




**T.C.**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# DÜŞÜK HIZLI DARBE SONRASI YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ FİLAMAN SARIM CTP BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDAKİ HASAR DAVRANIŞI

**Memduh KARA**

**DOKTORA TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2012**

**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

## DÜŞÜK HIZLI DARBE SONRASI YAMA İLE TAMİR EDİLMİŞ FİLAMAN SARIM CTP BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDAKİ HASAR DAVRANIŞI

**Memduh KARA**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışmanlar: Prof.Dr. Ahmet AVCI**
**Doç.Dr. Mesut UYANER**

**2012, 141 Sayfa**

**Jüri**
**Prof.Dr. Ahmet AVCI**
**Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR**
**Prof.Dr. Hacı SAĞLAM**
**Prof.Dr. Cevdet MERİÇ**
**Yrd.Doç.Dr. Gürol ÖNAL**

Cam takviyeli plastik borular kimyasal madde içeren akışkanların iletilmesinde, endüstriyel atıkların uzaklaştırılmasında, petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanılmaktadır. Kullanım sırasında CTP boruların uğrayacağı düşük hızlı darbeler, özellikle tabakalar arası ayrılma gibi gözle zor tespit edilebilecek hasarlara yol açarlar ve bu hasarlar borularda mukavemet kaybına neden olurlar. Oluşan hasarın onarılması borulardaki mukavemet kaybının önlenmesi açısından son derece önemlidir. ANSI/AWWA C950 standardı CTP boruları basınç sınıflarına ayırmış ve boruların işletme basınç değerlerini belirlemiştir. Bu çalışmada CTP olarak filaman sarım metoduyla imal edilen $(\pm 55°)_3$ sarım açısına sahip E-camı/epoksi kompozit borular kullanılmış ve ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 32 bar basınç değeri işletme basıncı olarak alınmıştır. İç basınç uygulanan CTP boruya 5, 10 ve 15 Joule enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda temas kuvveti-zaman, kuvvet-yer değiştirme, enerji-zaman değişimleri elde edilmiş ve numunede oluşan hasar bölgeleri incelenmiştir. Darbe hasarlı CTP borular, ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testi ile patlatılmıştır. CTP borularda oluşan patlama hasarları incelenmiş ve boruların patlama mukavemetindeki değişimler tespit edilmiştir. Darbe hasarlı boruların hasar bölgesi 2, 4 ve 6 kat kompozit yama uygulamasıyla tamir işleminden geçirilmiştir. Onarılmış borular ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testi ile patlatılmıştır. Darbe hasarlı borulara uygulanan yama işleminin boruların patlama mukavemetine ve hasar gelişimine etkileri değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, ön gerilmeli CTP borulara yapılan tüm enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbede oluşan hasarlar incelendiğinde elyaf kopmaları gözlenmemiştir. Buna bağlı olarak darbe hasarlı ve darbe hasarsız boruların iç basınca karşılık çap değişimleri aynı olmuştur. Ayrıca bu boruların hasar bölgelerine 6 katlı yama uygulamasının uygun olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Cam takviyeli plastik, Düşük hızlı darbe, Filaman sarım, Hasar davranışı, İç basınç, Yama tamiri

# ABSTRACT

## Ph.D THESIS

## FAILURE BEHAVIOR OF FILAMENT WOUND GRP PIPES UNDER INTERNAL PRESSURE REPAIRED WITH PATCH AFTER LOW VELOCITY IMPACT

**Memduh KARA**

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Selçuk University**
**Department of Mechanical Engineering**

**Advisors: Prof.Dr. Ahmet AVCI**
**Assoc.Prof.Dr. Mesut UYANER**

**2012, 141 Pages**

**Jury**
**Prof.Dr. Ahmet AVCI**
**Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR**
**Prof.Dr. Hacı SAĞLAM**
**Prof.Dr. Cevdet MERİÇ**
**Asst.Prof.Dr. Gürol ÖNAL**

Glass-reinforced plastic pipes are used for conducting of fluids containing chemicals, removing industrial waste, and for oil and natural gas transmission lines. GRP tubes can be subjected to a low velocity impact that causes barely visible damages such as delamination. These damages result strength loss in pipes. Repairing of the developed damage is a very important issue in terms of preventing of the strength loss. ANSI/AWWA C950 drinkable water pressure standard classifies GRP pipes and determines the operating pressure values. In this study, $(\pm 55°)_3$ filament wound E-glass/epoxy GRP tubes were used and 32 bar pressure value was taken as an operational value according to ANSI/AWWA C950 drinkable water pressure standard. Internally pressurized GRP tubes were impacted at the levels of 5, 10 and 15 J impact energy. After the tests, force-time histories, energy-time histories and force-displacement variations were obtained. Impact damaged GRP were burst according to ASTM D 1599-99 standard. Failure modes on the burst tubes were investigated and variations in the burst strength were also determined. Damage zones of the impacted tubes were repaired with 2, 4 and 6 layered composite patches. Repaired GRP pipes were burst by internal pressure test according to ASTM D 1599-99. The effects of patching of damaged GRP tubes on burst strength and damage progress were evaluated.

In this study, fiber breakage was not observed when damage caused by low velocity impact in all energy levels to pre-stressed CTP pipes was examined. Accordingly, the diameter changes of the damaged and undamaged pipes that subjected to internal pressure remained same. Furthermore, the suitability of six layered patch application on the damaged parts of the pipes was determined.

**Keywords:** Glass reinforced plastic, Low velocity impact, Filament wound, Damage behavior, Internal pressure, Patching

# ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanların Prof.Dr. Ahmet AVCI'ya ve Doç.Dr. Mesut UYANER'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın yapılması esnasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e ve Yük.Tek.Öğr. Lokman GEMİ'ye yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için test cihazlarının alınması, deney malzemelerinin temin edilmesi ve deney numunelerinin incelenmesi gibi konularda 09101030 nolu proje ile maddi destek veren Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tüm çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan eşime ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Memduh KARA
KONYA-2012

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **iv**

**ABSTRACT** ..... **v**

**ÖNSÖZ** ..... **vi**

**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**

**ŞEKİLLER LİSTESİ** ..... **x**

**ÇİZELGELER LİSTESİ** ..... **xiii**

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... **xiv**

**1. GİRİŞ** ..... **1**

**2. KAYNAK ARAŞTIRMASI** ..... **4**

**3. KOMPOZİT MALZEMELER** ..... **9**

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı ..... 9
3.2. Matris Malzemeleri ..... 9
3.2.1. Termoset matrisler ..... 10
3.3. Takviye Malzemeleri ..... 10
3.3.1. Cam elyaflar ..... 11
3.4. Tabakalı Kompozitler ..... 12
3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler ..... 12
3.5. Kompozit Üretimi ..... 13
3.5.1. Filaman sarım yöntemi ..... 13

**4. DÜŞÜK HIZLI DARBE ve HASAR ANALİZİ** ..... **15**

4.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği ..... 15
4.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları ..... 15
4.1.2. Normal temas kuvvetinin işi ..... 17
4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı ..... 17
4.3. Darbe Testleri ..... 18
4.3.1. Sarkaç testleri ..... 19
4.3.2. Ankastre edilmiş kiriş darbe testi ..... 21
4.3.3. Ağırlık düşürme darbe testi ..... 22
4.3.4. Yüksek hızlı darbe testi ..... 23
4.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları ..... 23
4.4.1. Matris hasarı ..... 25
4.4.2. Delaminasyon ..... 27
4.4.3. Elyaf hasarı ..... 30
4.4.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması ..... 32
4.4.5. Nüfuziyet ..... 32

**5. KOMPOZİT MALZEMELERİN TAMİRİ ..... 33**

5.1. Hasar Tahmini ..... 33
5.2. Tamir Seçenekleri ..... 34
5.2.1. Kozmetik (Yüzeysel) tamir ..... 34
5.2.2. Geçici tamir ..... 34
5.2.3. Yapısal tamir ..... 35
5.3. Tamir İşlemini Etkileyen Faktörler ..... 38
5.3.1. Yama tasarımı ..... 38
5.3.1.1. Yama bindirme uzunluğu ..... 41
5.3.1.2. Yama kalınlığı ..... 41
5.3.2. Yüzey hazırlama ..... 42
5.3.3. Yama malzemesinin seçimi ..... 43
5.3.4. Yapıştırıcı seçimi ..... 43
5.4. CTP Kompozit Boruya Etkiyen Gerilmeler ..... 44
5.5. Yapıştırıcı Bağdaki Hasar Tipleri ..... 45

**6. MATERYAL VE YÖNTEM ..... 47**

6.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi ..... 47
6.2. Yakma Deneyi ..... 48
6.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri ..... 49
6.3.1.Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı ..... 50
6.3.2.CTP kompozit boru yataklama ve iç basınç uygulama ünitesi ..... 51
6.3.3. Elektronik kontrol ünitesi ..... 53
6.4. CTP Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi ..... 54
6.4.1. Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri ..... 54
6.4.2. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri ..... 55
6.4.3. Absorbe edilen enerji-zaman ($E_a$-t) eğrileri ..... 56
6.4.4. Hız-zaman (V-t) eğrileri ..... 57
6.5. Statik İç Basınç Deneyleri ..... 58
6.5.1. Statik iç basınç test düzeneği ..... 58
6.6. CTP Kompozit Boruların Statik İç Basınç Patlama Davranışlarının Belirlenmesi ..... 60
6.6.1. Darbe hasarının statik patlama basıncına etkisi ..... 60
6.6.2. Hasarlı borularda onarım işleminin statik patlama basıncına etkisi ..... 61
6.7. Darbe Hasarlı CTP Boruların Onarımı ..... 61
6.8. Kompozit Borunun Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ..... 63
6.9. Kompozit Yamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ..... 64

**7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA ..... 66**

7.1. CTP Boruların ve Kompozit Yamanın Yakma Deney Sonuçları ..... 66
7.2. CTP Boruların ve Kompozit Yamanın Mekanik Özellikleri ..... 66
7.3. CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları ..... 67
7.3.1. Temas kuvveti-zaman değişimi ..... 68
7.3.2. Temas kuvveti-yer değiştirme ..... 69
7.3.3. Enerji-zaman değişimi ve enerji dağılımı ..... 71
7.3.4. Hız-zaman değişimi ..... 73
7.3.5. Kuvvet ve iç basıncın zamana bağlı değişimi ..... 74
7.3.6 İmpuls kuvveti ..... 76

7.3.7. Düşük hızlı darbe hasar analizi ..... 77
7.3.8 Özgül Hasar Enerjisi ..... 84
7.4. Darbe Hasarlı CTP Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları ..... 84
7.4.1. Darbe hasarlı boruların patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi ..... 84
7.4.2. Darbe hasarlı boruların patlama hasar analizi ..... 86
7.4.3 Statik iç basınç patlama testinin numune çap değişimine etkisi ..... 93
7.5. Onarılmış CTP Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları ..... 95
7.5.1. Artan darbe enerji seviyeleri için patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi 95
7.5.2. Farklı darbe enerji seviyeleri için yama kat sayısının statik iç basınç patlama hasarına etkisi ..... 98

**8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 111**

8.1 Sonuçlar ..... 111
8.2 Öneriler ..... 114

**KAYNAKLAR ..... 115**

**EKLER ..... 120**

**EK 1. DÜŞÜK HIZLI DARBENİN KİNETİK ANALİZİ ..... 120**

A1. Darbe Başlangıç Şartları ..... 120
A.2 İvme Değişiminin Elde Edilmesi ..... 120
A.2.1 İvmenin $\Delta t$ aralığında doğrusal değişimi (1. dereceden yaklaşım) ..... 121

**EK-2 ÖZGÜL HASAR ENERJİSİ ..... 124**

**ÖZGEÇMİŞ ..... 125**

## ŞEKİLLER LİSTESİ

**Şekil 3.1** CNC helisel flaman sargı makinesi (Şahin 2004) ..... 14
**Şekil 4.1** (a) izafi yer değiştirme $\delta$ nın (b) zaman $t$ nin bir fonksiyonu olarak normal temas kuvveti $F$ (Stronge 2000)..... 16
**Şekil 4.2** Charpy ve Izod darbe test düzenekleri (Ceyhun ve Turan 2003)..... 20
**Şekil 4.3** Sarkaç darbe test sisteminin şematik resmi (Aktaş 2007)..... 21
**Şekil 4.4** Ankastre edilmiş kiriş darbe test sisteminin şematik resmi, 1) numune ve 2) vurucu (Aktaş 2007) ..... 21
**Şekil 4.5** Ağırlık düşürme test düzeneği (Ceyhun ve Turan 2003) ..... 22
**Şekil 4.6** Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006)..... 24
**Şekil 4.7** Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı (Abrate 1998)..... 25
**Şekil 4.8** (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri (Abrate 1998) ..... 26
**Şekil 4.9** Delaminasyon alanlarının elyaf yönlendirme açılarına göre şekilleri (Abrate 1998) ..... 27
**Şekil 4.10** Sıralı delaminasyon şeritlerinin şematik gösterimi (Malvern ve ark. 1987) . 29
**Şekil 4.11** Darbe uygulanan yüzeye göre hasar yayılışı, (a) Cam yüzeyden, (b) Aramid yüzeyden (Park ve Jang 2001a) ..... 31
**Şekil 5.1** Tabakalı kompozitler için yama tamiri uygulaması ..... 36
**Şekil 5.2** Sandviç paneller için yama tamiri uygulaması..... 36
**Şekil 5.3** Mekanik bağlantılı yama ile tamir (Chicken ve ark.1997)..... 37
**Şekil 5.4** Yama ile onarılmış boru kesiti (Günaydın 2010)..... 39
**Şekil 5.5** Bindirmeli birleşim (Schubbe 1997) ..... 39
**Şekil 5.6** Levhadan yamaya yük transferi (Schubbe 1997) ..... 40
**Şekil 5.7** Tarafsız eksen değişimi ile meydana gelen eğilme (Schubbe 1997)..... 40
**Şekil 5.8** Yapıştırıcının soyulma ve klivaj hasarı (Schubbe 1997)..... 40
**Şekil 5.9** İki ucu kapalı basınçlı kaptaki gerilmeler (Roberts 1995) ..... 45
**Şekil 5.10** Yapıştırma hasar biçimleri (Mazumdar 2002) ..... 46
**Şekil 6.1** Numune geometrisi ..... 48
**Şekil 6.2** Düşük hızlı darbe test cihazı ..... 50
**Şekil 6.3** Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı ..... 51
**Şekil 6.4** CTP Kompozit boru yataklama ünitesi ..... 52
**Şekil 6.5** İç basınç uygulama ünitesi ..... 52
**Şekil 6.6** Elektronik kontrol ünitesi (Kara 2006) ..... 53
**Şekil 6.7** Artan darbe enerjisi altında oluşan kuvvet-çökme (F-d) eğrileri (Sayer 2009) ..... 55
**Şekil 6.8** Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri (Sayer 2009)..... 56
**Şekil 6.9** Absorbe edilen enerji-zaman ($E_a$-t) eğrileri (Sayer 2009)..... 57
**Şekil 6.10** Hız-zaman (V-t) eğrileri (Sayer 2009) ..... 57
**Şekil 6.11** Serbest uçlu iç basınç test aparatı (Şahin 2011) ..... 59
**Şekil 6.12** İç basınç test aparatı yerleştirilmiş deney numunesi ve muhafaza kabini..... 59
**Şekil 6.13** Serbest uçlu iç basınç deneyi seti (Şahin 2011) ..... 60
**Şekil 6.14** CTP kompozit borularda patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi (Uyaner 2010) ..... 61
**Şekil 6.15** Yama geometrisi (Günaydın 2010) ..... 62
**Şekil 6.16** 15 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numuneler için a) 2 kat b) 4 kat ve c) 6 kat yama yapılarak tamamlanmış onarım uygulaması..... 63
**Şekil 6.17** Teğetsel ve eksenel yönde strain-gage yapıştırılmış deney numunesi ..... 64

**Şekil 6.18** Altı katlı yama üzerine strain-gage yapıştırılmış çekme deney numunesi (Günaydın 2010) ..... 65
**Şekil 6.19** Tek bindirmeli birleşim deney numuneleri (Günaydın 2010) ..... 65
**Şekil 7.1** Yakılmış deney numuneleri a) Kompozit boru b) Kompozit yama ..... 66
**Şekil 7.2** CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet–zaman değişimi ..... 69
**Şekil 7.3** CTP kompozit boru numunesinde değişik çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet bağlı yer değiştirme ..... 70
**Şekil 7.4** CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjileri için elde edilen en büyük yer değiştirme miktarları ..... 71
**Şekil 7.5** Enerji-zaman değişimi ..... 71
**Şekil 7.6** CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde elde edilen enerji-zaman değişimi ..... 72
**Şekil 7.7** CTP kompozit boru numunelerinde değişik darbe enerjileri için elde edilen enerji dağılımı miktarları ..... 73
**Şekil 7.8** CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde elde edilen hız-zaman değişimi ..... 74
**Şekil 7.9** CTP kompozit boru numunesinde a) 5 J, b) 10 J ve c) 15 J darbe enerjileri için kuvvet ve basıncın zamanla değişimi ..... 75
**Şekil 7.10** CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde elde edilen basınç–zaman değişimi ..... 76
**Şekil 7.11** CTP kompozit boru numunelerinde farklı enerji seviyeleri için elde edilen impuls kuvvetleri ..... 76
**Şekil 7.12** İç basınç altında düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde a) 5 J b) 10 J c) 15J darbe enerjisinde oluşan ön ve arka hasar bölgeleri ..... 79
**Şekil 7.13** İç basınç altında düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde a) 5 J b) 10 J c) 15J darbe enerjisinde oluşan enine kesit hasar bölgeleri (Büyütme: 8X) ..... 79
**Şekil 7.14** İç basınç altında düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde a) 5 J b) 10 J c) 15J darbe enerjisinde oluşan enine kesit hasar bölgeleri (Büyütme: 20X) ..... 80
**Şekil 7.15** 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin yakma testi sonucu elde edilen ön hasar bölgesi ..... 82
**Şekil 7.16** Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi ..... 83
**Şekil 7.17** Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi ..... 83
**Şekil 7.18** Darbe hasarlı CTP boruların statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi ..... 86
**Şekil 7.19** CTP boruların statik iç basınç testi sonucu a) darbe hasarsız b) 5 J c) 10 J ve d) 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunede oluşan son hasar görünümü ..... 89
**Şekil.7.20** Hasarsız CTP kompozit numunenin statik patlama testindeki çap-iç basınç değişimi ..... 93
**Şekil 7.21** Hasarsız ve değişik darbe enerjileriyle hasarlandırılmış CTP kompozit numunelerin statik patlama testindeki çap-iç basınç değişimi ..... 94
**Şekil 7.22** 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi ..... 96
**Şekil 7.23** 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi ..... 97
**Şekil 7.24** 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi ..... 98
**Şekil 7.25** 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla a) Yamasız b) 2 kat yama c) 4 kat yama d) 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları ..... 100

**Şekil 7.26** 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla a) Yamasız b) 2 kat yama c) 4 kat yama d) 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları ..... 104
**Şekil 7.27** 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla a) Yamasız b) 2 kat yama c) 4 kat yama d) 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları ..... 108
**Şekil A1** Kuvvetin zamana göre değişimi ..... 120
**Şekil A2** İvmenin zamana göre değişimi ..... 121
**Şekil A3** 1.dereceden yaklaşımla ivme-zaman değişimi ..... 121
**Şekil B1** Değişik numunelerde yutulan enerji-özgül hasar enerjisi değişimi ..... 124

## ÇİZELGELER LİSTESİ

**Çizelge 3.1** E, S ve D camı elyaflarının özellikleri (Cam Elyaf San. A.Ş. 1984) ..... 11
**Çizelge 4.1** Farklı malzemelerin standart V-Çentik Charpy ve Izod darbe enerjileri (Ceyhun ve Turan 2003) ..... 20
**Çizelge 6.1** Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri (Samancı 2004) ..... 47
**Çizelge 7.1** Kompozit borunun mekanik özellikleri ..... 66
**Çizelge 7.2** Kompozit yamanın mekanik özellikleri ..... 67
**Çizelge 7.3** Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri (X±Sx) ..... 69

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\sigma_a$ : Eksenel gerilme

$\sigma_n$ : Basınçlı kabın yüzeyine dik yönde etki eden gerilme

$\sigma_T$ : Teğetsel gerilme

$p$ : Basınç

$E$ : Elastisite modülü

$W_f$ : Elyafın ağırlığı

$W_c$ : Kompozitin ağırlığı

$\rho_f$ : Elyafın yoğunluğu

$\rho_c$ : Kompozitin yoğunluğu

$V_f$ : Elyafın hacimsel oranı

$V$ : Hız

$V_y$ : İzafi hız

$d$ : Deplasman, yer değiştirme

$E_a$ : Yutulan enerji

$F$ : Kuvvet

$\delta$ : Yer değiştirme

$\delta_f$ : Kalıcı yer değiştirme

$t$ : zaman

$p$ : İmpuls

$W_d$ : Çarpışmada parça üzerine yapılan iş

$w_y$ : Yama genişliği

$t_y$ : Yama kalınlığı

### Kısaltmalar

CTP: Cam takviyeli plastik

DAQ: Data Acquisition

NI: National Instruments

ASTM: American Society for Testing and Materials

ANSI: American National Standards Institute

AWWA: American Water Works Association

# 1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, teknolojinin gelişmesiyle beraber insanların ihtiyaçları artmaktadır ve bu ihtiyaçların başında yeni malzeme üretimi gelmektedir. Doğada sınırlı sayıda bulunan ana malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri teknolojinin gelişmesiyle yetersiz kalmaktadır. Tasarımda aranan özellikleri verebilecek uygun bir malzeme üretmek amacıyla, makro boyutta iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler, kendilerini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini gösterecek tarzda, genellikle matris adı verilen ana yapı ile takviye malzemeden oluşurlar (Kara 2006). Plastik matrisli bir kompozit yapımında matris malzemesi olarak epoksi, polyester, vinilester gibi reçineler kullanılırken takviye malzemesi olarak E-camı, S-camı, karbon elyaf ve aramid elyaf gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Cam elyaf takviyeli plastik malzemeler (CTP), reçinenin içerisine takviye malzemesi olarak cam liflerinin katılmasıyla elde edilen kompozit malzemelerdir. Kompozit içerisinde cam elyaflar, sürekli veya süreksiz fazda bulunabilirler. CTP'ler istenilen boyutlarda üretilebilme imkanı, seri üretim, yüksek mukavemet, çok sayıda kimyasal maddeye dayanım, hava kosullarına dayanım, UV ışınlarına dayanım, farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlarda ve kombinasyonlarda malzeme üretilebilme imkanı saglaması gibi üstün özellikleri sayesinde birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır.

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine, çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır (Ceyhun ve Turan 2003).

Düşük hızlı darbeye karşı olan cevap malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarında darbe sonucunda oluşan hasar darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan

hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. İçyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez.

ANSI/AWWA C950 standardı CTP boruları basınç sınıflarına ayırmış ve boruların işletme basınç değerlerini belirlemiştir. CTP borular belirlenen basınç sınıflarında, kimyasal madde içeren akışkanların iletilmesi ve taşınması, endüstriyel atıkların taşınması ve uzaklaştırılması, deniz suyu alma veya deniz suyu deşarj uygulamaları, petrol ve doğalgaz iletim hatları, denizaltı doğalgaz boru hatları, basınçlı basınçsız kanalizasyon hatları gibi birçok mühendislik alanında kullanılırlar ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Üretim veya bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür. Kompozit yapılar metalik yapılara nazaran darbe hasarına karşı daha duyarlıdır ve darbe gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasar mukavemette azalmaya sebep olur ve yük altında büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkendir.

Kompozit malzemelerdeki darbe hasarlarının fark edilmesi ve araştırılması kompozit yapılar için düzenli bakım işlemlerinden biri olmalıdır. Kompozit bileşenlerdeki hasar çoğu zaman çıplak gözle görülemez ve hasar bölgesi en iyi tahribatsız muayene yöntemleri ile belirlenir. Başlangıçtaki mekanik özelliklerin tekrar sağlanması amacıyla hasar alanlarının tamiratı, hasarın şekline göre farklılık göstermektedir. Öncelikle hasar tespit edilir ve yapının kalıntı özelliklerinin üzerindeki etkisi tahmin edilir. Malzemenin tamir edilmesi ya da yeniden değiştirilmesi konusunda bir karar verilmelidir. Hasarın tamir edilemeyeceği durumlar var ise malzeme hurdaya çıkarılarak kullanımdan kaldırılır. Malzeme tamir edilebilir durumda ise tamir şekli belirlenir.

Hasar boyutu onarılabilecek kadar küçük ise onarım mümkün olur. Hasarlı boru hatlarının onarımı için civatalı kelepçe, kaynaklı kelepçe gibi pek çok onarım yöntemi kullanılmaktadır. Son yıllarda kompozit yamalar ile onarım yapılmaktadır. Kompozit

yamalar geleneksel onarım yöntemlerine göre daha dayanıklı, daha hafif, korozyona karşı daha dirençli ve uygulaması daha kolaydır (Günaydın 2010).

Bu çalışmada filaman sarım yöntemiyle E-camı/epoksi malzemeden imal edilen ±55° sarım açısına sahip CTP borular kullanılmıştır. CTP borular İzoreel firmasında $[\pm 55°]_3$ olacak şekilde 6 tabakalı olarak üretilmiştir. Üretilen deney numunelerine ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 32 bar basınç değerinde iç basınç uygulanmıştır. 32 bar iç basınç uygulanan CTP boru numunelerine 5, 10 ve 15 Joule enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda elde edilen temas kuvveti-zaman, kuvvet-yer değiştirme, enerji-zaman değişimleri belirlenmiştir. Farklı darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalan deney numunelerinde oluşan hasar alanları incelenmiş ve hasar modları tespit edilmiştir. Farklı enerji seviyelerinde darbe hasarına uğramış CTP borular ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testine maruz bırakılmıştır. CTP borularda statik iç basınç testlerinde meydana gelen hasar ilerlemesi, patlama hasarları ve boruların patlama mukavemetindeki değişimler tespit edilmiştir. Farklı darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe hasarı meydana gelmiş boruların hasar bölgesi 2, 4 ve 6 kat yama uygulamasıyla onarım işleminden geçirilmiştir. Boru numunelerinin onarım işlemlerinde kullanılmak üzere 0.15 mm kalınlığındaki, 200 $g/m^2$'lik E-camı kumaştan 100 mm genişliğindeki kumaşlar kesilmiştir. Onarım için hazırlanan cam kumaşlar fırça yardımıyla epoksi yapıştırıcı ile doyurularak boru üzerine sarılmıştır. Yama iki, dört ve altı katlı olacak şekilde sarım işlemine devam edilmiştir. Darbe hasarlı bölgesi onarım işleminden geçirilmiş borular ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testine maruz bırakılmışlardır. Darbe hasarlı borulara uygulanan yama işleminin boruların patlama mukavemetine ve hasar gelişimine etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler birçok mühendislik uygulamasında kullanılmakta ve kullanımı hızla artmaktadır. Filaman sarım kompozit borular yüksek basınca ve korozif ortamlara dayanıklı malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı filaman sarım CTP borular özellikle basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal madde iletiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok iletim alanında kullanılan bu malzemeler üretim, servis ve bakım işlemleri sırasında yabancı cisimlerin darbesine maruz kalabilirler. Darbe yüklerine maruz kalan malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim doğru hesap edilebilmelidir. İhmal edilen küçük hasarlar malzemenin mekanik özelliklerinde büyük değişimlere sebep olabilir ve istenmeyen kazalar ortaya çıkabilir. Kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelemesine yönelik olarak birçok araştırma yapılmıştır. Ancak bu araştırmaların çoğunluğu düz levhalara yapılan darbelerin incelenmesine yönelik çalışmalardır.

Alderson ve Evans (1992) ±55° cam elyaf takviyeli flaman sarım borular üzerine iki ayrı bağlama durumuna göre statik yükleme ve düşük hızlı darbe testleri uygulamıştır. Bu bağlama durumlarından birinde CTP numune zemin üzerine serbest bırakılmış diğerinde ise numunenin uç kısımları yataklanmıştır. Basit bir aydınlatma tekniği kullanarak borularda meydana gelen hasar alanının büyüklüğünü ve hasar sürecini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, numunede oluşan hasar sürecinin iki karakteristik kısmı olduğunu ortaya koymuşlardır. İlk olarak numuneyi bağlama durumu ne olursa olsun elastik davranışın aynı yük değerinde sona erdiğini tespit etmişlerdir. İkinci kısımda ise elastik davranışı takip eden diğer hasarların (delaminasyon) gelişiminde numune bağlama durumu ve test metodunun büyük önem taşıdığını ortaya koymuşlardır.

Doyum ve Altay (1996) ($\pm 45°_2$, 90°) S-camı ve ($\pm 54°_3$ ve 90°) E-camı filaman sarım ince silindirlerde düşen ağırlık etkisini ve sonrası hasar tespitini araştırmışlardır. Çalışmalarında 3,5 J ile 8,5 J arasında değişik enerji seviyelerinde darbe üretebilen bir cihaz kullanmışlardır. Darbe enerjisine göre numunede oluşan hasarın tipi ve boyutu ortaya konulmuştur. E-camı tüplerde büyük ölçüde yüzey çatlağı ve tabakalar arası ayrılma hasarı görülmüştür.

Kim ve ark. (1997) sonlu eleman (FE) analizi kullanarak kavisin, silindirik kompozit panellerin dinamik cevabına etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmaya göre az kavisli panellerin darbeye cevabı düz tabakalar gibi olmuştur ancak temas kuvveti

kavisin artmasıyla artmıştır. Aynı enerji seviyesinde yapılan darbe deneyleri için kavisli numunede meydana gelen tabakalar arası ayrılma düzlem yüzeylerden daha fazla önemlidir. Çünkü temas kuvveti ve temas süresi bu malzemelerde artmaktadır.

Kistler ve Waas (1998), uçak yapılarını temsil eden silindirik kavisli karbon epoksi kompozitlerde beklenmedik darbe ile ilgili deneysel ve sayısal çalışma yapmışlardır. Vurucu ve hedef davranışında birçok parametrenin etkisi sayısal olarak karşılaştırılmıştır ancak, darbe nedeniyle oluşan hasar tahmin edilememiştir.

P. B. Gning ve ark. (2004) $(\pm 55°)_{10}$ filaman sarımlı cam epoksi silindirlerde meydana gelen darbe hasarının hidrostatik basınç direncine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan silindirlerin iç çapı 55 mm, et kalınlığı 6mm ve uzunluğu 110 mm'dir. Öncelikle hasarsız numunelere dış basınç uygulanmış ve patlama basınçları tespit edilmiştir. Daha sonra farklı enerji sevilerinde hasarlandırılmış numunelere dış basınç uygulayarak numunenin patlama basıncındaki değişimler tespit edilmiştir. Numunelere dış basınç verilmesinin nedeni devam eden sualtı uygulamalarına hasar toleransı ortaya koymaktır. . Darbe hasarının cam/epoksi silindirlerin patlama basıncını önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir. Örneğin 12 J darbe enerjisi, patlama basıncını %40 a kadar azaltmıştır. Bu çalışma hasar tolerans gelişimi ile yapıların geliştirilmesi için, büyük bir önem arzetmektedir.

P. B. Gning ve ark. (2005) kalın ±55° filaman sarımlı cam epoksi tüplerine yarı–statik batma ve düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Ağırlık düşürme darbe testleri, 55 mm iç çaplı 6 mm kalınlığındaki tüplere 45 J enerji seviyesine kadar gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik inceleme ile ilk önce hasar alanları belirlenmiştir. Çok sayıdaki örnekler daha sonra kesilip düzeltilmiş, ardından hasar alanı boya emdirme tekniği ile işaretlenmiştir. Bu hasar gelişiminin detaylı şekilde belirlenmesine imkân vermiştir. Darbe hasarının patlama basıncına etkisi tanımlanmıştır. Darbe enerjisinin artmasıyla patlama basıncının düştüğü tespit edilmiştir.

M. Tarfaoui ve ark. (2007) cam epoksi silindir yapıların hasarına ve dinamik cevabına ölçek ve boyut etkisini araştırmışlarıdır. Çalışmalarında farklı boyutlarda ve ölçeklerde ±55° E-camı epoksi numuneler kullanmışlardır. İmalat parametrelerinin numunenin dinamik cevabına ve numunede oluşan hasara önemli ölçüde etki ettiğini tespit etmişlerdir. Numunede oluşan hasar, en büyük temas kuvveti, en büyük çökme ve temas süresi numune boyutlarıyla doğrudan ilişkilidir.

Uyaner ve ark. (2010) birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan filaman sarım tekniğiyle üretilmiş cam takviyeli plastik E-camı/epoksi, CTP boruların düşük

hızlı darbe sonrası mukavemetini incelemişlerdir. Çalışmalarında, $(\pm 55°)_5$ sarım açılı filaman sarım CTP borulara 6,350 kg kütleli 24 mm yarı küresel vurucu ile 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s'lik çarpma hızlarında düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Ayrıca hasarlı CTP borular ASTM D 1599-99 standardına göre statik patlatma testi ile patlatılmıştır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre, düşük hızlı darbe deneylerinde çarpma hızı arttıkça en büyük temas kuvveti, temas süresi, yer değiştirme miktarı, malzeme tarafından yutulan enerji ve numunelerde oluşan hasar miktarı artmaktadır. Ayrıca statik patlatma testi sonucunda darbe enerjisinin artmasıyla boru numunesinin patlama basıncı değerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Silindirlerin basınca cevabı ile ilgili olarak ta birçok çalışma sunulmuştur.

Rousseau (1997) sarım modelinin ince kompozit tüplerdeki hasara etkisini incelemiştir. Farklı ±55° sarım modeline sahip tüplerin iç basınç yorulma testleri, hasar ilerlemesi ile sarım deseni arasında bir ilişkinin olmadığını işaret etmiştir.

Be'akou ve ark. (2001) cam/epoksiden yapılan ince silindirik tabakalı kompozitlerin optimum sarımını incelemişlerdir. Elemanter katmanın bazı mekanik özelliklerindeki küçük değişmelerin iç basınç uygulanan kaplar için optimum elyaf sarım açısını kuvvetli bir şekilde etkilediğini göstermişlerdir.

Kaddour ve ark. (1998) kalın ve ince cidarlı ±55° sarım açılı kompozit silindirlerin dış basınç (çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranı 2:1) dahil çeşitli çift eksenli yükleme oranları altındaki davranışını incelemişlerdir. Yaygınca kullanılan kırılma kriterlerinin aslında kırılmayı doğru tahmin edemedikleri ancak kritik basınçları eksik tahmin ettiklerini ortaya koymuşlardır. Basit ilerlemeli hasar teorisi tahminleri, deneysel sonuçlarla en iyi uyumu verdiğini göstermişlerdir.

Graham (1995) kutupsal ve spiral sarım konfigürasyonları ile dış basınç testlerine konu olan kalın ve ince cidarlı cam ve karbon/epoksi silindirlerini ($d_i/t$=6, 9, 16 ve 21) incelemiştir. Termal yüklemeyi de içeren FE modellemesinde, tüp kalınlığındaki gerilme durumunun analitik modeli iyi ilintilidir ve daha ince silindirlerin elastik burkulma basıncı doğru tahmin edilmiştir. Bununla birlikte Kaddour ve ark. (1998)' e benzer şekilde Graham hasar basıncı tahmini ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum bulmamıştır. Malzeme hasarından kaynaklanan kalın cidarlı kompozit silindirlerin bozulmasını tahmin etmenin tek yolunun silindir testlerden elde edilen verileri kullanmak olduğu sonucuna varmıştır.

Hasarlı yapıların tamirine yönelik araştırmaların büyük çoğunluğu düzlen levhaların hasarlarını dikkate alarak yapılan çalışmalardır. Hasarlı basınçlı kap ve

boruların tamir edilmesine yönelik yapılan çalışmalarda genellikle kompozit yama ile tamirat tercih edilmiştir.

Roberts (1995), çatlaklı çelik basınçlı kabın karbon fiber kompozit yama ile onarılmasını deneysel olarak incelemiştir. Onarımın etkisini ölçmek için standart çekme numuneleri kullanmıştır. Çatlaklı çekme numuneleri kompozit yama ile onarıldıktan sonra çevrimsel yüke maruz bırakılmıştır. Kompozit yama ile onarılmış çatlaklı çelik borulara statik ve çevrimsel yük uygulanarak hasar davranışı incelenmiştir. Onarımın çatlaklı çelik numunelerde çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve numunelerin ömrününü arttırdığı görülmüştür.

Hu ve ark. (1990), çatlaklı çelik basınçlı kabı çelik yama ile epoksi yapıştırıcı kullanarak onarmıştır.

Wilson (2006), hasarlı çelik boruyu karbon/epoksi sargı ile onarmıştır. Karbon/epoksi yama ile onarılmış boruların, onarılmamış borulardan daha yüksek statik basınçlara dayandığı ve daha iyi yorulma karakteristikleri sergilediği görülmüştür. Kompozit sargı ile boru ara yüzeyinin şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı belirlenmiştir.

Goertzen ve Kessler (2007), boru onarımında kullandıkları karbon/epoksi yama malzemesinin mekanik ve termal özelliklerini belirlemek için dinamik ve mekanik analiz yapmışlardır. Bunun için üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Camlaşma sıcaklığı üzerine ısıtma hızı, frekans ve ölçüm metotlarının etkileri incelenmiştir.

Duell ve ark. (2008), çelik boruları takviye etmek ve dış yüzey korozyonunu durdurmak için onarım yapmışlardır. Onarım malzemesi olarak karbon/epoksi kompozit kullanılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile farklı geometrilere sahip hasarlı boruların gerilme analizi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her durum için maksimum gerilmenin hasar bölgesinin merkezinde olduğu görülmüştür.

Günaydın (2010) çentik boyut oranları a/c=0.2 ve a/t=0.75 olan yüzey çentikli CTP kompozit borularda, farklı katlardaki kompozit yamalarla onarımın, yorulma davranışına etkisi deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile gerilme analizi yapmıştır. 100 mm genişliğinde ve iki, üç, dört, beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda patlama basıncı, yamasız çentikli borunun patlama basıncına göre artmıştır. Yama ile onarılmış yüzey çentikli boruların yama kat sayısı artırıldığı zaman yorulma ömrü artmıştır. İki, üç ve dört katlı yama ile onarılmış borularda yama bölgesinde meydana gelen hasar sırasıyla beyazlama, sızıntı ve yırtılma

şeklinde gerçekleşmiştir. Beş, altı ve yedi katlı yama ile onarılmış borularda çentik bölgesinin mukavemetinin artması ile borunun yamasız bölgelerinde de beyazlama olmuştur. Fakat beş ve altı katlı yama ile onarılmış boruların sızıntı ve son hasara uğraması yama bölgesinden olmuştur. Yedi katlı yama ile onarılmış boruda ise yamanın hemen bitimindeki onarılmamış bölgeden elyaf kopması şeklinde son hasar meydana gelmiştir.

Kompozit yamalar yalnızca takviye ve onarım amaçlı değil aynı zamanda kompozit boruların uç uca birleştirilmesinde de kullanılmıştır.

Pang ve ark. (2004), iki 54° sarım açılı cam/epoksi kompozit boruyu fiber takviyeli kompozit malzeme ile sararak uç uca birleştirmişlerdir. Birleştirmede epoksi vinil ester ve UV ışınla kürlenen vinil ester olmak üzere iki farklı reçine kullanılmıştır. Uç uca birleştirilen kompozit borular reçine türüne göre ortam sıcaklığı ve güneş ışığı ile kürlenmiştir. Birleştirilmiş boruların statik iç basınç ve dört noktadan eğilme testleri yapılmıştır. Eğilme testi ile güneş ışığı ile kürlenen boruların ortam sıcaklığıyla kürlenen borularla benzer eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. İç basınç deneyinde ise güneş ışığı ile kürlenen boruların iç basınç dayanımlarının, ortam sıcaklığı ile kürlenenlere oranla daha az olduğu görülmüştür. Deney sonuçları sonlu elemanlar analizi ile mukayese edilmiştir. Bu araştırmadan güneş ışığı ile kürlenen boruların sıvı ve gaz taşımacılığı için uygun olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

Peck ve ark. 2007, iki kompozit boruyu farklı kalınlıklardaki cam kumaş ve farklı genişliklerdeki kırpılmış cam fiber ile UV ışınla kürlenen vinil ester reçine kullanarak uç uca birleştirmişlerdir. Birleştirilen borular UV lambalarla kür edilmiştir. Boruların mekanik özellikleri statik iç basınç ve dört noktadan eğilme testleri ile belirlenmiştir. Deney sonucunda üç ve beş katlı cam kumaşla birleştirilen boruların sekiz katlı cam kumaşla birleştirilenlerden daha yüksek patlama basıncına sahip olduğu görülmüştür. Çünkü sekiz katlıda yeterli kürleme yapılamamıştır. Birleşimin eğilme dayanımını ve rijitliğini belirlemek için ise eğilme testi yapılmıştır.

Li ve ark. (2003), 54° sarım açılı cam/epoksi kompozit boruları dört farklı yapıştırıcı ve bir çapraz katlı cam prepreg kullanarak uç uca birleştirmişlerdir. Birleşim metodunun etkinliğini belirlemek için statik iç basınç deneyleri ile sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. İç basınç deneyi sonucunda birleştirme malzemesi prepregin kat sayısının artması ile patlama basıncının arttığı görülmüştür.

# 3. KOMPOZİT MALZEMELER

## 3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

İki veya daha fazla sayıdaki malzemelerin tasarımda aranan özellikleri sağlayabilecek daha uygun bir malzeme oluşturmak için makro-seviyede birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni malzemeye kompozit malzeme denir. Kompozit malzeme üretilmesiyle, yüksek dayanım, hafiflik, tasarım esnekliği, yüksek rijitlik, aşınma direnci, yüksek sıcaklık kapasitesi, iyi korozyon direnci, iyi ısı iletkenliği, tasarım esnekliği ve estetik görünüm gibi özellikler sağlanabilmektedir.

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemelerin bilinen özelliklerinden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri, örneğin; yoğunluk, elastiklik modülleri ve çekme dayanımları vb. hesaplanabilir. Tasarımda aranan özelliklerin sağlanmasıyla uçaklar, uzay araçları, denizaltı araçları ve malzeme özellikleri kritik olan birçok makine elemanı kompozit malzemelerden üretilmektedir.

Kompozit malzemeler matris adı verilen bir ana bileşenle, yüksek mukavemete ve yüksek elastiklik modülüne sahip olan takviye edici (elyaf, parçacık, vs.) olarak adlandırılan yapısal bileşenlerden oluşurlar. Matrisler, kompozit malzemeler içerisinde takviye elemanları olan elyafları bir arada tutmaya yarar, yani bağlayıcı olarak görev yaparlar. Matrisin amacı; desteklemek, korumak ve gerilmeyi transfer etmektir. Matrislerin yoğunlukları, rijitlikleri, mukavemetleri elyaflara göre daha düşüktür. Bununla birlikte elyaflarla birleştiklerinde daha mukavemetli ve daha iyi rijitlik özelliği olan bir malzeme ortaya çıkar (Şahin 2002).

## 3.2. Matris Malzemeleri

Kompozit yapılarda elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumak amacıyla matris malzemesi kullanılır. Matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Kompozitlerde metal, seramik ve plastik esaslı matrisler kullanılmaktadır. Plastik esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler şeklinde iki tür olarak bulunmaktadır.

### 3.2.1. Termoset matrisler

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon gibi termoset plastikler matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termosetler termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan matris malzemeleridir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadırlar.

Uzay ve havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek dayanım istenen yerlerde klasik olarak epoksi reçine tercih edilir. Polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri, daha iyi mekanik özellikler, yorulma dayanımı, ısıl dayanım, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir.

Epoksi reçine, epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir ve uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan karma malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Reçinenin homojen olarak sertleşmemesi, özellikle gerilmeli korozyon olayında reçinenin çok faklı tepkiler vermesine sebep olur. Sertleşme 1 saat dolayında olup 127 °C ve 177 °C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250 °C 'ye kadar ısıl kararlı türleri de geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Dayanımları yüksektir, birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir.

## 3.3. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye malzemeleri elyaflardır. Elyaflar uzunluğu çaplarına göre çok büyük olan malzemelerdir. Kompozit malzemelerdeki elyafların en önemli fonksiyonu yükü taşımasıdır. Elyaflar, kompozit

malzemeye dayanım sağlarken rijitlik te sağlar. Kompozit malzemedeki sürekli elyaflara filaman, metalik filamanlara ise tel adı verilir. Eğer elyafların şekli dikdörtgen prizması şeklinde ise yani kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgen kenarlarından biri diğerinin 4 katından fazla olursa bu tür elyaflara şerit adı verilir.

### 3.3.1. Cam elyaflar

Cam elyaflar, kompozitlerde takviye malzemesi olarak en çok kullanılan ve en ucuz olan elyaf malzemelerdir. Cam elyafların genellikle dayanım/ağırlık oranı yüksektir. Alüminyum alaşımlara göre elastisite modülü büyük olurken, grafit ve aramid elyaflara göre daha düşüktür. Cam elyafla kuvvetlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranları, metallerin rijitlik/yoğunluk oranına göre daha düşüktür. Cam elyaflar yüksek kimyasal dirence sahiptirler.

Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar, E, C, D ve S camı olarak adlandırılırlar. Çizelge 3.1'de E camı ile S ve D cam elyaflarının özellikleri gösterilmektedir.

**Çizelge 3.1** E, S ve D camı elyaflarının özellikleri (Cam Elyaf San. A.Ş. 1984)

| Özellikler | E camı | S camı | D camı |
|---|---|---|---|
| Yoğunluk, ρ (g/cm$^3$ ) | 2,60 | 2,50 | 2,16 |
| Elastik modülü E (GPa) | 72 | 87 | 51,7 |
| Çekme dayanımı σ (GPa) | 3,45 | 4,54 | 2,41 |
| Çekme uzaması (%) | 4 | 2,9 | – |
| Özgül modül E/ ρ ((MN/m) | 27,7 | 34,8 | 23,9 |
| Özgül dayanım σ/ρ (MN/m/kg) | 1,37 | 1,81 | 1,16 |
| Boyuna termal genleşme katsayısı α (μm/C$^o$×10$^{-5}$) | 5 | 5,6 | 3,06 |

Cam elyaflar reçine ile birleşerek uygun bir malzeme ortaya çıkar. Elyaflar ile matris malzeme arasındaki bağların yetersiz olması iç yüzey hatalarını oluşturabilir. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmamaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır.

### 3.4. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit malzeme şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Ayrıca; tabakalar halinde bulunması her tabakanın ayrı bir kompozit olmasına izin vermektedir. Tabakalı kompozitlerin tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrolü diğer kompozitlerden daha kolay olmaktadır. Bu kompozitlerde özel gereksinimleri karşılamak amacıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlara sandviç malzeme de denir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, katılığı, aşınma direnci, ısıl yalıtım özellikleri iyileştirilebilir.

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemeden de yapılabilmektedir.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılabilmektedir. Burada ilke birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde takviye edecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır.

Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden veya tekbir türden malzeme kullanılabilmektedir. Tabakalı kompozitleri, üretimde kullanılan malzemelerin türlerinden hareketle, farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler ve tek tür malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler, şeklinde iki gurupta toplamak mümkündür.

#### 3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler

Çeşitli polimer malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumalara silikon emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir. Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar halinde birleştirilerek, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya benzer etkilere dirençli, çok hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler çeşitli zırh kalkan ve benzeri elemanların yapımında da kullanılmaktadır. Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemelerin çok değişik türleri mevcuttur ve farklı alanlarda kullanılmaktadır.

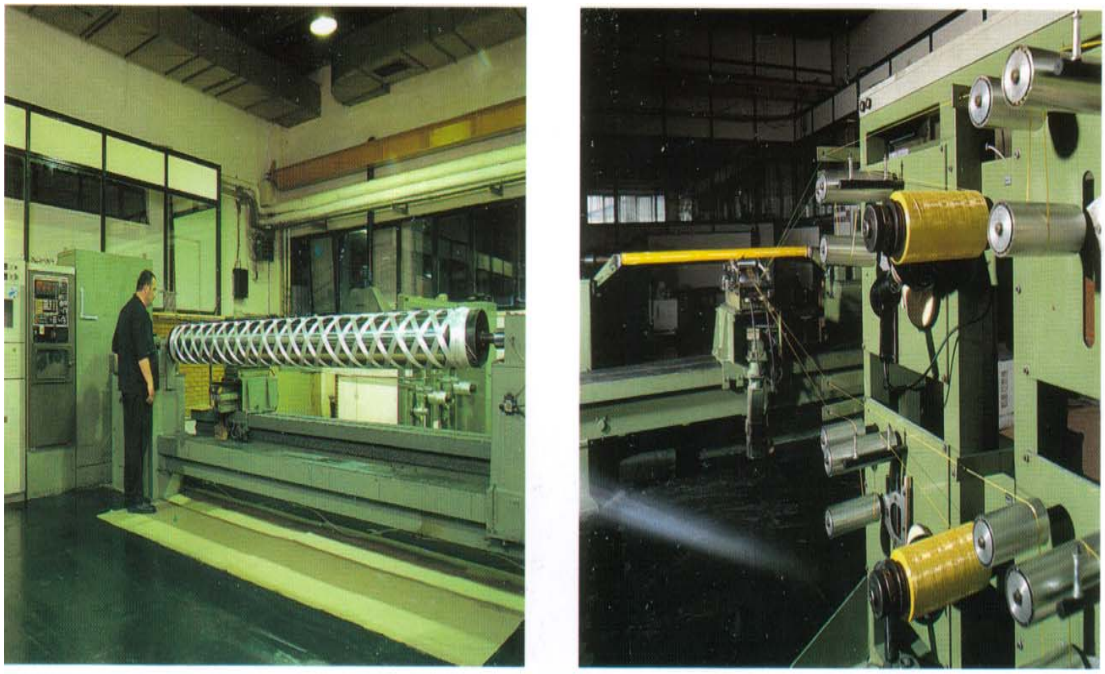
### 3.5. Kompozit Üretimi

Kompozit parçaların üretim yöntemi, malzeme bileşenlerinin özelliklerine, üretilecek ürünlerin biçimlerine, ürünün boyutlarına, mühendislik detaylarına, son kullanımlarına bağlı olarak seçilir. Kompozit ürünlerin motor supabı, baskılı devre kart, tekne gövdesi, uçak kanadı gibi pek çok uygulama alanı vardır. Üretim yöntemi bir üründen diğerine değişiklik gösterir. Üretimde kullanılacak matris tipleri, üretim prosesinin seçiminde önemli etkendir. Fiber takviyeli plastikler ve metal matris kompozitler ile yapılan bir motor pervane kanadını üretmek için farklı yöntemler kullanılır. Aynı matris malzeme kullanıldığında bile proses parametreleri değişir (Sinha 2006).

#### 3.5.1. Filaman sarım yöntemi

Filaman sargı tekniği, sürekli takviye elemanlarının dönel bir mandrel (kalıp) üzerini sarılması ile kompozit parça üretiminin gerçekleştirildiği, 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. Şekil 3.1'de filaman sarım prosesi görülmektedir. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan desenlerin bütün mandreli kaplaması şeklinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açıları mandrel boyuna doğru 25˚ gibi düşük açılardan mandrel eksenine dik açıya kadar değişebilir. Genellikle elyaflar 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, *prepeg* elyaf/reçine sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanır. Üretim prosesi, mandrelin çıkarılmasıyla tamamlanır. Gerekli durumlarda parça üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilir. Üretim prosesinin parça tipine, tasarım özelliklerine, malzeme kombinasyonlarına ve cihazlara bağlı olarak birçok çeşidi vardır. Filaman sargı tekniği ile üretilen yapılar genel olarak dönme yüzeyleri şeklindedir, bazı özel durumlarda bir takım sınırlamalarla asimetrik şekiller de üretilebilir. Ürünler, birkaç santimetreden metre boyutuna kadar değişebilen silindirler, borular ve tüpler olabilir. Küresel yâda konik şekiller özel uygulamalarla üretilebilir. Basınçlı tanklar ve depolama tankları da

bu tekniğin yaygın uygulamalarındandır. Yapılar, kullanılacakları alanlara ve maruz kalacakları yüklere göre özel olarak tasarlanır. Ayrıca gerekli hallerde kombinasyonlu üretimler de yapılabilir, bunlara örnek olarak termoplastik boru üzerine sarım, ince metal basınçlı kap üzerine sarım verilebilir.



**Şekil 3.1** CNC helisel flaman sargı makinesi (Şahin 2004)

Filaman sarım tekniğinde hemen her tip sürekli elyaf kullanılabilmesine rağmen filaman sarım metodu, esas olarak bir cam elyaflı sarım metodudur. Grafit, aramit ve Kevlar49 gibi elyaflar, yüksek özgül dayanım ve elastisite 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 3 veya 4 eksenli makinelere kadar bir çok çeşitleri vardır.

Filaman sarım tekniği ile üretilen kompozit boruların üretim parametreleri sonuç yapının özelliklerini büyük oranda etkiler. Özellikle, elyaf gerginliği, elyafların homojen dağılmaması ve reçinenin homojen olarak sertleşmemesi temel faktörler olarak sayılabilir. Gerilmeli korozyon olayında, elyaf hasarının temel sebebi elyaf üzerine gelen gerilmenin büyüklüğüdür. Elyaf gerginliğinin fazla olması bu prosesi hızlandırır. Reçine fazlalığı ise korozif ortamın elyafa ulaşmasını engellemesi bakımından önemlidir. Reçinenin homojen sertleşememesi ise matris malzemenin bazı bölgelerinin daha tok davranmasına ve çatlak hızının yavaşlatılması hatta durdurulmasına sebep olabilir (Şahin 2004).

# 4. DÜŞÜK HIZLI DARBE ve HASAR ANALİZİ

## 4.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği

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 (indentation) meydana getirir.

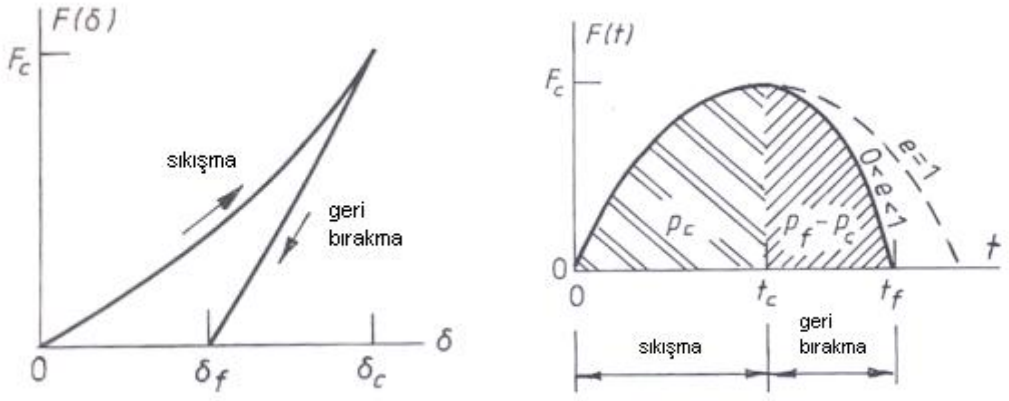
Darbe sırasında her bir anda, ara yüzey veya temas basıncı çarpışan iki cisimde zıt doğrultularda etki eden bir etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptir, böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin süratini azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş her iki cismin süratinin sıfır olmasını sağlar ve neticede sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cismi 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 sertliliğine 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 yakınlarındaki küçük bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlarda temas alanının yakınlarında plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar (birim şekil değiştirmeler) vardır. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşturma (cratering) ve dalma (penetration) şeklinde büyük belirginlikte olup kolaylıkla gözlenebilir. Her bir durumda deformasyonlar, çarpışan cisimlerde hız değişimine neden olan temas kuvvetlerinin bir parçasıdır. Büyük plastik deformasyonlara neden olacak çarpma hızı $102\times V_y$ ile $103\times V_y$ arasındadır. Buradaki $Vy$ yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli en düşük izafi hız olup metaller için akmadaki normal çarpma hızı 0,1 m/s mertebesindedir (Stronge 2000).

### 4.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları

Çarpışan cisimlerin ilk temasından sonra şekil değiştirebilen parçacık sıkıştırıldıkça temas kuvveti $F(t)$ yükselir. Şekil değiştirebilen parçacığın batması veya

sıkışması $\delta$ olsun. Çarpışan cisimlerin kompliyansı hakkında ayrıntılı bilgiye girmeden, $\delta$ yı doğrudan elde etmenin bir yolu bulunmamaktadır. Eğer kompliyans hıza bağımlı ise en büyük batma ve en büyük kuvvet izafi hızın normal bileşeninin sıfır olduğu anda meydana gelir. Şekil 4.1a normal temas kuvvetini batma $\delta$'nın bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 4.1b bu kuvveti zamanın bir fonksiyonu olarak gösterirken sonraki grafik temas süresinin yaklaşımın başlangıç aşaması veya sıkışma aşaması ile takip eden geri bırakma aşamasına ayrılmasını göstermektedir. Sıkışma sırasında, kinetik enerji temas kuvvetleri yardımıyla deformasyon iç enerjisine dönüştürülür. Eşit ve zıt yöndeki temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacığın iç deformasyon enerjisini artıran bir iş yaparken, temas kuvveti çarpışan cisimlerin başlangıçtaki normal izafi hızlarını düşüren bir iş yapar. Temas noktasının normal izafi hızı sıfır olduğunda sıkışma aşaması sona erer ve geri bırakma başlar. Takip eden geri bırakma aşaması sırasında, iç enerjisinin elastik kısmı bırakılır. Sıkışma sırasında biriktirilen elastik zorlanma enerjisi geri bırakma sırasında cisimleri birbirinden ayırmaya zorlayan bir kuvvet doğurur. Bu kuvvet tarafından yapılan iş, kinetik enerjinin bir kısmını yerine koyar.




**(a)** **(b)**

**Şekil 4.1** (a) izafi yer değiştirme $\delta$ nın (b) zaman $t$ nin bir fonksiyonu olarak normal temas kuvveti $F$ (Stronge 2000)

Geri bırakma sırasında şekil değiştiren bölgenin kompliyansı, sıkışma sırasındakinden daha küçüktür, bu nedenle temas son bulduğunda şekil değiştirebilen parçacığın bir kalıcı sıkışması $\delta_f$ bulunur.

Çarpmadan sonra herhangi bir $t$ zamanında temas kuvveti $F$ nin normal bileşeninin Şekil 4.1b deki eğrinin altında kalan alana eşit olan bir impulsu vardır Kuvvetin impulsu, impuls kuvveti olarak ta anılır (Stronge 2000).

### 4.1.2. Normal temas kuvvetinin işi

Normal temas kuvvetinin sıkışma ve geri bırakma aşamalarında yaptığı iş, sıkışma esnasında uygulanan impuls $p_c$ ile ayrılmadaki son impuls $p_f$ arasında bir bağıntı verir. Sıkışma süresince normal temas kuvveti şekil değiştirebilen parçacık üzerinde bir iş yapar (gerçekte, temasın başlangıç noktası civarındaki şekil değiştiren küçük bölgede). 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 (Stronge, 2000).

Kuvvetin impuls'un türevi d$p$= $F$d$t$ ile bağıntılı olduğu hatırlanarak $F$ kuvvetinin normal bileşeninin sıkışabilir parça üzerinde yaptığı iş $W_d$ hesaplanabilir:

$$W_d = \int_0^t Fvdt' = \int_0^p vdp' \tag{4.1}$$

## 4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Darbe, bir malzeme veya yapı üzerine düşük, orta ve yüksek hızlarda çok kısa bir süre içerisinde uygulanan anlık dış kuvvet olarak tanımlanır. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Genel olarak, darbeler düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi, hedefin ve çarpan cismin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütlesine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır (Mili ve Necip 2001). Düşük hızlı darbeye en basit örnek olarak kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı

darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme içyapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazen düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da adlandırılır. Düşük hızlı darbede, malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı çok büyük bir öneme sahiptir (Ceyhun ve Turan 2003).

Yüksek hızlı darbeler ise balistik limitte olan darbelerdir ve deneysel olarak darbe hızı yaklaşık 74,1 m/s'ye kadar olan hız olarak belirlenmiştir (Jenq ve Mo 1996). Yüksek hızlı darbe için de, bir uçağın havalanması veya havaalanına inmesi esnasında, uçak gövdesine bir taş parçasının çarpmasını örnek verebiliriz. Böyle bir darbede de küçük bir ağırlığa sahip parçanın yüksek hızla çarpması durumu söz konusudur. Böyle yüksek hızlı bir darbe söz konusu olduğunda, eğer parça yüksek bir hıza sahip ise kompozit malzemeye saplanabilir veya delip geçebilir.

Darbeye karşı olan cevap 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 darbe gören yüzeyde olabileceği gibi darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Bu nedenle kompozit malzeme veya yapı üzerine gelebilecek düşük veya yüksek hızlı darbelerin, malzeme veya yapıda meydana getirebileceği hasarı önceden tahmin etmek, simülasyonunu yapmak ve bunlara ait dinamik özelliklerin (enerji absorbe etme kabiliyeti, kırılma tokluğu, hasar mekanizmaları, mukavemet düşüşü ve çentik hassasiyeti) belirlenmesi gerekmektedir.

### 4.3. Darbe Testleri

Kompozit malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan alınan

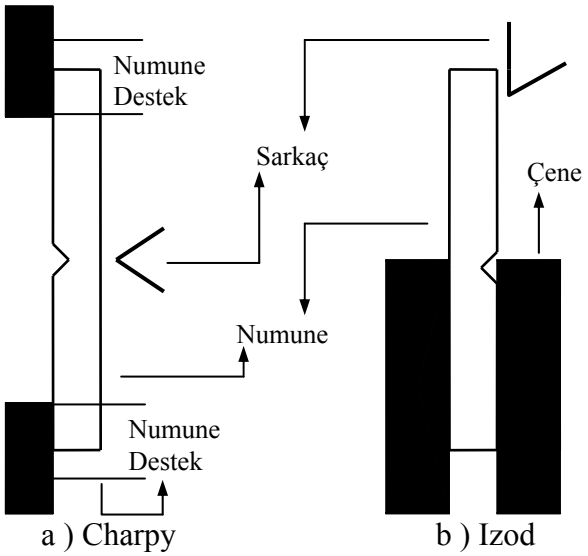
sonuçların karşılaştırılacağı zaman, kompozit malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen kompozit malzemelerin darbe davranışlarının belirlenmesi amacıyla günümüzde bazı test yöntemi ve cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar:

- Sarkaç testleri (Izod, Charpy ve Pendulum)
- Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu
- Ağırlık düşürme testleri
- Yüksek hızlı darbe testleri (Basınçlı hava ve Split-Hopkinson)

olarak sıralanabilir.

### 4.3.1. Sarkaç testleri

Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından soğurulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, soğrulan darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur (Şekil 4.2). Bu test yöntemleri ile elde edilmiş bazı sonuçlar Çizelge 4.1'de görülmektedir (Ceyhun ve Turan 2003).

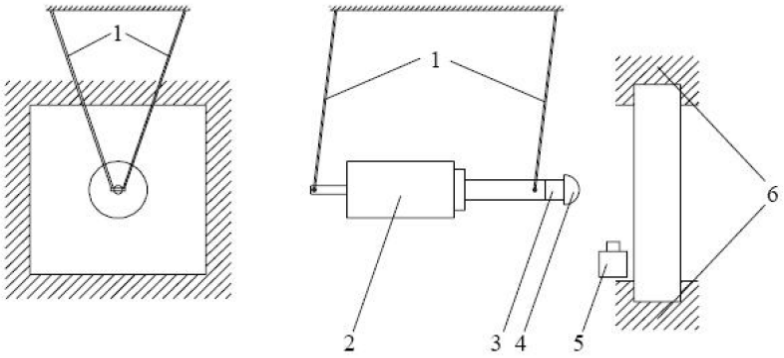



**Şekil 4.2** Charpy ve Izod darbe test düzenekleri (Ceyhun ve Turan 2003)

**Çizelge 4.1** Farklı malzemelerin standart V-Çentik Charpy ve Izod darbe enerjileri (Ceyhun ve Turan 2003)

| Malzeme | Darbe Enerjisi (kj/m$^2$) | |
|---|---|---|
| | Charpy | Izod |
| S–Cam/Epoksi(%55 elyaf) | 734 | - |
| B / Epoksi (%55 elyaf) | 109–190 | - |
| Kevlar/Epoksi (%60 elyaf) | 317 | 158 |
| AS Karbon/Epoksi (%60 elyaf) | 101–132 | 33–67 |
| HMS Karbon/Epoksi (%60 elyaf) | 23 | 7,5 |
| 4340 Çelik (Rc=43–46) | 214 | - |
| 7075–T6 Alüminyum Alaşımı | 153 | - |
| 6061–t6 Alüminyum Alaşımı | 67 | - |

Sarkaç darbe test sistemi ağırlık düşürmeli darbe test sistemine göre bazı avantajları olan bir test sistemidir. Bu sistem aynı tip ağırlık için küçük darbe enerjilerinin verilerinin alınmasında güvenilir olduğu gibi darbe hızı ve geri sekme hızının ölçülmesinde de bir avantaja sahiptir. Böylece, hareket denkleminin integrasyonu için kontrol sağlanır ve absorbe edilen enerji doğru bir şekilde ölçülebilir. Sarkaç darbe test sisteminin şematik olarak resmi Şekil 4.3'te görüldüğü gibidir.

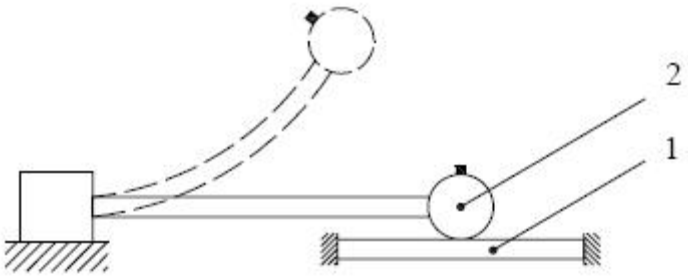



**Şekil 4.3** Sarkaç darbe test sisteminin şematik resmi (Aktaş 2007)

Sarkaç darbe test sistemini oluşturan parçaların isimleri şöyledir; 1) sarkacın asıldığı dört tane aramid ip, 2) düzlemsel bir ağırlık, 3) ağırlık ve kütle arasındaki kuvveti ölçmek üzere sarkacın ucuna yerleştirilmiş bir yük hücresi, 4) yük hücresinin ucuna yerleştirilmiş küresel ve sertleştirilmiş çelik bir uç, 5) darbe öncesi ve darbe sonrası hızı ölçmek için numune önüne yerleştirilmiş bir hız sensörü ve 6) numuneyi sabit tutmak için kullanılan rijit bir sabitleyici (Aktaş 2007 ve Herup 1996).

### 4.3.2. Ankastre edilmiş kiriş darbe testi

Şekil 4.4'te ankastre edilmiş kiriş darbe test sisteminin şematik resmi görülmektedir. Ankastre edilmiş kiriş darbe testi yaygın olarak kullanılmayan düşük hızlı bir darbe test sistemidir. Bu darbe sisteminde 1 inç çapındaki çelik bir küre esnek bir kirişin ucuna monte edilmiştir ve bu top çekilip bırakıldığında numune üzerine çarpar ve darbenin meydana gelmesini sağlar (Aktaş 2007).

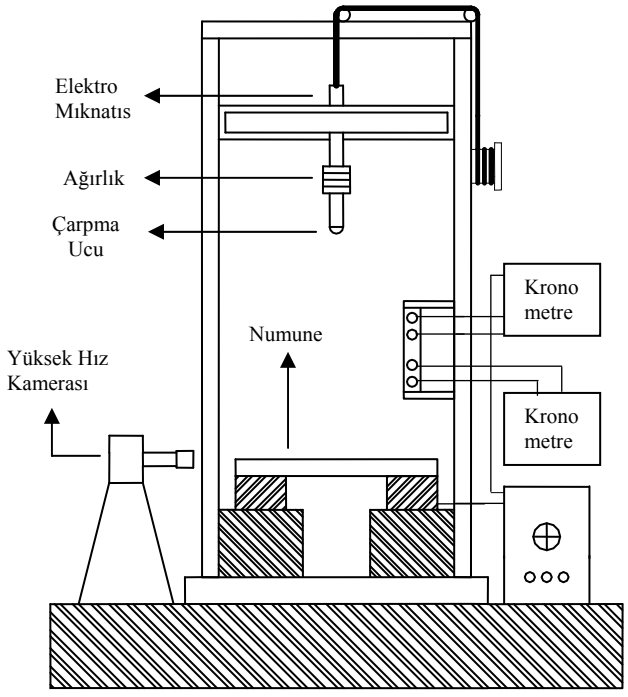



**Şekil 4.4** Ankastre edilmiş kiriş darbe test sisteminin şematik resmi, 1) numune ve 2) vurucu (Aktaş 2007)

### 4.3.3. Ağırlık düşürme darbe testi

Ağırlık düşürmeli darbe test metodu Izod ve Charpy test metotları yerine malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir metottur. Izod ve Charpy test metotlarında darbenin limiti belli iken, Ağırlık düşürmeli darbe test metodunda numuneye çarpma hızı ve darbe enerjisi istenilen şekilde ayarlanabilir ve istenilen ağırlığın istenilen yükseklikten numune üzerine düşürülmesi sağlanabilir. Ayrıca bu metot ile numuneye saplanma, delinme ve tekrarlı darbe testleri de yapılabilmektedir.

Ağırlık düşürme test cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve soğurulan enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil 4.5'te görüldüğü gibidir. Böyle bir cihazı meydana getiren donanım: platformlarla desteklenen numune, tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme cihazları (yük hücresi), çarpışmadan hemen önceki tüp hızını ölçmeye yarayan fotoelektrik hücreler ve darbe olayını görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasıdır (Ceyhun ve Turan 2003).




**Şekil 4.5** Ağırlık düşürme test düzeneği (Ceyhun ve Turan 2003)

Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah v.b), çarpan cismin karakteristiği (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu v.b), çarpan cismin hızı ve kütlesi (veya enerjisi), numunenin yapılandırması (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi v.b) etkilemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbe özellikleri söz konusu olduğu zaman tüm bu kıstasların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir Ceyhun ve Turan 2003).

### 4.3.4. Yüksek hızlı darbe testi

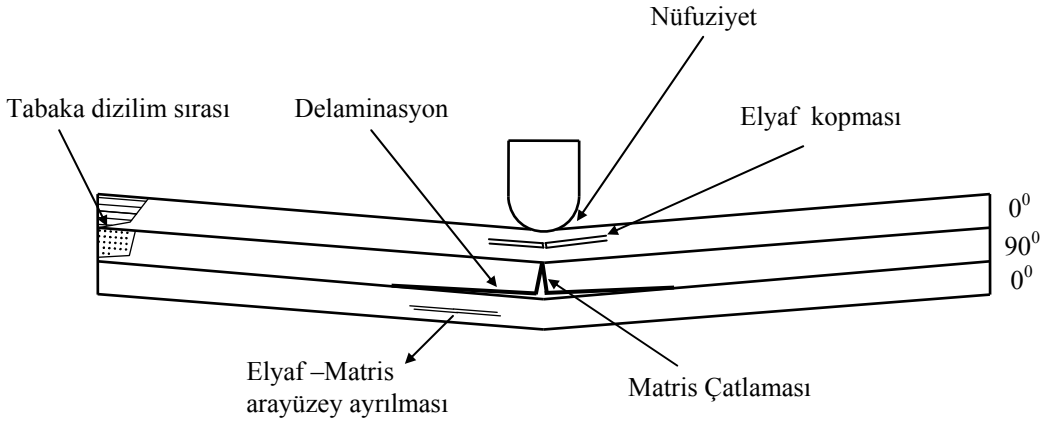
Yüksek hızlı darbe test metotlarında düşük ağırlıklı ancak yüksek hızlı parçaların malzeme veya yapılar üzerine olan darbeleri simüle edilir. Bu darbe test metotları basınçlı hava ile darbe test metodu ve Split-Hopkinson basınçlı çubuk test metodudur. Basınçlı hava ile darbe testi, kütlesi 250 gramdan küçük ve hızı 100 m/s'den büyük vurucular için uygun bir metottur. Split-Hopkinson basınçlı çubuk testi ise malzemelerdeki yüksek şekil değiştirme-hızı etkisini araştırmak ve malzemelerin çeşitli modlardaki dinamik davranışlarının incelenmesi için yaygın olarak kullanılan bir metottur (Abrate 1998).

## 4.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Kompozit malzemelerin en hassas oldukları yükleme durumu eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise enine yükleme (tabaka veya elyafa dik yükleme) durumudur. Tabakalı kompozit malzemede en büyük darbe hasarı da enine doğrultuda meydana gelir. Çünkü kompozit malzemeler kalınlık doğrultusunda tabaka düzleminde olduğundan daha zayıftırlar. Enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşüşlere 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 kütlesine 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, elyaf kopması şeklinde hasarlara sebep olabilirler. Bu da mukavemette önemli derecede bir düşüşe sebep olur. Rijitlikte azalma da mümkündür fakat genellikle ihmal edilebilir seviyededir. 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 sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir (Ceyhun ve Turan 2003).

Genel olarak bir kompozitin darbeye maruz kalmasıyla meydana gelen darbe hasarı matris çatlağı, delaminasyonlar ve elyaf hasarlarını içerir. Düşük hızlı darbede, matris çatlağı ile başlayan hasar, farklı elyaf yönlendirme açılarına sahip tabakalar arasında delaminasyonların (tabakalar arası ayrılma) meydana gelmesine sebep olur. Kompozite uygulanan darbe enerjisinin artmaya devam etmesiyle delaminasyonlar ve en sonunda elyaf hasarları meydana gelerek, vurucunun numuneye saplanması ve en sonunda da numunenin vurucu tarafından delinmesi meydana gelir. Şekil 4.6'da, çeşitli hasar kademelerine ait şematik bir resim görülmektedir.

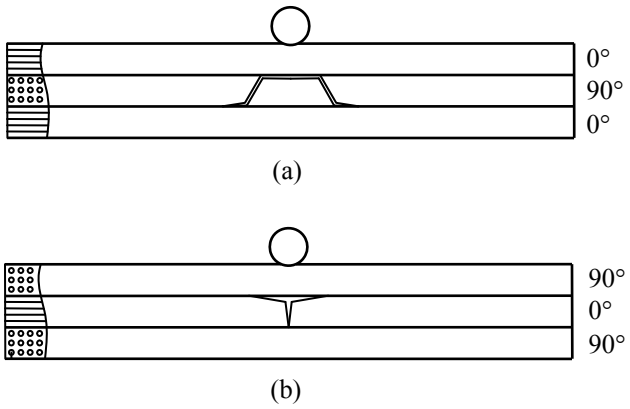



**Şekil 4.6** Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006)

Malzemede oluşan hasarların 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.

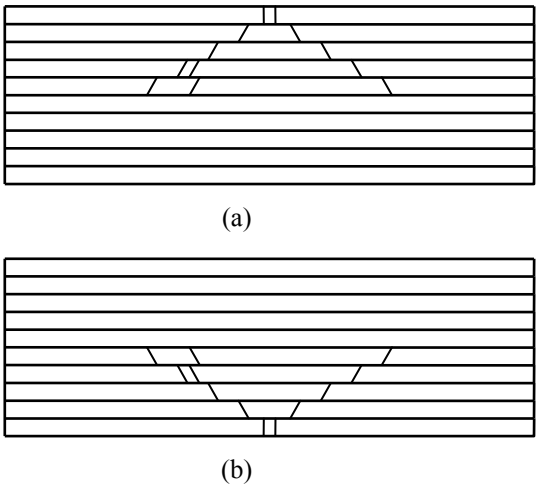
### 4.4.1. Matris hasarı

Matris hasarı, düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemede görülen ilk hasardır ve matris çatlaması şeklinde meydana gelir. Matris çatlamaları, tek yönlü elyaflardan oluşmuş tabakalarda genellikle elyaf 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 4.7). 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.




**Şekil 4.7** Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı (Abrate 1998)

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 4.8a). 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 4.8b) (Abrate 1998).




**Şekil 4.8** (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri (Abrate 1998)

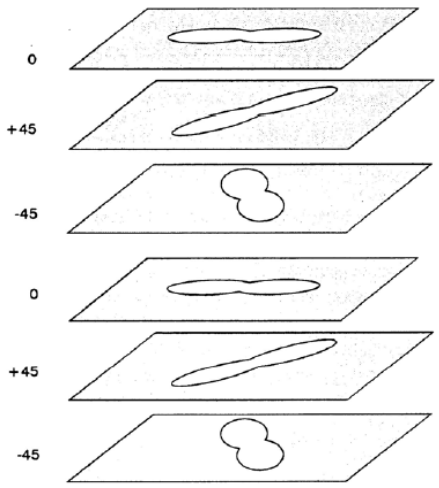
Bir kompozitin darbesinde hasara neden olan ilk kinetik enerji, çok kuvvetli bir biçimde matrisin mekanik özelliklerinden etkilenmektedir, fakat temel olarak elyafın özelliklerinden bağımsızdır (örneğin tabakalandırmadan ve örgü veya örgüsüz elyaf kullanılmasından). Griffin (1987), beş farklı elyaf için aynı matris malzemesi kullanarak beş kompozit için darbe deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda bu beş kompozit için hasar başlangıç enerjisinin aynı olduğunu ve hasarın matris-ağırlıklı olduğunu bildirmiştir. Ayrıca dizilim sırası ve elyaf takviyesi özelliklerinin hasar başlangıcı için gerekli olan enerji üzerine olan etkisi ölçülemez. Hasar matris çatlağı ile başlar ve matris çatlağı farklı elyaf açılı tabaka ara yüzeylerine ulaştığında da delaminasyon başlar.

Genel olarak polimer esaslı kompozitler üzerine yapılan çalışmalar göstermiştir ki, darbeye maruz kompozitin darbe performansı reçine sisteminin tokluk özelliğinin geliştirilmesine bağlıdır. Bu mekanik özellik, malzemenin şekil değiştirme enerjisi, kayma çatlaklarına karşı gösterdiği direnç ve gerilme yoğunluğu etkisini azaltma kabiliyetine ait bir ölçüyü temsil etmektedir. Yapılan deneylere göre, termoplastik matris kompozitlerin daha yüksek tokluk sergiledikleri belirtilmiştir (Dorey vd 1985). Genel olarak termoplastik kompozitler daha az matris çatlağı meydana getirirler ve bu kompozitlerde hasar daha az yayılma eğilimi göstermektedir. Bunun yanı sıra, kırılmada daha yüksek şekil değiştirmeye sahip bu reçineler yüksek darbe yüklerine de karşı direnç gösterirler. Ayrıca, yüksek darbe yüklerine karşı tokluğa sahip bu reçine sistemleri, daha az delaminasyon meydana gelmesine sebep olduklarından, yüksek bir darbe sonrası bası mukavemetine de sahiptirler (Sierakowski ve Chaturvedi 1997).

### 4.4.2. Delaminasyon

Delaminasyonlar, bitişik tabakalar arasında yapışmanın azalmasıyla meydana gelen ve tabakanın mukavemetini önemli derecede düşüren hasarlardır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir. Eğer iki bitişik tabaka aynı elyaf yönlendirme açısına sahip ise bu iki tabaka ara yüzeyinde delaminasyon meydana gelmemektedir. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı elyaf yönlenmelerinden 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 elyaf doğrultusu boyunca tabakanın iç bükey eğilmeye eğilimli olduğunu göstermektedir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyuşmazlık ne kadar büyük olursa ki 0°/90° 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.

Numune üst yüzeyinden darbeye maruz bir tabaka için, farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabaka ara yüzeylerinde ve alt tabaka ara yüzeylerinde elyaf açılarına göre meydana gelen delaminasyonlu alanlar dikdörtgen veya yerfıstığı şeklindedir. Buna ait şematik resim Şekil 4.9'da görülmektedir.




**Şekil 4.9** Delaminasyon alanlarının elyaf yönlendirme açılarına göre şekilleri (Abrate 1998)

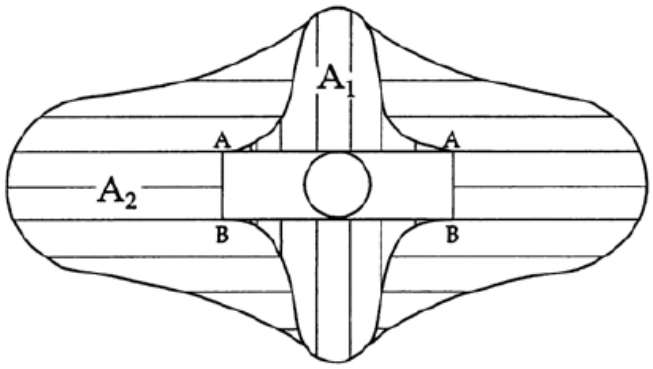
Delaminasyon başlangıcına neden olan başlangıç kinetik enerjisinin sınır değerini tespit etmek çok zor olduğundan birkaç testin yapılmasına ihtiyaç vardır. Şunu da belirtmek gerekir ki, meydana gelebilecek delaminasyon şekilleri oldukça düzensizdir ve bunların yönlenmelerini tespit etmek oldukça zordur. 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°/90°/0° 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. Oluşan çatlakların ara yüzeye ulaşınca durdurulması; elyaf yönlenmelerindeki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine çatlama tarafından zorlanır düşey eğilme çatlağı büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matris çatlamaları, kritik matris çatlamalarıdır. Delaminasyon, matris çatlamalarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı Mod I ayrılma olarak başlamaktadır.

Delaminasyon boyutu genellikle C-scan ultrasonik tarama cihazından ölçülen hasarlı alan olarak belirlenir. Genel olarak, kompozit içinde hasar, birkaç ara yüzeyde ortaya çıkmaktadır ve C-scan cihazları bu hasarlı alanların tek bir düzleme yansımasını sağlamaktadırlar. Tek bir düzleme yansıyan bu alan kompozitin tabaka sayısından etkilenmektedir. Bundan dolayı da her bir tabaka için alanın deneysel sonuçları, başlangıç kinetik enerjisine karşı farklı çizgiler üzerine düşmektedir (Abrate 1998).

Çeşitli kalınlıklarda ve aynı tabaka dizilim açısına sahip karbon-elyaf takviyeli kompozitlere yapılan darbe neticesinde meydana gelen delaminasyon alanının değişimi, vurucunun sahip olduğu kinetik enerji ile doğru orantılıdır (Cantwell 1988). Meydana gelen bu delaminasyon alanının, kinetik enerjinin bir fonksiyonu olduğu ve hedef kalınlığının artmasıyla da nonlineer olarak değiştiği bulunmuştur.

Çapraz takviyeli tabakalı cam-epoksi kompozitler üzerine yapılan sistemli bir çalışma ise, sıralı bir delaminasyon işleminin meydana geldiğini ve bununda absorbe edilen enerjinin dağılmasında önemli bir rol üstlendiğini göstermiştir. Bu işlem Malvern ve ark. (1987) tarafından detaylı bir şekilde anlatılmıştır ve bu işlem, meydana gelen bir şerit tarafından başlatılan sıralı bir delaminasyon mekanizmasını temel almaktadır. Düşük bir darbe hızıyla vurucunun çapraz takviyeli tabakalı bir kompozit plakaya darbesiyle, ilk tabakada, tabaka kalınlığı boyunca vurucunun ucunun çapına denk bir

şekilde iki tane şerit meydana gelir. Meydana gelen bu ilk şerit Şekil 4.10'da AA ve BB harfleriyle gösterilmiştir.




**Şekil 4.10** Sıralı delaminasyon şeritlerinin şematik gösterimi (Malvern ve ark. 1987)

Bu şerit, altındaki ikinci tabakaya vurucunun numuneye saplanması veya numuneden geri sekmesi meydana gelene kadar bir baskı uygular. Bu işlem ardı ardına gelen tabakalar için de tekrarlanır veya delaminasyon çatlağının yayılması için gerekli olan enerjinin tükenmesine kadar tekrarlanır. Ara yüzeylerde meydana gelen çatlakların zamanlaması, ardı ardına gelen tabakalarda meydana gelen çatlak ile aynı zamanda oluşur. Bunun yanı sıra çapraz takviyeli tabakalı kompozitler için yapılan bu çalışmada, meydana gelen şeridin uzunluğu ve delaminasyonun büyüklüğü eşit bulunmuştur. Bu durum Şekil 4.10'da A1 alanı ile gösterilmiştir. Ayrıca sıralı delaminasyonda bu örneği takip etmektedir (Sierakowski ve Chaturvedi 1997).

Yapılan bu çalışmalara göre bazı önemli noktalar şöyle vurgulanabilir.

- Çeki ve bası artık mukavemetleri hasar büyüklüğünün artışı ile azalır ve bununla nonlineer olarak ilişkilidir.
- Delaminasyon hasarı büyüklüğü darbe enerjisinin artmasıyla artar ve vurucu hızının bir sınır değeri olan, numunenin delinmesine ulaşılana kadar artar. İki tip sınır değeri gözlemlenmektedir, bir tanesi darbe enerjisine göre bir tanesi de darbe hızına göredir. Bunlar görülebilir hasar için düşük bir sınır değer ve maksimum hasar bölgesi boyutu için bir üst sınır değeri temsil ederler.
- Hasarın belirlenmesindeki gerçek ilişki, malzeme sayısına ve geometrik parametrelere bağlı olabilir. Bunlarda, elyaf, matris ve elyaf-matris arasındaki mukavemet, çatlak hassasiyeti, kırılma tokluğu, tabaka dizilim sırası, tabakalar

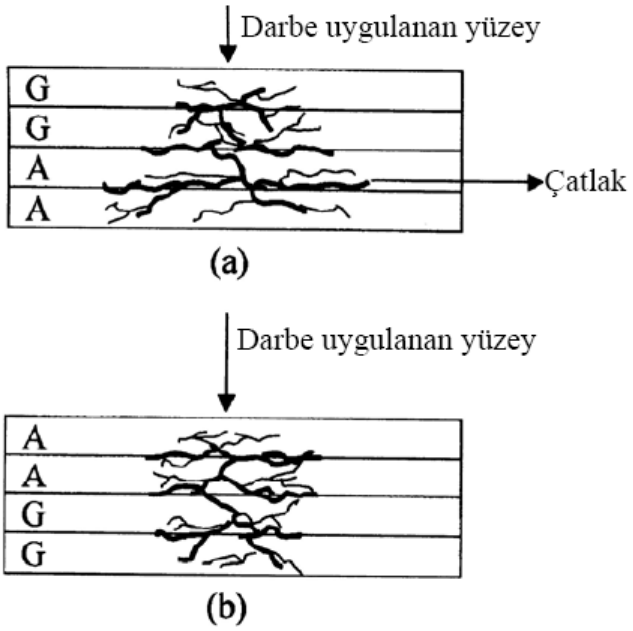
arası mukavemet, sınır şartları, malzemeye özgü sönümleme ve diğer faktörler olarak sıralanabilir.

### 4.4.3. Elyaf hasarı

Kompozit malzemede elyaf kopması, genellikle matris çatlaması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf hasarı, çarpan cismin batması nedeniyle darbe yüzeyinde oluşacağı gibi yüksek eğilme gerilmeleri nedeniyle darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. Yapılan araştırmalar elyaf tipinin matris çatlağı ve delaminasyonların başlamasına bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Fakat yüksek darbe enerjisi seviyelerinde elyafın özellikleri ve elyaf dizilim sırası önemli olmaktadır.

Kompozitin üretiminde kullanılan elyaf, hasar kontrolünde ve hasar toleransının geliştirilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Bir örnek verecek olursak, eşit darbe enerjilerinde, kompozitin enerji soğurabilme kabiliyeti, daha az elyaf kırılması ve daha yüksek artık mukavemetle sonuçlanır. Bir kompozitin yapımında, kırılmada yüksek kırılma şekil değişimine sahip bir elyafın, tok bir reçine sisteminin veya örgü veya dikişli bir tabakanın kullanılarak tabakalar arasında uyumlu bir düzen sağlanırsa bu kompozitin darbe direnci geliştirilmiş olur.

Park ve Jang (2001a), aramid/cam kompozitler için, aramid elyafların darbe uygulanan yüzeyde veya darbe uygulanmayan yüzeyde bulunması durumlarına göre yaptıkları darbe deneylerinde elyafların bulunduğu yer ile ilgili olarak önemli tespitlerde bulunmuşlardır. Kalın kompozitlerde darbe hasarı, darbe yüzeyinde darbe noktasına yakın yerlerde lokal gerilmelerin meydana gelmesinden dolayı başlar. Bu durum, darbe yüzeyindeki tabakanın tam bir deformasyona maruz kalmadığını gösterir. Çünkü bu deformasyonu alttaki bitişik tabakalar sınırlamakta ve alt yüzeydeki tabakalar deformasyonun büyük bir kısmını karşılamaktadır. Kompozitin darbesinde darbe, darbe yüzeyinden alt yüzeye doğru yayılarak ilerler. Bundan dolayı aramid tabaka darbe uygulanmayan alt yüzeyde bulunduğunda, kompozit; aramid tabakaların deformasyonu boyunca meydana gelen darbe enerjisinin büyük bir kısmını absorbe eder (Şekil 4.11a). Eğer aramid tabakalar darbe uygulanan yüzeyde olursa ve hemen altında da gevrek yapıdaki cam tabakalar bulunursa, bu cam tabakalar aramid tabakalar arasında yayılma eğiliminde olan deformasyonu sınırlayıcı bir etki yapar ve deformasyonun yayılmasını engeller (Şekil 4.11b).




**Şekil 4.11** Darbe uygulanan yüzeye göre hasar yayılışı, (a) Cam yüzeyden, (b) Aramid yüzeyden (Park ve Jang 2001a)

Elyaf takviyeli kompozitlerden cam/epoksi, karbon(grafit)/epoksi ve aramid/epoksi kompozitlerin darbe davranışlarıyla ilgili olarak elde edilen bazı bilgiler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Sierakowski ve Chaturvedi 1997);

- Tüm kompozit numuneler için, darbeden dolayı mukavemet azalması rijitlik azalmasından daha büyüktür.
- Tüm kompozitler için artık mukavemet faktörleri; elyaf dizilim sırası, kompozit tipi ve darbe hızı'dır.
- Elyafların matristen ayrılması, elyafların kırılma şekil değiştirmesi ile ilgilidir. Bu ayrılma, elyaf-matris arasındaki yapışma mukavemeti için elyaf kırılma şekil değiştirmesine oldukça bağlıdır. Eğer bu üç kompozit için sıralanacak olursa; cam/epoksi > aramid/epoksi > karbon(grafit)/epoksi olarak sıralamak mümkündür.
- Cam/epoksi ve aramid/epoksi kompozitleri arasında, cam/epoksi kompozitin matris kırılma yoğunluğu aramid/epoksi kompozite göre daha büyüktür.
- Her üç kompozit için delinme dirençlerine bakılacak olursa; aramid/epoksi > karbon/epoksi > cam/epoksi şeklinde sıralanmaktadır.

- Eğer aramid/epoksi ve cam/epoksi kompozitler için darbe sonucunda meydana gelen delaminasyon boyutlarına bakacak olursak; aramid/epoksi kompozitin delaminasyon boyutu cam/epoksi kompozitinkine göre daha büyüktür.

### 4.4.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması

Elyaf ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması düşük hızlı darbeye maruz kompozit malzemelerde görülen hasarlardan biridir. Bu nedenle kompozit hasarının kontrol edilmesinde elyaf-matris ara yüzeyi, kompoziti meydana getiren elyaf ve matris bileşenleri kadar önemlidir. Elyaf matris ara yüzeyindeki ayrılma matristen elyafa yük aktarılmasını azaltır veya ortadan kaldırabilir. Elyaf matris ara yüzeyindeki ayrılma çekme gerilmelerinden dolayı çoğunlukla darbe görmeyen alt tabakalarda meydana gelir.

### 4.4.5. 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.

# 5. KOMPOZİT MALZEMELERİN TAMİRİ

## 5.1. Hasar Tahmini

Mühendislikte yaygın olarak kullanılan metal türü malzemelerin darbe davranışları elastik ve/veya plastik deformasyon olarak görülmektedir. Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde ise çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalan ve kalmayan bölgede genellikle gözle görülebilen, gözle görülemeyen ve/veya çok zor görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Fiber takviyeli kompozitler için deneysel tekniklerin gelişmesine paralel olarak, hasar değerlendirmelerinde kullanılan başlıca teknikler tahribatlı ve tahribatsız muayene teknikleri olarak ikiye ayrılır. Örneğin karbon ve/veya aramid'den imal edilmiş olan bir kompozitin darbeye maruz kalması sonucunda, bu kompozitlerin iç tabakalarında ne gibi hasar mekanizmalarının meydana geldiğini çıplak gözle görmek mümkün değildir. Ama bu tekniklerin kullanılmasıyla hangi tabakalarda hasarın meydana geldiğini ve hasarın boyutunu belirlemek mümkün olabilir. Buna göre bu teknikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Reid ve Zhou 2000);

Tahribatlı teknikler:

- Kompozit tabakaları ayırma metodu
- Kesit fragtografisi

Tahribatsız teknikler:

Bu teknikler optik mikroskopiyi temel alan, hasarın genişliğini ve bulunduğu yeri inceleyen tekniklerdir.

- X-ışınları ile
- Ultrasonik olarak
- Akustik emisyon ile
- Lazer optik ile
- Termal cihazlar ile vb.

Kompozit malzemede bir hasarın meydana gelmesi ve yapının kalıcı özelliklerine etki etmesi durumunda hasarlı kompozit eleman ya onarılmalıdır ya da yenisi ile değiştirilmelidir. Hasarın onarılamadığı durumlar da mevcuttur. Örneğin, yüksek derecede gerilmeli elemanlar onarımdan sonra yeterli dayanıma sahip olamazlar. Hasar alanının büyüklüğüne göre üç onarım tipi mevcuttur (Abrate 1998).

1. Maksimum yük altında elemanın yük taşıma kabiliyetini azaltan büyük hasarlar hemen onarılmalıdır.
2. Parçanın maksimum yüke dayanabildiği küçük hasarlar belirlenmiş periyot içinde onarılmalıdır.
3. İhmal edilebilir derecedeki çok küçük hasarlar ise kozmetik iyileştirmeye ihtiyaç duyarlar.

Kompozit onarımlar korozyondan dolayı zayıflamış boruların takviyesi ve onarımı için 20 yıldır boru hattı endüstrisinde kullanılmaktadır. ASME B31.4 ve B31.8 gibi uluslararası onarım standartları, boru hattı onarımlarında kompozitlerin kullanılabileceğini onaylamıştır (Patrick 2004).

## 5.2. Tamir Seçenekleri

Bir kompozit yapı kullanımda iken hasara uğrarsa, hasarın durumuna göre üç tamir yönteminden biri uygulanarak onarılmalıdır.

### 5.2.1. Kozmetik (Yüzeysel) tamir

Malzemede oluşan hasarın bileşenlerin yapısal bütünlüğünü etkilemediği muayene sonucu tespit edilirse yüzeysel tamir yöntemi uygulanır. Yüzeysel tamir yüzeyi korumak ve dekore etmek için yapılır. Bu yöntemde takviye edici malzeme kullanımı olmadan da işlem yapılabilir. Bu yöntemde hasar ilerlemesinin olmayacağı dikkate alınmalıdır. Tamir işleminde hasarlı yapı ile takviye yama malzemesi arasında yapıştırmalı birleştirmeler kullanılabilir. Yapıştırmalı birleştirmelerin temel avantajı yeni bir gerilme konsantrasyonu ile karşı karşıya olmamalarıdır.

### 5.2.2. Geçici tamir

Bileşenlerin mekanik özelliklerini veya bütünlüğünü kendi başlarına tehdit etmeyen küçük hasar alanları, kullanım esnasında çok görülen bir durumdur. Bununla beraber hasar alanları tamir edilmeden bırakılırsa nem girmesi yoluyla, ısı etkisiyle ya da yorulma ile hasarın hızla ilerlemesi söz konusu olabilir. Bunu engellemek için öncelikle geçici tamirler yapılabilir. Geçici tamirlerde basit yama tamirleri olabilir. Böylece uygun yapısal tamir işlemi gerçekleştirilinceye kadar bileşen korunmuş olur.

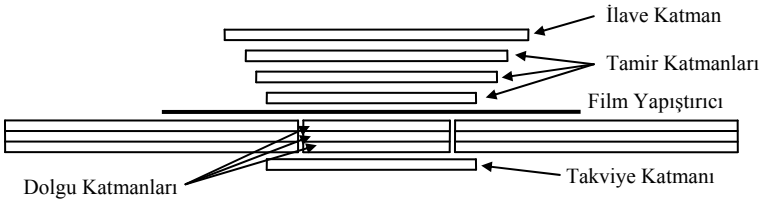
Geçici tamirde mekanik olarak birleştirilen ek yerleri orta-yüksek yük transferi uygulamalarında kullanılır. En önemli avantajları yüzey hazırlama işlemine duyarsız olmalarıdır. Geçici tamirata örnek olarak vidalanan alüminyum plaka veya perçinlenmiş karbon elyaf takviyeli yamalar gösterilebilir. Geçici tamirler düzenli muayeneye tâbi tutulmalıdırlar.

### 5.2.3. Yapısal tamir

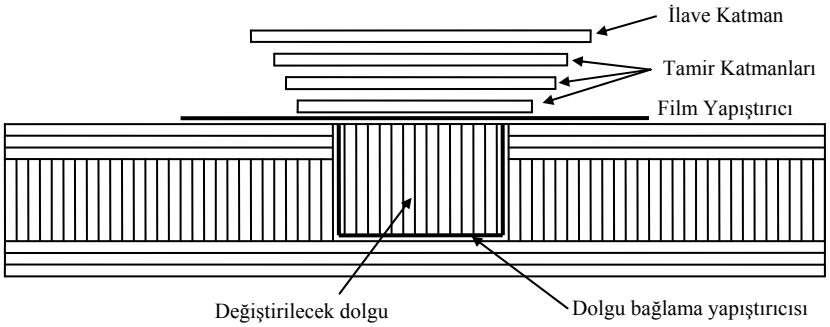
Eğer hasar yapıyı elyaf kırılması, tabaka ayrılması veya yapışkan ayrılması yoluyla zayıflatırsa hasarlı elyaf takviyesi ve sandviç yapılardaki özün değiştirilmesi gerekir. Böylece tamir yapılarak başlangıçtaki mekanik özelliklerin yerine konması sağlanabilir. Tamirdeki yapıştırma orijinal katmanlarda bir süreksizlik ve dolayısıyla bir gerilme arttırıcı oluşturduğu için yapısal tamir işlemleri, tamir alanında ilave katmanları gerektirir.

Yapısal tamirin başlıca amacı uygulanan yükleri tamamen desteklemek ve uygulanan gerilmeleri tamir alanı üzerinden iletmektir. Bunu yapabilmek için tamir malzemeleri orijinal tabakalı kompozitin katmanlarına yeterince yapışmalı ve üzerini kaplamalıdır. Yapısal tamir uygulamalarından yaygın olarak kullanılan yama tamiri uygulamasıdır.

Yama tamirinde, tamir yüzeyinin oluşturulabilmesi için hasarlı bölge delinerek boşaltılır. Boşaltılan kısımda, orijinal tabakalı kompozitin kalınlığı, dolgu katmanlarıyla oluşturulur ve tamir malzemeleri tabakalı kompozitin yüzeyine yapıştırılır. Eğer bileşen kullanımdaysa iyi bir tamir elde edebilmek için herhangi bir nem kalmayacak şekilde kurutulmalıdır. Şekil 5.1'de tabakalı kompozitler için Şekil 5.2'de ise sandviç paneller için yama tamiri uygulaması verilmiştir.




**Şekil 5.1** Tabakalı kompozitler için yama tamiri uygulaması




**Şekil 5.2** Sandviç paneller için yama tamiri uygulaması

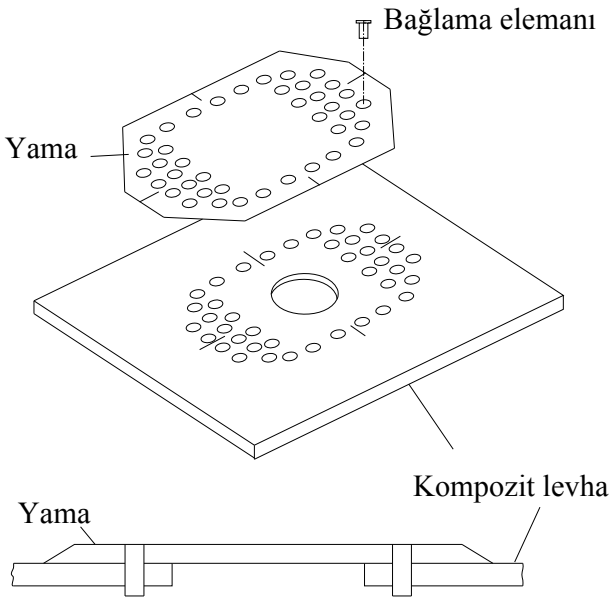
Tamirat, parçanın maksimum tasarım yüküne dayanması için eski dayanımını yeniden sağlamalıdır. Tamirat yaması delik boyunca yükü taşımalıdır ve hasarlı alanın eski dayanımını ve rijitliğini yeniden sağlamalıdır. Aynı zamanda alandaki yük dağılımını değiştirmemelidir.

Yapıştırmalı tamirat yönteminde yama kenarları, yama kenarlarında daha düşük soyulma gerilmesi, kayma gerilmesi ve daha geniş yük transfer bölgesi sağlamak için konikleştirilir. Birkaç katlı yamalarda yama kenarlarının konikleştirilmesine gerek duyulmaz (Abrate 1998).

Hosseini-Toudeshky ve Mohammadi (2007) merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum alaşımı panellerin tek taraflı onarımını boron/epoksi, grafit/epoksi ve cam/epoksi kompozit yamalar ile Rao ve ark. (1999) tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerini cam/epoksi kompozit yama ile Soutis ve ark. (1999) ise delikli karbon fiber/epoksi prepreg kompozitlerin iki taraflı onarımını karbon/epoksi prepreg yamalar ile yapıştırarak yapmıştır.

Hasarlı yapıya uygulanan yama tamiri yöntemlerinden bir diğeri mekanik bağlantılı tamir uygulamasıdır. Bu uygulama genellikle ince veya bal peteği yapılarından daha çok, kalın tabakalar için uygundur. Bu yöntem basit olup düşük

derecede işçilik ve ekipman ile gerçekleştirilebilir. Bu tamir şeklinde hasarlı elemana dairesel veya eliptik delik açılarak hasarlı bölge çıkarılır. Yama hazırlanır ve hasarlı elemanın bağlantı deliklerinin oluşturulması için model olarak kullanılır. Şekil 5.3'te mekanik bağlantılı yama ile tamir gösterilmiştir.




**Şekil 5.3** Mekanik bağlantılı yama ile tamir (Chicken ve ark.1997)

Bu yöntemde, yapıştırmalı tamir uygulamasında önemli olan kimyasallarla yüzey hazırlama işlemine gerek yoktur, yapıştırıcı ve kürleme gerektirmez. Bu yüzden yapıştırmalı tamir işleminde kritik olan nem ve sıcaklık problemleri görülmez. Yama malzemesi seçiminde termal genleşme katsayısı önemli bir etkendir. Çünkü yama ve hasarlı elemanın eşit olmayan genleşme veya büzülmesi kalıcı şekil değişimine sebep olur.

Mekanik bağlantılı tamir işleminde, hasarlı eleman üzerine bağlantı delikleri açılması parçanın ömrünü sınırlayabilir. Tabaka ayrılmasının ve fiber hasarının oluşumunu önlemek için, kompozit elemana delik açarken ve yama malzemesini imal ederken dikkatli olunmalıdır (Clarke 2002).

## 5.3. Tamir İşlemini Etkileyen Faktörler

### 5.3.1. Yama tasarımı

Yapısal birleşimlerle bir elemandan diğerine yük transferi gerçekleşir. Yapıştırıcılar kayma gerilmelerine karşı dirençli, soyulma ve çekme gerilmelerine karşı dirençli olmadıklarından birleşim tasarımı yapılırken yükün kayma etkisiyle aktarımına dikkat edilir. Birleşim kenarlarında eğilme etkili olduğunda soyulma gerilmeleri meydana gelir. Birleşen elemanlar elastik olduğunda ve birleşime etkiyen yükler aynı eksenli ya da paralel olmadığında, çekme ve kayma yükleri soyulma gerilmelerine dönüşür. Yapıştırıcı ile yapılan birleşimlerde dikkat edilecek faktörler aşağıda verilmiştir (Günaydın 2010);

- Birleşim tasarımı, birleşen elemanlar arasındaki yük aktarımı kayma veya basma biçiminde olacak şekilde yapılmalıdır.

- Sıcaklık direnci, kimyasal direnci, dayanım gibi ihtiyaçları karşılayan yapıştırıcı malzemesi seçilmelidir.

- Yapıştırma alanına kolaylıkla ulaşılabilmeli, ayrıca yüzey hazırlama ve yapıştırma işlemleri kolayca yapılabilmelidir.

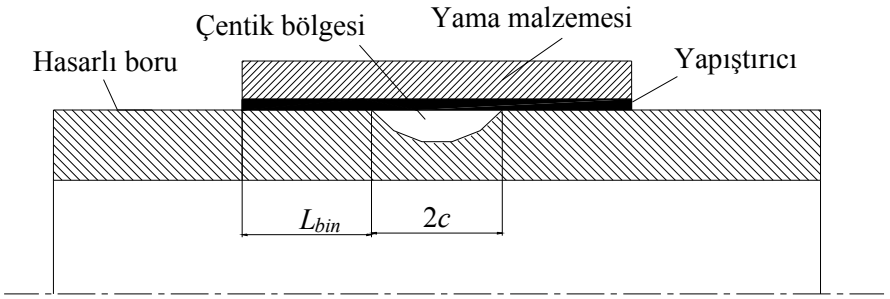
- Yapıştırma alanı büyük tutularak birleşimde meydana gelecek gerilme en aza indirilmelidir.

- Benzer olmayan elemanların birleştirilmesinde termal genleşme katsayısının farklılığından kaynaklanan kalıcı gerilmeler dikkate alınmalıdır.

- Birleşim dayanımının iyi olması için optimum yapıştırıcı kalınlığı uygulanmalıdır. Çok ince ya da çok kalın yapıştırıcı kullanmak birleşim dayanımının azalmasına sebep olur.

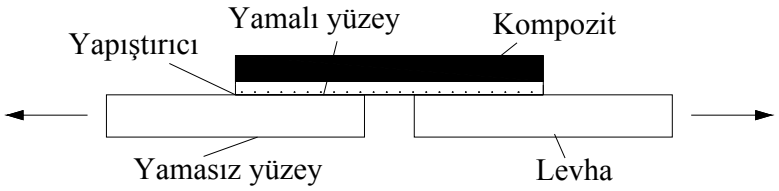
Yapıştırarak yapılan birleştirmede iki malzeme yapıştırıcı kullanılarak birleştirilir. En çok uygulanan birleşim tipi tek bindirmeli birleşimdir. Bu birleşimde yapıştırıcıdaki kayma gerilmeleri aracılığıyla, onarılan elemandan onaran elemana yük transferi gerçekleşir. Ancak, tek bindirmeli birleşimde yüklerin merkez dışı olmasından dolayı, eğilme etkili olur ve yapıştırıcı kalınlığı yönünde normal gerilmeler oluşur. Yapıştırıcının bindirme uçlarında meydana gelen normal ve kayma gerilmeleri birleşim dayanımının azalmasına sebep olur. Eğilme kuvveti ve normal kuvvetleri gidermek için çift bindirmeli birleşim uygulanır. Normal gerilmelerin mevcut olmamasından dolayı

çift bindirmeli birleşimin dayanımı tek bindirmeliden daha büyüktür. Yapıştırıcı seçimi ve özelliklerinin tespitinde tek bindirmeli birleşim testleri uygulanır (Mazumdar 2002). Şekil 5.4'te yama ile onarılmış bir borunun şematik resmi gösterilmiştir.

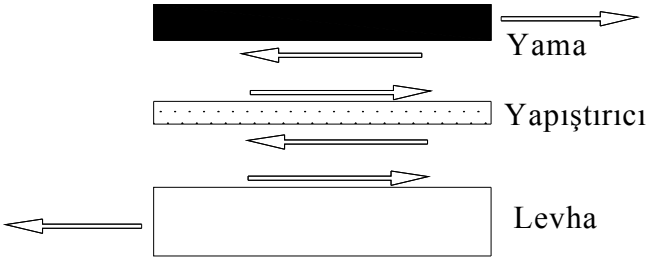



**Şekil 5.4** Yama ile onarılmış boru kesiti (Günaydın 2010)

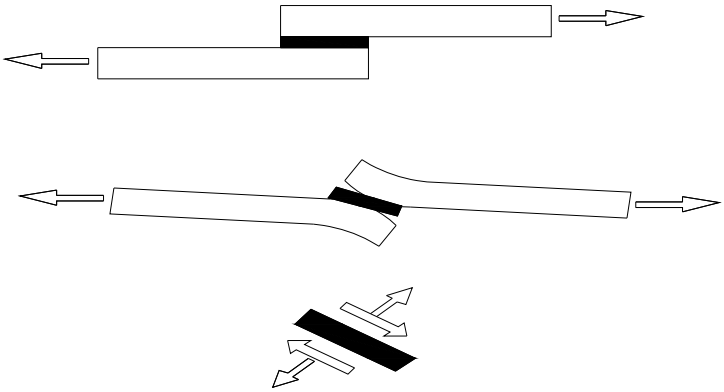
Şekil 5.5'te ise bindirmeli birleşim gösterilmiştir. Birleşimde levha ve yama çekme yükü etkisi altındadır. Levha ve yama arasındaki yapıştırıcı tabaka, kayma gerilmeleri aracılığıyla çekme yükünü levhadan yamaya aktarır. Şekil 5.6'da birleşimdeki yük transferi gösterilmiştir. Tek bindirmeli birleşimde tarafsız eksenin eksantirikliğinden dolayı levha ve yamada eğilme etkili olur. Şekil 5.7'de ise tarafsız eksen değişimi ile levha ve yamada meydana gelen eğilme gösterilmiştir (Schubbe 1997).



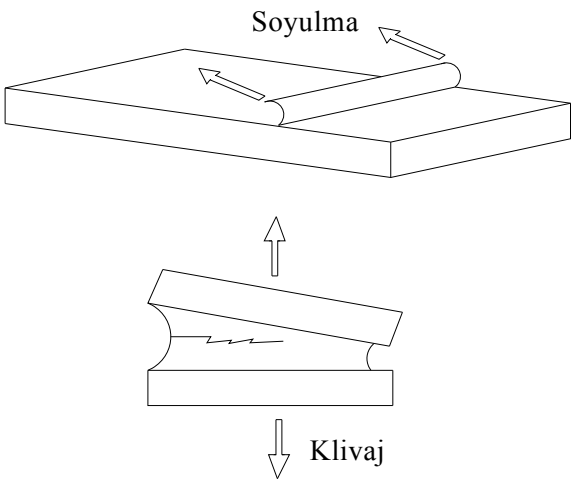

**Şekil 5.5** Bindirmeli birleşim (Schubbe 1997)




**Şekil 5.6** Levhadan yamaya yük transferi (Schubbe 1997)



**Şekil 5.7** Tarafsız eksen değişimi ile meydana gelen eğilme (Schubbe 1997)




**Şekil 5.8** Yapıştırıcının soyulma ve klivaj hasarı (Schubbe 1997)

Levha ve yamayı birleştiren yapıştırıcı tabakasında, yüzeye dik normal kuvvetler ile paralel kayma kuvvetleri meydana gelir. Bu kuvvetler ile yapıştırıcı hasarları meydana gelir. Yüzeye dik etkiyen kuvvetler Şekil 5.8'de gösterildiği gibi yapıştırıcının soyulma ve klivaj hasarına sebep olur (Schubbe 1997).

Yama kenarlarında meydana gelen bu hasar biçimlerinin en aza indirilmesinde çift taraflı onarım yapılması, yama kenarlarının konikleştirilmesi ya da bindirme uzunluğunun arttırılması etkili olur. Bu uygulamalar, yapıştırıcı hasarını ve yapıştırıcının levhadan ayrılma olasılığını azaltır (Schubbe 1997).

#### 5.3.1.1. Yama bindirme uzunluğu

Yama bindirme uzunluğu birleşim dayanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yama bindirme uzunluğunun kısa olması durumunda yapıştırıcı tabaka yüksek kayma gerilmesine maruz kalır. Onarımda yama uzunluğunun, yama kalınlığının 80-100 katı kadar olması tavsiye edilir (Composite … 2001).

Kısa bindirme uzunluklu yama kullanılması durumunda, yapıştırıcı tabaka plastik kayma gerilmesine maruz kalır. Bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmeleri daha geniş alana etki eder. Levha ile yama arasındaki yapışma yüzeyinin merkezinde kayma gerilmeleri minimumdur. Çünkü yapışma merkezinde levha ve yamanın deplasman uyumsuzluğu en aza inmiştir. Bu yüzden yapışma merkezinde elastik kayma gerilmesi, yama kenarlarında ise plastik kayma gerilmesi etkili olur. Yama bindirme uzunluğunun daha da artması ile plastik kayma gerilmeleri arasındaki elastik kayma bölgesi genişler (Roberts 1995).

#### 5.3.1.2. Yama kalınlığı

Yama tasarımında yama malzemesinin çekme rijitliği önemli bir faktördür. Onarılacak elemana yapıştırılan yama, elemandaki hasar ilerlemesini azaltmak için hasarlı elemandaki yükü taşır ve ayrıca hasar bölgesini kapatarak takviye sağlar. Yamanın nihai dayanımı da tasarımda önemlidir. Yama çekme veya kayma yükü altında çok kolay hasarlanmamalıdır (Roberts 1995).

Yama rijitliği, onarılacak elemanın rijitliğine eşit olduğunda onarım en etkili olur. Yama rijitliğinin onarılacak elemanın rijitliğine oranına rijitlik oranı denir ve bu oranın ideal değeri 1'dir. Onarımda daha rijit yamanın kullanılması birleşim dayanımının artması anlamına gelmez. Çünkü yamanın rijitliği ne kadar fazla olursa yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmeleri de o kadar etkili olur. Bununla birlikte yama kalınlığının artması, tarafsız eksenin değişmesine ve akabinde de birleşimde meydana gelecek eğilme momentlerine sebep olur. Bu yüzden rijitlik oranının 1,0-1,6 arasında

belirlenmesi tavsiye edilmiştir (Nagaswamy ve ark. 1995). İnce yama kullanarak yapılan onarımlarda ise çatlak üzerindeki yapıştırıcı tabakasında ve fiberlerde yüksek gerilme konsantrasyonu oluşur. Yama kalınlığının artması ile bu gerilmelerin azalması mümkün olur (Okafor ve ark. 2005).

Hosseini-Toudeshky ve Mohammadi (2007), merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum alaşımı panellerin tek taraflı onarımında kullandıkları boron/epoksi, grafit/epoksi ve cam/epoksi kompozit yamaların kalınlığını, panel kalınlığını aşmayacak ve rijitlik oranı 1,5'ten az olacak şekilde belirlemişlerdir. Lee (2004) ise ön çatlaklı alüminyum levhaların tek taraflı onarımında kullandıkları tek yönlü grafit/epoksi kompozit yama kalınlığını, rijitlik oranı 1,0 olacak şekilde tespit etmiştir.

### 5.3.2. Yüzey hazırlama

Yapıştırılarak yapılan birleşimlerde yapışma dayanımı büyük ölçüde yapıştırılan yüzeylerin kalitesine bağlıdır. Bu yüzden iyi bir yapıştırma için yüzey hazırlama işlemleri gereklidir. Yüzey hazırlama işlemleri yüzeydeki zayıf tabakaları yok etmek ve yüzeyin ıslanabilirliğini arttırmak için yapılır. Kompozit malzeme yüzeyleri, kalıp ayırıcı maddeler ve diğer katkı maddeleri ile etkileşim halinde olduğundan bu malzemelerin yüzey hazırlama işlemlerine ihtiyaçları vardır. Bu kirletici maddeler ya zımpara kâğıdı ile yüzeyi aşındırarak ya da kimyasallarla temizleyerek yüzeyden uzaklaştırılır (Mazumdar 2002).

Mekanik aşındırma işlemi kompozit malzemeler için kullanılmaktadır. Mekanik aşındırma ile metal ve kompozit malzemelerin yüzeyleri pürüzlü hale getirilir. Böylece malzemelerin yapışma yüzey alanları artar ayrıca yüzeyden kirletici maddeler ve partiküller uzaklaştırılır. Aşındırma işlemi için zımpara kâğıdı, tel fırça ve zımpara bezi kullanılır (Mazumdar 2002).

Kimyasal işlem de yapışma dayanımını etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu işlemde metalik ve metalik olmayan malzemelerin yüzeylerindeki kirletici maddeler çeşitli kimyasallar kullanılarak yok edilir (Mazumdar 2002).

Rao ve ark. (1999) tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerinin ve cam/epoksi kompozit yamaların, Soutis ve ark. (1999) ise iki taraflı onarım öncesi delikli karbon/epoksi prepreg kompozit numunelerinin yüzeylerini aseton ile temizlemiştir.

### 5.3.3. Yama malzemesinin seçimi

Yama malzemesinin seçiminde kullanım kolaylığı, mevcut olma, işlenebilirlik ve malzemenin performansı dikkate alınır (Schubbe 1997).

Yamanın rijitliği onarımı üç farklı şekilde etkiler. Birincisi, onarımda daha rijit yama malzemesi kullanarak yamanın daha fazla yük taşıması sağlanır. Bu şekilde çatlaklı eleman üzerindeki yük azalmış olur. İkincisi, daha rijit yama malzemesi ile onarılan elemanın çatlak açılma miktarı daha da azalır. Böylece çatlak ucundaki gerilmeler azalmış olur. Üçüncüsü ise daha rijit yama malzemesi kullanarak onarılacak eleman ile yama arasındaki ayrılma etkisi artar. Çünkü yama ne kadar rijit olursa yama ile onarılacak elemanın deplasmanları o derece farklı olur. Bu durum da eleman ile yama arasındaki yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmelerine sebep olur ve akabinde de ayrılmalar meydana gelir. Bunun için onarımda çok rijit yama malzemesi kullanılmamalıdır (Roberts 1995).

Hosseini-Toudeshky ve ark. (2005), merkezi çatlaklı 2024-T3 alüminyum panellerin tek taraflı onarımında, Rao ve ark. (1999) ise tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerin onarımında cam/epoksi kompozit yamalar kullanmıştır.

### 5.3.4. Yapıştırıcı seçimi

Tamir işleminin dayanım ve tokluğu yapıştırıcının kayma dayanımı ve modülü ile ilgilidir. Yüksek kayma modüllü yapıştırıcılar çatlaklı levhadaki gerilme şiddet faktörlerini azaltırlar. Düşük kayma modüllü yapıştırıcılar ise yapıştırıcı tabakasında daha fazla deformasyona sebep olurlar. Ayrıca levhadaki çatlak açılma miktarı ile birlikte gerilme ve çatlak ilerleme hızını da arttırırlar (Schubbe 1997).

Başarılı bir onarım iyi bir birleşim tasarımına, iyi yüzey hazırlamaya, uygun yapıştırıcı seçimine ve kürlemesine ihtiyaç duyar. Yapıştırıcı seçiminde yapıştırılacak malzemeleri tanımlamak, dayanıklılık ve diğer ihtiyaçları belirlemek gerekir (Mazumdar 2002).

Yapıştırıcı seçimi aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Yapıştırıcı çalışma sıcaklığında iyi dayanım ve tokluk özelliklerine sahip olmalı,
- Neme veya kimyasallara karşı dirençli olmalı,
- Yapışma, yüzey hazırlama etkenleri ile uyumlu olmalı,

- Mümkün olan en düşük kür sıcaklığına sahip olmalı (Schubbe 1997).

Çalışma sıcaklığı yapıştırıcı seçiminde dikkat edilecek özelliklerden biridir. Yüksek sıcaklıkta kürlenen yapıştırıcılar çok düşük sıcaklıklarda gevrek, düşük sıcaklıkta kürlenen yapıştırıcılar ise yüksek sıcaklıklarda plastik davranış sergilerler. Onarımın yerinde yapılması durumunda, yama ve onarılacak elemanın çalışma sıcaklığına yakın sıcaklıkta kür edilmesi gerekmektedir. Böylece yama ve onarılacak elemanda meydana gelebilecek termal kalıcı gerilmeler en aza indirilmiş ve çatlak ilerlemesine engel olunmuş olacaktır (Schubbe 1997).

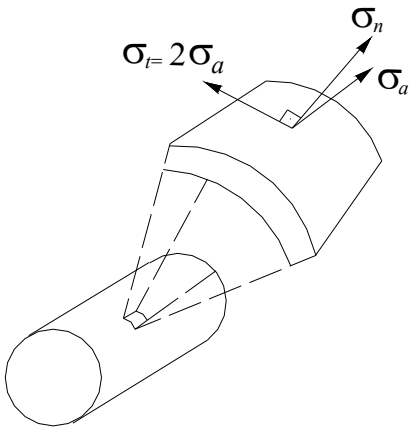
Yapıştırmalı birleşimlerde köpük, macun ve film şeklinde yapıştırıcılar kullanılır (Schubbe 1997). En çok kullanılan yapıştırıcılar epoksiler, akrilikler, üretanlar, silikonlar ve polyolefinlerdir (Mazumdar 2002).

Çok ince yapıştırıcı tabaka rijit ve gevrek davranırken, kalın yapıştırıcı tabaka gözenekli ve zayıf olur. Bu yüzden yapışma dayanımının iyi olması için yapıştırıcı kalınlığı 0,124 mm-0,249 mm arasında olmalıdır (Sun ve Klug 1996). Yapıştırıcı kalınlığı arttıkça yama rijitliği azalacağından, ince yapıştırıcılı birleşim kalın yapıştırıcılı birleşimden daha etkili olur. Bununla birlikte yama kalınlığının artması ile yama daha az şekil değişimi çekeceğinden yama daha dayanıklı olur (Okafor ve ark. 2005).

Rao ve ark. (1999) tek kenar çatlaklı alüminyum numunelerinin onarımında, Goertzen ve Kessler (2007) çelik boru onarımında, Soutis ve ark. (1999) ise delikli karbon/epoksi prepreg kompozit levhaların onarımında yapıştırıcı olarak epoksi kullanmışlardır.

## 5.4. CTP Kompozit Boruya Etkiyen Gerilmeler

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi ince cidarlı silindirik basınçlı kaplarda teğetsel yönde $\sigma_t$ ve eksenel yönde $\sigma_a$ gerilmesi olmak üzere 2/1 yükleme oranı mevcuttur. Basınçlı kabın yüzeyine dik yönde etki eden $\sigma_n$ gerilmesi ise basınçlı kabın dışarı doğru deformasyonuna sebep olur, bu gerilme uygulamada ihmal edilir. Basınçlı kabın kalınlığına göre yama daha ince olduğundan yamadaki normal gerilmeler minimum olur (Roberts 1995).




**Şekil 5.9** İki ucu kapalı basınçlı kaptaki gerilmeler (Roberts 1995)

Kompozit yamanın davranışı fiberlerin yönünün fonksiyonudur. Basınçlı kap uygulamasında kompozit yama çift eksenli yüklemeye mukavemet edebilmelidir. Yamadaki fiberler çatlak ilerlemesinin yavaşlaması için çatlağa dik yönde dizilmelidir. Yük fiberlere dik yönde uygulandığı zaman ise yama tasarımı, çatlak olmayacak şekilde yapılmalıdır (Roberts 1995).

Bir borunun patlama basıncı boru malzemesinin dayanımı ile ilgilidir. Boru yarıçapının cidar kalınlığına oranı 10'dan büyük olan borularda yani ince cidarlı borularda teğetsel gerilme Barlow'un denklemi ile belirlenir (Handbook for Armor Plate Pipe Wrap 1998).

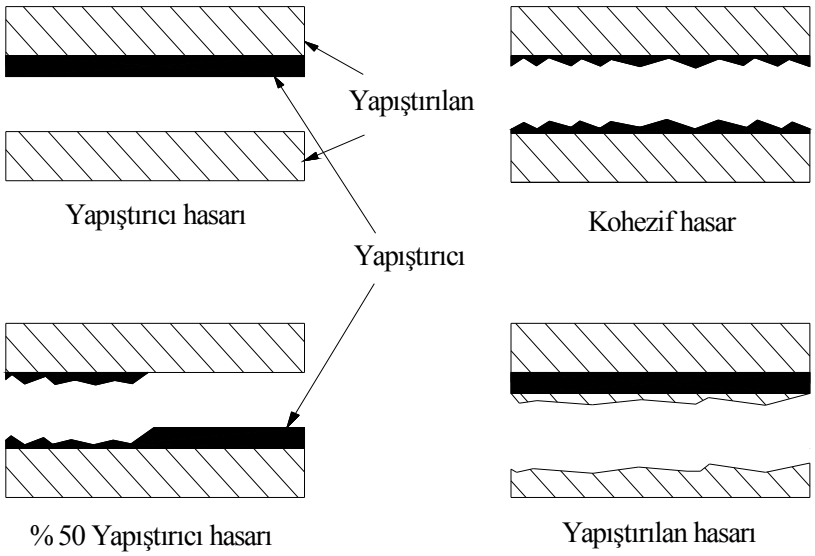
$$\sigma_t = \frac{p.r}{t} \tag{5.1}$$

Burada $\sigma_t$ teğetsel gerilme, *r* iç yarıçap, *p* iç basınç ve *t* cidar kalınlığıdır.

## 5.5. Yapıştırıcı Bağdaki Hasar Tipleri

Yapıştırmalı birleşimlerde Şekil 5.10'da gösterildiği üzere yapıştırıcı hasarı ve kohezif hasar meydana gelir. Yapıştırıcı hasarı, zayıf birleşim neticesinde yapıştırıcının yapıştırılandan ayrılması şeklinde gerçekleşir. Kohezif hasar ise yapıştırıcıda veya yapıştırılan malzemede meydana gelebilir. Kohezif hasar yapıştırıcı ile yapıştırılanın birleşim dayanımı, yapıştırıcı ya da yapıştırılan malzemenin dayanımından büyük olması durumunda gerçekleşir (Mazumdar 2002).

Yapıştırma tasarımı yapılırken yapıştırılan hasarının ya da kohezif hasarın meydana gelmesi istenir. Yapıştırılan hasarında yapıştırıcı ile yapıştırılanın birleşim dayanımı daha fazla olduğundan, yapıştırılan malzeme yırtılarak hasar verir. Kohezif hasarda ise yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme birbirine iyice bağlı olup yapıştırıcıda çatlama meydana gelir (Mazumdar 2002).




**Şekil 5.10** Yapıştırma hasar biçimleri (Mazumdar 2002)

Metallerde kohezif hasar meydana gelirken yapıştırıcı hasarı meydana gelmez (Adams ve Davies 1996). Kompozit malzemelerde ise yapıştırılan ve yapıştırıcı malzemelerinin poisson oranlarındaki farklılıktan dolayı hem yapıştırıcı hem de kohezif hasar oluşur (Armanios 2005).

# 6. MATERYAL VE YÖNTEM

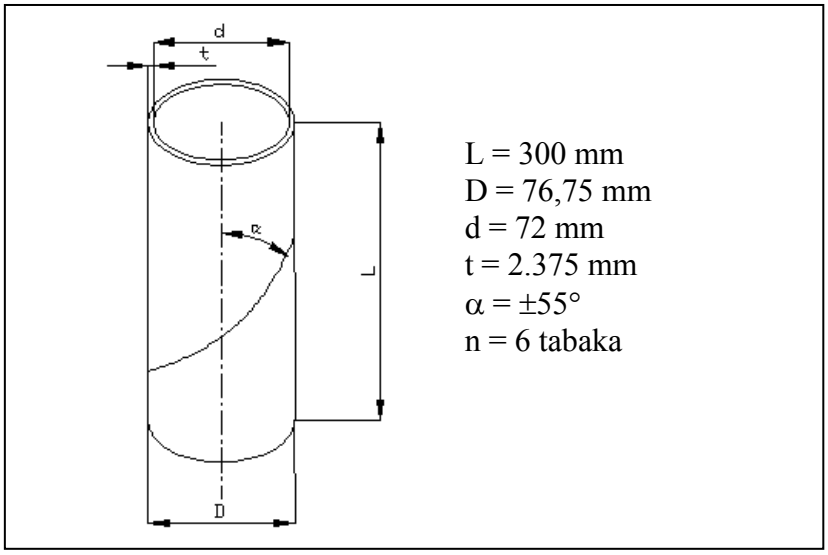
## 6.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi

Bu çalışmada kullanılan ±55° E-camı/epoksi filaman sarım kompozit borular İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. (İzmir, Türkiye) tarafından üretilmiştir. Kompozit boruların üretiminde yaş sargı yöntemi kullanılmıştır. Kompozit borulardaki elyaf malzemesi 17 μm çapında Vetrotex 1200 teks E camı, matris malzemesi ise Ciba Geigy, Bisphonel A, Epoksi CY 225 tir. Yaş sargı yönteminde elyaflar öncelikle 60 °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. Reçine emdirilen elyaflar mandreller üzerine boru ekseni ile arasında ±55° olacak şekilde sarılmışlardır. Helisel sarım işlemi kompozit borunun toplam tabaka sayısı 6 olacak şekilde devam etmiştir. Sarım işlemi bittikten sonra kompozit borular önce 135 °C' de 2 saat süreyle, sonra da 150 °C' de 2 saat süreyle fırında kür edilmiştir. Kür işleminden sonra her bir deney numunesinin uzunluğu 300 mm olacak şekilde kesilmiştir. Çizelge 6.1 de kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 6.1** Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri (Samancı 2004)

| | $E$ (GPa ) | $\sigma_{çek}$(MPa) | $\rho$(g/cm$^3$) | $\varepsilon_{kop}$(%) |
|---|---|---|---|---|
| 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 6.1'de numune geometrisi gösterilmiştir.




**Şekil 6.1** Numune geometrisi

## 6.2. Yakma Deneyi

Deneylerde kullanılacak olan CTP kompozit boru numunelerine ait elyaf hacim oranlarının belirlenmesi amacıyla ASTM D 2584 standardına göre yakma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yakma deneylerinde kullanılmak üzere ± 55° sarım açılı kompozit borudan, üç adet yakma deney numunesi kesilmiştir. Yakma numunelerinin öncelikle hacimleri daha sonra da hassas terazi kullanılarak kütleleri tespit edilmiştir. Yakma numuneleri sıcaklığı 600 °C olan fırında reçine tamamen yanıncaya kadar bekletilmiştir. Yakma işlemi sonrası geriye sadece cam elyaf kalmıştır. Hassas terazide tartılarak her bir yakma numunesine ait cam elyafın kütlesi belirlenmiştir. Daha önce elyaf ve reçinenin toplam kütlesi bilindiği için, toplam kütleden elyafın kütlesinin çıkarılması ile reçine kütlesi tespit edilmiştir.

Yama yakma deneyi için 300 mm genişliğindeki cam kumaş, Ciba Geigy, Bisphonel A, Epoksi CY 225 epoksi ile doyurularak 72 mm çapındaki malafa üzerine iki, dört, ve altı kat olacak şekilde elle sarılmıştır. Hazırlanan yamalar 80 °C'de 3 saat süreyle kür edilmiştir. Kür sonrası her tip yamadan 50 mm uzunluğunda üçer adet yakma deney numunesi kesilmiştir. Bu deneyler de boru yakma deneyinde olduğu gibi yapılmış ve böylece kompozit yamaların elyaf hacim oranı belirlenmiştir.

ASTM D 2584 standardına göre yakma numunelerine ait elyaf hacim oranı değerleri Denklem 6.1 ile belirlenir:

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \tag{6.1}$$

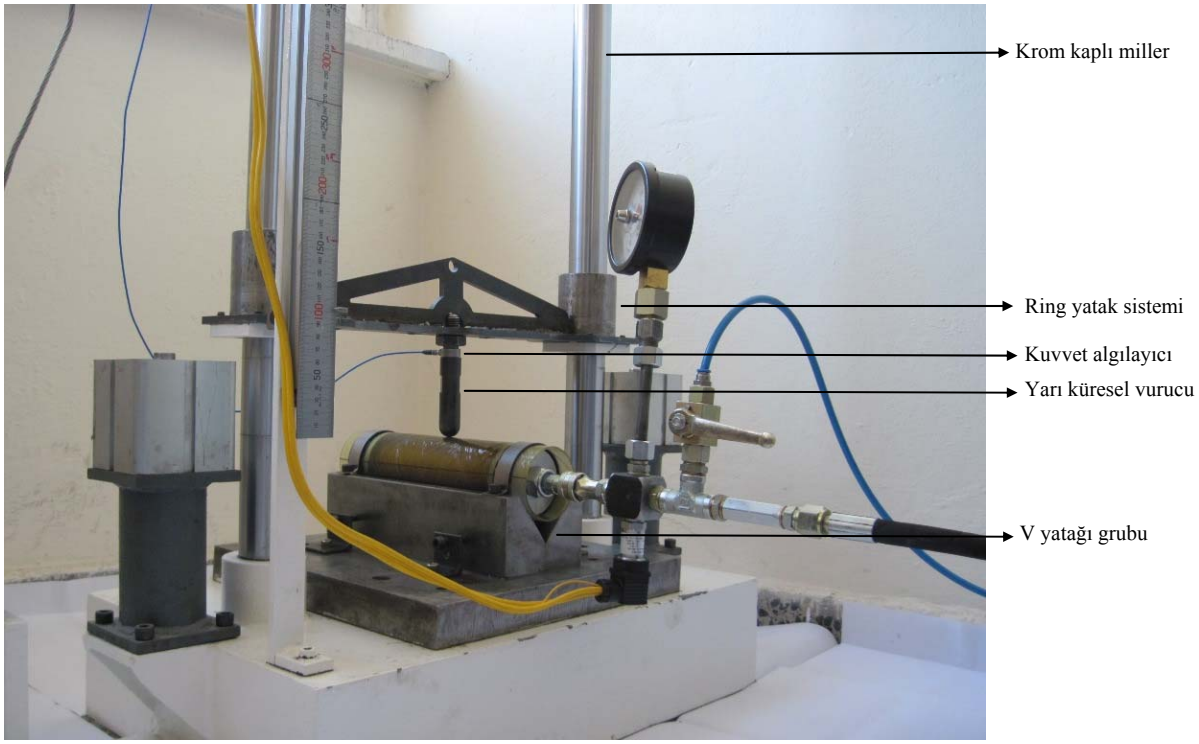
Burada $W_f$ elyafın, $W_c$ kompozitin kütlesi ve $\rho_f$ elyafın, $\rho_c$ kompozitin yoğunluğudur.

### 6.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

İç basınç altındaki CTP kompozit numunelerin düşük hızlı darbe cevaplarının araştırılması için özel olarak imal edilmiş düşük hızlı darbe cihazı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe test cihazı Şekil 6.2a-b'de görülmektedir. Deneylerde kullanılan cihaz ile değişik darbe enerji seviyelerinde ya da değişik darbe hızlarında darbe deneyleri yapılabilmektedir. Cihaz ile başlangıcından sonuna kadar, darbeyi kaydedebilme ve değerlendirebilme olanağı vardır.




(a)




(b)

**Şekil 6.2** Düşük hızlı darbe test cihazı

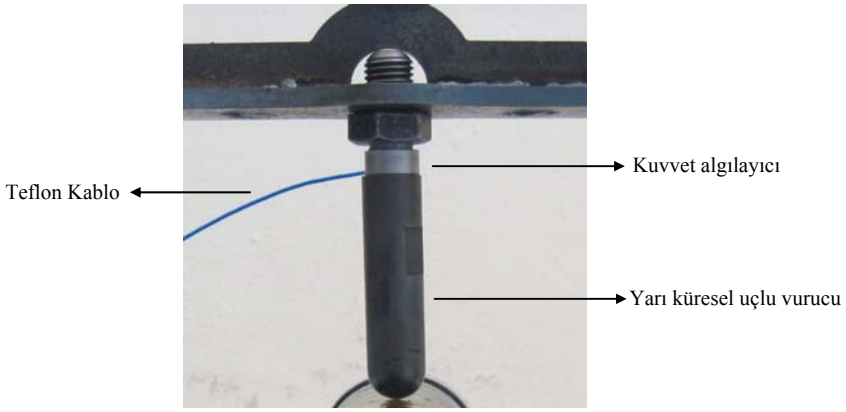
Deneylerde kullanılan cihaz üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi karşılıklı iki krom kaplı mil üzerinde düşey hareket eden vurucu kütlesinin ve kuvvet algılayıcının bağlı olduğu lineer ring yatak sistemidir. İkincisi ise CTP boru numunelerinin yataklanması için kullanılan V yatağı grubudur. Son eleman ise elektronik kontrol ünitesidir.

### 6.3.1.Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı

Düşük hızlı darbe deneylerinde vurucu kütlesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlamak amacıyla ring yataklamalı krom kaplı miller kullanılmıştır. Çelik miller üzerinde hareket eden karşılıklı iki lineer rulmanlı yatak Şekil 6.2'de de görüldüğü gibi vurucu kütlesinin 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 6.3'te vurucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. Deneyde kullanılan kuvvet algılayıcı PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) modelidir. 22,6

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

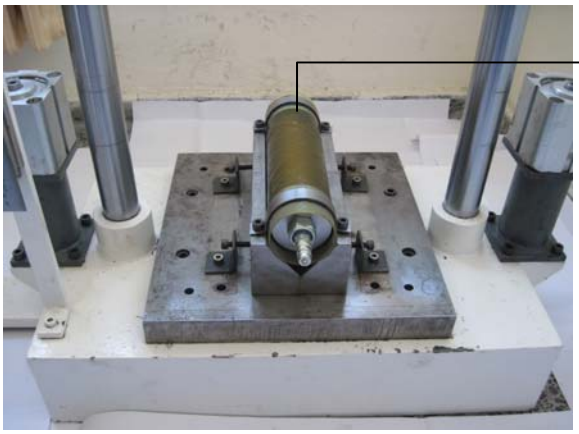



**Şekil 6.3** Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

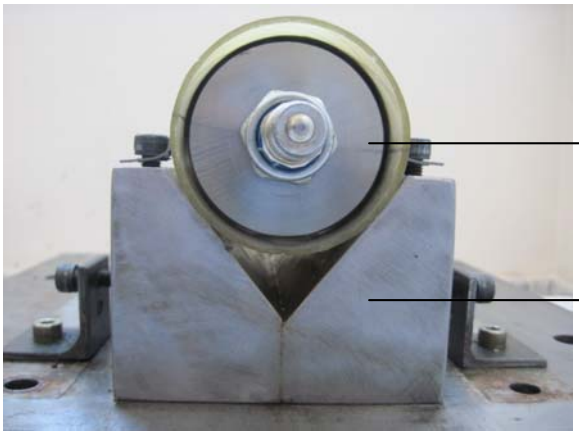
### 6.3.2.CTP kompozit boru yataklama ve iç basınç uygulama ünitesi

CTP Kompozit deney numunelerinin düşük hızlı darbe deneylerinde, her bir deney numunesi Şekil 6.4a-b'de görüldüğü gibi V yatağı üzerine yerleştirilmiştir.

CTP kompozit deney numunelerine düşük hızlı darbe deneyleri iç basınç altında yapılacaktır. İç basınç uygulama ünitesi kullanılarak numunelere 32 bar iç basınç verilmiştir. İç basınç uygulama ünitesi Şekil 6.5'te verilmiştir. Numune içerisine yerleştirilen iç basınç uygulama aparatının çalışması Bölüm 6.5'te anlatılmıştır. Deney numunelerine hidrolik pompa ile yağ basılarak iç basınç uygulanmıştır. Uygulanan iç basıncın değeri manometreden ve basınç sensöründen ölçülmüştür. Basınç sensöründen gelen sinyal elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir. Basınç sensörü düşük hızlı darbe esnasında numunede meydana gelecek basınç değişimlerini kaydetmek amacıyla kullanılmıştır. Darbenin etkisiyle numunede oluşacak basınç değişimlerini doğru tespit etmek için hidrolik hortumlardaki esnemeler önlenmiştir. Bunu sağlamak için hidrolik hortumlar ile basınç sensörü arasına tersimez vana konulmuştur.

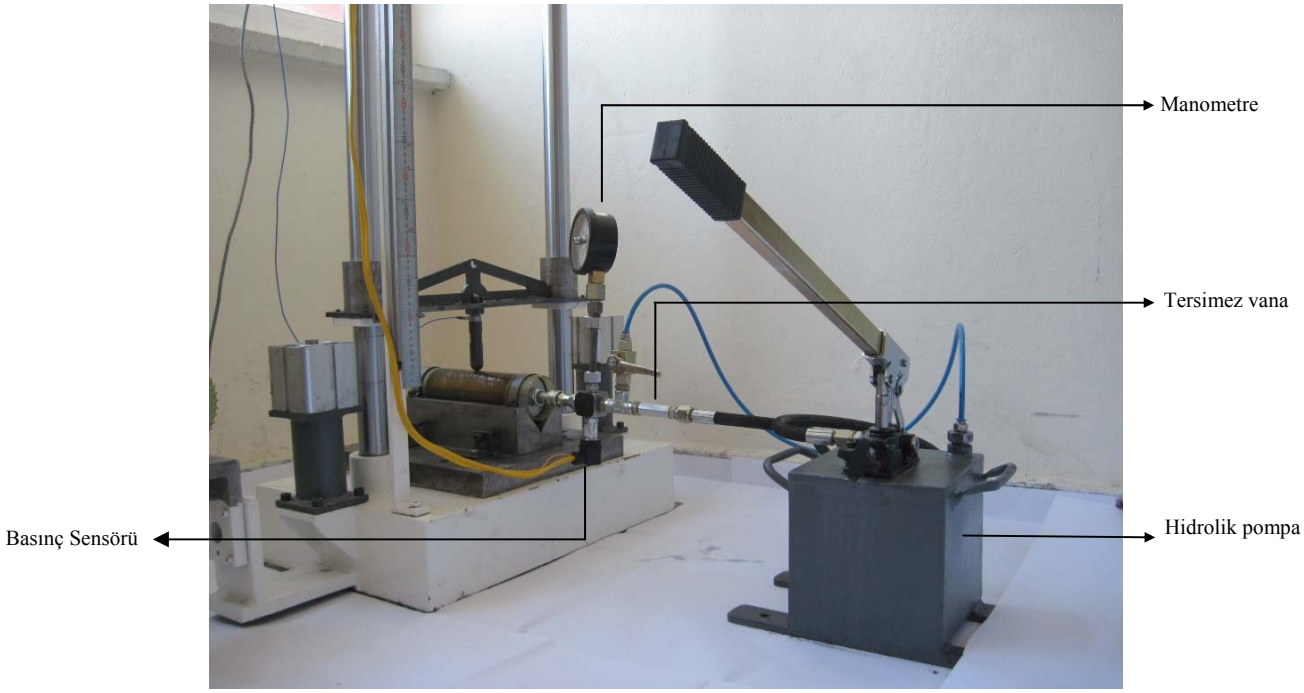



(a)




(b)

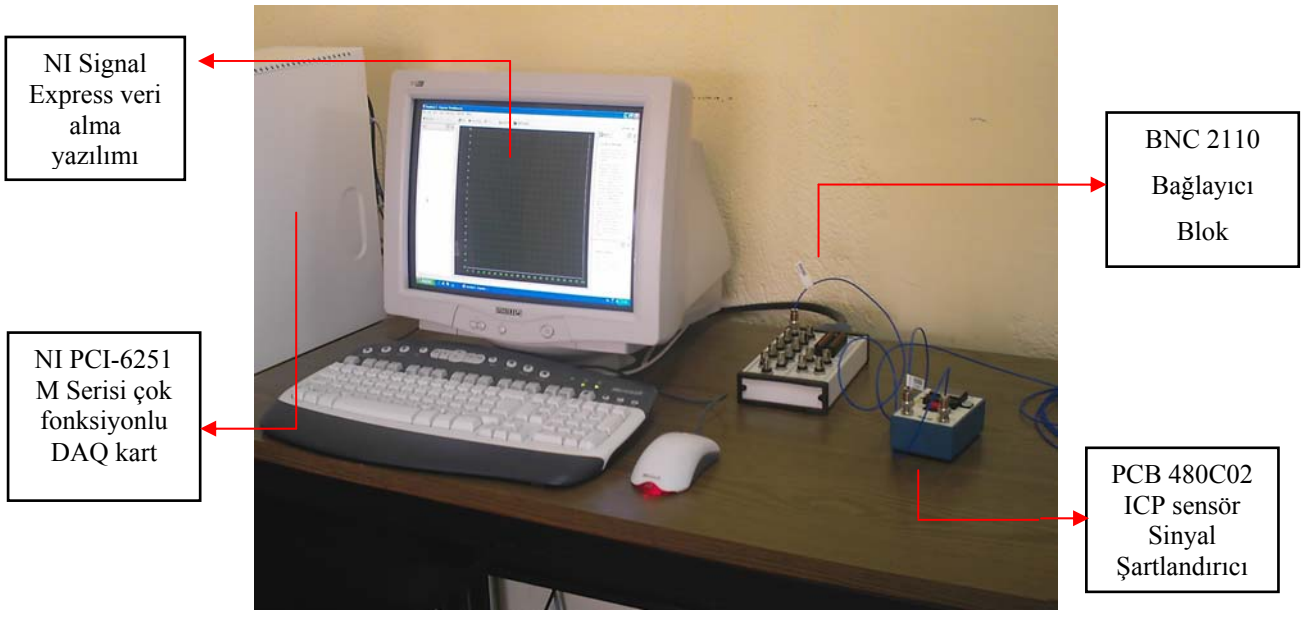
**Şekil 6.4** CTP Kompozit boru yataklama ünitesi




**Şekil 6.5** İç basınç uygulama ünitesi

### 6.3.3. Elektronik kontrol ünitesi

Elektronik aksamda kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin değerini yükselten bir sinyal şartlandırıcı mevcuttur. Kuvvet algılayıcıya ve sisteme uyumlu olabilmesi için PCB 480C02 ICP tipinde bir sinyal şartlandırıcı seçilmiştir. Kuvvet algılayıcı ile sinyal şartlandırıcı arasındaki bağlantıda PCB 003C30 teflon kablo kullanılmıştır. Kablo kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin, özelliğini kaybetmeden iletilmesini sağlamaktadır. Sinyal şartlandırıcıda yükseltilen sinyalin ve basınç sensöründen gelen sinyalin DAQ karta iletilebilmesi için BNC bağlayıcı blok kullanılmıştır. 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. Bilgisayarın ana kartı üzerine yerleştirilen DAQ kart ise gelen sinyali algılayıp işlemektedir. 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 6.6'da elektronik kontrol ünitesi görülmektedir (Kara 2006).



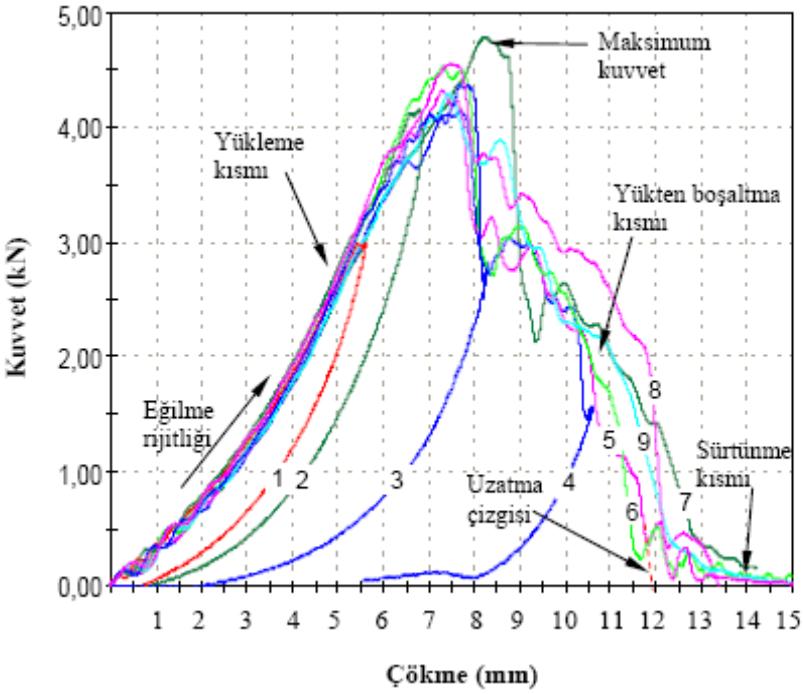

**Şekil 6.6** Elektronik kontrol ünitesi (Kara 2006)

## 6.4. CTP Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Darbe testlerinin numuneler üzerine değişik darbe enerji seviyelerinde uygulanmasıyla, darbe cihazından kompozit malzemelerin darbe davranışlarını gösteren birçok grafik ve sonuç elde edilebilmektedir. Bu grafikler, kompozitlerin darbe davranışına ait vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel durumun anlaşılmasını sağlamaktadır. Bunlardan kuvvet-çökme (*F-d*), kuvvet-zaman (*F-t*), enerji-zaman (*E-t*) ve hız-zaman (*V-t*) eğrileri gibi kompozitin darbe karakteristiğini belirlemede kullanılan grafikler elde edilebilir. Bu üç özel duruma ait grafik açıklamaları aşağıdaki bölümlerde yapılmıştır (Sayer 2009).

### 6.4.1. Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri

Kuvvet-çökme (yer değiştirme) (*F-d*) eğrileri darbe olayı esnasında kompozit malzemeye ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Şekil 6.7'de artan darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren bir *F-d* grafiği görülmektedir. Her bir eğri yüklemede bir artma kısmına, ulaşılan bir maksimum kuvvet değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Kuvvet-çökme eğrisinde artma kısmı darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Artan darbe enerjisi altında oluşan bu eğriler kapalı tip ve açık tip eğri olarak iki kısma ayrılır. Kapalı tip eğri vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından yutulmuş ve yutulamayan enerji de vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır. Buna göre şekilden de görüleceği üzere ilk 3 numune için oluşan eğriler kapalı tip eğrilerdir. Darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve çökme de artar. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi numune 4, kapalı tip bir eğri olmasına rağmen kapalı tip eğriden açık tip eğriye geçiş noktasında bulunmaktadır ve darbe enerjisinin daha da arttırılmasıyla eğri tipi kapalı tipten açık tip eğriye dönüşür. Eğer bir eğri açık tip ise ya vurucu numuneye saplanmıştır ya da numune delinmiştir. Buna göre numuneye saplanan vurucu numune kalınlığı boyunca aşağı doğru hareket eder ve artık numune yüzeyinden geri sekme meydana gelmez. Dolayısıyla, şekilden de görüldüğü gibi numune 5 te ya saplanma ya da delinme meydana gelmiştir.



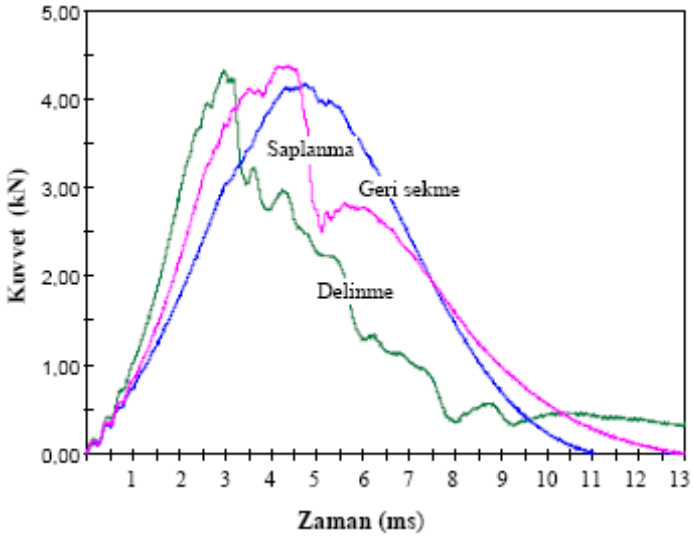

**Şekil 6.7** Artan darbe enerjisi altında oluşan kuvvet-çökme (F-d) eğrileri (Sayer 2009)

Darbe enerjisi daha da arttırıldığında vurucu numuneye saplanır, numune kalınlığı boyunca hareket eder ve sonunda da numuneyi delerek alt yüzeyden çıkar yani delinme olayı gerçekleşmiş olur. Şekil 6.7'de verilen kuvvet-çökme eğrisinde numune 6, 7, 8 ve 9, vurucu tarafından delinmiş numunelerdir. Eğrilerin uç kısımlarında yatay eksenin sonuna doğru kapanan kısım numune ve vurucu arasında sadece sürtünme meydana gelmesinden dolayı oluşan sürtünme kısmını ifade etmektedir. Dolayısıyla ulaşılan bu darbe enerjisinden sonra darbe enerjisi ne kadar arttırılırsa arttırılsın kompozitin daha faza darbe enerjisini yutamayacağı anlaşılmaktadır (Sayer 2009).

### 6.4.2. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri

Şekil 6.8'de numune yüzeyinden geri sekme, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel duruma ait kuvvet-zaman (*F-t*) grafiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi düşük enerjili darbelerde (örneğin geri sekme eğrisi gibi), eğri parabolik bir eğridir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmakta ve saplanma ve delinme eğrilerinde de görüldüğü gibi maksimum kuvvet değeri de hemen hemen sabit bir değer olmaktadır. Numunede delinme meydana geldiğinde kuvvetin sıfır olması gerekir ama şekilden de

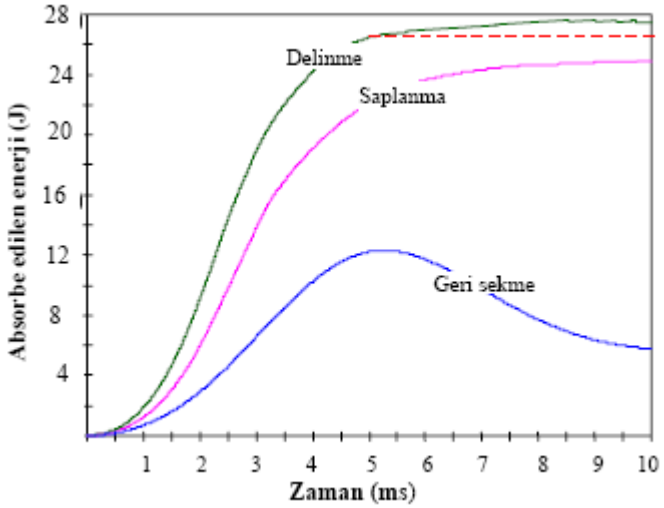
görüleceği üzere vurucu ve numune arasında sürtünme meydana geldiğinden eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel ilerlemiştir (Sayer 2009).




**Şekil 6.8** Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri (Sayer 2009)

### 6.4.3. Absorbe edilen enerji-zaman ($E_a$-t) eğrileri

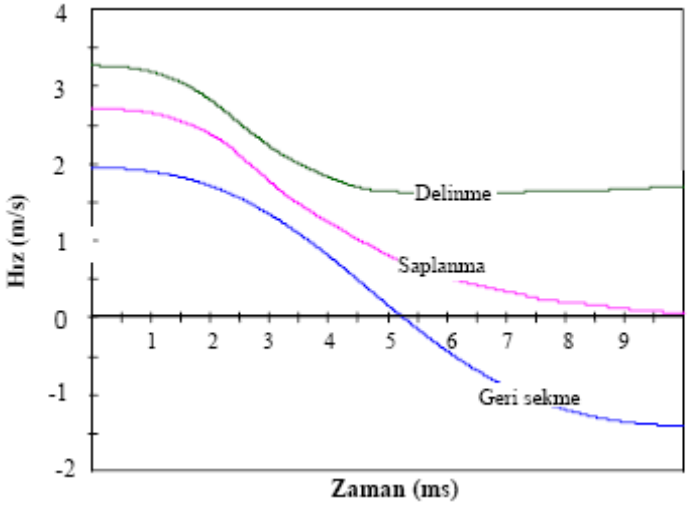
Şekil 6.9'da numune yüzeyinden geri sekme, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel duruma ait absorbe edilen enerji-zaman ($E_a$-$t$) grafiği görülmektedir. Absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme ($F$-$d$) eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilemez ve absorbe edilemeyen darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise vurucunun sahip olduğu darbe enerjisinin hepsi numune tarafından absorbe edilir ve eğrinin son kısmı şekilden de görüldüğü üzere hemen hemen yatay olarak devam eder. Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanın da darbe cihazının programı tarafından hesaplanan absorbe edilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarı doğru yönlendiği görülmektedir. Bu sürtünme kısmının altında kalan alanın toplam absorbe edilen enerji miktarından çıkarılması gerekir. Buna göre, numune tarafından absorbe edilen enerji değeri ise şekilde görülen kesikli çizginin yaklaşık olarak denk geldiği enerji değeridir (Sayer 2009).




**Şekil 6.9** Absorbe edilen enerji-zaman ($E_a$-t) eğrileri (Sayer 2009)

### 6.4.4. Hız-zaman (V-t) eğrileri

Şekil 6.10'da numune yüzeyinden geri sekme, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel duruma ait hız-zaman (*V-t*) grafiği görülmektedir. Artan darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, ilk başta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda, yukarı doğru hareket eden vurucu negatif bir hıza sahip olur.




**Şekil 6.10** Hız-zaman (V-t) eğrileri (Sayer 2009)

Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise, belli bir hız ile numuneye çarpan vurucunun numuneye saplanmasından dolayı tekrar yukarı doğru geri sekmesi

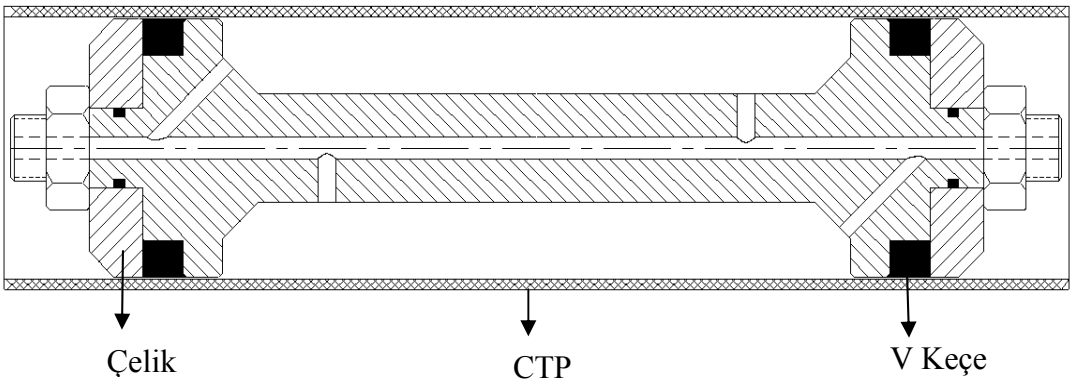
meydana gelmediğinden hız sıfırlanacaktır. Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise belli bir hız ile numuneye saplanıp kalınlık boyunca ilerleyen vurucunun hızını yavaşlatan durum, vurucu ve numune arasındaki sürtünmedir. Bunun sonucunda da geri sekme meydana gelmediğinden vurucu pozitif bir hıza sahip olacaktır (Sayer 2009).

### 6.5. Statik İç Basınç Deneyleri

Farklı enerji seviyelerinde darbe testlerine maruz bırakılmış CTP kompozit boruların patlama mukavemet değerlerini tespit etmek ve darbe hasarının patlama mukavemetine etkilerini araştırmak amacıyla statik iç basınç patlama deneyleri yapılmıştır. Statik iç basınç deneyleri ASTM D 1599-99 (2005)'e göre yapılmıştır. ASTM D 1599-99' a göre statik iç basınç patlama deneylerinde numuneye uygulanan iç basınç artışı başladıktan sonra deneyin 60-70 saniye arasında numunede sonuç hasarının (örneğin patlama) gerçekleşmesi gerekmektedir. Sonuç hasarının daha erken ya da daha geç olması durumunda deney tekrarlanmalıdır.

#### 6.5.1. Statik iç basınç test düzeneği

Serbest uçlu statik iç basınç patlama deneyleri için iç basınç test aparatı hazırlanmıştır (Şekil 6.11). Her iki kenarına sızdırmazlığı sağlamak için keçe yatağı açılmış aparat, çelik milden yapılmıştır. Ayrıca her iki ucuna vida açılmıştır. Yüksek basınca dayanıklı keçeler yataklarına yerleştirilmiş ve çelik flanşlarla desteklenmiştir. Hazırlanan düzenek Şekil 6.12'de görüldüğü gibi CTP kompozit borunun içine, boru iki ucu sızdırmazlık keçeleri üzerine gelecek şekilde monte edilmiştir. Bu nedenle boruya iç basınç uygulandığında boru çapı artarken boru boyu kısalabilmektedir. Bu nedenle serbest uçlu iç basınç deneyi olarak adlandırılmıştır. Deneylerde kullanılan CTP kompozit borular yüksek basınçlarda son hasara ulaşmaktadır. Bu hasar bazen borunun infilak etmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Oluşması muhtemel tehlikeleri ortadan kaldırmak ve güvenliği sağlamak amacıyla boru statik iç basınç patlama deneyleri esnasında Şekil 6.12'de görülen muhafaza kabini içerisine yerleştirilmiştir. Kabinin üzeri şeffaf olduğu için deney boyunca boruda meydana gelen hasar mekanizması gözlenmiş ve not edilmiştir.



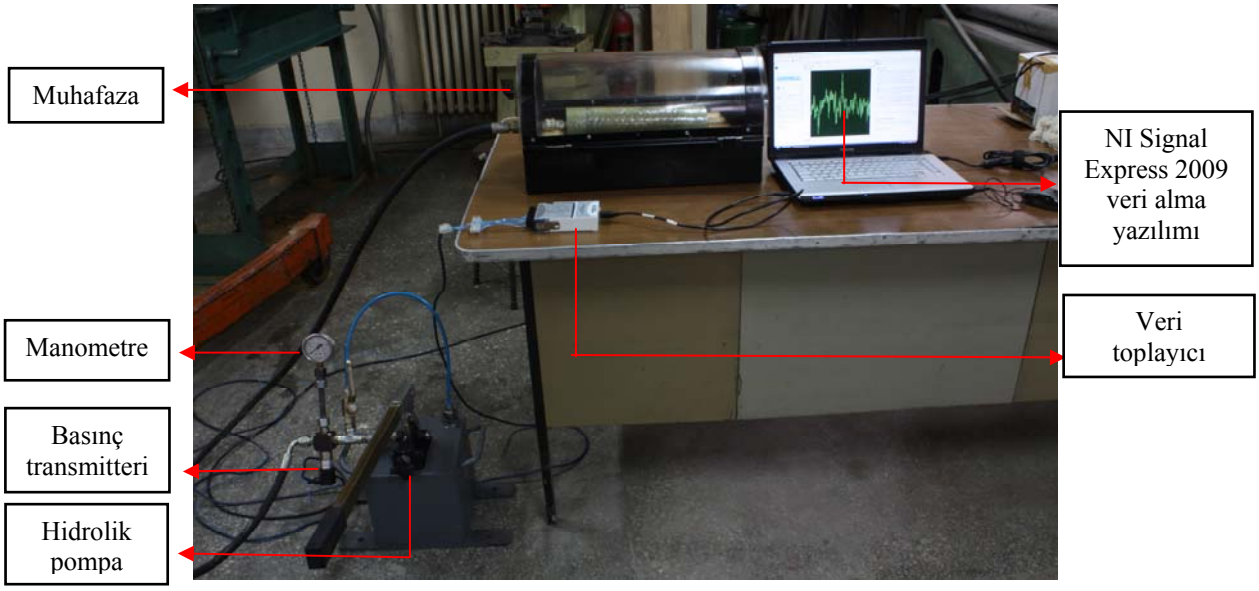

**Şekil 6.11** Serbest uçlu iç basınç test aparatı (Şahin 2011)



**Şekil 6.12** İç basınç test aparatı yerleştirilmiş deney numunesi ve muhafaza kabini

Şekil 6.13'te serbest uçlu iç basınç deney seti görülmektedir. Statik iç basınç deneylerinde boru numuneleri içerisine hidrolik pompa vasıtasıyla basınç yüklemesi yapılmıştır. Deney numuneleri içerisine pompa ile yağ basılırken numunede meydana gelecek sonuç hasarının 60-70 saniye arasında gerçekleşmesine dikkat edilmiş ve yüklemenin lineer olması sağlanmıştır. Deney numunesinde oluşan sonuç hasarının 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 düzenekte bulunan basınç sensörü 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 (Şahin 2011).




**Şekil 6.13** Serbest uçlu iç basınç deneyi seti (Şahin 2011)

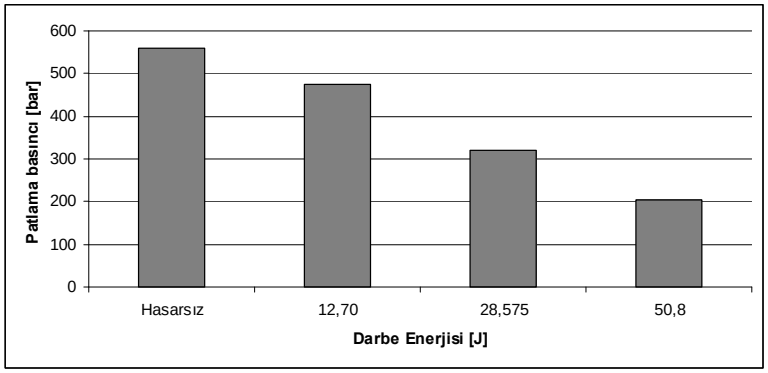
## 6.6. CTP Kompozit Boruların Statik İç Basınç Patlama Davranışlarının Belirlenmesi

İç basınç altındaki CTP kompozit numunelere farklı enerji seviyelerinde darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı enerji seviyeleri deney numunesi üzerinde farklı hasar mekanizmaları ortaya çıkarmaktadır. Bu hasar mekanizmaları boru numunesinin statik iç basınç patlama mukavemetinde hasarsız boruya göre azalmaya yol açacaktır. Bu azalma borunun yeniden kullanılabilirliğini, yenilenmesi gerektiğini yada tamir edilmesi gerektiğini belirlemek açısından önemlidir.

### 6.6.1. Darbe hasarının statik patlama basıncına etkisi

Patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi deney numunesinde oluşan darbe hasarlarının etkisini belirlemek açısından önemlidir. 10 tabakalı ±55° cam/epoksi kompozit boru numunelerinin kullanıldığı bir çalışmadan (Uyaner 2010) elde edilen sonuçlar Şekil 6.14'te görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça patlama basıncı değerinde düşme olduğu gözlenmiştir. 2 m/s çarpma hızıyla hasarlandırılmış (darbe enerjisi: 17,70 J) borunun patlama basıncı değerinde hasarsız boruya göre %15'lik azalma olmuştur. 3

m/s çarpma hızıyla hasarlandırılmış (darbe enerjisi: 28,575 J) borunun patlama basıncı değerinde hasarsız boruya göre %43, 4 m/s çarpma hızıyla hasarlandırılmış (darbe enerjisi: 50,80 J) borunun patlama basıncı değerinde hasarsız boruya göre %63 azalma olmuştur.




**Şekil 6.14** CTP kompozit borularda patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi (Uyaner 2010)

### 6.6.2. Hasarlı borularda onarım işleminin statik patlama basıncına etkisi

Değişik darbe enerji seviyelerinde hasar görmüş borulara ait hasar bölgeleri farklı kalınlıklarda onarım işlemine tabi tutulmuştur. Bu onarım işleminin deney numunesinin statik patlama basıncına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Bölüm 7.5'te verilmiştir.

## 6.7. Darbe Hasarlı CTP Boruların Onarımı

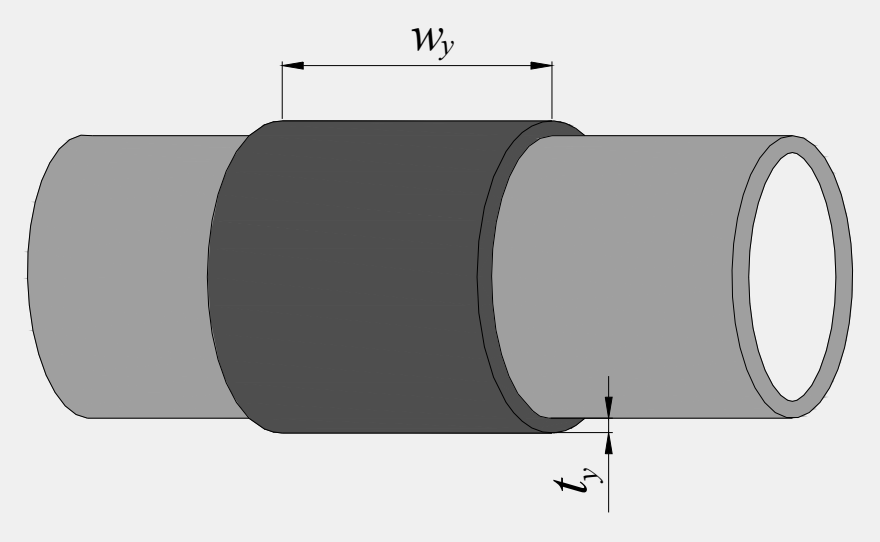
Düşük hızlı darbeye maruz kalarak hasar görmüş CTP kompozit borularına ait hasar bölgelerinin onarılmadan önce mekanik ve kimyasal olarak hazırlanması gerekmektedir. Mekanik hazırlama aşamasında boru yüzeyinin özellikle darbe hasarlı bölgenin hazır hale getirilmesi gerekir. Bunu sağlamak için öncelikle onarılacak bölge işaretlenmiş daha sonra boru numunesi torna tezgâhına bağlanmış ve yüzeydeki serbest reçine tabakası zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Zımparalama işlemiyle boru yüzeyi pürüzlü hale getirilerek onarım işleminde kullanılacak yamanın boru yüzeyine daha iyi bağlanması sağlanmıştır. Kimyasal hazırlama aşamasında ise pürüzlendirilen boru yüzeyleri aseton ile temizlenerek onarım öncesi her türlü kir, yağ ve bunun gibi istenmeyen etkenlerden arındırılmıştır.

Boru numunelerinin onarım işlemlerinde kullanılmak üzere 0,15 mm kalınlığındaki, 200 g/m$^2$'lik E-camı kumaştan 100 mm genişliğindeki kumaşlar kesilmiştir. Şekil 6.15'te genişliği $w_y$ ve kalınlığı $t_y$ olan yama ile onarılmış boru numunesi görülmektedir.

Onarım için hazırlanan cam kumaşlar fırça yardımıyla epoksi yapıştırıcı ile doyurularak boru üzerine sarılmıştır. Yama iki, dört ve altı katlı olacak şekilde sarım işlemine devam edilmiştir. Sarım işlemleri sırasında yamanın başlangıç ve bitiş kenarlarının darbe yüzeylerinin tam tersinde olmasına, her kata uygulanan sarım gerginliğinin aynı olmasına ve hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edilmiştir.

Sarım işlemi sonrasında yama yüzey pürüzlülüğünün sağlanması, yamanın boruya sıkı bağlanması ve kür işlemi sırasında reçinenin akmaması için yama yüzeyi polietilen film ile dıştan sarılmıştır.

Yama yüzeyi film ile sarılan boruların fırında 120 °C'de 3 saat kürlenmesiyle onarım işlemi tamamlanmıştır. Şekil 6.16'da 15 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numuneler için a) 2 kat b) 4 kat ve c) 6 kat yama yapılarak tamamlanmış onarım uygulaması görülmektedir.




**Şekil 6.15** Yama geometrisi (Günaydın 2010)



(a) (b) (c)

**Şekil 6.16** 15 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numuneler için a) 2 kat b) 4 kat ve c) 6 kat yama yapılarak tamamlanmış onarım uygulaması

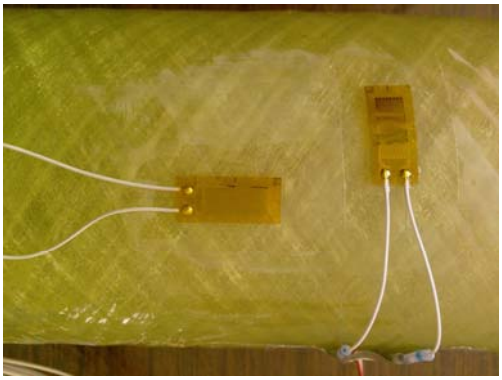
## 6.8. Kompozit Borunun Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

CTP kompozit boru numunesinin mekanik özellikleri statik iç basınç patlatma testi ile belirlenmiştir. Numuneye ait malzeme sınır değerlerinin tespiti için boru numunesi üzerine eksenel ve teğetsel yönde olmak üzere iki adet strain-gage yerleştirilmiştir (Şekil 6.17). Strain-gage yapıştırılacak numune yüzeyi önce zımparalanmış ve sonra aseton ile kimyasal olarak temizlenerek hazır hale getirilmiştir. Strain-gage kiti içerisinde verilen özel bir yapıştırıcıyla yüzeyi hazırlanmış numuneye strain-gageler yapıştırılmıştır. Daha sonra deney numunesi iç basınç patlatma test cihazına bağlanmış ve kademeli iç basınç artışı için hidrolik pompa ile yükleme yapılmıştır. Serbest uçlu iç basınç deneyi olduğu için, numune boyu kısalırken çapı artmaktadır. Numune boyunda ve çapında meydana gelen değişimler strain-gage üzerinden NI USB 9162 veri toplayıcısına aktarılmış ve bilgisayara kaydedilmiştir. Deney numunesine uygulanan iç basınç değerine göre teğetsel ve eksenel şekil değiştirme grafiği çıkarılmıştır. Grafik yardımıyla numunelere ait elastisite modülü ve poisson oranı değerleri tespit edilmiştir. Son hasar basıncına ait teğetsel hasar gerilmesi

Denklem 5.1 yardımıyla elde edilmiştir. Numunelerin poisson oranları; lineer bölgedeki şekil değiştirme değerleri kullanılarak

$$\upsilon_{12} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{6.2}$$

formülü yardımı ile hesaplanmıştır.

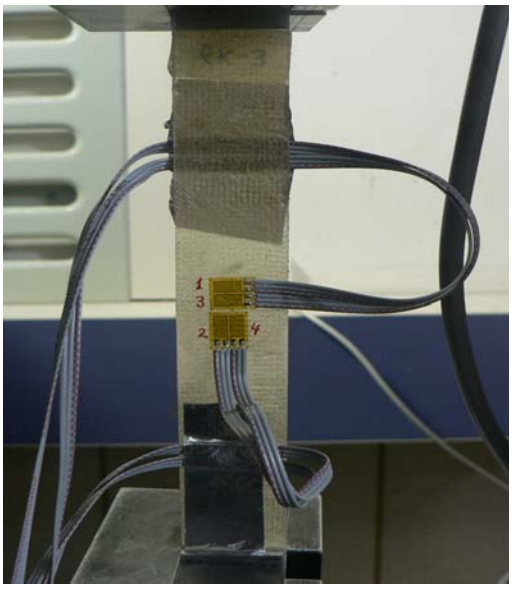


**Şekil 6.17** Teğetsel ve eksenel yönde strain-gage yapıştırılmış deney numunesi

## 6.9. Kompozit Yamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Kompozit yamanın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D 3039 standardına göre 250 mm uzunluklu ve 25 mm genişlikli çekme numuneleri hazırlanmıştır. Çekme numuneleri E-cam kumaş ve Ciba Geigy, Bisphonel A, Epoksi CY 225 epoksi reçineden imal edilmiştir. Numuneler el yatırma metoduna göre iki, üç, dört, beş ve altı katlı olacak şekilde hazırlanıp 3 saat süreyle 80 $^{\circ}$C'de kür edilmiştir. Elyaf hacim oranı 0,30 olan her bir yama tipinden üçer adet deney numunesi hazırlanarak çekme testleri yapılmıştır.

Kompozit yamanın Poisson oranını belirlemek için strain-gage kullanılmıştır. Biri eksenel diğeri ise enine şekil değişimini ölçmek üzere iki strain-gage, birbirine dik olacak şekilde yama numune yüzeyine yapıştırılmıştır Strain-gage yapıştırılmış deney numunesi Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Çekme testi sonucunda elde edilen şekil değişimi verilerine göre yamanın Poisson oranı belirlenmiştir (Günaydın 2010).



**Şekil 6.18** Altı katlı yama üzerine strain-gage yapıştırılmış çekme deney numunesi (Günaydın 2010)

Boru ile yama arasındaki kayma mukavemetinin belirlenmesi için ASTM D 5868 standardına göre Şekil 6.19'da gösterilen tek bindirmeli birleşim deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler için 100 mm uzunluklu ve 25 mm genişlikli boru numunesi ile aynı boyuttaki yama numunesi, bindirme yüzey alanı 25x25mm$^2$ olacak şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı olarak onarım işlemlerinde kullandığımız Bisphonel A, Epoksi CY-225 reçine, Anhydride HY-225 sertleştirici kullanılmıştır. Yapıştırma sonrası birleşim 80 $^{\circ}$C'de 3 saat süreyle kür edilmiştir. Bu numuneden üçer adet hazırlanarak çekme deneyleri yapılmıştır (Günaydın 2010).




**Şekil 6.19** Tek bindirmeli birleşim deney numuneleri (Günaydın 2010)

# 7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

## 7.1. CTP Boruların ve Kompozit Yamanın Yakma Deney Sonuçları

Deneylerde kullanılan ±55° sarım açılı 6 tabakalı kompozit boruların elyaf hacim oranını belirlemek amacı ile ASTM D2584'e göre yakma deneyleri yapılmıştır. Şekil 7.1'de yakılan deney numuneleri görülmektedir. Yakma deneyi sonucunda CTP kompozit boruya ait elyaf hacim oranı $V_f$=0,50 ve kompozit yamaya ait elyaf hacim oranı $V_f$=0,30 olarak bulunmuştur.



(a) (b)

**Şekil 7.1** Yakılmış deney numuneleri a) Kompozit boru b) Kompozit yama

## 7.2. CTP Boruların ve Kompozit Yamanın Mekanik Özellikleri

Kompozit borunun, yapılan deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

**Çizelge 7.1** Kompozit borunun mekanik özellikleri

| | |
|---|---|
| θ: Elyaf sarım açısı | $\pm 55^0$ |
| $\sigma_t$: Teğetsel hasar gerilmesi (MPa) | 428,96 |
| $\nu_y$: Poisson oranı | 0,525 |
| $E_y$: Elastiside modülü (GPa) | 20,48 |

Kompozit yamanın, yapılan deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 7.2'de verilmiştir.

**Çizelge 7.2** Kompozit yamanın mekanik özellikleri

| | | |
|---|---|---|
| Elastisite modülü, | $E_x=E_y$ (GPa) | 22 |
| Çekme mukavemeti, | $\sigma_y$ (MPa) | 292 |
| Poisson oranı, | $\nu_{xy}=-\varepsilon_y/\varepsilon_x$ | 0,16 |

Kompozit boru ve yama arasındaki kayma mukavemetinin belirlenmesi için çekme testi yapılmıştır. Çekme kuvveti arttıkça birleşimin bindirme bölgesinde eğilme gözlenmiştir. Boru ile yama arasında oluşan soyulma ve kayma gerilmelerinin, epoksinin kayma mukavemetini aşması durumunda yama borudan ayrılmaya başlamıştır. Bindirme bölgesinin uç kısımlarında kayma ve soyulma gerilmeleri en yüksek değerde olduğu için ayrılma, bindirme kenarlarından başlamış ve bu ayrılma yama ile boru bindirme yüzeyleri birbirinden tamamen ayrılıncaya kadar devam etmiştir. Deney sonucu elde edilen verilere göre boru ve yama arasındaki kayma mukavemeti 52,4 MPa olarak belirlenmiştir (Günaydın 2010).

## 7.3. CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

CTP boruların iç basınç altında düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesi amacıyla deney numunelerine farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyleri uygulanmıştır. Buna göre darbe deneyleri 5 J, 10 J ve 15 J çarpma enerjilerinde düşük hızlı gerçekleştirilmiştir. Artan darbe enerji değerlerini elde edebilmek için vurucu kütlesinin bırakılacağı yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. Vurucu 5 J enerji seviyesi için 0,0827 m yükseklikten, 10 J enerji seviyesi için ise 0,1605 m yükseklikten ve 15 J enerji seviyesi için 0,2407 m yükseklikten düşürülmüştür. V yatağı üzerine yerleştirilen numunelere iç basınç test düzeneği yardımıyla 32 bar iç basınç uygulanmış ve yarı küresel uçlu vurucu ile her bir numunenin ortasına darbe yapılmıştır. Darbe enerjisiyle, darbe sonrası numunede oluşan hasar mekanizmalarının ilişkilendirilebilmesi için ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütlesi tutularak tekrarlı darbeler engellenmiştir. Darbenin başlangıcından sonuna kadar kuvvet değişim verileri kuvvet algılayıcı tarafından basınç değişim verileri basınç sensörü tarafından elektronik aksama iletilmiştir. Bu veriler Signal Express yazılımı ile elde edilen, kuvvetin zamana göre değişim grafiğinde ve basıncın zamana göre değişim grafiğinde gösterilmiştir. Temas kuvveti-yer değiştirme, enerji-zaman ve hız-zaman değişimleri düşük hızlı darbenin

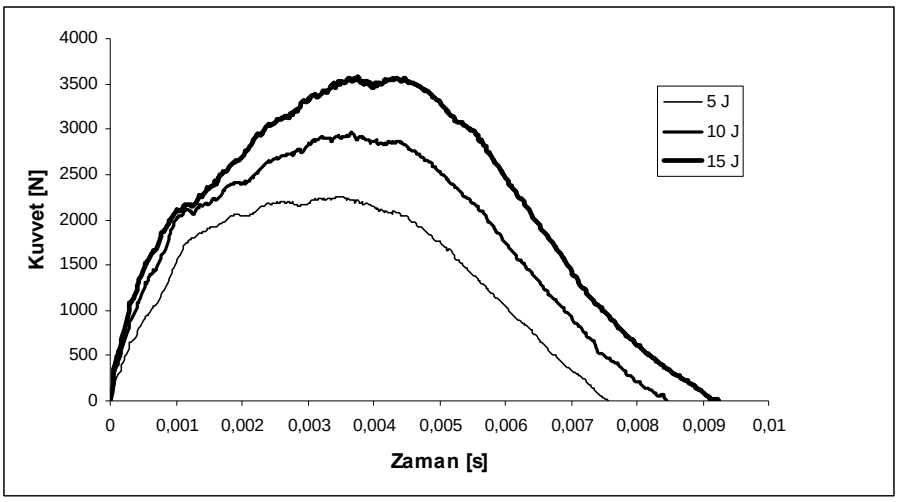
kinetik analizi neticesinde elde edilmiştir. Düşük hızlı darbenin kinetik analizi EK-1'de verilmiştir.

### 7.3.1. Temas kuvveti-zaman değişimi

Düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-zaman değişimi eğrileri kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Şekil 7.2'de artan darbe enerjisi altında, temas kuvvetinin zamana göre değişimini gösteren grafikler verilmiştir. 5 J, 10 J ve 15 J'lük çarpma enerjilerinde elde edilen temas kuvveti-zaman değişimlerinin çıngırak eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Her bir eğri yüklemede bir artma kısmına, ulaşılan bir en büyük kuvvet değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Tüm grafikler vurucunun numuneye temas etmesinden sonra numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan grafiklerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından yutulmuş geri kalan enerji ise vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır.

Grafiklerde görülen salınımlar numuneler üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang ve Vukhanh, 1994). Darbe enerjisinin artmasıyla numunede oluşan hasar miktarı artmaktadır. Buna bağlı olarak darbe enerjisinin artmasıyla grafikte oluşan salınım miktarında da artma gözlenmiştir. Temas kuvveti en büyük değerine ulaşıncaya kadar hasar gelişiminin hızla devam ettiği düşünülmektedir (Kara 2006). İç basınç altında olmayan deney numunelerinin düşük hızlı darbe cevabının araştırıldığı çalışmalardan Uyaner ve ark. (2010) elde edilen temas kuvveti-zaman değişim grafiklerinde salınım miktarlarının bu çalışmaya göre çok daha fazla olduğu görülmüştür. Bu çalışmada numunelere uygulanan iç basınç numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine ve daha az hasarlanmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak grafiklerde oluşan salınım miktarı iç basınçsız deneylere göre daha düşüktür.

Darbe enerjisinin artmasıyla numune üzerinde oluşan en büyük temas kuvvetinin arttığı grafikte açıkça görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisin artmasıyla numunede oluşan temas süresi de artmaktadır. 15 J darbe enerjisiyle yapılan deneyden elde edilen grafikte salınımların çok daha fazla olması numunede daha fazla hasar oluştuğunu göstermektedir (Uyaner 2007).




**Şekil 7.2** CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet–zaman değişimi

Artan darbe enerji değerlerine göre elde edilen çarpma hızı en büyük temas kuvveti ve temas süresi değerleri Çizelge 7.3'de verilmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla çarpma hızının, en büyük temas kuvvetinin ve temas süresinin arttığı çizelgede açıkça görülmektedir.

**Çizelge 7.3** Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri (X±Sx)

| Darbe Enerjisi [J] | Çarpma Hızı [m/s] | En Büyük Temas Kuvveti [N] | Temas Süresi [s] |
|---|---|---|---|
| 5 | 1,255 | 2250,675±131,80 | 0,00756±0,000329 |
| 10 | 1,775 | 2962,488±106,414 | 0,00848±0,000695 |
| 15 | 2,174 | 3572,375±99,436 | 0,00924±0,000188 |

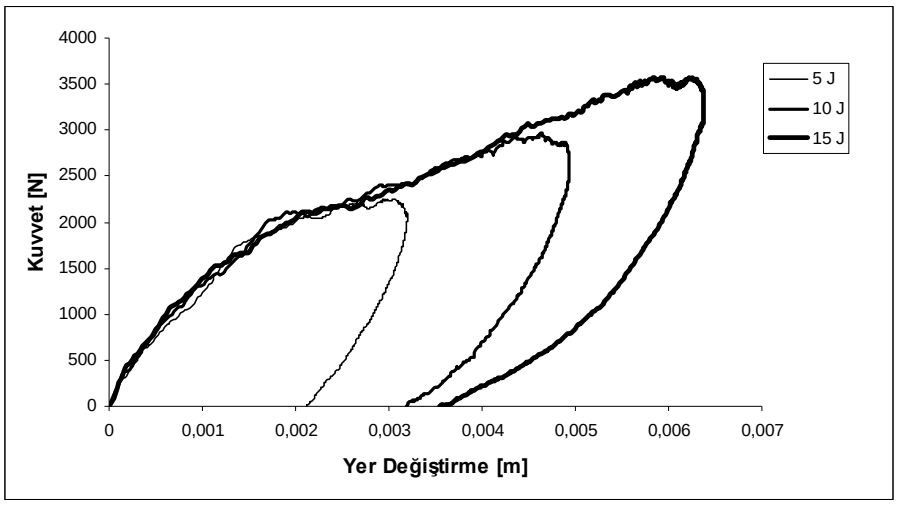
### 7.3.2. Temas kuvveti-yer değiştirme

Darbeye maruz kalan kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-yer değiştirme (kuvvet-çökme) değişim grafikleridir. Farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış CTP kompozit numuneler için elde edilen kuvvete bağlı yer değiştirme değerleri Şekil 7.3'te verilmiştir. Darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede yer değiştirme (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Darbe enerjisi arttıkça kuvvet ve yer değiştirme miktarı artmaktadır. Kuvvet en büyük değerine ulaştığında yer değiştirme miktarı da en büyük değerine ulaşmaktadır.

Kuvvet-yer değiştirme eğrisinde artma kısmındaki eğim darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı *eğilme rijitliği* olarak adlandırılır. Eğilme

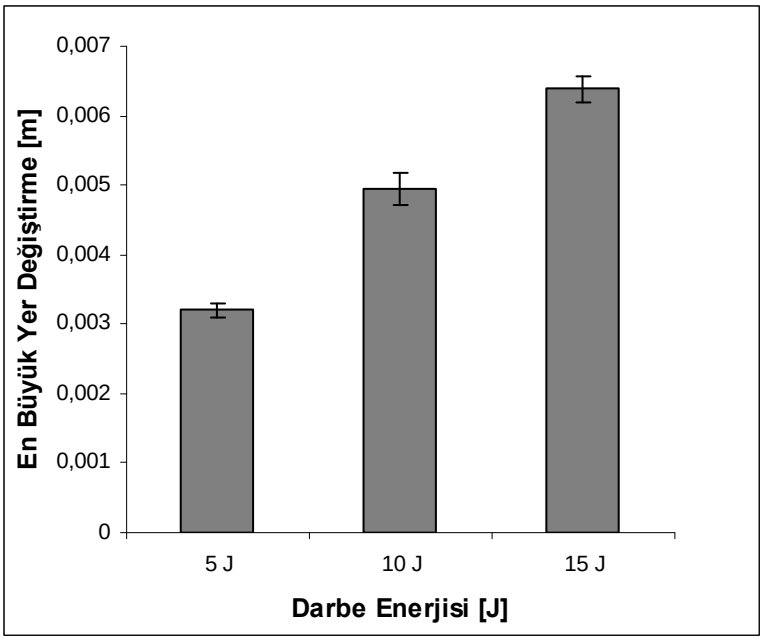
rijitliğindeki salınımlar ve değişimler numunede oluşan hasarlanmayı göstermektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla numunelerin eğilme rijitliğinde büyük bir değişim gözlenmemiştir. Bunun en büyük nedeni numunelerin iç basınç altında darbe yüklemesine maruz kalmasıdır. Deney numunelerine uygulanan iç basınç numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine neden olmakta ve buna bağlı olarak eğilme rijitliğinde büyük bir değişim görülmemektedir. Eğilme rijitliğinde büyük bir değişimin olmaması deney numunesinde büyük hasarların özellikle elyaf hasarlarının olmadığına işaret etmektedir. İç basınç altında olmadan farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit CTP boruların eğilme rijitliğinde ciddi değişmeler olmaktadır. Şöyle ki kuvvet-yer değiştirme eğrisinin artma kısmında kuvvet belirli bir değere ulaşınca numune oluşan hasarlanmadan dolayı eğilme rijitliğinde keskin bir düşme meydana gelmiştir (Şahin 2011 ve Uyaner 2010).

Kuvvet-yer değiştirme grafiği altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir (Kara, 2006). Darbe enerjisi arttıkça kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın arttığı ve buna bağlı olarak numune tarafından yutulan enerji miktarının da arttığı Şekil 7.3'te açıkça görülmektedir.




**Şekil 7.3** CTP kompozit boru numunesinde değişik çarpma enerjilerinde elde edilen kuvvet bağlı yer değiştirme

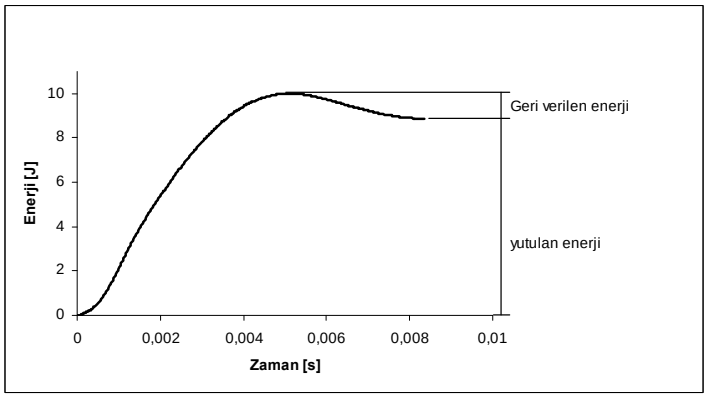
Şekil 7.4'te 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjisi için CTP kompozit numunelerde oluşan en büyük yer değiştirme miktarları verilmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla yer değiştirme miktarının arttığı açık bir şekilde görülmektedir.




**Şekil 7.4** CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjileri için elde edilen en büyük yer değiştirme miktarları

### 7.3.3. Enerji-zaman değişimi ve enerji dağılımı

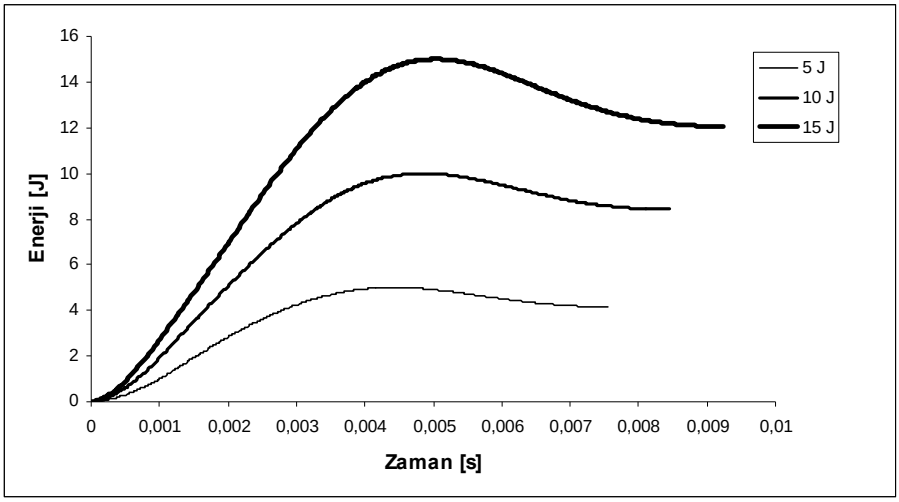
Düşük hızlı darbe deneylerinde vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından yutulamaz ve yutulmayan darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Şekil 7.5'te verilen enerji-zaman değişim grafiğinde numune tarafından yutulan ve geri verilen enerji değerleri görülmektedir.




**Şekil 7.5** Enerji-zaman değişimi

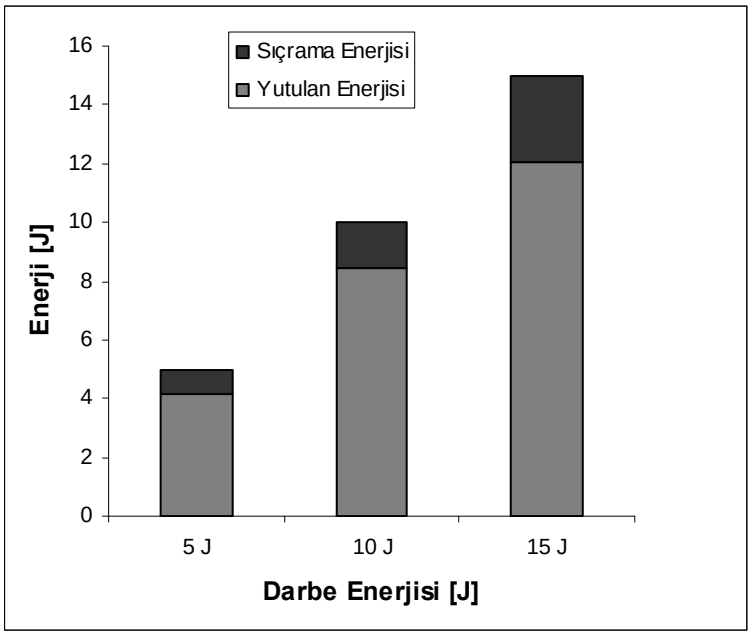
Şekil 7.6'daki grafikte farklı enerji sevilerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış CTP kompozit boru numunelerinden elde edilen enerji-zaman değişimi birlikte

görülmektedir. Kuvvet-yer değiştirme grafiğiyle uyumlu olarak Enerji-zaman değişim grafiğinde de darbe enerjisinin artmasıyla numune tarafından yutulan enerjinin arttığı görülmektedir.




**Şekil 7.6** CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde elde edilen enerji-zaman değişimi

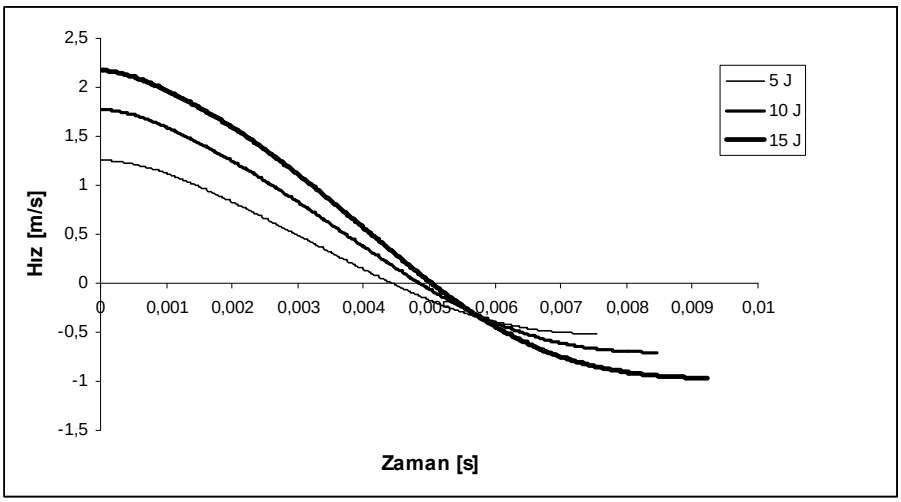
Numune tarafından yutulan enerji ve geri verilen enerji değerleri enerji zaman değişim grafiklerinden elde edilebildiği gibi ayrıca kuvvet-yer değiştirme eğrisinin altında kalan alandan da numune tarafından yutulan enerji hesaplanabilmektedir. Şekil 7.7'de CTP kompozit boru numunelerinden farklı darbe enerji seviyeleri için elde edilen sıçrama enerjisi ve numune tarafından yutulan enerji değerleri verilmiştir. Düşük hızlı darbe gören iç basınç altındaki kompozit boru numunesi 5 J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %83'ünü, 10 J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %84'ünü ve 15 J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %80'ini yutmuştur. 5 J ve 10 J darbe enerjisi seviyeleri için numune tarafından yutulan enerjinin toplam enerjiye oranı birbirine çok yakın olurken 15 J darbe enerjisi için bu oran azalmıştır. 15 J darbe enerjisi için yutulan enerji miktarının toplam enerjiye oranının azalması iç basınç etkisinden dolayıdır. İç basınç olmadan yapılan çalışmada (Şahin 2011) darbe enerjisinin artmasıyla yutulan enerji miktarının toplam enerjiye oranının arttığı tespit edilmiştir. Şekil 7.7'de açıkça görüldüğü gibi darbe enerjisi arttıkça numune tarafından yutulan enerji miktarı ve sıçrama enerjisi miktarı artmaktadır. Numune tarafından yutulan enerji miktarının artması numunede oluşan hasarın arttığını göstermektedir. Numune tarafından yutulan enerji farklı hasar mekanizmalarına harcanmıştır.




**Şekil 7.7** CTP kompozit boru numunelerinde değişik darbe enerjileri için elde edilen enerji dağılımı miktarları

### 7.3.4. Hız-zaman değişimi

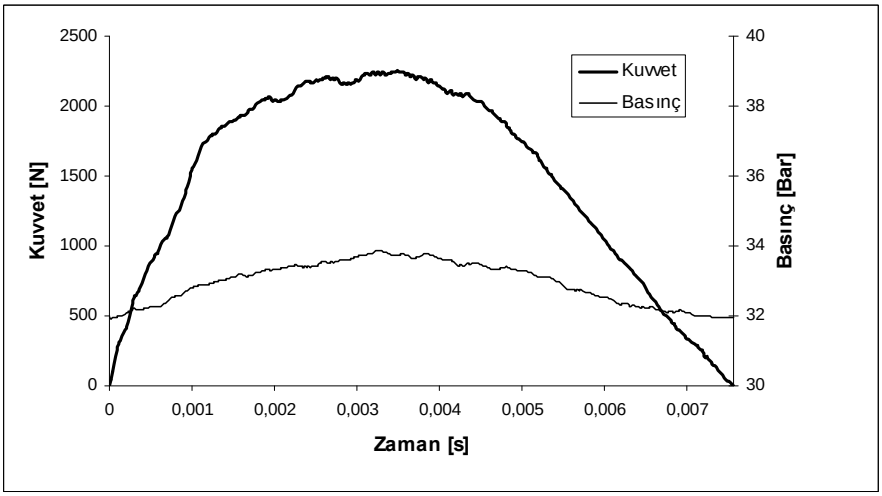
Şekil 7.8'de farklı enerji sevilerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış CTP kompozit boru numunelerinden elde edilen hız-zaman değişimi verilmiştir. Artan darbe enerjisi altında yapılan darbe testlerinde, başlangıçta belli bir hıza sahip olan vurucunun numune ile ilk temasından sonra hızı azalarak sıfıra düşmüştür. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi ile yukarı doğru hareket başlar ve vurucu Şekil 7.8'de görüldüğü gibi negatif bir hıza sahip olur. Enerjinin artmasıyla vurucunun çarpma hızı da artar. Buna bağlı olarak çarpma hızı yüksek olan vurucunun darbeden sonra dönüş hızı da daha yüksektir.



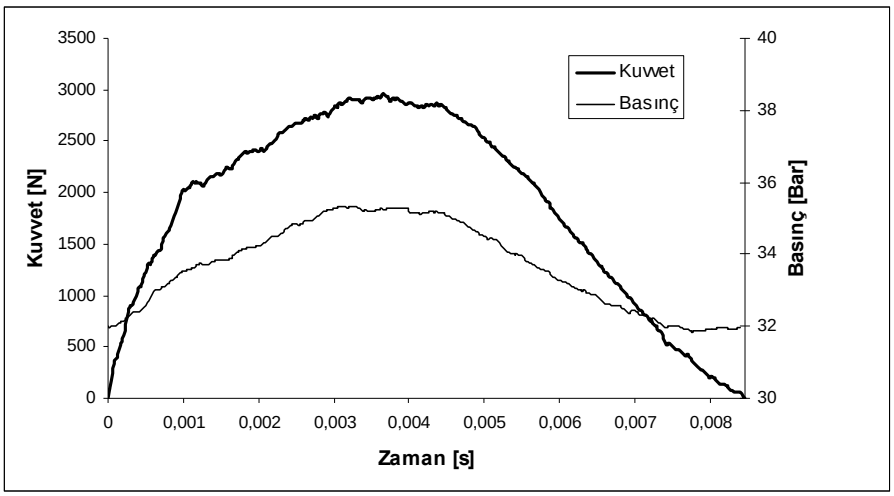

**Şekil 7.8** CTP kompozit boru numunesinde farklı darbe enerjilerinde elde edilen hız-zaman değişimi

### 7.3.5. Kuvvet ve iç basıncın zamana bağlı değişimi

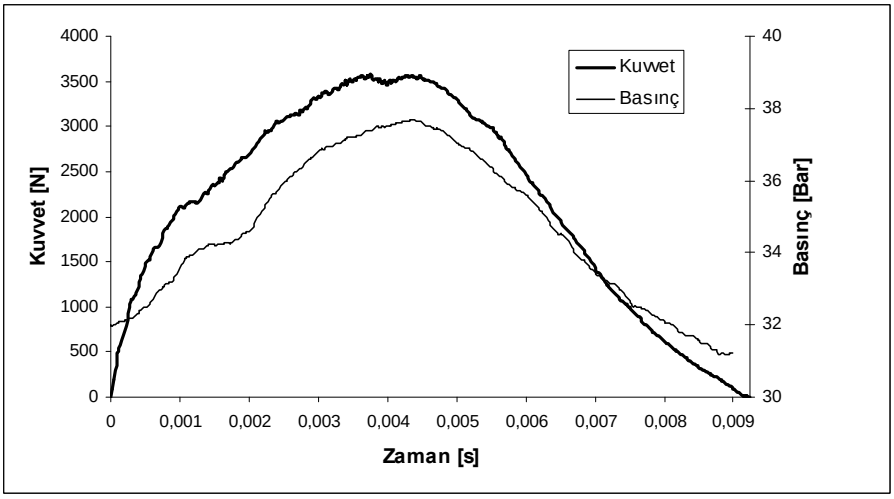
Bölüm 7.3.1'de CTP kompozit boru numunelerinin düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-zaman değişimleri anlatılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz kalan CTP kompozit boru numunelerine darbeden önce 32 bar iç basınç uygulanmış ve kuvvet-zaman değişimine bağlı olarak basınçtaki değişim Şekil 7.9 a-c'de verilmiştir. Darbe esnasında vurucunun numuneye temasıyla beraber kuvvet artmaya başlamış buna bağlı olarak ta iç basınç değeri artmaya başlamıştır. Temas kuvvetinin en büyük değerine ulaştığı noktada iç basınç değeri de en büyük değerine ulaşmıştır. Geri sekmenin etkisiyle temas kuvveti azalarak sıfıra düşmüştür. Buna bağlı olarak iç basınç değeri de azalmış ve darbeden önceki basınç değerine tekrar düşmüştür.




(a)



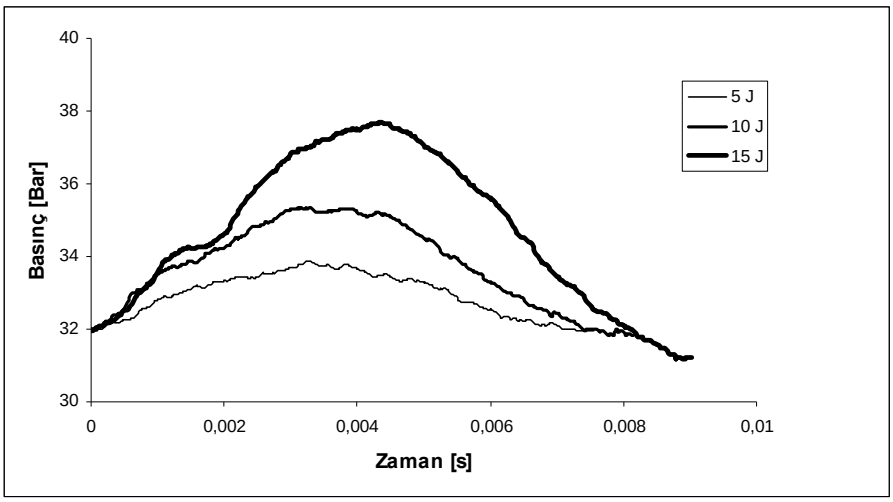

(b)




(c)

**Şekil 7.9** CTP kompozit boru numunesinde a) 5 J, b) 10 J ve c) 15 J darbe enerjileri için kuvvet ve basıncın zamanla değişimi

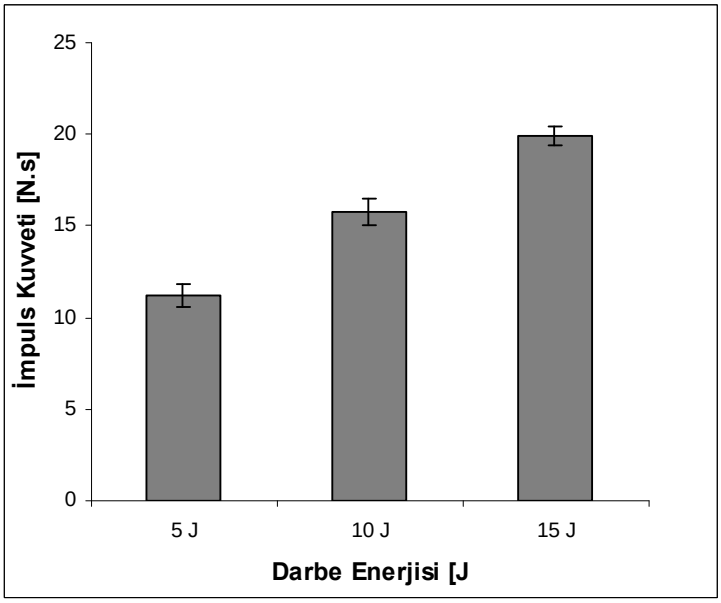
Şekil 7.10'da farklı enerji sevilerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış CTP kompozit boru numunelerinden elde edilen iç basınç-zaman değişimi verilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça iç basınçta meydana gelen yükselme miktarı artmıştır. 5 J darbe enerjisi için iç basınç değerinin ulaştığı en büyük değer 33,89 bar, 10 J darbe enerjisi için iç basınç değerinin ulaştığı en büyük değer 35,33 bar ve 15 J darbe enerjisi için iç basınç değerinin ulaştığı en büyük değer 37,69 bardır. Darbe sırasında numunede meydana gelen hasarlar basınç artışının salınımlı olmasına neden olmuştur.




**Şekil 7.10** CTP kompozit boru numunesinde farklı çarpma enerjilerinde elde edilen basınç–zaman değişimi

### 7.3.6 İmpuls kuvveti

Çarpışma sırasında cisimlerin hareketini değiştiren kuvvet, genellikle çok kısa sürelerde etkilidir. İmpuls kuvveti lineer momentumdaki değişmeye eşit olup aynı zamanda kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alana da eşittir. Değişik darbe enerji seviyeleri için CTP kompozit numunelerden elde edilen impuls kuvveti değerleri Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla impuls kuvvetinin arttığı şekilden açıkça anlaşılmaktadır. Bu beklenen bir durumdur.



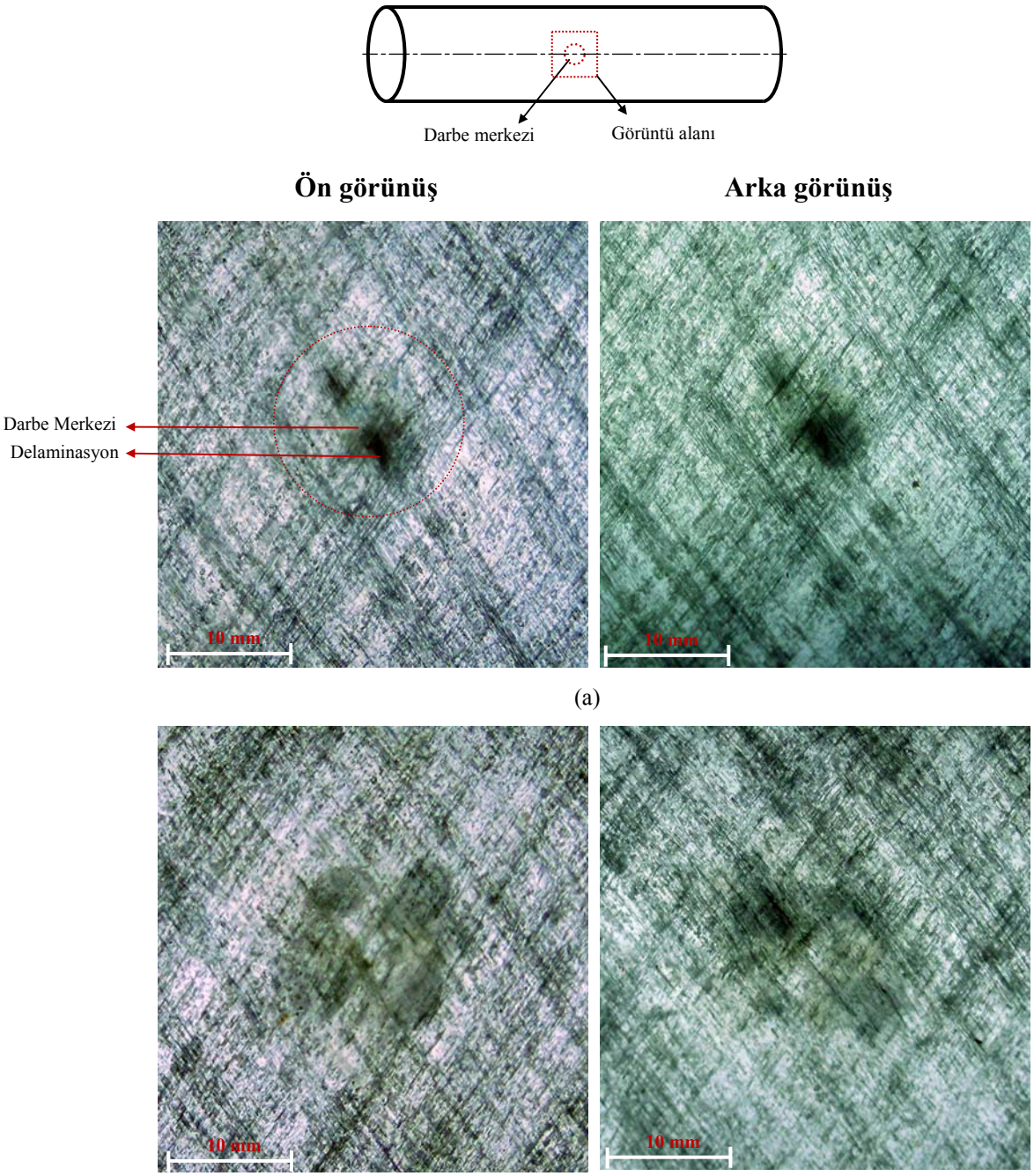

**Şekil 7.11** CTP kompozit boru numunelerinde farklı enerji seviyeleri için elde edilen impuls kuvvetleri

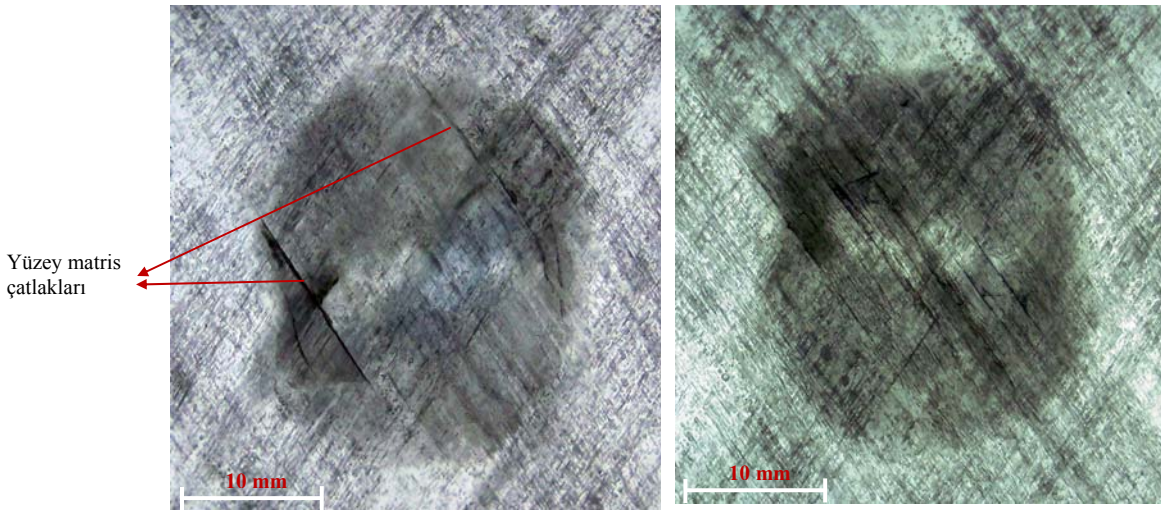
### 7.3.7. Düşük hızlı darbe hasar analizi

İç basınç altındaki kompozit CTP deney numunelerine yapılan darbe deneylerinden sonra numunede oluşan hasarlar tespit edilmiş ve değerlendirilmiştir. Kevlar ve cam/epoksi kompozit numunede meydana gelen hasarlar, hasarlı bölgenin arkasından ışık tutarak belirlenebilir. Tabakalar arası ayrılmaların boyutu ve şekli ile mevcut olan matris çatlakları çıplak göz ile belirlenebilir (Abrate, 1998). Kompozit CTP boru numunelerinin iç basınç altında darbe yapıldıktan sonra ön ve arka bölgelerinin ışık altında yüksek çözünürlükle fotoğrafları çekilmiş ve incelenmiştir. Numuneler darbe bölgelerinden kesilerek optik mikroskop altında incelenerek 8X ve 20X büyütmelerde enine kesit görüntüleri çıkarılmıştır. İlaveten darbe hasarlı numuneler yakma testine tabi tutulmuş ve numunelerde oluşması muhtemel elyaf hasarları incelenmiştir. Şekil 7.12-17'de CTP numunelerde değişik darbe enerjileri için ön, arka ve enine kesit bölgelerine ait hasarlar görülmektedir. Darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan darbe hasar bölgesinin genişlediği açıkça görülmektedir.

Şekil 7.12a'da 5 J darbe enerjisi için numunenin ön ve arka bölgelerindeki hasarlar görülmektedir. 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunede oluşan hasar bölgesi 10 J ve 15 J darbe hasarına göre oldukça küçüktür. Numunenin ön hasar bölgesi incelendiğinde darbe merkezinde oluşan, vurucunun nüfuziyet bölgesi görülmektedir. Darbe merkezi etrafında elyaf sarım doğrultusunda küçük bir delaminasyon alanı oluştuğu tespit edilmiştir. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı kayma gerilmeleridir. Bu nedenle delaminasyon alanının elyaf sarım doğrultusunda yayıldığı görülmektedir. Numunenin arka hasar bölgesi incelendiğinde oluşan delaminasyon alanının ön hasar bölgesinden daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 7.13a'da ise numunenin kesitinin optik mikroskop altında elde edilen görüntüler verilmiştir. Hasar bölgesi incelendiğinde radyal çatlakların çok az oluştuğu gözlenmiştir. Darbe hasarının darbe merkezinin etrafına doğru yayıldığı numunenin kesit görüntüsünden anlaşılmaktadır. Kompozit borular ince cidarlı olmalarına rağmen iç basınç etkisinden dolayı serbest bir şekilde eğilemediklerinden darbeden kaynaklanan hasarın yayılımı Bölüm 4.4.1 de açıklanan çam ağacı görünümlü (Şekil 4.8a) olarak ortaya çıkmıştır. 5 J darbe enerjisi için hasar bölgesinde oluşan delaminasyon ve radyal çatlaklar Şekil 7.14a'da daha bariz görülmektedir. Yakma testi sonucunda darbe hasarlı

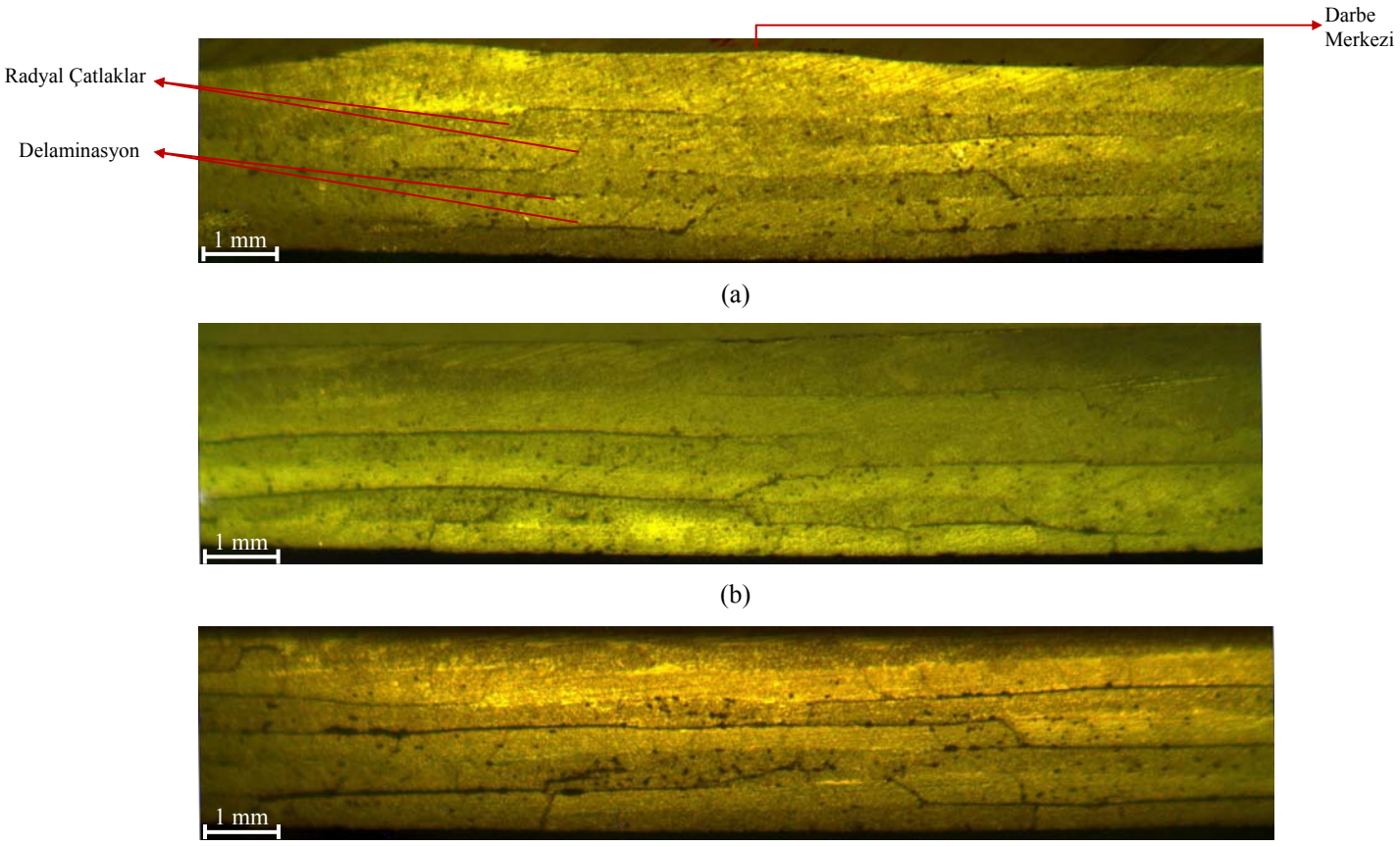
bölgede elyaf kopmaları tespit edilememiştir. Bölüm 7.3.2' de belirtildiği gibi kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde eğilme rijitliğinde ani düşmelerin olmaması elyaf kopmasının olmadığına işaret etmektedir. Yakma testi sonucunda da tüm enerji seviyeleri için darbe hasarlı bölgede elyaf kopmalarının olmadığı görülmüştür. Numunede elyaf hasarının oluşmamasının en büyük sebebi numunenin iç basınç altında düşük hızlı darbeye maruz kalmasıdır. İç basınç numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine neden olmuştur.






(c)

**Şekil 7.12** İç basınç altında düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde a) 5 J b) 10 J c) 15J darbe enerjisinde oluşan ön ve arka hasar bölgeleri

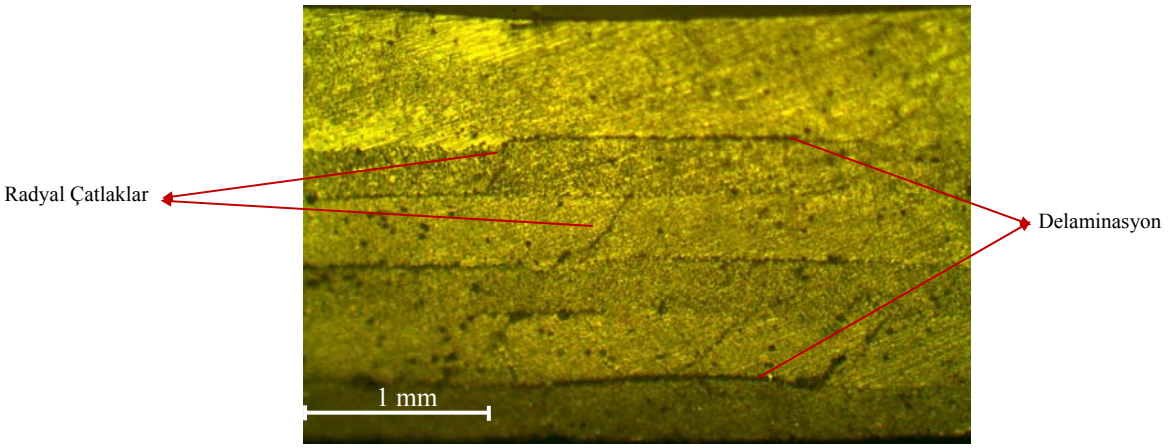



(a)

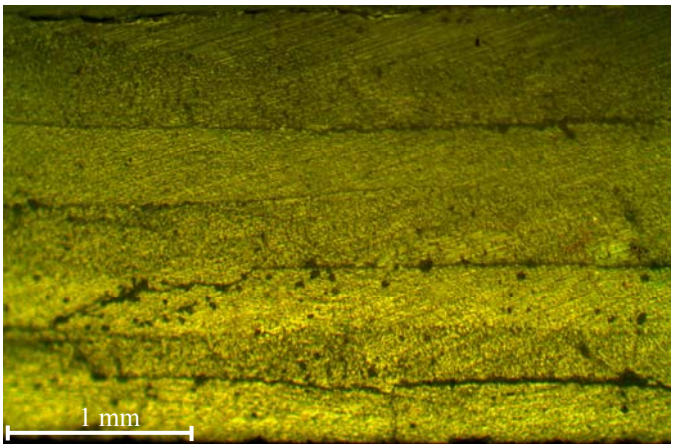
(b)

(c)

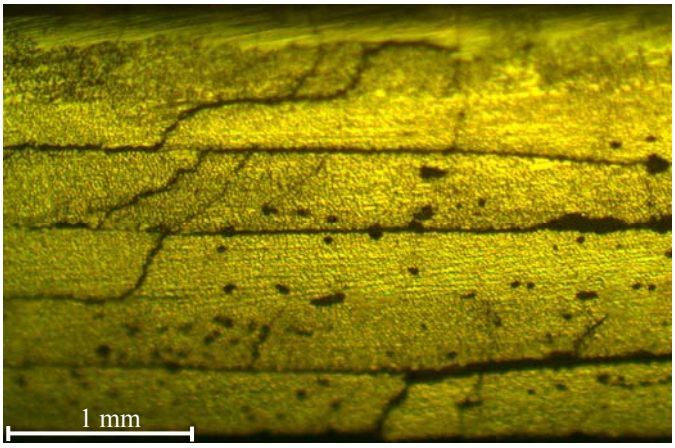
**Şekil 7.13** İç basınç altında düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde a) 5 J b) 10 J c) 15J darbe enerjisinde oluşan enine kesit hasar bölgeleri (Büyütme: 8X)




(a)




(b)




(c)

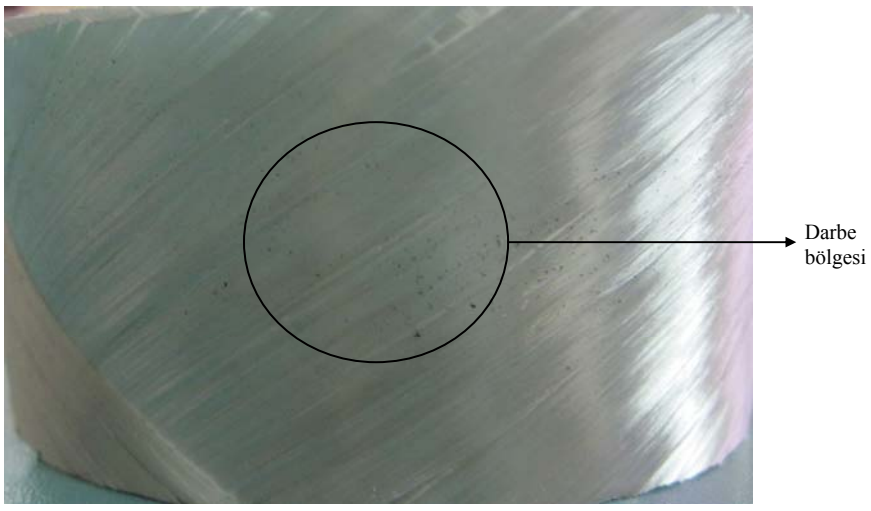
**Şekil 7.14** İç basınç altında düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde a) 5 J b) 10 J c) 15J darbe enerjisinde oluşan enine kesit hasar bölgeleri (Büyütme: 20X)

Şekil 7.12b'de 10 J darbe enerjisi için numunenin ön ve arka bölgelerinde, Şekil 7.13b'de numune kesitinde oluşan hasarlar görülmektedir. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunede oluşan hasar bölgesi 5 J darbe hasarından daha büyük 15 J darbe hasarından daha küçüktür. Hasarlı numunenin ön hasar bölgesi incelendiğinde darbe merkezinde oluşan, vurucunun nüfuziyet bölgesi ve bu bölgeyi saran delaminasyon bölgesi bariz olarak görülmektedir. Delaminasyon bölgesi 5 J darbe hasarında oluşan bölgeden daha büyüktür. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakalar arasında eğilme rijitliği farklılık göstereceği için delaminasyon alanı ±55° elyaf sarım doğrultusunda artış göstermiştir. Numune üst yüzeyinden darbeye maruz bir tabaka için, farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabaka ara yüzeylerinde ve alt tabaka ara yüzeylerinde elyaf açılarına göre meydana gelen delaminasyonlu alanlar dikdörtgen veya yerfıstığı şeklindedir (Abrate 1998). 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP kompozit numunede oluşan delaminasyon alanının yer fıstığı şeklinde olduğu görülmektedir. Numunenin ön yüzeyindeki hasar bölgesinde matris çatlakları oluşmuştur. Oluşan matris çatlakları elyaf sarım doğrultusundadır. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunelerin arka yüzeyinde oluşan hasar alanı ön yüzeyde oluşan alandan daha büyüktür. Bu numunelerin hasar bölgesinin kesit görüntüleri optik mikroskop altında incelendiğinde radyal çatlak oluştuğu gözlenmiş ve bu radyal çatlakların 5 J darbe hasarına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Numune kesitindeki hasar gelişimi numunenin darbe esnasında serbest olarak eğilememesi nedeniyle, 5 J darbe enerji hasarında görüldüğü gibi çam ağacı şeklinde olmuştur. Hasar bölgesinde oluşan delaminasyonlar ve radyal çatlaklar Şekil 7.14b'de verilen 20X büyütmeli kesit görüntüsünde açıkça görülmektedir. Darbe hasarlı numunelerin yakma testi sonucunda darbe hasarlı bölgede elyaf kopmaları tespit edilememiştir. Bu deney numunesinin kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde de eğilme rijitliğinde ani düşmelerin olmaması elyaf kopmasının olmadığına işaret etmektedir.

Şekil 7.12c'de 15 J darbe enerjisi için numunenin ön ve arka bölgelerinde, Şekil 7.13c'de numune kesitinde oluşan hasarlar görülmektedir. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunede oluşan hasar bölgesi 5 J darbe hasarından ve 10 J darbe hasarından daha büyüktür. Numunenin ön hasar bölgesi incelendiğinde nüfuziyet bölgesi ve bu bölgeyi saran delaminasyon bölgesi görülmektedir. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunede oluşan delaminasyon ±55° elyaf sarım doğrultusunda artış göstermiş ve yer fıstığı şeklinde bir hasar meydana gelmişken, 15 J darbe enerjisiyle

hasarlandırılmış numunede dairesel bir hasar bölgesi oluşmuştur. Numunenin ön yüzeyinde ve arka yüzeyinde matris çatlakları oluşmuştur ve oluşan bu çatlaklar 10 J darbe hasarına göre çok daha fazladır. Ön yüzeyde oluşan matris çatlakları elyaf sarım yönünde olduğu gibi darbe merkezini saran dairesel şekilde de oluşmuştur. Bu numunelerin arka yüzeyinde oluşan hasar alanı da diğerlerinde olduğu gibi ön yüzeyde oluşan alandan daha büyüktür. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunelerin hasar bölgesinin kesit görüntüleri optik mikroskop altında incelendiğinde numunede oluşan radyal çatlakların diğer enerji seviyelerine göre çok daha fazla olduğu bariz olarak tespit edilmiştir. Şekil 7.14c'de verilen 20X büyütmeli kesit görüntüsünde numunede oluşan radyal çatlakların tüm tabakalar arasında olduğu görülmektedir.

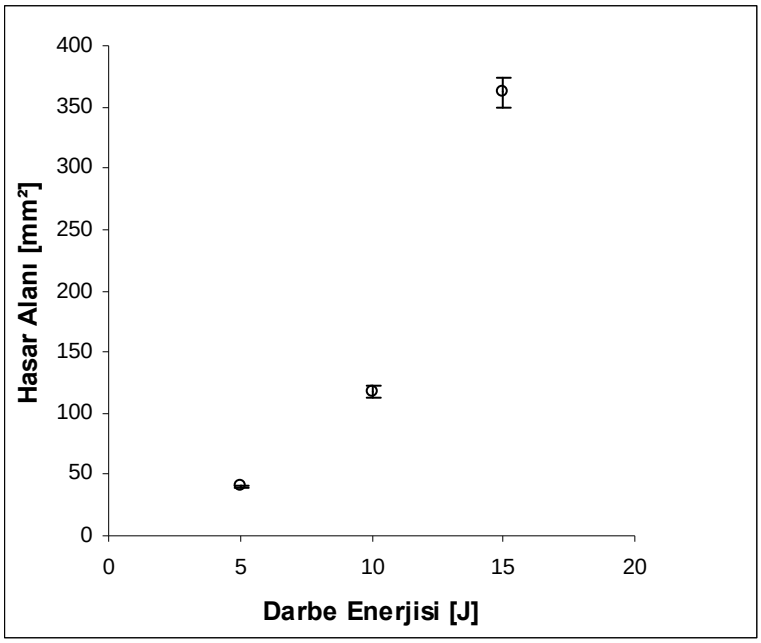
Şekil 7.15'te 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin yakma testi sonucu ön hasar bölgesi görülmektedir. Hasarlı numunelerin yakma testi sonucunda tüm enerji seviyeleri için numunenin ön, arka ve tabakalar arası darbe bölgelerinde herhangi bir elyaf hasarı ve elyaf kopması tespit edilememiştir. Bu deney numunesinin kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde de eğilme rijitliğinde ani düşmelerin olmadığı görülmektedir. Bu durum diğerlerinde olduğu gibi elyaf kopmasının olmadığına işaret etmektedir.




**Şekil 7.15** 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin yakma testi sonucu elde edilen ön hasar bölgesi

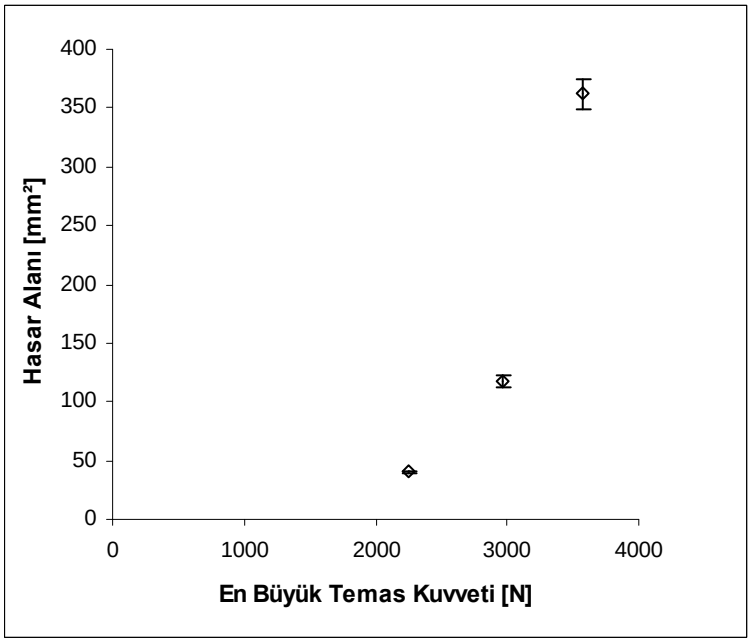
Farklı enerji seviyeleri için CTP kompozit numunelerde oluşan hasar alanı değişimi Şekil 7.16'da verilmiştir. Her bir enerji seviyesi için şekilde verilen hasar alanı

değeri tüm alanları içine alan arka yüzeydeki hasar alanıdır. Darbe enerjisi arttıkça hasar alanının arttığı şekilde açıkça görülmektedir.




**Şekil 7.16** Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi

Şekil 7.17'de farklı enerji seviyeleri için numunelerde oluşan en büyük temas kuvveti-hasar alanı değişimi verilmiştir. Numunede meydana gelen en büyük temas kuvvetinin armasıyla hasar alanının arttığı bariz olarak görülmektedir.




**Şekil 7.17** Değişik numunelerde darbe enerjisi-toplam hasar alanı değişimi

### 7.3.8 Özgül Hasar Enerjisi

Birim hasar hacmi başına düşen yutulan enerji miktarı, özgül hasar enerjisi olarak isimlendirilmiştir. Darbe enerjisi-özgül hasar enerjisi değişiminden yararlanarak ara enerji değerleri için numunede oluşacak hasar hacminin ve buna bağlı olarak hasar alanının tespit edilebileceği önerilmektedir. Bu çalışma için elde edilen darbe enerjisi-özgül hasar enerjisi değişimleri Ek 2'de sunulmuştur.

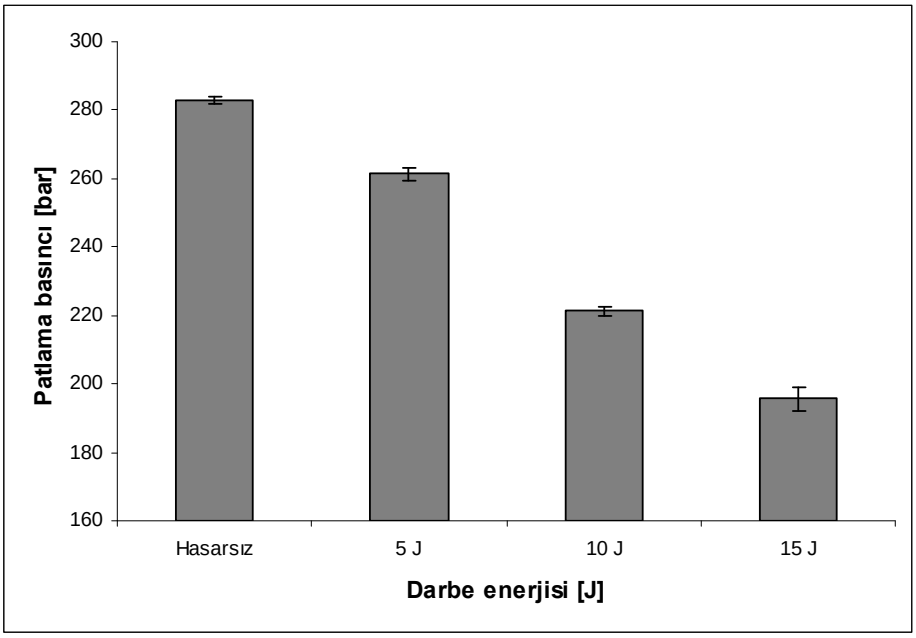
## 7.4. Darbe Hasarlı CTP Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları

CTP kompozit boru numuneleri farklı darbe enerjileri ile hasarlandırıldıktan sonra statik iç basınç patlama testine tabi tutulmuştur. Statik iç basınç patlama testleri CTP numunelerin hasar gördükten sonra statik patlama mukavemetinde meydana gelen değişimleri tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Statik iç basınç testi öncelikle hasarsız numuneler için gerçekleştirilmiş ve hasarsız numunenin statik iç basınç patlama değeri tespit edilmiştir. Daha sonra sırasıyla 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin statik iç basınç patlama değerleri tespit edilmiştir. ASTM D 1599-99 standartlarına göre yapılan statik iç basınç patlama deneylerinde numunelerde oluşan son hasar (patlama) 60-70 saniye süre sonunda gerçekleşmelidir. Ulaşılan en büyük basınç değeri o numuneye ait patlama basıncı olarak belirlenmiştir. CTP borularda statik iç basınç patlama testi esnasında oluşan hasar mekanizmaları ve düşük hızlı darbe hasarının bu mekanizmalara etkisi incelenerek değerlendirilmiştir. CTP borularda düşük hızlı darbe yapılarak oluşturulan ön hasarın statik patlama testi esnasındaki gelişimi gözlemlenmiştir.

### 7.4.1. Darbe hasarlı boruların patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi

CTP kompozit boru numunelerine düşük hızlı darbe testlerinde uygulanan darbe enerjisi miktarı arttıkça deney numunelerinin patlama mukavemetinde düşme olmaktadır. Uygulanan darbe enerjisi çok küçük değerlerde olsa bile patlama mukavemetinde düşme meydana getirmektedir (Gning 2004). Statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi Şekil 7.18'de verilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi darbe deneylerinde uygulanan darbe enerjisi seviyesi arttıkça deney numunelerinin statik iç basınç patlama değerlerinde düşme

meydana gelmiştir. Bunun en önemli nedeni darbe enerjisi arttıkça numunede meydana gelen hasarların artmasıdır. Darbeye maruz kalmış deney numunesinde oluşan hasarların artması patlama basıncı değerinin düşmesine sebep olmuştur. 5 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunenin patlama basıncında yaklaşık olarak %8'lik bir kayıp meydana gelmiştir. 10 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunenin patlama basıncında yaklaşık olarak %22'lik bir azalma oluşurken 15 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunenin patlama basıncında yaklaşık olarak %31'lik bir azalma meydana gelmiştir. Darbe deneyleri esnasında numunelerin iç basınç etkisinde olması sebebiyle darbe sonrasında numunelerde elyaf hasarları meydana gelmemiştir. Bu durum darbe hasarlı numunelerin yakma testi sonucunda, hasar bölgelerinin incelenmesiyle tespit edilmiştir. Uygulanan iç basınç, numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine neden olduğu için numunelerde elyaf hasarlarının meydana gelmemesi, patlama basıncındaki düşmenin çok daha büyük olmasını engellemiştir. Patlama basıncı değerinin azalmasında en çok etkili olan hasar mekanizması delaminasyondur. İlaveten numune kesitinde darbe sonrası oluşan radyal çatlaklar patlama basıncının düşmesinde etkili olmuştur. Darbe enerjisi arttıkça delaminasyon alanı ve radyal çatlaklar artmaktadır. Bu artış CTP numunenin patlama basıncı değerinin düşmesine neden olmaktadır. Statik iç basınç patlama testi esnasında basıncın yükselmesiyle tabakalar arası oluşan radyal çatlaklar ilerlemekte, basınçlı yağ bu çatlaklardan delaminasyon alanına dolmaktadır. Bu şekilde yağın yüzeye ulaşması daha düşük basınçlarda gerçekleşmekte ve darbe hasarlı numunede meydana gelen son hasar daha düşük basınçlarda oluşmaktadır. 5 J darbe enerjisi ile hasarlanmış numunede bu tür çatlaklar çok azdır ve patlama mukavemetindeki azalma diğerlerine göre çok daha düşüktür. 15 J darbe enerjisi ise numunede çok fazla radyal çatlak ve delaminasyon meydana getirdiği için numunenin patlama basıncındaki düşme diğerlerine göre çok daha fazla olmuştur.




**Şekil 7.18** Darbe hasarlı CTP boruların statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi

### 7.4.2. Darbe hasarlı boruların patlama hasar analizi

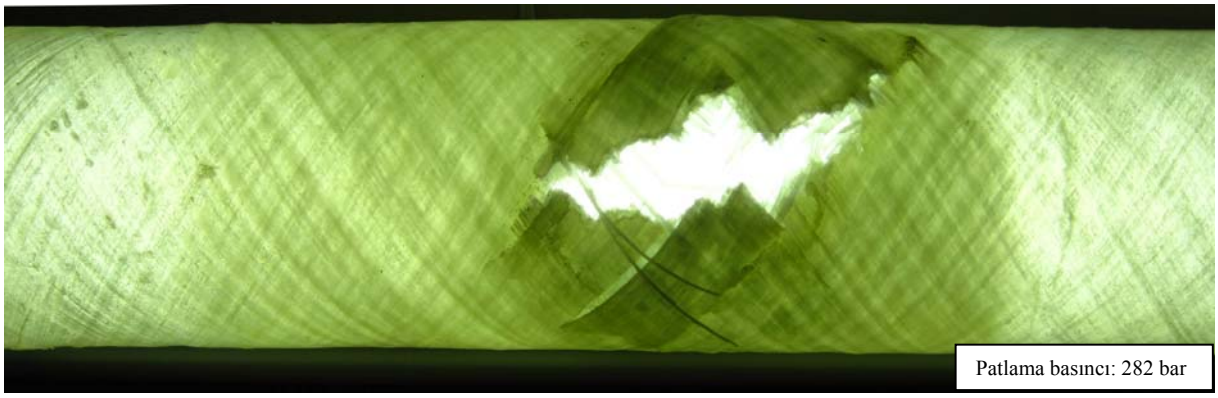
Statik iç basınç patlama deneyleri esnasında beş önemli hasar aşaması tespit edilmiştir. Bu hasar aşamaları sırasıyla beyazlaşma başlangıcı, yoğun beyazlaşma, sızıntı başlangıcı, su jeti oluşumu ve sonuç hasarıdır. Statik iç basınç patlama deneyinde iç basıncın etkisiyle elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmıştır. Bunun neticesi olarak deney numunesinin boyunda kısalma olurken çapında artma meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak ± elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Elyafa dik çekme gerilmeleri ve elyafa paralel kayma gerilmelerinin etkisiyle elyaf doğrultusunda ince beyaz çizgiler oluşmaya başlamıştır. Belirlenen hasar aşamalarından birincisi elyaf doğrultusunda oluşmaya başlayan bu ince beyaz çizgilerdir. Numunede ince beyaz çizgilerle başlayan beyazlaşma, basıncın artmasıyla çoğalmaya başlamıştır. Basınç yükseldikçe beyazlaşmanın artışı delaminasyonun bir işaretidir (Gemi 2004). Tabakalı kompozit malzemede farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebeplerinden birisi de tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı kayma gerilmeleridir. İç basıncın etkisiyle numunede eğilme kaynaklı kayma gerilmeleri de ortaya çıkmaktadır. Numunede meydana gelen yoğun beyazlaşma ikinci hasar aşaması olarak tespit edilmiştir. Bu hasar aşamasında numunenin büyük bir

bölümünde veya tamamında delaminasyon meydana gelmiş, elyaf matris ara yüzey ayrılmaları gerçekleşmiştir. Numunede yoğun beyazlaşma oluştuktan sonra tabakalar arası matris çatlakları ilerlemiş ve numunede damlama veya terleme şeklinde ilk sızıntı gerçekleşerek üçüncü hasar aşaması ortaya çıkmıştır. İç basıncın artmaya devam etmesi nedeniyle numunede meydana gelen sızıntı su jetine dönüşerek dördüncü hasar aşamasının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kısa bir süre sonra yoğun su jeti veya infilak şeklinde kompozit numunede son hasar meydana gelmiştir.

Şekil 7.19'da sırasıyla hasarsız, 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen son hasar fotoğrafları görülmektedir. Son hasar fotoğrafları deney numunelerinin içerisinden ışık geçirerek yüksek çözünürlükte çekilmiştir. Böylece numunelerde meydana gelen sonuç hasarları çok daha net olarak ortaya çıkarılmıştır. Statik iç basınç patlama deneylerinde CTP kompozit boru numunelerinde meydana gelen beyazlaşma şeffaflığın yitirilmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle numunenin içerisinden ışık geçirilerek fotoğraf çekildiğinde beyazlaşma olan bölgeler mat olarak görülmektedir. Statik iç basınç patlama deneylerinde numunelerde meydana gelen hasar gelişimi değerlendirilirken bu durumun dikkate alınması önemlidir. Beyazlaşma olan bölgeler içerisinden geçen ışığı şeffaf olarak geçirmeyen ve fotoğrafta mat olarak görülen bölgelerdir.

Hasarsız CTP kompozit deney numunelerinin statik iç basınç patlama testi esnasında uygulanan iç basıncın etkisiyle ±55° yönündeki elyaflar teğetsel doğrultuya yönlenmeye çalışmış ve numune çapı artmaya başlarken boyu kısalmaya başlamıştır. Buna bağlı olarak ± elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmaya başlamıştır. Ayrıca iç basıncın etkisiyle farklı elyaf yönlenmelerindeki eğilme rijitliği farklılığından dolayı kayma gerilmeleri ortaya çıkmıştır. İç basınç arttıkça gerilme değerleri artmaya devam etmiş ve 170 bar civarında bu gerilmelerin etkisiyle numunede elyaf doğrultusunda ince beyaz çizgilerin oluştuğu gözlenmiştir. Beyaz çizgiler elyaf matris ara yüzey ayrılmasının ve delaminasyonların başlamasının işaretidir. Beyazlaşma başladıktan sonra numunelerde meydana gelen hasarlar kalıcı hasarlardır. 240 bar basınç değerine ulaşıncaya kadar beyazlaşma hızla devam etmiş, 240 bar basınçta numune tüm çevresi boyunca beyazlaşmıştır. Elyafların büyük çoğunluğu matristen ayrılmış ve numunenin tamamında ya da tamamına yakınında delaminasyon meydana gelmiştir. 240 bar basınç değerinde numunede meydana gelen çap artışı açık olarak görülmüştür. Numuneye uygulanan basınç arttırıldıkça numunede tabakalar arası matris çatlamaları oluşmaya başlamış ve çatırdama şeklinde sesler

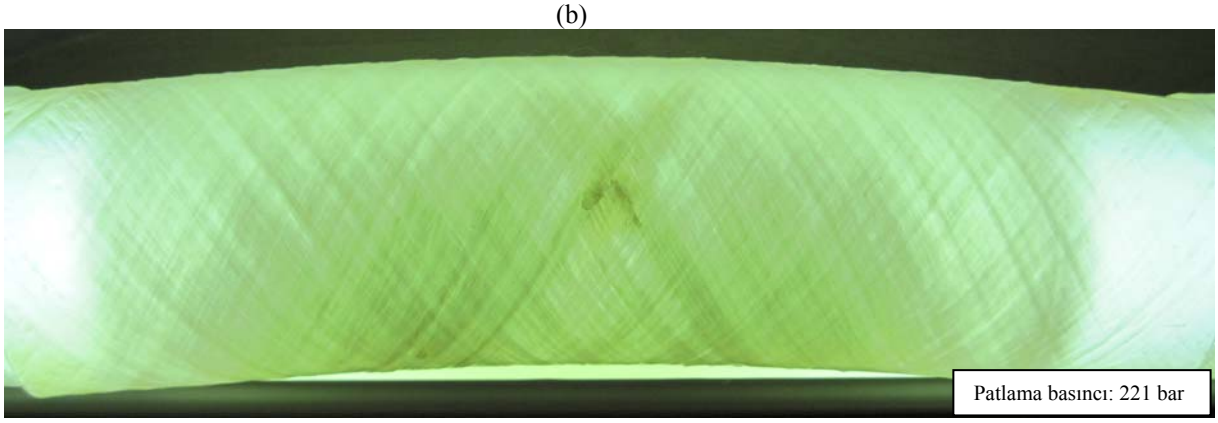
gelmeye başlamıştır. Numunede reçine yoğunluğunun az olduğu tarafa doğru sehim gerçekleşmiştir. 282 bar basınç değerine ulaşıldığında numunede elyafların kopması gerçekleşmiş ve deney numunesi infilak ederek büyük bir gürültüyle patlamıştır. Patlamanın etkisiyle numunede yarılma meydana gelmiş ve son hasar oluşumu gerçekleşmiştir. Hasarsız deney numunesinin statik iç basınç patlama deneyinde sızıntı başlangıcı ve su jeti oluşumu gözlenmemiştir. Şekil 7.19a'da darbe hasarsız borunun statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen son hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğrafta numunede oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları net olarak görülmektedir. Son hasarın oluştuğu patlama bölgesi incelendiğinde elyafların matristen ayrıldıktan sonra koptuğu ve borunun yarılarak açıldığı görülmektedir. Serbest uçlu iç basınç altındaki borularda en büyük gerilme teğetsel yönde oluşmaktadır. Bu nedenle boruda meydana gelen yarılmanın eksenel yönde başladığı ve elyaf sarım yönünde ilerlediği görülmektedir.



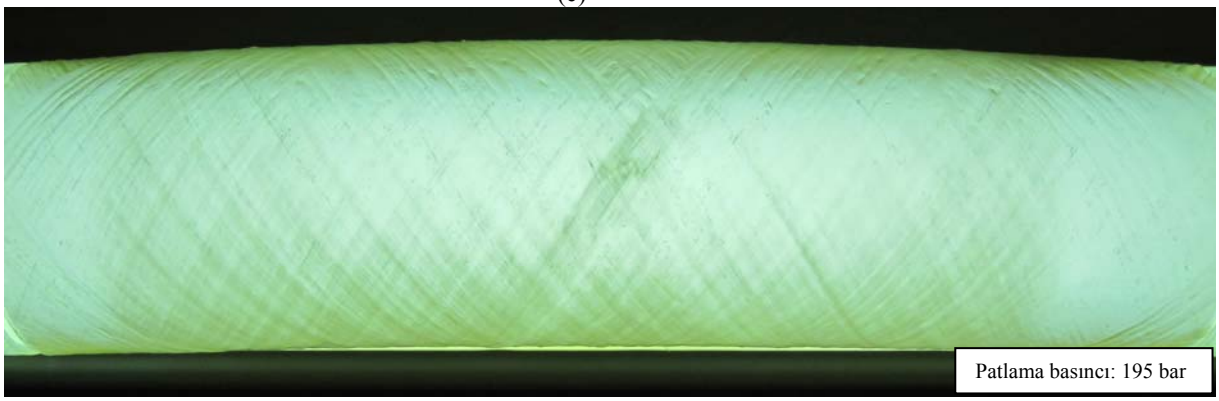

(a)




(b)




(c)




(d)

**Şekil 7.19** CTP boruların statik iç basınç testi sonucu a) darbe hasarsız b) 5 J c) 10 J ve d) 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunede oluşan son hasar görünümü

5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde elyaf doğrultusunda küçük bir delaminasyon alanı mevcuttur. Kesit görüntüsü incelendiğinde radyal çatlakların çok az olduğu tespit edilmiştir. Hasarlı numune statik iç basınç patlama testine maruz bırakıldığında numunede oluşan ön hasarın patlama mukavemetinde düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Numunedeki darbe hasarının, hasar gelişimine de etkisi olmuştur. Statik iç basınç patlama testi esnasında iç basıncın artmaya başlamasıyla elyafların teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışması, farklı yönlenmeye sahip elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda oluşan kayma ve basma gerilmelerini arttırmaya başlamıştır. Bu gerilmelerin etkisiyle iç basınç değeri 170 bara ulaştığında darbe bölgesinde, darbe hasarından kaynaklanan beyazlaşma artmaya başlamıştır. Beyazlaşmanın artmaya başlaması numunede darbe hasarının dışında kalıcı hasarların oluşmaya başladığına işaret etmektedir. Basıncın artmasıyla numunede oluşan beyazlaşma da artmaktadır. Elyaf matris ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyonlar olarak ifade edilen bu beyazlaşmalar tüm numuneyi sarmaya başlamış ve 240 bara ulaşıldığında numunenin çevresi boyunca beyazlaşma oluşmuştur. Deney numunesinde iç basıncın etkisiyle reçine yoğunluğunun az olduğu yerde sehim oluşmuştur. Uygulanan iç basınç değeri 260 bar olduğunda deney numunesi darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamıştır. Bu deney numunesinde de hasarsız numunede olduğu gibi sızıntı başlangıcı ve yoğun su jeti oluşumu gözlenmemiştir. 5 J darbe hasarlı numunede statik iç basınç testindeki hasar gelişimi darbe hasarsız numuneye benzemektedir. Farklı olarak hasarsız numunede beyazlaşma herhangi bir noktadan başlayıp artarken 5 J darbe hasarlı numunede darbe bölgesinden artmaya başlamıştır. Başlangıç ön hasarından dolayı patlama mukavemetinde bir miktar düşme olmuştur. Şekil 7.19b'de 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen son hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde numunede oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca darbe hasarlı yerden elyafların koparak borunun yarıldığı görülmektedir.

10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde ±55° elyaf sarım doğrultusunda yerfıstığı şeklinde delaminasyon alanı ve yüzeyde matris çatlakları mevcuttur. Ayrıca numune kesitinde radyal çatlaklar oluşmuştur. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunenin statik iç basınç patlama testinde numunedeki darbe hasarının patlama mukavemetinde bariz bir düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Numunedeki darbe hasarı statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimi üzerinde de

etkili olmuştur. Statik iç basınç patlama testine başlandığında numuneye verilen iç basıncın artmasıyla borunun elyaf doğrultusu teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmış ve buna bağlı olarak numunenin çapı artmaya boyu ise kısalmaya başlamıştır. Numunenin farklı elyaf doğrultularının kesiştiği noktalarda meydana gelen gerilmeler çaptaki ve boydaki değişimde etkili olmuştur. İç basınç değeri 170 bar civarına ulaştığında 5 J darbe hasarlı numunede olduğu gibi darbe bölgesindeki beyazlaşma artmaya başlamıştır. Beyazlaşmanın artmaya başlaması kompozit numunede darbe hasarının haricinde başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe hasarından kaynaklanan delaminasyonların artmasını ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının oluştuğunu işaret etmektedir. Basıncın artmaya devam etmesi neticesinde numunede oluşan beyazlaşma da artmaya devam etmiştir. Beyazlaşmanın işaret ettiği elyaf matris ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyonlar tüm numuneyi sarmaya başlamıştır. 210 bar basınca ulaşıldığında numunenin darbe hasarlı bölgesinden damlama ve terleme şeklinde sızıntı başlangıcı meydana gelmiştir. Basıncın artmasıyla damlama şeklinde olan sızıntı su jetine dönüşmüş ve 221 bar basınçta yoğun su jeti oluşmuştur. Numunede infilak etme şeklinde bir patlama meydana gelmemiştir. Bunun en önemli sebebi numune kesitinde düşük hızlı darbe neticesinde oluşan tabakalar arası radyal çatlaklardır. İç basıncın etkisiyle bu çatlaklar ilerlemiş ve basınçlı yağ delaminasyon bölgesine dolarak yüzeye doğru yükselmiştir. Yüzeyde bulunan matris çatlakları da büyümüş ve numunede infilak olmaksızın basınçlı yağ sızmaya başlamıştır. Basıncın artmasıyla çatlaklar açılarak yoğun su jeti oluşmasına sebebiyet vermiştir. Hasarsız ve 5 J darbe hasarlı numune infilak ederek patlarken 10 J darbe hasarlı numune infilak etmeksizin sonuç hasarına ulaşmıştır. Ancak 10 J darbe hasarlı numunede de beyazlaşma diğerlerinde olduğu gibi 170 bar civarında başlamıştır. Şekil 7.19c'de 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama deneyi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde numunede oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının darbe hasarlı bölgeye doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Yoğun su jetinin oluştuğu bölgede yarılma meydana gelmediği ve boruda bir miktar sehim oluştuğu görülmektedir.

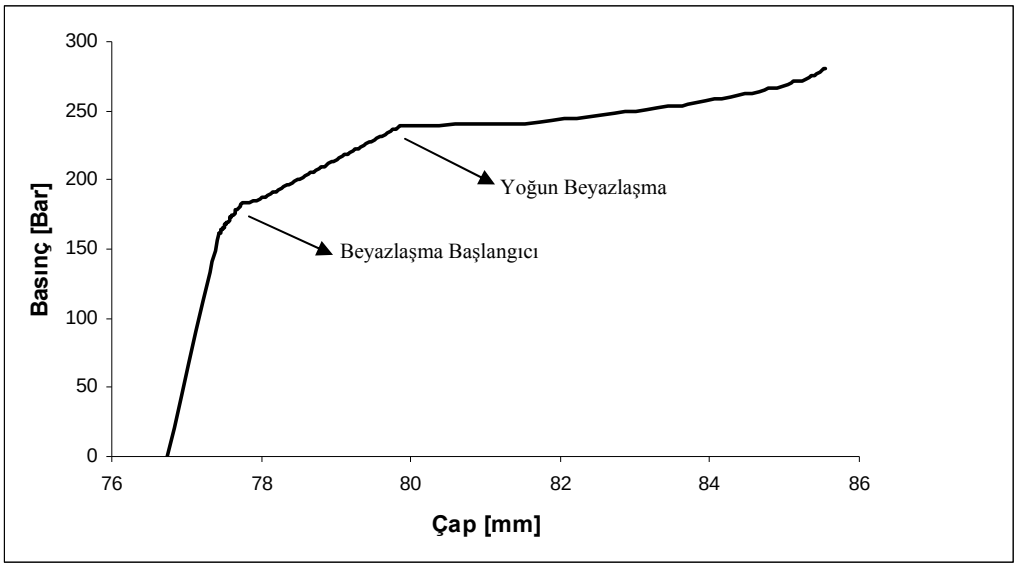
15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde ±55° elyaf sarım doğrultusunda daha yoğun olmak üzere dairesel şekilde delaminasyon alanı ve yüzeyde bariz matris çatlakları oluşmuştur. İlaveten numune kesitinde tüm tabakalar arasında radyal çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numuneden çok daha fazladır. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunenin statik

iç basınç patlama testinden elde edilen sonuçlara göre numunedeki darbe hasarı patlama basıncı değerinde ciddi bir düşmeye sebep olmuştur. Deney numunesinde 15 J darbe enerjisiyle oluşturulan hasar statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimine de önemli bir etki yapmıştır. Statik iç basınç patlama testine maruz bırakılan darbe hasarlı numunede, uygulanan iç basıncın artmasıyla borunun öncekilerde olduğu gibi elyaf doğrultusu teğetsel doğrultuya yönelmeye çalıştığı için numune çapı artmaya numune boyu kısalmaya başlamıştır. Numunenin farklı elyaf doğrultularının kesiştiği noktalarda gerilmeler meydana gelmiş ve bu gerilmeler çaptaki ve boydaki değişimde etkili olmuştur. Bundan önceki deneylerde olduğu gibi iç basınç değeri 170 bar civarına ulaştığında 15 J darbe hasarlı numunede de darbe bölgesindeki beyazlaşma artmaya başlamıştır. Beyazlaşmanın artmaya başlaması; öncekilerde olduğu gibi kompozit numunede darbe hasarının haricinde başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe hasarından kaynaklanan delaminasyonların artmasını ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının oluştuğunu göstermektedir. Basıncın artmaya devam etmesi neticesinde numunede oluşan beyazlaşma da artmaya devam etmiştir. Elyaf matris ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyonlar numuneyi sarmaya başlamış. 190 bar basınca ulaşıldığında darbe bölgesinden damlama ve terleme şeklinde sızıntı başlangıcı meydana gelmiştir. 10 J darbe hasarlı numunede olduğu gibi basıncın artmasıyla damlama şeklinde olan sızıntı su jetine dönüşmüştür. 195 bar basınç değerine ulaşıldığı anda yoğun su jeti oluşumu gerçekleşerek numune infilak etmeksizin son hasara ulaşmıştır. Numunede tüm çevresi boyunca beyazlaşma gerçekleşmemiştir. Numunede infilak olmamasının en önemli nedeni numunede darbe hasarından kaynaklanan ve tüm tabakalar arasında oluşan radyal çatlaklardır. 10 J darbe hasarlı numunede olduğu gibi bu çatlaklar iç basıncın etkisiyle büyümüş ve basınçlı yağ delaminasyon bölgesine dolarak yüzeye doğru yükselmiştir. Yüzeyde bulunan matris çatlakları da büyümüş ve numunede infilak olmaksızın basınçlı yağ sızmaya başlamıştır. Basıncın artmasıyla çatlaklar açılarak yoğun su jeti oluşmasına sebebiyet vermiştir. Tabakalar arası çatlak miktarının fazla olması sebebiyle son hasara ulaşma daha düşük basınç değerinde gerçekleşmiştir. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunede de beyazlaşma diğerlerinde olduğu gibi 170 bar civarında başlamıştır. Şekil 7.19-d'de 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama deneyi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde numunede oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının diğerlerine göre daha az olduğu görülmektedir. Çünkü öncekilerde sonuç hasarı daha yüksek basınçlarda

oluştuğu için numunede daha fazla elyaf matris ara yüzey ayrılması ve delaminasyonlar meydana gelmiştir. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunede ise darbe hasarlı bölgenin kesitinde tabakalar arası çatlaklar çok fazladır. Bu çatlaklar statik iç basınç patlama testi esnasında numunede daha düşük basınçta sonuç hasarının oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca yoğun su jetinin oluştuğu bölgede yarılma meydana gelmediği ve boruda bir miktar sehim oluştuğu görülmektedir.

### 7.4.3 Statik iç basınç patlama testinin numune çap değişimine etkisi

CTP kompozit boruların statik iç basınç patlama testi esnasında numunede meydana gelen çap değişimi tespit edilmiş ve iç basınca bağlı çap değişim grafiği olarak verilmiştir. Şekil 7.20'de hasarsız CTP numunenin statik iç basınç patlama testinden elde edilen iç basınca bağlı çap değişim grafiği görülmektedir.

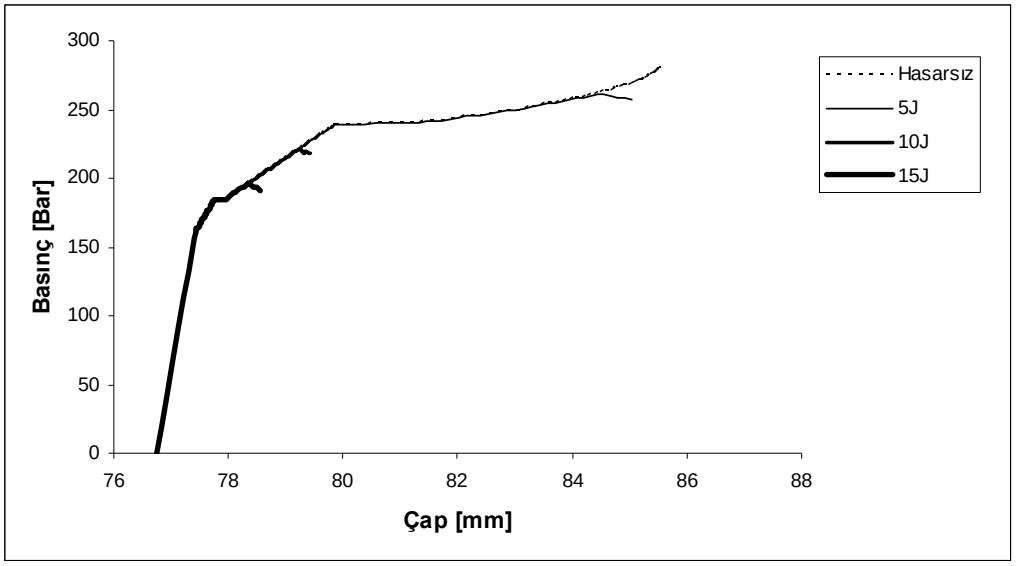



**Şekil.7.20** Hasarsız CTP kompozit numunenin statik patlama testindeki çap-iç basınç değişimi

Test esnasında numuneye uygulanan iç basınç değerinin artmaya başlamasıyla numune çapı da artmaya başlamıştır. Hasar analizinde de bahsedildiği gibi 170 bar civarında numunede beyazlaşma başlamıştır. 170 bar civarındaki basınç değeri grafikte doğrusallığın bozulduğu yer olarak görülmektedir. Bu basınç değerinden sonraki hasarlar kalıcı hasarlardır. Beyazlaşma 240 bara kadar hızla devam etmiştir. 240 bar basınç değerinde numunenin tüm çevresi boyunca beyazlaşma gerçekleşmiş ve elyafların büyük çoğunluğu matristen ayrılmıştır. Grafikten de görüldüğü üzere 240 bar

basınç değerinden sonra çap değişimi daha fazla artarak 282 bar a kadar devam etmiştir. 282 barda numune infilak ederek patlamış ve son hasara ulaşılmıştır.

Şekil-7.21'de hasarsız ve değişik darbe enerjilerinde hasarlandırılmış CTP kompozit boruların statik patlama testinden elde edilen, iç basınca bağlı çap değişim grafiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi farklı darbe hasarlarına sahip numunelerin statik iç basınç patlama testinden elde edilen çap değişim eğrileri, hasarsız numuneden elde edilen eğriye paraleldir. Bunun sebebi olarak Bölüm 7.3.7 düşük hızlı darbe hasar analizinde incelendiği üzere, düşük hızlı darbe neticesinde elyaflarda hasar olmaması gösterilebilir. Boru rijitliğine elyafın katkısı reçineden daha fazladır. Bunlardan dolayı hasarlı borulardaki basınç-çap değişimi sonuç hasarlarına kadar darbe hasarsız boruda gerçekleşen ile aynı olmuştur. Darbe hasarlı borularda sonuç hasarı gelişmeden çok az önce bir miktar basınç düşmesi gözlenmiştir. 5J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunede, hasarsız numuneye paralel çap artışı olmuş ve basınç 260 bara ulaştığında hasar yerinden infilak ederek patlamıştır. 10J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numune, beyazlaşma başlangıcından sonra 221 bar basınçta infilak etmeksizin darbe bölgesinden yoğun su jetiyle son hasara ulaşmıştır. 15J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numune ise beyazlaşma başlangıcından sonra 195 barda infilak etmeksizin darbe bölgesinden yoğun su jetiyle son hasara ulaşmıştır.




**Şekil 7.21** Hasarsız ve değişik darbe enerjileriyle hasarlandırılmış CTP kompozit numunelerin statik patlama testindeki çap-iç basınç değişimi

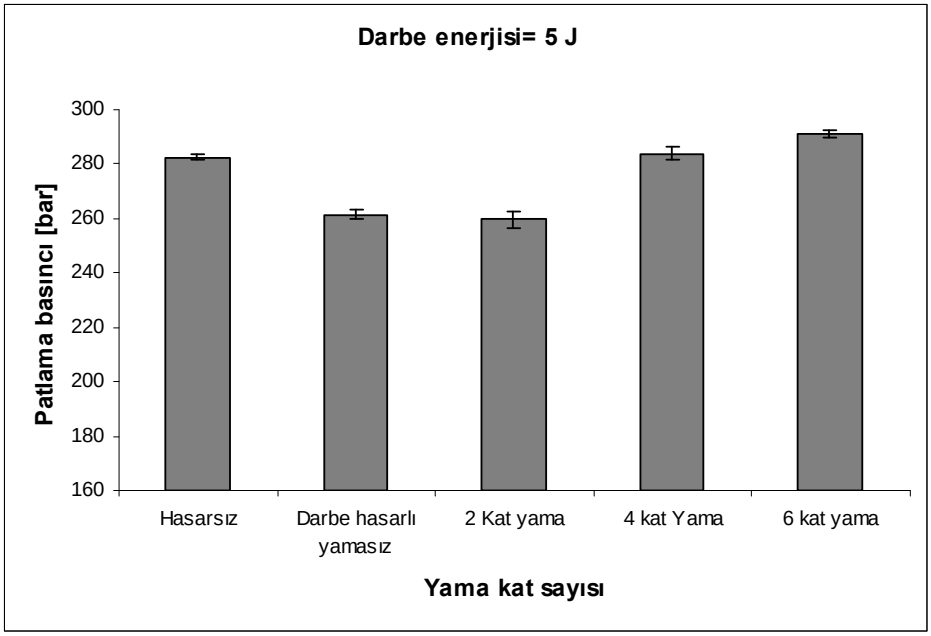
## 7.5. Onarılmış CTP Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları

CTP kompozit boru numuneleri 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırıldıktan sonra darbe hasar bölgeleri 0.15 mm kalınlıklı, 200 g/m$^2$'lik E-camı kumaş ile 100 mm genişliğinde tüm çevre boyunca 2, 4 ve 6 kat yama yapılarak onarılmıştır. Darbe hasar bölgeleri, farklı katlarda yama ile onarılmış CTP kompozit numuneler ASTM D 1599-99 standartlarına göre statik iç basınç patlama testine maruz bırakılmışlardır. Statik iç basınç patlama testleri onarılmış numunelerin tamir gördükten sonra patlama basıncı değerinde meydana gelen değişimleri tespit etmek ve tamir işleminin patlama basıncı değerine etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Farklı darbe enerjileriyle hasarlandırılmış numuneler, tamir edilmeden statik iç basınç patlama testine maruz bırakıldıklarında patlama basınçlarında hasarsız numuneye göre düşme olduğu tespit edilmiştir. Hasarlı numunelerin statik patlama basıncı değerlerinin tamir işleminden sonra hasarsız numunenin patlama basıncı değerlerine ulaşması beklenmektedir. Bu nedenle farklı darbe enerjilerinde hasarlandırılan numunelerin 2, 4 ve 6 kat yama ile onarılması neticesinde hasarsız patlama basıncı değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Yama kat sayısının numunenin patlama basıncında meydana getirdiği değişmeler belirlenerek değerlendirilmiştir. Ayrıca onarım işleminin CTP kompozit boru numunelerinde, statik iç basınç patlama testi esnasında oluşan hasar mekanizmalarına etkisi tespit edilerek değerlendirilmiştir.

### 7.5.1. Artan darbe enerji seviyeleri için patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi

5 J darbe enerjisi ile hasarlandırıldıktan sonra hasar bölgesi farklı katlarda yama ile tamir edilmiş CTP kompozit boru numunelerinden statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen, yama kat sayısına göre patlama basıncı değişimi Şekil 7.22'de verilmiştir. Şekilde hasarsız ve hasar gördükten sonra yama yapılmamış numunenin de patlama basıncı değerleri verilerek karşılaştırma yapılmıştır. Hasarlı numunelerdeki yama kat sayısı arttıkça patlama basıncı değerinde artış olduğu şekilde açıkça görülmektedir. 2 kat yama yapılmış numunenin patlama basıncı yamasız numuneye göre artış göstermemiştir. Bu nedenle 5 J darbe enerjisiyle hasar görmüş numuneye 2 kat yama yapılmasının herhangi bir faydası olmamaktadır. 4 kat yama yapılmış numunenin patlama basıncı 283 bar olarak ölçülmüştür. Hasarsız numunenin 282 barda patladığı düşünülerek 4 kat yamanın 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numuneler

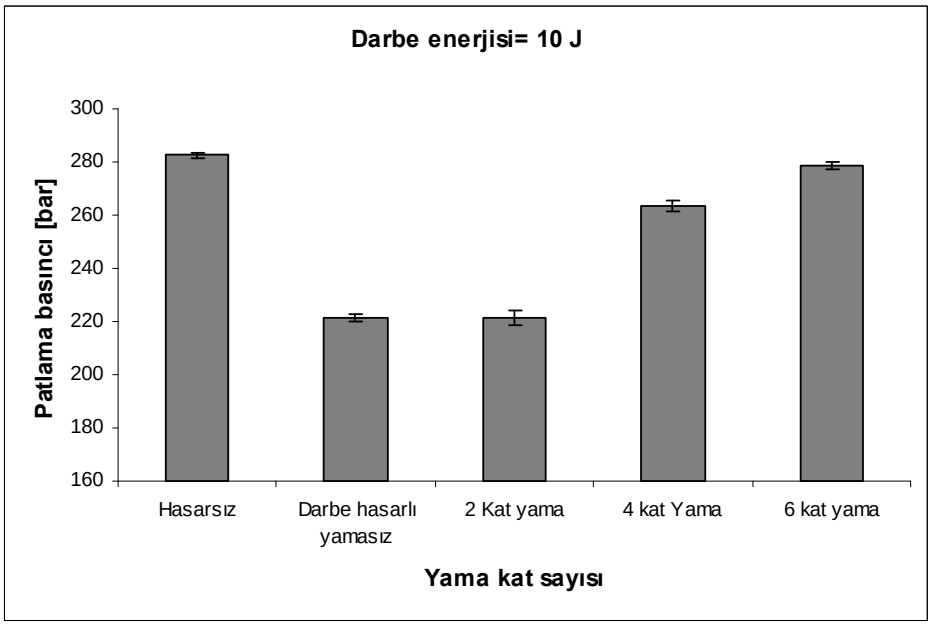
için uygun olduğu tespit edilmiştir. 6 kat yama yapılmış numunenin patlama basıncı ise 291 bar olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu patlama basıncı değeri hasarsız patlama basıncı değerinden daha yüksektir. 5 J darbe enerjisiyle düşük hızlı darbeye maruz kalmış CTP kompozit boru numunelerinde meydana gelen darbe hasarının 2 kat yama ile tamir edilmesinin uygun olmadığı 4 kat veya 6 kat yama yapılması gerektiği belirlenmiştir.




**Şekil 7.22** 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi

Şekil 7.23'te 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış ve hasar bölgesi değişik katlarda yama ile tamir edilmiş CTP kompozit boru numunelerinden, statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen, yama kat sayısına göre patlama basıncı değişimi verilmiştir. Şekilde hasarsız ve 10 J darbe enerjisiyle hasar gördükten sonra yama yapılmamış numunenin patlama basıncı değerleri de verilmiştir. Şekilde tamir edilmiş hasarlı deney numuneleri için yama kat sayısı arttıkça patlama basıncında da artış olduğu görülmektedir. 5 J darbe hasarlı deney numunesinde olduğu gibi bu numune için de 2 kat yama tamirinin patlama basıncında yamasız numuneye göre herhangi bir artış göstermediği belirlenmiştir. Bu nedenle 10 J darbe enerjisiyle hasar görmüş numuneye 2 kat yama yapılmasının patlama basıncı değerine herhangi bir faydası olmamaktadır. 4 kat yama yapılmış numunenin patlama basıncı 263 bar olarak ölçülmüştür. Bu değer hasarsız numunenin patlama basıncı değerinden düşük olmakla beraber tamir edilmemiş numunenin patlama basıncı değerinden yüksektir. Yama tamirinin amacı numunenin patlama basıncını hasarsız patlama basıncına ulaştırmaktır. Bu nedenle 4 kat yama

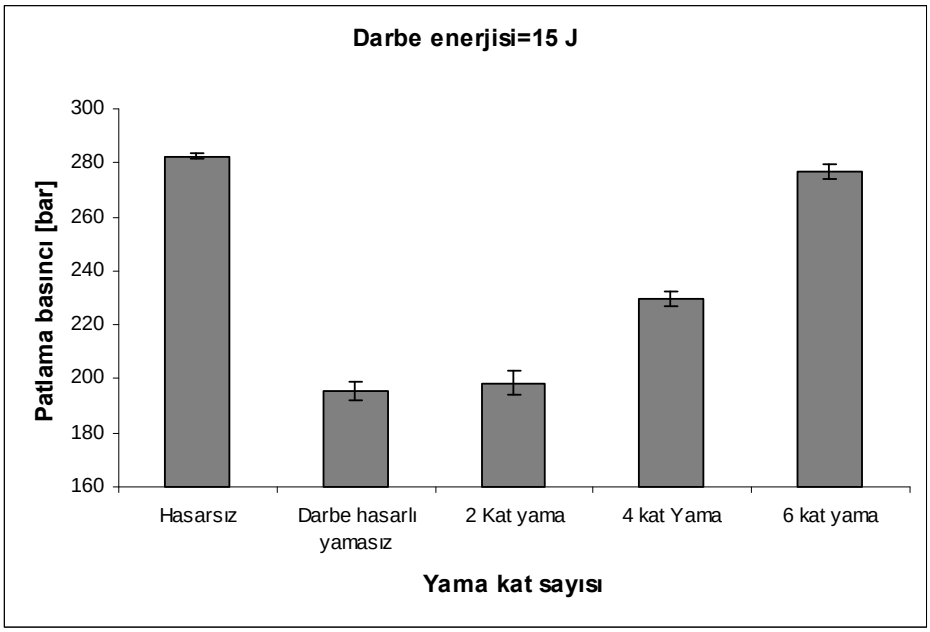
tamiri uygun görülmemiştir. Çünkü istenilen basınç değerine ulaşılamamıştır. 6 kat yama yapılmış numunenin patlama basıncı değeri ise 278 bar olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu patlama basıncı değeri hasarsız patlama basıncı değerinden daha azdır ancak bu fark %1,5 civarındadır. Bu nedenle 6 kat yama tamiri 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP kompozit numuneler için uygundur. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış CTP kompozit boru numunelerinde oluşan darbe hasarının 2 ve 4 kat yama ile tamir edilmesinin uygun olmadığı tespit edilmiş olup bu numunelerin 6 kat yama ile tamir edilmesi gerektiği belirlenmiştir.




**Şekil 7.23** 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi

Şekil 7.24'te 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi farklı katlarda yama ile onarılmış CTP kompozit boru numunelerinden statik iç basınç patlama deneyleri sonucunda elde edilen, yama kat sayısına göre patlama basıncı değişimi verilmiştir. Hasar bölgeleri değişik katlarda yama tamiri ile onarılmış deney numuneleri için yama kat sayısı arttıkça patlama mukavemetinde artış olduğu şekilde görülmektedir. 5 J ve 10 J darbe hasarlı deney numunelerinde olduğu gibi 15 J darbe hasarlı numune için de 2 kat yama tamirinin patlama basıncında yamasız numuneye göre herhangi bir artış göstermediği belirlenmiştir. 2 kat yama tamiri 15 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunede olumlu en ufak bir etki yapmamıştır ve herhangi bir faydası olmamıştır. 4 kat yama yapılmış 15 J darbe hasarlı deney numunesinin patlama basıncı 231 bar olarak ölçülmüştür. Bu değer yamasız patlama basıncından daha

yüksektir ancak hasarsız patlama basıncından çok düşüktür. 10 J darbe hasarlı numunede olduğu gibi 15 J darbe hasarlı numune için de 4 kat yama uygun değildir. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesine 6 kat yama yapılmış numunenin patlama basıncı değeri ise 276 bar olarak ölçülmüştür. 276 bar patlama basıncı değeri hasarsız patlama basıncı değerinden daha azdır ancak bu fark %2 civarındadır. 6 kat yama tamiri 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numuneler için uygundur.




**Şekil 7.24** 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde patlama basıncı-yama kat sayısı değişimi

Tüm numuneler için yama kat sayısı arttıkça patlama basıncı değerleri de artmaktadır. 2 kat yama tüm enerji seviyeleri için uygun değildir. 4 kat yama 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numuneler için uygundur ancak 10 J ve 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numuneler için uygun değildir. 6 kat yama ise bu çalışmada kullanılan tüm enerji seviyeleri için uygundur.

### 7.5.2. Farklı darbe enerji seviyeleri için yama kat sayısının statik iç basınç patlama hasarına etkisi

Bölüm 7.4.2 de hasarsız ve darbe hasarlı boruların statik iç basınç patlama deneyleri esnasında beş önemli hasar aşamasının tespit edildiği ve bu hasar aşamalarının sırasıyla beyazlaşma başlangıcı, yoğun beyazlaşma, sızıntı başlangıcı, su jeti oluşumu ve sonuç hasarı olduğu belirtilmiş ve açıklanmıştır. Farklı darbe enerjileriyle

hasarlandırılan deney numuneleri 2, 4 ve 6 kat yama yapıldıktan sonra statik iç basınç patlama testine maruz bırakılarak hasar gelişimi incelenmiştir.

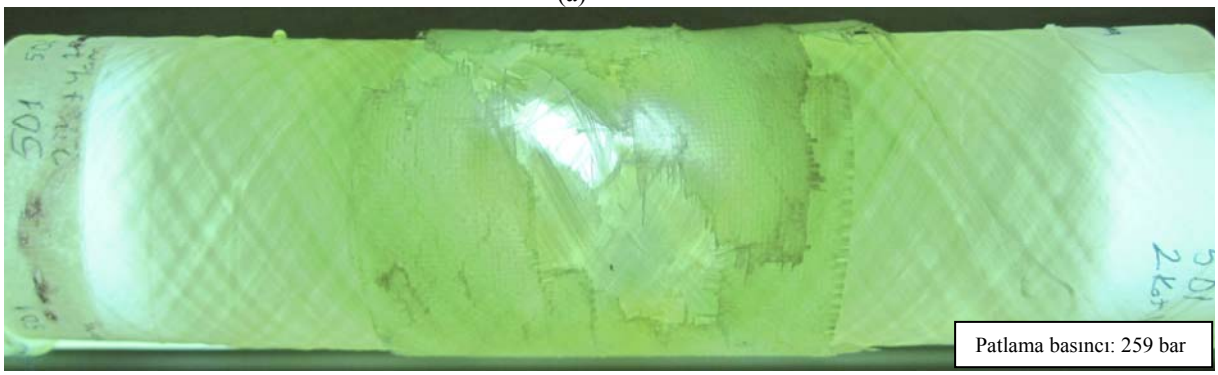
Şekil 7.25'te 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla yamasız, 2 kat yama, 4 kat yama ve 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları görülmektedir.

Şekil 7.25a'da son hasar görüntüsü verilen 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ancak yama tamiri uygulanmamış CTP kompozit boru numunesinde statik iç basınç patlama testi esnasında oluşan hasar gelişimi Bölüm 7.4.2'de anlatılmıştır.

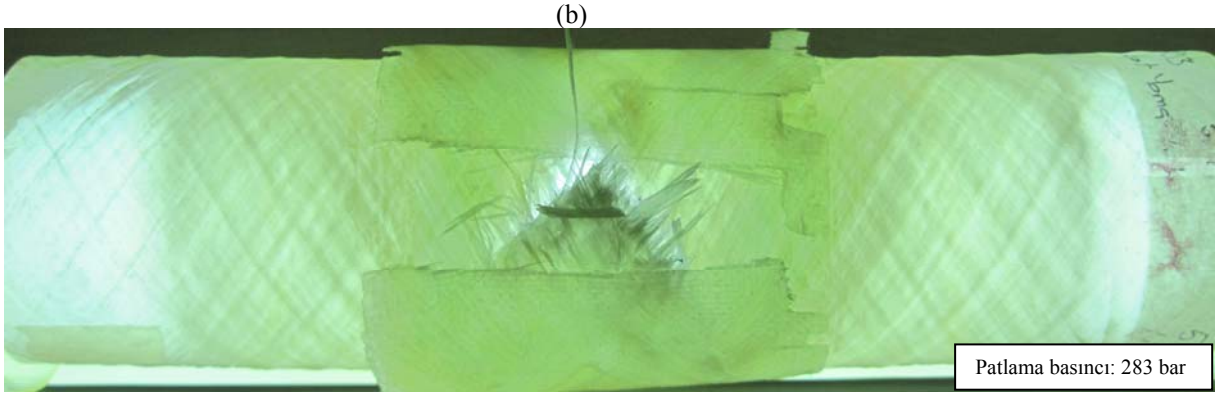
Şekil 7.25b'de 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 2 kat yama ile onarılmış CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. 5 J darbe hasarlı 2 kat yama ile tamir edilmiş numune statik iç basınç patlama testine maruz bırakıldığında numuneye uygulanan iç basıncın artmasıyla borunun elyaf doğrultusu teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmış ve buna bağlı olarak numune çapı artmaya numune boyu kısalmaya başlamıştır. Elyafların teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışması farklı elyaf yönlenmelerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşturmuştur. İlaveten farklı elyaf yönlenmelerinde numunenin eğilme rijitliği değişeceği için kayma gerilmeleri oluşacaktır. CTP boru numunesindeki elyaflar ±55° sarım açısı yönünde iken yama numunesinde 0° ve 90° yönlerindedir. Ayrıca boru numunesi ile yama numunesinin elastisite modüllerinin farklı olması ve ±55° sarım açısı yönündeki elyafların iç basıncın etkisiyle teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışması boru numunesi ile yama arasındaki bağda kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olacaktır. İç basınç arttıkça boru numunesinde ve yama ile boru arasında oluşan gerilme değerleri artmaya başlamıştır. Basınç değeri 170 bar değerine ulaştığı anda öncelikle yamada beyazlaşma başlamıştır. Beyazlaşma başladıktan çok kısa bir süre sonra kayma gerilmelerinin etkisiyle 2 kat yama, numune üzerinden kabuk gibi ayrılmış ve yırtılmıştır. Yamanın numuneden ayrılmasıyla tüm yük darbe hasarlı boru numunesine binmiştir. Bu esnada boruda başlayan beyazlaşma, basıncın artmaya devam etmesinden dolayı hızla artarak ilerlemesini sürdürmüştür. 240 bar basınç değerine ulaşıldığında numunenin tüm çevresinde beyazlaşma oluşmuştur. Bu durum elyafların büyük çoğunluğunun matristen ayrıldığını ve numunenin tamamında delaminasyonlar oluştuğunu göstermektedir. Uygulanan iç basınç değeri 259 bar olduğunda deney numunesi darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamıştır.



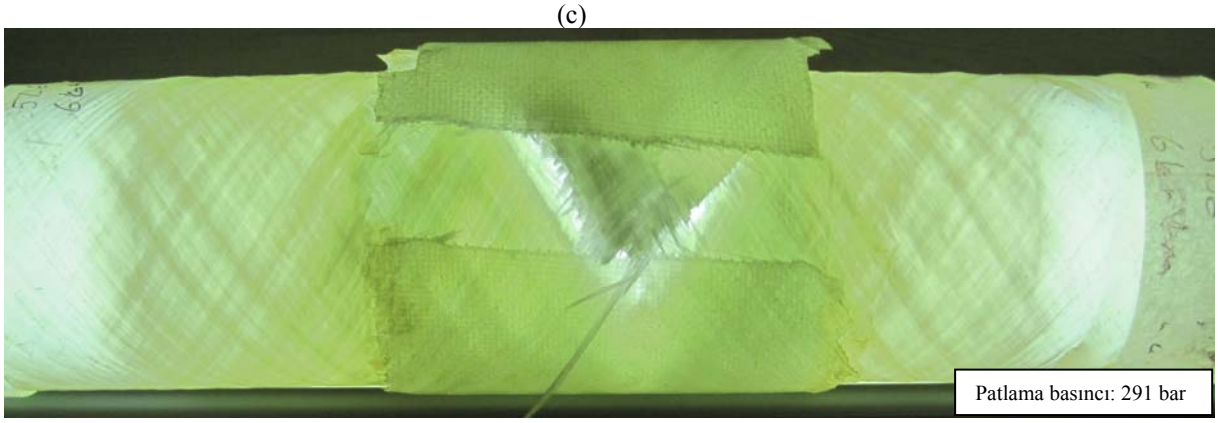

(a)




(b)




(c)




(d)

**Şekil 7.25** 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla a) Yamasız b) 2 kat yama c) 4 kat yama d) 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları

2 kat yama ile tamir edilmiş deney numunesinin statik iç basınç patlama testi altındaki hasar gelişimi yama yapılmamış numuneyle benzerlik göstermektedir. Çünkü yama numunesi ince olduğu için borudaki çap değişimini sınırlandıramamış ve beyazlaşma başlangıcının olduğu anda boru numunesi ile yama arasında oluşan kayma gerilmelerinin etkisiyle yama kabuk gibi numuneden ayrılarak parçalanmıştır. Yamanın ayrılması sebebiyle tüm yük numuneye bindiği için numunede gelişen hasar mekanizması yamasız numuneye büyük ölçüde benzemektedir. 2 kat yama ile tamir edilmiş numunenin statik iç basınç patlama testinden elde edilen son hasar fotoğrafı incelendiğinde numunede meydana gelen delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları açıkça görülmektedir. Yama tamirinin numuneden ayrıldığı ve numunede elyaf kopması gerçekleştikten sonra yarılma meydana geldiği Şekil 7.25-b'de görülmektedir.

Şekil 7.25c'de 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 4 kat yama ile onarılmış CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. Hasar bölgesi 4 kat yama ile onarılmış CTP kompozit deney numunesi statik iç basınç patlama testine maruz bırakılmıştır. Test esnasında numuneye uygulanan iç basıncın artmasıyla borunun elyaf doğrultusu teğetsel doğrultuya yönelmeye çalıştığı için deney numunesinin çapı artmaya boyu ise kısalmaya başlamıştır. 2 kat yamadan farklı olarak 4 kat yama deney numunesindeki elyafların teğetsel doğrultuya yönelmesini ve buna bağlı oluşan çap değişimini sınırlandırmıştır. Bu sınırlandırma elyafların teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışması ile ± elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda oluşan kayma ve basma gerilmeleri ile boru numunesi ve yama arasında meydana gelen kayma gerilmelerinin oluşmasına engel değildir. Ayrıca yama numunesinde de iç basıncın etkisiyle çekme gerilmeleri ortaya çıkmıştır. Numuneye uygulanan iç basınç arttıkça gerilme değerleri artmaya devam etmiştir. Basınç değeri 190 bar değerine ulaştığı anda önce yamada sonra numunede beyazlaşma başlamıştır. İç basınç artmaya devam ettiği için beyazlaşma da artarak devam etmiştir. 250 bar basınç değerine ulaşıldığında numunenin tüm çevresinde ve yamada beyazlaşma oluşmuştur. Bu esnada numune ile yama arasındaki kayma gerilmelerinin artması nedeniyle ve çaptaki kalıcı artışın etkisiyle yama numuneden ayrılmaya başlamıştır. 270 barda yamanın büyük çoğunluğu numuneden ayrılmıştır. Uygulanan iç basınç değeri 283 bar olduğunda yama yarılmış ve deney numunesi darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamıştır. İç basınç altındaki boruda oluşan en büyük gerilme teğetsel yönde olduğu için bu gerilmenin etkisiyle yamanın yırtılması eksenel

yönde gerçekleşmiştir. Yamanın yırtıldığı yer darbe hasarının olduğu yerdir. İç basınç patlama testi esnasında deney numunesinde sızıntı başlangıcı ve yoğun su jeti oluşumu gözlenmeden son hasar meydana gelmiştir. 4 kat yama, deney numunesindeki elyafların teğetsel doğrultuya yönelmesini ve buna bağlı oluşan çap değişimini sınırlandırdığı için numunede meydana gelen beyazlaşma başlangıcı daha yüksek basınçta meydana gelmiştir. Bu durum darbe hasarlı numune için önemlidir. Beyazlaşma başlangıcının ötelenmesi numunenin son hasara ulaşmasını da öteler ve statik patlama basıncını arttırır. 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numune için 4 kat yama uygundur. Oluşan son hasar fotoğrafında elyaf matris ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyonlar görülmektedir. Yamanın iç basınç etkisiyle eksenel yönde yarıldığı ve numunede elyaf kopmaları gerçekleştikten sonra yarılma oluştuğu görülmektedir.

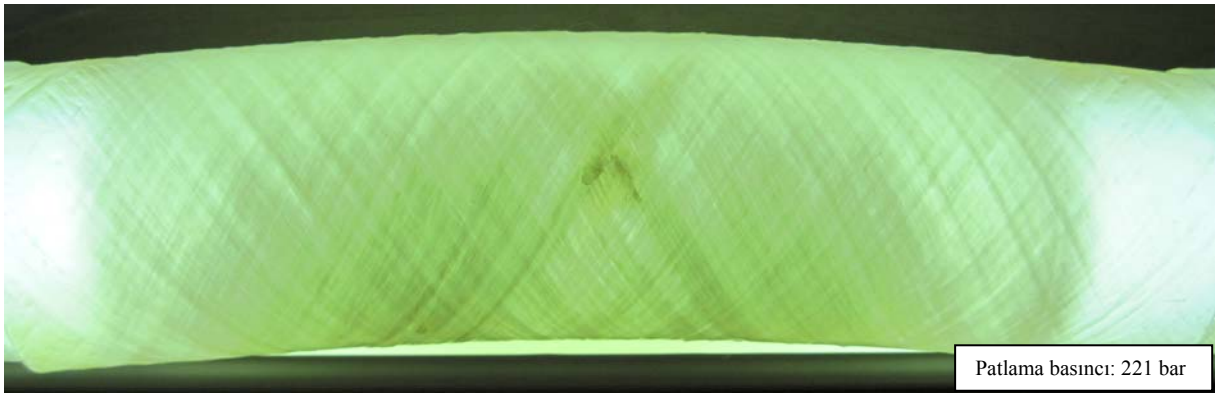
Şekil 7.25d'de 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 6 kat yama ile onarılmış CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. 4 kat yamada olduğu gibi 6 kat yama deney numunesindeki elyafların teğetsel doğrultuya yönelmesini ve buna bağlı oluşan çap değişimini sınırlandırmıştır. Bu sınırlandırma miktarı 6 kat yamanın 4 kat yamadan daha kalın olması nedeniyle daha büyüktür. İç basınç arttıkça boru numunesinde ve yama ile boru arasında oluşan gerilme değerleri artmaya başlamıştır. Basınç değeri 205 bar değerine ulaştığı anda önce deney numunesinin tamir edilmemiş bölgesinde daha sonra yamanın kenarında beyazlaşma başlamıştır. İç basınç artmaya devam ettiği için beyazlaşma da artarak devam etmiştir. 255 bar basınç değerine ulaşıldığında numunenin tüm çevresinde ve yamada yoğun beyazlaşma oluşmuştur. 255 bar basınç değerinden sonra yama numuneden ayrılmaya başlamıştır ve 275 barda yamanın büyük çoğunluğu numuneden ayrılmıştır. İç basınç değeri 291 bar olduğunda yama yırtılmış ve deney numunesi darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamıştır. Yamanın yırtılması darbe hasarının olduğu yerden ve eksenel yönde gerçekleşmiştir. İç basınç patlama testi esnasında deney numunesinde sızıntı başlangıcı ve yoğun su jeti oluşumu gözlenmeden son hasar meydana gelmiştir. 6 kat yamada meydana gelen beyazlaşma başlangıcı basınç değeri 4 kat yamadan daha yüksektir. Çünkü 6 kat yama daha kalın olduğu için deney numunesinde iç basıncın etkisiyle oluşan çap değişimini daha fazla sınırlamıştır. 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numune için 6 kat yama uygundur. Deney numunesine ait son hasar fotoğrafında iç basıncın etkisiyle oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ayrılmaları görülmektedir. Numunede elyaf kopması gerçekleştikten sonra

yarılma meydana gelmiştir. Yama numunesi ise borudan ayrıldıktan sonra eksenel yönde yırtılmıştır.

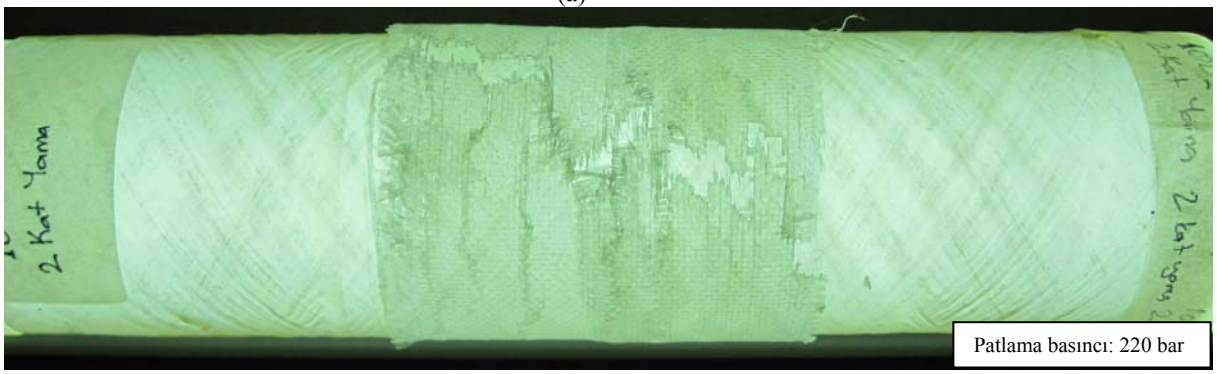
Şekil 7.26'da 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla yamasız, 2 kat yama, 4 kat yama ve 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları görülmektedir.

Şekil 7.26a'da son hasar fotoğrafı verilen 10 J darbe hasarlı ve yama tamiri uygulanmamış CTP kompozit boru numunesinde statik iç basınç patlama testi esnasında oluşan hasar gelişimi Bölüm 7.4.2'de anlatılmıştır.

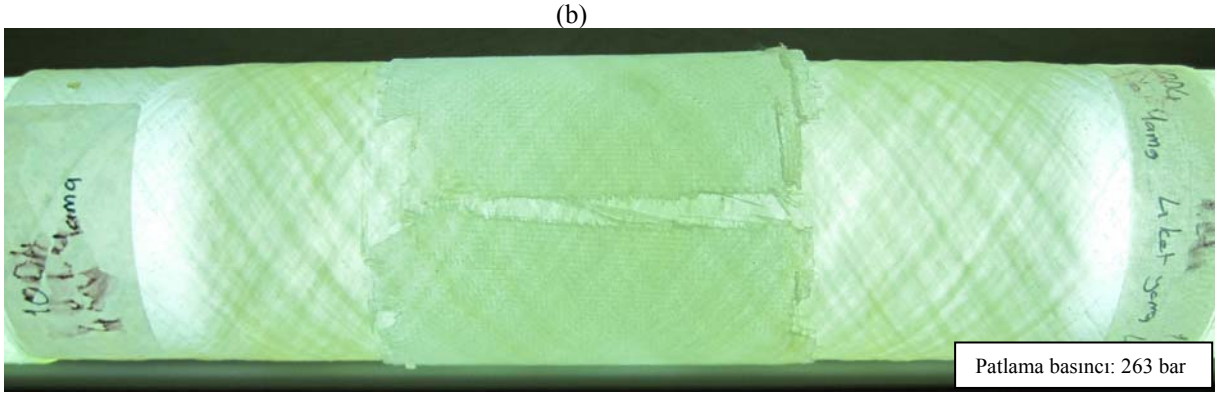
10 J darbe ile hasarlandırılmış numunenin darbe bölgesinde 5 J darbe hasarına göre delaminasyon alanı daha büyüktür, yüzeyde matris çatlakları ve tabaka içi radyal çatlaklar vardır. 5 J darbe hasarlı numunede 2 kat yamanın herhangi bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple 10 J darbe hasarlı numunede de 2 kat yamanın etkili olması beklenmemelidir. Şekil 7.26b'de 2 kat yama ile onarılmış CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. Sonuç hasar görüntüsü incelendiğinde deney numunesinde, 4 kat ve 6 kat yamaya göre delaminasyonların ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının daha az olduğu görülmektedir. Yama numuneden ayrılarak yırtılmıştır. 2 kat yama ile tamir edilmiş numunenin statik iç basınç testi yamasız numuneye benzemektir. Şöyle ki; iç basıncın artmasıyla yamalı kompozit deney numunesinde oluşan gerilme değerleri artmaya devam etmiştir. Basınç değeri yamasız darbe hasarlı numunede olduğu gibi 170 bar değerine ulaştığı anda beyazlaşma başlamış ve çok kısa bir süre sonra çekme ve kayma gerilmelerinin etkisiyle 2 kat yama numune üzerinden kabuk gibi ayrılmış ve yırtılmıştır. 2 kat yama borudaki çap değişimini sınırlandırmak için yeterli olmamıştır. Yamanın numuneden ayrılmasıyla beraber iç basıncın tamamı darbe hasarlı boru numunesine binmiştir. Bu esnada darbe bölgesinden başlayan beyazlaşma, artmaya devam etmiş ve tüm numuneyi çepeçevre sarmıştır. Basınç yaklaşık olarak 210 bar değere ulaştığında yırtılan yamanın altından darbe hasar bölgesinden sızıntı başlamıştır. Basınç arttıkça sızıntı su jetine dönüşmüş ve 220 bar civarında yoğun su jeti oluşumu gerçekleşmiş ve numune infilak etmeksizin son hasar durumuna ulaşmıştır.



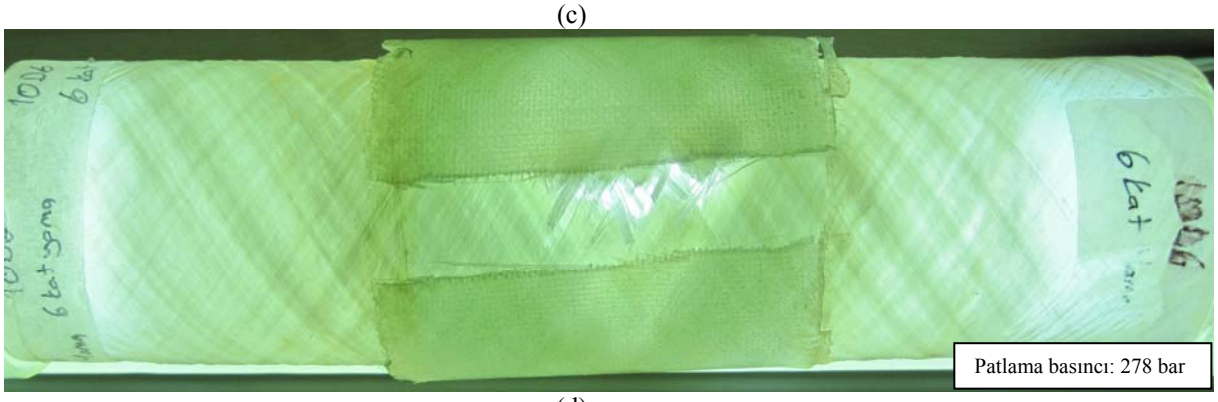

(a)




(b)




(c)




(d)

**Şekil 7.26** 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla a) Yamasız b) 2 kat yama c) 4 kat yama d) 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları

2 kat yamanın iç basınç etkisiyle numunede oluşan çap değişimini ve gerilmeleri sınırlandıramaması darbe hasarından kaynaklanan delaminasyon alanının ve tabakalar arası çatlakların yamasız boruda olduğu gibi hızlı ilerlemesine ve sonuç hasarına ulaşmasına neden olmuştur.

Şekil 7.26c'de 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 4 kat yama ile onarılmış CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. Deney numunesinde oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları fotoğrafta görülmektedir. Yama iç basıncın etkisiyle eksenel yönde yırtılmış numuneden ayrılmıştır. Yırtılan yamanın altında darbe hasarlı bölge vardır. Boruda yarılma oluşmadığı görülmektedir. 10 J darbe hasarlı ve 4 kat yamalı numunenin statik iç basınç patlama testi esnasında, numuneye uygulanan iç basıncın artmasıyla meydana gelen çap artışı 4 kat yama tarafından bir miktar sınırlandırılmıştır. Basıncın yükselmeye devam etmesiyle (190 bar basınca ulaşıldığında) artan gerilme değerleri beyazlaşmanın başlamasına neden olmuştur. Beyazlaşma başladıktan sonra ilerlemeye devam etmiş ve 245 bar basınç değerine ulaşıldığında tüm numuneyi sarmıştır. Bu esnada yama boru numunesi üzerinden ayrılmaya başlamıştır. Yamanın ayrılmaya başlamasıyla darbeden kaynaklanan tabakalar arası çatlaklar ilerlemiş, basınçlı yağ 250 bar civarında darbe bölgesi üzerindeki yamanın altından sızmaya başlamıştır. 263 barda yama yırtılmış darbe bölgesinden yoğun su jeti oluşarak boru infilak etmeden sonuç hasarına ulaşılmıştır. Yamanın yırtılması eksenel yönde gerçekleşmiştir. 10 J darbe enerjisiyle hasar görmüş numunenin hasar bölgesinin 4 kat yama ile tamir edilmesi statik patlama basıncının yükselmesini sağlamıştır. Darbe hasarından kaynaklanan delaminasyonların ve diğer hasarların ilerlemesi, yamanın çap değişimini sınırlandırmasından dolayı gecikmiştir. Bu gecikme numunede meydana gelen sonuç hasarının daha yüksek basınçta olmasını sağlamıştır.

10 J darbe enerjisi için hasar bölgesinin 6 kat yama ile tamir edilmesi hasarlı numunenin statik patlama basıncı değerini hasarsız numunenin statik patlama basıncı değerinin %98'ine ulaştırmıştır. Şekil 7.26d'de numunede oluşan sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. 6 kat yamalı deney numunesinde meydana gelen delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları fotoğrafta görülmektedir. 6 kat yamanın iç basıncın etkisiyle numuneden ayrıldığı ve eksenel yönde yırtıldığı görülmektedir. Yamalı numunenin statik iç basınç patlama testine başlandıktan sonra iç basıncın artmasıyla numunede oluşacak olan çap değişimi 6 kat yama tarafından sınırlandırılmıştır. Bu

sınırlandırma 4 kat yamaya göre daha yüksektir. Statik iç basınç patlama testinde numuneye uygulanan basınç değeri sürekli arttırıldığı için yamalı deney numunesinde oluşan gerilmelerin etkisiyle, iç basınç 200 bar değerine ulaştığı anda numunede yamalı bölgenin dışında beyazlaşma başlamıştır. Bu beyazlaşma iç basıncın artmasıyla artarak devam etmiş ve 250 barda deney numunesinin tüm çevresinde yoğun beyazlaşma gözlenmiştir. Bu esnada yama deney numunesi üzerinden ayrılmaya başlamıştır. Darbe hasarından kaynaklanan tabakalar arası çatlakların ilerlemesiyle basınçlı yağ yüzeye doğru çıkmaya başlamıştır. Yüzeye ulaşan yağ 265 bar basınca ulaşıldığında yama ile numune arasından ilerleyerek sızmaya başlamıştır. Basınç değeri 278 bar olduğu anda yama eksenel yönde yırtılmış ve darbe hasarının olduğu yerden başlayarak numunede elyaf kopması gerçekleşmiştir. Numunede meydana gelen elyaf kopmasından dolayı son hasar infilak şeklinde olmuştur.

10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunenin hasar bölgesinin tamir edilmesi son derece önemlidir. Her ne kadar numunede darbeden dolayı delinme olmamışsa da numunenin statik patlama mukavemetini etkileyecek ciddi hasarlar oluşmuştur. Yama tamiri ile çap değişimini sınırlandırmak ve bu hasarların ilerlemesinin önüne geçilmek istenmiştir. 2 kat yama ince olduğu için sınırlandırma yapamamıştır. 4 kat yama sınırlandırma yapmış ancak darbeden kaynaklanan hasarların fazla olması nedeniyle istenilen şekilde olmamıştır. 6 kat yamanın meydana getirdiği sınırlandırma numunenin statik patlama basıncını hasarsız patlama basıncına %98 oranında yaklaştırmıştır.

Şekil 7.27'de 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla yamasız, 2 kat yama yapılmış, 4 kat yama yapılmış ve 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen sonuç hasar fotoğrafları görülmektedir.

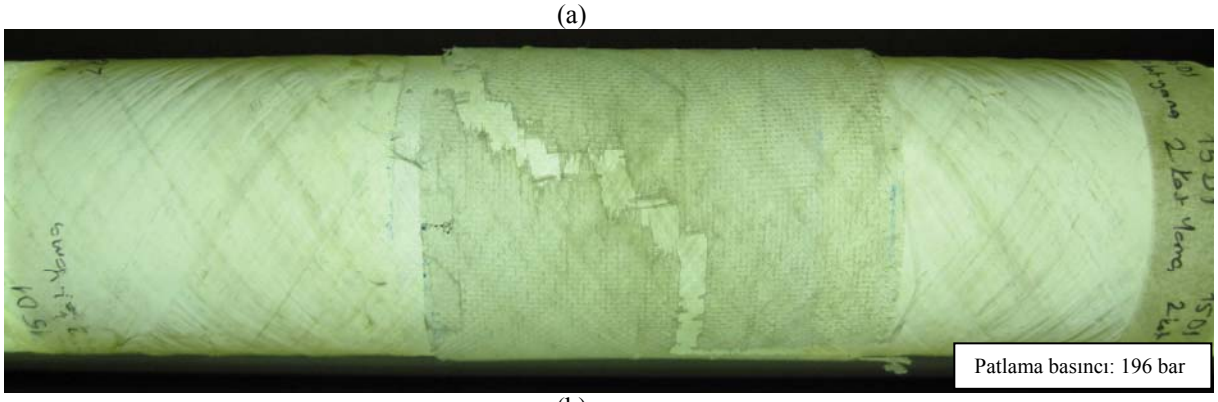
Şekil 7.27a'da son hasar fotoğrafı verilen 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ancak yama tamiri uygulanmamış CTP kompozit boru numunesinde statik iç basınç patlama testi esnasında oluşan hasar gelişimi Bölüm 7.4.2'de anlatılmıştır.

Düşük hızlı darbeden kaynaklanan darbe hasarlarının en büyüğü 15 J darbe enerjisinde oluşmuştur. Özellikle delaminasyon alanı 5 J ve 10 J darbe hasarına göre çok daha büyüktür. Numune yüzeyinde oluşan matris çatlakları ve kesitte oluşan tabaka içi radyal çatlaklar daha belirgin ve daha fazladır. 5 J ve 10 J darbe hasarlı numunede 2 kat yamanın herhangi bir etkisinin olmadığı tespit edildiği için 15 J darbe hasarlı numunede de 2 kat yamanın etkili olacağı düşünülmemektedir. Şekil 7.27b'de 15 J darbe

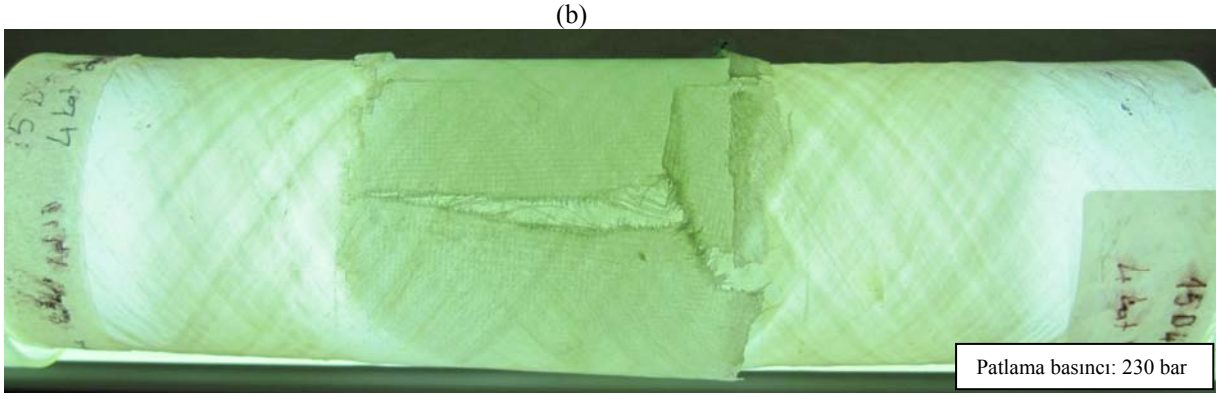
enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 2 kat yama ile tamir edilmiş CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. Sonuç hasarı görüntüsünde yamalı deney numunesinde oluşan delaminasyonların ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının 4 kat ve 6 kat yama uygulanmış numuneden daha az olduğu görülmektedir. Yamanın iç basınç etkisiyle numuneden ayrılarak yırtıldığı görülmektedir. Darbe hasarının olduğu yerde yarılma oluşmadığı ve elyaf kopmalarının gerçekleşmediği görüntüden anlaşılmaktadır. 15 J darbe hasarlı ve 2 kat yama ile tamir edilmiş numunenin statik iç basınç patlama testi 5 J ve 10 J darbe hasarlı numunelerde olduğu gibi yama yapılmamış numuneye benzemektir. Numuneye uygulanan iç basıncın artmasıyla numune çapı artmaya, numune boyu kısalmaya başlamış ve buna bağlı olarak yamalı deney numunesinde gerilmeler oluşmuştur. İç basıncın artmasıyla bu gerilme değerleri artmaya devam etmiştir. Basınç değeri yaklaşık olarak 175 bar değerine ulaştığı anda beyazlaşma başlamış ve çok kısa bir süre sonra kayma gerilmelerinin etkisiyle 2 kat yama numune üzerinden kabuk gibi ayrılmış ve yırtılmıştır. 2 kat yama borudaki çap değişimini ve gerilmeleri sınırlandırmak için yeterli olmamıştır. Yamanın numuneden ayrılmasıyla beraber numuneye uygulanan iç basıncın tamamı boru numunesine binmiştir. Bu esnada darbe bölgesinden başlayan beyazlaşma, artmaya devam etmiş ve 185 bar civarında darbe bölgesinden damlama şeklinde sızıntı başlangıcı oluşmuştur. İç basıncın artmasıyla sızıntılar artmış ve 196 barda yoğun su jeti oluşarak sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Numunede infilak olmaksızın sonuç hasarı oluşmuştur. 2 kat yamanın elyafların teğetsel doğrultuya yönlenmesini sınırlandıramaması nedeniyle darbeden kaynaklanan tabakalar arası çatlaklar ve delaminasyon alanı yamasız numunede olduğu gibi ilerlemiştir. Tabakalar arası çatlaklardan ilerleyen basınçlı yağ delaminasyon alanından ve yüzeydeki matris çatlaklarından ilerlemesine devam ederek yüzeye ulaşmış sızıntıyı başlatmıştır. İç basıncın artmasıyla sızıntı su jetine dönüşmüştür. 2 kat yamanın öncekilerde olduğu gibi 15 J darbe hasarlı numune için de uygun olmadığı hasar gelişiminden açıkça görülmüştür.



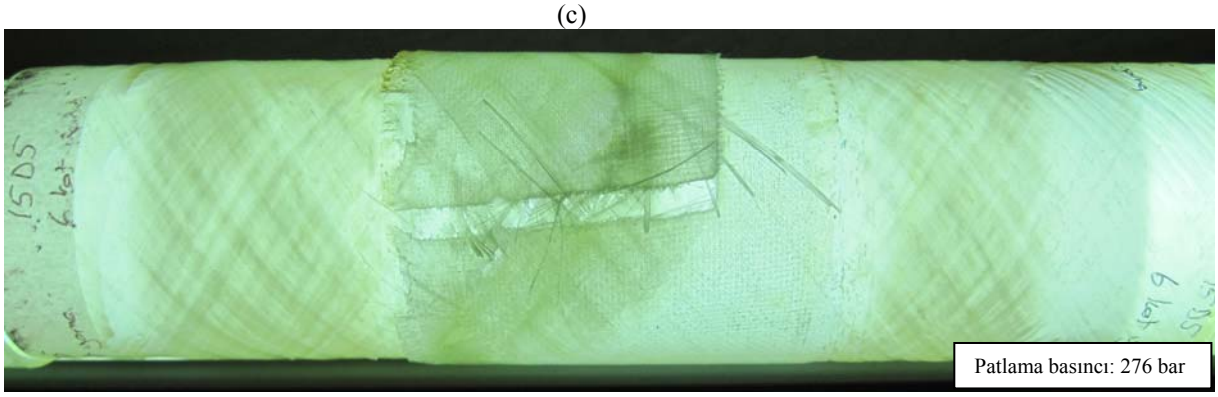

(a)




(b)




(c)




(d)

**Şekil 7.27** 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi sırasıyla a) Yamasız b) 2 kat yama c) 4 kat yama d) 6 kat yama yapılmış boruların statik iç basınç patlama testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları

Şekil 7.27c'de 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 4 kat yama ile tamir edilmiş CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. Sonuç hasar görüntüsü incelendiğinde deney numunesinde oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmaları görülmektedir. Yama numuneden ayrılmış ve eksenel yönde yırtılmıştır. Darbe hasarlı bölge su jetinin oluştuğu bölgedir. Bu bölgede infilak olmadığı için yarılma görülmemektedir. 15 J darbe hasarlı ve darbe hasar bölgesi 4 kat yama ile tamir edilmiş numunenin statik iç basınç patlama testi esnasında gelişen hasar mekanizması ise şu şekilde olmuştur. Numuneye uygulanan iç basıncın artmasıyla numunede meydana gelecek olan çap artışı 4 kat yama tarafından sınırlandırıldığı için darbe hasarından kaynaklanan hasarların ilerlemesi gecikmiştir. Basıncın artmaya devam etmesiyle deney numunesinde oluşan gerilmelerinin değerleri de artmaya devam etmiştir. Basınç 190 bar değerine ulaştığında bu gerilmelerin etkisiyle beyazlaşma başlamıştır. Beyazlaşma iç basınç artışı ile artmaya devam etmiştir. 4 kat yama, boru üzerinden ayrılmaya başlamış ve yamanın ayrılmasıyla darbeden kaynaklanan hasarların ilerlemesi artmıştır. Buna bağlı olarak basınçlı yağ, hasar bölgesindeki radyal çatlaklardan ve delaminasyon alanından ilerleyerek yüzeye doğru yükselmeye başlamıştır. 215 bar civarında numune yüzeyine ulaşan basınçlı yağ, yamanın altından ilerlemiş ve sızmaya başlamıştır. Basıncın yükselmesiyle sızıntı artmış ve 230 barda yama eksenel yönde yırtılmış basınçlı yağdaki sızıntı yoğun su jetine dönüşerek sonuç hasarı oluşmuştur. Hasar gelişiminden de görüleceği gibi 4 kat yama uygulaması, numunenin darbeden kaynaklanan hasarlarının ilerlemesinin, daha yüksek basınçlarda oluşmasına sebep olmuştur.

15 J darbe hasarlı ve hasar bölgesi 6 kat yama ile onarılmış borunun statik patlama basıncı hasarsız patlama basıncının %98'i civarındadır. Şekil 7.27d'de 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış ve hasar bölgesi 6 kat yama ile tamir edilmiş CTP kompozit deney numunesinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuç hasar görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde yamalı deney numunesinde oluşan elyaf matris ara yüzey ayrılmaları ve delaminasyonlar görülmektedir. Darbe hasarının olduğu yerden elyaf kopmaları gerçekleşmiş ve yarılma meydana gelmiştir. Yarılma elyaf sarım doğrultusuna ilerlemiştir. Yama, iç basıncın etkisiyle oluşan teğetsel gerilmelerden dolayı eksenel yönde yırtılmıştır. Yamanın numuneden ayrıldığı görülmektedir. 15 J darbe hasarlı ve 6 kat yama yapılmış numunenin statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimi şu şekilde oluşmuştur. Deney numunesine uygulanan iç basıncın artmaya

başlamasıyla numunede meydana gelecek olan çap değişimi 6 kat yama tarafından sınırlandırıldığı için numunede ve yama ile numune arasındaki oluşan kayma gerilmelerinin oluşturduğu beyazlaşma diğerlerine göre (yamasız, 2 kat yama ve 4 kat yama) daha yüksek basınçta gerçekleşmiştir. Uygulanan iç basınç 200 bar değerine ulaştığında numunede yamasız bölgede beyazlaşma başlamıştır. Bu beyazlaşma iç basıncın artmasıyla yükselmeye devam etmiş 240 bar civarında numunenin tüm çevresinde yoğun beyazlaşma görülmüştür. Yama deney numunesi üzerinde ayrılmaya başlayınca darbe hasarlı bölgede oluşturduğu sınırlama ortadan kalkmıştır. İç basıncın etkisiyle radyal çatlaklar ilerlemiş ve basınçlı yağ yüzeye doğru ilerlemeye başlamıştır. Hasarın hızla ilerlemesi nedeniyle yüzeye ulaşan basınçlı yağ 250 bar civarında yama ile numune arasından sızmaya başlamıştır. Basıncın yükselmeye devam etmesi nedeniyle sızıntı miktarı giderek artmıştır. İç basınç 276 bar basınç değerine ulaştığı anda yama eksenel yönde yırtılmış ve numunede elyaf kopması gerçekleşmiştir. Elyaf kopmasının etkisiyle deney numunesi infilak ederek patlamış ve sonuç hasarı meydana gelmiştir.

15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunenin hasar bölgesinde 5 J ve 10 J darbe enerjisine göre daha fazla hasar oluşmuştur. Bu hasarların içerisinde delinme hasarı yoktur. Numunede delinme hasarı olmamış olsa da numunenin statik patlama basıncı %32 civarında azalmıştır. Bu nedenle darbe hasarının tamir edilmesi veya hasar ilerlemesinin sınırlandırılması son derece önemlidir. Darbe hasarlı numuneye 2 kat yama uygulaması numunenin iç basınçtan kaynaklanan çap artışına herhangi bir sınırlandırma getirememiştir. Bu yüzden 2 kat yama uygun değildir. 4 kat yama uygulaması ise numunede oluşacak çap artışını sınırlandırmıştır. Ancak bu sınırlandırma 15 J darbe hasarı için istenilen miktarda değildir. Çünkü 15 J darbe enerjisi numunede çok fazla hasar meydana getirmiştir ve basınçlı yağın bu hasarlı kısımdan ilerleyerek yüzeye ulaşması söz konusudur. 15 J darbe enerjisi için en iyi sonuç 6 kat yama uygulamasından elde edilmiştir. 6 kat yama kalınlığından dolayı numunede meydana gelecek olan çap artışını diğerlerine göre daha fazla sınırlandırdığı için numunede son hasarı oluşturan statik patlama basıncı değeri hasarsız patlama basıncı değerine çok yaklaşmıştır.

# 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 8.1 Sonuçlar

**1.** Düşük hızlı darbe deneylerinde darbe enerjisinin artmasıyla CTP kompozit boru numunesi üzerinde oluşan en büyük temas kuvveti, yer değiştirme miktarı, vurucu ile numune arasındaki temas süresi artmaktadır.

**2.** Düşük hızlı darbe gerçekleştirilecek numunelere 32 bar iç basınç uygulanmıştır. Darbe sırasında numunelere uygulanan iç basınç değeri darbenin etkisiyle değişmektedir. Numuneye uygulanan iç basınç değeri, 5 J darbe enerji seviyesinde %5,91, 10 J darbe enerji seviyesinde %10,41 ve 15 J darbe enerji seviyesinde %17,87 artmıştır.

**3.** *Eğilme rijitliği* kuvvet-yer değiştirme eğrisinde, eğrinin artma kısmındaki eğim olarak ifade edilmiştir. Eğilme rijitliğindeki salınımlar ve değişimler numunede oluşan hasarlanmayı göstermektedir. Bu çalışmada darbe enerjisinin artmasıyla numunelerin eğilme rijitliğinde büyük bir değişim gözlenmemiştir. Bunun en büyük nedeni numunelerin iç basınç altında darbe yüklemesine maruz kalmasıdır. Deney numunelerine uygulanan iç basınç numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine neden olmakta ve buna bağlı olarak eğilme rijitliğinde büyük bir değişim görülmemektedir. Eğilme rijitliğinde büyük bir değişimin olmaması deney numunesinde büyük hasarların özellikle elyaf hasarlarının olmadığına işaret etmektedir.

**4.** Darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-yer değiştirme ve enerji zaman değişimleri, darbe enerjisinin artmasıyla numune tarafından yutulan enerji miktarının arttığını göstermektedir. Yutulan enerji miktarının darbe enerjisine oranı incelendiğinde 5 J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %83'ünün, 10 J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %84'ünün ve 15 J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %80'inin iç basınç altındaki deney numunesi tarafından yutulduğu tespit edilmiştir. Enerjinin geri kalan kısmı vurucunun numuneden geri sekmesine harcanmıştır.

**5.** CTP kompozit boru numunelerinde darbeden dolayı oluşan hasarlar darbe enerjisinin artmasıyla artış göstermektedir. 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunelerde yüzeyde çok küçük matris çatlamaları ve küçük bir delaminasyon alanı oluşmuştur. İlaveten numune kesitinde tabakalar arasında çok az radyal çatlaklar oluşmuştur. 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunelerde yüzeyde belirgin matris çatlamaları oluşurken delaminasyon alanı büyümüştür. Numune kesitinde oluşan tabakalar arası radyal çatlaklar 5 J darbe enerji seviyesine göre daha fazladır. 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılan numunede ise en büyük delaminasyon alanı oluşmuştur. Ayrıca yüzeyde oluşan matris çatlamaları ve kesitte oluşan tabakalar arası radyal çatlaklar diğer enerji seviyelerindeki darbe hasarlarına göre çok daha fazla olmuştur. Çalışmadaki tüm enerji seviyeleri için numunelerde darbeden kaynaklanan elyaf hasarları ve delinme oluşmamıştır. Elyaf hasarlarının oluşmadığı darbe hasarlı numunelerin yakma testi sonucunda incelenmesiyle tespit edilmiştir. Elyaf hasarlarının oluşmamasında en büyük etken numuneye uygulanan iç basınç değeridir.

**6.** Numunede oluşan hasarların artmasıyla beraber numunenin statik iç basınç patlama değeri düşmüştür. Hasarsız boruların statik iç basınç patlama değerlerine göre, 5 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunenin patlama basıncında %8, 10 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunenin patlama basıncında %22 ve 15 J darbe enerjisiyle hasarlanmış numunenin patlama basıncında %31'lik bir azalma meydana gelmiştir. Darbe deneyleri esnasında numunelerin iç basınç etkisinde olması nedeniyle delinme ve elyaf hasarının meydana gelmemesi patlama basıncındaki düşmenin çok daha büyük olmasını engellemiştir.

**7.** Darbe hasarlı boruların statik iç basınç patlama deneylerinde, 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunede oluşan sonuç hasarı numunenin infilak etmesi şeklinde gerçekleşirken 10 J ve 15 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde yoğun su jeti oluşumuyla gerçekleşmiştir.

**8.** Hasarsız ve darbe hasarlı boruların statik iç basınç patlama testi esnasında iç basınca bağlı çap değişimi tespit edilmiştir. Elde edilen çap değişim eğrileri değerlendirildiğinde darbe hasarlı numunelerin çap değişim eğrilerinin, hasarsız numunenin çap değişim eğrisine paralel olduğu tespit edilmiştir. Darbe hasarlı numune daha düşük basınçta son hasara ulaşmaktadır.

**9.** Darbe hasar bölgeleri tamir edilmiş CTP kompozit boru numunelerinde yama kat sayısının artmasıyla numunenin statik patlama basıncında yamasız boruya göre iyileşme meydana gelmiştir. 2 kat yama uygulamasının çalışmadaki tüm enerji sevileri için, numunelerin statik iç basınç patlama değerlerine olumlu herhangi bir katkısı olmamıştır. 4 kat yama uygulaması 5 J darbe hasarlı numunenin patlama basıncı değerini hasarsız patlama basıncının %100'üne, 10 J darbe hasarlı numunenin patlama basıncı değerini hasarsız patlama basıncının %93'üne ve 15 J darbe hasarlı numunenin statik patlama basıncını hasarsız patlama basıncının %82'sine çıkarmıştır. 6 kat yama uygulaması 5 J darbe hasarlı numunenin patlama basıncı değerini hasarsız patlama basıncının %103'üne, 10 J darbe hasarlı numunenin patlama basıncı değerini hasarsız patlama basıncının %99'una ve 15 J darbe hasarlı numunenin statik patlama basıncını hasarsız patlama basıncının %98'ine çıkarmıştır.

**10.** Tamir edilmiş boruların statik iç basınç patlama hasar gelişimi, 2 kat yama uygulamasının tüm numuneler için yararlı olmadığını, 4 kat yama uygulamasının 5 J darbe enerjisi için yararlı olurken diğerleri için yararlı olmadığını, 6 kat yama uygulamasının ise tüm numuneler için yararlı olduğunu göstermiştir.

**11.** Tamir edilmiş boruların statik iç basınç patlama deneylerinde, 5 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunede oluşan sonuç hasarı 2, 4 ve 6 kat yama uygulamasının tamamında, numunenin infilak etmesi şeklinde gerçekleşmiştir. 10 J darbe enerji seviyesi için hasar bölgesine 2 kat yama uygulaması, numunede sonuç hasarının su jeti şeklinde oluşmasına neden olurken 4 ve 6 kat yama uygulanan numunelerde sonuç hasarı numunenin infilak etmesi şeklinde gerçekleşmiştir. 15 J darbe enerji seviyesi için ise, hasar bölgesine 2 ve 4 kat yama uygulaması numunede sonuç hasarının su jeti şeklinde oluşmasına neden olurken 6 kat yama uygulanan numunelerde sonuç hasarı numunenin infilak etmesi şeklinde gerçekleşmiştir.

## 8.2 Öneriler

Bu çalışmada filaman sarım metoduyla E-camı/epoksi malzemeden imal edilen ±55° sarım açısına sahip CTP borular kullanılmıştır. Farklı sarım açısına sahip CTP boru numuneleri üretilerek benzer çalışmalar yapılabilir. Üretilen deney numunelerine ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 32 bar basınç değerinde iç basınç uygulanmıştır. 32 bar iç basınç uygulanan CTP boru numunelerine 5, 10 ve 15 Joule enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Farklı iç basınç değerlerinde ve farklı darbe enerjisi seviyelerinde düşük hızlı darbeler yapılarak yeni çalışmalar ortaya konulabilir. Çalışmalara ilaveten boruların patlama basıncı değerleri tespit edilerek tamir görmüş hasarlı numuneler yorulma deneylerine tabi tutulabilir.

**KAYNAKLAR**

Abrate, S., 1998, Impact on composite structures. Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.

Adams, R.D., Davies, R., 1996, Strength of joint involving composites, *Journal of Adhesion,* Vol. 59, pp. 171-182.

Alderson KL., Evans KE., 1992, Low velocity transverse impact of filament wound pipes. Part 1. Damage due to static and impact loads. *Composite Structure*, 20:37-45.

Alderson KL., Evans KE., 1992, Failure mechanisms during the transverse loading of filament-wound pipes under static and low velocity impact conditions. *Composites* 23(3):167-73.

Aktaş, M., 2007, Temperature effect on impact behavior of laminated composite plates, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 144s.

Armanios, E.A., 2005, Analysis of delamination related fracture processes in composites, Preliminary Final Report, NAS 1.26184603, NASA-CR-184603.

ANSI/AWWA C950-07, 2006, "AWWA Standard for Fiberglass Pressure Pipe" American Water Works Association, 6666 W. Quincy Ave., Denver, USA.

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.

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.

ASTM D3039, 2007, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D3039_D3039M-08, www.astm.org.

ASTM D 5868 -01, 2008, "Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D5868-01R08

Be´akou A, Mohamed A., 2001, Influence of variable scattering on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites. *Composite Structure* 53:287-93.

Cantwell, W.J., 1988, The ifluence of target geometry on tyhe high velocity response of CFRP. *Composite Structures*, 10 (3): 247-265.

Ceyhun, V., Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.

Chicken, S.H., Welburn, S. Reed, S., 1997, Repairing composite aircraft structures-RAF experience of peacetime and battle damage techniques. *Aeronautical Journal* 101 (1006), 277-285.

Clarke, S., 2002, Field repair of composite plates using fibre metal laminates, M.S. Thesis. *Carleton University*, Ottawa, Ontario.

Dorey, G. Bishop, S., Curtis, P., 1985, On the impact performance of carbon fibre laminates with epoxy and PEEK matrices. *Composites Science and Technology*, 23 (3): 221-237.

Doyum A.B., Altay B. 1996, Detection of low-velocity impact damage in glass/epoxy tubes by penetrant method. *Insight* 40(2):117-21.

Duell, J.M., Wilson, J.M., ve Kessler, M.R., 2008, Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol.85, pp. 782-788.

Gemi, L., 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 88s.

Gning P.B., Tarfaoui M., Collombet F., Riou L., Davies P., 2005, Damage development in thick composite tubes under impact loading and influence on implosion pressure: experimental observations. *Composites: Part B* 36:306-318.

Gning P.B., Tarfaoui M., Collombet F., Davies P., 2004, Prediction of damage in composite cylinders after impact. *Journal of Composite Materials,* 39;917-928.

Goertzen, W.K., Kessler, M.R., 2007, Dynamic mechanical analysis of carbon/epoxy composites for structural pipeline repair, *Composites: Part B*. Vol. 38, pp. 1-9.

Graham D., 1995, Composite pressure hulls for deep ocean submersibles. *Composite Structure,* 32:331-43.

Griffin, C.F., 1987, Damage tolerance of toughned resin graphite composites. ASTM STP, 937: 23-33.

Günaydın, B., 2010, Kompozit yama ile onarılmış yüzey çentikli filaman sarım borularda yorulma davranışları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 113s.

Handbook for Armor Plate Pipe Wrap, June 1998, Edition, Armor Plate, Inc., Pasadena, Texas.

Herup, E.J., 1996, Low-velocity impact on composite sandwich plates., PhD Thesis, *Air University,* United Satates of America, 363 s.

Hosseini-Toudeshky, H. Mohammadi, B. 2007, A simple method to calculate the crack growth life of adhesively repaired aluminum panels. *Composite Structures*. Vol. 79, pp. 234-241.

Hu, Y.-Q, Li, P.-N, Ju, D.-Y ve Hong-Liang, Pan, H.-L. 1990, experimental İnvestigation on a cracked body with adhesive bonded reinforcement, *International Journal of Pressure Vessel and Piping,* Vol. 41, pp.193-206.

Jenq, S.T., Mo, J.J., 1996, Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 34 (2): 375-384.

Kaddour AS, Soden PD, Hinton MJ., 1998, Failure of ±55 degree filament wound glass/epoxy composite tubes under biaxial compression. *Journal of Composite Material* 32(18):1618-45.

Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 93s.

Kim SJ, Goo NS, Kim TW., 1997, The effects of curvature on the dynamic response and impact-induced damage in composite laminates. *Composites Science and Technology* 57(57):763-73.

Kistler LS, Waas AM., 1998, Impact response of cylindrically curved laminates including a large deformation scaling study, *International Journal of Impact Engineering,* 21:61-75.

Lee, W.-Y. Lee, J.-J., 2004, Successive 3D FE analysis technique for characterization of fatigue crack growth behavior in composite-repaired aluminum plate. *Composite Structures.* Vol.66, pp. 513-520.

Li, G., Davis, D., Stewart, C., Peck, J. ve Pang, S.-S. 2003, Joining composite pipes using hybrid prepreg welding and adhesive bonding, polymer composites, *ProQuest Science Journals*, Vol. 24, No.6, pp. 697.

Malvern, L.E., Sun, C.T., Liu, D., 1987, Damage in composite laminates from central impacts at subperforation speeds, in Recent Trends in Aeroelasticity, Structures and Dynamics. University of Florida Press, Gainesville, FL, 298-312.

Mazumdar, S.K., 2002, Composites manufacturing materials, Product and Process Engineering, CRC Press, United States of America.

Mili, F., Necib, B., 2001, Impact behaviour of cross-ply laminated composite plates under low velocities. *Composite Structures*, 51: 273-244.

Nagaswamy, V., Pipkins, D.S. Atluri, S.N., 1995, An FEAM based methodology for analyzing composite patch repairs of metallic structures. Struct Integrity Aging Aircraft, ASME 1995;AD-Vol. 47:273-300.

Okafor, A.C., Singh, N., Enemuoh, U.E. Rao, S.V., 2005, Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. *Composite Structures*. Vol. 71, pp. 258-270.

Pang, S.-S., Li, G., Jerro, H. D., Peck, J. A. ve Stubblefield, M. A., 2004, Fast joining of composite pipes using uv curing frp composites, polymer composites*, ProQuest Science Journals,* Vol. 25, No.3, pp. 298.

Park, R., Jang, J., 2001a, Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: Effect of stacking sequences. *Polymer Composites*, 22 (1): 80-89.

Patrick, A.J., 2004, Composites-case studies of pipeline repair applications, pigging products and services association, Clock Spring Company, L.P, Huntingdon, UK.

Peck, J.A., Jones, R.A., Pang, S.-S., Li, G. ve Smith, B.H., 2007, UV-Cured FRP joint thickness effect on coupled composite pipes, *Composite Structures*, Vol. 80, pp. 290-297.

Rao, V.V., Singh, R. Malhotra, S.K., 1999, Residual strength and fatigue life assessment of composite patch repaired specimens. *Composites: Part B*. Vol. 30, pp. 621-627.

Reid, S.R., Zhou, G., 2000, Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures. CRC Press, Woodhead Pub., United Satates of America, 303 s.

Roberts, P.D., 1995, Crack growth retardation by carbon fibre composite patching: An application to steel pressure vessel repair. M.S. Thesis. *University of Alberta*, Edmonton, Alberta.

Rousseau J, Perreux D, Verdiere N., 1997, Motifs d'enroulements et endommagement dans les tubes composites verre/epoxy. *Me´canique Indus Mate´r* 50(3).

Samancı, A., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP boruların iç basınç altında yorumlama davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 109s.

Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 134s.

Schubbe. J.J., 1997, Thickness effects on a cracked aluminum plate with composite patch repair, Ph.D. Thesis, *Air Force Institute of Technology*, Wright-Patterson AFB, Ohio.

Sierakowski, R. L., Chaturvedi, S. K., 1997, Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites. John Wiley & Sons, Inc., United Satates of America, 252 s.

Sinha, P.K., 2006, Composite materials and structures, *Composite Centre of Excellence*, AR&DB, Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur.

Soutis, C., Duan, D-M., Goutas, P., 1999, Compressive behaviour of cfrp laminates repaired with adhesively bonded external patches. *Composite Structures*. Vol. 45, pp. 289-301.

Stronge, W.J., 2000, Impact mechanics. Cambridge, Cambridge University Press. 1-26.

Sun, C.T. Klug, J.A., 1996, Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches. *AIAA J*. Vol. 34(2), pp. 369-74.

Şahin, Y., 2000, Kompozit malzemelere giriş, Gazi Kitabevi, *Ankara*.

Şahin, Ö.S., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 150s.

Şahin, A., 2011, Düşük hızlı darbe görmüş filaman sarım e-camı/epoksi boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 100s.

Tarfaoui M., Gning P.B., Davies P., Collombet F., 2007, Scale and size effects on dynamic response and damage of glass/epoxy tubular structures. *Journal of Composite Materials,* 41;547-558.

Uyaner M., Kara M., 2007, Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity Impact, *Journal of Composite Materials*, Vol.41, No. 24.

Uyaner M., Kara M., Gemi, L., 2010, Filaman sarım e-camı/epoksi kompozit boruların düşük hızlı darbe sonrası mukavemeti, *13th International Materials Symposium*,

Wang, H., Vukhanh, T., 1994, Damage extension in carbon fiber/peek cross ply laminates under low-velocity ımpact. *Journal of Composite Materials*. 28,684-704.

Wilson, J. M. 2006, Characterization of a carbon fiber reinforced polymer repair system for structurally deficient steel piping, Ph.D. Thesis. *University of Tulsa*.

# EKLER

## EK 1. DÜŞÜK HIZLI DARBENİN KİNETİK ANALİZİ

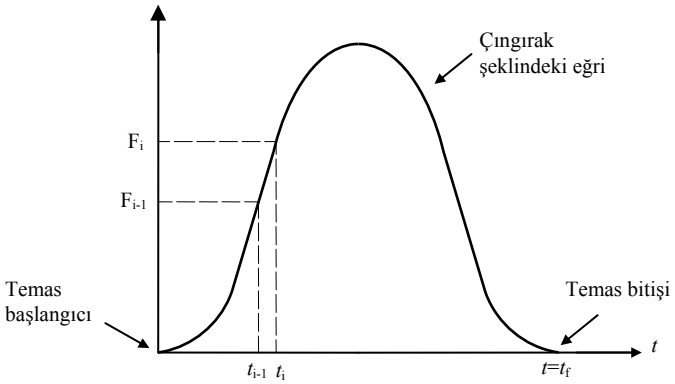
### A1. Darbe Başlangıç Şartları

$F_0$=0 N, $a_0$=0 m/s$^2$

$m$: etkin kütle=13,35 kg $t_0$=0 s

$v_0$= Vurucunun numuneye ilk temastaki hızı m/s

Düşük hızlı darbede zamana bağlı olarak elde edilen kuvvetin değişimi Şekil A1'de görüldüğü gibidir.



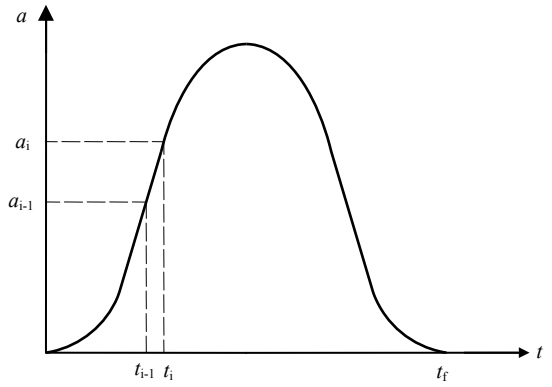

**Şekil A1** Kuvvetin zamana göre değişimi

### A.2 İvme Değişiminin Elde Edilmesi

Merkezi çarpışma için $t$=$t_i$ anındaki ivme Newton'un 2. kanunu yardımıyla hesaplanır:

$$a_i = \frac{F_i}{m} \tag{A.1}$$

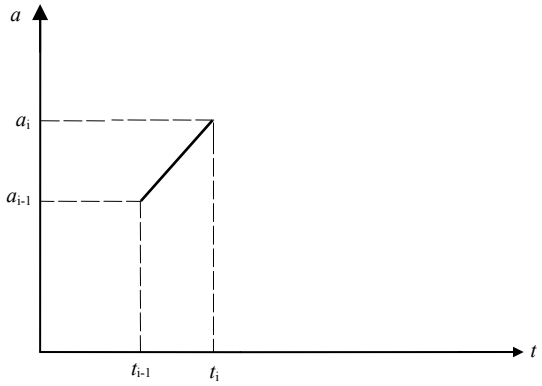
Burada $F_i$, $t_i$ anında kuvvet algılayıcıdan elde edilen kuvvet değeridir. İvmenin zamana göre değişimi, kuvvet-zaman grafiğine benzer.




**Şekil A2** İvmenin zamana göre değişimi

Şekil A2'den görüleceği üzere ivme zamana en az 2. dereceden bağlıdır. $\Delta t$ zaman aralığı çok küçük olduğundan bu değişim 1. dereceden kabul edilebilir. Deney sonuçları 1. dereceden ve 2 dereceden yaklaşımla değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar arasında ihmal edilecek kadar küçük farklar elde edilmiştir. Bu nedenle ifadeler basitliği ve hesap kolaylığı açısından 1. dereceden yaklaşım ile denklemler türetilecektir.

### A.2.1 İvmenin $\Delta t$ aralığında doğrusal değişimi (1. dereceden yaklaşım)




**Şekil A3** 1.dereceden yaklaşımla ivme-zaman değişimi

İki noktadan bir doğru geçer. ($a_{i-1}$ , $t_{i-1}$) ile ($a_i$ , $t_i$) noktalarından geçen doğrunun denklemi,

$$a(t) = kt + c \tag{A.2}$$

Burada $k$ doğrunun eğimi olup,

$$k = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \tag{A.3}$$

ve $c$,

$$c = \frac{t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i}{t_i - t_{i-1}} \tag{A.4}$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt},\ dv = a(t)dt \tag{A.5}$$

(A.5) yardımıyla hız,

$$v = v_0 + \frac{1}{2}k(t^2 - {t_0}^2) + c(t - t_0) \tag{A.6}$$

$t_{i-1}$ ve $t_i$ zaman aralığı için (A.6) denklemini düzenlersek,

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{2}k_i({t_i}^2 - {t_{i-1}}^2) + c_i(t_i - t_{i-1}) \tag{A.7}$$

Şimdi yer değiştirmeleri bulalım,

$$v = \frac{ds}{dt},\ ds = vdt \tag{A.8}$$

(A.8) denkleminde (A.6) daki $v$ ifadesini yerine koyarsak

$$s = s_0 + \frac{1}{6}k(t^3 - {t_0}^3) + \frac{1}{2}c(t^2 - {t_0}^2) - (v_0 + ct_0 + \frac{1}{2}k{t_0}^2)(t - t_0) \tag{A.9}$$

$t_{i-1}$ ve $t_i$ zaman aralığında yer değiştirme,

$$s_i = s_{i-1} + \frac{1}{6}k_i({t_i}^3 - {t_{i-1}}^3) + \frac{1}{2}c_i({t_i}^2 - {t_{i-1}}^2) - (v_{i-1} + c_i t_{i-1} + \frac{1}{2}k_i {t_{i-1}}^2)(t_i - t_{i-1}) \tag{A.10}$$

Böylece N çift ($F_i$ , $t_i$) kuvvet-zaman verilerinden N çift ($F_i$ , $s_i$) kuvvet-yer değiştirme değerleri elde edilir.

**A.3 Düşük hızlı darbe neticesinde deney numunesi tarafından yutulan enerjinin bulunması**

Kütlenin hareket süresince değişmesi halinde Newton'un ikinci kanunu:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \tag{A.11}$$

Burada *m.v* terimi lineer momentum *p* dir. Kütlenin sabit olması halinde (A.11) denklemi;

$$Fdt = d(mv) = mdv \tag{A.12}$$

halini alır.

$$\int_{t_1}^{t_2} Fdt = \int_{v_1}^{v_2} mdv \tag{A.13}$$

Eşitliğindeki sol tarafta bulunan entegral, kuvvet-zaman eğrisi altındaki alanı verir ve impuls kuvveti olarak isimlendirilir. İmpuls kuvveti *J* ile gösterilir.

$$J = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{dp}{dt} \right) dt = p_{t_2} - p_{t_1} = p_{final} - p_{initial} = \Delta p = m \tag{A.14}$$

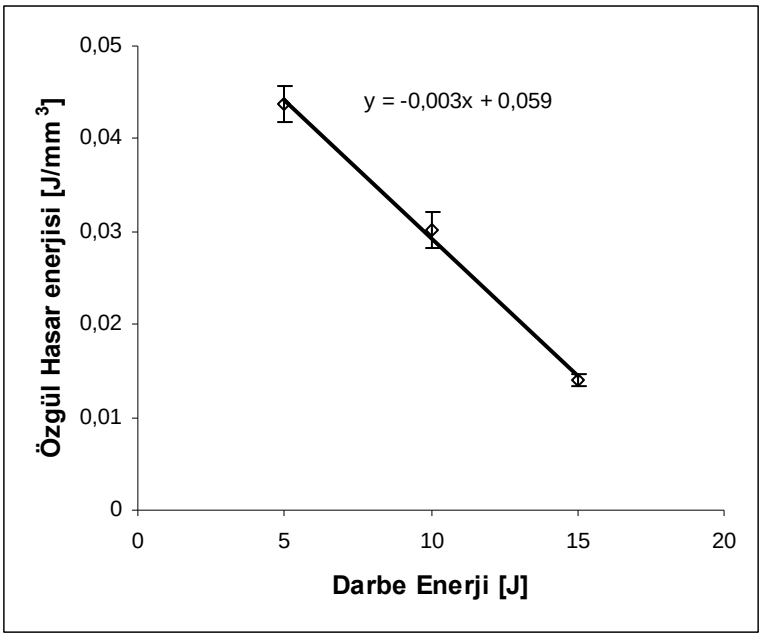
(A.16) dan impuls kuvveti *J*'nin lineer momentumdaki değişime eşit olduğu görülür.

$$\int_{t_{01}}^{t} Fvdt = \int_{v}^{v} vdp = \frac{1}{2} m(v_2{}^2 - v_1{}^2) \tag{A.15}$$

(A.15) eşitliğinin sağ tarafının kinetik enerjideki değişime eşit olduğu görülmektedir. Bu da numune tarafından yutulan enerjiyi vermektedir.

## EK-2 ÖZGÜL HASAR ENERJİSİ

Düşük hızlı darbe deneylerinde darbe enerjisinin ne kadarlık kısmının numune tarafından yutulmuş olduğu tespit edilmiş ve enerji dağılımı Bölüm 7.3.3'te verilmiştir. Numune tarafından yutulan enerji değişik hasar mekanizmaları ortaya çıkarmaktadır. Darbenin etkisiyle numunede meydana gelen hasarlı bölgenin hacmi hesaplanmış ve birim hasar hacmi başına düşen, yutulan enerji miktarı tespit edilmiştir. Birim hasar hacmi başına düşen yutulan enerji miktarı, özgül hasar enerjisi olarak isimlendirilmiştir. Şekil B1'de darbe enerjisi seviyelerine göre özgül hasar enerjisi değişimi verilmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla numune tarafından yutulan enerji miktarı da artmaktadır. Numune tarafından yutulan enerji miktarı arttıkça özgül hasar enerjisi doğrusal olarak azalmaktadır. Darbe enerjisi-özgül hasar enerjisi değişiminden yararlanarak ara enerji değerleri için numunede oluşacak hasar hacminin ve buna bağlı olarak hasar alanının tespit edilebileceği öngörülmektedir.




**Şekil B1** Değişik numunelerde yutulan enerji-özgül hasar enerjisi değişimi

## ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Mersin'in Tarsus ilçesinde doğdu. 2002 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tesisat Öğretmenliği Bölümünden mezun oldu. 2005 yılında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı.

2002-2004 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Sarayönü Meslek Yüksekokulu Doğalgaz-Isıtma ve Sıhhi Tesisat Teknolojisi Programında Öğretim Görevlisi olarak görev yaptı. 2004 yılında Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Meslek Yüksekokulu Doğalgaz-Isıtma ve Sıhhi Tesisat Teknolojisi Programında Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevine devam etmektedir.

Öğr.Gör. Memduh KARA, evli ve bir çocuk babasıdır.

## KİŞİSEL BİLGİLER


| | | |
|---|---|---|
| **Adı Soyadı** | **:** | Memduh KARA |
| **Uyruğu** | **:** | Türkiye Cumhuriyeti |
| **Doğum Yeri ve Tarihi** | **:** | Tarsus 18.10.1980 |
| **Telefon** | **:** | 0 (332) 8340306 |
| **Faks** | **:** | 0 (332) 8340305 |
| **e-mail** | **:** | memduhkara@selcuk.edu.tr |


## EĞİTİM

| **Derece** | | **Adı, İlçe, İl** | **Bitirme Yılı** |
|---|---|---|---|
| Lise | : | Tarsus Anadolu Meslek Lisesi, Tarsus, Mersin | 1998 |
| Üniversite | : | Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Tesisat Öğretmenliği Bölümü, Isparta | 2002 |
| Yüksek Lisans | : | Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya | 2006 |
| Doktora | : | Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya | 2012 |

## İŞ DENEYİMLERİ

| **Yıl** | **Kurum** | **Görevi** |
|---|---|---|
| 2002-2004 | Selçuk üniversitesi Sarayönü Meslek Yüksekokulu | Öğretim Görevlisi |
| 2004- | Selçuk üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu | Öğretim Görevlisi |

## UZMANLIK ALANI

Mekanik tesisat, Düşük hızlı darbe deneyleri

## YABANCI DİLLER

İngilizce

## YAYINLAR

### KİTAPLAR:

1. Akandere, O., Uyaner, M., Ataberk, N., Kara, M., 1. ULUSAL KONYA DOĞALGAZ SEMPOZYUMU ve SERGİSİ BİLDİRİLER KİTABI, 2005, S.Ü. Basımevi, KONYA

### ULUSLARARASI HAKEMLİ MAKALELER:

1. Uyaner, **M., Kara**, M., "Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact", *Journal of Composite Materials*, 41(24), 2877-2895, (2007) ISSN: 0021-9983. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

2. Uyaner, M., **Kara, M**. "Experimental Study of the Impact Behavior of Laminated Composites Striken by Sharp Impactors", *Science and Engineering of Composite Materials*, 19(3), ……-…….(2012) ISSN (Online) 2191-0359, ISSN (Print) 0792-1233, DOI: 10.1515/secm-2011-0135

### ULUSLARARASI KONGRE BİLDİRİLERİ:

1. Uyaner, M., **M. Kara** and N. Ataberk, "Impact behavior of E-Glass/Epoxy laminated composite", 7. Uluslararası Kırılma Konferansı, 19-21 October, Kocaeli, TURKEY. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

2. Uyaner, M., **M. Kara** ve N. Ataberk, "E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışına numune boyutlarının etkisi", 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, 7-9 November 2007, Istanbul, TURKEY. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

3. **Kara, M.** ve Uyaner, M., "Tabakalı kompozitlerin darbe cevabına vurucu şeklinin etkisi", 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, 7-9 November 2007, Istanbul, TURKEY.

4. Yapici A., Metin M., Uyaner M., **Kara M.** and Eskizeybek V., "Effect of Low Velocity Impact Damage on Composite Plates", 13th International Conference on Applied Mechanics & Mechanical Engineering, May 27-29, 2008, Military Technical College Kobry Elkobbah, Cairo, EGYPT.

5. **Kara, M.**, Avci, A., ve Uyaner, M., "Kompozit Yama Yapılmış E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Cevabı", 12. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, 15-17 Ekim 2008 Denizli, TURKEY.

6. Uyaner, M., **Kara, M.**, Gemi, L., "Filaman Sarım E-Cami/Epoksi Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mukavemeti", 13th International Materials Symposium (IMSP'2010) 13-15th October 2010 - Pamukkale University-Denizli-Turkey.

7. **Kara, M.**, Yüce, İ., Işık M. ve Uyaner, M., "Dairesel Kompozit Tabakalarda Düşük Hızlı Darbe Hasarının İncelenmesi", 13th International Materials Symposium (IMSP'2010) 13-15th October 2010 - Pamukkale University-Denizli-Turkey.

8. **Kara, M.**, Uyaner, M., Avcı, A., "İç basınç altındaki filaman sarım CTP kompozit boruların düşük hızlı darbe cevabı", 9. Uluslararası Kırılma Konferansı, 19-21 Ekim 2011, Istanbul, TURKEY. (Doktora Tezinden yayınlanmıştır.)

9. Uyaner, M., **Kara, M.**, Şahin, A., "Düşük hızlı darbe görmüş filaman sarım E-camı/epoksi boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi", 9. Uluslararası Kırılma Konferansı, 19-21 Ekim 2011, Istanbul, Türkiye.

10. Akdemir, A., Arıkan, H., Erdem, Y., **Kara, M.**, Uyaner, M., "Çelik talaşı/silikon kompozit malzeme üretimi ve düşük hızlı darbe özelliklerinin deneysel incelenmesi", 9. Uluslararası Kırılma Konferansı, 19-21 Ekim 2011, Istanbul, Türkiye.

**ULUSAL HAKEMLİ MAKALELER:**

1. Necati Ataberk, Mesut Uyaner, **Memduh Kara**, Yapılarda Isı Yalıtımının Yapı Maliyetine Etkisi, İzolasyon Dünyası, 49, 68 - 72, 2004.

2. **Kara, M**., Uyaner, M., Doğalgaz Isıtma ve Sıhhi Tesisat Teknolojisi programı öğrencilerinin endüstriye dayalı öğretim hakkındaki görüşleri ve beklentileri, Selçuk Üniversitesi Kadınhanı Faik İçil Meslek Yüksekokulu Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, Yıl 1 – Sayı 1 – Mayıs 2011

**PROJELER:**

1. Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, S. Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No: 2004/118, Yardımcı yürütücü, 2006.

2. Düşük hızlı darbeye maruz filaman sarım CTP kompozit boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışının incelenmesi, S. Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje No: 08401118, Proje Yöneticisi, Yardımcı yürütücü, 2011.