesitinin düzgün ve istenen boyutlarda olması gerekir. Düzgün bir bant ile sadece mukavemet artmaz ayrıca sabit bir kalınlık ta sağlanabilir.

Birim kat kalınlığı, belirli bir bant yoğunluğu (uç sayısı/genişlik) ve elyaf yüzdesi ile hesaplanır. Elyaf kat kalınlığı, genellikle üretici firmalarca hazırlanmış grafiklerden belirlenir. Bant yoğunluğu ve elyaf/reçine oranının dışında, boşluk miktarı ve malafa üzerindeki sıkışmada ortalama kat kalınlığını etkiler.

Sarım hızı tezgâh ve malzeme tipine göre büyük ölçüde değişmektedir. 100 m/dak kadar sarım hızı olumlu sonuç vermektedir. Hassas sarım için daha düşük hızlar (15-30 m/dak) kullanılmaktadır (Tarakçioğlu 1992).

## 6. DÜŞÜK HIZLI DARBE

### 6.1 Düşük Hızlı Darbenin Mekanığı

Çarpışan iki cismin yüzeyleri bir araya geldiğinde küçük bir temas alanında basınç yükselir. Temas süresince her bir anda, temas alanındaki basınç yerel bir deformasyon ve akabinde bir nüfuziyet doğurur.

Darbe sırasında her bir anda, ara yüz veya temas basıncı çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda etki eden bir etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptir, böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin süratini azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş her iki cismin süratının sıfır olmasını sağlar ve neticede sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cisimi birbirinden ayırmaya zorlar, sonunda bu cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Katı cisimlerin arasındaki darbede, çarpışma süresince etki eden temas kuvveti, iki cisim yüzeylerinin bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir neticesidir.

Darbe esnasında ortaya çıkan yerel deformasyonlar çarpışan cisimlerin direngenliğine olduğu kadar temas başlangıcındaki izafi çarpma hızına bağlı olarak ta değişir. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonlara neden olan temas basınçlarını doğurur. Bunlar temas alanının yakınındaki küçük bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlarda temas alanının yakınında plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar (birim şekil değiştirmeler) vardır. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşturma ve dalma şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir (Stronge, 2000).

#### 6.1.1. Normal temas kuvvetinin işi

Normal temas kuvvetinin sıkışma ve geri bırakma aşamalarında yaptığı iş, sıkışma esnasında uygulanan impuls ile ayrılmadaki son impuls arasında bir bağıntı verir. Sıkışma süresince normal temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacık üzerinde (gerçekte, temasın başlangıç noktası civarındaki şekil değiştiren küçük bölgede) bir iş yapar. Bu iş parçacığı deforme eder ve iç enerjisini yükseltir. Şüphesiz parçacığı sıkıştıran kuvvetin bir eşi olan fakat zıt yöndeki kuvvet sıkışma esnasında normal izafi hareketin kinetik enerjisini düşürür. Parçacığın sıkışmasında yutulan enerjinin bir kısmı,

geri bırakma sırasında eski haline gelebilir. Enerjinin eski haline gelebilen bu kısmı elastik zorlanma enerjisi olarak bilinir.

Kuvvetin impulsun türevi  $dp = Fdt$  ile bağıntılı olduğu hatırlanarak  $F$  kuvvetinin normal bileşeninin sıkışabilir parça üzerinde yaptığı iş  $W_n$  hesaplanabilir:

$$W_n = \int_0^t Fv dt' = \int_0^p v dp' \quad (6.1)$$

### 6.1.2 Serbest düşme hareketi

Hava direnci ihmal edilir ve yerçekimi ivmesinin yükseklikle değişmediği kabul edilirse, serbest düşen bir cismin hareketi sabit ivme altındaki bir boyutlu harekete özdeşdir. Bu nedenle sabit ivme için kullanılan kinematik eşitlikleri uygulanabilir. Serbest düşme denklemleri;

$$\begin{aligned} v &= v_0 - gt \\ v_{ort} &= \frac{v_0 + v}{2} \\ y &= -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0 \\ v^2 &= v_0^2 - 2g(y - y_0) \end{aligned} \quad (6.2)$$

Serbest düşmede ilk hız sıfır olduğu zaman;

$$v = \sqrt{2gh} \quad (6.3)$$

### 6.1.3 Darbe enerjisi

$h$  yüksekliğinde vurucu kütesinin sahip olduğu potansiyel enerji ise:

$$\Pi = m.g.h \quad (6.4)$$

**Çizelge 6.1.** İstenilen darbe enerjisi için hesaplanan değerler ( $m=6.35\text{kg}$ )

Darbe Enerjisi (J)	Çarpma Hızı (m/s)	Yükseklik (cm)
5	1.2549	8.026
10	1.7747	16.05

Çizelge 6.1 de her bir darbe enerjisi için Denklem (6.3) ve Denklem (6.4) kullanılarak hesaplanan çarpma hızı ve yükseklik değerleri verilmiştir.

## 6.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

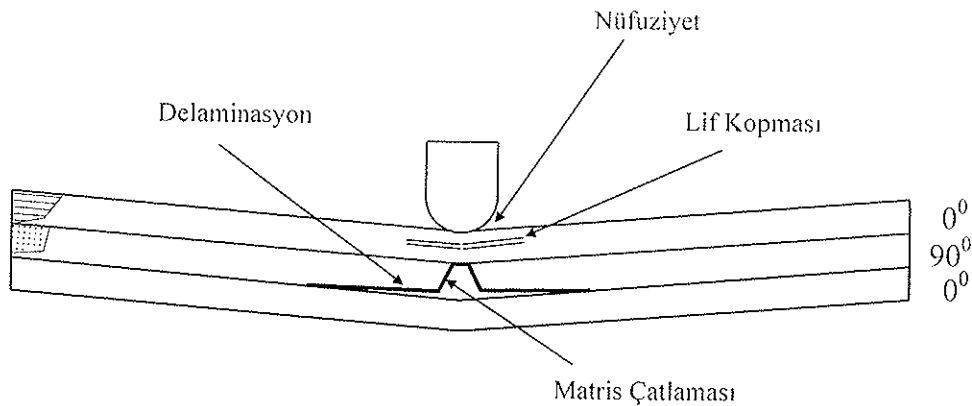
Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi soğurabilir. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemeler enerjiyi elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris çatlaması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde soğurabilirler. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.

### 6.2.1 Enine darbe

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu düzlem dışına doğru (tabaka veya fibere dik yükleme) olandır çünkü kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıflar. Sonuç olarak, enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşümlere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı göstermiş oldukları cevap çok karmaşıktır. Bu, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapılandırılmasına da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini nitelendirme de önemli bir rol oynar. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları mevcuttur. Düşük hızlı darbeler tabakalar üzerinde gözle görülen hasarlar oluşturmayabilirler. Fakat tabaka içerisinde, matris çatlaması, delaminasyon, fiber kopması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu da mukavemette önemli derecede bir düşüme sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür fakat genellikle ihmal edilebilir seviyededir. (Ceyhun ve Turan, 2003).

### 6.2.2. Tabakalı kompozit malzemede darbe sonucu oluşan hasar modları

Elyaf takviyeli plastik tabakalar, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli darbe hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler (bunların dışında daha birçok hasar modundan bahsetmek mümkündür). Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil 6.1'de görüldüğü gibidir (Ceyhun ve Turan, 2003).



Şekil 6.1 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri

1. **Matris modu:** Çatlama liflere paralel meydana gelir. Bunun nedeni bası gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.

2. **Delaminasyon modu:** Tabakalar arası eğilme cevabı uyumsuzluğundan ortaya çıkar.

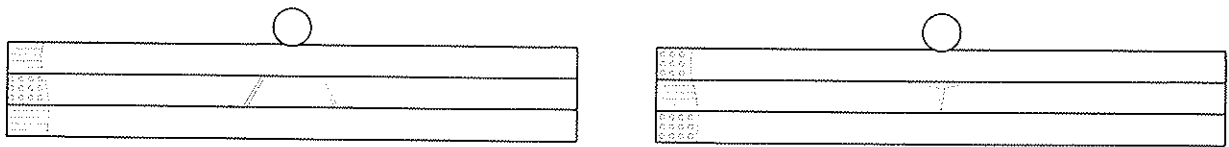
3. **Elyaf modu:** Gerilme altındaki lif kopar, sıkıştırma altındaki lif eğilir.

4. **Nüfuziyet:** Çarpan cisim kompozit malzemeye tamamıyla nüfuz eder.

Malzemedeki hasar modlarının belirlenmesi sadece darbe olayı hakkında bilgi edinmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemeti hakkında fikir edinmeyi sağlaması açısından da çok önemlidir. Hasar modları arasındaki etkileşmeyi anlamak, hasar modunun başlaması ve ilerlemesini anlamak açısından da çok önemlidir.

### 6.2.2.1 Matris hasarı

Literatürde rapor edilen darbe testlerinin çoğunluğu, düşük enerjili testleri içerir. Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris çatlama şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca lif ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matris çatlama, tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lif doğrultusuna paralel düzlemlerde oluşur. Darbeden sonra, tahmin edilmesi çok zor olan ve karmaşık bir düzende bulunan matris çatlakları vardır. Tabakalı kompozitin darbe sonrası özelliklerinde matris çatlaklarının çok büyük etkisi olmadığından bunların belirlenmesi çok ta gerekli değildir. Ama hasar süreci matris çatlakları ile başlar ve arkasından bu çatlaklar tabaka ara yüzlerinde tabaka ayrılmasına (delaminasyon) neden olur. İki tür matris çatlağı gözlenir: çekme çatlakları ve kayma çatlakları (Şekil 6.2).



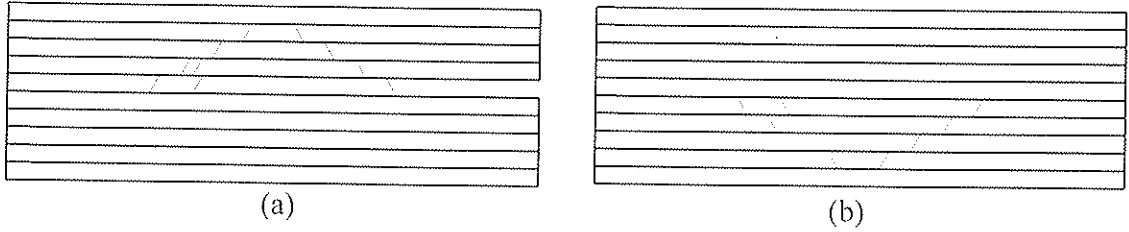
(a)

(b)

Şekil 6.2 Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı

Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakacığın enine kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda

önemli rolü oynadığını göstermektedir. Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler (Şekil 6.3a). İnce tabakalı kompozitler için, kompozitin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur. Bu da matris çatlakları ve delaminasyonları başlatarak ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir hasar görüntüsü verir (Şekil 6.3b).



Şekil 6.3 Hasar örnekleri (a) çam ağacı görünümülü (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümülü

#### 6.2.2.2. Delaminasyon

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir ayrılmadır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı elyaf yönlendirmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı kayma gerilmeleridir. Bu konudaki deneyler ve analizler, eğilmenin enine doğrultuda dış bükey olduğu ve lif doğrultusu boyunca tabakanın iç bükey eğilmeye eğilimli olduğunu göstermektedir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyumsuzluk ne kadar büyük olursa ki  $0^\circ/90^\circ$  en kötü elyaf doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, sıralanma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir.

Matris çatlaması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris çatlaması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Enine darbeye maruz  $0^\circ/90^\circ/0^\circ$  tabakaları için delaminasyon ve matris çatlaması etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlardaki eğimlenmiş çatlaklar ara yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler (Şekil 6.2.a). Oluşan çatlakların ara yüzeye ulaşınca durdurulması; elyaf yönlendirmelerindeki değişimden

dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine çatlama tarafından zorlanır (Şekil 6.2.b). Düşey eğilme çatlağı büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matris çatlamları, kritik matris çatlamlarıdır. Delaminasyon, matris çatlamlarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kayma gerilmelerinden dolayı Mod I ayrılma olarak başlamaktadır.

### **6.2.2.3. Elyaf kopması**

Hasar modlarından bir diğeri olan elyaf kopması, genellikle matris çatlama ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf kopmasına neden olan en önemli iki etken:

1. Yüksek yerel gerilmeler ve nüfuziyetin neden olduğu etkilerdir (esas olarak kesme kuvvetleri tarafından idare edilen etkiler). Bu olay vurucunun hemen altında gerçekleşir.
2. Yüksek eğme gerilmeleridir. Bu olay ise, darbeye maruz kalmayan yüzde meydana gelir.

### **6.2.2.4. Nüfuziyet**

Nüfuziyet, hasarın makroskobik bir modudur ve çarpan cismin malzeme üzerindeki dalma miktarını veya delme miktarını ifade eder. Elyaf hacim oranlarının aynı olduğu farklı boyutlardaki malzemelerde çarpan cismin nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır.

## 7. MATERYAL VE METOT

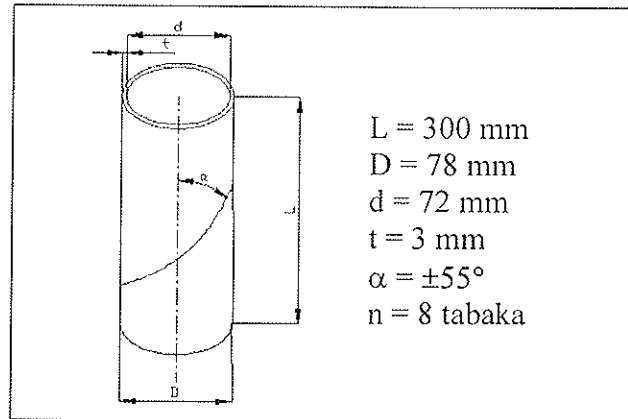
### 7.1. Kompozit Boruların Üretimi

$\pm 55^\circ$  cam/epoksi filaman sarım kompozit borular İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. (İzmir, Türkiye) tarafından üretilmiştir. Bu çalışmada  $\pm 55^\circ$  sarım açılı kompozit borular kullanılmıştır. Kompozit boruların üretiminde yaş sargı metodu kullanılmıştır. Kompozit borulardaki elyaf malzemesi 17  $\mu\text{m}$  çapında Vetrotex 1200 teks E camı, matris malzemesi ise Ciba Geigy, Bisphenol A, Epoksi CY 225 tir. Yaş sargı metodunda elyaflar öncelikle 60  $^\circ\text{C}$ ' lik reçine banyosundan geçirilmiştir. Çapı 72 mm uzunluğu 1 m olan mandreller üzerine kompozit borunun mandrelden kolay çıkması için QZ-13 kalıp ayırıcı sürülmüştür. Reçineye emdirilen elyaflar mandreller üzerine boru eksenine ile arasında  $\pm 55^\circ$  olacak şekilde sarılmışlardır. Helisel sarım işlemi kompozit borunun toplam tabaka sayısı 8 olacak şekilde devam etmiştir. Sarım işlemi bittikten sonra kompozit borular önce 135  $^\circ\text{C}$ ' de 2 saat süreyle, sonra da 150  $^\circ\text{C}$ ' de 2 saat süreyle fırında kür edilmiştir. Kür işleminden sonra her bir deney numunesinin uzunluğu 300 mm olacak şekilde kesilmiştir. Çizelge 7.1 de kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 7.1.** Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri

	$E$ (GPa)	$\sigma_{\text{sek}}$ (MPa)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\epsilon_{\text{kop}}$ (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2.6	4-5
Matris: Epoksi Reçine	3.4	50-60	1.2	1.5-2

Test numunesinin uzunluğu ve iç çapı sırayla 300 ve 72 mm dir. Şekil 7.1 de numune geometrisi gösterilmiştir.



**Şekil 7.1.** Numune geometrisi

## 7.2. Kompozit Boru Yakma Deneyi

Kompozit boru yakma deneyi ASTM D 2584' e göre yapılmıştır.  $\pm 55^\circ$  sarım açılı kompozit borudan, üç adet 37.5 mm uzunluğundaki yakma deney numunesi kesilmiştir. Yakma numunelerinin hacimleri ve hassas terazi kullanılarak kütleleri tespit edilmiştir. Yakma numuneleri sıcaklığı 600 °C olan fırında reçine tamamen yanıcaya kadar bekletilmiştir. Yakma işlemi sonrası geriye sadece cam elyaf kalmıştır. Hassas terazide tartılarak her numuneye ait cam elyafın kütlesi belirlenmiştir. Daha önce elyaf ve reçine toplam kütlesi bilindiği için, toplam kütlede elyafın ağırlığının çıkarılması ile reçine ağırlığı tespit edilmiştir. Elyaf hacim oranı değerleri Denklem 7.1 ile belirlenir:

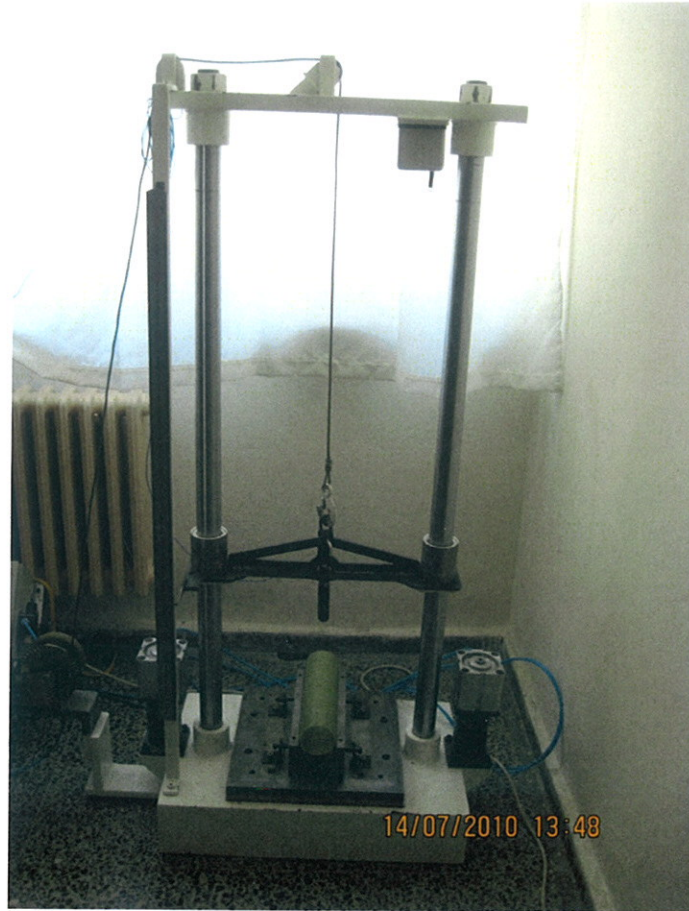
$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (7.1)$$

Burada  $W_f$  elyafın,  $W_c$  kompozitin kütlesi ve  $\rho_f$  elyafın,  $\rho_c$  kompozitin yoğunluğudur.

## 7.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

Düşük hızlı darbe ile numunelerde hasar oluşturulması için özel olarak imal edilmiş dinamik test cihazı kullanılmıştır. Cihaz farklı darbe enerjilerinde veya farklı darbe hızlarında darbenin başlangıcından sonuna kadar, darbeyi kaydedebilen özel bir kabiliyete sahiptir.

Cihazımız üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi vurucu kütesinin ve kuvvet algılayıcının bağlı olduğu lineer yataklı üst tabladır. İkincisi ise CTP boru numunelerinin yataklanması için kullanılan V yatağı grubudur. Son elemanımız ise elektronik kontrol ünitesidir. Düşük hızlı darbe test cihazımız Şekil 7.2'de görülmektedir.



Şekil 7.2. Düşük hızlı darbe test cihazı

Ayrıca cihaz üzerinde vurucu kütleini istediğimiz yüksekliğe kaldırabileceğimiz bir makara sistemi mevcuttur. Makara halatının uç kısmında vurucu kütleini tutan bir pim vardır. Bu pim çekildiğinde vurucu kütleisi serbest düşme ile çelik mil üzerinde düşey olarak harekete geçer.

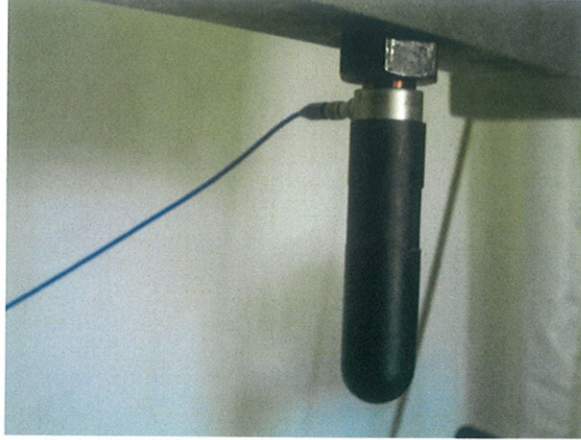
### 7.3.1.Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı

Vurucu kütleinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlamak amacıyla lineer yatak sistemi kullanılmıştır. Çelik miller üzerinde hareket eden karşılıklı iki lineer rulmanlı yatak Şekil 7.2’te de görüldüğü gibi vurucu kütleinin her iki kenarına bağlanarak monte edilmiştir.

Vurucunun kütlesi bağlı olduğu lineer yatak ve bağlama elemanlarıyla birlikte 6.35 kg dır. 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir.

Şekil 7.3’da vurucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. Deneyde kullanılan kuvvet algılayıcı PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) modelidir. 22.6

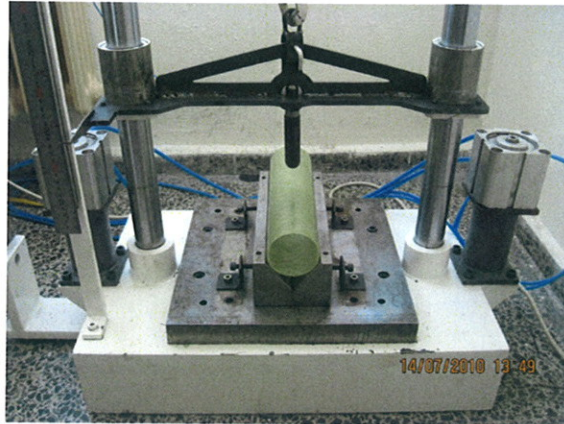
kN ölçme kapasitesi vardır. Vurucu kütlesi ile vurucu arasına monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcıya bağlı düşük gürültülü teflon kablo yardımı ile sinyal elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



Şekil 7.3. Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

### 7.3.2.CTP boru yataklaması

Kompozit deney numunelerinin düşük hızlı darbe deneylerinde, her bir numune Şekil 7.4'de görüldüğü gibi V yatağı üzerine serbestçe konmuştur. Vurucu, numune üzerine ilk darbeyi yaptıktan sonra mekanik olarak tutulmuş böylece tekrarlı darbeler engellenmiştir.



Şekil 7.4. V yatağı üzerindeki deney numunesi

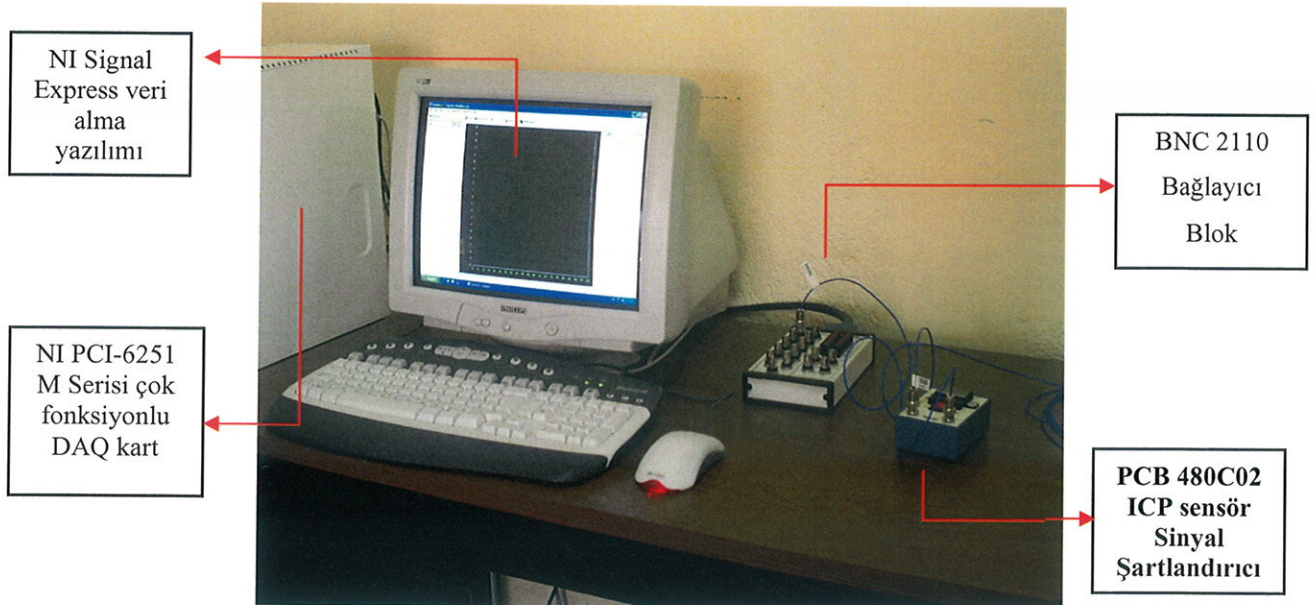
### 7.3.3. Elektronik kontrol ünitesi

Elektronik aksamda kuvvet algılayıcıdan gelen sinyali algılayıp yükselten bir sinyal şartlandırıcı mevcuttur. Kuvvet algılayıcıya ve sisteme uyumlu olabilmesi için PCB 480C02 ICP tipinde bir sinyal şartlandırıcı seçilmiştir. 24 volt gerilimle çalışmaktadır. Enerjisi üç adet 9 volt'luk pil ile sağlanmaktadır. Kuvvet algılayıcı ile sinyal şartlandırıcı arasındaki bağlantıda PCB 003C30 teflon kablo kullanılmıştır. Kablo kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin özelliğini kaybetmeden iletilmesini sağlamaktadır.

Sinyal şartlandırıcıda yükseltilecek sinyali DAQ karta iletilebilmesi için BNC bağlayıcı blok kullanılmıştır. Ayrıca mevcut sistemle beraber çalıştırılacak cihazlar için DAQ kart tarafında üretilen gerilim bu bağlayıcı blok üzerinden alınabilmektedir. Sinyal şartlandırıcı ile bağlayıcı blok arasında kullanılan teflon kablo ise PCB 003D03 modelinde üretilen kablodur. Bağlayıcı blok ile DAQ kart arasında kullanılan kablo modeli ise SHC 6868EPM' dir.

Ana kart üzerine yerleştirilen DAQ kart ise gelen sinyali algılayıp işleyen karttır. NI PCI-6251 M serisi çok işlevli DAQ kart seçilmiştir. DAQ kart aynı anda birbirinden farklı birçok sinyali alıp işleyebilmektedir. Bunun yanı sıra istediğimiz özellikte yeni sinyaller de üretilebilmektedir. Bu sinyalleri bağlayıcı blok üzerinden alarak başka sistemler çalıştırılabilir.

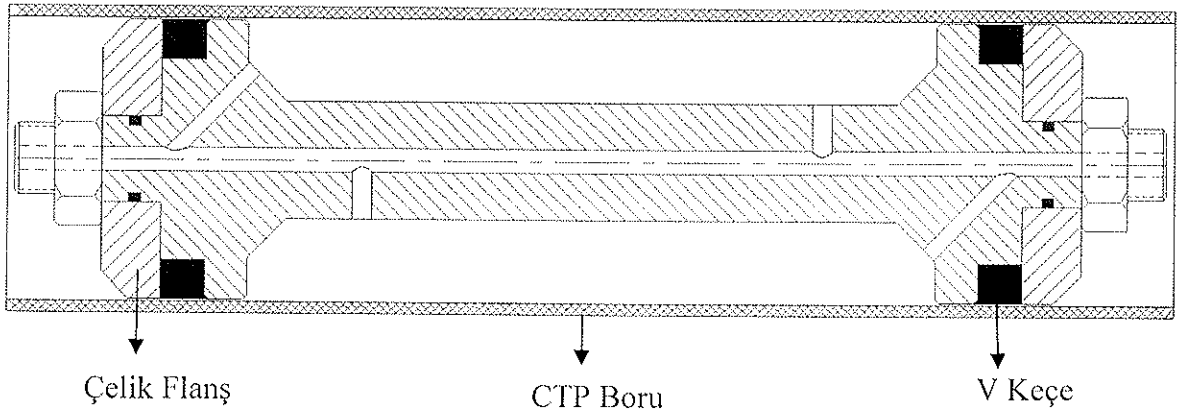
NI Signal Express yazılımı ile zamana göre kuvvetin değişim grafiği elde edilmiştir. Şekil 7.5'de elektronik kontrol ünitesi görülmektedir.



Şekil 7.5. Elektronik kontrol ünitesi

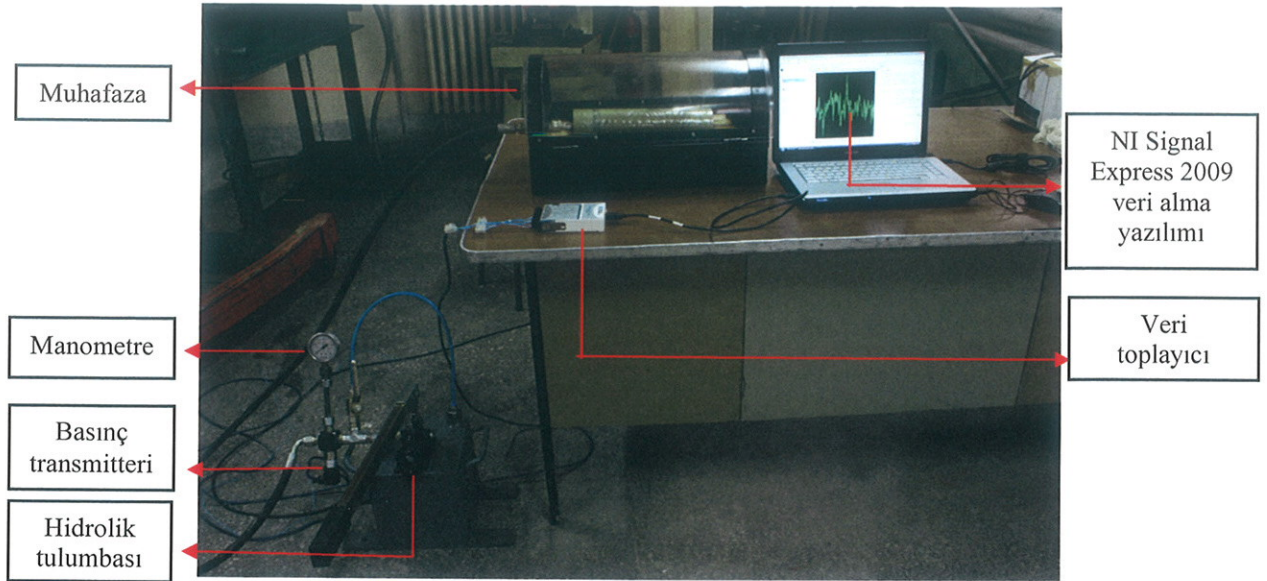
#### 7.4. Serbest Uçlu $\pm 55^\circ$ Sarım Açılı CTP Boruların Statik İç Basınç Deneyleri

Statik iç basınç deneyleri, ASTM D 1599-99(2005)' e göre yapılmıştır. Statik iç basınç deneyleri statik patlama basınç değerlerinin tespiti ve hasar mekanizmasının incelenmesi için yapılmıştır. Statik patlama basınç değeri yorulma deneylerinde kullanılacak olan gerilme oranlarının belirlenmesi için gereklidir. Darbe hasarsız, 5 J ve 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış deney numunelerinin patlama mukavemeti statik iç basınç deneyleri ile tespit edilmiştir. Böylece düşük hızlı darbe hasarının patlama mukavemetine etkisi belirlenmiştir.



Şekil 7.6. Serbest uçlu iç basınç test aparatı

Serbest uçlu iç basınç testi için Şekil 7.6 de görülen düzenek hazırlanmıştır. Kademeli iç basınç artışı için hidrolik pompa ile yükleme yapılmıştır. Sızdırmazlığı sağlamak için iki ucu vidalı mile karşılıklı olarak yüksek basınca dayanıklı iki V keçesi takılmıştır. Bu keçeler iki çelik flanşla desteklenerek, vidalı mile uygun sızdırmazlık elemanları ile monte edilmiş ve sistem deneye hazırlanmıştır. Hazırlanan düzenek Şekil 7.6' te görüldüğü gibi CTP borunun içine monte edilmiştir. CTP boru iki ucu V keçeler üzerine gelecek şekilde monte edildiğinden, iç basınç etkisi ile çapta büyüyerek boyca kısalabilmektedir. Bu bakımdan serbest uçlu iç basınç deneyi olarak adlandırılmıştır.



Şekil 7.7. Serbest uçlu iç basınç deneyi seti

Şekil 7.7’te serbest uçlu içi basınç deney düzeneği görülmektedir. İçerisine aparat takılan CTP boru yüksek patlama gerilmesine dayanıklı bir kabin içerisine konularak deneyler yapılmıştır. Kabinin üzeri şeffaf olduğu için deney boyunca boruda meydana gelen hasar gözlenmiş ve not edilmiştir. Deney numunesi içerisine bir el tulumbası vasıtasıyla basınç yüklemesi yapılmıştır. ASTM D 1599-99’ a göre son hasarın (patlama) başlangıçtan itibaren 60-70 saniye arasında gerçekleşmesi gerekmektedir. El tulumbasıyla yağ basılırken buna dikkat edilmiş ve yüklemenin lineer olması sağlanmıştır. Son hasarın belirtilen süreden önce ya da sonra gerçekleşmesi durumunda deney tekrarlanmıştır. Deney esnasında basınç artışı manometreden takip edilmiştir. Ayrıca elektronik bir düzenek yardımıyla basıncın zamana göre değişimi kaydedilmiştir. Bu düzende bulunan basınç transmitteri üzerine gelen basınç değişimine göre gerilim üretmektedir. Üretilen gerilim bir veri toplayıcı vasıtasıyla NI Signal Express 2009 veri alma yazılımına iletilmiştir. Bu yazılım sayesinde basıncın zamana göre değişim grafiği elde edilmiştir. Elde edilen grafikler sonuç bölümünde verilmiştir.

### 7.5. Serbest Uçlu $\pm 55^0$ Sarım Açılı CTP Boruların Yorulma İç Basınç Deneyleri

Yorulma iç basınç deneyleri ASTM E 2992 standardına göre yapılmıştır. Deneyler için PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı kullanılmıştır. Serbest uçlu iç basınç temin edilmesini sağlayan aparat kompozit boru içerisine sabitlendikten sonra,

boru cam mika bir kabin içerisine yerleştirilmiştir. Kompozit borunun hidrolik güç ünitesi ile bağlantısı sağlandıktan sonra, PLC ünitesinden üst ve alt basınç değerleri girilerek sistem çalıştırılmıştır. Sisteme, deney numunelerinin statik patlama basıncının %30, %35 ve %40'i olmak üzere üç farklı üst basınç değeri uygulanmıştır. Deney boyunca yorulma yük oranı  $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}=0.05$  ve frekans değeri  $f=0.416$  Hz olacak şekilde (dakikada 25 çevrim) sabit tutulmuştur.

Bu çalışmada ASTM D2992-06 e göre (silindir teorisi) uygulanan gerilmeler basınç  $p$  değerlerinin kullanılarak  $\sigma$  gerilme değerlerinin hesaplanmasında ince cidarlı kaplar ( $D/t > 20$ ) teorisi kullanılmıştır. Buna göre çevresel gerilme

$$\sigma = p(D - t_r) / 2t_r \quad (7.2)$$

Burada,

$\sigma$  = çevresel gerilme, kPa

$D$  = ortalama takviyeli dış çap, mm

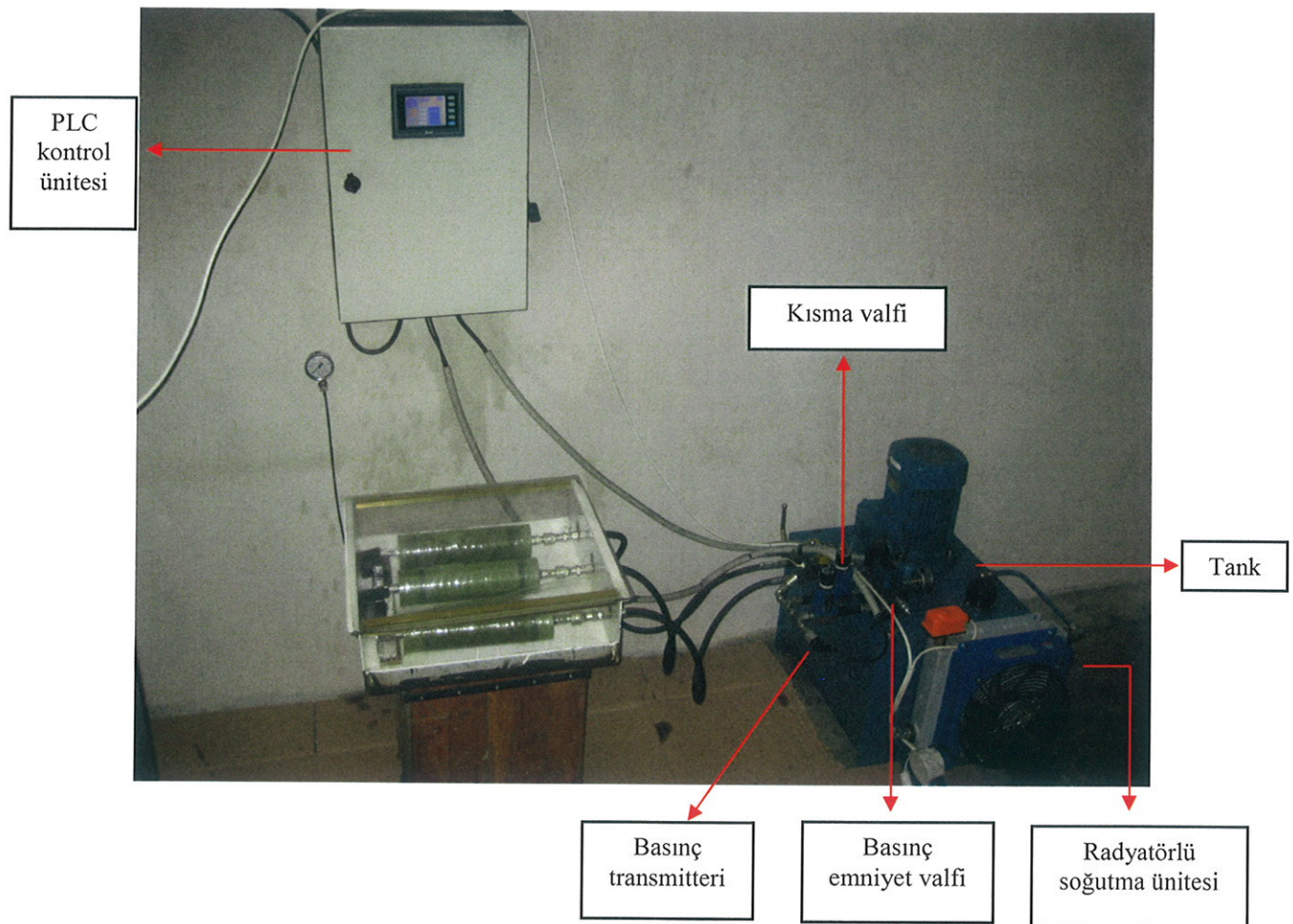
$p$  = iç basınç, kPa ve

$t_r$  = minimum takviyeli cidar kalınlığı, mm

### 7.5.1. Yorulma iç basınç deney cihazı

Yorulma deneyleri için Şekil 7.8'de gösterilen PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı kullanılmıştır. Bu iş için;  $p = 250$  bar basınç ve  $Q=8$  l/dak'lık debi kapasiteli dişli pompası bulunan, tank hacmi  $V=60$  litre olan bir hidrolik güç ünitesi hazırlandı. Pompa çıkışına alt ve üst basınçları mekanik olarak set edebileceğimiz birer adet basınç emniyet valfi konuldu. Bunun üzerine PLC ünitesinden uyarı alan, selenoid kumandalı 2x2'lik bir yön kontrol valfi konuldu. Valf çıkışına devredeki yağ basıncını algılayan SIEMENS marka analog bir basınç transmitteri takıldı. Hidrolik sistem aynı anda 3 adet deney numunesi ile birlikte çalışmaya müsaade edecek kapasitede tasarlandı. Test aparatlarını hidrolik devreye bağlamak için çok çabuk ve kolay sökülüp takılabilen, 3 adet quick kaplin takılı birer metre uzunluğunda esnek hidrolik hortumlar kullanıldı. Ayrıca sinüzoidal bir gerilme değişimi elde etmek amacıyla, ayrı ayrı ayarlanabilen gidiş ve dönüş hatlarına birer kısma valfi konuldu. Hidrolik akışkan olarak 46 numara hidrolik yağı kullanıldı. Uzun süreli çalışmak zorunda kalan test cihazına, yükselen yağ sıcaklığını düşürmek amacıyla radyatörlü bir soğutma ünitesi eklendi.

PLC kontrol ünitesi; analog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrandan oluşmaktadır. İstenilen frekansta çevrim sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Çalışma prensibi; numune hattındaki basınç, ayarlanan üst basınç değerine ulaştığını basınç sensöründen aldığı sinyal ile algılayan kontrol ünitesi, selenoid valfi kumanda ederek basınçlı yağın tanka tahliyesini sağlamakta ve ayarlanan frekans değerini sağlayacak bir süre sonunda, valfi tekrar eski konumuna almaktadır. Bu işlem ta ki boru hasara uğrayıncaya kadar devam etmektedir. Tabii ki dijital ekran, hattaki yağ basıncını ve çevrim sayısını sürekli olarak göstermekte ve kaydetmektedir. Dijital ekrandan okunan basınç değerleri ile devreye takılı hassas bir analog manometreden okunan değerler karşılaştırılarak, PLC ünitesinin kalibrasyonu yapılmıştır.



Şeki 7.8. PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı

## 8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 8.1. $\pm 55^\circ$ Sarım Açılı CTP Boruların Yakma Deney Sonuçları

$\pm 55^\circ$  sarım açılı kompozit boruların elyaf hacim oranını belirlemek amacı ile ASTM D2584'e göre yakılan deney numuneleri Şekil 8.1'de görülmektedir. Deney sonucu kompozit boru elyaf hacim oranı  $V_f=0.50$  olarak bulunmuştur.



Şekil 8.1. Yakılmış deney numuneleri

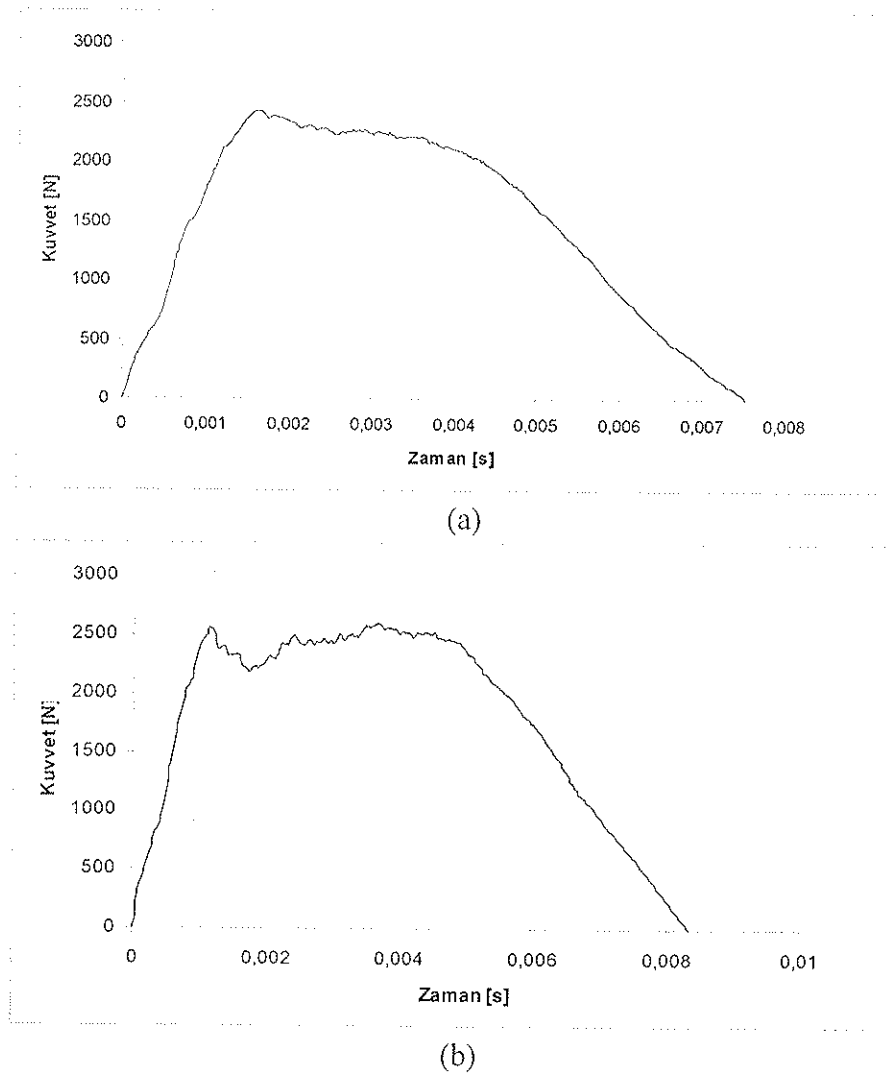
### 8.2. $\pm 55^\circ$ Sarım Açılı CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

Deneyler 5 Joule ve 10 Joule'luk çarpma enerjilerinde yapılmıştır. Bu enerjileri elde edebilmek için vurucu kütesinin bırakılacağı yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. Vurucu kütlesi 5 Joule'luk enerji seviyesi için 8,026 cm yükseklikten, 10 Joule'luk enerji seviyesi için ise 16.05 cm yükseklikten düşürülmüştür. Yarı küresel uçlu vurucu ile her bir numunenin ortasına darbe yapılmıştır. Vurucu ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütlesi tutularak tekrarlı darbeler engellenmiştir. Darbenin ilk başlangıcından sonuna kadar bütün veriler kuvvet algılayıcı tarafından elektronik aksama iletilmiştir. Bu veriler Signal Express yazılımı ile elde edilen kuvvetin zamana

göre değişim grafiğinde gösterilmiştir. Her bir deneyde kuvvetin zamana bağlı değerlerinden elde edilen karakteristikler Ek 2'de çizelge halinde verilmiştir.

### 8.2.1. Kuvvet-Zaman değişimi

şekil 8.2 a-b'de sırayla 5 Joule ve 10 Joule'luk çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet-zaman değişimleri görülmektedir. Elde edilen kuvvet-zaman değişimlerinin an eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir.

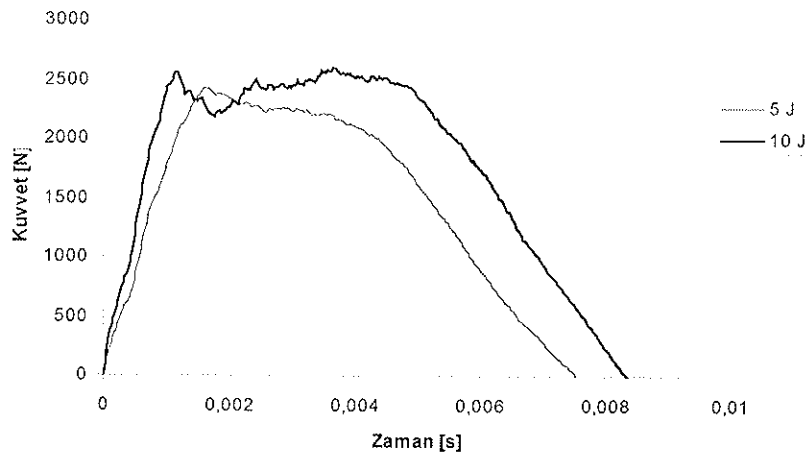


şekil 8.2. CTP kompozit boru numunesinde kuvvet-zaman değişimi a) 5 J darbe enerjisi için b) 10 J darbe enerjisi için

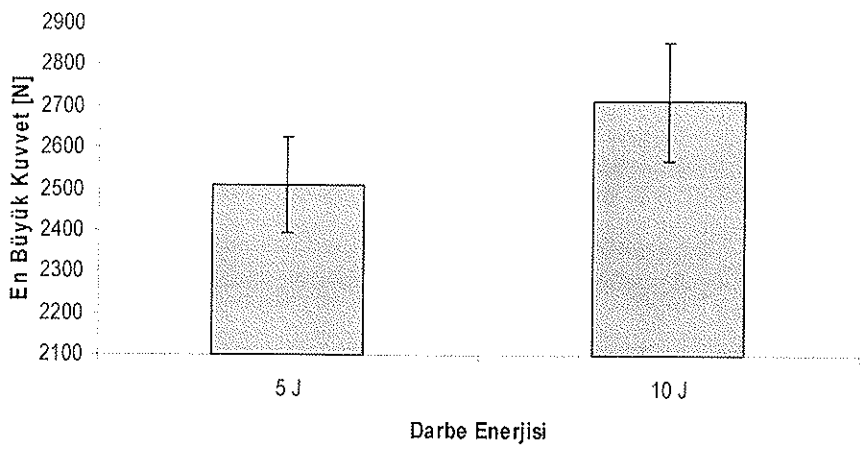
şekil 8.2' de verilen her iki grafikte de kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sıfıra düşmektedir. Her bir grafikte darbenin başlangıcında küçük salınımlar oluşmaktadır. Kuvvet en büyük değerine ulaşınca bu

salınımlar hızla artmaktadır. Bu durum numunenin üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang & Vukhanh, 1994). Darbe esnasında kuvvet değerinin 2000 N'un üzerinde olduğu zaman dilim içerisinde numunede oluşan hasarın daha fazla olduğu grafikte görülmektedir.

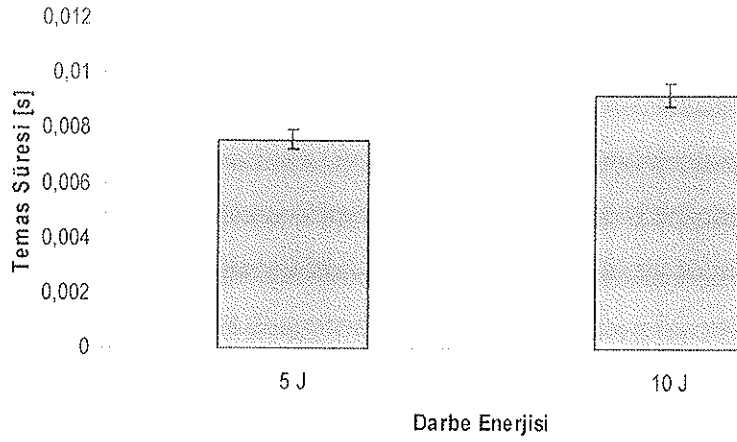
Şekil 8.3'de farklı darbe enerjilerinde elde edilen kuvvet-zaman değişimi birlikte görülmektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla numune üzerinde oluşan en büyük temas kuvvetinin arttığı grafikte açıkça görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artmasıyla numunede oluşan temas süresi de artmaktadır. 10 J darbe enerjisiyle yapılan deneyden elde edilen grafikte salınımların çok daha fazla olması numunede daha fazla hasar oluştuğunu göstermektedir (Kara, 2006). Şekil 8.4' de farklı çarpma enerjilerinde oluşan en büyük temas kuvveti, Şekil 8.5' de ise farklı çarpma enerjilerinde oluşan temas süresi gösterilmiştir.



Şekil 8.3. CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet-zaman değişimi



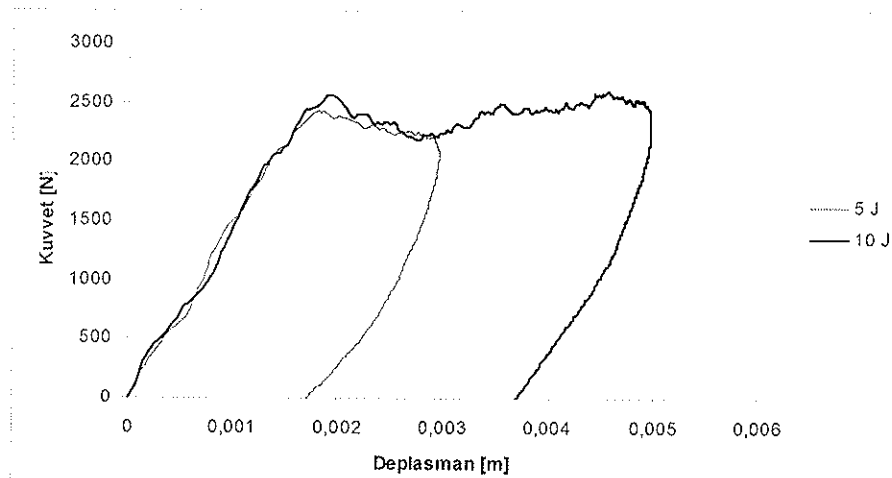
Şekil 8.4. CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde oluşan en büyük temas kuvveti



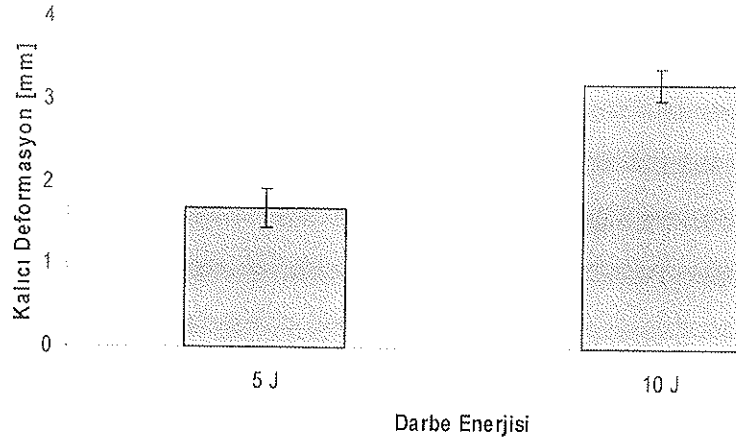
Şekil 8.5. CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde oluşan en büyük temas süresi

### 8.2.2. Kuvvet-Deplasman değişimi

Şekil 8.6'deki grafikte farklı darbe enerjilerinde elde edilen kuvvet-deplasman değişimi birlikte görülmektedir. Kuvvet-deplasman grafiği altında kalan alan numunede yutulan enerjiyi vermektedir. 10 J darbe enerjisiyle yapılan deneyde numune tarafından yutulan enerji miktarının daha fazla olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 8.7'deki grafikte 5 J ve 10 J darbe enerjisi sonucunda oluşan kalıcı deformasyon miktarları gösterilmiştir.



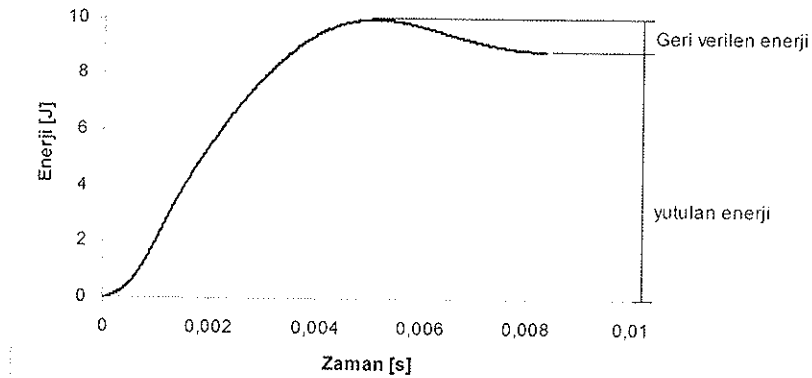
Şekil 8.6. CTP kompozit boru numunesinde değişik çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet-deplasman değişimi



Şekil 8.7. CTP kompozit boru numunesinde değişik çarpma enerjileri sonucunda oluşan kalıcı deformasyon miktarları

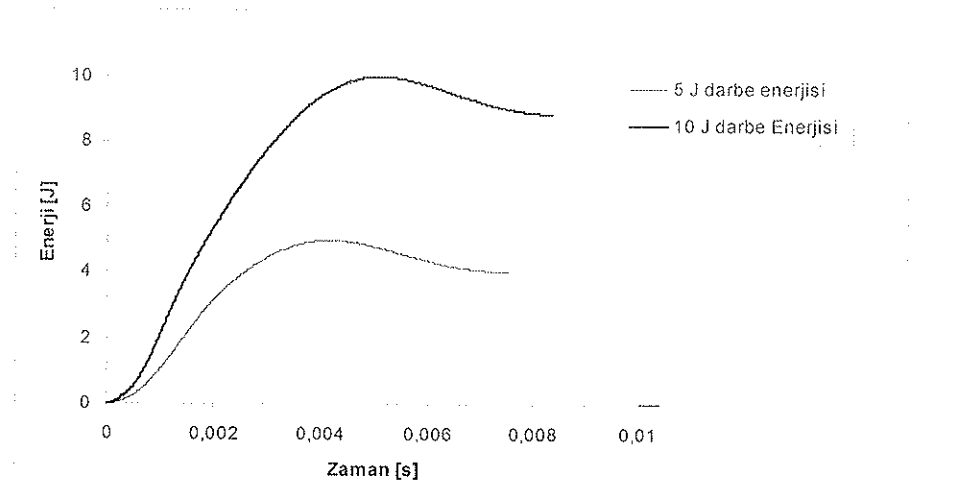
### 8.2.3. Enerji-Zaman değişimi

Darbe süresi boyunca oluşan enerji değişimi numune tarafından yutulan ve geri verilen enerjinin tespit edilmesi bakımından önemlidir. Şekil 8.8’de verilen enerji-zaman değişim grafiğinde numune tarafından yutulan ve geri verilen enerji değerleri görülmektedir.

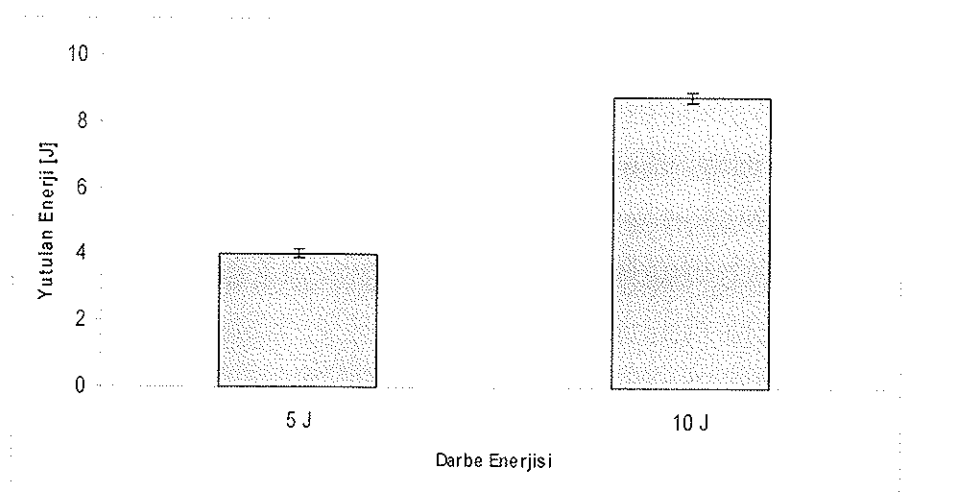


Şekil 8.8. Enerji-Zaman değişimi

Şekil 8.9’deki grafikte farklı darbe enerjilerinde elde edilen enerji-zaman değişimi birlikte görülmektedir. Kuvvet-deplasman grafiğiyle uyumlu olarak Enerji-zaman değişim grafiğinde de 10 J darbe enerjisiyle yapılan deneyde numunenin daha fazla enerji yuttuğu görülmektedir. Şekil 8.10’deki grafikte de yutulan enerji miktarları verilmiştir.



Şekil 8.9. CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde elde edilen enerji-zaman değişimi

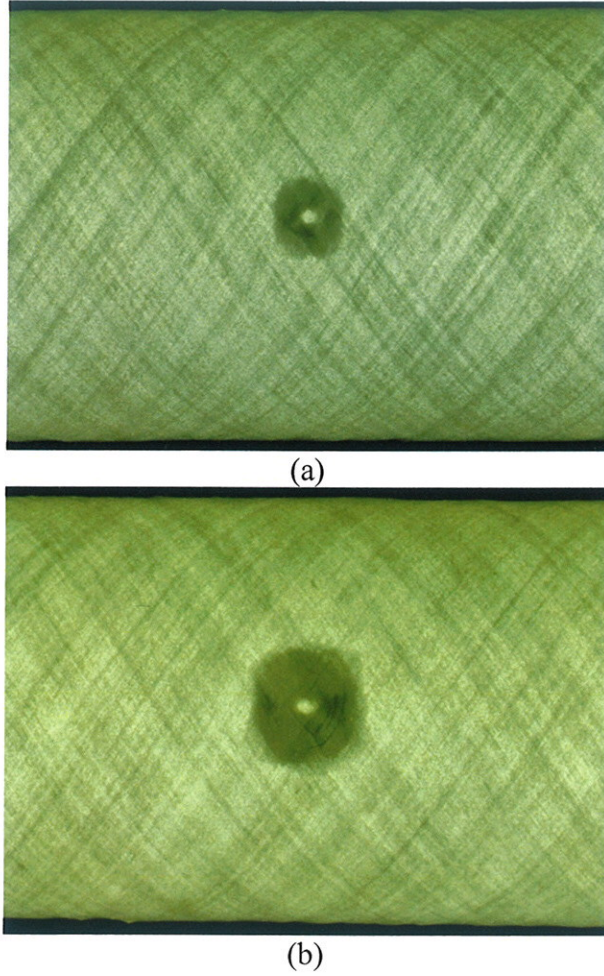


Şekil 8.10. CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde yutulmuş enerji miktarları

#### 8.2.4. Hasar Analizi

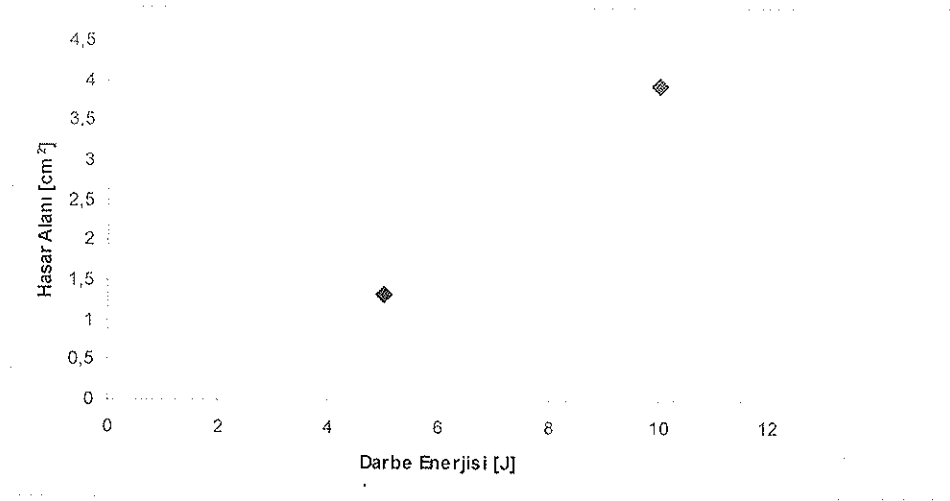
Kevlar ve cam/epoksi kompozitlerde gelişen hasarlar numune arkasından ışık tutulmak suretiyle belirlenir (Abrate 1998). Deney numunelerine darbe yapıldıktan sonra hasar bölgesinin yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflar çekilirken boru yüzeyinden kaynaklanan parlama engellenmediği için boruların iç yüzeyi aydınlatma kâğıdı ile kaplandıktan sonra boruların içinden floresan lamba geçirilerek boru içinden aydınlatma sağlanmış ve fotoğraflar bu şekilde çekilmiştir. Şekil 8.11 a-b'de düşük hızlı darbe yapılmış CTP kompozit deney numunelerinde sırasıyla 5 J ve 10 J darbe enerjisi için elde edilen hasar bölgeleri görülmektedir.

Deney numunelerinin hasar bölgesinde olan birinci bölge, vurucunun nüfuz ettiği bölgedir. Vurucunun nüfuziyeti bu bölgede matrisin ezilmesine sebep olmuştur ve elyaf sıyrılmaları gözlenmiştir. Hasar bölgesindeki ikinci bölge ise tabakaların tamamında veya çoğunluğunda delaminasyonların olduğu bölgedir (Sugun ve Rao 2004). Bu bölgede matris çatlakları ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları oluşmuştur. 10 J darbe enerjisiyle yapılan deneyde oluşan hasar miktarı daha fazladır. Matris çatlakları artmış delaminasyon alanı büyümüştür.



**Şekil 8.11.** Düşük hızlı darbe yapılmış CTP kompozit deney numunelerinde hasar bölgeleri a) 5 J darbe enerjisi b) 10 J darbe enerjisi

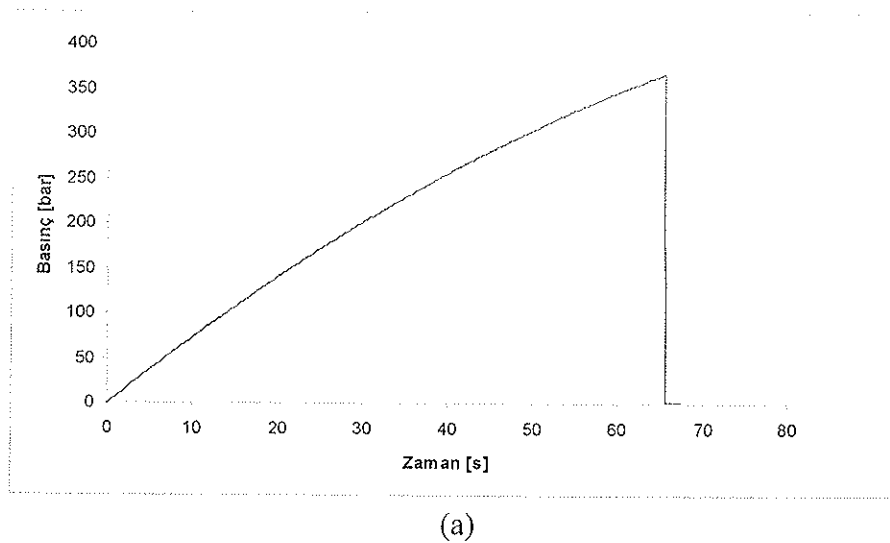
Darbe enerjisine bağlı olarak toplam hasar alanı Şekil 8.12'de verilmiştir. Şekildeki hasar alanı değeri tüm alanları içine alan en büyük hasar alanıdır. 10 J darbe enerjisi ile yapılan deneyde numune üzerinde oluşan hasar alanının, 5 J darbe enerjisi ile oluşan hasar alanından 3 kat daha büyük olduğu grafikte açıkça görülebilmektedir. Yani darbe enerjisi arttıkça hasar alanı da artmaktadır.



Şekil 8.12. Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi

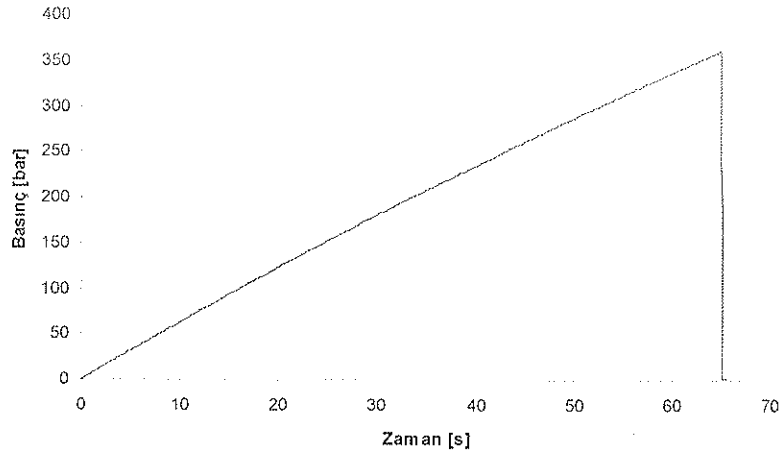
### 8.3. $\pm 55^{\circ}$ Sarım Açılı CTP Borularının Serbest Uçlu Statik İç Basınç Deneç Sonuçları

Darbe hasarsız, 5 J ve 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış borular statik iç basınç testine tabi tutulup patlama mukavemeti belirlenmiştir. Testler esnasında elde edilen basınç-zaman değişimi Şekil 8.13'da sırasıyla a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış numuneler için verilmiştir. ASTM D 1599-99 standartlarına göre yapılan deneylerde numunelerde oluşan son hasar (patlama) 60-70 saniye süre sonunda gerçekleşmiştir. Ulaşılan en büyük basınç değeri o numuneye ait patlama mukavemeti olarak belirlenmiştir.

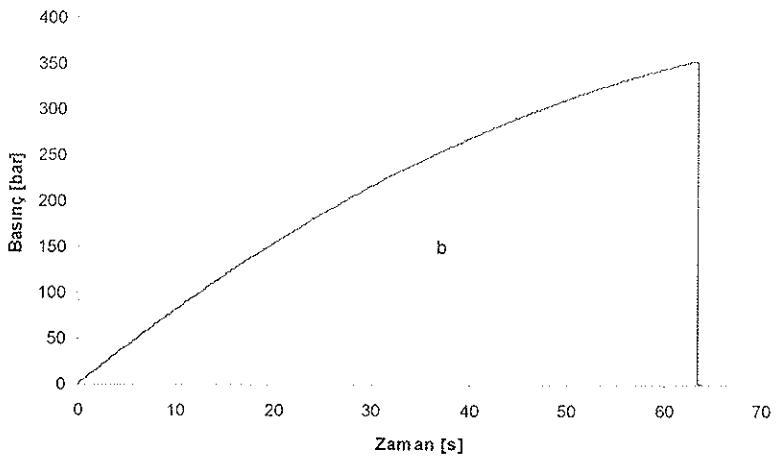


(a)

Şekil 8.13. Statik iç basınç ile patlatma deneyi yapılan numunelerde Basınç-Zaman değişimi a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış



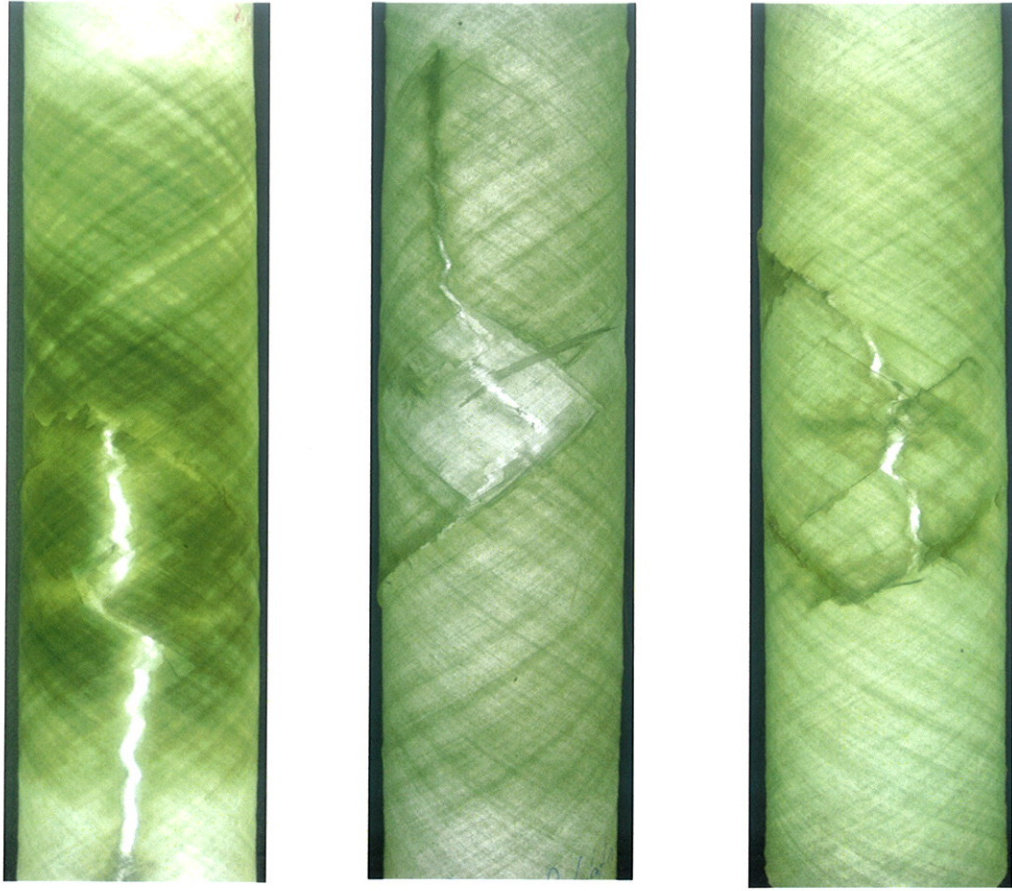
(b)



(c)

Şekil 8.13. Statik iç basınç ile patlatma deneyi yapılan numunelerde Basınç-Zaman değişimi a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış

Statik iç basınç testi sırasında hasarın ilk belirtisi yorulma deneylerinde de gözlendiği gibi elyaf doğrultusunda ince beyaz çizgilerin oluşumudur. Bu çizgiler elyafa dik çekme gerilmeleri ve elyafa paralel kayma gerilmeleri ile oluşmaktadır. Tarakçioğlu'na (1992) göre, beyazlaşmanın basınçla artışı tabaka ayrılmasının bir işaretidir. Şekil 8.14'da sırasıyla a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve c) 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların statik iç basınç testi sonucu elde edilen deney numune fotoğrafları görülmektedir.



(a)

(b)

(c)

**Şekil 8.14.** CTP borularda statik iç basınç testi sonucu oluşan hasar görünümü a) darbe hasarsız b) 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış c) 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış

Darbe hasarsız deney numunesinin statik iç basınç patlatma testi sırasında numune 70 barda aksenal yönde kısalmaya başladı. 180 barda şekil değişiminden dolayı boru genelinde matris yüzeyindeki şeffaflık bozulmaya ve elyaf doğrultusunda beyaz ince çizgiler (debonding) oluşmaya başladı. 280 barda yoğun beyazlaşma başladı. 280 ile 340 bar arasında yoğun beyazlaşma çok hızlı bir şekilde ilerledi. Gerilme arttıkça borunun boyca kısaldığı ve çap olarak büyüdüğü bariz bir şekilde gözlemlendi. Bu şekil değişiminden dolayı boruda çok az bir sehim oluştu. 366 barda sehim oluşan kısmın iç tarafında yoğun beyazlaşmanın olduğu bölgede elyaf kopması şeklinde şiddetli bir patlama gerçekleşti. Patlamanın etkisi ile patlamanın başlangıç noktasından numunenin sonuna kadar yarıma oluştu.

5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama testinde 70barda yüklemeye devam edildikçe borunun boyu kısalmaya başladı. 220 barda beyazlaşma başlangıcı gözlemlendi. 300 ile 360 bar arasında yoğun beyazlaşma çok hızlı bir şekilde artış gösterdi. 360 barda darbe noktasından başka bir yerde gerçekleşen

sızıntının hemen akabinde şiddetli bir patlama gerçekleşti. Patlama sonrası numune üzerinde inceleme yapıldığında oluşan hasarın darbe yapılan bölgenin çevresinde gerçekleştiği tespit edildi. Yoğun beyazlaşmanın ve hasar bölgesinin darbe hasarsız numuneden daha az olduğu gözlemlendi. Hasarın gelişimi ve büyümesine sebep olan yorulmaların elyaf sarım açısı doğrultusunda ve boru ekseninde gerçekleştiği gözlemlendi. Özellikle bu numunede boru ekseninde oluşan yarılmaların darbe hasarsıza göre daha az gerçekleştiği ve hasar bölgesinde kabuk şeklinde ayrılma olduğu görüldü.

10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış olan numunenin statik iç basınç patlama testinde 70 barda yüklemeye devam edildikçe borunun boyu kısalmaya başladı. 240 barda beyazlaşma başlangıcı ile birlikte numuneden matris çatlama sesleri gelmeye başladı. Basınç artışının devamıyla beraber numunede yoğun beyazlaşma görüldü. 350 barda numune darbe hasar bölgesinin 4 cm uzağından su jetine başladı ve hemen ardından 354 barda şiddetli bir şekilde darbeli bölgeden patladı. Hasar elyaf sarım açısı doğrultusunda  $-55^\circ$  de elyaf kopması  $+55^\circ$  de yarıma şeklinde aksenel doğrultuda gerçekleşti. Sonuç hasarı elyaf kopması şeklinde yorumlandı. Oluşan hasar, darbe hasarsız ve 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılan numuneden daha az ve bölgesel olarak gerçekleşti.

#### 8.4. $\pm 55^\circ$ Sarım Açılı CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi

$\pm 55^\circ$  sarım açısına sahip darbe hasarsız ile 5 J ve 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP kompozit boruların yorulma ömrünü belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde yorulma yük oranı  $R=0.05$  ve gerilme değeri statik patlama mukavemetinin %30, %35 ve %40'ı olacak şekilde tekrarlı iç basınç uygulanmıştır. Yorulma deneyleri esnasında tespit edilen üç önemli hasar aşaması belirlenmiş ve bu aşamalara göre gerilme-çevrim sayısı grafikleri verilmiştir. Bu hasar aşamalarından birincisi numunelerde terleme veya damlacık şeklinde ilk sızıntının başladığı aşamadır. İkinci hasar aşaması olarak numunede yoğun sızıntının (su jeti) başlaması dikkate alınmıştır. Üçüncü hasar aşaması ise sonuç hasarıdır. Sonuç hasarı numunenin patlaması ve deneyin sonlandırılmasıdır.

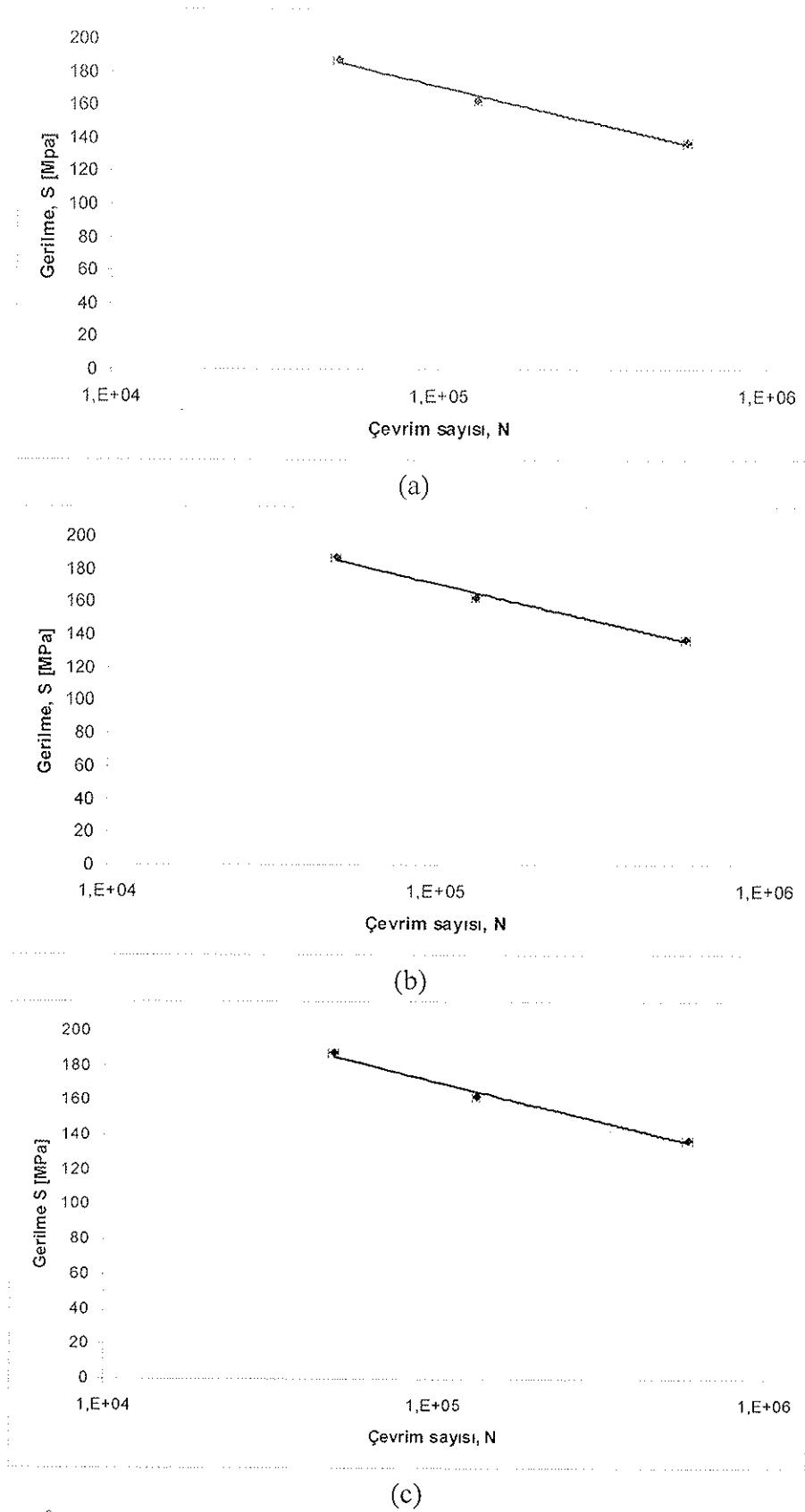
#### 8.4.1. $\pm 55^0$ Sarım Açılı Darbe Hasarsız CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi

$\pm 55^0$  sarım açısına sahip darbe hasarsız boruların yorulma deneyinde, iç basıncın etkisiyle elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmıştır. Bunun neticesi olarak deney numunesinin boyunda kısıalma olurken çapında artma meydana gelmiştir. Elyafların teğetsel yönde gerilip tekrar eski haline dönmesi sonucu  $\pm$  elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmelerin etkisiyle tabakalar arası ayrılmalar ve elyaf matris ayrılmaları gerçekleşmiştir. Beyazlama şeklinde gerçekleşen bu hasarlar elyaf doğrultusunda büyümüş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur. Aynı durum Günaydın (2010)'da da gözlenmiştir. Matris çatlamasının oluşmasıyla numune ilk sızıntı damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boru infilak ederek patlamıştır. Şekil 8.15' de  $\pm 55^0$  sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların yorulma deney numunelerine ait a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi gerilme değeri düştükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sızıntı başlangıcı, su jeti oluşumu ve sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir.

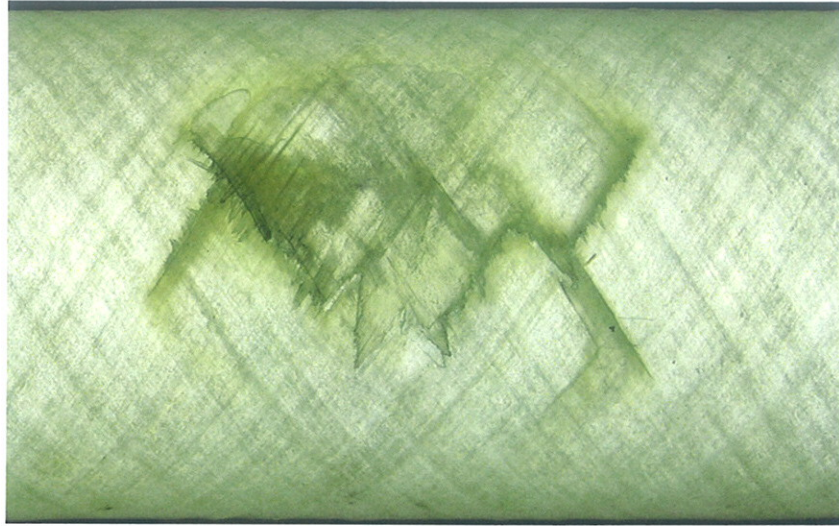
Şekil 8.16'de  $\pm 55^0$  sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı fotoğrafları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi gerilme değeri yükseldikçe oluşan sonuç hasarı numunede daha yüksek tahribatlar ve buna bağlı olarak daha büyük hasarlar meydana getirmiştir. Tüm gerilme değerlerinde numunede şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı oluşmuştur. Çizelge 8.1.' de darbe hasarsız numunelerle yapılan deneylere ait ortalama deney sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 8.1.**  $\pm 55^0$  sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların ortalama deney sonuçları (R=0.05 f=0.42 Hz)

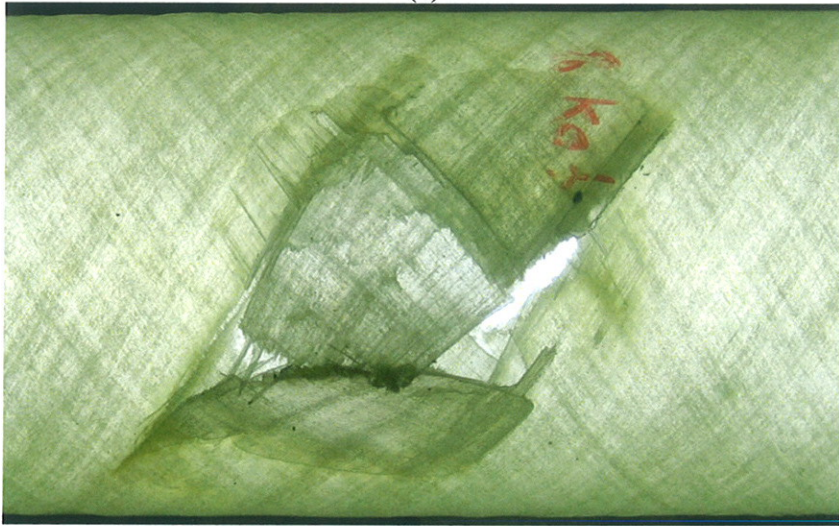
Test no	% gerilme	Maksimum radyal gerilme (MPa)	Minimum radyal gerilme (MPa)	İlk sızıntı başlangıç çevrimi	Yoğun sızıntı başlangıç çevrimi	Sonuç hasar çevrimi
1	30	137.25	6.8625	569159	570865	582299
2	35	160.125	8	130972	131366	134037
3	40	183	9.15	49064	49168	49270



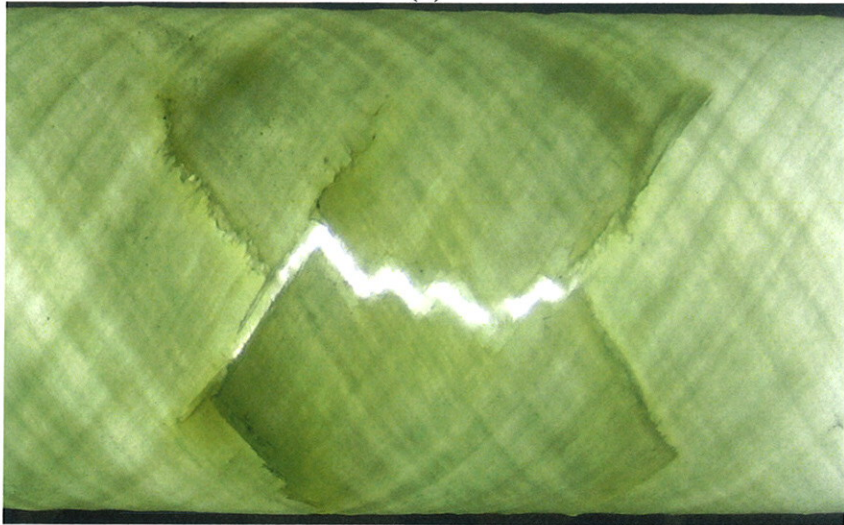
Şekil 8.15.  $\pm 55^\circ$  sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların yorulma deney numunelerine ait gerilme-çevrim sayısı grafikleri a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) son hasar



(a)



(b)



(c)

**Şekil 8.16.**  $\pm 55^\circ$  sarım açılı darbe hasarsız CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar fotoğrafları a) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %30'u kadar basınç b) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %35'i kadar basınç c) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %40'ı kadar basınç

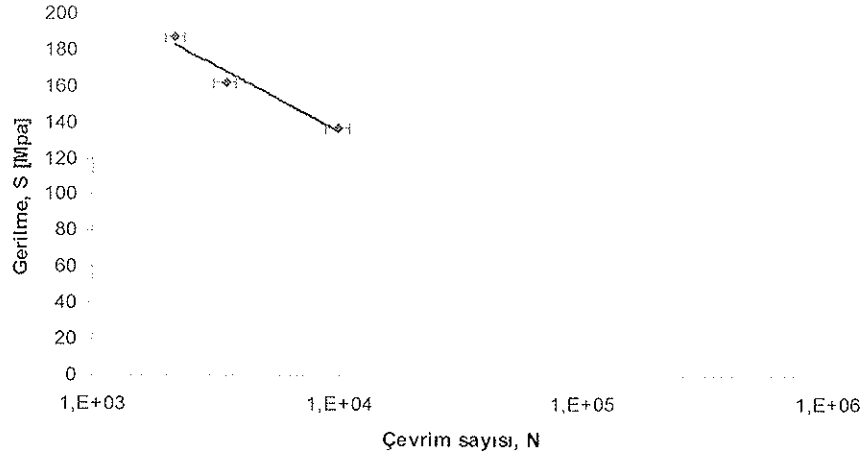
#### 8.4.2. $\pm 55^\circ$ Sarım Açılı 5 J Darbe Enerjisiyle Hasarlandırılmış CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi

$\pm 55^\circ$  sarım açısına 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde darbe hasarını tabakalar arası ayrılmalar oluşturmuştur. 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deneyinde, darbe hasarsız numunede olduğu gibi iç basıncın etkisiyle elyaf lar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmış ve buna bağlı olarak kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmelerin etkisiyle tabakalar arası ayrılmaların olduğu darbe hasarlı bölgede elyaf matris ayrılmaları oluşmuş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur. Matris çatlaması tabakalar arasında ilerlemiş ve darbe bölgesinde ilk sızıntı damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde sızıntı yoğunlaşarak su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boru darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamıştır. Şekil 8.17' de  $\pm 55^\circ$  sarım açılı 5 J darbe hasarlı CTP boruların yorulma deney numunelerine ait a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi gerilme değeri düştükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sızıntı başlangıcı, su jeti oluşumu ve sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir. 5 J darbe hasarlı numunenin yorulma deneyi darbe hasarsız numuneye benzemektedir. Ancak numunede yorulmayla görülen hasarlar daha düşük çevrimlerde ve darbe bölgelerinde oluşmaktadır.

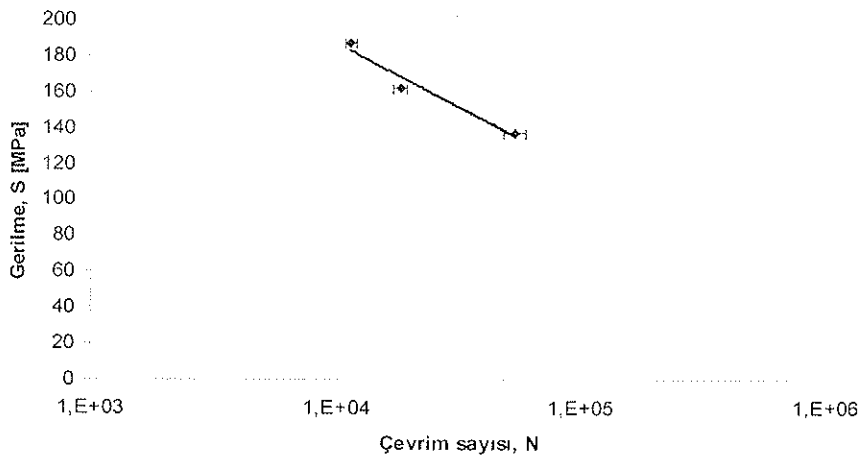
Şekil 8.18' de  $\pm 55^\circ$  sarım açılı 5 J darbe hasarlı CTP boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı fotoğrafları verilmiştir. Darbe hasarsız boruda olduğu gibi gerilme değeri yükseldikçe oluşan sonuç hasarı numunede daha yüksek tahribatlar ve buna bağlı olarak daha büyük hasarlar meydana getirmiştir. Tüm gerilme değerlerinde numunede şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı oluşmuştur. Numunenin sonuç hasarına ulaşması darbe hasarsız boruya göre daha düşük çevrimlerde gerçekleşmiştir. Çizelge 8.2.' de 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerle yapılan deneylere ait ortalama deney sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 8.2.**  $\pm 55^\circ$  sarım açılı 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların ortalama deney sonuçları (R=0.05 f=0.42 Hz)

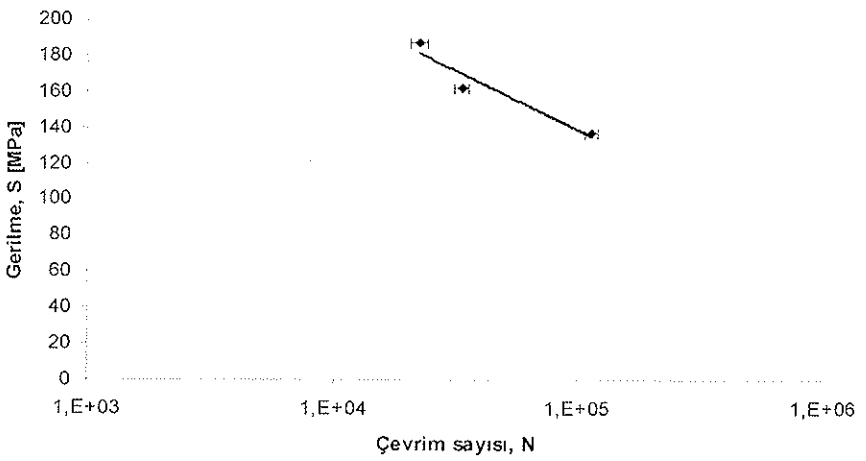
Test no	% gerilme	Maksimum radyal gerilme (MPa)	Minimum radyal gerilme (MPa)	İlk sızıntı başlangıç çevrimi	Yoğun sızıntı başlangıç çevrimi	Sonuç hasar çevrimi
1	30	135	6.75	9891	53535	113285
2	35	157.5	7.875	3440	18146	33422
3	40	180	9	2164	11327	22344



(a)

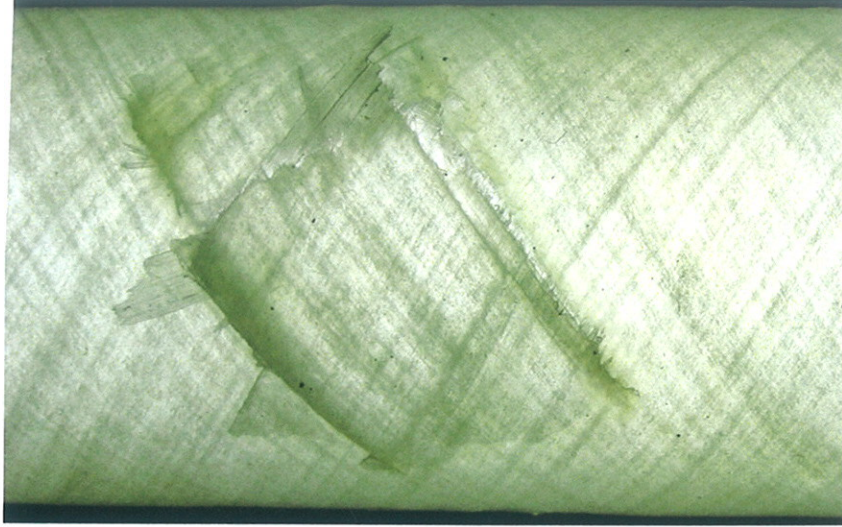


(b)

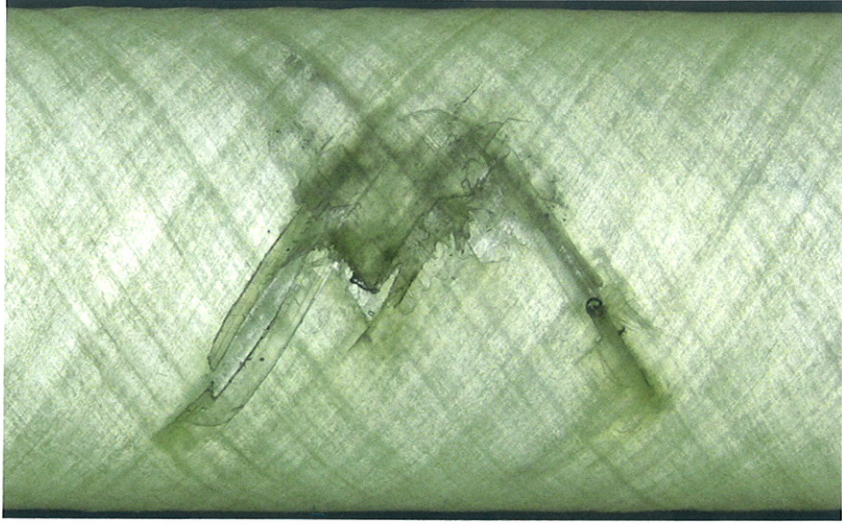


(c)

Şekil 8.17.  $\pm 55^\circ$  sarım açılı 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait gerilme-çevrim sayısı grafikleri a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) son hasar



(a)



(b)



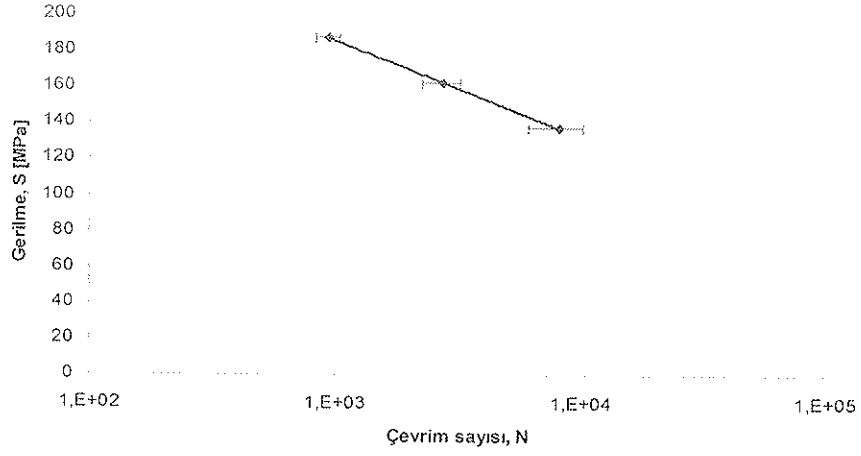
(c)

**Şekil 8.18.**  $\pm 55^\circ$  sarım açılı 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar fotoğrafları a) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %30'u kadar basınç b) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %35'i kadar basınç c) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %40'ı kadar basınç

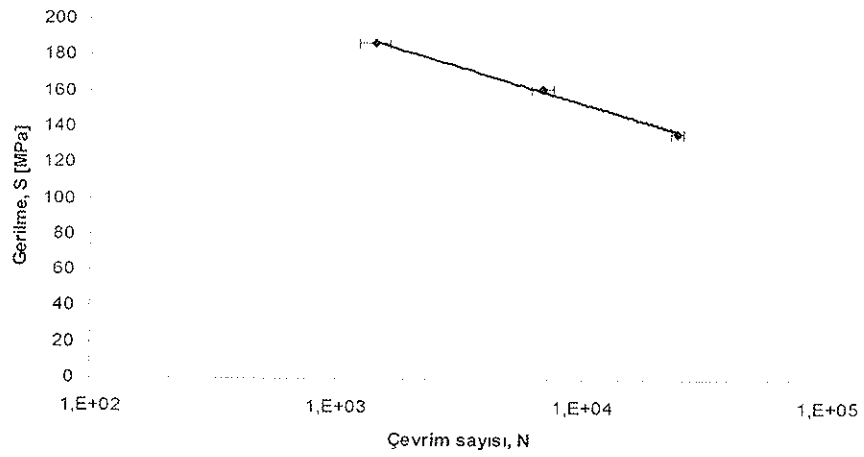
### 8.4.3. $\pm 55^0$ Sarım Açılı 10 J Darbe Enerjisiyle Hasarlandırılmış CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi

$\pm 55^0$  sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde darbe hasarı tabakalar arası ayrılmalar oluşturmuştur. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deneyinde, darbe hasarsız numunede olduğu gibi iç basıncın etkisiyle elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmış ve buna bağlı olarak kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmelerin etkisiyle tabakalar arası ayrılmaların olduğu darbe hasarlı bölgede elyaf matris ayrılmaları oluşmuş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur. Matris çatlaması tabakalar arasında ilerlemiş ve darbe bölgesinde ilk sızıntı damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boru darbe hasarlı bölgeden basıncı tutamayacak şekilde hasarlanmış ve deney sonlandırılmıştır. Şekil 8.19.' de  $\pm 55^0$  sarım açılı 10 J darbe hasarlı CTP boruların yorulma deney numunelerine ait a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi gerilme değeri düşüktüğü yorulmaya tabi tutulan numunelerde sızıntı başlangıcı, su jeti oluşumu ve sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numuneler 5 J darbe hasarlı ve darbe hasarsız numunenin yorulma deneyine benzerlik göstermekle beraber sonuç hasarı daha düşük çevrimlerde ve darbe bölgelerinde oluşmaktadır.

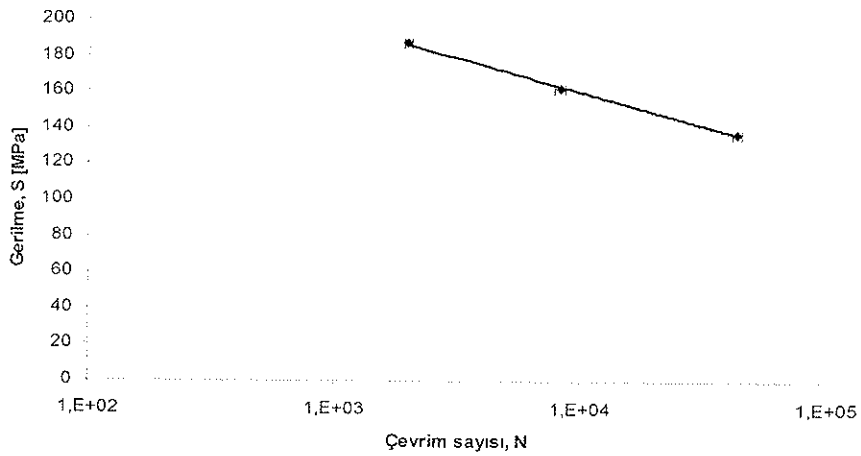
Şekil 8.20.' de  $\pm 55^0$  sarım açılı 10 J darbe hasarlı CTP boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı fotoğrafları verilmiştir. Darbe hasarsız boruda olduğu gibi gerilme değeri yükseldikçe oluşan sonuç hasarı numunede daha yüksek tahribatlar ve buna bağlı olarak daha büyük hasarlar meydana getirmiştir. Ancak 10 J ile hasalandırılmış boru düşük basınçlı yorulmalarda infilak ederek patlamamıştır. Belirli bir çevrim sayısından sonra darbe bölgesi açılarak son hasar gerçekleşmiştir. Yüksek basınçlı yorulmada ise yine darbe yerinden şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı oluşmuştur. Numunenin son hasara ulaşması darbe hasarsız boruya ve 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış boruya göre daha düşük çevrimlerde gerçekleşmiştir. Çizelge 8.3.' de 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerle yapılan deneylere ait ortalama deney sonuçları verilmiştir.



(a)

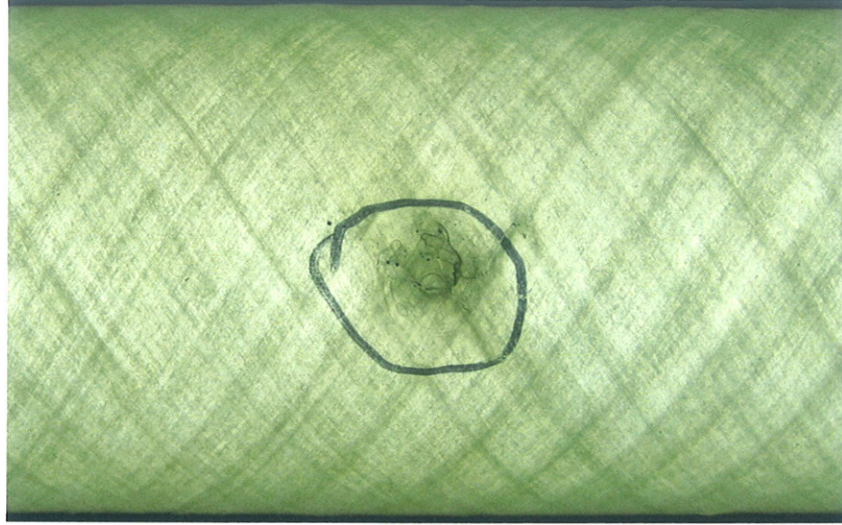


(b)

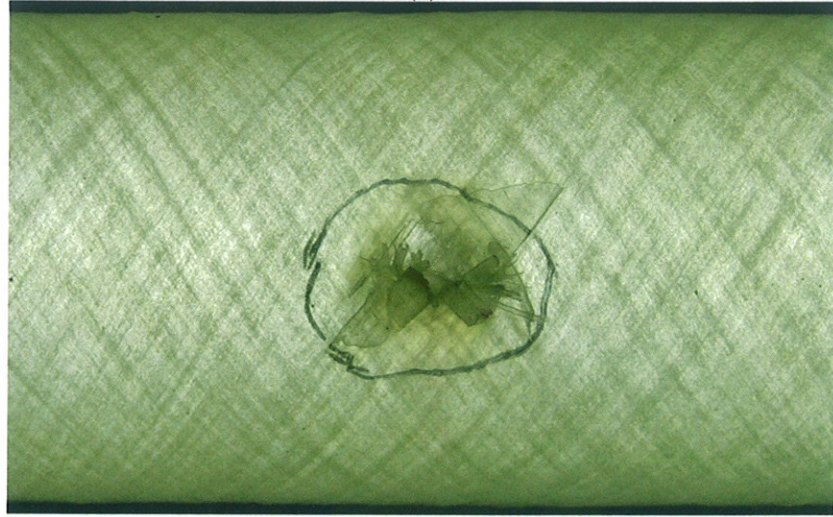


(c)

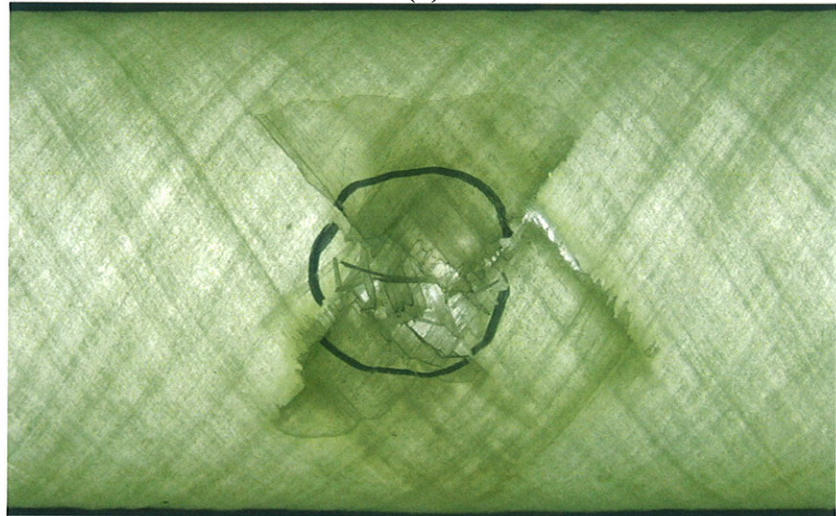
Şekil 8.19.  $\pm 55^{\circ}$  sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait gerilme-çevrim sayısı grafikleri a) ilk sızıntı b) yoğun sızıntı c) son hasar



(a)



(b)



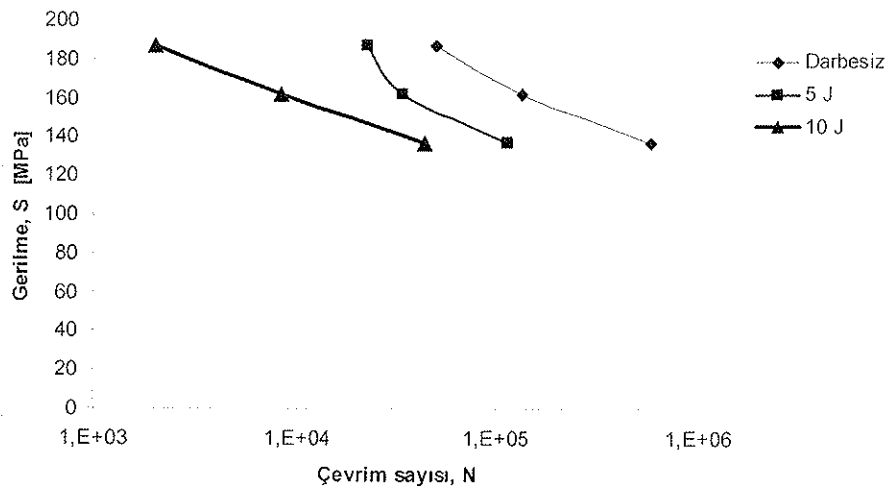
(c)

**Şekil 8.20.**  $\pm 55^\circ$  sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar fotoğrafları a) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %30'u kadar basınç b) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %35'i kadar basınç c) darbe hasarsız borunun patlama basıncının %40'ı kadar basınç

Çizelge 8.3.  $\pm 55^0$  sarım açılı 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP boruların ortalama deney sonuçları ( $R=0.05$   $f=0.42$  Hz)

Test no	% gerilme	Maksimum radyal gerilme (MPa)	Minimum radyal gerilme (MPa)	İlk sızıntı başlangıç çevrimi	Yoğun sızıntı başlangıç çevrimi	Sonuç hasar çevrimi
1	30	132.75	6.64	8146	24624	43308
2	35	154.875	7.74	2683	6854	8210
3	40	177	8.85	920	1422	1953

Şekil 8.21.'de  $\pm 55^0$  sarım açılı farklı darbe enerjileri ile hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerine ait son hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi darbe enerjisi arttıkça yorulma ömrü düşmektedir.



Şekil 8.21.  $\pm 55^0$  sarım açılı farklı darbe enerjileri ile hasarlandırılmış CTP boruların yorulma deney numunelerinde son hasar için gerilme-çevrim sayısı grafikleri

## 9. SONUÇLAR

( $\pm 55^\circ$ )<sub>4</sub> sarım açılımlarına sahip CTP boruların darbe hasarsız, 5 J ve 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılarak ASTM D 2992-06 standardına uygun olarak R= 0.05 gerilme oranı ve 0.42 Hz frekansta gerçekleştirilen iç basınç altında yorulma davranışı sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Darbe enerjisi arttıkça CTP kompozit boruda meydana gelen hasar alanı artmaktadır. 10 J darbe enerjisi ile yapılan deneyde numune üzerinde oluşan hasar alanının, 5 J darbe enerjisi sonucu oluşan hasar alanından 3 kat daha büyük olduğu görüldü.

2. Darbe enerjisi arttıkça numunenin yorulma ömrü azalmaktadır.

3. Darbe hasarlı numunelerde yorulma son hasarı darbe bölgesinde meydana gelmektedir.

4. Farklı gerilme kademelerindeki yorulma hasar davranışı, darbeli ve darbesiz borularda, izotropik malzemelerde yorulma davranışına benzer olarak, yüksek gerilme oranlarında kısa sürede, düşük gerilme oranlarında ise uzun sürede gerçekleşti.

5. Darbesiz ve 5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış borularda son hasar şiddetli patlama şeklinde olurken, 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış numunelerde yoğun sızma ya bağlı olarak numunenin basıncı tutamaması şeklinde gerçekleşti.

## KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1998, Impact on composite structures. Cambridge, *Cambridge University Press*. 135-160.
- Akdemir, A., 1992, Yüzey çatlaklı cam takviyeli plastiklerde gerilmeli korozyon, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Akdemir, A., Tarakcıoğlu, N., Avcı, A., 2001, Stress corrosion crack growth in glass polyester composites with surface crack, *Composites: Part B*, Vol.32, pp-123-129.
- Akkus, N., Kawahara, N., 2000, Bending behaviours of thin composites pipes with reinforced nodes, *Mater. Sci. Res.Int*, 6:131-5.
- Alderson, K.L., Evans, K.E., 1992, Failure mechanism during the transverse loading of filament wound pipes under static and low velocity impact conditions, *Composites*, 23:167-73.
- Arıkan, H., 1990, Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mühendislik Sabitlerinin Bulunması ve İmalatı, Yüksek Lisans Semineri, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Arıkan, H., 2002, Çelik Tel Takviyeli Polimer Kompozitlerin Kırılma Davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- ASTM Standard D1599, 1999 (2005), "Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/D1599-99R05, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM Standard D2584, 2008, "Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/D2584-08, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM Standard D2992, 2006, "Standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for *fiberglass* (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and fittings", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/D2992-06, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM Standard E1823, 2010a, "Standard terminology relating to fatigue and fracture testing", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/E1823-10A, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Boniface, L., Ogin, S.L., 1989, Application of the Paris equation to the fatigue growth of transverse ply cracks, *Int. J. Comp. Mater*, 23, 735-54.
- Bredemo, R., 1992, Damage development during uniaxial fatigue of filament wound tubes, *SICOMP report 92-001. Pitea (Sweden)*, Swedish Institute of Composites.

- Ceyhun, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- Conder, RL., Newhouse NL., 1980, Cyclic pressure test of a filament wound vessel containing liquid nitrogen, *Cryogenics*, December, 697-701.
- Coo, V.K.S., 1985, Effect of loading path on the failure of fibre reinforced composite tubes, *J. Comp. Mater*, 19, 525-533.
- Çep, H., Zeytin, S., Alper, S., 2002, Fatigue at elevated temperature, *Metal Dünyası*, Vol.109, 72.
- Dieter, G.E., 1976, Mechanical metallurgy, 2nd Ed; *Mc Graw Hill Co.* Tokyo, 403-447.
- Eldeniz, İ., 1992, Yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde yorulma çatlak büyümesi ve tabaka ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Ellyin, F., Martens, M., 2001, Biaxial fatigue behaviour of multidirectional filament wound glass-fiber epoxy pipe, *J. Comp. Sci. Tec.*, 61: 491-502.
- Ferry, L., Perreux, D., Rousseau, J., Richard, F., 1998, Interaction between plasticity and damage in the behaviour of  $[+\Phi, -\Phi]_n$  fibre reinforced composite pipes in biaxial loading (internal pressure and tension), *Composites Part B* 29B:715-723.
- Fuchs, H.O., Stephens, K.I., 1980, Metal fatigue in engineering, *J. Wiley Sons Inc*, N. York, 1-35.
- Gemi, L., 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Güldü, İ., 1995, Cam takviyeli plastik malzemelerde takviye açısının kırılma davranışına etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Günaydın, B., 2003, Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Günaydın, B., 2010, Kompozit yama ile onarılmış yüzey çentikli filaman sarım borularda yorulma davranışları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Harris, C.E., Allen, D.H., Nottorf, E.W., 1989, Prediction of Poisson's ratio in cross ply laminates containing matrix cracking and delaminations, *J. Comp. Tec. & Research* 11(2):53-58.
- Hashin, Z., Rotem, A., 1973, A fatigue criterion for fiber reinforced materials, *J. Comp. Materials*, 7:448-464.

- Henaff- Garden, C., 1990, Influence de la séquence d'empilement sur la fissuration en fatigue des plis transverses de stratifiés a fibres longues, Thèse de Doktorat, *Université de Poitiers, France*.
- Hull, D., 1981, An introduction of composite materials.
- Hull, D., Legg, M.J., and Spencer, B., 1978, Failure of glass polyester filament wound pipe, *Composites*, 9:17-24.
- Hwang, W., Han, K.S., 1986, Fatigue of composites-fatigue modulus concept and life prediction , *J. Comp. Mater*, 20:154-65.
- Hwang, W., Han K.S., 1986, Fatigue of composite material- damage model and life prediction, Composite material Fatigue and fracture, 2nd. Volume ASTM STP 1012, Paul A.Lagace (Vol.Ed.) American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 87-102.
- Isa, M.D., Feih, S., Mouritz, A.P., 2011, Compression fatigue properties of z-pinned quasi-isotropic carbon/epoxy laminate with barely visible impact damage, *Composite Structures*, Volume 93, Issue 9, Pages 2269-2276.
- Jones, C.J., Dickson, R.F., Adam, T., Reiter, H., Harris, B., 1984, The environmental fatigue behaviour of reinforced plastics, *Proceedings of the Royal society London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 396:315-338.
- Jones, M.L.C., Hull, D., 1979 Microscopy of failure mechanisms in filament wound pipe, *J. Material Sci.* 14:165-174.
- Jones, R.M., 1975, Mechanics of Composite Materials.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Kaynak, C., Mat, O., 2001, Uniaxial fatigue behaviour of filament wound glass-fiber epoxy composite tubes, *J. Comp. Sci. Tec.* 61:1833-1840.
- Lee, L.J., Tang, J.N., Sheu, D.Y., 1993, Prediction of fatigue life for matrix dominated composite laminates, *J. Comp. Sci. Tec.* 46:21-28.
- Lubin, G., 1982, Handbook of composites, *Van Nostrand Reinhold Co.*
- Martens, M., Ellyin, F., 2000, Biaxial monotonic behavior of a multidirectional glass fiber epoxy pipe, *J. Comp. Sci. Tec.* 61: 491-502.
- Martens, M.G.,1999, Biaxial monotonic and fatigue behaviour of a multidirectional glass fibre reinforced epoxy pipe, *Ph. D. Thesis University of Alberta*.
- Melin, L. G., Schön, J., Nyman, T., 2002, Fatigue testing and buckling characteristics of impacted composite specimens, *International Journal of Fatigue*, Volume 24, Issues 2-4, Pages 263-272.

- Misag-39-Tübitak projesi, 2001, Filaman sargı tekniği ile kompozit malzeme kullanılarak yüksek basınca dayanıklı optimum boru tasarımı, *Bariş Elektrik End. A.Ş.*
- Mitrovic, M., Hahn, H. T., Carman, G. P., Shyprykevich, P., 1999, Effect of loading parameters on the fatigue behavior of impact damaged composite laminates, *Composites Science and Technology*, Volume 59, Issue 14, , Pages 2059-2078.
- Nishiwaki, T., Yokoyama, A., Mackawa, Z., Hamada, H., Mori, S., 1995, A quasi three dimensional lateral compressive analysis method for a composite cylinder, *Comp. Structure*, 32:293-298.
- O'brien, T.K., Reisfinder, K.L., 1981, Fatigue damage evaluation through stiffness measurement in boron/epoxy laminates, *J. Comp. Materials*, 15:55-70
- Onoda, Y., 1985, Optimal laminate configurations of cylindrical shells for axial buckling *AIAA J.* 23(7):1093-8.
- Pagano, N.J., 1971, Stress gradients in laminated composite cylinders, *J. Comp. Materials*, 5: 260-265.
- Pagano, N.J., Halpin, J.C., Whitney, J.M., 1968, Tension buckling of anisotropic cylinder, *J. Comp. Mater*, 2:154-167.
- Pagano, N.J., Whitney, J.M., 1970, Geometric design of composite cylindrical characterization specimens, *J. Comp. Mater.*4:360-379
- Parton, V.Z., Morozov, E.M., 1978, Elastic-Plastic Fracture Mechanics, *Mir Publishers*, Moskow, 30-37.
- Perreux, D., Joseph, D., 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament wound pipes under biaxial fatigue experimental results and damage model, *Comp. Sci. Tech.* 57:353-364
- Philippidis, T P., Anastasios, P., 2001, Complex stress state effect on fatigue life of GRP laminates. Part I, experimental, *Int. J. Fatigue* 24:813-823.
- Rebierre, J.L., Maatallah, M.N., Gamby, D., 2001, Initiation and growth of longitudinal and transverse cracks in composite cross ply laminates, *Comp. Structures*, 53:173-187.
- Reisfinder, K.L., 1977, Some fundamental aspects of the Fatigue and fracture response of composite materials, In: Proceeding of 30th annual society of engineering meeting, 14-6, *Lehigh University Bethehem PA.*
- Reisfinder. K.L., Schulte, K., Duke, J.C., 1983, Long term fatigue behaviour of composite materials, ASTM STP 813 *American Society for Testing and Materials*, 136-59.

- Richard F., Perreux, D., 2000, A reliability method for optimization of  $\pm\theta$  fiber reinforced composite pipes, *Reliability Engineering and System Safety* 68:53-59.
- Rotem, A., 1979, A Fatigue Failure of Multidirectional Laminate, *AIAA.J.*, 7(3):271-7.
- Sakin, R., 2004 Bilgisayar destekli, çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyeester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- Sarıtaş, S., 1987, Yorulmuş Kırık Yüzeylerin Mikroskopla İncelenmesi, *İkinci Ulusal Kırılma Konferansı*, Trabzon, 189-196.
- Shan, Y., Liao, K., 2002, Environmental fatigue behavior and life prediction of unidirectional glass-carbon/epoxy hybrid composites, *Int. J. Fatigue*, 24:847-859.
- Smerdov, A.A., 2000, A computational study in optimum formulations optimization problems on laminated cylindrical shells for buckling: I Shells under axial compression, *Comp. Sci. Tech.* 60:2057-60.
- Smith, P.A., Wood, J.R., 1990, Poisson's ratio as damage parameter in the static tensile loading of simple cross laminates, *Comp. Sci. Tech.* 38:85-93.
- Spencer, B., Hull, D., 1978, Effect of winding angle on failure of filament wound pipe, *Composites*, 9: 263-271
- Stronge, W.J. (2000). Impact mechanics. Cambridge, *Cambridge University Press*. 1-26.
- Sugun, B.S., & Rao, R.M.V.G.K., 2004, Low velocity impact of glass, carbon and kevlar composites using repeated drop tests. . *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. Vol.23,No.15, 1583-1599.
- Tai, N. H., Ma, C. C. M., Lin, J. M., Wu, G. Y., 1999, Effects of thickness on the fatigue-behavior of quasi-isotropic carbon/epoxy composites before and after low energy impacts, *Composites Science and Technology*, Volume 59, Issue 11, Pages 1753-1762.
- Tai, N.H., Yip, M.C., Lin, J.L., 1998, Effects of low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, Volume 58, Issue 1, Pages 1-8.
- Tarakçıoğlu, N., 1992, Yüzey çatlaklı ve çatlaksız filaman sarma cam-epoxy borularda sarım açısının malzeme özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya
- Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., Avcı, A., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, *Composites Part B*, 32:131-138.

- Tong, J., 2002, Characteristics of fatigue crack growth in GFRP laminates, *Int. J. Fatigue*, 24:291-297.
- Uyaner, M., Kara, M., 2007 Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 41(24), 2877-2895.
- Vanpaepegem, W., Degrieck, J., 2001, Fatigue degradation modelling of plane woven glass/epoxy composites, *Composites Part A*, 32:1433-1441.
- Wang, H., & Vukhanh, T., 1994, Damage extension in carbon fiber/PEEK cross ply laminates under low-velocity impact. *Journal of Composite Materials*, 28, 684-704.
- Wang, S.S., Srinivasan, S., Cole, B., 1997, Long term leakage failure and life prediction fiber composite laminate tubing under combined internal pressure and axial loading, *Theory and Experiments 2nd International Conference on Comp. Materials for Offshore Operations CMOO-2 University of Houston*, Houston TX
- Wolodgo J.D., 1999, Biaxial fatigue and leakage characteristics of fiber reinforced composite tubes, *Ph.D. thesis University of Alberta*.
- Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., 2001, Analysis of multilayered filament wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures* 53:483-491.
- Yuanjian, T., Isaac, D.H., 2007, Impact and fatigue behaviour of hemp fibre composites, *Composites Science and Technology*, Volume 67, Issues 15-16, Pages 3300-3307.
- Yuanjian, T., Isaac, D.H., 2008, Combined impact and fatigue of glass fiber reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, Volume 39, Issue 3, Pages 505-512.

## EKLER

EK-1 SERBEST UÇLU  $\pm 55^{\circ}$  SARIM AÇILI CTP BORULARIN STATİK İÇ  
BASINÇ DENEY SONUÇLARI

	Patlama Basıncı	
	bar	MPa
Darbe hasarsız	366	457.5
5 J	360	450
10 J	354	442.5

**EK-2 HER BİR DENEYDE KUVVETİN ZAMANA BAĞLI DEĞERLERİNDEN ELDE EDİLEN KARAKTERİSTİKLER**

<b>5 joule</b>	Deney1	Deney2	Deney3	Deney4	Deney5	Deney6	Deney7	Deney8	Deney9	Ortalama	St Sapma	St Hata
J Impuls [Ns]	11,32	11,513	11,64	11,819	11,563	11,157	11,561	11,249	11,135	11,4397	0,235279	0,0784
$W_d$ Yutulmuş Enerji [J]	4,1157	4,0106	3,9383	3,8324	3,9829	4,1995	3,9837	4,1525	4,2102	4,04731	0,12897	0,043
$t_c$ Temas Süresi [s]	0,0077	0,0081	0,0081	0,0072	0,0073	0,0074	0,0079	0,0074	0,0072	0,00759	0,000358	0,0001
$F_{max}$ En büyük kuvvet [N]	2469,4	2507,8	2357,3	2731,9	2530,2	2600,7	2571,8	2376,5	2466,2	2512,43	115,2898	38,43
Kalıcı deplasman [mm]	1,7697	2,1519	1,5692	1,3659	1,5733	1,8044	1,4869	1,7416	1,7809	1,69376	0,228601	0,0762

<b>10 joule</b>	Deney1	Deney2	Deney3	Deney4	Deney5	Deney6	Deney7	Deney8	Deney9	Ortalama	St Sapma	St Hata
J Impuls [Ns]	15,56	15,276	15,283	14,9	15,522	14,759	15,205	15,189	15,566	15,2511	0,283023	0,0943
$W_d$ Yutulmuş Enerji [J]	8,77	8,7357	8,7312	8,962	8,5761	9,0409	8,78	8,7902	8,5461	8,77026	0,158563	0,0529
$t_c$ Temas Süresi [s]	0,0092	0,009	0,0095	0,0099	0,009	0,0099	0,0088	0,0089	0,0091	0,00926	0,000419	0,0001
$F_{max}$ En büyük kuvvet [N]	2714,3	2722,3	2661,5	2543	2837,6	2459,8	2927,2	2808,7	2754,3	2714,3	144,9202	48,307
Kalıcı deplasman [mm]	3,2	3,0397	3,2738	3,2245	3,4032	3,5404	3,1011	3,1391	2,9046	3,20294	0,19026	0,0634

**EK-3.  $\pm 55^\circ$  SARIM AÇILI DARBE HASARSIZ CTP BORULARIN YORULMA DENEY SONUÇLARI**

<b>110 bar (30%)</b>	<b>Deney1</b>	<b>Deney2</b>	<b>Deney3</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Standart Sapma</b>	<b>Standart Hata</b>
<b>İlk sızıntı</b>	577551	532715	597213	569159,7	33057,65959	19085,84866
<b>Yoğun sızıntı</b>	579284	534313	599000	570865,7	33154,98823	19142,04138
<b>Son Hasar</b>	590879	545034	610985	582299,3	33802,24268	19515,73391

<b>130 bar (35%)</b>	<b>Deney1</b>	<b>Deney2</b>	<b>Deney3</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Standart Sapma</b>	<b>Standart Hata</b>
<b>İlk sızıntı</b>	125095	131174	136648	130972,3	5779,139584	3336,587795
<b>Yoğun sızıntı</b>	125473	131568	137059	131366,7	5795,623377	3346,104717
<b>Son Hasar</b>	127981	134266	139865	134037,3	5945,299011	3432,519985

<b>150 bar (40%)</b>	<b>Deney1</b>	<b>Deney2</b>	<b>Deney3</b>	<b>Ortalama</b>	<b>Standart Sapma</b>	<b>Standart Hata</b>
<b>İlk sızıntı</b>	48787	52089	46318	49064,67	2895,502432	1671,719109
<b>Yoğun sızıntı</b>	48802	52245	46457	49168	2911,306064	1680,84334
<b>Son Hasar</b>	48900	52352	46559	49270,33	2914,201835	1682,515214

**EK-4 .  $\pm 55^{\circ}$  SARIM AÇILI 5 J DARBE ENERJİSİ İLE HASARLANDIRILMIŞ  
CTP BORULARIN YORULMA DENEY SONUÇLARI**

110 bar (30%)	Deney1	Deney2	Deney3	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata
İlk sızıntı	8159	9505	12011	9891,667	1954,893688	1128,658397
Yoğun sızıntı	61732	56142	42732	53535,33	9764,529345	5637,553646
Son Hasar	117822	100313	121720	113285	11401,8941	6582,886626

130 bar (35%)	Deney1	Deney2	Deney3	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata
İlk sızıntı	3151	3051	4119	3440,333	589,8655214	340,5590176
Yoğun sızıntı	20432	16920	17087	18146,33	1981,205778	1143,849689
Son Hasar	37781	29897	32590	33422,67	4007,413671	2313,681362

150 bar (40%)	Deney1	Deney2	Deney3	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata
İlk sızıntı	2040	1893	2560	2164,333	350,4516134	202,3333333
Yoğun sızıntı	12075	11801	10105	11327	1067,113865	616,098477
Son Hasar	25611	21698	19723	22344	2996,685335	1730,137085

**EK-5 .  $\pm 55^{\circ}$  SARIM AÇILI 10 J DARBE ENERJİSİ İLE HASARLANDIRILMIŞ  
CTP BORULARIN YORULMA DENEY SONUÇLARI**

110 bar (30%)	Deney1	Deney2	Deney3	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata
İlk sızıntı	4805	11855	7780	8146,667	3539,273701	2043,400624
Yoğun sızıntı	23509	22752	27611	24624	2614,362064	1509,402641
Son Hasar	40055	46091	43780	43308,67	3045,478671	1758,30793

130 bar (35%)	Deney1	Deney2	Deney3	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata
İlk sızıntı	3351	2905	1794	2683,333	801,8193895	462,9306404
Yoğun sızıntı	7855	7206	5501	6854	1215,835926	701,9631994
Son Hasar	8303	8977	7350	8210	817,4772168	471,9706912

150 bar (40%)	Deney1	Deney2	Deney3	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata
İlk sızıntı	770	870	1121	920,3333	180,8323349	104,4035972
Yoğun sızıntı	1058	1454	1756	1422,667	350,0533293	202,1033839
Son Hasar	1935	1834	2090	1953	128,945725	74,44684905

**ÖZGEÇMİŞ****KİŞİSEL BİLGİLER**

**Adı Soyadı** : Aykut ŞAHİN  
**Uyruğu** : T.C  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : POLATLI 30.04.1984  
**Telefon** : 0505 703 8238  
**Faks** :  
**e-mail** : aykutsahinn@hotmail.com

**EĞİTİM**

<b>Derece</b>	<b>Adı, İlçe, İl</b>	<b>Bitirme Yılı</b>
Lise	: N.M.Ç. Anadolu Lisesi, Batıkent ANKARA	2002
Üniversite	: Kırıkkale Üniversitesi , Kırıkkale	2007
Yüksek Lisans :		
Doktora :		

**İŞ DENEYİMLERİ**

<b>Yıl</b>	<b>Kurum</b>	<b>Görevi</b>
2008	Filkar Otomotiv A.Ş.	Kalite kontrol şefi
2008-...	Konaltaş Alüminyum A.Ş.	Üretim şefi

**YABANCI DİLLER** İngilizce (orta)