



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARLI FİLAMAN SARIM HİBRİD BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI

Lokman GEMİ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2014

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Lokman GEMİ
Tarih: 30/01/2014

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARLI FİLAMAN SARIM HİBRİD BORULARIN İÇ BASINÇ ALTINDA YORULMA DAVRANIŞI

Lokman GEMİ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanlar: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Doç. Dr. Mesut UYANER

2014, 164 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Doç. Dr. Ahmet SAMANCI

Filaman sarım kompozit borular yüksek basınçta kimyasal madde içeren akışkanların iletilmesinde, endüstriyel atıkların uzaklaştırılmasında, petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanılmaktadır. Kullanım sırasında kompozit boruların uğrayacağı düşük hızlı darbeler; matris çatlakları, elyaf kopmaları ve özellikle tabakalar arası ayrılma gibi gözle zor tespit edilebilecek hasarlara yol açarlar. Oluşan bu hasarlar borularda hem mukavemet kaybına hem de yorulma ömründe düşüşe neden olabilirler. Bu amaçla cam/karbon/cam sıralaması kullanılarak [$\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$] konfigürasyona sahip hibrit kompozit borular üretilmiştir. ANSI/AWWA C950 standardında ön görülen çalışma koşulları esas alınarak CTP borular basınç sınıflarına ayrılmış ve boruların işletme basınç değerleri 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 ve 48 MPa teğetsel ön gerilmeler olacak şekilde test koşulları belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla, yukarıda belirtilen ön gerilmeler altında çalışan borular üzerine 20J enerjiyle düşük hızlı darbe uygulanmış ve ön hasar oluşturulmuştur. Düşük hızlı darbe sırasında boruların dinamik davranışları ve oluşan hasar incelenmiştir. Yapılan çalışma neticesinde 24 MPa ön gerilme değerinden daha yüksek gerilmeler altında, darbe ön hasarının, boruların yorulma davranışına etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra, ANSI/AWWA C950 standardına ön görülen işletme basıncı kategorilerinden 6, 12 ve 18 MPa ön gerilme değerleri esas alınarak deney parametreleri belirlenmiştir. Darbe hasarlı hibrit borular, ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç testine tabi tutulmuştur. Boruların patlama mukavemetleri belirlenmiştir ve oluşan hasarlar incelenmiştir. Darbe hasarlı ve hasarsız boruların yorulma davranışlarının belirlenmesi amacıyla ASTM-D 2992-06 standardına uygun olarak (R=0.05 gerilme oranı ve f=0.42 Hz frekansta) yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme altında darbeye maruz kalmış numuneler, hasarsız numunelerin patlama mukavemetinin %30, %35, %40, %45, %50 ve %55 gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, darbe hasarsız numunelerin davranışlarıyla karşılaştırılmıştır. Yorulma deneyleri sırasında gelişen hasarlar detaylı bir biçimde incelenmiş ve üç önemli hasar aşaması belirlenmiştir. Bu hasarlar; terleme veya damlacık şeklinde ilk sızıntı, yoğun sızıntının (su jeti) başlaması, tabaka ayrılması ve patlama şeklinde sonuç hasarıdır. Sonuç hasarın oluştuğu çevrim sayıları kayıt edilerek *S-N* eğrisi elde edilmiştir. Yorulma sonrası numunede oluşan hasar bölgeleri incelenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde uygulanan ön gerilme değeri arttıkça darbe ön hasarının azaldığı, buna bağlı olarak statik patlatma mukavemeti ve yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, Elyaf takviyeli plastik, Filaman sarım, Hasar davranışı, Hibrit kompozit, İç basınç, Yorulma

ABSTRACT

Ph.D THESIS

FATIGUE BEHAVIOR OF FILAMENT WOUND HYBRID PIPES WITH LOW VELOCITY IMPACT DAMAGE UNDER INTERNAL PRESSURE

Lokman GEMİ

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

Advisors: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER

2014, 164 Pages

Jury
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Assoc. Prof. Ahmet SAMANCI

Filament wound composite pipes are used in high pressure chemical's transportation, industrial waste disposition, oil and natural gas transmission lines. In case of this type of pipes experience low velocity impacts, barely visible damages such as matrix cracking, fiber breakage and delamination can form. These damage types can result in both loss of strength and decrease of fatigue life. For investigation of this situation, composite pipes with glass/carbon/glass sequence have been produced at $[\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°]$ configuration. In accordance with ANSI/AWWA C950 standard, the pipes classified into operating pressure classes and testing pressures determined such that tangential pre-stress are 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 and 48 MPa.

In order to investigate the effect of low velocity impact damage and dynamic behavior, the pipes subjected to 20J low velocity impact while they are working under different pressures. After the tests, it is observed that when the operating pressure in higher than 24 MPa, the lows velocity impact damage does not affect the fatigue life of the pipes. After that point, the testing parameters modified by considering only pressure classes which yields 6, 12, 18 MPa's tangential pre-stresses. After the low velocity impact, the pipes subjected to internal pressure test according to ASTM D 1599-99 standard and burst pressure and damage formation have been investigated.

In order to obtain the fatigue behavior the intact and impact pre-damaged pipes were subjected to fatigue testing according to ASTM D 2992-06 which stipulates stress ratio of R=0.05 and loading frequency of f=0.42 Hz. For this aim, the pipes subjected low velocity impact under different operating pressures have now subjected to fatigue loading at stress levels 30%, 35%, 40%, 45%, 50% and 55% of burst pressure of intact pipes. The obtained results were compared with fatigue behavior of intact pipes. The damage formation during fatigue loading was examined in detail and three different damage types were observed which are; leakage initiation as sweating or oil droplet formation, intense leakage, delamination and explosion final failure. The final failure cycles were recorded and used for obtaining S-N curves. After the fatigue testing, the damage zones within material were examined. As a result of this study, it is observed that, the static burst pressure and fatigue life increased with increased pre-stress value.

Keywords: Damage behavior, Fatigue, Fiber reinforced plastic, Filament wound, Hybrid composite**,** Internal pressure, Low velocity impact,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği sağlayan Tez Danışmanlarım Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e ve Doç. Dr. Mesut UYANER'e,

Bu süreçte çalışmalarımı sabırla takip ettikleri ve benden tecrübelerini ve desteklerini hiç esirgemedikleri için Tez İzleme Komitesi üyelerinden Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya ve Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU'na,

Tez konusunun belirlenmesinde ve literatür araştırmaları noktasında yurtiçi ve yurtdışı deneyimlerini benden esirgemeyen Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e,

Çalışmalarımın özellikle darbe deneylerinin yapılması esnasında teorik ve deneysel bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Öğr. Gör. Dr. Memduh KARA'ya,

Yorulma deneylerinde deney cihazı, donanımlar ve manevi desteklerini benden esirgemeyen Doç. Dr. Ahmet SAMANCI ve Doç. Dr. Hüseyin ARIKAN'a,

Tezimin okunması ve düzeltmelerinin yapılması esnasında çalışmalarıma zaman ayırdıkları için Mak. Yük. Müh. Turan DEMİRCİ ve Mak. Yük. Müh. Egemen KARABULUT'a,

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için deney numunelerin temin edilmesi ve incelenmesi gibi konularda 10201062 nolu proje ile maddi destek veren Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne,

Özellikle, çalışmalarımın başlangıcından bitimine kadar hiçbir fedakârlıktan kaçmadan maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen anneme, babama ve eşime

SONSUZ TEŞEKKÜRÜ BİR BORÇ BİLİRİM.

Lokman GEMİ
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

3. KOMPOZİT MALZEMELER **13**

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı 13
3.2. Matris Malzemeleri 13
3.2.1. Termoset matrisler 14
3.3. Takviye Malzemeleri 14
3.3.1. Cam elyaflar 15
3.3.2. Karbon elyaflar 15
3.4. Tabakalı Kompozitler 16
3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler 17
3.5. Kompozit Üretimi 17
3.5.1. Filaman sarım yöntemi 17

4. KOMPOZİT MALZEMELERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE HASAR ANALİZİ **20**

4.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği 20
4.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları 20
4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı 22
4.3. Darbe Testleri 23
4.3.1. Ağırlık düşürme darbe testi 24
4.3.2. Yüksek hızlı darbe testi 25
4.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları 26
4.4.1. Matris hasarı 27
4.4.2. Delaminasyon 29
4.4.3. Darbe ile elyaf hasarı 32
4.4.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması 34
4.4.5. Nüfuziyet 34

5. YORULMA **35**

5.1. Giriş 35
5.2. Yorulma Testi 36

5.2.1. Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi 38
5.2.2. Gerilme-çevrim sayısı (S/N) eğrisi 38
5.3. Kompozit Malzemelerde Yorulma 38
5.4. Yorulma Olayının Gelişimi 42

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 43

6.1. Hibrit Kompozit Boruların Kavramsal Tasarımı 43
6.2. Hibrit Kompozit Boruların Üretimi 44
6.2. Yakma Deneyi 45
6.3. Açık Uçlu İç Basınç Altında Düşük Hızlı Darbe Deneyleri 46
6.3.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı 47
6.3.2. Kompozit boruların yataklanması ve teğetsel ön gerilme uygulama ünitesi 48
6.4. Hibrit Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi 49
6.4.1. Kuvvet-zaman (*F*-*t*) eğrileri 50
6.4.2. Kuvvet-Çökme (*F*-*d*) eğrileri 51
6.5. Statik İç Basınç Deneyleri 52
6.5.1. Statik iç basınç test düzeneği 53
6.6. Hibrit Boruların Statik İç Basınç Patlama Hasar Davranışlarının Belirlenmesi .. 55
6.6.1. Statik iç basınca maruz darbe hasarlı boruların patlamasının akustik emisyon ile hasar analizi 55
6.7. Hibrit Kompozit Borunun Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi 56
6.8. Serbest Uçlu Hibrit Boruların Değişken İç Basınç Altında Yorulma Deneyleri . 57
6.8.1. İç basınç yorulma deney cihazı 58
6.9. Darbe ve Yorulma Sonrası Makro ve Mikro Hasarlarının İncelenmesi İçin Numune Hazırlama 59

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 62

7.1. Hibrit Kompozit Boruların Yakma Deney Sonuçları 62
7.2. Hibrit Kompozit Boruların Mekanik Özellikleri 62
7.3. Hibrit Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları 63
7.3.1. Temas kuvveti-zaman değişimi 63
7.3.2. Temas kuvveti-yer değiştirme 66
7.3.3. Farklı ön gerilme değerleri için darbe deneylerinde oluşan en büyük teğetsel gerilme değerleri 69
7.3.4. Düşük hızlı darbe hasar analizi 70
7.4. Darbe Ön Hasarlı Hibrit Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları .. 85
7.4.1. Darbe ön hasarlı borularda ön gerilme - patlama mukavemet ilişkisi 85
7.4.2. Hasarsız ve darbe ön hasarlı boruların patlama hasar analizi 87
7.4.3. Yorulma deneylerinde kullanılacak hibrit borulara darbe öncesi uygulanacak teğetsel ön gerilme değerlerinin belirlenmesi 97
7.5. Hasarsız ve Darbe Ön Hasarlı Hibrit Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Deneyleri 101
7.5.1. Hasarsız hibrit boruların yorulma hasar analizi 102
7.5.2. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma hasar analizi 113
7.5.3. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma hasar analizi 122
7.5.4. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma hasar analizi 130

8. SONUÇLAR 141

KAYNAKLAR 145

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ_a : Eksenel gerilme

σ_n : Basınçlı kabın yüzeyine dik yönde etki eden gerilme

$\sigma_{T,}$ σ_{HS} : Teğetsel gerilme

P : Basınç

E : Elastisite modülü, teğetsel yönde rijitlik katsayısı

ν_y: Poisson oranı, şekil değiştirme oranı

W_f : Elyafın ağırlığı

W_c : Kompozitin ağırlığı

ρ_f : Elyafın yoğunluğu

ρ_c : Kompozitin yoğunluğu

V_f: Elyafın hacimsel oranı,

V : Hız

V_y : İzafi hız

d : Deplasman, yer değiştirme

E_a : Yutulan enerji

F : Kuvvet

δ : Yer değiştirme

δ_f : Kalıcı yer değiştirme

t : Zaman

p : İmpuls

W_d : Çarpışmada parça üzerine yapılan iş

D : Boru çapı

t_r : Boru cidar kalınlığı

θ, α : Elyaf sarım açısı

S : Gerilme

N : Çevrim sayısı

R : Gerilme oranı

f : Frekans

Kısaltmalar

AE: Akustik emisyon

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

Alt İndisler

g: Cam (glass)

c: Kabon (carbon)

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 bunlardan üretilen 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 iyi özelliklerini gösterecek tarzda, genellikle matris adı verilen ana yapı ile takviye malzemesinden oluşmaktadır (Kara 2006). Plastik matrisli bir kompozit yapımında matris malzemesi olarak epoksi, polyester, vinilester gibi reçineler kullanılırken, takviye malzemesi olarak E-camı, S-camı, karbon ve aramid elyaf gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Cam-karbon elyaf takviyeli hibrit kompozit malzemeler, reçinenin içerisine takviye malzemesi olarak cam ve karbon elyaflarının katılmasıyla elde edilen kompozit malzemelerdir. Hibrit kompozit içerisinde cam ve karbon elyaflar, sürekli veya süreksiz fazda bulunabilirler. Farklı elyaflar olan cam ve karbon birlikte veya farklı tabakalarda ihtiyaca göre farklı malzeme sırasında (material sequence) sıralanabilirler. Hibrit borular yüksek mukavemet, çok sayıda kimyasal maddeye, hava koşullarına, UV ışınlarına dayanım ile farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlarda ve kombinasyonlarda ve istenilen boyutlarda üretilebilme, seri üretim 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 almışlardır (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. Bu hasar iç yapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerin darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde meydana gelirken, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmeyebilir (Kara 2006).

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 montaj yada sonrasında 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 sonucunda gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasarlar mukavemetin azalmasına sebep olur ve yük altında bu hasarlar büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler 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.

Bu çalışmada; hem darbeye karşı hemde yorulmaya karşı dirençli, filaman sarım yöntemiyle Karbon, E-camı/epoksi malzemeden imal edilen içten dışa doğru $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açısına sahip, hibrit kompozit borular kullanılmıştır. Hibrit kompozit borular İzoreel firmasında her bir sarım açısında 2 tabaka olacak şekilde Cam/Karbon/Cam malzeme sırasında üretilmiştir. Üretilen deney numunelerine ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 ve 32 bar iç basınçlar uygulanmış; 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, ve 48 MPa teğetsel

ön gerilme değerleri elde edilmiştir. Teğetsel ön gerilme uygulanan hibrit boru numunelerine 20 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda F-t (temas kuvveti-zaman), F-d (kuvvet-yer değiştirme) grafikleri elde edilmiştir. Belirlenen teğetsel ön gerilme değerlerinde düşük hızlı darbeye maruz kalan deney numunelerinde oluşan hasar alanları incelenmiş ve hasar modları tespit edilmiştir. Yorulmada kullanılacak teğetsel ön gerilme değerlerini belirlemek için darbe ön hasarlı deney numuneleri 226,5 MPa (%50 σ_{HS}) maksimum teğetsel gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. Yapılan bu çalışmalar doğrultusunda statik iç basınç ve yorulma deneylerinde kullanılacak işletme teğetsel ön gerilme parametreleri 6, 12, ve 18 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe ön hasarına uğramış hibrit borular ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testine maruz bırakılmıştır. Hibrit borularda statik iç basınç testlerinde meydana gelen hasar ilerlemesi, patlama hasarları ve boruların patlama mukavemetindeki değişimler tespit edilmiştir. Darbe hasarsız ile 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme altında 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların yorulma ömürlerini ve hasar gelişimlerini belirlemek amacıyla ASTM E 2992 standardına göre yorulma deneyleri yapılmıştır. Yorulma deneylerinde kullanılacak maksimum gerilme değerleri; hasarsız numunenin açık uçlu iç basınç patlatma deneylerinde elde edilen teğetsel maksimum mukavemet değerlerinin (σ_{HS}) %30, %35, %40, %45, %50 ve %55 oranlarında olacak şekilde belirlenmiştir. Yorulma deneyleri esnasında; terleme veya damlacık oluşumu ilk sızıntı, su jeti başlaması ile yoğun sızıntı ve sonuç hasarı şeklinde üç önemli hasar aşaması belirlenmiştir. Sonuç hasar çevrimine göre maksimum teğetsel gerilme-çevrim sayısı grafikleri verilmiştir. Yapılan bütün çalışmalarda, numunede oluşan hasar bölgelerinin makro ve mikro yapıları incelenmiş ve hasarlar kategorize edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Birçok mühendislik uygulamasında kullanılan kompozit malzemelerin; son yıllarda teknolojinin de gelişmesi ile üretim teknikleri gelişmekte ve kullanım alanları hızla artmaktadır. Yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu bir malzeme olan elyaf takviyeli filaman sarım hibrit kompozit borular yüksek basınca ve korozif ortamlara dayanıklı malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı filaman sarım hibrit borular özellikle basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal madde iletiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca savunma sanayi, uzay ve havacılık alanlarında da kullanılmaktadır. Stratejik bir öneme sahip, ileri kompozit malzeme sınıfına giren, hibrit (Karbon, E-cam/epoksi) kompozit boruların imalat parametrelerinin ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu büyük önem arz etmektedir. Bu sayede; gerek endüstriyel amaçlı kulanım için ve gerekse savunma sanayinde kullanım için, özellikle darbe ve yorulma yükü altında bu tür malzemelerin mekanik özelliklerinin ve hasar davranışlarının bilinmesi, dizayn ve tasarım için çok önemlidir.

Kompozit malzemeler hakkında deneysel ve teorik birçok çalışma yapılmıştır. Mekanik özelliklerinin, elyaf sarım açısının ve üzerinde bulunması muhtemel olan yüzey hatalarının, değişken yükleme şartlarında malzeme ömrüne etkisi gibi konular incelenmiştir. 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 yorulma yükü altında malzemenin mekanik özelliklerinde büyük değişimlere sebep olabilir ve istenmeyen kazalar ortaya çıkabilir.

Filaman sarım boruların basınca cevabı ve sarım açısının deformasyon ve hasar mekanizmasına etkisi ile ilgili olarak birçok çalışma yapılmıştır.

Cam takviyeli plastiklerden yapılmış flaman sarım borular izotropik malzemelerden yapılmış olan borulardan daha büyük avantaja sahiptirler. Bununla beraber bu tip malzemelerin anizotropik karakterlerinden dolayı boruların yük altındaki davranışları, tasarım kriterleri çok daha karışıktır.

Pagano ve Halpin (1968), çekme, basma, iç basınç ve burulma yükleri altında anizotropik tüplerin tabakalanma analizini incelemiştir. Pagano ve Halpin (1968), anizotropik filaman sarım ince cidarlı borularda deformasyon davranışlarını analitik ve deneysel olarak araştırmıştır. Yine Pagano (1970, 1971), tabakalı silindirlerin elastik gerilme bileşenlerini kabuk teorisini kullanarak incelemiştir.

Cam elyaf polyester filaman sarım borularda sarım açısının deformasyon ve hasar mekanizmasına etkisini Spencer ve Hull (1978), Hull ve diğ.(1978), teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir. Ayrıca iç basınca maruz CTP filaman sarım borularda deformasyon hızına sarım açısının etkisi statik ve dinamik patlama testleri ile araştırılmıştır (Coo 1985, Hashin ve Rotem 1973).

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

Kaddour ve diğ. (1998) kalın ve ince cidarlı ±55° sarım açılı kompozit silindirlerin dış basınç (çevresel gerilmenin eksenel gerilmeye oranı 2:1) dahil çeşitli iki eksenli yükleme oranları altındaki davranışını incelemişlerdir.

Graham (1995) kutupsal ve spiral sarım konfigürasyonları ile dış basınç testlerine konu olan kalın ve ince cidarlı cam ve karbon/epoksi silindirleri (d_i/t=6, 9, 16 ve 21) incelemiştir.

Kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelemesine yönelik olarak birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir:

Doyum ve Altay (1996), ($\pm 45°_2$, 90°) S-camı ve ($\pm 54°_3$ ve 90°) E-camı filaman sarım ince borularda düşen ağırlık etkisini ve sonrası hasar durumunu 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 borularda büyük ölçüde yüzey çatlağı ve tabakalar arası ayrılma hasarı görülmüştür.

Kistler ve Waas (1998), uçak yapılarını temsil eden silindirik kavisli karbon epoksi kompozitlerde 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.

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 gelişiminin 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.

Tarfaoui ve diğ. (2007), cam epoksi silindir yapıların hasarına ve dinamik cevabına ölçek ve boyut etkisini araştırmışlardır. 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 süresinin numune boyutlarıyla doğrudan ilişkili olduğunu rapor etmişlerdir.

Darbe sonrası veya farklı şekillerde hasarlandırılmış kompozit boruların kalan (artık) patlama mukavemetlerin tespiti ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır: Curtis ve diğ. (2000), darbeye ya da statik batmaya maruz kalan filaman sarım kompozit tüplerin hasar, deformasyon ve kalan patlama mukavemetini incelemişlerdir. Statik batma ve düşük hızlı darbe sonuçları karşılaştırılmıştır. Tüplerin statik batma ve düşük hızlı darbe davranışlarının aynı olduğunu belirlemişlerdir. Düşük enerjili batmayla oluşan matris çatlama hasarının kalan patlama mukavemetine etki etmediğini ama yüksek enerjili batmayla oluşan elyaf burkulmasının kalan patlama mukavemetini %60 a kadar düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Deniz ve Karakuzu (2012) $[\pm 55]_3$ sarım açılı cam-epoksi kompozit boruların darbe davranışına deniz suyuna daldırmanın etkisini deneysel olarak incelenmişlerdir. Kompozit borular 50 mm, 75 mm , 100 mm ve 150 mm lik dört farklı çapta seçilmiştir. Borular laboratuar ortamında % 3.5 tuz oranına sahip deniz suyunda 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda bekletilmiştir. Bu periyotların sonunda numuneler 20 ^{o}C ortam sıcaklığında 15 J, 20 J ve 25 J olacak şekilde üç farklı enerji seviyesinde darbeye maruz bırakılmıştır. Kuru ortamda bekletme ve daldırma durumlarındaki karşılaştırmalar darbe testlerindeki temas kuvveti eğrisi ve absorbe edilen enerji verileri kullanılarak yapılmıştır. Absorbe edilen rutubet, deniz suyundaki tuz, boruların çapı, kalan mukavemet, maksimum temas kuvveti, absorbe edilen enerjinin kompozit boruların hasarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

P. B. Gning ve diğ. (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 6 mm ve uzunluğu 110 mm'dir. Öncelikle hasarsız numunelere dış basınç uygulanmış ve patlama basınçları tespit

edilmiştir. Daha sonra farklı enerji seviyelerinde 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.

Gning ve diğ. (2005), kalın ±55° filaman sarımlı cam epoksi tüplerine 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.

Uyaner ve diğ. (2010), 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 6,35 kg ağırlıklı 24 mm yarı küresel vurucu ile 2, 3 ve 4 m/s'lik çarpma hızlarında düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Ayrıca hasarlı kompozit borulara ASTM D 1599-99 standardına göre statik patlatma testi uygulanmıştır. 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 düştüğünü tespit etmişlerdir.

Uçları açık ve kapalı filaman sarım CTP borular iç basınç testlerine tabi tutulmuştur (Jones ve Hull 1979, Misag-Tübitak 2001, Spencer ve Hull 1978, Tarakçıoğlu 1992). Kısa süreli deneylerde, sarım açısının artışına bağlı olarak patlama basıncına yakın gerilmelerde, damlacıklar halinde sızıntının oluştuğu ve basıncın azaldığı gözlenmiştir. Bu olayı Jones ve Hull (1979), içten itibaren elyafa paralel oluşan radyal çatlakların, katlar arasındaki elyaf kesişme noktasında bir sızıntı yolu oluşturmalarıyla açıklamışlardır. Sürünmenin, kısa süre sızıntı gerilmesinin altındaki gerilmelerde çok uzun sürelerde meydana geldiği, bu olaya aslında radyal çatlamanın yol açtığı bilinmektedir. Richard ve Perreux (2000), tabakalı kompozit malzemelerde

güvenilirlik yaklaşımıyla hasar mukavemetinin optimizasyonu konusunu incelmişlerdir. Yaptıkları çalışmada iç basınç altındaki filaman sarım CTP boruların hasar davranışını incelemişlerdir. Bu boruların sızıntı hasarının, yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir (Wang ve diğ. 1997). Bu çalışmada ASTM D2992-91'e göre (silindir teorisi) uygulanan gerilmeler hesaplanmıştır.

Xia ve diğ. (2001), yaptıkları çalışmada filaman sarım kompozit borularda elastik gerilme analizinin basitleştirilmiş bir şeklini incelemişlerdir. Burada boru sadece iç basınca maruzdur. Bu tip borularda eğilme, düşey yükleme, aksiyal yükleme ve iç basınç şartları denenmiştir (Akkus ve Kawahara 2000, Alderson ve Evans 1992, Nishiwaki ve diğ. 1995, Onoda 1985, Smerdov 2000). Rosenow (1977), klasik laminasyon teorisini kullanarak farklı açılar için gerilme şekil değiştirme ilişkisini incelemiştir.

Kompozit boruların yorulma davranışları ile ilgili de birçok çalışma yapılmıştır: Ellyin ve Martens (2001), filaman sarım metoduyla üretilmiş olan CTP boruları iki eksenli yorulma deneyine tabi tutmuşlardır. Deneylerde farklı teğetsel/eksenel yükleme durumları için malzemenin yorulma davranışları incelenmiş, sızıntı ve hasar dayanımları belirlenirken, yine iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişim ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Borularda yorulma olayı ASTM D 2992 standardına göre yapılmıştır. Bu standarda göre deneyler 0,42 Hz frekansta ve R=0,05 gerilme oranında gerçekleştirilmiştir.

$(\pm 55°)_2$ sarım açılarına sahip cam-epoksi kompozit borular Kaynak ve Mat (2001) tarafından eksenel yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yükleme değerleri malzemenin çekme dayanımının %60, %70, %80 aralıklarında seçilerek S-N diyagramı elde edilmiştir.

Rebiere ve diğ. (2001)'nın yaptıkları çalışmada yapıdaki radyal ve boyuna çatlakların gerilme bölgesine etkisi, rijitlikteki düşüş ve Poisson oranındaki düşüşü incelemişlerdir. Deneyler statik ve alternatif yükler altında yapılmıştır. Birçok araştırmacı boyuna çatlakların statik yük değeri ve çevrim sayısı arttıkça arttığını göstermişlerdir (Boniface ve Ogin 1989, Henaff-Garden 1990).

Filaman sarım kompozit borular birçok araştırmacı tarafından tek eksende yorulmaya tabi tutulmuştur (Kaynak ve Mat 2001, Bredemo 1992, Conder ve Newhouse 1980). Ferry ve diğ.'ne (1998) göre, bir kompozit malzemenin yorulma direnci, matrisin hasara karşı direnci ile ilgilidir. O'brien ve Reisfinder'e (1981) göre, hasar başlayınca

rijitlik azalır. Hwang ve Han'a (1986) göre, kompozit malzemelerde sekant modülündeki düşüş, hasarın bölgesel olarak birleşimi ile belirlenir. Deneyin yapıldığı frekans düşük olursa malzeme yorulmadan çok sürünmeye maruz kalır. Çünkü düşük frekans daha uzun yükleme periyodu demektir (Reisfinder ve diğ.1983).

Smith ve Wood (1990), hasar kriteri olarak rijitlik düşüşünü değil, Poisson oranının değişimini kabul etmişlerdir. Çünkü aynı hasar oranında Poisson oranındaki değişim daha fazladır (Harris ve diğ.1989).

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

Wolodgo (1999), yaptığı çalışmada ±71° ve ±45° derecelik sarım açılarına sahip filaman sarım boruları, çekme yönünde yorulmaya maruz bırakmıştır. Sızıntıya sebep olacak gerilmeler, hasar noktaları, makroskopik hasar modları, yükleme oranı (R) ve statik ve alternatif yükleme durumuna göre incelemiştir. Ayrıca, matris hasarı ile sızıntı ömrü ilişkisini incelenmiştir. Deneysel çalışmalar bir sonlu elemanlar analiziyle doğrulanmıştır. Bu deneyler, değişik eksenel/teğetsel gerilme oranlarında gerçekleştirilmiştir.

Martens (1999), yaptığı çalışmada iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişim ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkinin belirlenmesini incelemiştir. Hashin ve Rotem (1973), değişik modlarda elyaf takviyeli malzemeler için yorulma mukavemet kriteri ortaya koymuşlardır. Çok yönlü tabakalı kompozitler ele alındığında bir başka hasar türü olan tabaka ayrılması dikkate alınmalıdır (Rotem 1979).

Perreux ve diğ. (1997) yaptıkları çalışmada $(\pm 55°)_3$ açılı tabakalı kompozit filaman sarma borular kullanmıştır. Frekansın ömür ve hasar etkisi incelemişlerdir ($0.02 \leq$ frekans ≤ 5 Hz). Frekans arttıkça ömrün arttığını fakat belli bir noktadan sonra frekans artıkça ömrün değişmediğini göstermişlerdir. Reisfinder (1977), yorulma sırasında matris malzemesindeki çatlakların sürekli artmadığını ve belli bir çevrim sayısından sonra doyuma ulaşıp daha fazla ilerlemediği göstermişlerdir.

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

Sarı ve diğ. (2012) darbe enerjisinin kompozit boruların statik patlama basıncına ve yorulma ömrüne etkisini araştırmışlardır. Numuneler 100 mm iç çapında ve 400 mm uzunluğunda üretilmiştir. Darbe testleri 5 J, 7.5 J ve 10 J gibi üç farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet-yer değişim eğrileri çizilmiştir. Darbeli ve darbesiz numunelere statik iç basınç uygulanmış hasar basınçları tespit edilmiştir. Bu basınç referans alınarak kompozit borular sırasıyla yorulmaya maruz bırakılmış ve dinamik hasar ve yorulma ömürleri elde edilmiştir. Statik testte darbeden sonra sızıntı ve patlama basıncında azalma, terleme, sızıntı ve patlama çevrimlerinde düşüş gözlenmiştir.

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

Deniz ve diğ. (2013), ±55° cam elyaf takviyeli flaman sarım borularda çevrimsel iç basınç altındaki cam-epoksi kompozit boruların yorulma ömrüne deniz suyunun ve darbe yükünün etkisini araştırmışlardır. Kompozit boruları 3, 6 ve 9 aylık zaman aralıklarında deniz suyuna daldırılıp bekletilmiştir. Üç farklı enerji seviyesinde darbe testi (5 J, 7.5 J ve 10 J) uygulandıktan sonra borular yorulma testine tabi tutulmuştur. Hem darbe enerjisine hemde deniz suyuna daldırma süresine göre, yorulma ömründe değişiklikler görüldüğünü rapor etmişlerdir. Darbesiz numunelerin yorulma ömrü darbeli numunelerden daha büyüktür. Yorulma süresince yorulma hasar tipleri terleme, sızıntı ve patlama olarak belirlemişlerdir.

Literatürde hibrit kompozitler hakkında yapılmış birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar genel olarak hibritasyonun darbe davranışına ve yorulmaya etkisini incelemişlerdir. Özellikle hibrit kompozitlerde tabaka sıralamasının ve takviye malzemelerinin oranının önemi vurgulanmıştır.

Cam-grafit/epoksi hibrit kompozit malzemelere Sevkat ve diğ. (2009) ağırlık düşürme testi uygulamışlardır. Malzemenin dinamik cevabı sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hibrit örgülü kompozit panellerde oluşan hasar türleri ve enerji absorbsiyonu incelenmiştir. Çalışmalarının sonucunda; test edilen bu dört sıralamadan GL (cam) kompozitlerinin en yüksek, GR (grafit) kompozitlerinin en düşük darbe direncine sahip olduğunu göstermişlerdir. Diğer iki kompozitten dışı cam-içi karbon olan malzeme, dışı karbon içi cam olan malzemeden hafifçe daha iyi davranış sergilediğini rapor etmişlerdir.

Hosur ve diğ. (2005) örgülü cam ve örgülü karbon elyaf takviyeli kompozit levhaların düşük hızlı darbe davranışını çalışmışlardır. Malzemede oluşan deformasyon ve hasar incelenmiştir. Bu çalışmada, dört farklı kombinasyonda hibrit kompozit plakaların düşük hızlı darbe yüklemesi durumundaki deneysel olarak cevapların tespiti gerçekleştirilmiştir. Karbon-epoksi ve cam-epoksi plakaların cevabı hibrit numunelerle karşılaştırılarak incelenmiştir. Sonuç olarak, karbon epoksi plakalara göre hibrit plakaların yük taşıma kabiliyetinin daha yüksek olduğu, fakat rijitliklerinin daha düşük oldugu belirlenmiştir.

Mahdi ve diğ. (2003) farklı konfigürasyonlarda üretilen cam epoksi ve karbon epoksi hibrit kompozit boruların basma yükü altındaki hasar davranışlarını incelenmişlerdir. Bu çalışmada, çarpışma davranışında, enerji yutmada, hasar mekanizmalarında ve kompozit silindir modlarında hibritasyonun etkisi üzerine yoğunlaşılmıştır. Hasar modlarında hibritasyonun etkisinin son derece baskın olduğunu, diğer test edilmiş silindirlerle karşılaştırıldığında, cam-karbon-cam/epoksi malzeme sırasındaki (stacking sequence) yapının iyi enerji emme kabiliyetini ortaya koyduğunu belirtmişlerdir.

Zuraida ve diğ. (2007) hibrit ve hibrit olmayan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit boruların statik enine batma yüklemesi (quasi static lateral indentation loading) sırasındaki mekanik davranışı ve hasar davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda; karbon/epoksi tüplerin daha yüksek yüklere gösterdiği direnç ile, cam ve cam-karbon hibrit borulardan daha az deformasyona uğradığı belirtmişlerdir. Ayrıca, hibrit kompozit borularda istifleme sırasını (stacking sequence) boruların mukavemet ve statik enine batma yüklemesine karşı performansı geliştirmek için kullanılabileceği rapor etmişlerdir.

Wakayama ve diğ. (2006) asfalt esaslı, düşük modüllü karbon elyafla takviyeli filaman sarım kompozit boruların darbe yükü altında oluşan hasarın patlama mukavemetine etkisini çalışmışlardır. Filaman sarım karbon elyaf takviyeli plastik (FW-CFRP) kompozit boruların darbe sonrası patlama mukavemetinin artırılması için üç farklı düşük modüllü, asfalt esaslı (asfalt-pitch) yüksek basma mukavemetli, karbon elyaf malzemesini FW-CFRP kompozit borunun yüzeyine uygulanmıştır. Sonuç olarak düşük modüllü karbon elyaflar kullanıldığında, kalan patlama mukavemetinde artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Shan ve Liao (2001), tek yönlü cam-karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitin çevresel yorulma davranışını incelemişlerdir. Maksimum çekme mukavemetinin

ortalama %85, %65 ve %45 değerlerinde, çekme-çekme yorulmasına tabi tutmuşlardır. Böylece, cam elyafa uygun miktarda karbon elyaf katılarak cam-karbon hibrit kompozitte yorulmada daha iyi bir performansa ulaşılabildiklerini rapor etmişlerdir.

Shan ve Liao (2002), cam ve karbon takviyeli hibrit kompozit levhaları çekme-çekme yüklemesi durumunda yorulma davranışlarını belirlemek için hem havada hem de 25 ^{o}C de saf su içinde deneylere tabi tutmuşlardır. Maksimum mukavemetin %85 değerinde yapılan deneylerde yorulma ömründe belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak maksimum mukavemetin %65 ve %45 değerlerinde yapılan deneylerde yorulma ömrünün azaldığını rapor etmişlerdir.

Literatüde yapılan çalışmalara bakıldığında (Zuraida ve diğ. 2007, Mahdi ve diğ. 2003, Sevkat ve diğ. 2009, Shan ve Liao 2001-2002); kompozit malzemelerde, darbe sonrası oluşan hasarın azaltılması ve yorulma ömrünün iyileştirilmesi açısından hibritasyonun etkili olduğu görülmektedir. Özellikle kompozit borularda, darbe ve yorulma yükü altında oluşan hasarın azaltılması için hibritasyonla beraber tabakalarda kullanılan elyaf sarım açılarının konfiğürasyonuda önemlidir. Kompozit borular, özellikle sıvı ve gaz iletim hatlarında kullanım esnasında darbe hasarına maruz kalabilirler. Belli bir işletme basıncında kullanılan bu borularda; iç basıncın oluşturduğu teğetsel ön gerilmenin, kompozit boru üzerinde oluşan darbe hasarını nasıl etkilediğinin araştırılması önemlidir. Literatürde, Kara (2012, 2014) dışında kompozit burulara yapılan düşük hızlı darbe deneylerinde, darbe öncesi herhangi bir iç basınç veya ön gerilme uygulanmadığı tespit edilmiştir. Bu tespitler doğrultusunda bu çalışmada; farklı iç basınçlar altında kullanılan borularda, farklı ön gerilme değerlerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Ön gerilmenin, darbe hasarının gelişimine etkisi ve farklı ön gerilme değerlerinde darbe ön hasarlı boruların statik patlatma ve yorulma davranışları incelenmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

İki veya daha fazla sayıdaki malzemenin, 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 2004).

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 ikiye ayrılır.

3.2.1. Termoset matrisler

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon genellikle plastikler matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termosetler, termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü zor olan 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 farklı tepkiler vermesine sebep olur. Sertleşme belirli 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 de 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 dört 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 elastiklik 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.

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 rijitliğini ve mukavemet performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için, elyaf kimyasallarla kaplanır. Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar, E, C, D ve S camı olarak adlandırılırlar. Çizelge 3.1'de E camı ile karbon elyaflarının özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 E camı ve Karbon elyafların özellikleri
(Cam Elyaf San. A.Ş. 2011, AKSA Karbon Elyaf San. A.Ş. 2011)

Özellikler	E camı	Karbon (12K A-42)
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	2,6	1,75
Elastiklik modülü, E (GPa)	73	230
Çekme dayanımı, σ (GPa)	2,4	3,5
Çekme uzaması, (%)	4	1,5
Özgül modül, E/ ρ ((MN/m)	28	131
Özgül dayanım, σ/ρ (MN/m/kg)	0,93	2

3.3.2. Karbon elyaflar

Karbon elyaf, gelişmiş polimer matrisli kompozitlerde takviye için en yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı bir malzemedir. Karbon elyaflar, yüksek özgül modül ve özgül mukavemete sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme modülü ve yüksek mukavemetlerini korurlar. Oda sıcaklığında karbon fiberler nem veya çok çeşitli çözücüler, asitler ve bazlardan etkilenmezler. Bu elyafları içeren kompozitler özel

mühendislik özellikleri sergilerler. Nispeten ucuz ve ekonomik elyaf ve kompozit üretim süreçleri geliştirilmiştir. Karbon fiber takviyeli polimer kompozit şu anda; spor ve eğlence ekipmanları (olta, golf kulüpleri), elyaf sargılı roket motor gövdeleri, basınçlı kaplar ve hem askeri hem ticari, sabit kanatlı uçak yapısal bileşenleri ile helikopterlerde (örneğin, kanat, gövde, stabilizatör, ve dümen bileşenler gibi) kullanılmaktadır.

Karbon elyaflar; hazırlandığı maddeye bağlı olarak iki gruba ayrılır. Petrol türevlerinden elde edilen, zift esaslı elyaflar; büyük ölçüde dayanım dışı amaçlarla kullanılırlar. Takviye malzemesi olarak genellikle polyacrylonitrileden (PAN) üretilmiş fiberler kullanılır. Bu grup içinde yüksek dayanımlı, elyaf türleri vardır. Karbon elyafların tasarım malzemesi olarak kullanılması, daha çok yüksek dayanımlı türü üzerinde yoğunlaşmaktadır. Karbon elyaflar; grafit tabakalarındaki karbon atomları arasındaki güçlü kimyasal bağ nedeniyle yüksek elastiklik modülü ve çekme dayanımına sahiptirler. Grafit tabakalarının, elyaf eksenine paralel olarak yönlendirildiği durumlarda en yüksek dayanım değerlerine ulaşılır.

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, rijitliği, 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 (hibrit) 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 elyaf veya asbest elyaf 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.

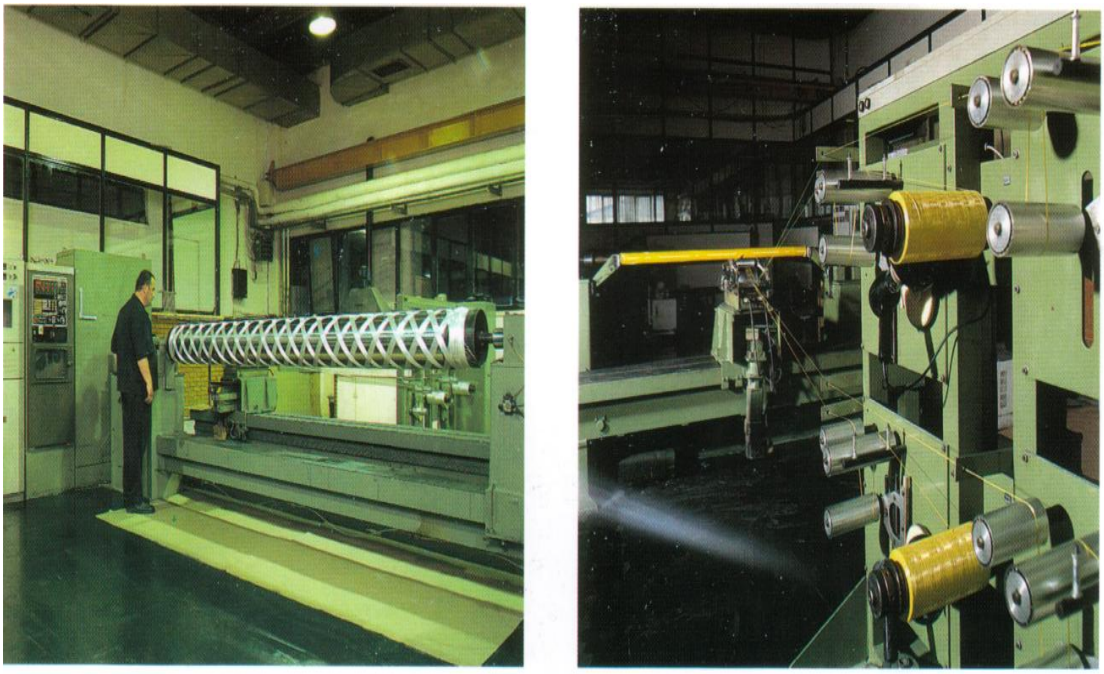
3.5. Kompozit Üretimi

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 değişebilir (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, *prepreg* 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 filaman sargı makinesi (Gemi 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 elastiklik modülü gerektiren havacılık ve uzay alanlarında kullanılmaktadır. Bu teknikte kullanılan başlıca reçine malzemeleri ise epoksi, polyester ve vinilester olarak özetlenebilir. Filaman sargı makinelerden tamamen bilgisayar kontrollü üç veya dört eksenli makinelere kadar birçok 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 yavaşlatılmasına hatta durdurulmasına sebep olabilir (Şahin 2004).

4. KOMPOZİT MALZEMELERDE DÜŞÜK HIZLI DARBE 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.

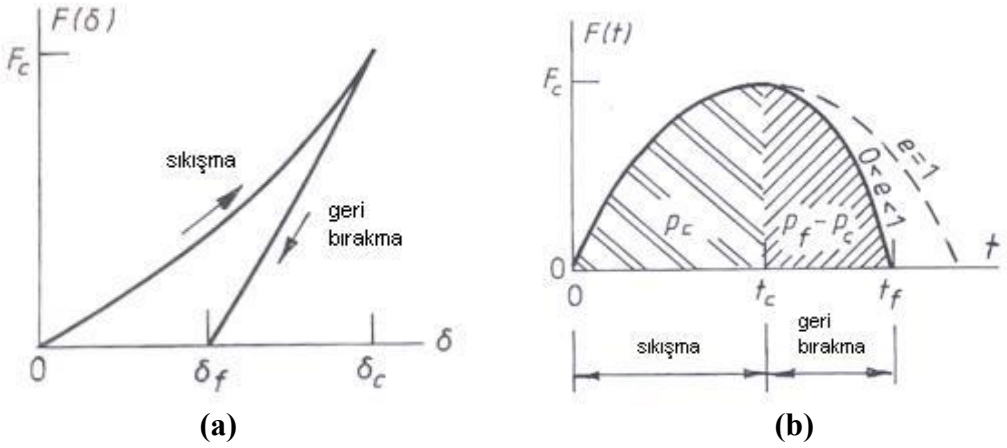
Darbe sırasında her bir anda, ara yüzey veya temas basıncı; çarpışan iki cismin zıt doğrultularda bir etki veya tepki bileşke kuvveti oluşturur. Böylece cisimlerin birbirine geçmesine karşı direnme oluşur. Başlangıçta nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve bu kuvvet birbirine yaklaşan cisimlerin hızını azaltır. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetlerinin yaptığı iş, her iki cismin hızının 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 yüzeyinin bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir neticesidir.

Darbe esnasında ortaya çıkan yerel deformasyonlar çarpışan cisimlerin sertliğine 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 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 V_y 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 δ olsun. Çarpışan cisimlerin kompliyansı hakkında ayrıntılı bilgiye girmeden,

δ 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 (yer değiştirme) δ'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 elastik ve plastik deformasyon 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.



Şekil 4.1 (a) izafi yer değiştirme δ 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 yer değiştirmesi δ_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).

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, impulsun türevinin dp= Fdt 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 (Ceyhun ve Turan 2003). 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 (Mili ve Necip 2001).

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, parça 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 malzeme özelliklerinin (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)

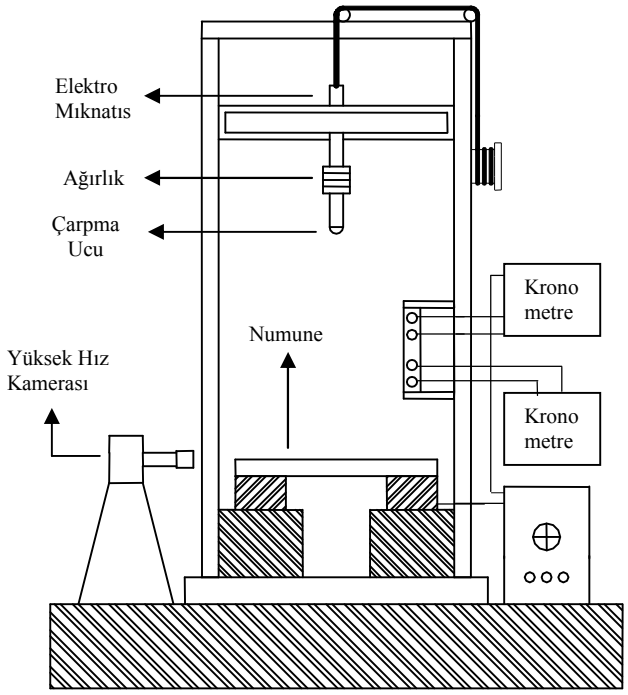
- Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu
- Ağırlık düşürme testleri
- Yüksek hızlı darbe testleri (Basınçlı hava ve Split-Hopkinson)

olarak sıralanabilir.

4.3.1. 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 hasar gelişimi ile ilişkilendirilebilirler. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil 4.2'de 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 4.2 Tipik bir 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).

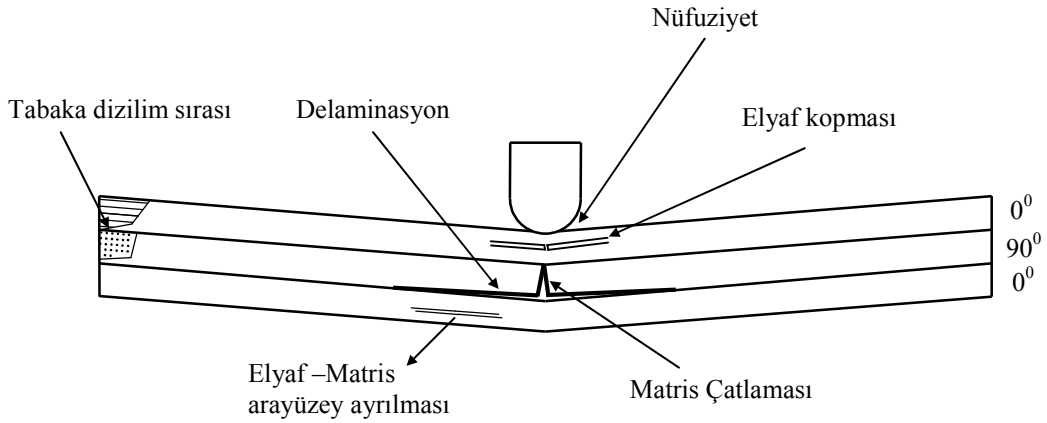
4.3.2. Yüksek hızlı darbe testi

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 kalınlık doğrultusunda 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 nitelendirmede önemli bir rol oynar. Darbe yüklemesi altında çarpan cismin gözle görülemeyen yada 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 matriste 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 4.3'de, çeşitli hasar kademelerine ait şematik bir resim görülmektedir.

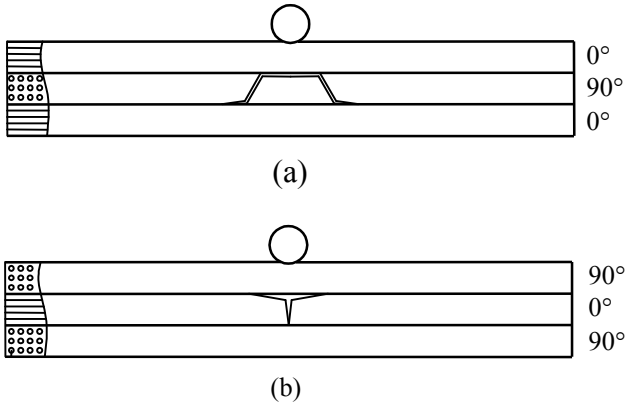


Şekil 4.3 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006)

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

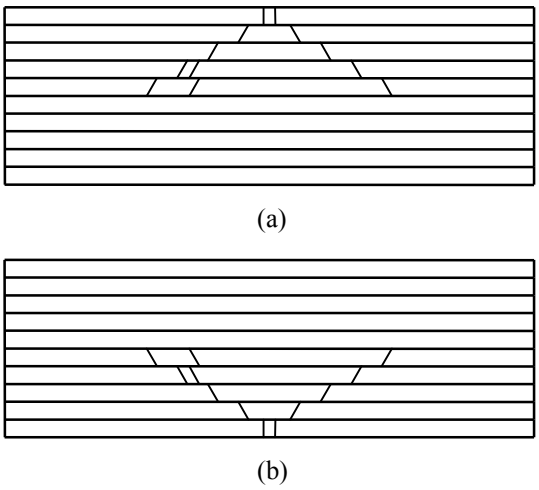
4.4.1. Matris hasarı

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. 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 4.4). 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 4.4 Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı (Abrate 1998)

Tabakalı kalın 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 4.5a). Tabakalı ince 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 4.5b) (Abrate 1998).



Şekil 4.5 (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 ile aynı matris malzemesi kullanarak beş kompozit için darbe deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda bu beş kompozit için

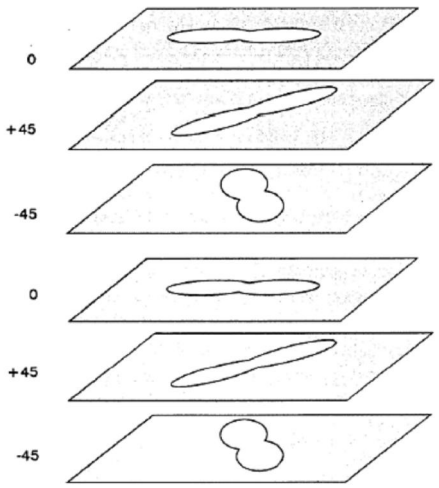
hasar başlangıç enerjisinin aynı olduğunu ve hasarın matris-ağırlıklı olduğunu bildirmiştir. Ayrıca dizilim sırası ve elyaf takviyesi özelliklerinin, hasar başlangıcı için gerekli olan enerji üzerine olan etkisi ölçülemez. Hasar matris çatlağı ile başlar ve matris çatlağı farklı elyaf açılı tabaka ara 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 ve diğ. 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 karşı da 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 açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir. Eğer iki bitişik tabaka aynı elyaf yönlendirme açısına sahip ise, bu iki tabaka ara yüzeyinde delaminasyon kısmi olarak meydana gelmektedir. 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 (Abrate 1998).

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 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6 Delaminasyon alanlarının elyaf yönlendirme açılarına göre şekilleri (Abrate 1998)

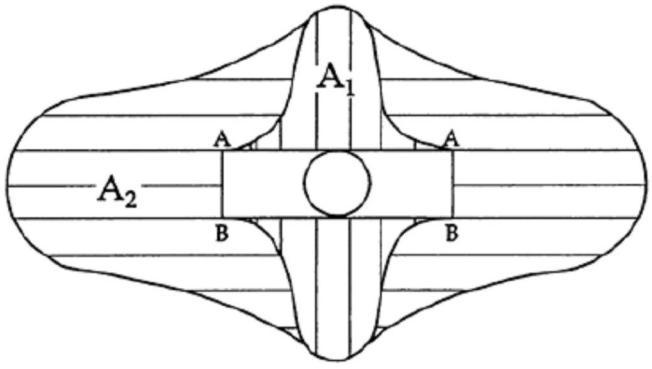
Delaminasyon başlangıcına neden olan başlangıç kinetik enerjisinin sınır değerini tespit etmek çok zor olduğundan birkaç testin yapılmasına ihtiyaç vardır. Şunu da belirtmek gerekir ki, meydana gelebilecek delaminasyon şekilleri oldukça düzensizdir ve bunların yönlenmelerini tespit etmek oldukça zordur. 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 kayma gerilmelerinden dolayı Mod I ayrılma olarak başlamaktadır.

Delaminasyonun 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 bunun da absorbe edilen enerjinin dağılmasında önemli bir rol üstlendiğini göstermiştir. Bu işlem Malvern ve diğ. (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 4.7'de AA ve BB harfleriyle gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Sıralı delaminasyon şeritlerinin şematik gösterimi (Malvern ve diğ. 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 4.7'de A1 alanı ile gösterilmiştir. Ayrıca sıralı delaminasyonda bu örneği takip etmektedir (Sierakowski ve Chaturvedi 1997).

Yapılan bu çalışmalara göre bazı önemli noktalar şöyle vurgulanabilir;

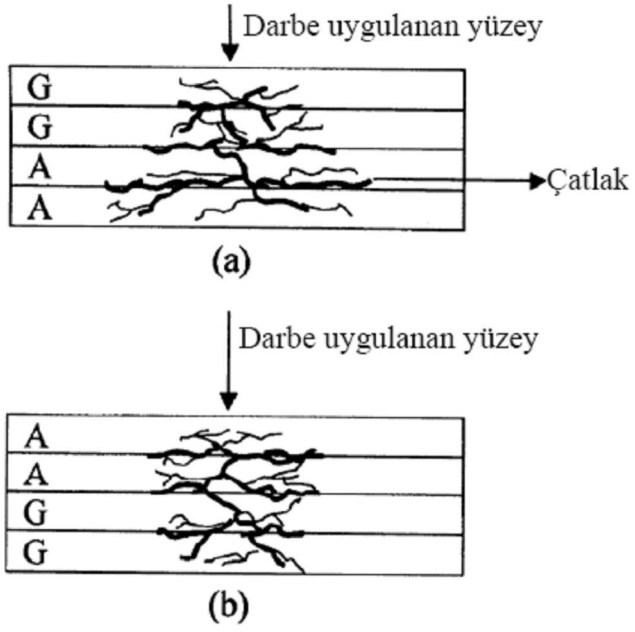
- Çekme ve basma kalan mukavemetleri hasar büyüklüğünün artışı ile azalır ve bununla nonlineer olarak ilişkilidir.
- Delaminasyon hasarı büyüklüğü darbe enerjisinin artmasıyla artar ve vurucu hızının bir sınır değeri olan, numunenin delinmesine ulaşılana kadar artar. İki tip sınır değeri gözlemlenmektedir; 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. Bunlar da, 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. Darbe ile elyaf hasarı

Kompozit malzemede elyaf kopması, genellikle matris çatlaması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf hasarı, çarpan cismin batması nedeniyle darbeye maruz kalan malzeme 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 kalan 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 (2001), 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 merkezine 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 hasarı, 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 4.8a). 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 4.8b).



Şekil 4.8 Darbe uygulanan yüzeye göre hasar yayılışı, (a) Cam yüzeyden, (b) Aramid yüzeyden (Park ve Jang 2001)

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 kalan 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 ayrılma, 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 delinmesini ifade eder. Elyaf hacim oranlarının aynı olduğu, farklı boyutlardaki malzemelerde çarpan cismin nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır.

5. YORULMA

5.1. Giriş

Mühendislik yapı elamanlarının yorulmadan dolayı hasar görmesi ve neticede kopması bugün hala mühendislerin güncel problemi olarak önemini korumaktadır. Bu problem özellikle değişen tekrarlı yüklerin uygulandığı durumlarda ve konstrüksiyon malzemesinin önemli derecede yüzey düzgünsüzlüğü ihtiva ettiği hallerde çok önemli olmaktadır (Eldeniz 1992). Genel kullanımı itibariyle yorulma kelimesi malzemelerin statik gerilme veya uzamalar altındaki davranışlarından farklı olarak, tekrarlı gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlardaki davranışlarını belirlemek için kullanılmaktadır (Fuchs ve Stephens 1980).

Yorulma ASTM E 1823-10a 'ya göre şu şekilde tanımlanmıştır: Tekrarlı gerilme ve uzamalara maruz kalan malzemelerde belirli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine ve sonucunda da kırılmaya neden olan kalıcı yapı değişimidir, ikinci tanımlamada üzerinde durulan dört önemli özellik; olayın sürekli gelişmesi, lokalize olması, çatlakların büyümesi ve sonuçta kırılmanın ortaya çıkmasıdır. Uygulamada makinalara ve dolayısıyla makine parçalarına genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler eğilme ve burulma momentleri etki eder (Parton ve Morozov 1978). Bu tür zorlanma altındaki makine elemanı kendi akma sınırı altındaki bir gerilmede beklenmedik bir tarzda kırılabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir (Dieter 1976). Yorulma zorlanması sırasında yük istenildiği kadar tekrarlanabilir ve zorlanmanın zaman aralıkları bulunabilir (Sarıtaş 1987).

Metallerde yorulma hasarı herhangi bir uyarıcı belirti vermeden ve aniden kırılmanın ortaya çıkmasından dolayı özellikle tehlikelidir. Metallerde yorulma kırığı yüzeyi gevrek kırılma yüzeyine benzer (Dieter 1976). Bir yorulma kırığı genellikle kırık yüzeyi incelenerek diğer hasar türlerinden kolayca ayrılabilir. Yorulma kırığı ilerledikçe, açılan kesit birbiri, ile sürtünerek yüzeyin o bölgesinin parlak bir görünüm almasını sağlar. Daha sonra kalan kesit uygulanan yükü taşıyamayacak bir duruma geldiğinde ani kırılma sonucu kaba bir görünümde olur. Yorulma kırığı yüzeyinde duraklama çizgileri ve tekrar izlerini görmek mümkündür. Yorulma çatlağında yorulmanın durdurulduğu aralıklar veya yük değerlerinin değişimi nedeniyle, ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer duraklama çizgileri meydana gelebilir. Bu çizgiler

yorulma çatlağı ucunun değişik zamanlardaki konumunu gösterir. Gerilmenin her çevriminde bir duraklama çizgisi meydana gelir. Duraklama çizgilerinin varlığı o kırık yüzeyinin yorulmuşluğunun kesin delilidir, ancak bunların bulunmaması kırık yüzeyinin yorulmadığını göstermez. Duraklama çizgilerinin meydana gelmesi için malzemenin yeterince sünek olması gerekir. Duraklama çizgilerinin şekline bakılarak yorulma kırılmasının başlama ve büyümesi hakkında bilgiler edinilebilir (Sarıtaş 1987).

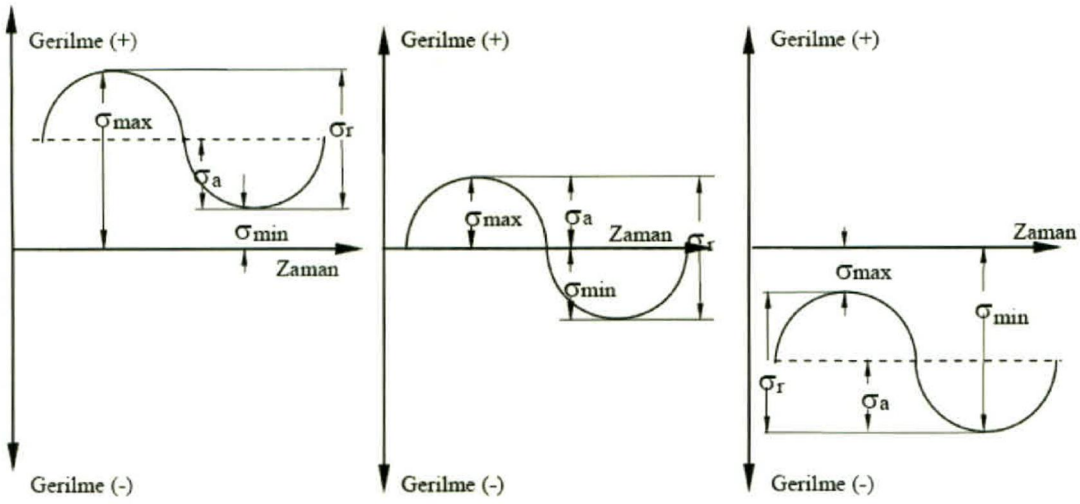
Kompozit malzemelerdeki fiber kırılması, delaminasyon, matris çatlaması, boşluklar gibi hatalar konvansiyonel metallerdeki çatlak gibi hatalardan daha sık görülebilir. Ancak, bir metaldeki hasar gelişimi daha beklenmediktir. Bu yüzden konvansiyonel metaller potansiyel olarak kompozit malzemelerden daha tehlikelidir (Jones 1975).

5.2. Yorulma Testi

Malzemelerin yorulma testi, yorulma cihazları denilen makinalarda gerçekleştirilir. Bu cihazlarla malzemeye zamana bağlı olarak değişen sinüzoidal dalgalı gerilmeler uygulanır. Bu sinüsoidal dalgada gerilme artarak maksimum ve azalarak minimum değere ulaşır. Değişken gerilmeler etkisindeki makine elemanlarında gerilmelerin maksimum değerleri ile bunların periyodik değişimi yani tekrarı önemlidir. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler elemanın iç bünyesinde yıpranmalara ve ayrılmalara sebep olduğu için kopma olayı, statik sınırların çok altında olur. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç bünyesindeki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye ise yorulma ömrü denir (Gemi 2004).

Yorulma testi genellikle sinüzoidal yük kullanılarak yapılır. Böylece yorulma yükünün durumu Şekil 5.1'de gösterilen birkaç parametreyle tanımlanabilir. Maksimum ve minimum gerilmeyi belirterek diğer gerilme parametreleri; gerilme aralığı σ_r, gerilme genliği σ_a, ortalama gerilme σ_m ve yorulma gerilme oranı R gibi parametreler kolayca belirlenebilir.

Yorulma olayında gerilmenin basma veya çekme şeklinde etki etmesine göre üç tip çevrim bölgesi vardır. İlk bölgede kuvvetin en büyük gerilme değeri de en küçük gerilme değeri de negatif değer gösterir. Bu bölgeye negatif tekrar bölgesi denir. İkinci bölgede gerilme çekme ile basma arasında değişiklik gösterir. Burası alternatif bölge olarak adlandırılır. Üçüncü bölgede ise kuvvetin en büyük gerilme değeri de en küçük gerilme değeri de pozitif değer gösterir. Bu bölgeye ise pozitif tekrar bölgesi denir.



Şekil 5.1 Yorulmada tipik gerilme-zaman eğrileri (Erkendirci 2006)

Şekil 5.1.'de gösterilen bu parametreler

$$\sigma_r=\sigma_{max}-\sigma_{min} \qquad 5.1$$

$$\sigma_m=\frac{\sigma_{max}+\sigma_{min}}{2} \qquad 5.2$$

$$\sigma_a=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2} \qquad 5.3$$

$$R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \qquad 5.4$$

R değeri, yorulma yükleme biçiminin bir göstergesidir. Çizelge 5.1'de önemli yükleme biçimleri özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 R değerleri için yorulma yük biçimleri

Yorulma Yük Oranı	Yorulma Yük Biçimi
R=l	Sabit Yük
R=0	Çekme-Yükünü Boşaltma
0<R<1	Çekme-Çekme
R= –l	Çekme-Basma (σ_m=0)
–1<R<0	Çekme-Basma

Yorulma deneyleri genelde 10 Hz den daha düşük frekanslarda yapılır. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi yüksek frekanslarda ısı birikimi daha fazla olmaktadır. İkincisi ise yorulma olayı genellikle düşük frekanslarda daha etkilidir.

5.2.1. Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi

Herhangi bir yük genliğinde verilen bir ömür süresi için, yorulma dayanımı ortalama (σ_m) gerilme'ye bağlıdır. Verilen aynı yorulma ömrü için, gerilme genliği σ_a ortalama gerilme arttıkça azalmaktadır. Çelik gibi metaller için, yorulma ömrünün sonsuz olduğu bir gerilme değeri vardır. Bu durum için yorulma dayanımı, sürekli mukavemet sınırı olarak ifade edilir. Alüminyum alaşımı gibi diğer malzemeler sürekli mukavemet sınırına sahip değildir. Böylece herhangi bir yorulma ömrü belirlenmelidir.

5.2.2. Gerilme-çevrim sayısı (S/N) eğrisi

Yorulma ömrü, verilen maksimum gerilme seviyesinde hasarın meydana geldiği çevrim sayısı olarak ifade edilir. Yorulma ömrünü tam olarak tanımlayabilmek için, ortalama gerilme veya yorulma gerilme oranı R'ye ihtiyaç duyulur. Böyle testlerin sonuçları, logaritmik ölçekte hasarın meydana geldiği çevrime karşılık, maksimum yorulma gerilmesi olarak grafik halinde verilir. Bu grafik S-N (Gerilme-Çevrim sayısı) eğrisi olarak tanımlanır. S-N eğrisi malzemenin yorulmasını temsil eden genel yollardan biridir. Birbirini izleyen gerilme malzemeye uygulandığı zaman bu eğride, hasar için çevrim sayısı (N), gerilme genişliği (S)'nin bir fonksiyonu olarak belirlenir. S-N eğrisinin eğimi, malzemenin yorulma direncinin bir ölçüsüdür ve malzemeden malzemeye değişir (Hull 1981).

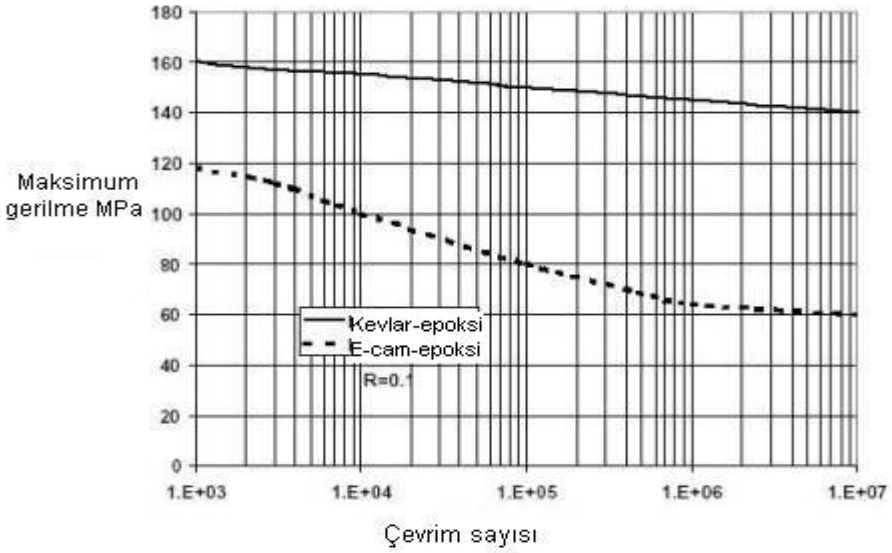
5.3. Kompozit Malzemelerde Yorulma

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

Yorulma deneylerinde çoğunlukla sinüs dalgası şeklinde bir yükleme kullanılır (Şekil 5.1). Bunun sebebi, deneyleri uygulayan makinelerin genellikle dönen diskler yada kütleler kullanmasıdır. Ayrıca çoğu makinedeki yorulma, dalga şekliyle oluşmaktadır. Günümüzde farklı birçok dalga şeklini uygulayabilen hidrolik deney cihazları mevcuttur.

ASTM D-2992-06 Standardına göre silindirik boruların iç basınç etkisi altında yorulma deneylerinde uygulanması gereken gerilme oranı R=0,05 olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi, genellikle bu deneyin hidrolik tahrikli deney düzenekleri yardımıyla yapılmasıdır. Zira hidrolik düzeneklerde basıncın sıfıra inmesi mümkün olamamaktadır.

Yorulma ömrü genellikle belli bir gerilme değeri için hasara kadarki çevrim sayısı ile ifade edilir. Bu sonuçlar genellikle maksimum gerilme ve çevrim sayısının logaritması arasında çizilir. Bu diyagram *S-N* eğrisidir. Şekil 5.2'de iki ayrı kompozit malzeme için S-N diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.2 İki ayrı kompozit malzeme için S-N diyagramı

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

S-N eğrisi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$S = \sigma_{tu}.(mLogN + b) \tag{5.5}$$

Burada S maksimum yorulma gerilmesi, σ_{tu} ortalama statik mukavemet, N hasara neden olan çevrim sayısı, m ve b sabitlerdir. Sabit m sayısı eğim, b sayısı ise S-N eğrisinin kestiği gerilme olarak açıklanır. m' nin düşük ve b' nin yüksek değeri yüksek yorulma mukavemetini ifade eder. m ve b sabitleri için tipik değerler bazı geleneksel kompozitler için Çizelge 5.2' de verilmiştir. Aynı R oranındaki, karbon fiber ve E-camı fiber kompozitler için m ve b değerleri kıyaslandığında, karbon fiber kompozitlerin daha iyi bir yorulma mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. b katsayısı statik mukavemetten daha fazla etkilenmektedir (Sakin 2004).

S-N grafiği üstel olarak da ifade edilebilir.

$$\frac{S}{\sigma_{tu}} N^d = c \tag{5.6}$$

burada c ve d sabitlerdir.

Çizelge 5.2. n ve b sabitleri için tipik değerler

Malzeme	R	m	b
E-camı / sünek epoxy 0°	0,1	–0,1573	1,3743
T300 karbon / sünek epoxy 0°◦	0,1	–0,0542	1,0420
E-camı / gevrek epoxy 0°	0,1	–0,1110	1,0935
T300 karbon / gevrek epoxy 0°	0,1	–0,0873	1,2103
E-camı / epoxy $[0/90°]_s$	0,05	–0,0815	0,934

Tek yönlü ve tek tabakalı bir kompozit yapıda üç farklı yorulma hasar tipi görülebilir. Bunlar, elyaf kırılması, matris kırılması ve elyaf matris ayrılmasıdır. Elyaflar yüksek rijitliğe sahipse matris kırılması daha az önem arz eder. Çünkü elyaflar şekil değiştirmeyi sınırlar. Eğer elyaf ve matris ara yüzey dayanımı yeterli değilse matris çatlaması ve elyaf sıyrılması da gözlenebilir. Çok tabakalı malzemelerde ise yorulma sonucu ayrıca tabaka ayrılması görülebilir. Elyaf kırılması olmadığı müddetçe kompozit malzemenin dayanımı fazla düşmez. Çok tabakalı kompozitlerde ise dört hasar biçimi meydana gelir. Bunlar; fiber kırılması, matris çatlaması, fiber-matris ayrılmasına ilaveten yorulma yükünün sonucu olarak tabaka ayrılmasıdır.

Yorulma ömrü iki ayrı bölgede incelenir: Bunlar çatlak oluşumu ve ilerlemesidir. Yüksek gerilme değerlerindeki çalışma genellikle düşük çevrim sayılı yorulma olarak adlandırılır. Bu çalışma şeklinde çatlak çabuk oluşur ve yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak ilerlemesiyle geçer. Çatlak genellikle boşluk ve gerilme konsantrasyonunun daha fazla bulunma ihtimali olan yüzey bölgesinde başlar. Kompozit malzemelerde matriste bulunması muhtemel olan süreksizlikler birer çatlak başlangıcı olabileceğinden, kompozitlerde yüzey altında çatlak başlangıcı görülmez.

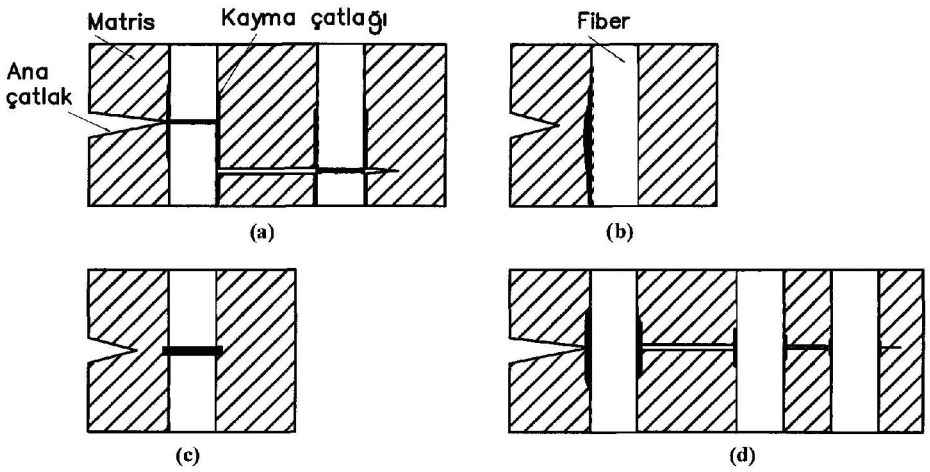
Kayma gerilmesi sonucu oluşan çatlaklar kırılma yüzeyini ve çekilen enerjiyi arttırdıklarından dolayı yorulma ömrü üzerine pozitif bir etkiye sahiptirler. Ayrıca bu çatlaklar çatlağın körleşmesine de sebep olurlar. Kayma çatlakları matris ve elyafın arasındaki farklı Poisson oranları arasındaki fark sebebiyle yorulma çatlağı boyunca oluşabilir. Eğer elyafların hasar şekil değiştirmesi matrisinkinden az ise elyaflar çatlak doğrultusunda hasara uğrayabilir. Sünek elyafların gevrek matris kompozisyonunda ise matris daha önce hasara uğrayabilir.

Elyaf açısının çatlak ilerlemesi üzerine etkisi büyüktür. Çatlak ilerlerken elyafa paralel doğrultuda çok az bir engelle karşılaşır. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı az olacağından dolayı çatlak elyafa paralel ilerlerler. Dolayısıyla çapraz katlı tabakalı kompozitlerde 0 ve 90 derecelik tabakalar hem statik hem de değişken yüklemelerde ilk hasara uğrayan bölgelerdir. Enine tabakalardaki çatlaklar tabakalar arası bölgede kayma çatlakları ve çatlak körleştirmesi sonucu durdurulabilir.

Gerilme çevrim sayısı (S-N) eğrisi yorulma ömrünü ve toplam yorulma ömrünü oluşturan çatlak başlama ve çatlak ilerleme ömürlerini gösterir. Uygulanan değişken gerilmenin değeri arttıkça yorulma ömrü kısalır ve böylece çatlağın daha kısa sürede başlamasına sebep olur. Parçaların yüzey kısımlarında çatlaklar, düzensizlikler varsa yorulma ömründeki çatlak başlaması için geçen süre ortadan kalkar ve bu şekilde toplam yorulma ömrü kısalır (Eldeniz 1992).

Kayma çatlakları ile meydana gelen, fiber kırılması ve matris çatlamasını içeren bir kompozitte yorulma çatlağının ilerlemesi boyunca mümkün sayıda olay meydana gelebilir. Kayma çatlakları, tek başlarına çekme yükü ile yırtılmaya, matris çatlaması olmaksızın çatlak önü fiber kırılmasına veya fiber kırılması olmaksızın matris çatlamasına sebep olurlar (Günaydın 2003).

Şekil 5.3'de olaylar tek yönlü tek tabakalı ve çok tabakalı kompozitlerin her ikisinde de meydana gelebilir. Ancak, çok tabakalı kompozitlerde fiber açısı ve tabaka sınırları, yorulma çatlak ilerlemesinde önemli rol oynar.



Şekil 5.3 Kompozitlerin yorulması boyunca çatlak ilerleme biçimleri a) Kayma çatlakları ile meydana gelen fiber kırılması ve matris çatlaması b) Çekme ile oluşturulan kayma çatlakları c) Çatlak önü fiber kırılması d) Fiber kırılması olmaksızın matris çatlaması.

5.4. Yorulma Olayının Gelişimi

Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzeme yada makine parçasına çekme gerilmesinin uygulanması, bu gerilmede değişimlerin yada dalgalanmaların olması ve bu esnada plastik şekil değişiminin gözlenmesi gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri olmazsa yorulma çatlağı başlamaz ve ilerleyemez. Çekme gerilmesinde meydana gelen değişmeler ve dalgalanmalar çatlağı başlatır. Çatlağın ilerlemesi ise çekme gerilmesinin etkisiyle olur.

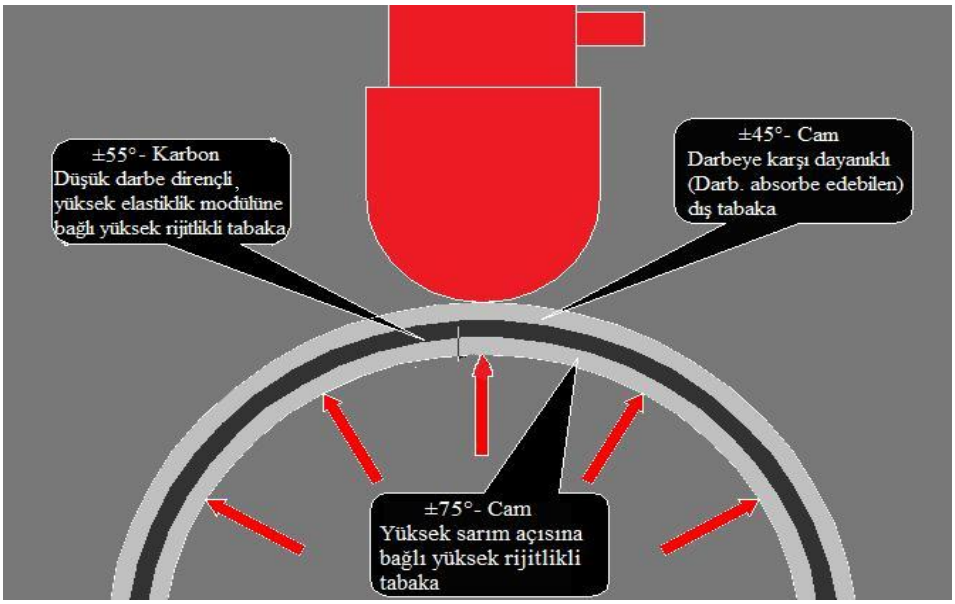
Yorulma üzerine yapılan çalışmaların başlangıç dönemlerinde çevrim sayısını belirlemek üzere sabit büyüklükte değişken gerilmelerle malzemeler yükleniyordu. Daha sonraları ise yorulma hasarlarının metalurjik hatalardan ve dizaynlardan kaynaklandığı ve çatlakların süreksizliklerden başlayıp ilerlediğinin tespit edilmesi üzerine yorulmanın bazı kademelerden geçerek meydana geldiği ve ilerlediği fikrine varıldı. Kırılma mekaniği açısından bir yapı veya makine elemanının ömrü üç adımda incelenir. İmalattan kaynaklanan bir kusurun ya da sürünme, yorulma etkisiyle bir mikro çatlağın oluşumu olan çatlak başlangıcı safhası, kırılma tokluğu veya gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilen kararlı çatlak ilerleme safhası ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın meydana geldiği kırılma safhasıdır (Güldü 1995).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Hibrit Kompozit Boruların Kavramsal Tasarımı

Hibrit kompozit boru tasarımında; flaman sarım açıları ile hibritasyon parametreleri dikkate alınmıştır. Birçok çalışmada, flaman sarım borularda sarım açısının deformasyon ve hasar mekanizmasına etkisi araştırılmıştır (Spencer ve Hull 1978, Hull ve diğ. 1978, Coo 1985, Hashin ve Rotem 1973). Hibrit kompozitler hakkında da yapılmış birçok çalışma vardır. Bu çalışmalarda genel olarak hibritasyonun darbe davranışına ve yorulmaya etkisini incelenmiştir (Sevkat ve diğ. 2009, Hosur ve diğ. 2005, Mahdi ve diğ. 2003, Zuraida ve diğ. 2007, Shan, ve Liao 2001-2002). Literatür yapılan ön çalışmalar eşliğinde; darbe ve yorulma deneylerinde kullanılacak uygun parametrelerde hibrit kompozit borular üretilmiştir. Aynı zamanda üretilen borular hem darbeye karşı hemde yorulmaya karşı dirençli olması düşünülmüştür. İç basınç yükleri altında anizotropik tüplerin tabakalanma analizi de birçok kişi tarafından incelenmiştir (Pagano ve Halpin 1968, Pagano 1970-1971, Be'akou ve diğ. 2001). Tabakalar arası elastik uyumsuzluk oluşmaması, bunun tabakalar arası erken delaminasyon hasarına yol açmaması, iç basınç yükünün düzgün paylaşılması ve eğilme dayanımı ve rijitliğin artırılması dikkate alınmıştır. Tabakaların rijitliklerinin yakın olması tasarımda önemli bir kriter olarak düşünülmüştür.

Darbe deneyleri esnasında hibrit kompozit boruya gelen yükler ve tabakaların cevabının kavramsal tasarım geometrisi Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Hibrit kompozit borunun kavramsal tasarım geometrisi

Rijitlikleri dengelemek ve malzeme bütünlüğünü sağlamak amacı ile hibrit kompozit boruda iç tabaka ±75° gibi yüksek açı ile cam elyaf, bir sonraki tabaka yüksek rijitlikte statik ve yorulma yüklerini taşıması için ±55° karbon elyaf ile sarılmıştır. Darbe yüklemesinde temas kuvveti süresince, enerjisinin absorbe edilmesi ve kuvveti + ve – elyafların eşit olarak taşıması dikkate alınarak; dış tabaka ±45° sarım açısında cam elyaf kullanılarak sarılmıştır.

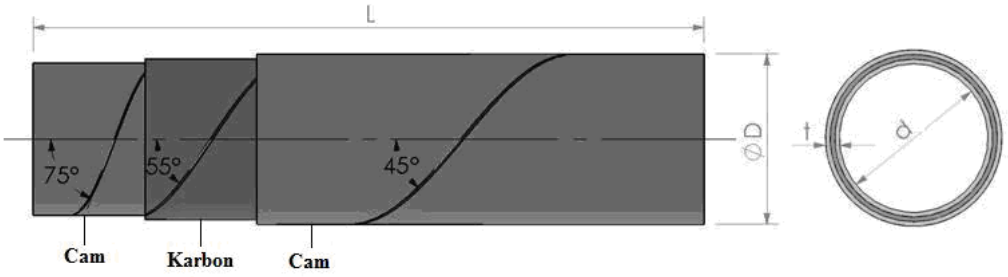
6.2. Hibrit Kompozit Boruların Üretimi

Bu çalışmada cam-karbon elyaf/epoksi boruların hazırlanmasında, Elyaf malzemesi olarak Cam Elyaf San. A.Ş. 1200 teks (17 μm çapında) E camı ve Aksa Karbon Elyaf San. A.Ş. 12K A-42 800 teks karbon elyaf, matris malzemesi olarak da Momentive, Bisphonel A, Epikote 828 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhyride) kullanılmıştır. Üretimde yaş sarım metodu kullanılmıştır. Elyaflar bir reçine banyosundan geçirilmiştir. Sarım işlemi başlamadan önce sarım esnasında soğuk mandrelin reçine sıcaklığını düşürmemesi için mandrel 60 ^{o}C ye ısıtılmıştır. Reçine banyosunda reçine karışımın sıcaklığı 60 ^{o}C de kontrol altında tutulmuştur. Mandrellerin üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülmüştür. Kür işlemi ise 2 saat 135 ^{o}C ve 2 saat 150 ^{o}C de yapılmıştır. Malafa çapı 72 mm dir. Sarım işlemi sonunda 1 m uzunluğunda, ortalama 77.1 mm çapında ve 6 tabakalı borular elde edilmiştir. Bütün bu işlemler cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açıları için tekrar edilmiştir. Hibrit boruların üretimi ve fırında sertleştirme işlemleri için, İzmir İzoreel Komp. Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. imkanlarından yararlanılmıştır. Çizelge 6.1 de kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 6.1 Kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri

	E (GPa)	$\sigma_{çek}$(MPa)	ρ(g/cm^3)	ε_{kop}(%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2,6	1,5-2
Elyaf: Karbon-12K A-42	230	3500	1,75	1,5
Matris: Epoksi Reçine	3,4	50-60	1,2	4-6

Üretilen boruların uzunluğu ve iç çapı sırayla 300 ve 72 mm dir. Şekil 6.2'de numune geometrisi ve geometrik uzunlukarı gösterilmiştir.



L	300 mm	**t**	2,55 mm
D	77,1 mm	**α**	$\pm 75_g^\circ \pm 55_c^\circ \pm 45_g^\circ$
d	72 mm	**n**	6 tabaka



Şekil 6.2 Numune geometrisi

6.2. Yakma Deneyi

Üretilen hibrit kompozit boru numunelerine ait elyaf hacim oranlarının belirlenmesi amacıyla ASTM-D2584 standardına uygun yakma deneyleri yapılmıştır. Yakma deneylerinde kullanılmak üzere cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g^\circ/\pm 55_c^\circ/\pm 45_g^\circ$ sarım açılı hibrit kompozit borudan, 43 mm boyunda üç adet yakma deney numunesi kesilmiştir. Yakma numunelerinin öncelikle hacimleri (25 cm^3) daha sonra da hassas terazi kullanılarak ağırlıkları (41,5 gr) tespit edilmiştir. Yakma numuneleri sıcaklığı 600 °C olan fırında reçine tamamen yanıncaya kadar bekletilmiştir. Yakma işlemi sonrası geriye sadece cam ve karbon elyaf kalmıştır. Hassas terazide tartılarak her bir yakma numunesine ait cam ve karbon elyafların ağırlıkları belirlenmiştir. Daha önce elyafların ve reçinenin toplam ağırlığı bilindiği için, toplam ağırlıktan elyafların ağırlığının çıkarılması ile reçine ağırlığı tespit edilmiştir.

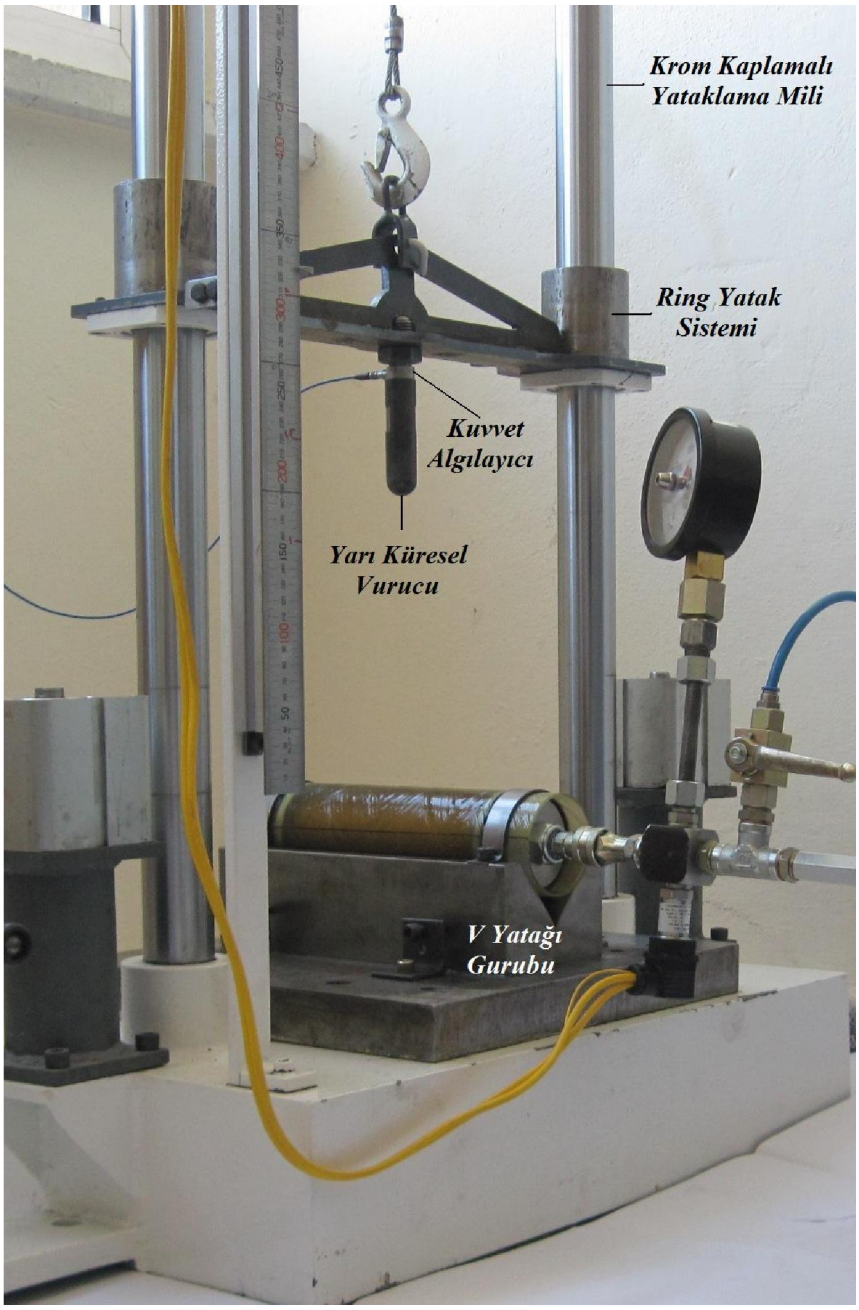
ASTM-D2584 standardına göre yakma numunelerine ait elyaf hacim oranı değerleri Denklem 6.1 ile belirlenir:

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

Burada W_f elyafın, W_c kompozitin ağırlığı ve ρ_f elyafın, ρ_c kompozitin yoğunluğudur.

6.3. Açık Uçlu İç Basınç Altında Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

Teğetsel ön gerilme altındaki hibrit kompozit boru numunelerin düşük hızlı darbe cevaplarının araştırılması için özel olarak imal edilmiş düşük hızlı darbe cihazı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe test cihazı Şekil 6.3'te görülmektedir. Deneylerde kullanılan cihaz ile değişik darbe enerji seviyelerinde, değişik darbe hızlarında ya da değişik ön gerilme değerlerinde darbe deneyleri yapılabilmektedir. Darbe esnasında cihazdan gelen bütün veriler bilgisayar ortamında kayıt altına alınabilmektedir.

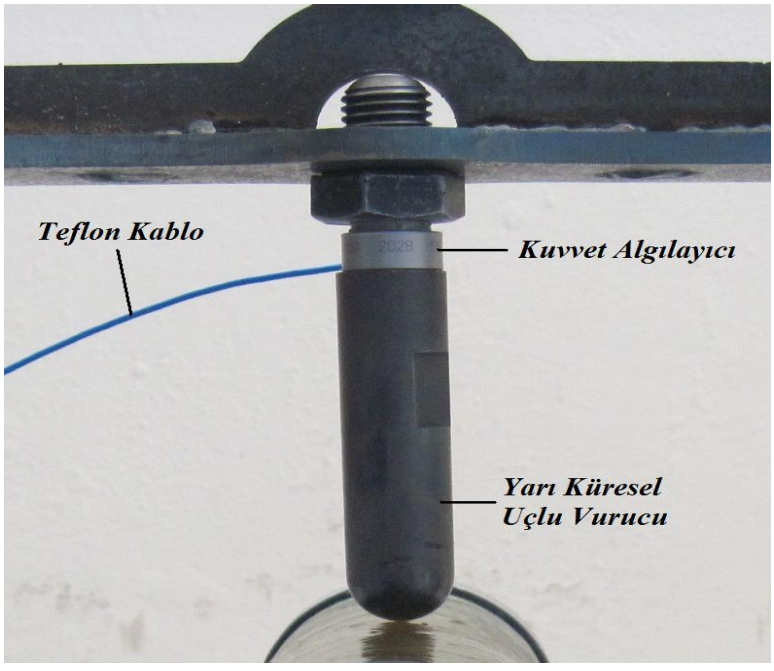


Şekil 6.3 Düşük hızlı darbe test cihazı

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 kompozit boru numunelerinin yataklanması için kullanılan V yatağı grubudur. Son eleman ise elektronik kontrol ünitesidir.

6.3.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı

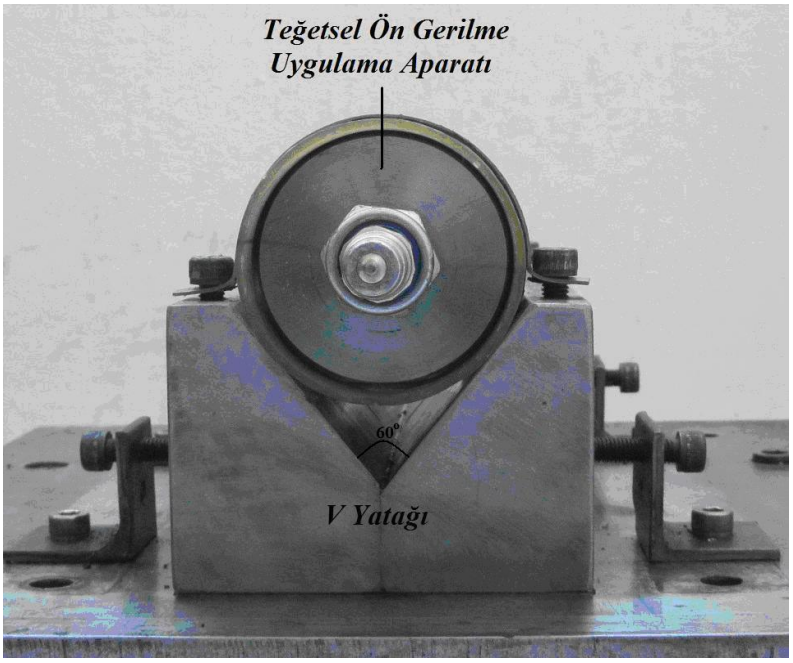
Düşük hızlı darbe deneylerinde vurucu kütlesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlamak amacıyla ring yataklamalı krom kaplı miller kullanılmıştır. Çelik miller üzerinde hareket eden karşılıklı iki lineer rulmanlı yatak Şekil 6.3'te de görüldüğü gibi vurucu kütlesinin her iki kenarına bağlanarak 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 6.4'de 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 (Kara 2012).



Şekil 6.4 Vurucu-Kuvvet algılayıcı bağlantısı

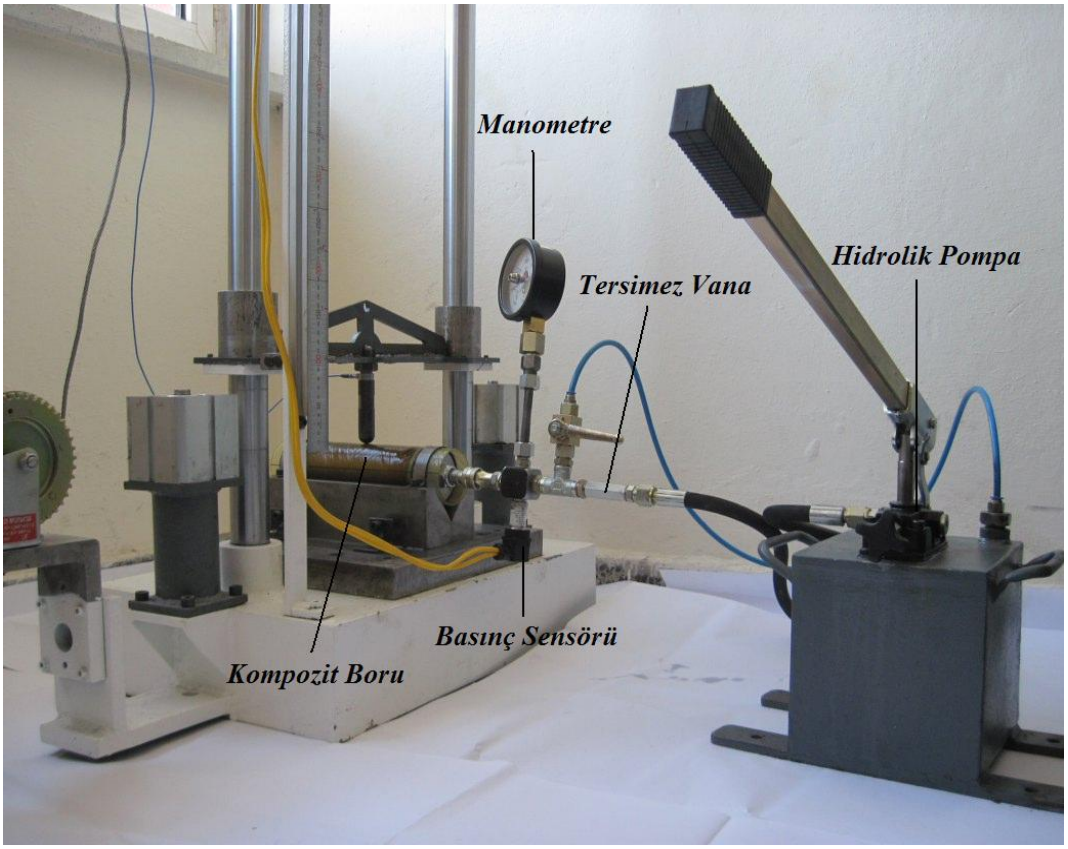
6.3.2. Kompozit boruların yataklanması ve teğetsel ön gerilme uygulama ünitesi

Kompozit deney numunelerinin düşük hızlı darbe deneylerinde, her bir deney numunesi Şekil 6.5'te görüldüğü gibi V yatağı üzerine yerleştirilmiştir. Kompozit deney numunelerine düşük hızlı darbe deneyleri teğetsel ön gerilme altında yapılmıştır.



Şekil 6.5 Kompozit boru yataklama ünitesi

İç basınç uygulama ünitesi kullanılarak numunelere 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 ve 48 MPa değerlerinde teğetsel ön gerilmeler uygulanmıştır. İç basınç uygulama ünitesi Şekil 6.6'da 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 da 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.



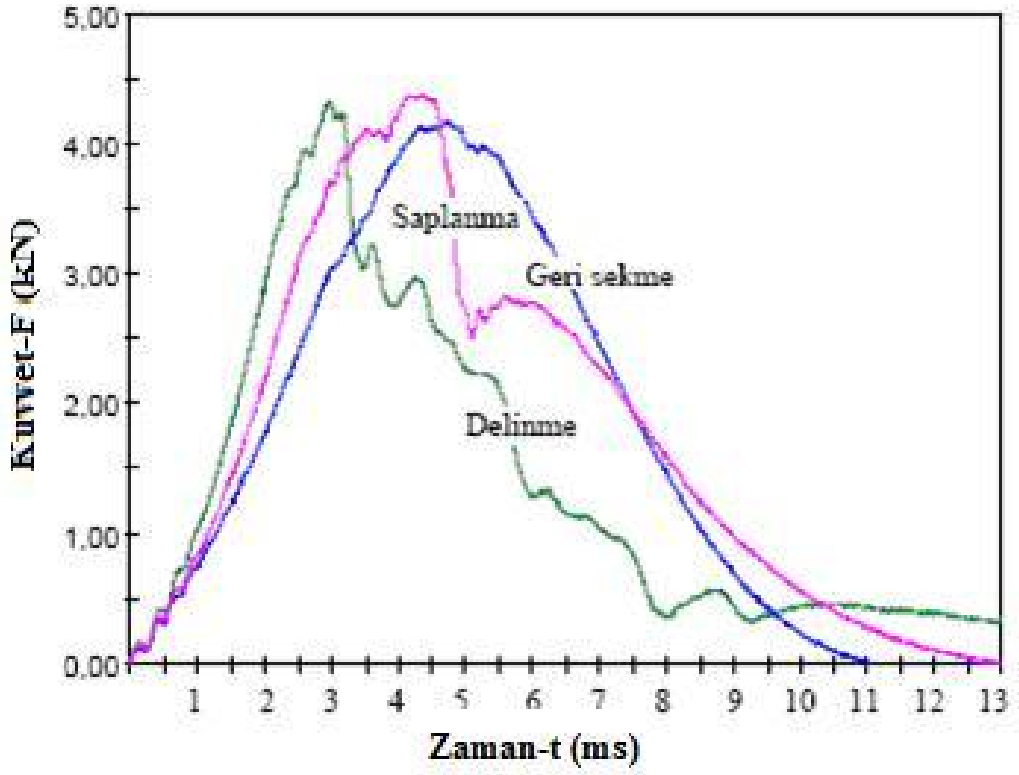
Şekil 6.6 Teğetsel ön gerilme sağlamak için iç basınç uygulama ünitesi

6.4. Hibrit Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Darbe testlerinin numuneler üzerine farklı teğetsel ön gerilmelerde belli bir darbe enerji seviyesi 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*) 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-zaman (*F-t*) eğrileri

Şekil 6.7'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.

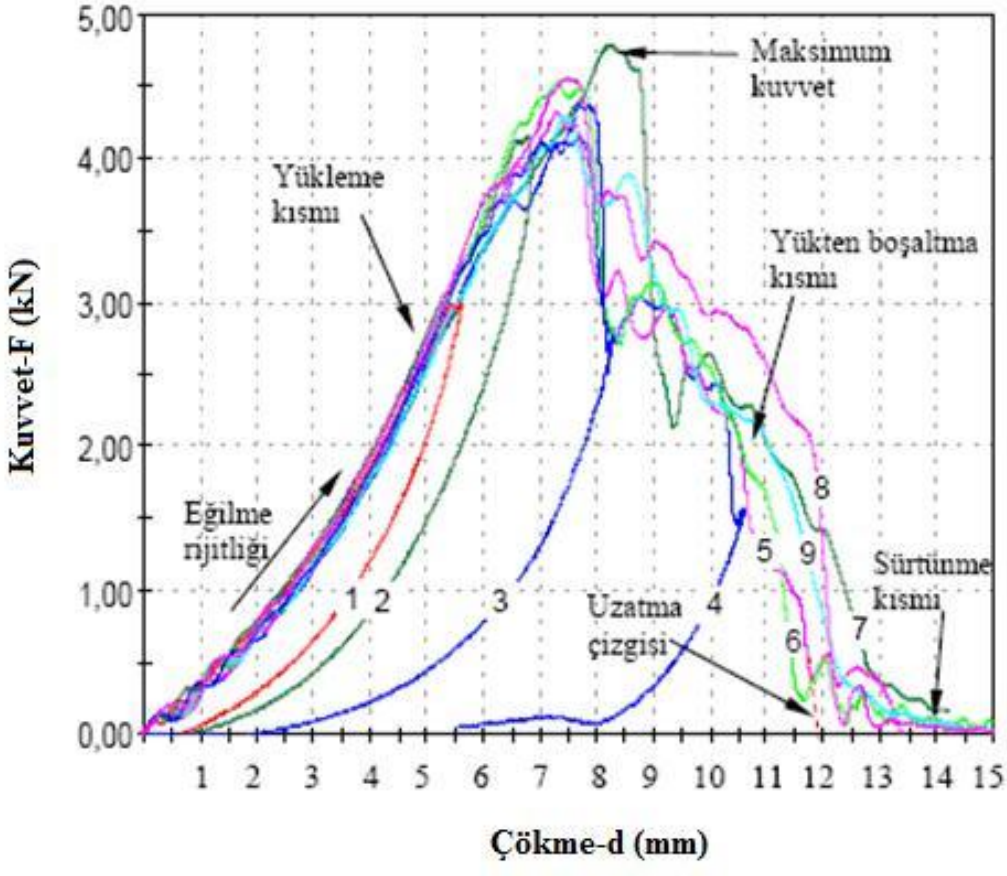


Şekil 6.7 Tipik kuvvet-zaman (*F-t*) eğrileri (Sayer 2009)

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).

6.4.2. 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 6.8'de artan darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren bir *F-d* grafiği görülmektedir.



Şekil 6.8 Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik kuvvet-çökme (*F-d*) eğrileri (Sayer 2009)

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 üç numune için oluşan eğriler kapalı tip eğrilerdir. Darbe enerjisi

arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve çökme de artar. Şekil 6.8'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.

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 6.8'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).

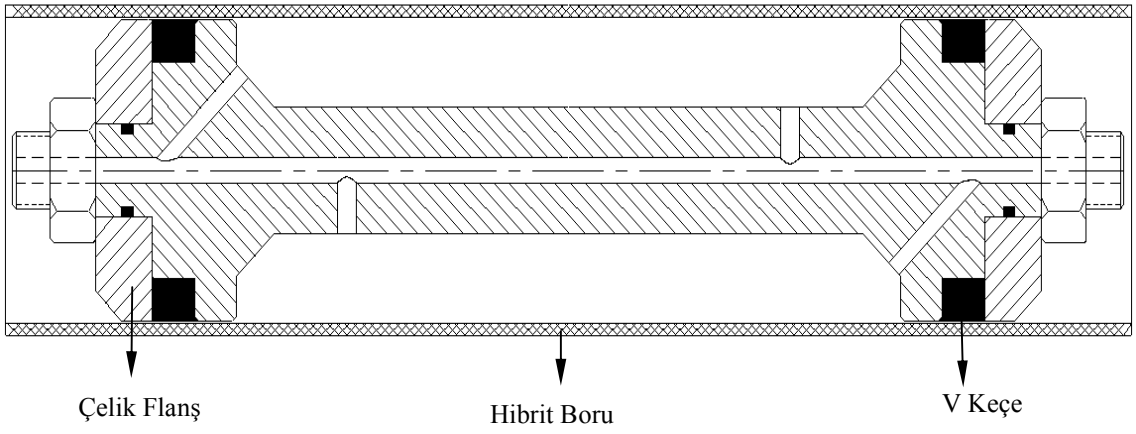
6.5. Statik İç Basınç Deneyleri

Statik iç basınç deneyleri, özellikle statik patlama mukavemetinin tespiti, hasar mekanizmasının incelenmesi ve malzeme sınır değerlerinin tespiti için yapılmıştır. Özellikle statik patlama mukavemetinin tespiti, yorulma deneylerinde kullanılacak olan gerilme oranlarının belirlenmesi için gereklidir. Malzeme sınır değerlerinin tespiti için her boru üzerine eksenel ve teğetsel olmak üzere iki adet strain-gage yerleştirilmiştir. Bu ve buna benzer sistemlerde boru iki ucu serbest olarak iç basınç etkisi ile zorlanmaktadır. Deney numuneleri, 300 mm boyunda cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açılı borulardan hazırlanmıştır.

Farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe testlerine maruz bırakılmış hibrit 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.

6.5.1. Statik iç basınç test düzeneği

Serbest uçlu statik iç basınç patlama deneyleri için Şekil 6.9'da görülen iç basınç test aparatı hazırlanmıştır. 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 6.9'da görüldüğü gibi hibrit kompozit borunun içine, boru iki ucu sızdırmazlık keçeleri üzerine gelecek şekilde monte edilmiştir. Böylece boruya iç basınç uygulandığında boru çapı artarken boru boyu kısalabilmektedir. Bu nedenle serbest uçlu iç basınç deneyi olarak adlandırılmıştır.



Şekil 6.9 Serbest uçlu iç basınç test aparatı (Şahin 2011)

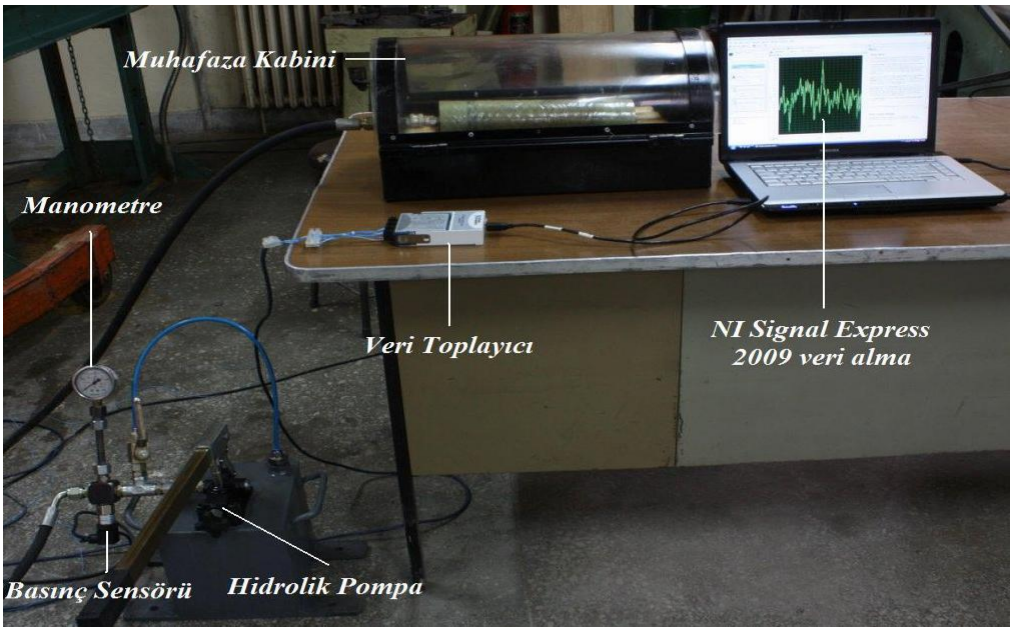


Şekil 6.10 İç basınç test aparatı yerleştirilmiş deney numunesi ve muhafaza kabini

Deneylerde kullanılan hibrit 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 6.10'da görülen muhafaza kabini içerisine yerleştirilmiştir. Kabinin üzeri şeffaf olduğu için deney boyunca boruda meydana gelen hasar mekanizması gözlenmiş ve not edilmiştir.

Şekil 6.11'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 hasarına kadar yüklemenin basınç artış hızının sabit olması sağlanmıştır. Deney numunesinde oluşan sonuç hasarının belirtilen süreden önce yada 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 veri alma yazılımına iletilmiştir. Yazılım sayesinde basıncın zamana göre değişim grafiği elde edilmiştir.



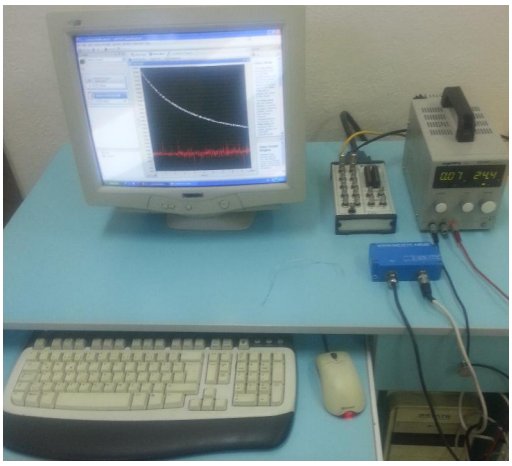
Şekil 6.11 Serbest uçlu iç basınç patlatma deneyi seti

6.6. Hibrit Boruların Statik İç Basınç Patlama Hasar Davranışlarının Belirlenmesi

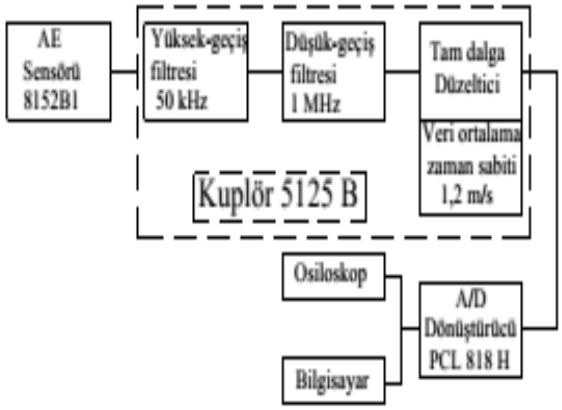
Farklı teğetsel ön gerilmeler altındaki hibrit kompozit numunelere aynı enerji seviyesinde darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri üzerine yapılan 20 J enerjili düşük hızlı darbe; farklı hasar mekanizmaları ortaya çıkarmıştır. Bu durum akustik emisyon ile incelenmiştir. Bu hasar mekanizmaları boru numunesinin statik iç basınç patlama mukavemetini hasarsız boruya göre azaltmıştır. Bu azalma borunun yeniden kullanılabilirliğini, yenilenmesi gerektiğini yada hasarlı halde ne kadar ömürlü olduğunu belirlemek açısından önemlidir.

6.6.1. Statik iç basınca maruz darbe hasarlı boruların patlamasının akustik emisyon ile hasar analizi

Hibrit kompozit boruların statik iç basınç patlama deneyleri esnasında akustik emisyon ölçümünü yapmak için kullanılan düzeneğin Şekil 6.12a'da ve Şekil 6.12b'de ölçüm zinciri ve şematik görünüşü verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.12 a) AE sensörü ölçme zinciri b) şematik görünüşü c) kuplörün görünüşü (Kistler: 5125B) d) AE sensörü, (Kistler 8152B1)

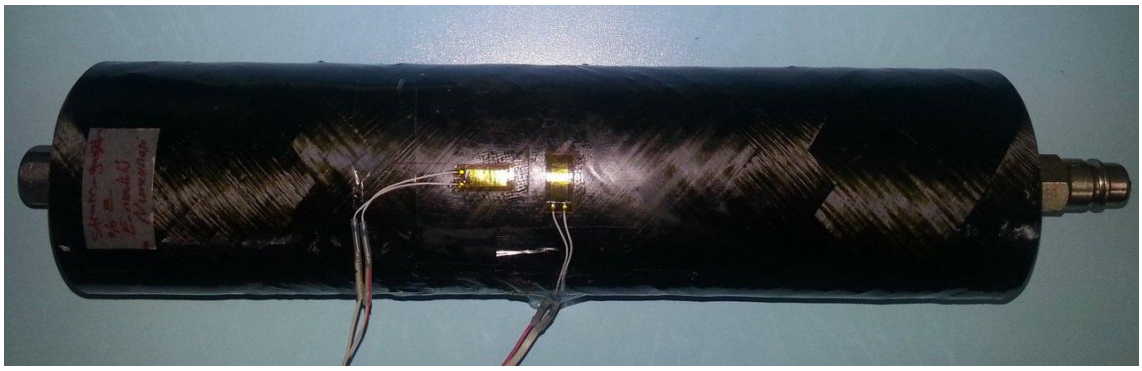
Akustik emisyon sinyallerini algılamak için Şekil 6.12d'de görülen piezo-elektrik prensibine göre çalışan bir akustik emisyon sensörü (Kistler: 8152B1) kullanılmıştır. Sensörden alınan sinyaller; Şekil 6.12c'de görülen bir şarj yükseltici (kuplör) (Kistler: 5125B) ile yükseltildikten sonra, yüksek-geçiş filtresi (50 kHz), alçak-geçiş filtresi (1 MHz) ve tam dalga düzelticiden geçirilerek, ortalama değerleri (1.2 m/s) alınıp, analiz için bilgisayara kaydedilmiştir. Kuplör, AE sensöründen gelen yüksek frekanstaki akustik emisyon sinyallerini işlemek için özel olarak tasarlanmıştır. 6, 12 ve 18 MPa ön gerilme değerinde hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların statik iç basınç patlama deneyleri esnasında akustik emisyon ölçümünü yapılmış ve alınan verilerle akustik veri-gerilme değişim grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu grafikler Bölüm 7.4 de sunulmuştur.

6.7. Hibrit Kompozit Borunun Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Hibrit 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 6.13). 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 artmıştır. 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 teğetsel yönde rijitlik katsayısı (elastisite modülü) ve şekil değiştirme oranı (Poisson oranı) değerleri tespit edilmiştir. Son hasar basıncına ait teğetsel hasar gerilmesi Denklem 6.3 yardımıyla elde edilmiştir. Numunelerin şekil değiştirme oranları (Poisson oranları); lineer bölgedeki şekil değiştirme değerleri kullanılarak

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

formülü yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 6.13 Teğetsel ve eksenel yönde strain-gage yapıştırılmış deney numunesi

6.8. Serbest Uçlu Hibrit Boruların Değişken İç Basınç Altında Yorulma Deneyleri

İç basınç etkisi altında yorulma deneyleri ASTM E 2992 standardına göre yapılmıştır. Deneyler için PLC kontrollü yorulma iç basınç deney cihazı kullanılmıştır. Serbest uçlu iç basınç temin edilmesini sağlayan aparat kompozit boru içerisine sabitlendikten sonra, boru patlatma kabininin içerisine yerleştirilmiştir. Kompozit borunun hidrolik güç ünitesi ile bağlantısı sağlandıktan sonra, PLC ünitesinden üst ve alt basınç değerleri girilerek sistem çalıştırılmıştır. Sisteme, deney numunelerinin statik patlama basıncının %30, %35, %40, %45, %50 ve %55'i olmak üzere altı farklı üst basınç değeri uygulanmıştır. Deney boyunca yorulma yük oranı $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$=0,05 ve frekans değeri f=0.416 Hz olacak şekilde (dakikada 25 çevrim) sabit tutulmuştur.

Bu çalışmada ASTM D2992-06 e göre (silindir teorisi) uygulanan gerilmeler basınç P değerlerinin kullanılarak σ gerilme değerlerinin hesaplanmasında ince cidarlı kaplar (D/t>20) teorisi kullanılmıştır. Buna göre teğetsel gerilme

$$\sigma = P(D - t_r)/2t_r \tag{6.3}$$

Burada,

σ_{HS}= teğetsel gerilme, kPa

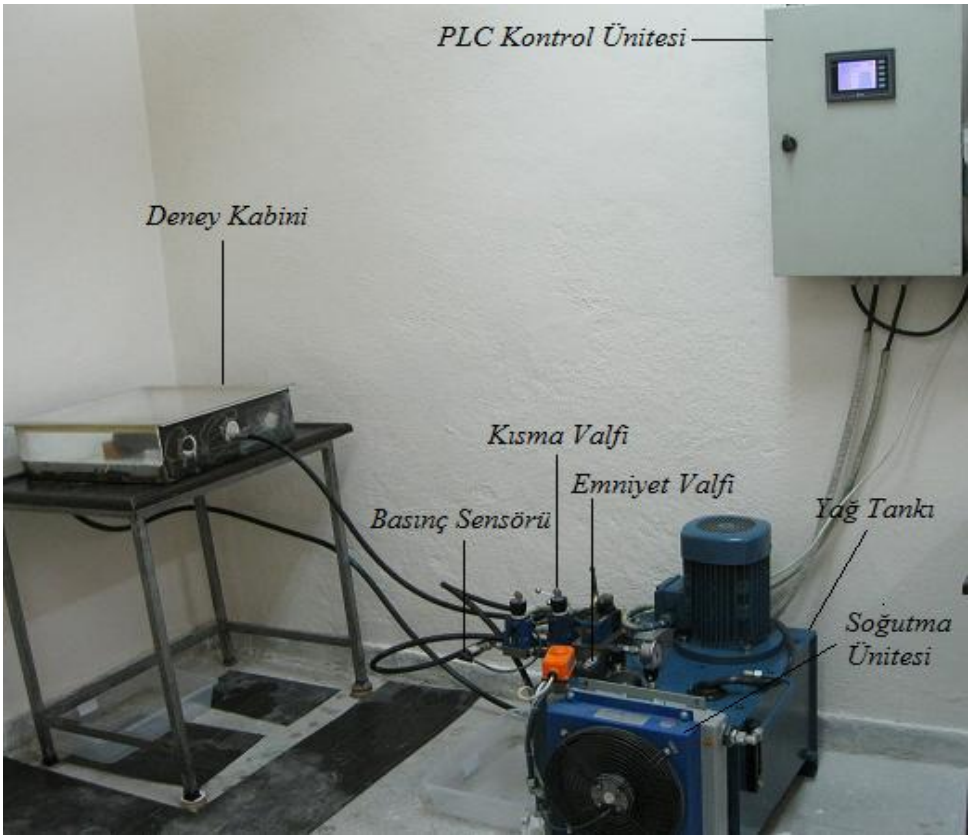
D = ortalama takviyeli dış çap, mm

P = iç basınç, kPa ve

t_r = minimum takviyeli cidar kalınlığı, mm

6.8.1. İç basınç yorulma deney cihazı

Yorulma deneyleri için Şekil 6.14'de gösterilen PLC kontrollü iç basınç yorulma deney cihazı kullanılmıştır. Bu iş için; P =250 bar basınç ve Q=8 ℓ/dak' lık debi kapasiteli dişli pompası bulunan, tank hacmi V=60 litre olan bir hidrolik güç ünitesi hazırlanmıştır. Pompa çıkışına alt ve üst basınçları mekanik olarak set edebileceğimiz birer adet basınç emniyet valfi konulmuştur. Bunun üzerine PLC ünitesinden uyarı alan, selenoid kumandalı 2x2'lik bir yön kontrol valfi konulmuştur. Valf çıkışına devredeki yağ basıncını algılayan SIEMENS marka anolog bir basınç transmitteri takılmıştır. Hidrolik sistem aynı anda üç adet deney numunesi ile birlikte çalışmaya müsaade edecek kapasitede tasarlanmıştır. Test aparatlarını hidrolik devreye bağlamak için çok çabuk ve kolay sökülüp takılabilen, üç adet quick kaplin takılı birer metre uzunluğunda esnek hidrolik hortumlar kullanılmıştır. Ayrıca sinüzoidal bir gerilme değişimi elde etmek amacıyla, ayrı ayrı ayarlanabilen gidiş ve dönüş hatlarına birer kısma valfi konulmuştur. Hidrolik akışkan olarak 46 numara hidrolik yağı kullanılmıştır. Uzun süreli çalışmak zorunda kalan test cihazına, yükselen yağ sıcaklığını sabit tutmak amacıyla radyatörlü bir soğutma ünitesi eklenmiştir.



Şekil 6.14. PLC kontrollü iç basınç yorulma deney cihazı

PLC kontrol ünitesi; anolog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrandan oluşmaktadır. İstenilen frekansta çevrim sağlayacak şekilde hazırlanmıştır.

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

6.9. Darbe ve Yorulma Sonrası Makro ve Mikro Hasarlarının İncelenmesi İçin Numune Hazırlama

Deneylerde kullanılan numunelerin mikro hasar incelemesinden önce makro hasar incelemesi yapılmıştır. Hasar bölgelerinde tabakalar arası ve tabaka içinde bulunan yağ kalıntıları tabakalar arası hasarın görüntülenmesine engel teşkil etmektedir. Darbe ve yorulma deneylerinden sonra gözle görülebilen makro hasarların belirginleşmesi için darbe ve yorulma cihazlarında kullanılan hidrolik yağ hasar bölgesinden arındırılmıştır. Bu işlem için numuneler bir malafaya takılıp 8 bar hava basıncına maruz bırakılmıştır. Basınçlı havanın etkisi ile hibrit boru numunelerinin iç kısmından dışa doğru yağ kalıntıları hasar bölgesinden uzaklaştırılmıştır.

Hasar bölgeleri makro ve mikro incelemeye hazır hale getirilmiştir. Makro hasar incelemesi için hibrit boru numenelerinin dış görünüş genel fotoğraflaması yapıldıktan sonra hasar bölgeleri boru numunelerinden kesilerek alınmıştır. Hibrit boru numunelerinin iç kısmında oluşan hasar bölgeleride fotoğraflanmıştır. Makro hasarları incelenen numunelerin mikro hasar incelemeleri için hasar bölgeleri radyal ve eksenel yönlerde kesilmiştir. Kesme işlemi Şekil 6.15'de görülen METKON marka kesme cihazı ile uygun kesme takımı kullanılarak yapılmıştır. Darbe hasarlı numunelerde kesme işlemi darbe hasarının etkisini inceleyebilmek için darbe noktalarından yapılmıştır.



Şekil 6.15 Numunelerin kesme işleminde kullanılan METKON marka kesme cihazı

Kesilen numunelerin hasar bölgelerinin incelenebilmesi için hasar yüzeyi Şekil 6.16a'da görülen METKON marka zımparalanma cihazında farklı zımparalama işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminden sonra hasar yüzeylerine aynı cihazda parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan numuneler yıkandıktan sonra hasar bölgesinde bulunan zımpara ve su kalıntıları kuru hava ile temizlenmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.16 Mikro yapının hazırlanmasında ve incelenmesinde kullanılan a) METKON marka zımparalanma ve parlatılma cihazı b) numune tutucu ve gerdirici mengene

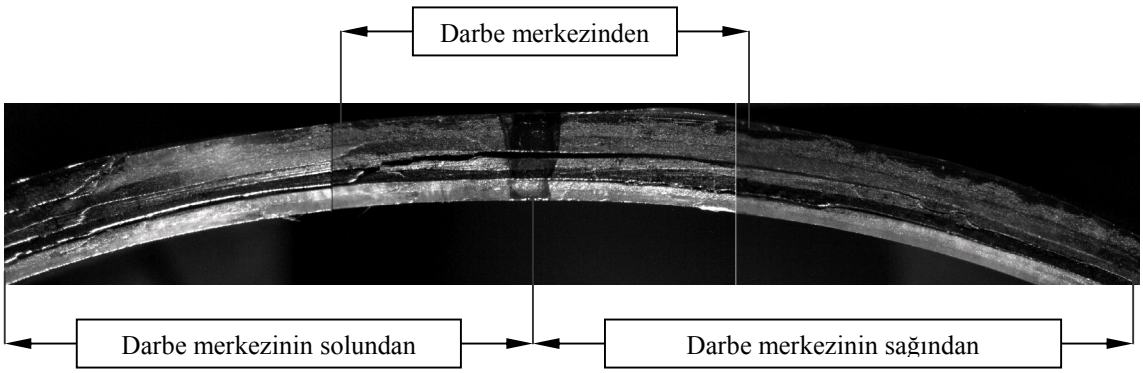
Temizlenen numuneler mikroskopta incelemek üzere Şekil 6.16b'de gürülen numune tutucu ve gerdirici mengeneye bağlanmıştır. Numunede oluşan tabakalar arası ve tabaka içi hasarın daha net görüntülenebilmesi için ilave bir hasar oluşturmayacak şekilde hasaralı numuneler mengene ile sıkıştırılarak gerdirilmiştir.

Numunelerin mikro hasar incelemesi için Şekil 6.17'de görülen KOZO marka USB mikroskop kameralar kullanılmıştır.



Şekil 6.17 Mikro hasarın incelenmesinde kullanılan KOZO marka USB mikroskop kameralar

Mikro hasar incelemelerinde mevcut mikroskopla numune kesitinde oluşan hasarı bir bütün olarak görüntüleme imkânı olmadığı için hasar bölgesi iki veya üç parçada görüntülenebilmiştir. Bu görüntüleme işlemi Şekil 6.18'de görüldüğü gibi darbe merkezinden, darbe merkezinin solundan ve darbe merkezinin sağından olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu şekilde görüntüleme şekli ile tabaka ayrılmaları, dış yüzey ve iç yüzey matris çatlakları, radyal çatlaklar vb. hasarlar daha net görüntülenmiştir.



Şekil 6.18 Mikro hasarın incelenmesinde görüntüleme şekilleri

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Hibrit Kompozit Boruların Yakma Deney Sonuçları

Deneylerde kullanılan cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açılı 6 tabakalı kompozit boruların elyaf hacim oranını belirlemek amacı ile ASTM D2584'e göre yakma deneyleri yapılmıştır. Şekil 7.1'de yakılan boru numunesi görülmektedir. Yakma deneyi sonucunda hibrit kompozit boruya ait elyaf hacim oranı $V_{f\text{-}Cam} = 0.33$ $V_{f\text{-}Karbon} = 0.08$ $V_{f\text{-}Cam\text{-}Karbon\text{-}Cam} = 0.41$ olarak bulunmuştur.



(a) (b)

Şekil 7.1 a) yakılmış deney numunesi b) ayrılmış karbon ve cam elyaflar

7.2. Hibrit Kompozit Boruların Mekanik Özellikleri

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

Çizelge 7.1 Hibrit kompozit borunun mekanik özellikleri

θ	Elyaf sarım açısı (cam/karbon/cam)	$\pm 75_g{}^0 \pm 55_c{}^0 \pm 45_g{}^0$
σ_T, σ_{HS}	Teğetsel hasar gerilmesi (MPa)	453
ν_y	Şekil değiştirme oranı (Poisson oranı)	0,618
E_y	Teğetsel yönde rijitlik katsayısı (Elastisite modülü) (GPa)	22,48

7.3. Hibrit Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

Cam-karbon/epoksi hibrit boruların teğetsel ön gerilme altında düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesi amacıyla deney numunelerine farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde 20 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Darbe esnasında kullanılan farklı teğetsel ön gerilme değerleri ANSI/AWWA C950 standardında belirtilen işletme basınç aralıklarında seçilmiş ve bu iç basınçlar kullanılan numuneler için gerilme değerine dönüştürülmüştür. Darbe enerji değerlerini elde edebilmek için vurucu kütlesinin bırakılacağı yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. 24 mm çapında yarı küresel çelik vurucu 20 J enerji seviyesi için 0,32 m yükseklikten düşürülmüştür. 60^o açılı V yatağı üzerine yerleştirilen numunelere iç basınç test düzeneği yardımıyla 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 ve 48 MPa değerlerinde teğetsel ön gerilme uygulanmış ve yarı küresel çelik uçlu vurucu ile her bir gerilme değeri için numunelere 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 ise 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 (çökme), ve hız-zaman değişimleri düşük hızlı darbenin kinetik analizi neticesinde elde edilmiştir.

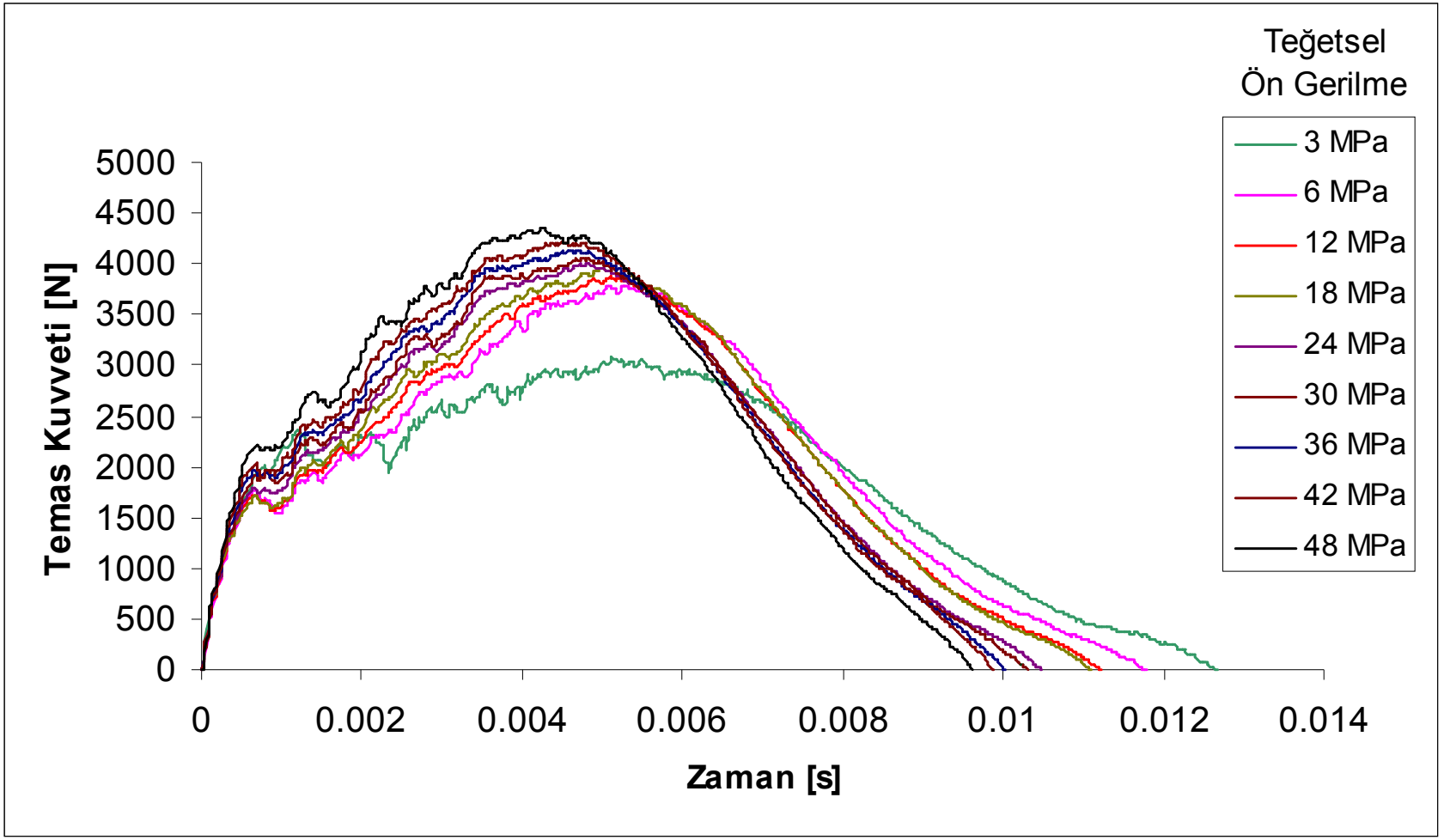
7.3.1. Temas kuvveti-zaman değişimi

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 teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe enerjisi altında, temas kuvvetinin zamana göre değişimini gösteren grafikler verilmiştir. 3 ila 48 MPa teğetsel ön gerilme aralığında ve 20 J'lük çarpma enerjisinde elde edilen temas kuvveti-zaman değişimlerinin çan eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Her bir eğri yüklemede bir artma kısmına, ulaşılan en büyük bir temas kuvveti 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). Teğetsel ön gerilme değerinin azalması ile numunede oluşan çökmenin artışı hasar miktarınıda artırmaktadır. Buna bağlı olarak teğetsel ön gerilme değerinin azalması ile grafikte oluşan salınım miktarında da artma gözlenmiştir. Temas kuvveti en büyük değerine ulaşıncaya kadar hasar gelişiminin hızla devam ettiği düşünülmektedir (Kara 2006). Teğetsel ön gerilme altında olmayan deney numunelerinin düşük hızlı darbe cevabının araştırıldığı çalışmalardan Uyaner ve diğ. (2010) elde edilen temas kuvveti-zaman değişim grafiklerinde salınım miktarlarının bu çalışmaya göre çok daha fazla olduğu görülmüştür. Kara (2012), çalışmasında numunelere uygulanan iç basınç (ön gerilme) numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine ve daha az hasarlanmasına neden olduğunu ifade etmiştir. Buna bağlı olarak düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen kuvvet-zaman grafiklerde oluşan salınım miktarı iç basınçsız (ön gerilmesiz) deneylere göre daha düşüktür.

Bu çalışmada da teğetsel ön gerilme (iç basınç) etkisi ile şekil değiştirmenin (çökmenin) daha az oluşması, hasarlanmanın da az oluşmasına sebep olmuştur. En yüksek teğetsel ön gerilme uygulanan Kara (2012)'nın çalışmasından farklı olarak, teğetsel ön gerilme değerleri en düşükten en yükseğe doğru artırılarak uygulanmıştır. Teğetsel ön gerilmenin artmasıyla numune üzerinde oluşan en büyük temas kuvvetinin arttığı Şekil 7.2'de açıkça görülmektedir. Ayrıca teğetsel ön gerilmenin artmasıyla numunede oluşan temas süresi de azalmaktadır. 3 MPa ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle yapılan deneyden elde edilen grafikte salınımların çok daha fazla olması numunede çökmeden dolayı daha fazla darbe hasarının oluştuğunu göstermektedir.



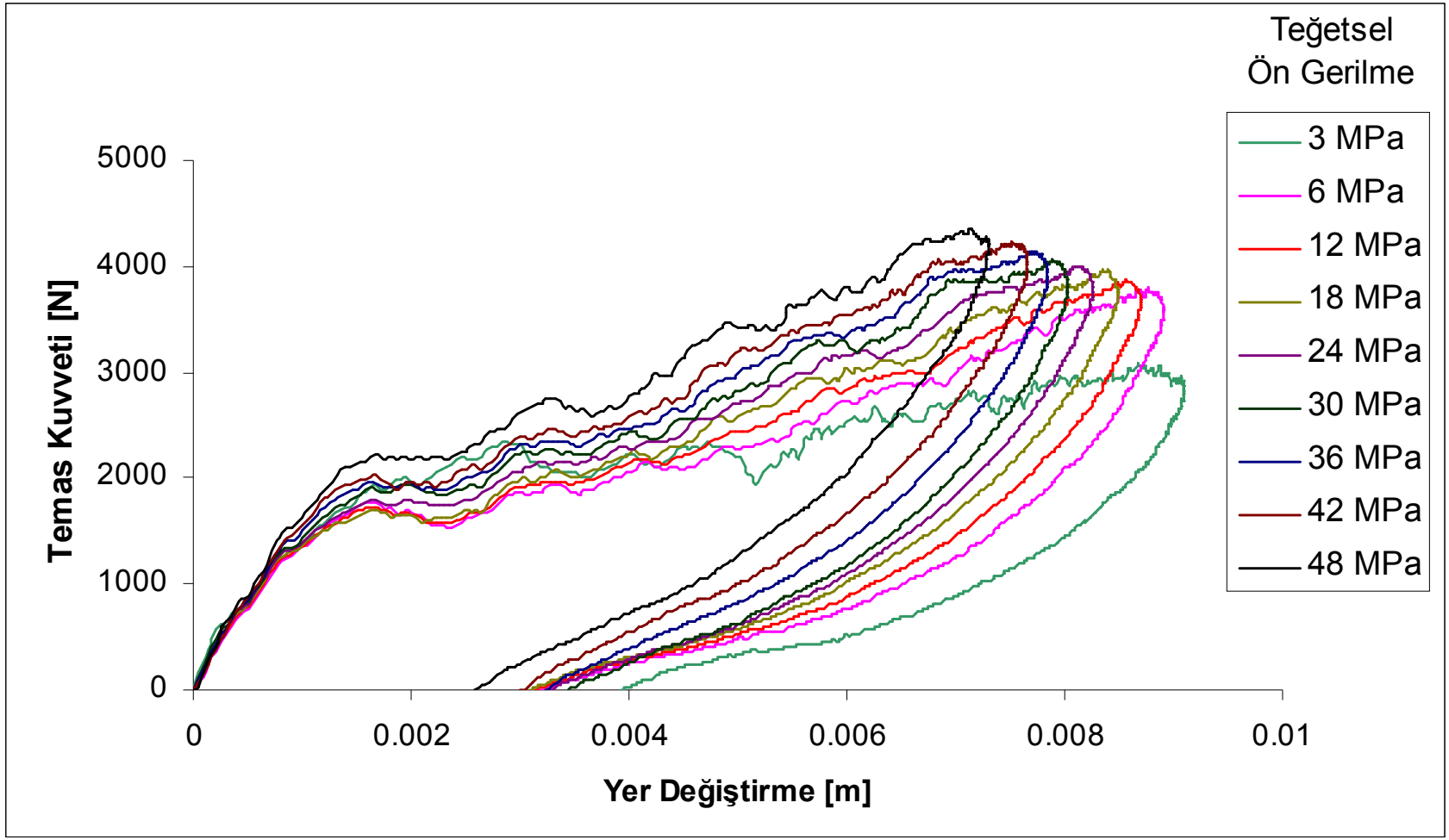
Şekil 7.2 Hibrit kompozit boru numunesinde 20 J darbe enerjisi için farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde elde edilen kuvvet–zaman değişimi

7.3.2. Temas kuvveti-yer değiştirme

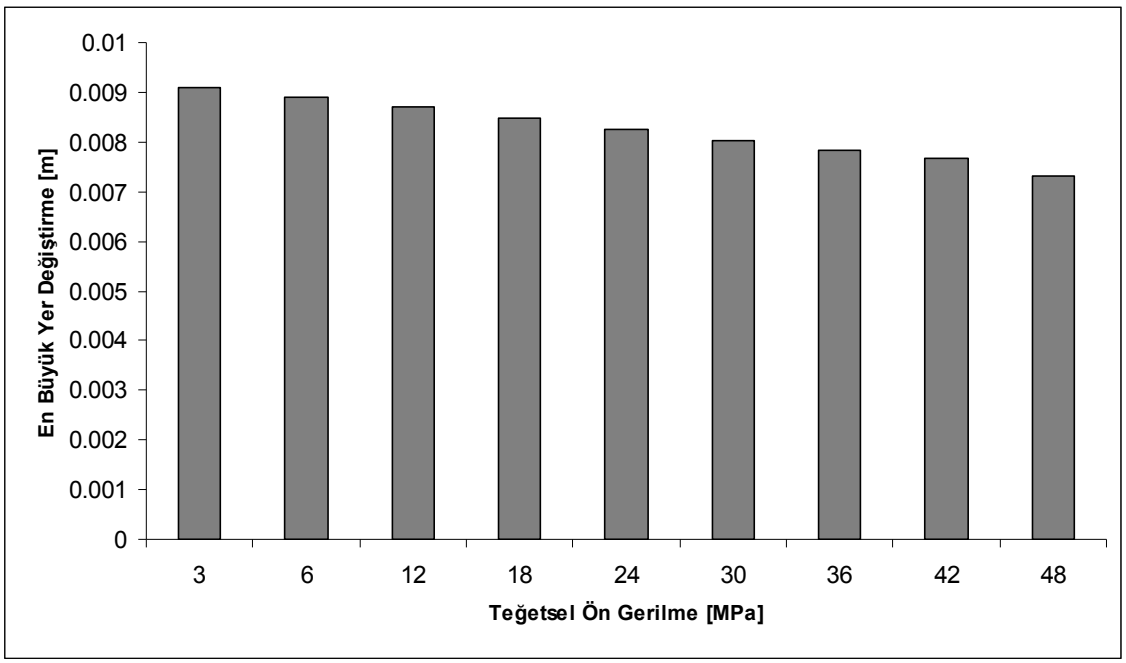
Darbeye maruz kalan kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-yer değiştirme (kuvvet-çökme) değişim grafikleridir. Farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde düşük hızlı darbeye maruz kalmış hibrit kompozit numuneler için elde edilen kuvvete bağlı yer 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. Hibrit kompozit borularda ön gerilme değeri arttıkça temas kuvvet artmakta ve yer değiştirme miktarı azalmaktadır. Grafikteki en büyük ön gerilme değerinde temas kuvveti değeri en büyük, yer değiştirme miktarı en küçük değerde oluşmaktadır.

Temas 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. Teğetsel ön gerilme değerlerinin artmasıyla numunelerin eğilme rijitliğinde büyük bir değişim gözlenmemiştir. Bunun en büyük nedeni numunelerin teğetsel ön gerilme altında darbe yüklemesine maruz kalmasıdır. Deney numunelerine uygulanan teğetsel ön gerilme, numunede 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 daha az oluşmasına işaret etmektedir.

Şekil 7.4'te 3, 6, 12, 18, 24 30, 36, 42, 48 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde 20 J darbe enerjisi için hibrit kompozit numunelerde oluşan en büyük yer değiştirme miktarları verilmiştir. Uygulanan teğetsel ön gerilmenin artmasıyla yer değiştirme miktarının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. 3 MPa en düşük teğetsel ön gerilme değerinde ≈ 9,1 mm gibi yüksek bir yer değiştirme gerçekleşmiştir. Artan teğetsel ön gerilme değerleriyle beraber azalan yer değiştirme 48 MPa en yüksek teğetsel ön gerilme değerinde ≈ 7,3 mm olmuştur.



Şekil 7.3 Hibrit kompozit boru numunesinde 20 J darbe enerjisi için farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde elde edilen kuvvete bağlı yer değiştirme miktarları



Şekil 7.4 Hibrit kompozit boru numunesinde 20 J darbe enerjisi için farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde elde edilen en büyük yer değiştirme miktarları

Kuvvet-yer değiştirme grafiği içinde kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir (Kara, 2006). Şekil 7.3'te grafik içinde kalan alan hesaplandığında yutulan enerji miktarı elde edilmiştir. Çizelge 7.2'de yutulan enerji, geri verilen enerji, elde edilen yer değiştirme miktarları ve %50 σ_{HS} gerilme değerinde ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayıları verilmiştir. Çizelge 7.2 incelendiğinde; artan ön gerilme değerleri ile beraber yer değiştirme miktarlarında düzenli olarak azalma meydana geldiği görülmektedir. Fakat ön gerilmenin artışıyla yutulan enerji veya geri verilen enerji değerlerinde önemli oranda bir artış veya azalma saptanamamıştır.

3 MPa en düşük ve 48 MPa en yüksek teğetsel ön gerilme değerinde yutulan enerjiler arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa sırasıyla ≈ 15,4 J ve ≈ 13,1 J gibi yakın değerler olduğu görülecektir. Bu değerlerin belli bir aralıkta kaldığı söylenebilir. Sonuç olarak; farlı teğetsel ön gerime değerlerinde sabit bir enerji seviyesinde düşük hızlı darbe uygulanan hibrid borularda oluşan hasarlar aşağıda verilen Çizelge 7.2 yardımı ile yorumlanmıştır. Darbe esnasında yutulan enerji; düşük ön gerilme değerlerinde hasarlandırılan numunelerde, ağırlıklı olarak yoğun hasar gelişimine sebep olmuştur. Buna bağlı olarak malzemenin çok hasarlı ve kısa ömürlü olduğu anlaşılmaktadır (Ön gerilme, σ = 3 MPa / Yorulma ömrü, N= 713). Yüksek ön gerilme

değerlerinde ise yutulan enerjinin ağırlıklı olarak elastik şekil değişimine harcandığı, böylece malzemenin az hasarlı ve uzun ömürlü olduğu anlaşılmaktadır (Ön gerilme, σ= 30 MPa / Yorulma ömrü, N= 3230).

Çizelge 7.2 Farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış kompozit borularda elde edilen enerji dağılım, yer değiştirme miktarları ve yorulma ömrü verileri

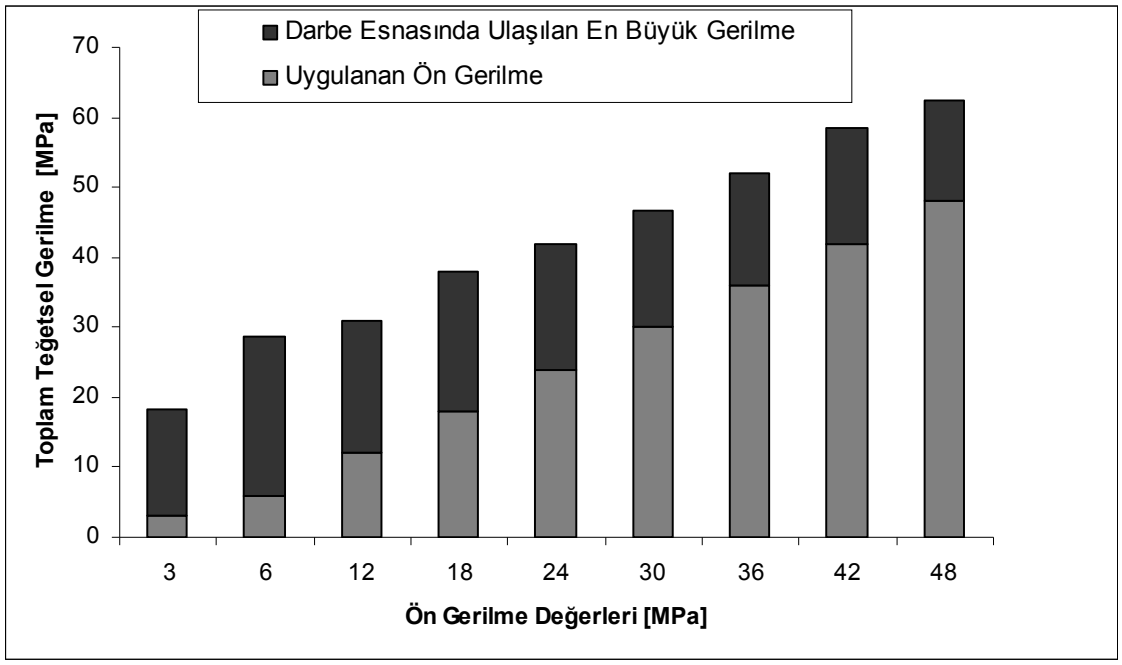
Teğetsel Ön Gerilme (MPa)	Uygulanan Enerji (J)	Yutulan Enerji (J)	Geri Verilen Enerji (J)	Elde Edilen Yer Değiştirme (m)	%50 σ_{HS} gerilme değerinde yorulma ömrü
3		15,39185	4,608155	0,009096	713
6		13,91433	6,08567	0,008902	1047
12		14,23696	5,763039	0,008694	1783
18		13,63004	6,369962	0,008487	2169
24	20	14,58467	5,41533	0,008254	2536
30		14,21216	5,787844	0,008025	*3230
36		13,92076	6,07924	0,007842	*3141
42		13,34823	6,651773	0,007659	-
48		13,08236	6,917637	0,0073	-

** 24 MPa ön gerilme değerinden sonra darbe hasarlı hibrit numunelerde, yorulma sonuç hasarı darbe noktasından farklı yerlerden oluşmuş ve hasarsız numune gibi davranmıştır.*

7.3.3. Farklı ön gerilme değerleri için darbe deneylerinde oluşan en büyük teğetsel gerilme değerleri

Bölüm 7.3.1'de hibrit kompozit boru numunelerinin düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen kuvvet-zaman değişimleri anlatılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz kalan hibrit kompozit boru numunelerine darbeden önce 3, 6, 12, 18, 24 30, 36, 42, 48 MPa teğetsel ön gerilme uygulanmış ve kuvvet-zaman değişimine bağlı olarak basınç sensöründen ölçülen gerilmedeki değişim Şekil 7.5'da verilmiştir.

Darbe esnasında vurucunun numuneye temasıyla beraber temas kuvveti artmaya başlamış buna bağlı olarak da teğetsel ön gerilme değeri artmıştır. Temas kuvvetinin en büyük değerine ulaştığı noktada gerilme değeri de en büyük değerine ulaşmıştır. Geri sekmenin etkisiyle temas kuvveti azalarak sıfıra düşmüştür. Buna bağlı olarak gerilme değeri de azalmış ve darbeden önceki teğetsel ön gerilme değerine tekrar düşmüştür.



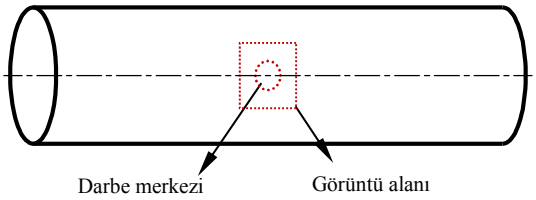
Şekil 7.5 Farklı teğetsel ön gerilme uygulanmış hibrit kompozit boru numunelerinde 20 J darbe seviyesi için elde edilen en büyük teğetsel gerilme değerleri

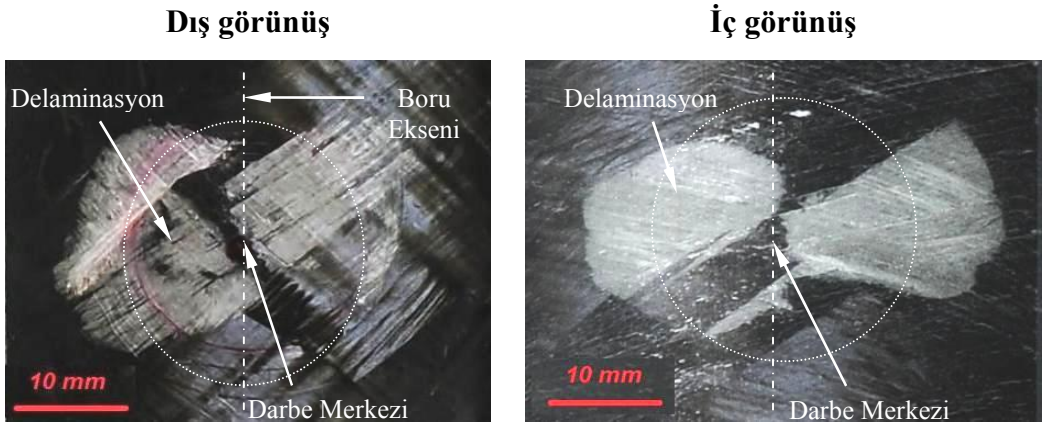
7.3.4. Düşük hızlı darbe hasar analizi

Hibrit kompozit deney numunelerine teğetsel ön gerilme altındaki yapılan darbe deneylerinden sonra numunede oluşan hasarlar tespit edilmiş ve değerlendirilmiştir. Cam/karbon/cam-epoksi kompozit numunede meydana gelen hasarlar, bir dizi işlemden sonra görüntülenebilmektedir. Kompozit hibrit boru numunelerinin teğetsel ön gerilme altında darbe yapıldıktan sonra darbe bölgesinin ön gerilme uygulamada kullanılan hidrolik akışkandan arındırılması gerekmektedir. Bunun için darbe yapılmış boru numunesi temizlendikten sonra tekrardan temiz bir malafaya takılıp 8 bar hava basıncına maruz bırakılmıştır. Bu basınç değerinde ilave hasar oluşmamıştır. Özellikle matris çatlağı bulunan numunelerde; kullanılan hidrolik akışkanın tabakalar arasından rahat sızmasından dolayı hasar bölgesi makro olarak çok net bir şekilde görüntülenebilmiştir. Tabakalar arası ayrılmaların boyutu ve şekli ile mevcut olan matris çatlakları çıplak göz ile belirlenebilir (Abrate, 1998).

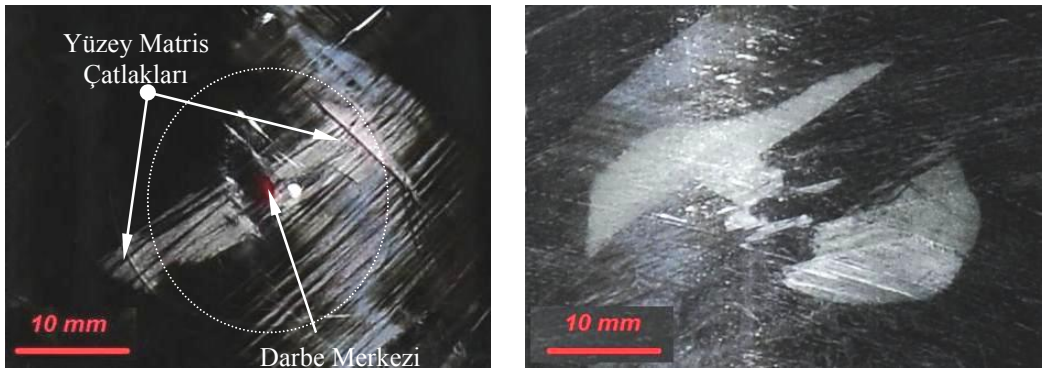
Darbe noktalarında oluşan hasarın dış ve iç bölgelerinin yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiş ve incelenmiştir. Numuneler darbe bölgelerinden kesilip optik mikroskop altında incelenerek kesit görüntüleri çıkarılmıştır.

Şekil 7.6, 7, 8 ve 9'da hibrit numunelerde 20 J enerji seviyesinde farklı teğetsel ön gerilme değerleri için dış, iç ve kesit bölgelerine ait hasarlar görülmektedir.

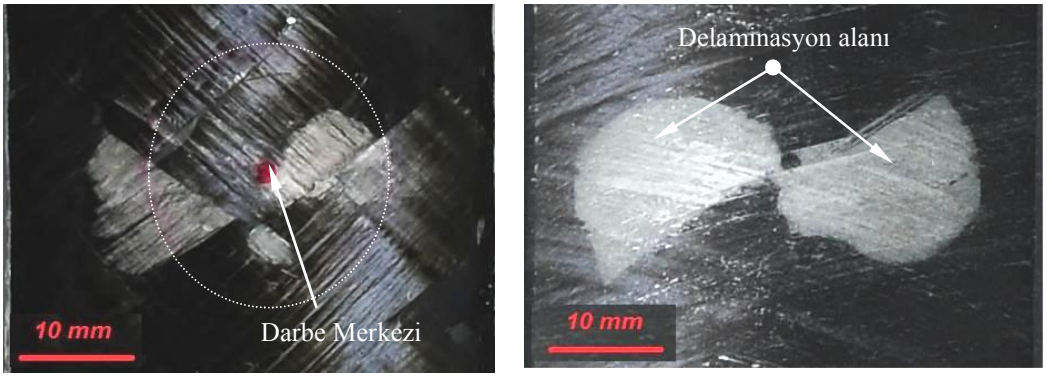




(a)

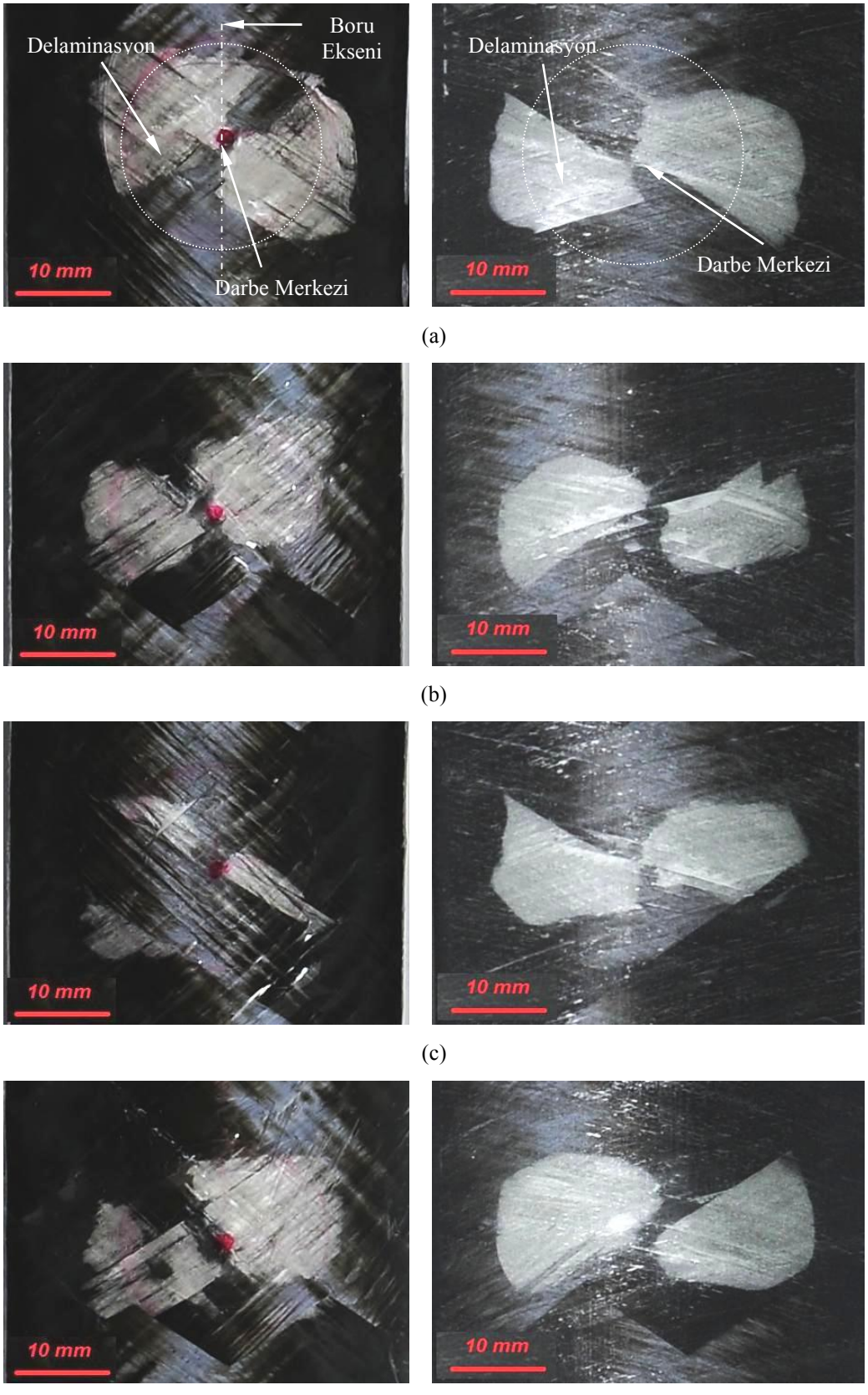


(b)

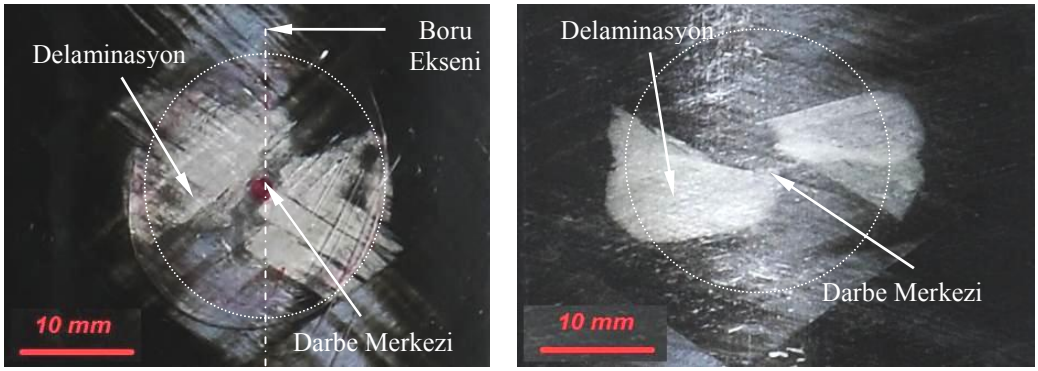


(c)

Şekil 7.6 Hibrit kompozit boru numunelerinde 20 J darbe enerjisi için a) 6 MPa b) 12 MPa c) 18 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde oluşan dış ve iç hasar bölgeleri



Şekil 7.7 Hibrit kompozit boru numunelerinde 20 J darbe enerjisi için a) 24 MPa b) 30 MPa c)36 MPa d) 42 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde oluşan dış ve iç hasar bölgeleri

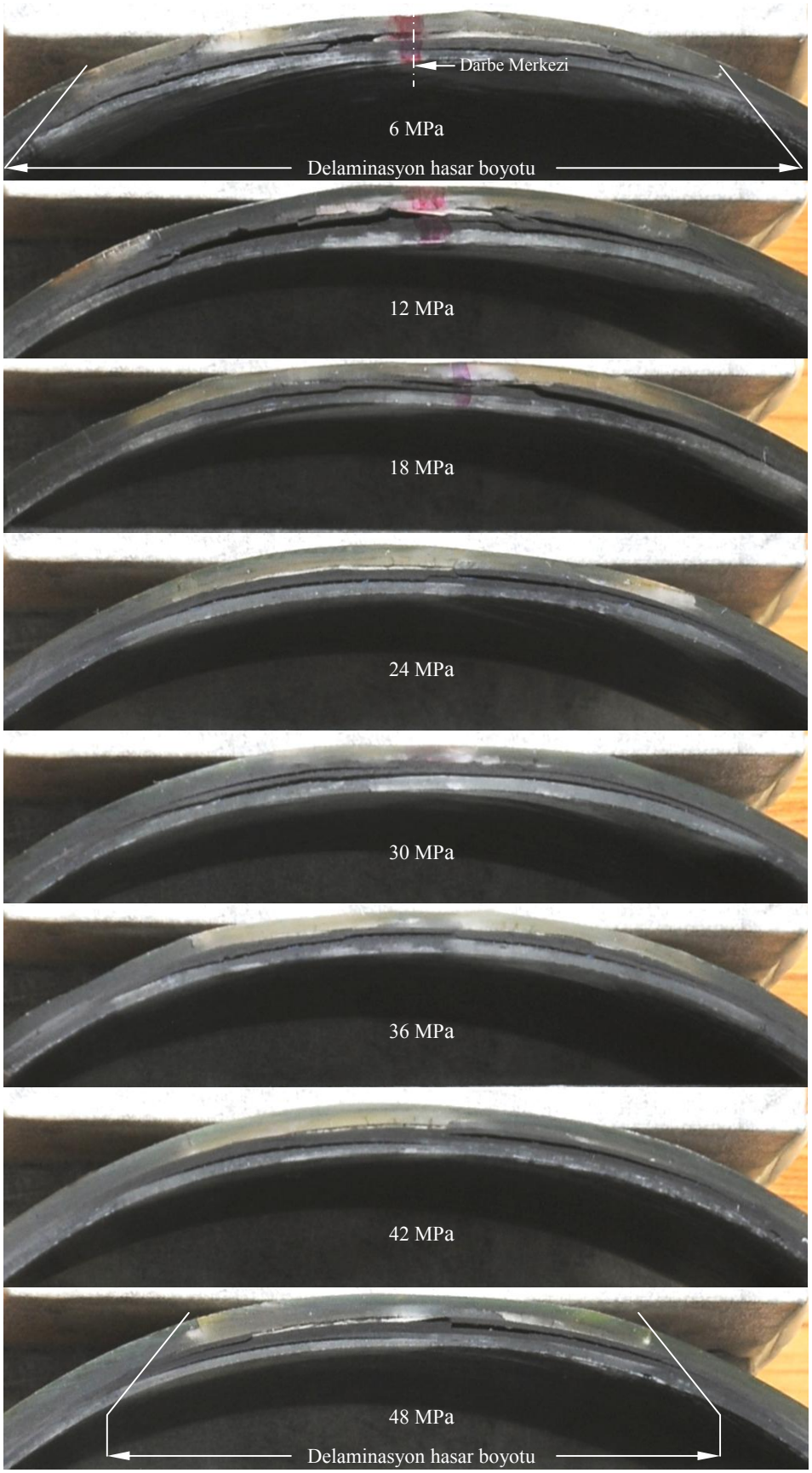


Şekil 7.8 Hibrit kompozit boru numunelerinde 20 J darbe enerjisi için 48 MPa teğetsel ön gerilme değerinde oluşan dış ve iç hasar bölgeleri

Dış ve iç hasar bölgeleri incelendiğinde, darbe merkezi etrafında elyaf sarım doğrultusunda büyük bir delaminasyon alanı oluşmuştur. Tabakalı kompozit malzemede tabakalar arasındaki farklı elyaf yönlenmelerinden ve farklı takviye malzeme kullanımından dolayı bu tabakaların 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 yayılmaktadır. Numunenin iç hasar bölgesi incelendiğinde oluşan delaminasyon alanının dış hasar bölgesinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 7.6, 7 ve 8'de hasar resimlerinde, dış ve iç yüzeyin cam elyafla sarılması ve reçineninde şeffaflık etkisi ile arka planda fon olarak görülen siyah zemin ±55° karbon tabakası çok net görülmektedir. Dış hasar bölgesi ±45° cam tabakası ve iç hasar bölgesi ±75° cam tabakasıdır. Darbe esnasında oluşan, dış tabakada basma ve çekme gerilmeleri ile iç tabakada sadece çekme gerilmesinin etkisiyle, cam tabakalar karbon tabakasından ayrılmıştır. Delaminasyonun etkisiyle numune dış ve iç yüzeyinde bulunan şaffaflık gitmiş ve hasar alanları daha net görüntülenebilmiştir.

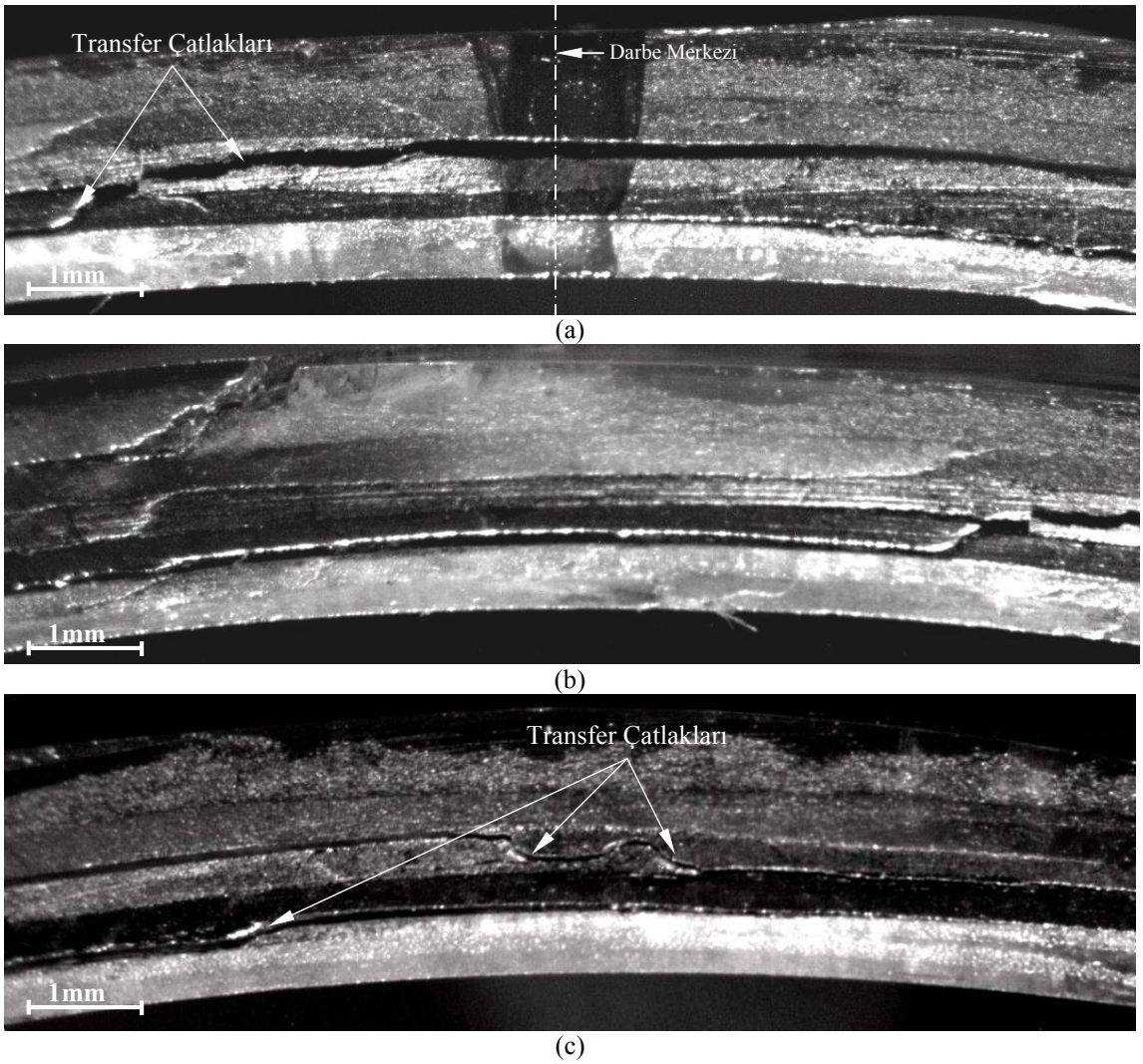
Şekil 7.9'da kesit bölgelerine ait hasarlar dikkatli incelendiğinde darbe esnasında numuneye uygulanan ön gerilmenin 6 MPa'dan başlayarak 48 MPa'a kadar artmasıyla, yutulan enerji miktarında ciddi bir değişim olmamasına rağmen, numunelerde oluşan darbe hasar bölgesinin azaldığı açıkça görülmektedir. Ön gerilme değeri arttıkça numunede oluşan yer değiştirme (çökme) miktarının azalması darbe hasar bölgesininde azalmasına sebep olmaktadır. Azalan yer değiştirmenin etkisiyle daha küçük bir hasar bölgesi oluşmaktadır.



Şekil 7.9 Hibrit kompozit boru numunelerin sırasıyla 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 ve 48 MPa teğetsel ön gerilme altında 20 J darbe enerjisi sonrası, basınç artışına bağlı ön gerilme artışının sonucuna bağlı olarak genişleyen delaminasyon darbe hasarının radyal kesit görünüşleri

6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi için Şekil 7.6 a'da numunenin dış ve iç bölgelerindeki hasarlar görülmektedir. Bu ön gerilme değerinde numunede oluşan hasar bölgesi diğer ön gerilme değerlerindeki hasarlara göre oldukça büyüktür. Numunenin iç ve dış hasar bölgesi incelendiğinde nüfuziyet bölgesi ve bu bölgeyi saran delaminasyon alanı görülmektedir.

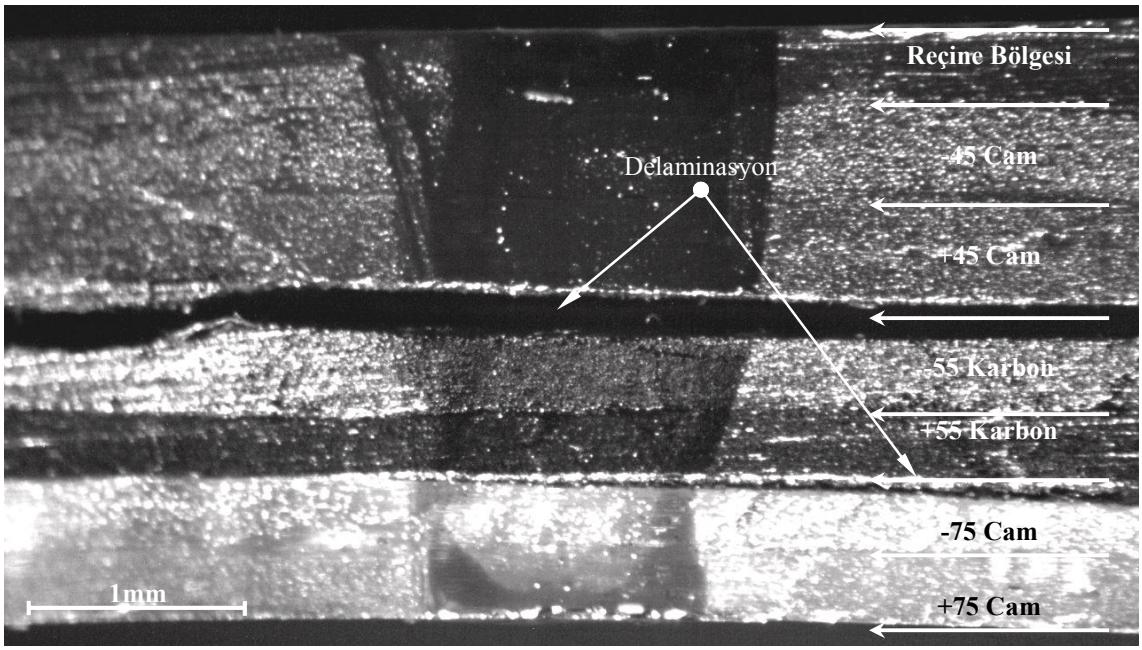
Şekil 7.10, 11, 12, 13 ve 14'te numune kesitinde oluşan hasarlar görülmektedir. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılan numunede oluşan hasar bölgesi 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe hasarlarından daha büyüktür.



Şekil 7.10 Hibrit borunun 6 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası hasarın radyal kesit görünüşleri, a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan c) darbe merkezinin sağından

6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde numune kesitinden alınmış olan bütün mikro yapı resimlerinde delaminasyon çok net bir şekilde görülmektedir. Delaminasyon ağırlıklı olarak tabakalar arasında gerçekleşmektedir. Delaminasyon gelişimini, Şekil

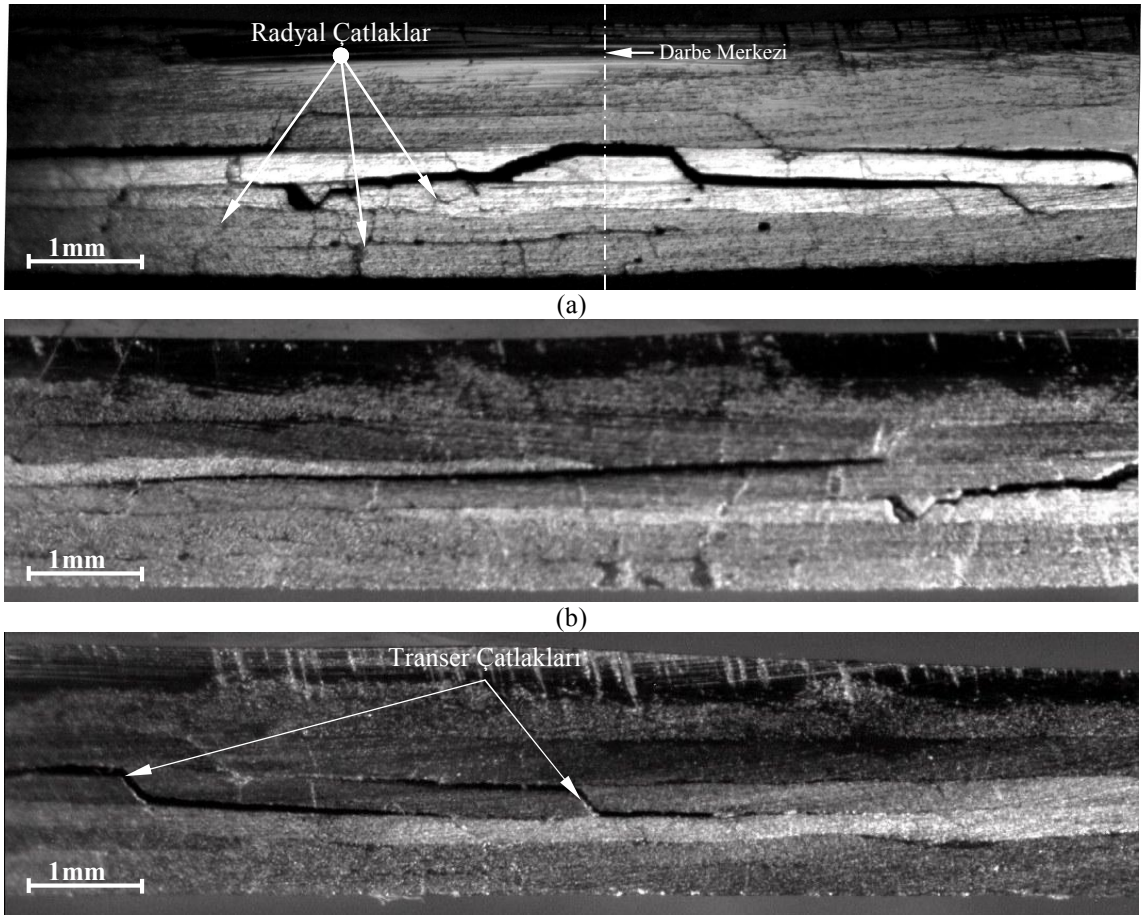
7.11 incelendiğinde numunenin orta katmanında bulunan ±55° karbon tabakası belirlemektedir.



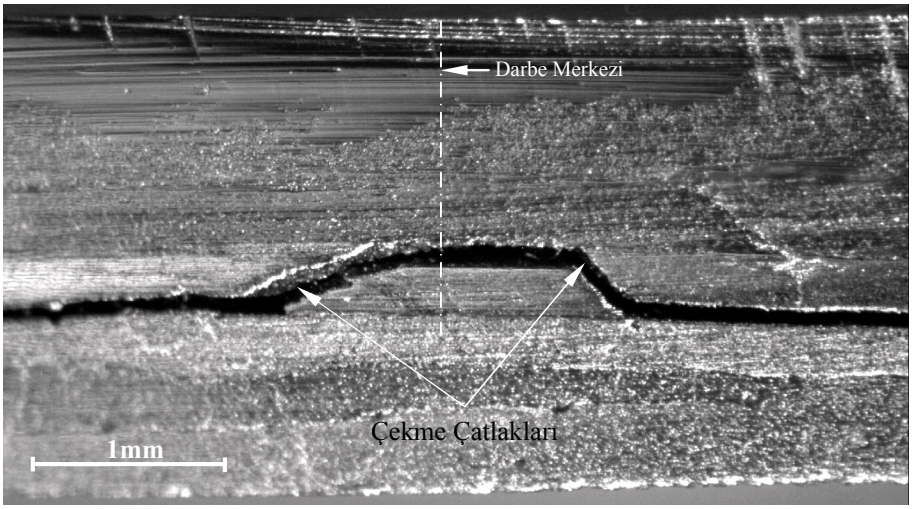
Şekil 7.11 6 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe merkezinin radyal kesit görünüşü

Şekil 7.10'da radyal kesit ve Şekil 7.12'de eksenel kesitler incelendiğinde delaminasyonun; sarım açılarının ve eğilme rijitliklerinin farklılığından dolayı cam ve karbon tabakaları arasında oluştuğu görülmektedir. Darbenin etkisiyle ±45° cam tabakası ile ±55° karbon tabakası arasında başlayan delaminasyon transfer çatlakları vasıtasıyla karbon tabakası içinde ilerleyerek ±55° karbon tabakası ile ±75° cam tabakası arasına ulaştığı görülmektedir. Bu gelişim özellikle yorulma deneylerinde sızıntı yolu olarak tanımlanacaktır. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde numunelerin hasar bölgesinin kesit görüntüleri optik mikroskop altında incelendiğinde numunede oluşan radyal çatlakların, daha büyük teğetsel ön gerilme değerlerinde görülenlere göre çok daha fazla olduğu bariz olarak tespit edilmiştir. Şekil 7.12a'da verilen eksenel kesit görüntüsünde numunede oluşan radyal çatlakların tüm tabakalar içinde olduğu görülmektedir.

Şekil 7.13'de darbe merkezinde darbe yüklemesi sırasında normal gerilmelerin karbon tabakasında radyal kayma mukavemetini aştığında oluşan çekme çatlakları görülmektedir. Şekil 7.10a,c'de ve Şekil 7.12c'de delaminasyonların, darbe merkezinden uzaklaştıkça transfer çatlakları aracılığıyla yön değiştirdiği ve bir alt veya üst tabakaya geçiş yaptığı net bir şekilde görülmektedir.



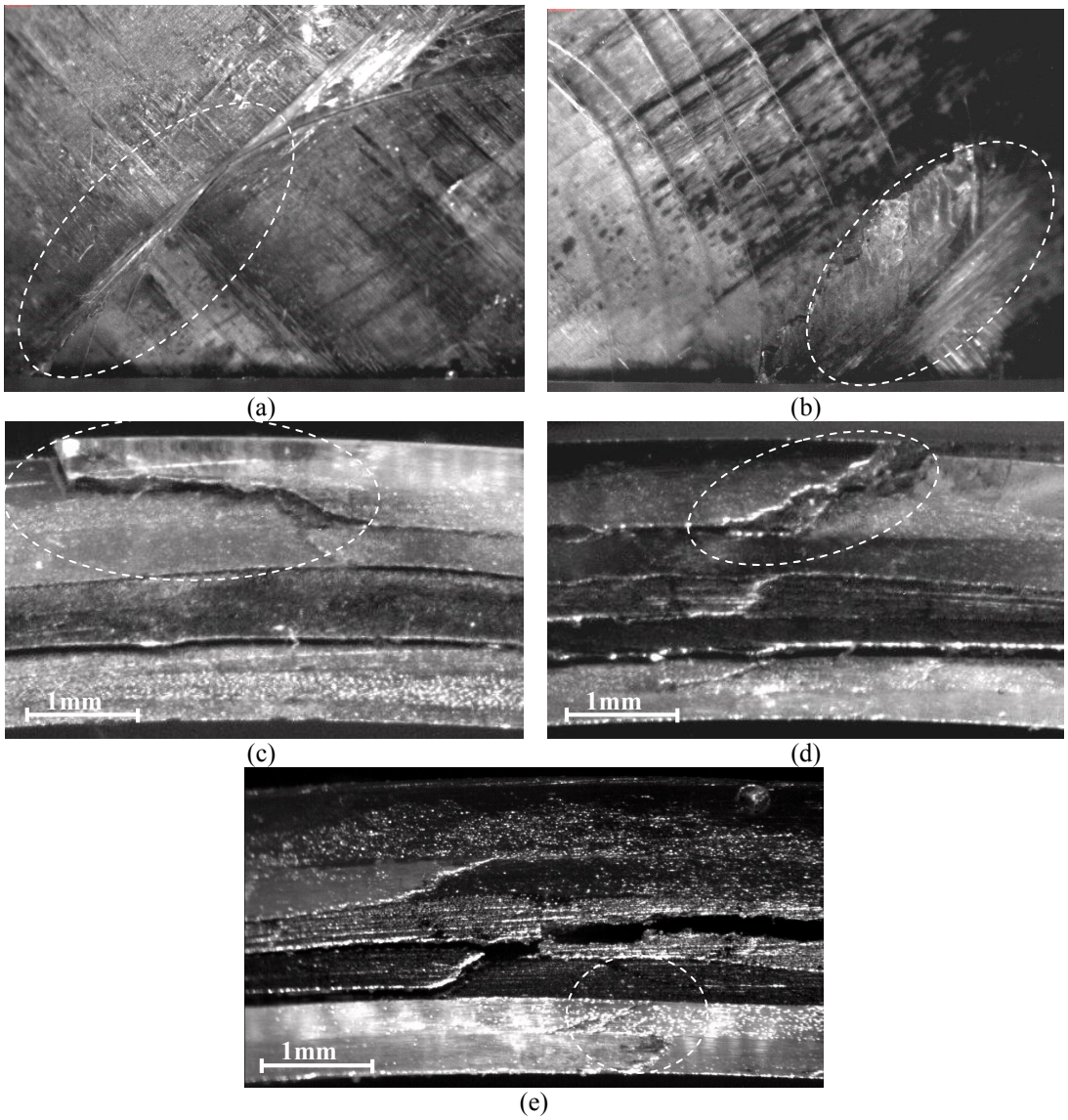
Şekil 7.12 Hibrit kompozit borunun 6 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası eksenel kesit görünüşleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan c) darbe merkezinin sağından



Şekil 7.13 6 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe merkezinde çekme çatlaklarının eksenel kesit görünüşü

Şekil 7.14'de görüldüğü gibi numunenin dış ve iç yüzeyinde matris çatlak hasarları oluşmuştur. Oluşan bu çatlak hasarları 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde oluşan hasarlara göre çok daha fazladır. Şekil 7.14b'de dış yüzeyde görülen matris çatlakları elyaf sarım yönünde oluştuğu gibi darbe merkezi etrafında dairesel matris

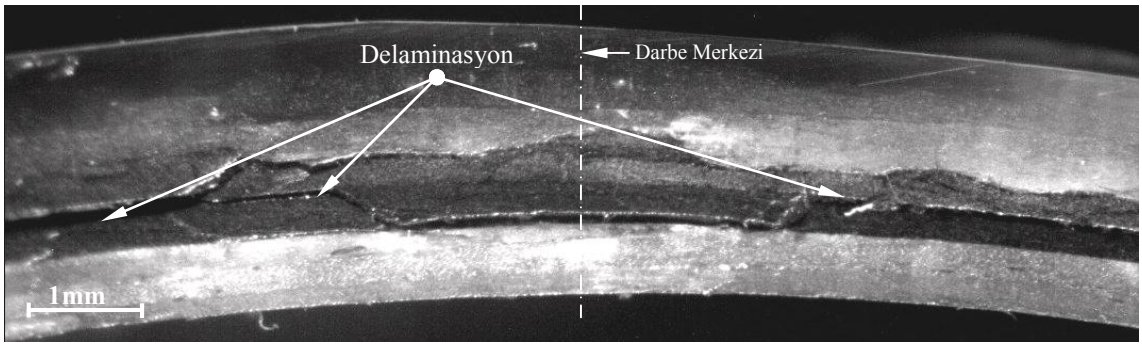
çatlakları şekilinde de oluşmuştur. Bu numunelerin iç yüzeyinde oluşan hasar alanı da diğerlerinde olduğu gibi dış yüzeyde oluşan alandan daha büyüktür. Bu teğetsel ön gerilme değerinde oluşan yoğun hasarlar özellikle darbe merkezinden ziyade, yer değiştirmenin (deplasmanın) fazla olmasından dolayı darbe merkezinin 1,5-2 cm çevresinde oluşmaktadır. Şekil 7.14a ve Şekil 7.14c'de hasar, dış yüzey matris çatlağı şeklinde oluşurken Şekil 7.14b ve Şekil 7.14d'de dış yüzey matris çatlaklarıyla beraber matris yarılması (splitting) şeklinde oluşmuştur. Şekil 7.14e'de hasarın, iç yüzey matris çatlağı şeklinde oluştuğu görülmektedir. Ön gerilmeli darbe esnasında söz konusu dış yüzey matris çatlaklardan terleme şeklinde sızıntı oluşmuştur. Bu çatlaklar statik patlatma ve yorulma deneylerinde sızıntı hasarının gelişiminde büyük rol oynayacaktır.



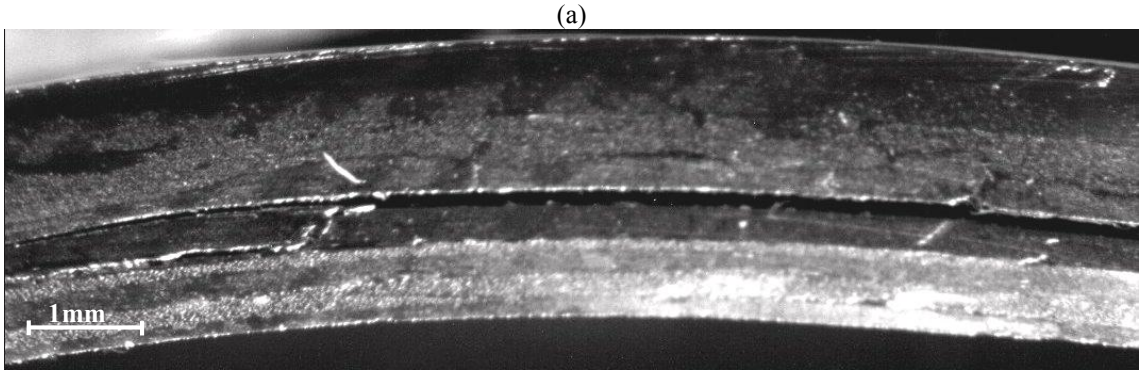
Şekil 7.14 Hibrit kompozit boruda 6 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası oluşan hasarlar, a-b) dış yüzey matris çatlakları c-d) dış yüzey matris çatlaklarının radyal kesit görünüşü e) iç yüzey matris çatlağının radyal kesit görünüşü

12 MPa teğetsel ön gerilme değeri için; Şekil 7.6b'de hasarlı numunenin dış ve iç hasar bölgesi incelendiğinde, darbe merkezinde oluşan ve bu bölgeyi saran delaminasyon alanı bariz olarak görülmektedir. Abrate (1998)'nin de rapor ettiği gibi, 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 delaminasyon alanları dikdörtgen veya yerfıstığı şeklindedir.

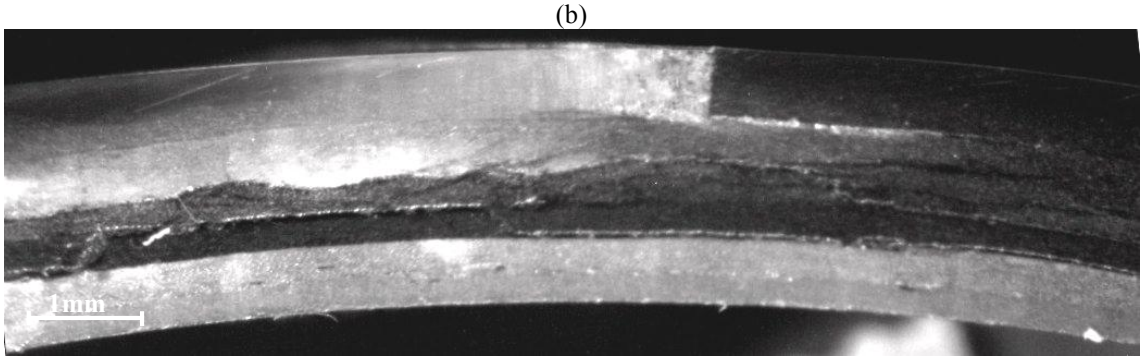
Şekil 7.15, 16, 17, 18 ve 19'da numune kesitinde oluşan hasarlar incelendiğinde numunelerin iç yüzeyinde oluşan hasar alanı ve hasar miktarı, dış yüzeyden daha büyüktür. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılan numunede oluşan hasar bölgesi, 18 MPa teğetsel ön gerilme değeri hasarından daha büyük, 6 MPa teğetsel ön gerilme değeri hasarından daha küçüktür.



(a)



(b)

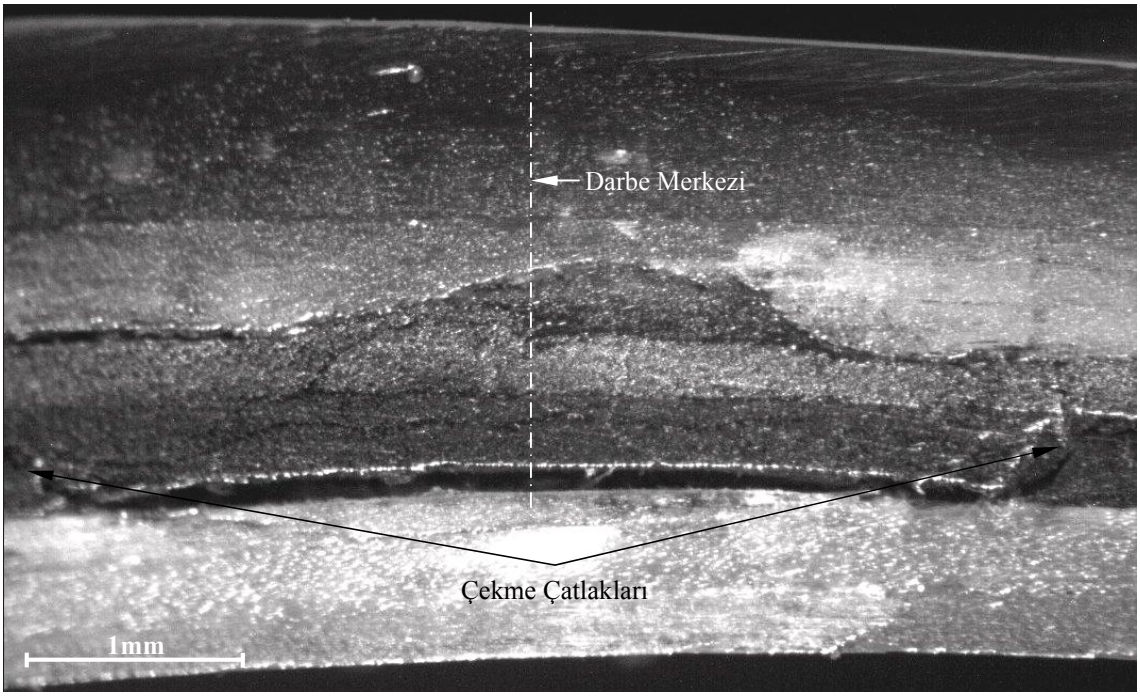


(c)

Şekil 7.15 Hibrit boruda 12 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası hasarın radyal kesit görünüşleri, a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan c) darbe merkezinin sağından

Farklı elyaf sarımaçılarına sahip tabakalar arasında eğilme rijitliği farklılık göstereceği için delaminasyon alanı, dış kısımda ±45° elyaf sarım doğrultusunda iç kısımda ±75° elyaf sarım doğrultusunda kısmen görülmekle bereber ±55° elyaf sarım açılı karbon tabakası içinde de artış gösterdiği Şekil 7.15a'da görülebilmektedir.

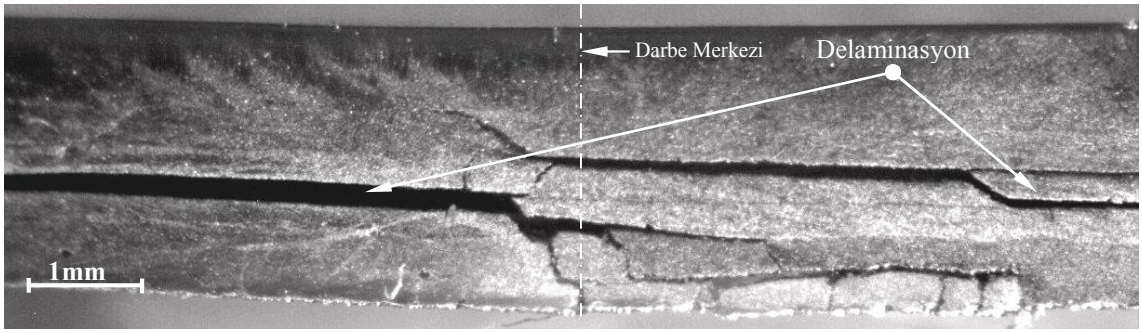
Şekil 7.16'da 6 MPa ön gerilme değerinde de oluştuğu gibi, darbe merkezinde darbe yüklemesi sırasında normal gerilmelerin karbon tabakasında radyal kayma mukavemetini aştığında oluşan çekme çatlakları görülmektedir.



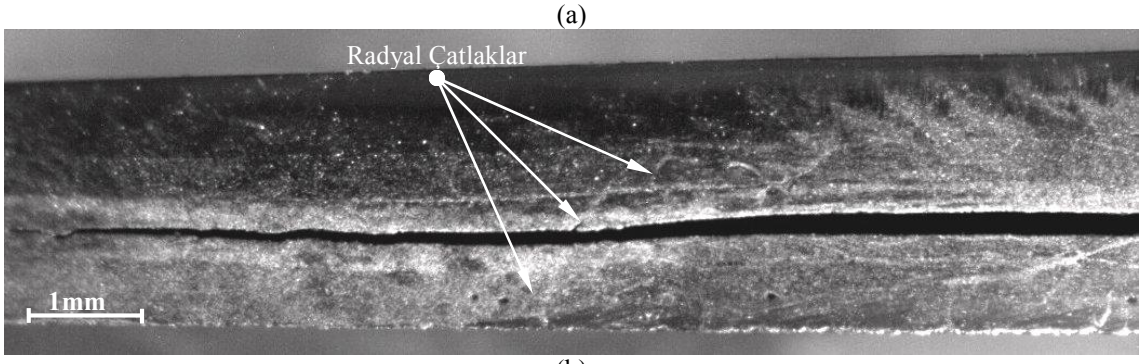
Şekil 7.16 12 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe merkezinde çekme çatlaklarının radyal kesit görünüşü

12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış hibrit kompozit numunede oluşan delaminasyon alanının, yoğun olarak karbon tabakası içinde oluşması bu numunede hasarın dış ve iç yüzeyden görülebilmesini engellemiştir. Oluşan hasarlar Şekil 7.15a radyal kesitte ve Şekil 7.17a eksenel kesitte net bir şekilde görülmektedir.

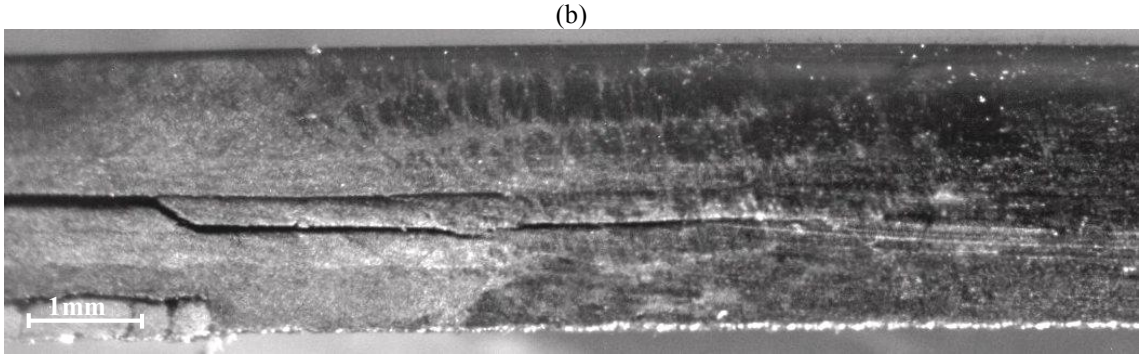
Numune kesitindeki hasar gelişimi, numunenin darbe esnasında serbest olarak eğilememesi nedeniyle, 6 MPa gerilme değerinde darbe hasarında da görüldüğü gibi çam ağacı şeklinde olmuştur. Şekil 7.17a ve Şekil 7.18 dikkatli incelendiğinde darbenin etkisi ile numunenin iç kısmında bulunan ±75° elyaf sarım açılı cam tabakalar arasında tabaka ayrılması ile beraber özellikle +75° cam tabakasında yoğun bir şekilde radyal matris çatlaklarının oluştuğu görülmektedir.



(a)

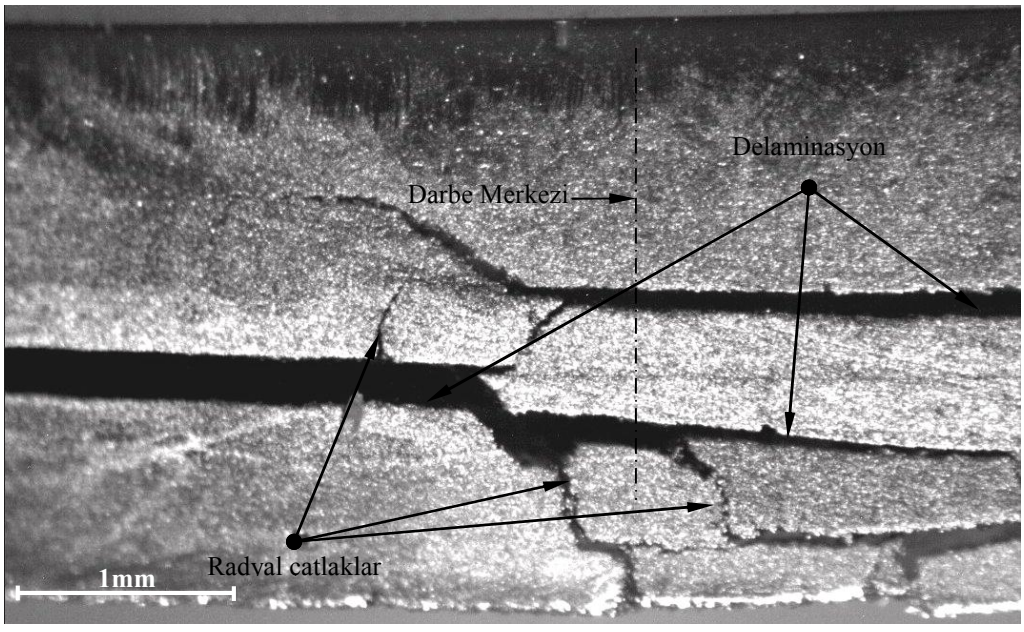


(b)



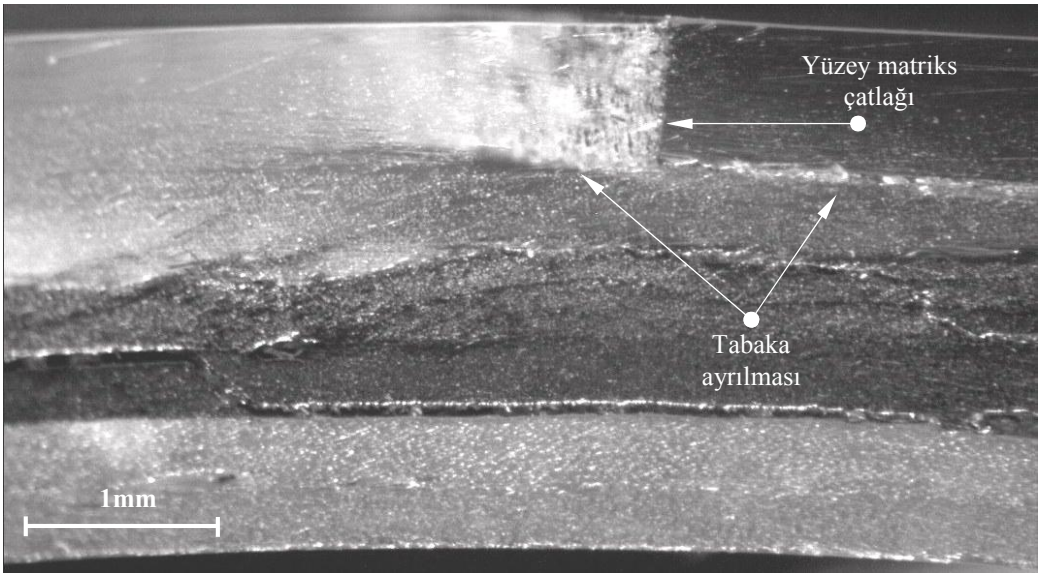
(c)

Şekil 7.17 Hibrit borunun 12 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası hasarın eksenel kesit görünüşleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan c) darbe merkezinin sağından



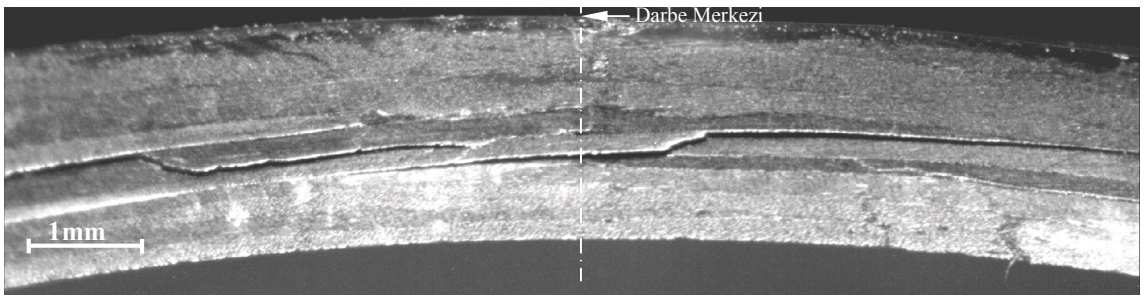
Şekil 7.18 12 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe merkezinde oluşan hasarların eksenel kesit görünüşü

Numunenin dış yüzey hasar bölgesinde Şekil 7.19'da ve Şekil 7.6b'de görüldüğü gibi dış yüzey matris çatlakları oluşmuştur. Çatlak yüzeyde matris bölgesinden başlayıp -45° sarım açılı cam tabakasından +45° cam tabakasına kadar ilerlemiş ve tabaka ayrılmasına sebep olmuştur. Oluşan çatlakları -45° cam elyaf sarım doğrultusuna diktir.



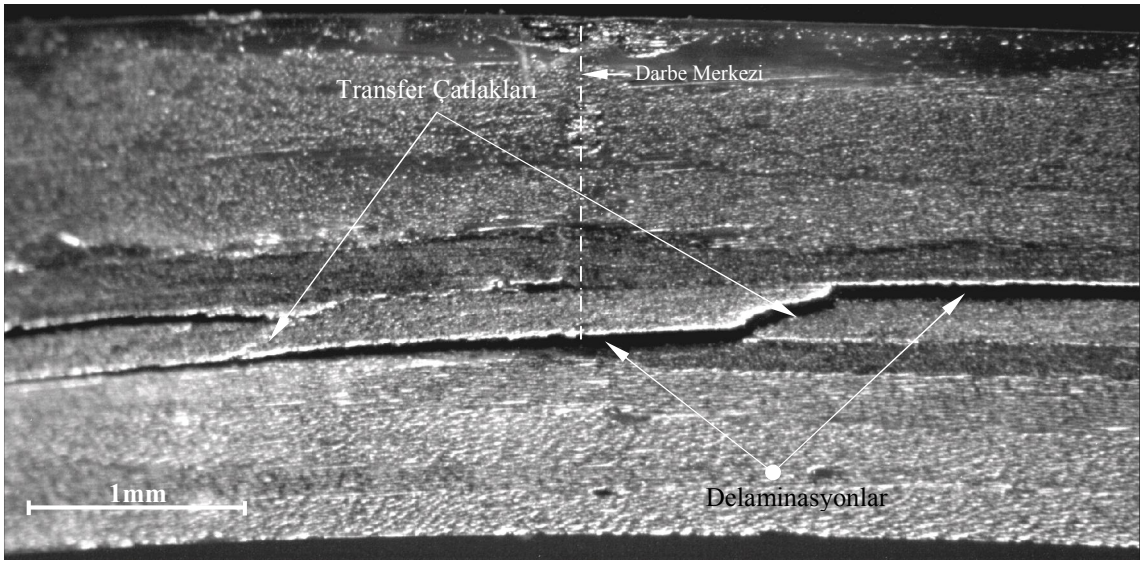
Şekil 7.19 12 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe sonrası oluşan dış yüzey matris çatlağının ve tabaka ayrılmasının radyal kesit görünüşü

18 MPa teğetsel ön gerilme değeri için; Şekil 7.20, 21, 22 ve 23'de numune kesitinin optik mikroskop altında elde edilen görüntüleri verilmiştir. Hasar bölgesi incelendiğinde, yüksek ön gerilme ile azalan çökmede radyal çatlaklarında çok az oluştuğu gözlenmiştir. Darbe hasarının darbe merkezinin etrafına doğru yoğunlaştığı numunenin kesit görüntüsünden anlaşılmaktadır.

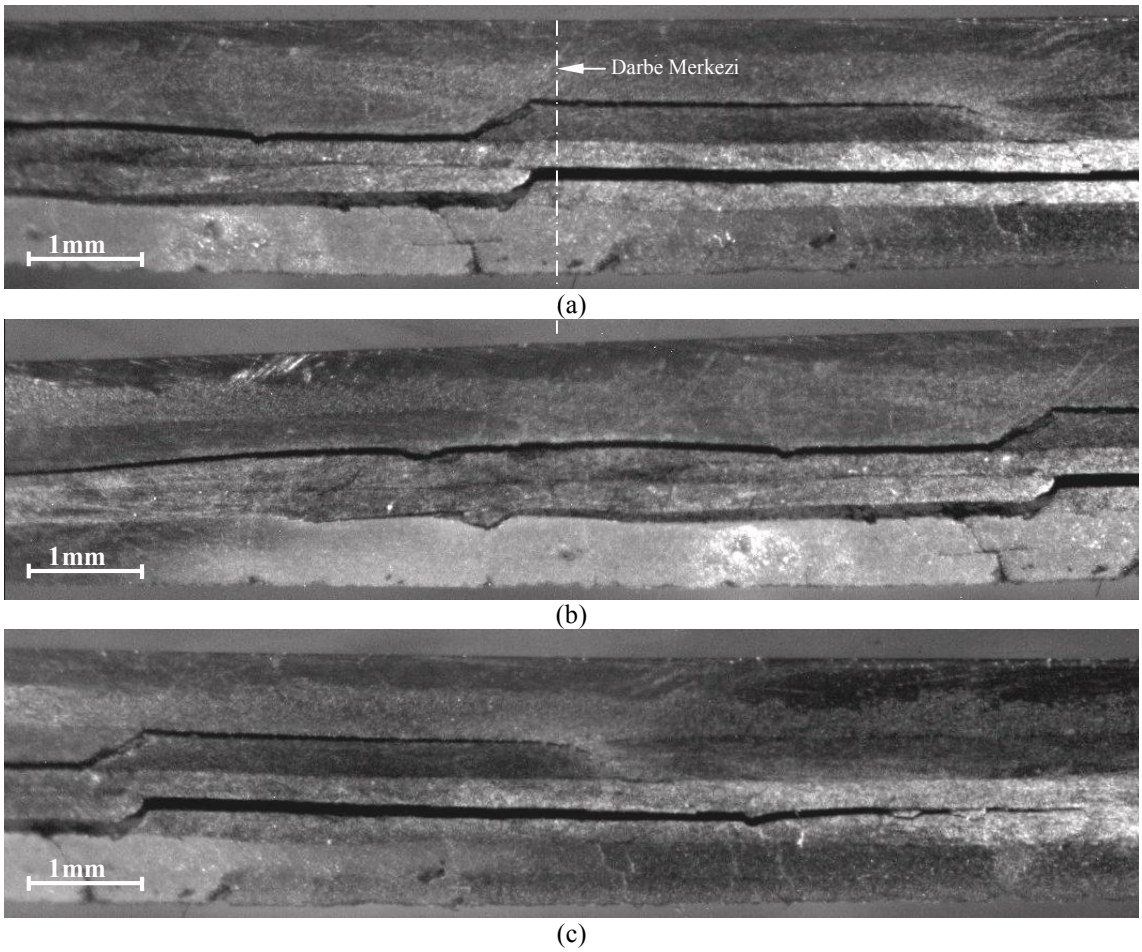


Şekil 7.20 Hibrit kompozit boru numunelerin 18 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası darbe merkezinin radyal kesit görünüşü

18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe neticesinde hasar bölgesinde oluşan delaminasyon ve transfer çatlakları Şekil 7.21'de radyal kesitte ve Şekil 7.23'de eksenel kesitte daha bariz bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.21 18 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe merkezinde transfer çatlaklarının ve delaminasyonların radyal kesit görünüşü

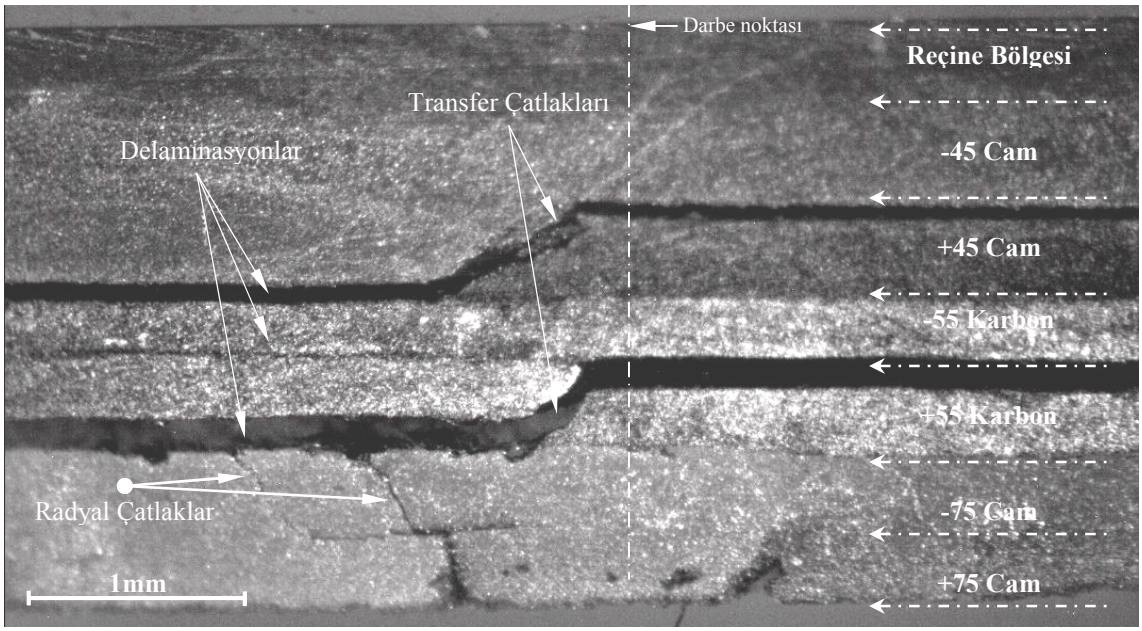


Şekil 7.22 Hibrit borunun 18 MPa teğetsel ön gerilme atında 20 J darbe enerjisi sonrası hasarın eksenel kesit görünüşleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan c) darbe merkezinin sağından

Hibrit kompozit borular ince cidarlı olmalarına rağmen uygulanan teğetsel ön gerilmenin artışından dolayı serbest bir şekilde eğilemediklerinden dış yüzey, iç yüzey ve radyal matris çatlaklarından ziyade sadece tranfer çatlağı ve tabaka ayrılmasına

doğru yöneldiği anlaşılmaktadır. Dış yüzey ve iç yüzey matris çatlaklarının oluşmaması ve radyal matris çatlaklarının az oluşu, özellikle yorulma deneylerinde sızıntı hasarının geç oluşmasına sebep olacaktır.

Şekil 7.23'te darbe merkezinde oluşan hasarlar görülmektedir. Darbe öncesi uygulanan ön gerilmenin yüksek olmasından dolayı oluşan hasarlar, ağırlıklı olarak delaminasyon hasarı şekilde görülmüştür. Delaminasyonlar tabakalar arasında yön değiştirmeden lineer şekilde ilerlemiştir. Ayrıca ön gerilme değerinin yüksek oluşu transfer çatlaklarının darbe merkezinde oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 7.23 18 MPa teğetsel ön gerilme atında darbe merkezinin eksenel kesit görünüşü

Her üç ön gerilme değerinde oluşan hasarlar genel olarak dikkate alındığında; darbe öncesinde uygulanan ön gerilme değeri arttıkça darbe hasarlarının azaldığı görülmektedir. Farklı sarım açılarından ve tabakalar arasındaki eğilme rijitlik farklılığından kaynaklı oluşan darbe ön hasarlarının, düşük ön gerilme değerlerinde daha etkin olduğu anlaşılmıştır. 6 MPa ön gerilme değerinde, iç ve dış yüzey matris çatlakları, radyal çatlaklar, trasfer çatlakları, çekme çatlakları ve delaminasyonlar yoğun olarak görülmüştür. Ön gerilme değeri attıkça, hibrit kompozit boru daha rijit hale gelmiş ve darbe esnasında oluşan yer değiştirme (çökme) miktarı azalmıştır. Yer değiştirme miktarının azalmasıyla; dış ve iç yüzey matris çatlaklarının oluşmadığı, radyal çatlaklarının bariz bir şekilde azaldığı, transfer çatlaklarının darbe merkezinde yoğunlaştığı, delaminasyon alanlarının azaldığı ve delaminasyonların tabakalar arasında yön değiştirmeden lineer şekilde ilerlediği tespit edilmiştir.

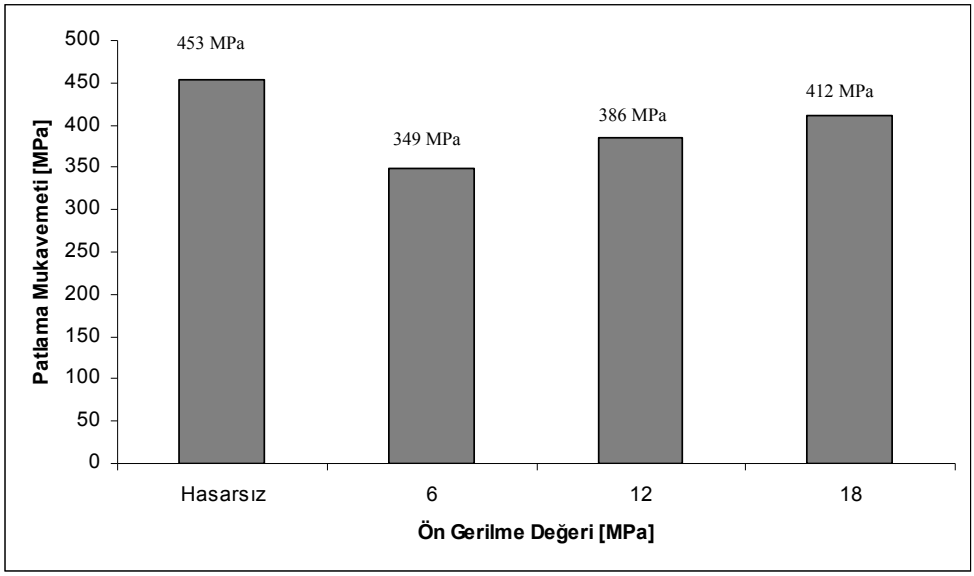
7.4. Darbe Ön Hasarlı Hibrit Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları

Hibrit kompozit boru numunelerine farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde belli bir enerji seviyesinde darbe yüklemesi yapıldıktan sonra hasarlı borular statik iç basınç patlama testine tabi tutulmuştur. Statik iç basınç patlama testleri; hibrit boru numunelerine darbe ön hasarı oluşturulduktan sonra, statik patlama esnasında meydana gelen hasarları tespit etmek ve kalan patlama mukavemetini elde etmek amacıyla yapılmıştır. Statik iç basınç testi öncelikle hasarsız numuneler için gerçekleştirilmiş ve hasarsız numunenin teğetsel patlama mukavemeti tespit edilmiştir. Daha sonra sırasıyla 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin statik iç basınç patlama testleri ile kalan patlama mukavametleri tespit edilmiştir. Deneyler ASTM D 1599-99 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ulaşılan en büyük basınç değeri o numuneye ait patlama basıncı olarak belirlenmiş ve bu değer kalan teğetsel patlama mukavemeti olarak hesaplanmıştır. Hibrit borularda statik iç basınç patlama testi esnasında oluşan hasar mekanizmaları ve düşük hızlı darbe hasarının bu mekanizmalara etkisi incelenerek değerlendirilmiştir. Hibrit kompozit borularda; düşük hızlı darbe yapılarak oluşturulan darbe ön hasarının, statik iç basınç patlama testi esnasındaki gelişimi gözlemlenmiştir.

7.4.1. Darbe ön hasarlı borularda ön gerilme - patlama mukavemet ilişkisi

Düşük hızlı darbe testleri öncesinde, hibrit kompozit boru numunelerine uygulanan teğetsel ön gerilme miktarının azalması, yer değiştirme (çökme) miktarının artmasına neden olmuştur. Artan yer değiştirme miktarı, oluşan darbe ön hasar miktarının artmasına ve kalan patlama mukavemetinin düşük çıkmasına sebep olmuştur.

Statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen kalan patlama mukavemetleri Şekil 7.24'de verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi darbe deneylerinden önce uygulanan teğetsel ön gerilme değeri azaldıkça deney numunelerinin statik iç basınç patlama mukavemetlerinde düşme meydana gelmiştir. Bunun en önemli nedeni teğetsel ön gerilme azaldıkça numunede meydana gelen hasarların artmasıdır. Hasarların artışının başlıca sebebi ön gerilmenin azalması ile numunenin darbe merkezi ve çevresinde yer değiştirmenin (çökmenin) artmasıdır. Yani, hibrit kompozit borularda hasar gelişimi yer değiştirme (çökme) kontrollüdür.



Şekil 7.24 Hasarsız ve farklı teğetsel ön gerilme uygulanmış hibrit kompozit boru numunelerinde 20 J darbe enerji seviyesi için elde edilen statik iç basınç patlama mukavemet değerleri

Darbeye maruz kalmış deney numunesinde oluşan hasarların artması patlama mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. 20 J darbe enerjisiyle 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin patlama mukavemetinde yaklaşık olarak %9'lik bir azalma meydana gelmiştir. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin patlama mukavemetinde yaklaşık olarak %15'lik bir azalma oluşurken, 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin patlama mukavemetinde yaklaşık olarak %23'lük bir azalma meydana gelmiştir. Darbe deneyleri esnasında numunelerin ön gerilme etkisinde olmasına rağmen özellikle düşük ön gerilme seviyelerinde darbe sonrasında numunelerde çökmeden dolayı elyaf hasarları meydana gelmiştir. Uygulanan teğetsel ön gerilme değerindeki artış, numunenin dıştan uygulanan yüklere karşı daha az şekil değiştirmesine ve elyaf hasarlarının daha az oluşmasına sebep olmuştur. Bu durum patlama basıncındaki düşmenin çok daha büyük olmasını engellemiştir. Patlama mukavemet değerinin azalmasında etkili olan hasar mekanizmalarının birisi de delaminasyondur. İlaveten numune kesitinde darbe sonrası oluşan matris iç yüzey ve dış yüzey çatlaklarıyla beraber radyal matris çatlaklarıda patlama basıncının düşmesinde etkili olmuştur. Darbe esnasında teğetsel ön gerilme değeri azaldıkça delaminasyon alanı ve matris çatlaklar artmaktadır. Çökme oranına bağlı olan bu artış, hibrit numunenin patlama mukavemet değerinin düşmesine neden olmaktadır.

Statik iç basınç patlama testi esnasında, iç basıncın yükselmesiyle beraber tabaka içlerinde oluşan radyal çatlaklar büyümekte ve basınçlı yağ bu çatlaklardan delaminasyon alanına ilerlemektedir. Bu durumda darbe hasarlı numunelerde, basınçlı yağın dış yüzey matris çatlaklarına ulaşması hızlanmakta ve sonuç hasarlarının oluşumu daha düşük basınçlarda gerçekleşmektedir. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisi ile hasarlanmış numunede bu tür çatlaklar çok daha azdır ve patlama mukavemetindeki azalma diğerlerine göre çok daha düşüktür. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde ise numunede çok fazla iç yüzey, dış yüzey matris çatlakları ile radyal çatlak ve delaminasyon meydana getirdiği için numunenin patlama basıncındaki düşme diğerlerine göre çok daha fazla olmuştur.

7.4.2. Hasarsız ve darbe ön hasarlı boruların patlama hasar analizi

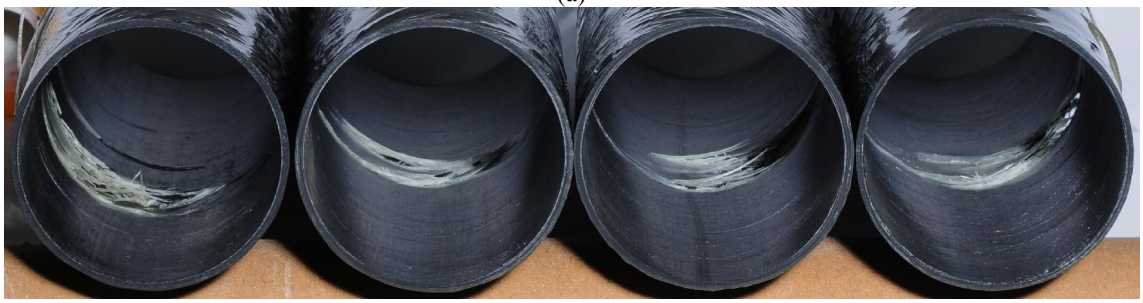
Statik iç basınç patlama deneyleri esnasında üç önemli hasar aşaması tespit edilmiştir. Bu hasar aşamaları sırasıyla; sızıntı başlangıcı (terleme veya damlacık), su jeti oluşumu ve sonuç hasarıdır. Hibrit borularda; beyazlaşma başlangıcı ve yoğun beyazlaşma numune genelinde görülmemiştir. Bunun sebebi ±75°sarımlı cam tabakasının şekil değişimini belli bir noktadan sonra sınırlandırmasıdır. Statik iç basınç patlama deneyinde iç basıncın etkisiyle elyaflar radyal 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 mikro çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Tabakalı kompozit malzemede farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebeplerinden birisi de tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığıdır.

Özellikle darbe ön hasarlı numunelere uygulanan gerilme değeri arttıkça darbe bölgesinde bulunan tabakalar arası matris çatlakları ilerlemiş ve numunede terleme veya damlama şeklinde ilk sızıntı gerçekleşerek ilk hasar aşaması ortaya çıkmıştır. İç basıncın artmaya devam etmesi nedeniyle numunede meydana gelen sızıntı su jetine dönüşerek ikinci hasar aşamasının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kısa bir süre sonra yoğun su jeti gerçekleşmiş ve sonrasında infilak ederek elyaf kopması şeklinde kompozit numunede son hasar meydana gelmiştir.

Şekil 7.25'de sırasıyla; hasarsız, 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilmede 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen sonuç hasar fotoğrafları görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.25 Hibrit kompozit boruların statik iç basınç testi sonucu sırasıyla; darbe hasarsız ve 6, 12, 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerde oluşan sonuç hasarının, a) dış ve b) iç görünüşleri

Sonuç hasar deney numunelerinin fotoğrafları stüdyo ortamında yüksek çözünürlükte çekilmiştir. Böylece numunelerde meydana gelen sonuç hasarları çok daha net olarak görüntülenmiştir.

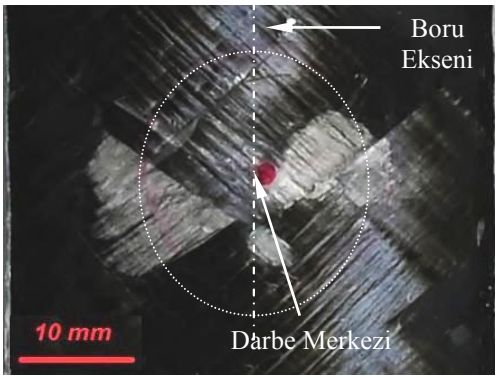
Statik iç basınç patlama deneylerinde; hibrit kompozit boru numunelerinde meydana gelen beyazlaşmanın çok az olduğu, özellikle darbe merkezine yakın patlama bölgelerinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Bunun sebebi ±75° cam tabakasının hibrit boruda oluşan şekil değişimini kısıtlamasıdır. Statik iç basınç patlama deneylerinde numunelerde meydana gelen hasar gelişimi değerlendirilirken bu durumun dikkate alınması önemlidir.

Hasarsız hibrit kompozit deney numunelerinde; statik iç basınç patlama testi esnasında uygulanan iç basıncın etkisiyle gerilme değerleri artmaya devam etmiş ve 175 MPa ila 204 MPa gerilme değeri civarında numunede boru ekseni doğrultusunda ±45° cam tabakasında yüzey matris çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Numuneye uygulanan gerilme değeri arttırıldıkça numunede tabakalar arası matris çatlamaları oluşmaya başlamış ve 263 MPa gerilme değerinden sonra şiddetli şeklinde sesler gelmiştir. 321 MPa gerilme değerinden sonra numune geometrisinde herhangi bir değişiklik olmaz iken ara ara çatlama sesleri gelmeye devam etmiştir. Numunede herhangi bir eğilme veya sehim gerçekleşmemiştir. 453 MPa gerilme değerine ulaşıldığında numunede özellikle karbon tabakasında bulunan elyafların kopması sonucunda deney numunesi infilak ederek büyük bir gürültüyle patlamıştır. Patlamanın etkisiyle numunede yarılma meydana gelmiş ve sonuç hasar oluşumu gerçekleşmiştir.

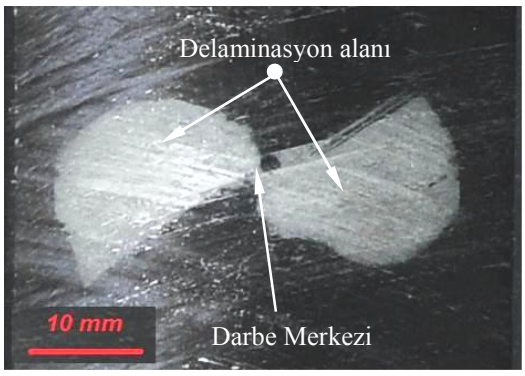
Hasarsız deney numunesinin statik iç basınç patlama deneyinde sızıntı başlangıcı ve su jeti oluşumu gözlenmemiştir. Şekil 7.25a'da darbe hasarsız numunenin statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen sonuç hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğrafta numunede oluşan delaminasyonlar net olarak görülmektedir. Sonuç hasarın oluştuğu patlama bölgesi incelendiğinde elyafların matristen ayrıldıktan sonra koptuğu, borunun yarılarak açıldığı ve karbon tabakasının bir bütün olarak ayrıldığı görülmektedir. Bu durumdan, hasarsız numunelerde sonuç hasarının oluşumunun karbon tabakası kontrollü gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Serbest uçlu iç basınç altındaki borularda en büyük gerilme teğetsel yönde oluşmaktadır.

Bu nedenle boruda meydana gelen yarılmanın teğetsel yönde başladığı ve elyaf sarım yönünde ilerlediği görülmektedir.

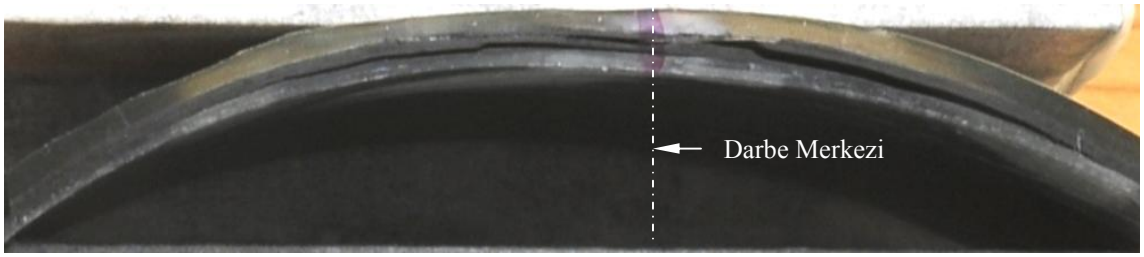
18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış hibrit boruların darbe bölgesinde Şekil 7.26a'da görüldüğü gibi elyaf doğrultusunda küçük bir delaminasyon alanı mevcuttur. Bölüm 7.3.7'de bahsedildiği gibi kesit görüntüsü incelemelerinde radyal çatlakların çok az olduğu tespit edilmiştir. Hasarlı numune statik iç basınç patlama testine maruz bırakıldığında numunede oluşan darbe ön hasarının patlama mukavemetinde düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir.



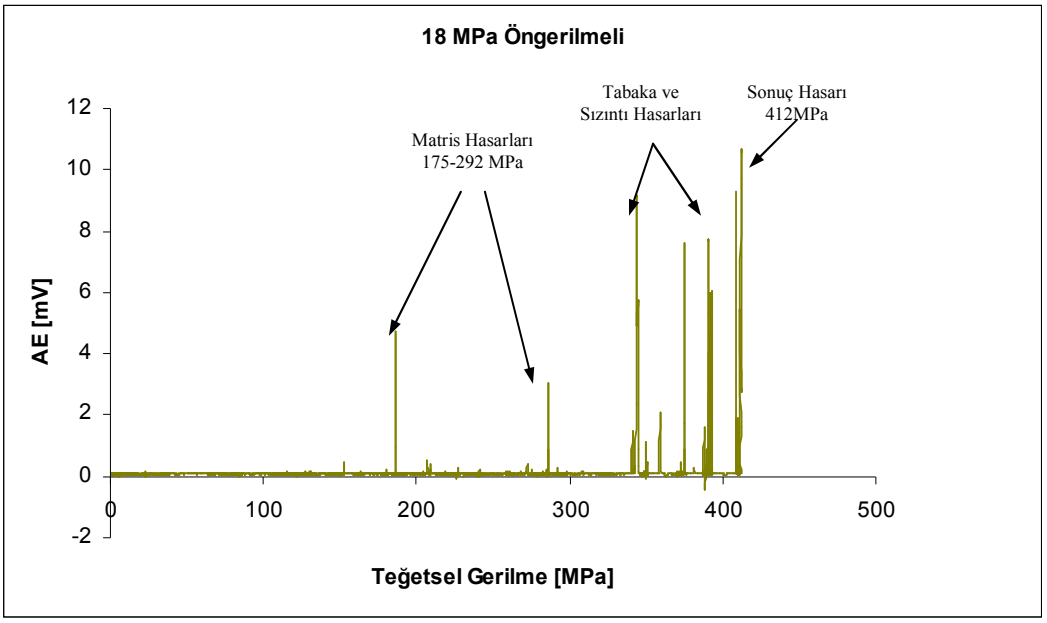
(a)



(b)



(c)

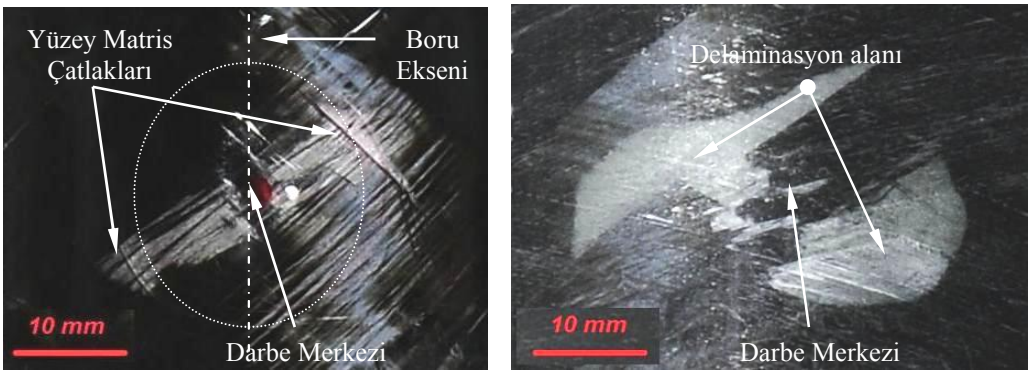


(d)

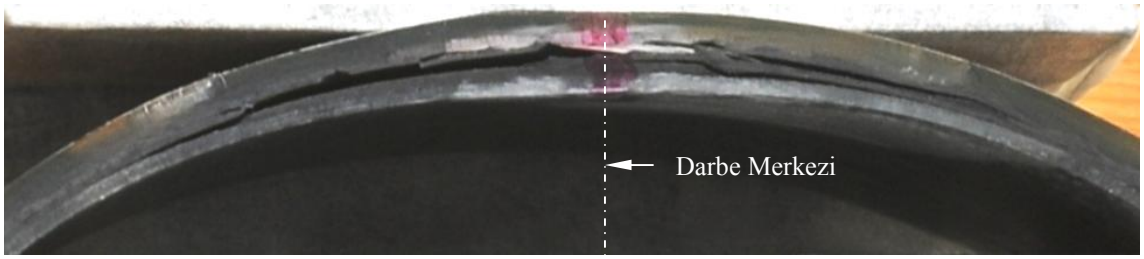
Şekil 7.26 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin a) dış ve b) iç görünüşü, c) radyal kesit görünüşü d) patlama esnasındaki akustik veri-gerilme değişimleri

Numunedeki darbe hasarının, hasar gelişimine de etkisi olmuştur. Statik iç basınç patlama testi esnasında iç basıncın artmaya başlamasıyla elyafların teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışması, farklı sarım açılarına sahip elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda oluşan kayma ve basma gerilmelerini arttırmaya başlamıştır. Bu durum darbe hasar bölgesinde hasarın gelişimini hızlandırmıştır. Deney esnasında gözlemlenen makro hasarlardan ve Şekil 7.26d'de akustik veri-gerilme değişim grafiğinden de anlaşıdığı gibi 175 MPa ve 292 MPa gerilme aralığında numuneden matris çatlama sesleri geldiği tesbit edilmiştir. Uygulanan gerilme değeri 350 MPa'ya ulaştığında darbe bölgesinde, darbe hasarından kaynaklanan tabaka hasarlarının ilerlemesi ile terleme şeklinde sızıntı oluşmaya başlamış ve boru yüzeyini ıslatmıştır. Wang ve diğ. (1997), kompozit boruların sızıntı hasar başlangıcının yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir. Basıncın artmasıyla numunede oluşan sızıntı da artmaktadır. Uygulanan gerilme değeri 412 MPa olduğunda deney numunesi darbe hasarlı bölgeden infilak ederek patlamış ve sonuç hasarı oluşmuştur. Bu deney numunesinde de hasarsız numunede olduğu gibi yoğun su jeti oluşumu gözlenmemiştir. Bu hasarlı numunede statik iç basınç testindeki hasar gelişimi darbe ön hasarsız numuneye benzemektedir. Darbe ön hasarından dolayı patlama mukavemetinde bir miktar düşme olmuştur. Şekil 7.25a'da 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen son hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde numunede oluşan delaminasyonlar ve darbe ön hasarlı bölgeden elyafların koparak borunun yarıldığı görülmektedir. Hasarsız numunede olduğu gibi karbon tabakası kabuk şeklinde ayrılmıştır. Sonuç hasarının oluşumunu karbon tabakasının hasara uğraması belirlemiştir.

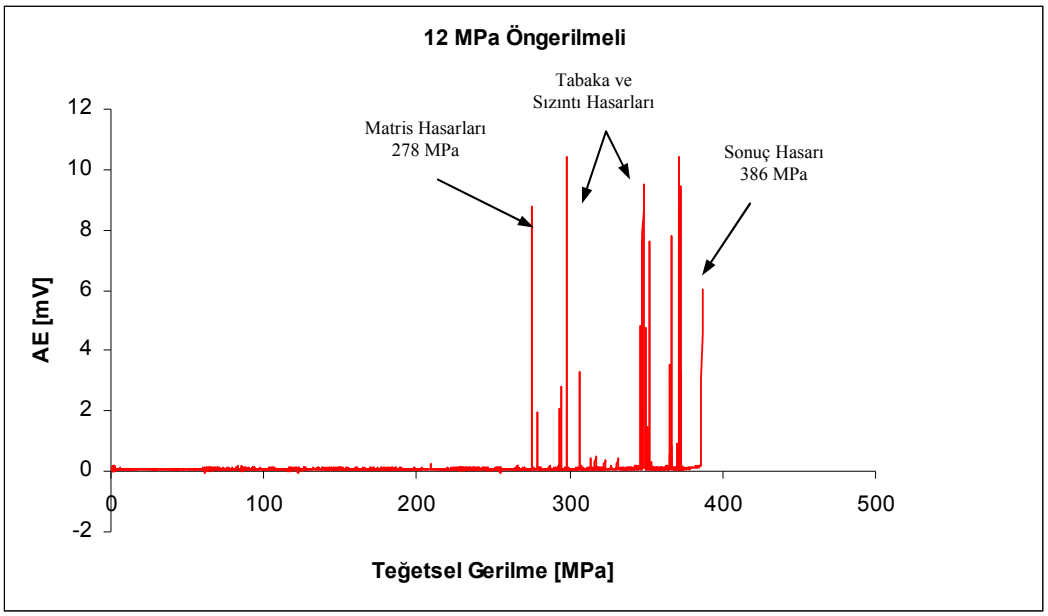
12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde Şekil 7.27'de görüldüğü gibi ±45° dış ve ±75° iç kısımda elyaf sarım doğrultusunda delaminasyon alanı ve yüzeyde matris çatlakları mevcuttur. Ayrıca Bölüm 7.3.7'de bahsedildiği gibi numune kesitinde radyal çatlaklar oluşmuştur. Statik iç basınç patlama testinde numunedeki darbe ön hasarının patlama mukavemetinde bariz bir düşmeye neden olduğu tespit edilmiştir. Numunedeki darbe ön hasarı statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimi üzerinde de önemli ölçüde etkili olmuştur. Statik iç basınç patlama testine başlandığında numuneye uygulanan gerilme değerinin artmasıyla boruda belli açılarda sarılan elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmış ve buna bağlı olarak numunenin çapı artmaya, boyu ise kısalmaya başlamıştır.



(a) (b)



(c)



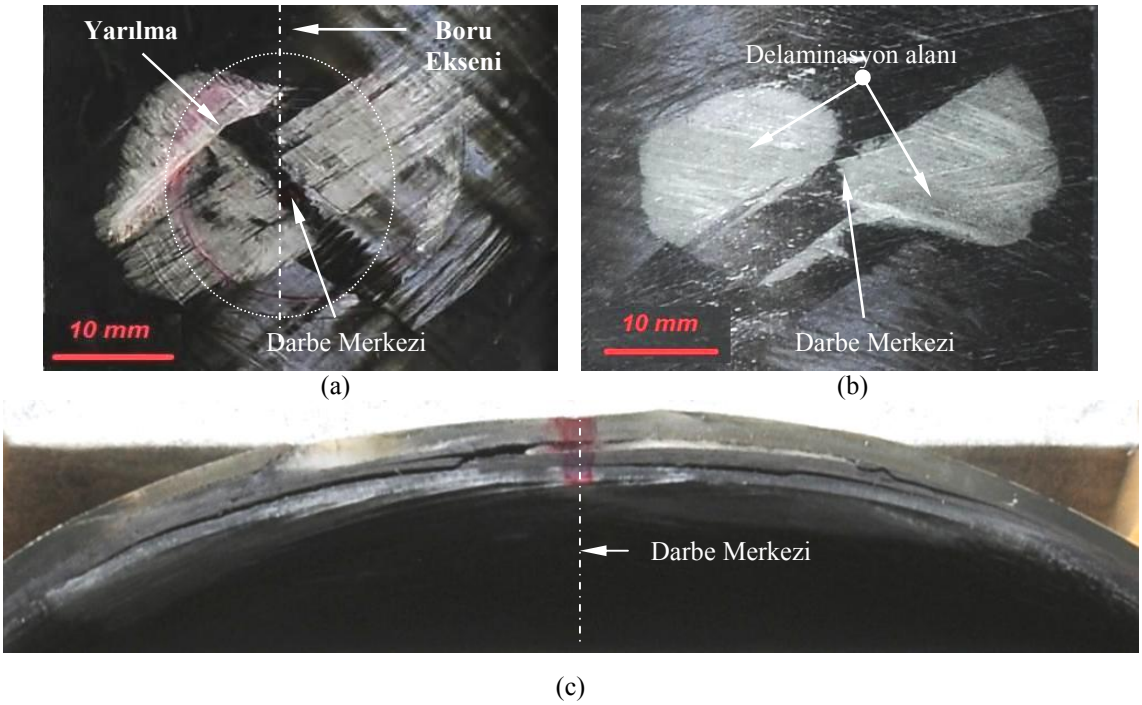
(d)

Şekil 7.27 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin a) dış ve b) iç görünüşü, c) radyal kesit görünüşü d) patlama esnasındaki akustik veri-gerilme değişimleri

Numunenin farklı elyaf doğrultularının kesiştiği noktalarda meydana gelen gerilmeler çaptaki ve boydaki değişimde etkili olmuştur. 220 MPa ve 278 MPa gerilme aralığında yüzey matris çatlaklarında terleme şeklinde sızıntı oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan sızıntının en önemli sebebi numune kesitinde düşük hızlı darbe neticesinde oluşan iç ve dış yüzey matris çatlaklarıyla beraber tabaka ayrılmaları ve tabakalar içinde oluşan radyal çatlaklardır. İç basıncın etkisiyle bu çatlaklar ilerlemiş ve basınçlı yağ

delaminasyon bölgesine dolarak dış yüzeye doğru yükselmiştir. Yüzeyde bulunan matris çatlaklarına ulaşan basınçlı yağ buradan sızmaya başlamıştır. Deney esnasında gözlemlenen makro hasarlardan ve Şekil 7.27d'de akustik veri-gerilme değişim grafiğindende anlaşıdığı gibi gerilme değeri 278 MPa civarına ulaştığında numunede matris çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Numunede matris çatlak seslerinin başlaması kompozit numunede darbe hasarının haricinde, başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe yüklemesinden kaynaklanan tabaka hasarlarının artmaya başladığı ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının oluştuğunu işaret etmektedir. Basıncın artmaya devam etmesi neticesinde numunede oluşan tabaka hasarının ilerlemesi ile sızıntıda artmaya devam etmiş ve damlacık şekline dönüşmüştür. Maksimum mukvemet değerine yakın gerilme değerinde sızıntı su jetine dönüşmüştür. 386 MPa gerilme değeri aralığında numunede darbe merkezinden infilak etme şeklinde bir patlama ile sonuç hasarı meydana gelmiştir. Şekil 7.25a'da 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama testi neticesinde elde edilen sonuç hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde numunede oluşan delaminasyonlar ve elyaf kopmalarının darbe hasarlı bölgeye doğru yoğunlaştığı görülmektedir.

6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde; 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış borunun darbe bölgesinde Şekil 7.28'de görüldüğü gibi elyaf doğrultusunda 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinden daha büyük bir delaminasyon alanı mevcuttur. Şekil 7.28a'da görüldüğü gibi darbe merkezi çevresinde oluşan dairesel yüzey matris çatlaklarıyla beraber yüzeyde yarılma şeklinde büyük matris çatlakları oluşmuştur. İlaveten Bölüm 7.3.7'de bahsedildiği gibi numune kesitinde tüm tabakaların içinde radyal çatlakları oluşmuştur. Bu çatlaklar 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış numuneden çok daha fazladır. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış numunenin statik iç basınç patlama testinden elde edilen sonuçlara göre numunedeki darbe hasarı maksimum mukavemet değerinde ciddi bir düşmeye sebep olmuştur. Bu gerilme değerinde deney numunesinde oluşturulan hasar statik iç basınç patlama testindeki hasar gelişimine de önemli bir etki yapmıştır. Statik iç basınç patlama testine maruz bırakılan darbe ön hasarlı numunede, uygulanan iç basıncın artmasıyla borunun 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde olduğu gibi elyaf açıları teğetsel doğrultuya yönelmeye çalıştığı için numune çapı artmaya ve boyu kısalmaya başlamıştır.



Şekil 7.28 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin a) dış ve b) iç görünüşü, c) radyal kesit görünüşü d) patlama esnasındaki akustik veri-gerilme değişimleri

İç basınç yüklemesinden kısa bir süre sonra yüzey matris çatlaklarıyla beraber yüzeyde yarılma şeklinde büyük matris çatlaklarından terleme olmaksızın damlama şeklinde sızıntı oluşmaya başladığı görüldü. Bundan önceki deneylerde olduğu gibi Şekil 7.28d'de akustik veri-gerilme değişim grafiğinden de anlaşıldığı üzere 175 MPa ila 248 MPa gerilme aralığında hasarlı numuneden matris çatlama sesleri gelmeye başlamıştır. Matris çatlama seslerinin başlaması; öncekilerde olduğu gibi kompozit numunede darbe hasarının haricinde başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe hasarından kaynaklanan delaminasyonların artmasını ve elyaf doğrultusunda mikro

çatlakların oluştuğunu göstermektedir. Basıncın artmaya devam etmesiyle 329 MPa gerilme değerinde darbe bölgesinden tabaka hasarı ile birlikte damlama şeklinde sızıntı oluşmuştur. Bu sızıntı hasarı ilerleyen gerilme değerlerinde su jeti şeklinde sızıntıya dönüşmüştür. 349 MPa gerilme değerinde yoğun su jeti oluşmaksızın infilak ederek sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Şekil 7.25-a'da 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun statik iç basınç patlama deneyi sonucunda elde edilen sonuç hasar fotoğrafı verilmiştir. Tabakalar arası çatlak miktarının, tabaka ayrılmalarının ve matris yüzey çatlaklarının fazla olması sebebiyle sonuç hasara ulaşma daha düşük gerilme değerinde gerçekleşmiştir. Şekil 7.28'de hasar fotoğrafları incelendiğinde numunede oluşan delaminasyonlar ve matris dış ve iç yüzey çatlaklarının diğer teğetsel ön gerilme değerlerine göre daha çok olduğu görülmektedir.

Şekil 7.25a'da 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların iç basınç patlama deneyi sonucunda elde edilen son hasar fotoğraflarına makro boyutta bakıldığında düşük teğetsel ön gerilme değerlerinde hasarlandırılan hibrit borularda hasar tahribatı daha küçük oluşurken yüksek teğetsel ön gerilme seviyelerinde tahribat daha büyük gerçekleşmiştir. Düşük teğetsel ön gerilme seviyelerinde darbe merkezi etrafında yoğunlaşan darbe ön hasarının daha fazla olması; sonuç hasarının yüksek teğetsel ön gerilmelerde oluşan sonuç hasarlara göre daha küçük olmasına sebep olmuştur.

Bu çalışmada; hibritasyonun ve farklı açılarda elyaf konfigürasyonuna sahip tabakaların, statik iç basınç patlama mukavemetine ve yorulma ömrüne etkisinin araştırılması için ön çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar; literatürde benzer yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Kara (2012, 2014) dışında kompozit burulara yapılan düşük hızlı darbe deneylerinde, darbe öncesi herhangi bir iç basınç veya ön gerilme uygulanmadığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar aşağıda Çizelge 7.3'de özet halinde verilmiştir. Her iki çalışmada kullanılan numuneler 300 mm boyunda ve altı tabakaya sahiptir. Kullanılan düşük hızlı darbe test cihazı aynı özelliktedir. Kara (2012, 2014) yaptığı çalışmalarda, $(\pm 55°)_3$ sarım açısına sahip E-cam/epoksi numuneler kullanmıştır. Her iki çalışmada kullanılan filaman sarım kompozit borular İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. tarafından üretilmiştir. Kompozit borularda kullanılan cam elyaf malzemesi 17 µm çapında Vetrotex 1200 teks E camı dır. Matris malzemesi ise Momentive, Bisphonel A, Epikote 828 kullanılmıştır.

Çizelge 7.3'de verilen sonuçlar incelendiğinde, her iki çalışmada da 32 bar iç basınç (ön gerilme) değerinde, farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Kara (2012, 2014)'nın yaptığı çalışmada 5, 10 ve 15 J enerjili düşük hızlı

darbe deneylerinde hasarlandırılan numuneler, iç basınç patlatma testlerine tabi tutulmuştur. Gning (2004)'de rapor ettiği gibi, Kara (2012) yaptığı çalışmasında da uygulanan darbe enerjisi çok küçük değerlerde olsa bile patlama mukavemetinde düşme meydana geldiğini tespit etmiştir. Her bir enerji seviyesinde hasarlanan numuneler darbe noktasından hasara uğramış ve patlama mukavemetlerinde düşme meydana gelmiştir. Mevcut çalışmada ise Kara (2012, 2014)'dan farklı olarak, karbon takviyesi ile cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açılı 6 tabakalı hibrit kompozit borular kullanılmıştır. 32 bar iç basınç (ön gerilme) değerinde 10 ve 15 J enerjili düşük hızlı darbe deneylerinde hasarlandırılan numuneler ile hasarsız numuneler, iç basınç patlatma testlerine tabi tutulmuştur. Darbe hasarlı numunelerde sonuç hasarı darbe noktasından farklı yerlerde meydana gelmiş ve patlama mukavemetlerinde düşme meydana gelmemiştir. Darbe hasarlı borular, yüksek rijitlik ve yüksek ön gerilme değerlerinden dolayı hasarsız borular gibi davranmıştır. Bu çalışmada; hibritasyon ve farklı açılarda elyaf konfigürasyonu ile düşük hızlı darbe ve yorulma yüklerine karşı dirençli hibrid kompozit borular üretilmiştir.

Çizelge 7.3 Aynı teğetsel ön gerilme değerlerinde farklı darbe enerjileri ile hasarlandırılmış kompozit boruların iç basınç patlatma test sonuçlarının literatür karşılaştırması

Yapılan Çalışmalar		**Kara 2012, 2014**		**Mevcut Çalışma**	
SS	Malzeme sırası	Cam/Cam/Cam		Cam/Karbon/Cam	
θ	Elyaf sarım açısı	$(\pm 55°)_3$		$\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$	
σ_{HS}	Teğetsel hasar gerilmesi	428 MPa		453 MPa	
ν_y	Poisson oranı	0,525		0,453	
E_y	Elastiside modülü	20,48 GPa		22,48 GPa	
V_f	Elyaf hacim oranı	0,50		0,41	
P_{max}	Patlatma basıncı	Hasarsız	282 Bar	Hasarsız	310 Bar
P_{kal}	Darbe sonrası patlatma basınçları	5 J	260 Bar	-	-
		10 J	221 Bar	10 J*	310 Bar
		15 J	195 Bar	15 J*	310 Bar
$P_{iç}$	Darbe öncesi uygulanan iç basınç (ön gerilme)	32 Bar (48 MPa)		32 Bar (48 MPa)	

** Darbe hasarlı hibrit numuneler darbe noktasından farklı yerlerden hasar göstermiştir.*

Bu borularda; düşük hızlı darbenin ve yorulmanın etkisini inceleyebilmek için düşük hızlı darbe deneyleri, farklı iç basınç (ön gerilme) değerlerinde 20 J darbe enerjisinde yapılmıştır. Bölüm 7.4.3'te farklı ön gerilme değerlerinde darbe ön hasarlı borular, 226,5 MPa (%50 σ_{HS}) gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. Yapılan bu çalışmalar doğrultusunda statik iç basınç ve yorulma deneylerinde kullanılacak işletme teğetsel ön gerilme parametreleri 6, 12, ve 18 MPa olarak tespit edilmiştir.

7.4.3. Yorulma deneylerinde kullanılacak hibrit borulara darbe öncesi uygulanacak teğetsel ön gerilme değerlerinin belirlenmesi

Şekil 7.2'de kuvvet-zaman, Şekil 7.3'de Kuvvet-yer değiştirme grafikleri, düşük hızlı darbe hasarları ve bu bölümde 226,5 MPa (%50 σ_{HS}) gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan numuneler incelenerek yorulma deneylerinde kullanılacak teğetsel ön gerilme değerleri tesbit edilmiştir. Bu değerler ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basıncı aralığında seçilmiştir. Ön gerilme değerlerini daha iyi kıyaslayabilmek için 0 MPa'da yani herhangi bir teğetsel ön gerilme uygulanmadan numunelere 20 J enerjide darbe deneyleri uygulanarak yorulma deneylerine başlanmıştır. Darbe deneylerinde elde edilen kuvvet-zaman grafiğinde kullanılan teğetsel ön gerilme değerleri 3 MPa'den başlayarak numunelere darbe öncesi uygulanmıştır. Darbe ön hasarlı borular yarulmaya tabi tutulmuş ve yorulma esnasında oluşan hasarlar gözlemlenmiştir. Ön gerilme değerleri artırılarak yorulma deneylerine devam edilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelere darbe esnasında uygulanan teğetsel ön gerilme değerleri, yorulmada kullanılan parametreler ve yorulma sonrası sonuç hasar çevrim sayıları Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde 20 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların %50 σ_{HS} gerilme değerinde ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayısı.

Test no	Darbe esnasında uygulanan iç basınç (Bar)	Darbe esnasında uygulanan ön gerilme (MPa)	% gerilme σ_{HS}=453 (MPa)	Maksimum teğetsel gerilme (MPa)	Minimum teğetsel gerilme (MPa)	Sonuç hasar çevrimi
1	0	0	50	226,5	11,3	5
2	2	3				713
3	4	6				1047
4	8	12				1783
5	12	18				2169
6	16	24				2536
7	20	30				3230
8	24	36				3141

Çizelge 7.4'de verilmiş olan parametrelere göre yapılan yorulma deneyleri sonucunda oluşan hasarlarının dıştan ve içten genel görünüşü Şekil 7.29'te verilmiştir.



(a)

(b)

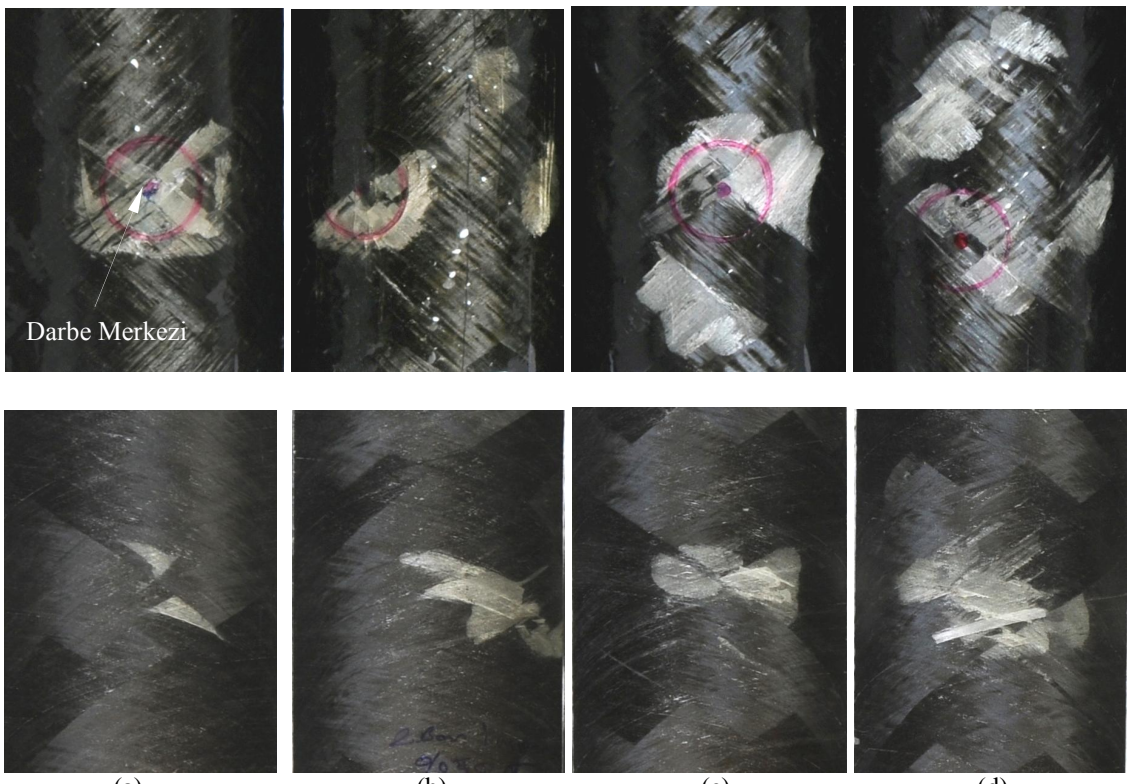
Şekil 7.29 20 J darbe enerjisi için 0 ila 48 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde elde edilen darbe ön hasarlı boruların %50 σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası hasarların dıştan ve içten genel görünüşü

Şekil 7.29, 30 ve 31 incelendiğinde 0 ile 24 MPa gerilme aralığında uygulanan teğetsel ön gerilme değerlerinde borularda oluşan sonuç hasarı darbe merkezinde gerçekleşmektedir. 30 MPa ve 36 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinde hasarlandırılmış numunelerde sonuç hasarı darbe merkezinden farklı yerlerde meydana gelmiştir. 24 MPa teğetsel ön gerilme değerinden sonra oluşan darbe hasarları yüksek olan teğetsel ön gerilmenin etkisi ile azalmakta ve malzemede yorulmanın etkisi ile oluşan hasar miktarından geride kalmaktadır. Bu sebepten dolayı 36 MPa teğetsel ön gerilme değerinden sonra deneylere devam edilmemiştir.

Yorulma deneylerinden elde edilen fotoğraflar genel olarak incelendiğinde, darbe esnasında uygulanan teğetsel ön gerilme değerinin artması ile numunede oluşan yorulma sonuç hasarlarının arttığı ve daha geniş bir hasar alanı oluşturduğu gözlenmiştir. Sonuç hasarının artışı numunenin hem iç kısımda ±75°'lik tabakada hemde dış kısmında ±45°'lik tabakada gerçekleşmektedir. Bunun nedeni; Şekil 7.3'ten de anlaşılacağı gibi numuneye uygulanan teğetsel ön gerilme değeri arttıkça numunede meydana gelen yerdeğiştirme miktarının azalmasıdır. Yer değiştirme miktarının azalması ile numunede eğilmeden kaynaklanan hasar miktarıda azalmaktadır. Çizelge 7.4 incelendiğinde yüksek teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe hasarının daha az

olması yorulma deneylerinde numune ömrünün uzun olmasına neden olduğuda anlaşılmaktadır.

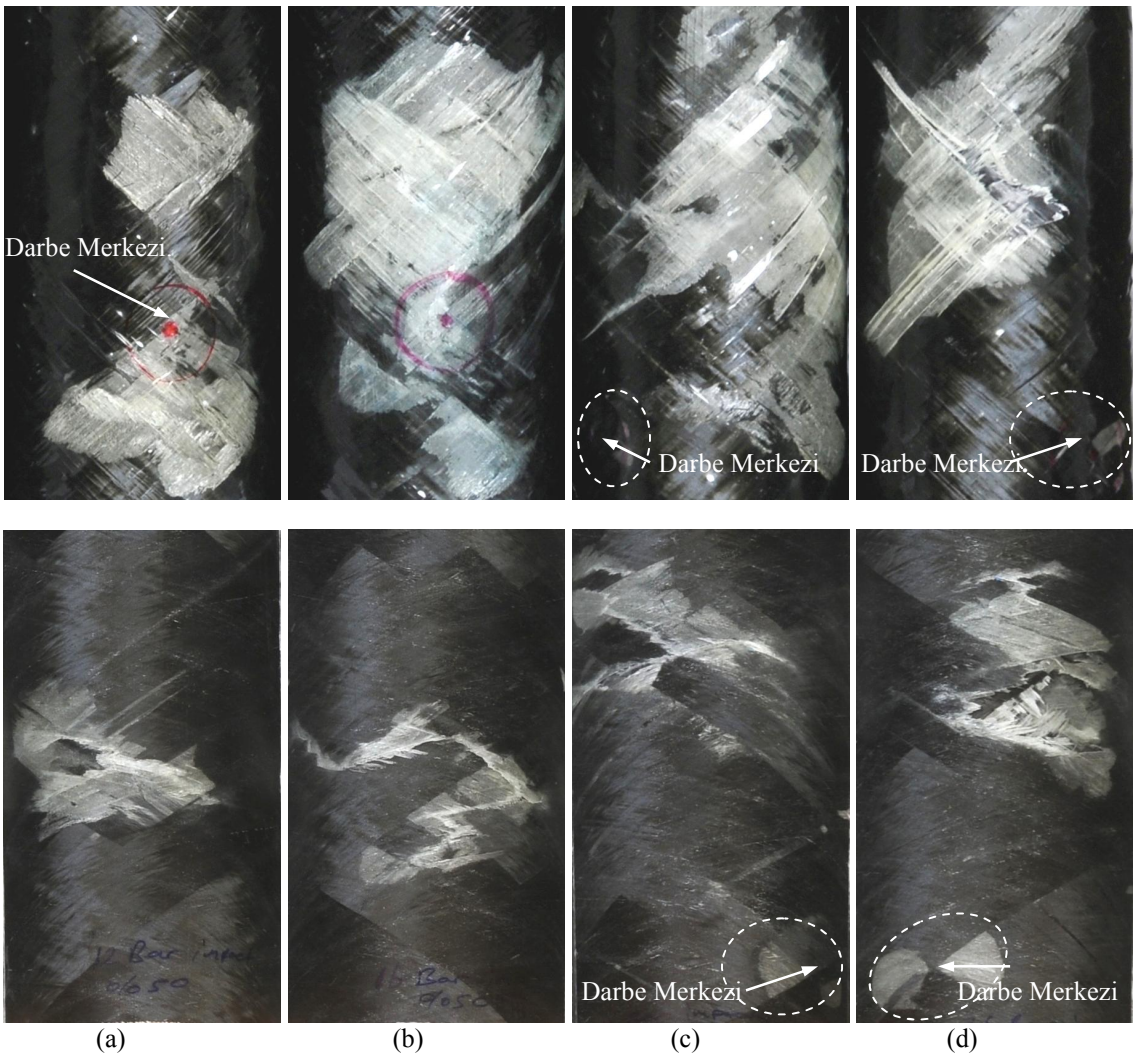
Şekil 7.30'de yorulma sonrası sonuç hasarı dıştan ve içten dikkatlice incelendiğinde, düşük teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe hasar miktarı fazla olduğundan yorulma hasarı darbe merkezinde yoğunlaşmıştır. Numunelerin hem iç kısmında hemde dış kısmında yorulma sonrası hasar bölgesi daha az oluşmuştur. Bununda nedeni; numuneye uygulanan teğetsel ön gerilme değeri azaldıkça numunede meydana gelen çökme yani yer değiştirme miktarının artmasıdır. Yer değiştirmenin artması ile numunede eğilmeden kaynaklanan hasar miktarıda artmaktadır. Darbe merkezi çevresinde yoğunlaşan bu hasarlar; yorulma ömrünü azalttığı gibi yorulma hasar bölgesininde daha dar bir alanda yoğunlaşmasına sebep olmuştur.



Şekil 7.30 Hibrit kompozit boru numunesinde 20 J darbe enerjisi için farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde elde edilen darbe ön hasarlı numunelerin yorulma sonrası hasarın dıştan ve içten görünüşü a) 0 MPa, b) 3 MPa, c) 6 MPa ve c) 12 MPa

Şekil 7.30 ve Şekil 7.31 den de anlaşıldığı gibi her bir numune kendi içinde karşılaştırıldığında numunenin iç kısımda ±75°'lik tabakada oluşan hasar numunenin dış kısmında ±45°'lik tabakada gerçekleşen hasardan daha az oluşmaktadır. Bunun nedeni ise her tabakadaki elyafların sarım açısının farklılığından kaynaklanmaktadır. Sarım açısından dolayı ±75°'lik tabakada uygulanan gerilmenin oluşturduğu şekil değişiminin

±45°'lik tabakaya kıyasla daha az olmasıdır. Yorulmanın etkisi ile darbe merkezinde oluşan hasar ilerledikçe basınçlı yağ ±75°'lik cam tabakadan ±55°'lik karbon tabakasına ilerler. Karbon tabakasından da ilerleyen basınçlı yağ ±45°'lik cam tabakasına ulaştığında darbe ve yorulma esnasında oluşan tabaka ayrılması; bu tabakanın sarım açısının daha küçük olmasından dolayı daha hızlı bir şekilde ilerlemekte ve basınçlı yağın etkisi ile genişlemektedir. Düşük teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe hasarlı numunelerde dar bir alanda oluşan hasar bölgesinde birkaç yerden yoğun bir şekilde sızıntı ve tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı gerçekleşmektedir. Yüksek teğetsel ön gerilme değerlerinde darbe hasarlı numunelerde geniş bir alana yayılan hasar bölgesinde birçok yerden yoğun bir şekilde sızıntı gerçekleşmesi ile beraber yoğun tabaka ayrılmasının da etkisi ile sonuç hasarı yarılma ve patlama şeklinde gerçekleşmektedir.



Şekil 7.31 Hibrit kompozit boru numunesinde 20 J darbe enerjisi için farklı teğetsel ön gerilme değerlerinde elde edilen darbe ön hasarlı numunelerin yorulma sonrası hasarın dıştan ve içten görünüşü a) 18 MPa, b) 24 MPa, c) 30 MPa, c) 36 MPa

Darbe öncesinde belirlenecek teğetsel ön gerilme değerleri için bütün bu bilgilerle ışığında, özellikle 24 MPa teğetsel ön gerilme değerinden sonra oluşan yorulma sonuç hasarının darbe merkezinden gerçekleşmemesi dikkate alınmıştır. Bu nedenlerden dolayı düşük hızlı darbe hasarlı hibrit borularda darbe ön hasarının yorulma ömrüne etkisini inceleyebilmek için seçilecek teğetsel ön gerilmeler 3 MPa ile 24 MPa aralığında olmalıdır. Bu değerler ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 4, 8 ve 12 bar olarak alınmıştır. Bu basınç değerleri bu çalışmada kullanacağı deney numunelerinde 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değeri olarak hesaplanmıştır.

7.5. Hasarsız ve Darbe Ön Hasarlı Hibrit Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Deneyleri

Cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açısına sahip darbe hasarsız ile 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme altında 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların yorulma ömrünü belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelere yorulma yük oranı R=0,05 ve gerilme değeri; hasarsız numunelerin açık uçlu iç basınç patlatma deneylerinde elde edilen teğetsel yönde σ_{HS} teğetsel maksimum mukavemet değerlerinin %30, %35, %40, %45, %50 ve %55'ı olacak şekilde tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Yorulma deneyleri esnasında tespit edilen üç önemli hasar aşaması belirlenmiş ve sonuç hasar çevrimine göre teğetsel gerilme-çevrim sayısı grafikleri verilmiştir. Bu hasar aşamalarından birincisi, numunelerde terleme veya damlacık şeklinde ilk sızıntının başladığı aşamadır. İkinci hasar aşaması olarak numunede yoğun sızıntının (su jeti) başlaması dikkate alınmıştır. Üçüncü hasar aşaması ise sonuç hasarıdır. Sonuç hasarı; numunenin patlaması veya yoğun tabaka ayrılması neticesinde deneyin sonlandırılmasıdır.

Yorulma deneylerinde kullanılacak darbe ön hasarlı numunelerde darbe yapılacak noktaların seçilmesi önem arz etmektedir. Yorulma deneylerinde yapılan ön çalışmalar esnasında; boru üzerine yapılacak darbe ön hasar bölgesi rasgele seçildiğinde sonuç hasar çevrimlerinde tutarsızlıklar olduğu tesbit edilmiştir. Flaman sarım üretim tekniği göz önünde bulundurularak numunelerde özellikle karbon tabakasının $\pm 55^o$ elyaf demetlerinin kesişim noktaları dikkate alınmış ve darbe noktaları bütün yorulma

deneylerinde aynı olacak şekilde bu noktalardan seçilmiştir. Darbe merkezi olarak seçilen ± demetlerinin kesişdiği noktalar; flaman sarım tekniği ile üretilen kompozit borularda en zayıf noktalar olduğu göz önünde tutulmuştur. Bu şekilde darbe hasarlı borularda yorulma sonuç hasarının kontrolü oluşturulan darbe ön hasarı tarafından sağlanmış olacaktır. Darbe ön hasar noktaları ± demetlerinin kesişim noktalardan seçilmediğinde oluşan hasarlar ağırlıklı olarak tabaka ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir. Bu durum numunelerin hasarsız gibi davranmasına sebep olmakta ve sonuç hasarı darbe merkezinden farklı bir yerden gerçekleşebilmektedir.

7.5.1. Hasarsız hibrit boruların yorulma hasar analizi

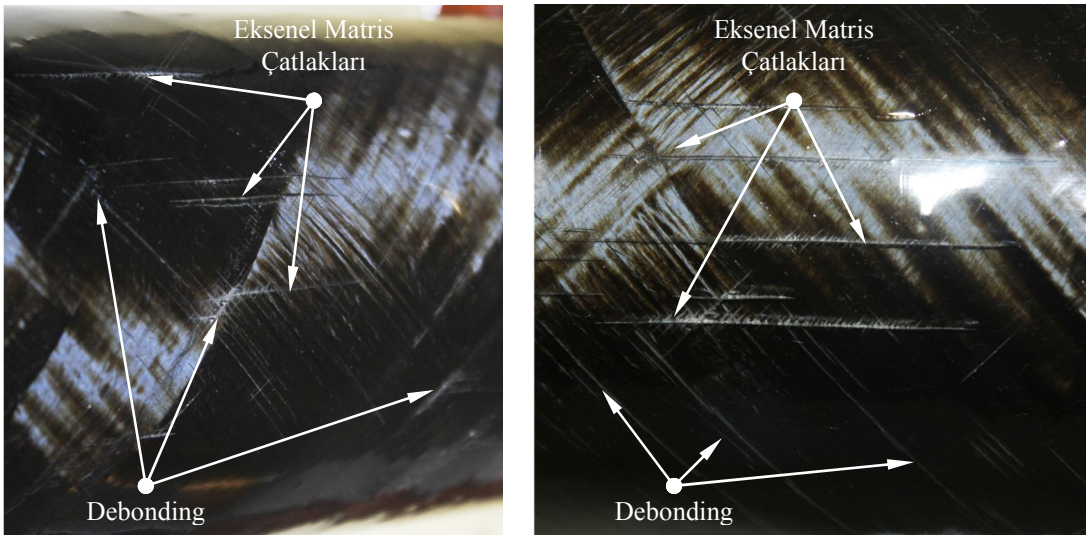
Karbon, E-camı/epoksi kompozit borular herhangi bir darbe hasarına maruz bırakılmadan hasarsız olarak Bölüm 7.5'te belirtilen gerilme oranlarında yorulma deneylerine tabi tutulmuştur. Darbe hasarsız hibrit boruların yorulma deneyinde, iç basıncın etkisiyle bütün tabakalardaki elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmıştır. Bunun neticesi olarak deney numunesinin boyunda kısalma olurken çapında artma meydana gelmiştir. Elyafların teğetsel yönde gerilip tekrar eski haline dönmesi sonucu ± elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmelerin etkisiyle tabakalar arası ayrılmalar ve elyaf matris ayrılmaları gerçekleşmiştir. Beyazlama şeklinde gerçekleşen bu hasarlar elyaf doğrultusunda büyümüş ve ilerleyen çevrimlerde matris çatlaması oluşturmuştur. Aynı durum Günaydın (2010) tarafından da rapor edilmiştir. Matris çatlamasının oluşmasıyla numunede ilk sızıntı terleme şeklinde oluşurken sonraki çevrimlerde damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boruda yoğun sızıntı ve yoğun tabaka ayrılması veya infilak şeklinde sonuç hasarları oluşmuştur.

Darbe hasarsız hibrit kompozit boruların yorulma deneylerinde özellikle düşük gerilme değerlerinde oluşan ilk hasar; elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlaklar yani elyaf matris ara yüzeyi ayrılması, numunenin dışında bulunan ±45° cam tabakasında görülmüştür. Serbest uçlu iç basınç deneyine tabi tutulan numuneler incelendiğinde, tüm boru boyunca elyafa paralel beyaz ince çizgiler (debonding) oluşmaktadır (Gemi 2004). Debonding; 135,9 MPa en düşük gerilme değerinde 103.080 çevrimde elyaf-matris ara yüzeyinde, elyaf sarım açısı doğrultusunda süreksiz mikro çatlaklar şeklinde oluşmaya başlamıştır. İlerleyen çevrimlerde bu süreksiz mikro

çatlaklar elyaf sarım açısı doğrultusunda birleşmiştir. Şekil 7.32'de görüldüğü gibi ±45° cam tabakasında bu çatlakların mikro boyutta oluştuğu ve ilerleyen çevrimlerde numuneyi sarım açısı doğrultusunda dolaştığı gözlendi. Gemi (2009)'nin de tespit ettiği gibi düşük gerilmelere tabi tutulan numunelerde, yorulmanın etkisi ile ilerleyen çevrimlerde elyaf doğrultusunda yeni mikro çatlaklar oluşmuştur.

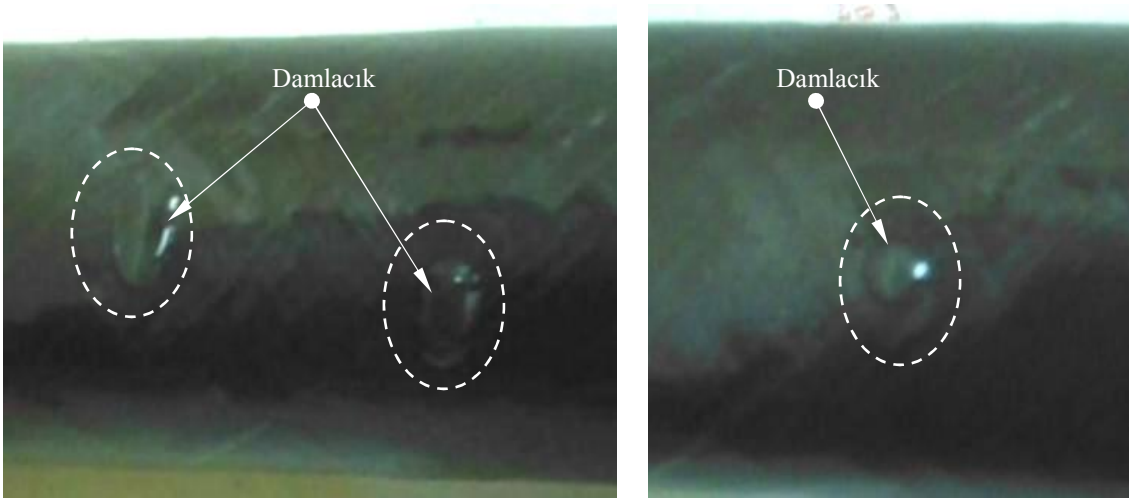
181.260 çevrimde Şekil 7.32'de görüldüğü gibi matris yüzeyinde Ellyin ve Martens'in (2001) gözlemlediği gibi, numune eksenine paralel 8-10 adet 1-3 cm boyunda matris yüzey çatlakların oluştuğu gözlendi. Yorulma sırasında matris malzemesindeki çatlak uzunluklarının sürekli artmadığını ve belli bir çevrim sayısından sonra daha fazla ilerlemediğini Reisfinder (1977)'de rapor etmiştir.

Elyaf doğrultusunda ve eksenel yönde oluşan çatlakların kesişim bölgelerinde numunenin iç yüzeyinden dışa doğru noktasal iğne deliği şeklinde beyaz lekelerin oluşumu gözlendi. İlerleyen çevrimlerde bu beyaz lekeler, numune üzerinde diğer kesişim bölgelerine de yayıldı. Bu lekelerin her çevrimde, basınçlı akışkanın etkisi ile açılıp kapandığı gözlendi (Gemi 2004, 2005).



Şekil 7.32 Hasarsız hibrit boru numunelerinde %30 σ_{HS}=135,9 MPa gerilme değerlerinde N=181.260 çevrimde yorulma esnasında oluşan elyafa paralel debonding ve eksenel doğrultuda matris çatlakları

135,9 MPa endüşük gerilme değerinde 264.930 çevrimde eksenel matris çatlağı ve elyaf bandı içinde debonding'in yoğun olduğu bölgede yorulmanın etkisi ile terleme şeklinde sızıntının gerçekleştiği görüldü. Terlemenin etkisi ile boru yüzeyinin ıslandığı gözlendi. Wang ve diğ. (1997), boruların sızıntı hasar başlangıcının yüzeyin ıslanması ile başladığını rapor etmişlerdir.



Şekil 7.33 Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinde %30 σ_{HS}=135,9 MPa gerilme değerlerinde N=360.000 çevrimde yorulma esnasında oluşan sızıntının damlacık şeklinde görünüşü

Şekil 7.33'de görüldüğü gibi 360.000 çevrimde terlemenin oluştugu bölgelerde sızıntının arttığı ve sızıntı hasarının damlacık şeklinde oluştuğu gözlendi. Damlacık şeklinde oluşan sızıntı ilerleyen çevrimlerde yorulmanında etkisi ile su jeti oluşumuna kadar artış göstermekte ve her yüklemede rahatlıkla gözlemlenebilmektedir.

135,9 MPa en düşük gerilme değerinde 441.521 çevrimde yoğunlaşan damlacık şeklindeki sızıntı hasarı su jeti şeklini almıştır. Su jeti hasarı tekli olarak başlamış ve ilerleyen çevrimlerde çoklu yoğun su jetine dönüşmüştür. Çok kısa çevrim sonrasında yoğun sızıntınında etkisiyle bölgesel tabaka ayrılması oluşmuş ve basınçlı sıvı çevrime girememiştir. Şekil 7.34'de görüldüğü gibi yoğun sızıntı ve tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur. Rotem'e (1979) göre, tabakalı kompozitler ele alındığında bir başka hasar türü olan tabaka ayrılması dikkate alınmalıdır.



Şekil 7.34 Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinde %30 $\sigma_{HS=}$ 135,9 MPa gerilme değerlerinde N=444.200 çevrimde yorulma esnasında oluşan yoğun sızıntının sonuç hasarı görünüşü

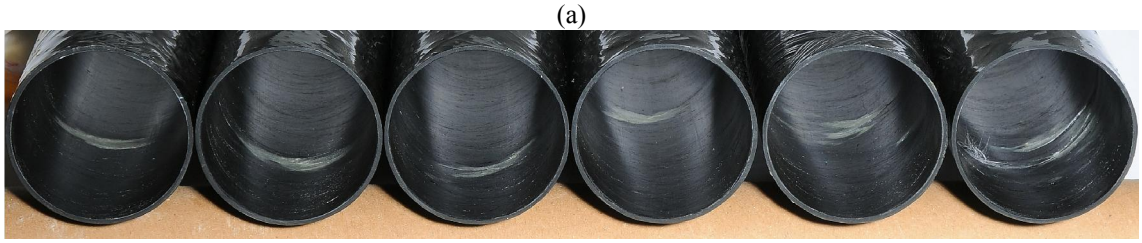
135,9 MPa düşük gerilme değerinde gözlemlenen hasar aşamaları 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde çok kısa çevrim aralığında gerçekleşmiştir. Elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlaklar yani elyaf matris ara yüzeyi ayrılması (debonding), 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde çok az süreksiz mikro matris çatlağı şeklinde görülmüştür. Numune eksenine paralel 2-4 adet 0,5-1 cm boyunda az sayıda matris yüzey çatlakların oluştuğu gözlendi. Terleme ve damlacık şeklinde sızıntı hasarı gözlenmeksizin su jeti hasarı oluşmuştur. Su jeti kısa bir çevrim sonra numunenin farklı bölgelerindede gerçekleşmiştir. Su jeti oluşumundan çok kısa süre sonra yüksek iç basıncın etkisi ile numunede yağun tabaka ayrılması ve Şekil 7.35'de görüldüğü gibi yoğun su jeti şeklinde sonuç hasarı gerçekleşmiştir.



Şekil 7.35 Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinde %50 σ_{HS}=226,5 MPa gerilme değerlerinde N=3184 çevrimde yorulma esnasında oluşan yoğun sızıntının sonuç hasarı görünüşü



(a)



(b)

Şekil 7.36 Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinin farklı gerilme değerlerinde yorulma sonrası hasarın a) dış yüzey ve b) iç yüzey genel görünüşü

Şekil 7.36 da hasarsız hibrit boruların yorulma deneyi sonrası dış ve iç yüzeylerinde oluşan sonuç hasarlarına ait fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde; uygulanan düşük gerilme değerlerinden yüksek gerilmelere doğru bakıldığında numunelerde oluşan hasarların arttığı görülmektedir. 249,2 MPa en yüksek gerilme değerlerinde numunede şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı oluşmuştur.

Diger gerilme değerlerinde Gemi (2004)'nin de rapor ettiği gibi, yoğun su jeti sonrasında numunede patlama olmaksızın oluşan hasar bölgesel tabaka ayrılması ve yarılma şeklinde görüldü. Numunelerin boyunda ve çapında belirgin bir deformasyon görülmemektedir. Çizelge 7.5'te darbe hasarsız numunelerle yapılan deneylere ait ortalama yorulma deneyi sonuç hasar çevrimleri verilmiştir.

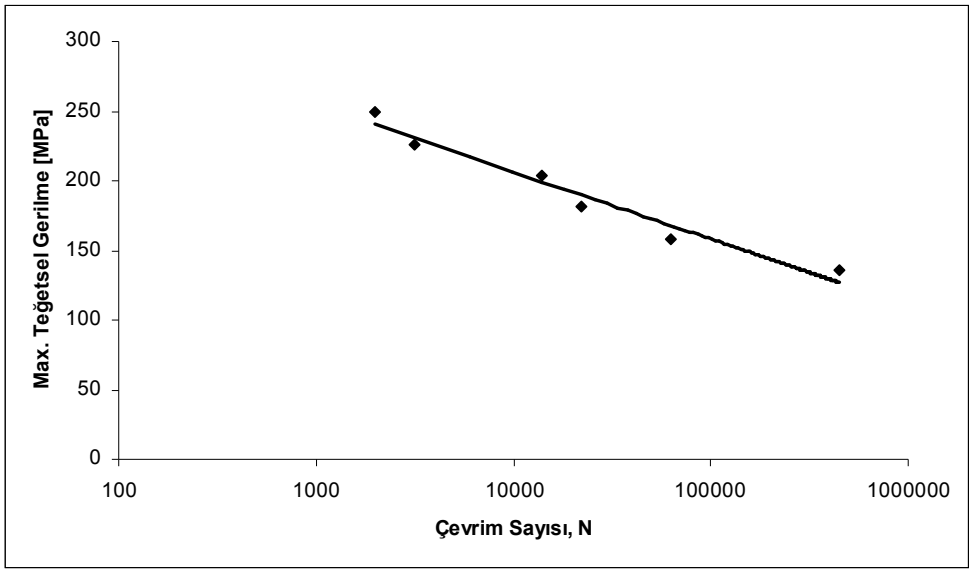
Çizelge 7.5'te yorulma çevrim sayıları incelendiğinde; 225,5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numunelerde 203,9 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numune ile kıyaslandığında yorulma ömründe ani

bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. Bu gerilme değerlerine ait hasar fotoğraflara bakıldığında 225,5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde hasarın elyaf kopması şeklinde tahribatlı oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 7.5 Darbe hasarsız hibrit kompozit boruların ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayısı

Test no	% gerilme σ_{HS}=453 (MPa)	Maksimum teğetsel gerilme (MPa)	Minimum teğetsel gerilme (MPa)	Sonuç hasar çevrimi
1	30	135,9	6,8	444200
2	35	158,5	7,9	62327
3	40	181,2	9	21883
4	45	203,9	10,2	13878
5	50	226,5	11,3	3184
6	55	249,2	12,5	1971

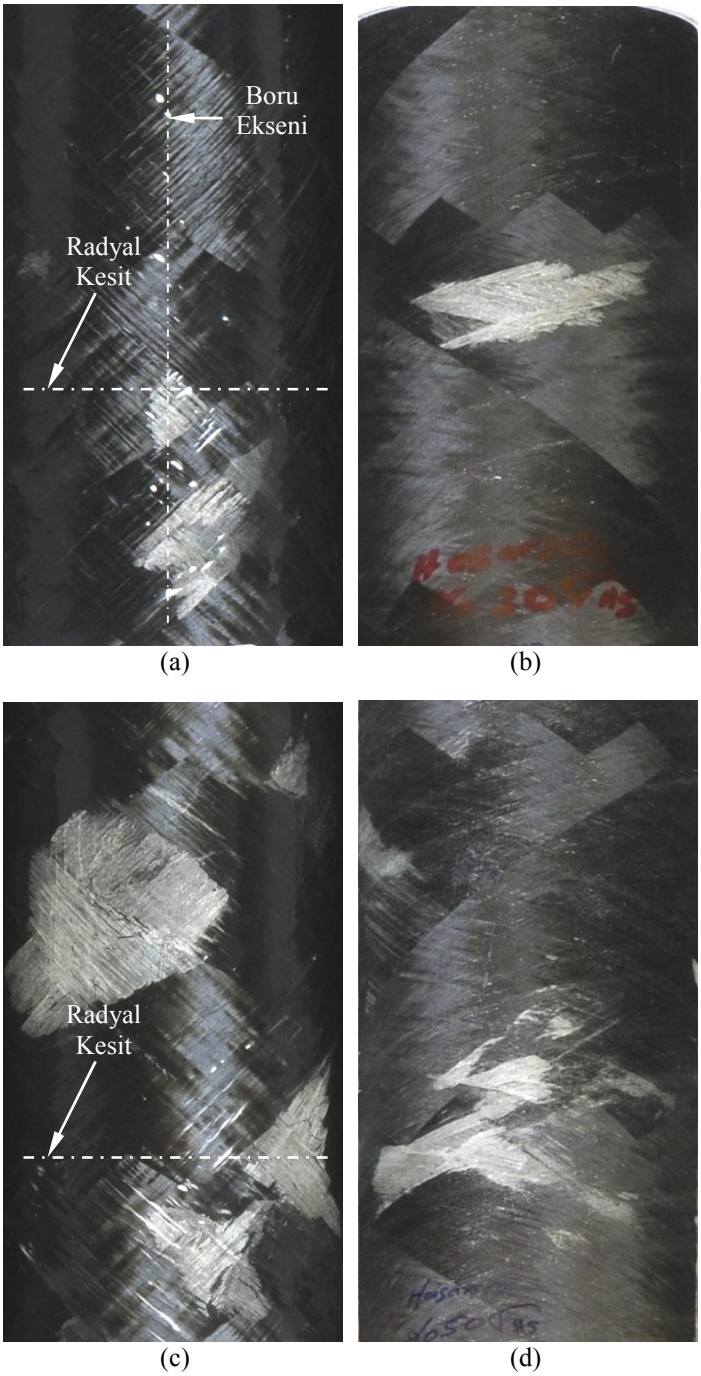
Şekil 7.37'de darbe hasarsız hibrit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafikten'de anlaşıldığı gibi gerilme değeri düştükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmektedir.



Şekil 7.37 Hasarsız hibrit kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği

Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinde yorulma deneylerinde oluşan sonuç hasarlarının makro ve mikro yapılarınında incelemesi yapılmıştır. Mikro hasar incelemeleri, $\%30\sigma_{HS}$ ve $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde yorulma hasarına uğrayan deney

numuneleri esas alınarak yapılmıştır. Numunelerin makro hasar fotoğrafları Şekil 7.38 de görüldüğü gibi birebir aynı ölçekte aynı bölgeden alınmıştır. Mikro yapılarını inceleyebilmek için daha önce belirtilen makro hasar numuneleri kullanılmıştır.

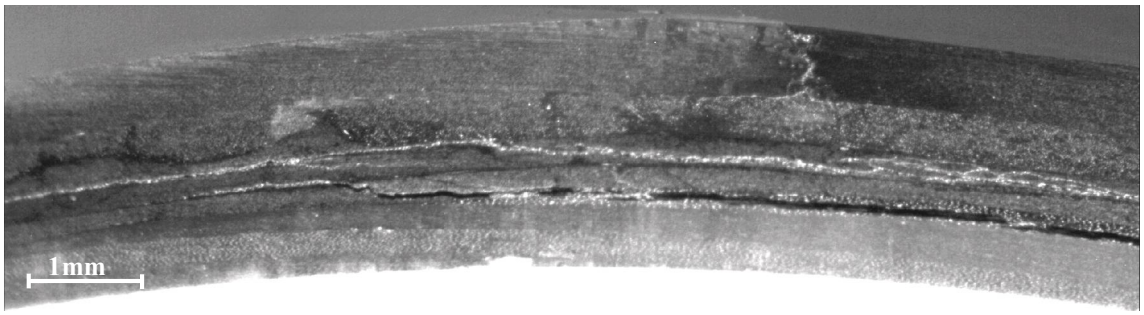


Şekil 7.38 Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinin (a-b) %30σ_{HS} ve (c-d) %50σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası dış ve iç görünüşü

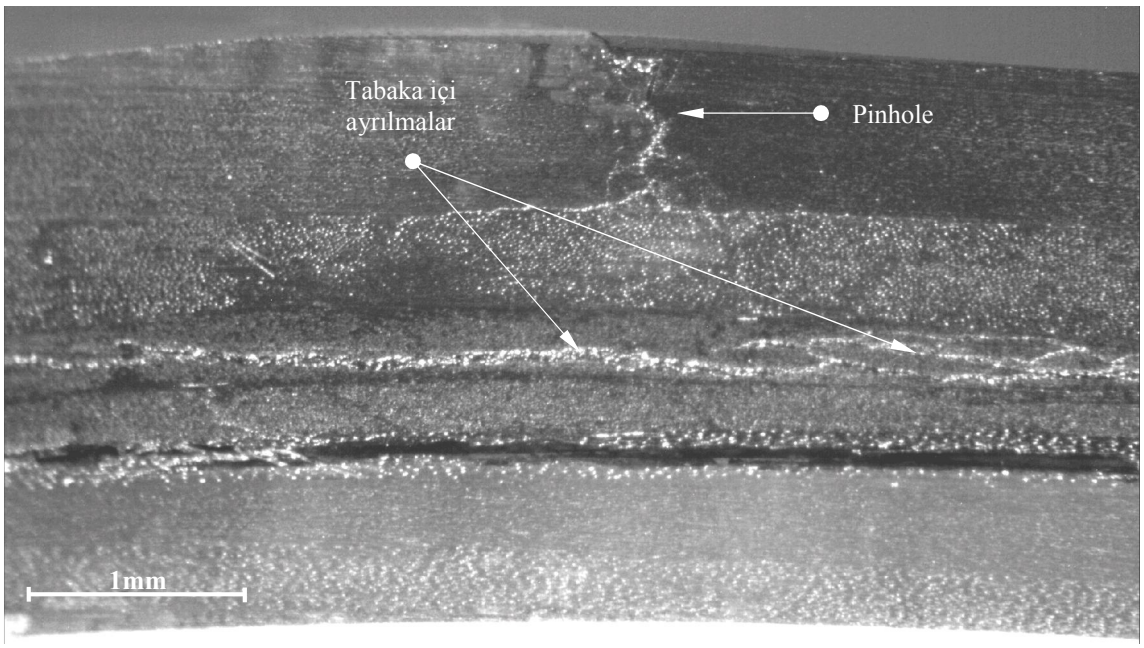
Numuneler hasarın yoğun oluştuğu bölgeden radyal yönde kesilmiştir. Numuneler makro ve mikro hasar incelemeleri için hazırlanırken hasar bölgesinde ilave hasar oluşturulmamıştır.

%30σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.39, 40 ve 41'de 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde yorulma sonrası oluşan tabaka ayrılmaları, tabakalar içinde oluşan radyal matris çatlakları ve yüzey matris çatlakları çok rahat gözlemlenebilmektedir. Makro hasar incelemelerinde yorulma esnasında elyaf doğrultusunda ve eksenel yönde oluşan çatlakların kesişim bölgelerinde numunenin iç yüzeyinden dışa doğru noktasal iğne deliği (pinhole) şeklinde beyaz lekelerin oluşumu tesbit edilmişti.

Şekil 7.39a'da görüldüğü gibi pinhole yüzeye ulaşmış ve sızıntı hasarına yol açmıştır. Jones ve Hull (1979) tarafından yapılan mikroskobik analizde elyafa paralel çatlakların katlar arasında elyaf kesişme noktalarında birkaç μm çapında bir sızıntı yoluyla oluşturduklarını açıklamışlardır.



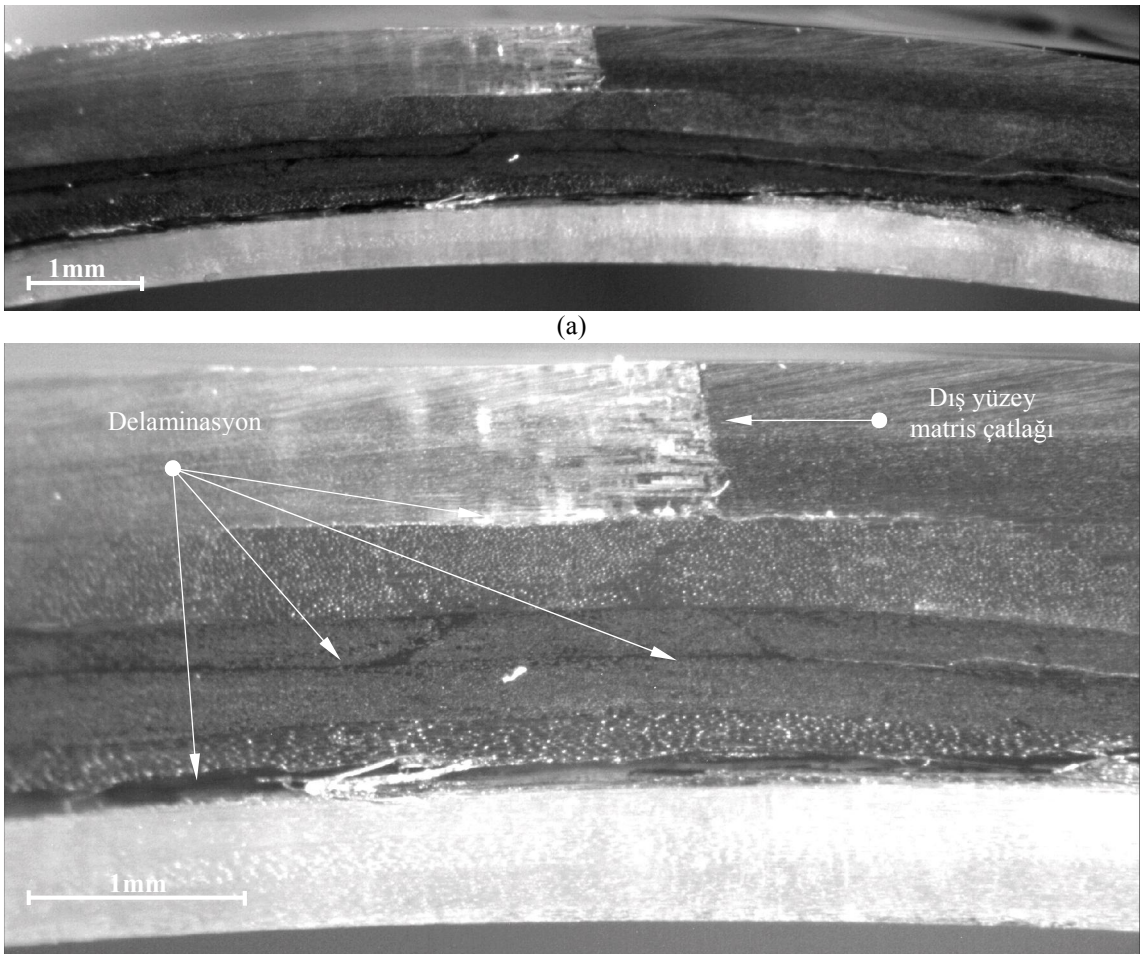
(a)



(b)

Şekil 7.39 Hasarsız hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS}, 135,9 MPa gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

Yine makro hasar incelemelerinde yorulma esnasında eksenel yönde oluşan matris yüzey çatlaklarının kesit görünüşü Şekil 7.40 da verilmiştir. Mikro yapı resmi incelendiğinde matris yüzeyinde oluşan çatlağın -45° cam tabakasından ilerleyerek +45° cam tabakasına ulaştığı ve iki tabaka arasında delaminasyona yol açtığı görülmektedir. Yorulma esnasında bu delaminasyon bölgesine ulaşan basınçlı yağ bu çatlaklar aracılığıyla ilk sızıntı hasarı olan terlemeye sebep olmuştur.

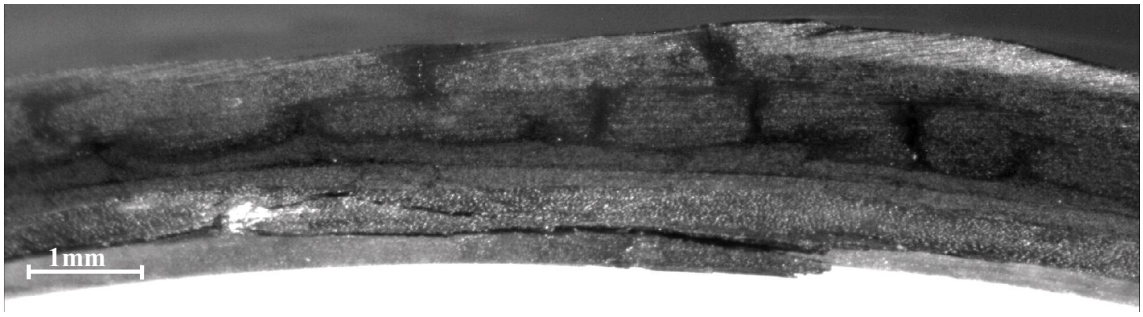


Şekil 7.40 Hasarsız hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

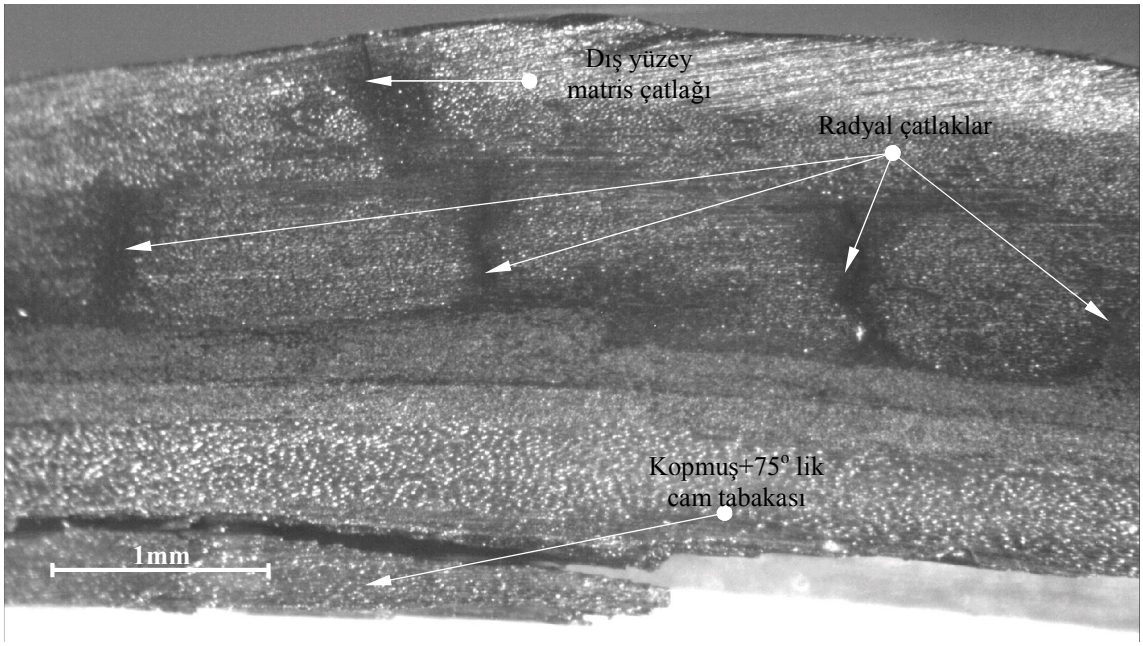
Şekil 7.41 de yoğun hasar bölgesinden alınan mikro yapı resminde tabaka ayrılmaları, tabakalar içinde oluşan radyal matris çatlakları, yüzey matris çatlakları ve tamamen kopmuş olan $+75^0$ lik cam tabakası çok rahat görübilmektedir. 135,9 MPa gerilme değerlerinde 444.200 gibi yüksek bir çevrimde yorulmanın numune kesitinde oluşturduğu yoğun hasar net bir şekilde görülmektedir.

Yorulmanın etkisiyle $+75^o$ lik cam tabakası tamamen kopmuştur. Bu tabakadan ilerleyen basınçlı yağ -75^o lik cam tabakasında oluşan en yakın hasar bölgesinden geçip

karbon tabakasına ulaşmıştır. Basınçlı yağ cam tabakalarından daha az hasara uğrayan karbon tabakalarından ilerleyip ±45^o cam tabakasına geçmiştir. ±45^o cam tabakasında sarım açısının düşük olması sebebiyle ±75^o cam ve ±55^o karbon tabakasından daha fazla hasara uğramıştır. 135,9 MPa gerilme değerlerinde ±45^o cam tabakasında matris malzemesi elyaftan daha önce hasara uğramıştır. Ferry ve diğ. (1998)'e göre, bir kompozit malzemenin yorulma direnci, matrisin hasara karşı direnci ile ilgilidir. Basınçlı yağ radyal çatlakların ve matris yüzey çatlaklarının fazla olduğu bu tabakadan rahat bir şekilde numunenin yüzeyine ulaşabilmektedir.



(a)

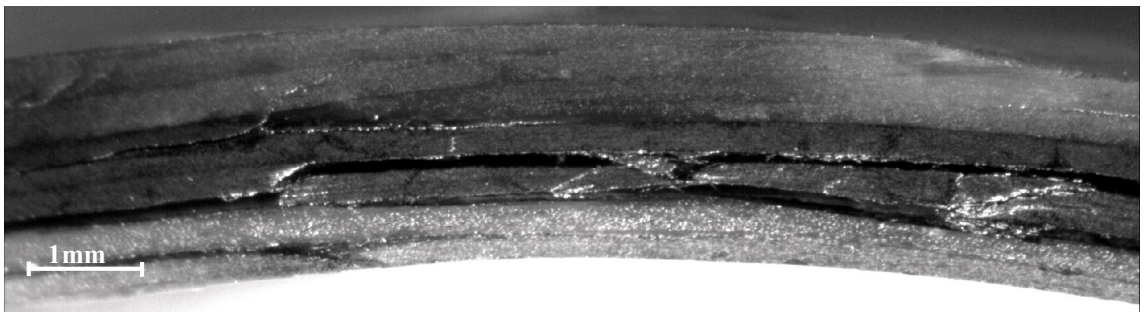


(b)

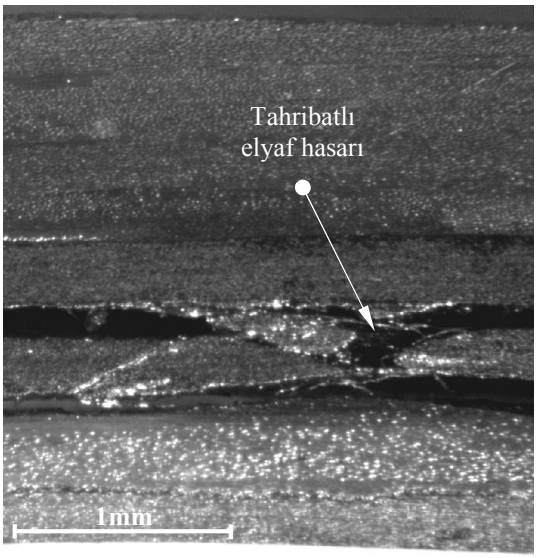
Şekil 7.41 Hasarsız hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

%50σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.42 ve 43'te 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde 3184 gibi düşük çevrimde oluşan radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde yorulma sonrası tabaka ayrılmaları, tabakalar içinde oluşan radyal matris çatlakları ve yüksek gerilme değerinden dolayı karbon tabakasında oluşan elyaf hasarları rahat görülebilmektedir. Bu gerilme değerinde sonuç hasarını karbon tabakası belirlemiştir.

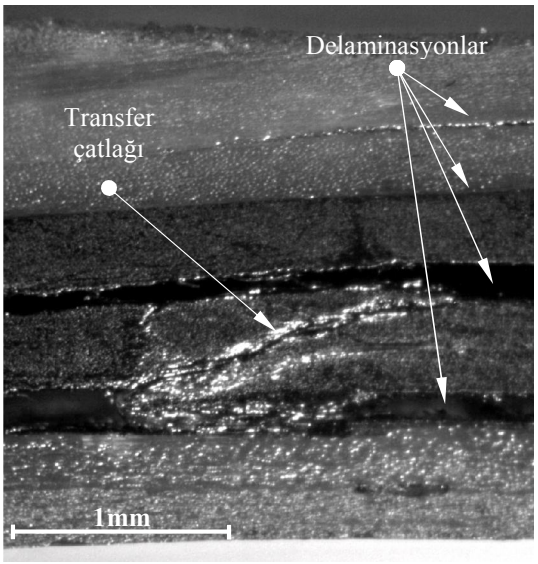
Cam tabakalarında tabaka ayrılması şeklinde hasar görürken, karbon tabakası gerilme yükünün büyük bir kısmını taşıdığından birçok yerden ani elyaf kopması şeklinde sonuç hasarına uğramıştır. Karbon tabakası hasar görmesine rağmen ±45^o cam tabakasının sarım açısından ve kullanılan elyafın düşük modüllü olmasından dolayı numune bütünlüğünü korumuştur. Mikro yapı resimlerinden Şekil 7.42a ve 7.43a'dan da anlaşıldığı gibi +55^o karbon tabakasında yorulma sonuç hasarı daha fazla oluşmuştur.



(a)



(b)



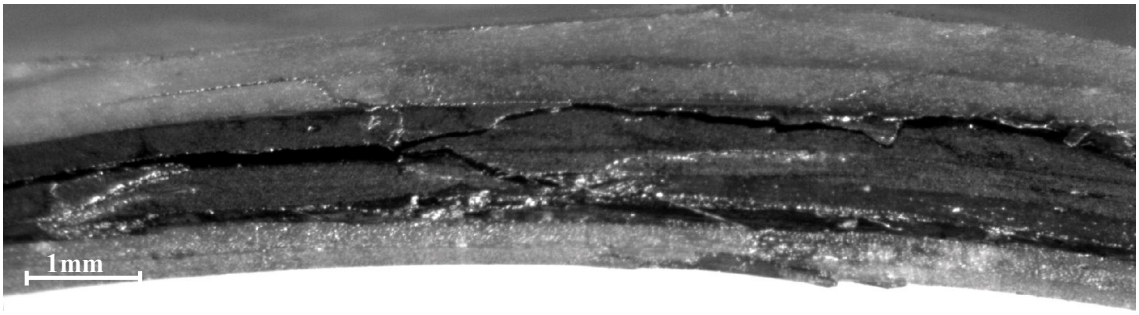
(c)

Şekil 7.42 Hasarsız hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

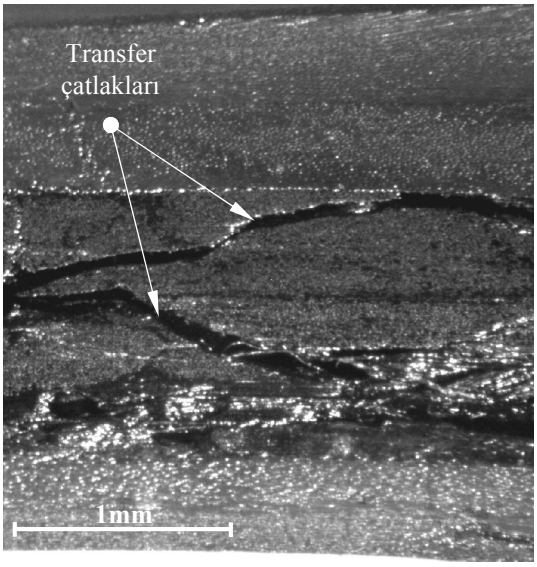
Hasarsız hibrit kompozit boru numunelerinde yüksek gerilme değerinde, yorulma deneylerinde oluşan sonuç hasarlarının makro hasar incelemelerinde terleme ve damlacık şeklinde sızıntı hasarı gözlenemedi. Bunun sebebi numunede sızıntıya sebep olacak yorulma matris hasarları oluşmadan yüksek gerilme değerinden dolayı düşük çevrimlerde sonuç hasarına ulaşmasıdır.

Şekil 7.43'te de görüldüğü gibi ±75^o cam ve ±55^o karbon tabakalarında oluşan yüksek tahribattan dolayı yüksek basınçlı sıvı ±45^o cam tabakasına ulaşmıştır. Bu

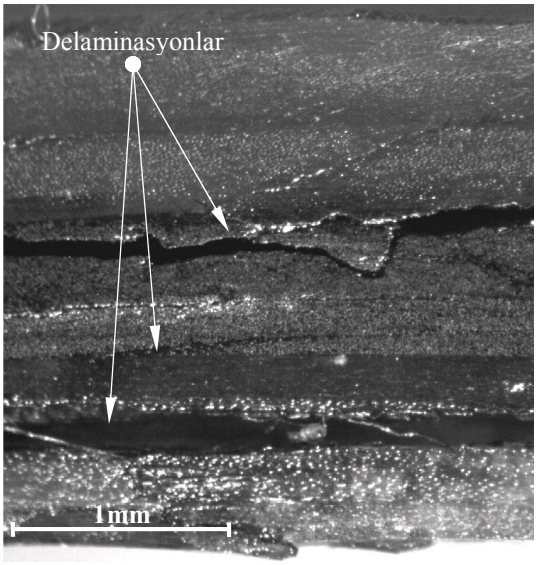
tabakadaki sarım açısının düşük olması sebebiyle yüksek basınçlı sıvının etkisi büyük bir delaminasyon alanı oluşturmuştur. Kısa bir çevrim sonra bu tabakada oluşan hasarlardan dolayı sonuç hasarı yoğun su jeti şeklinde gerçekleşmiştir.



(a)



(b)



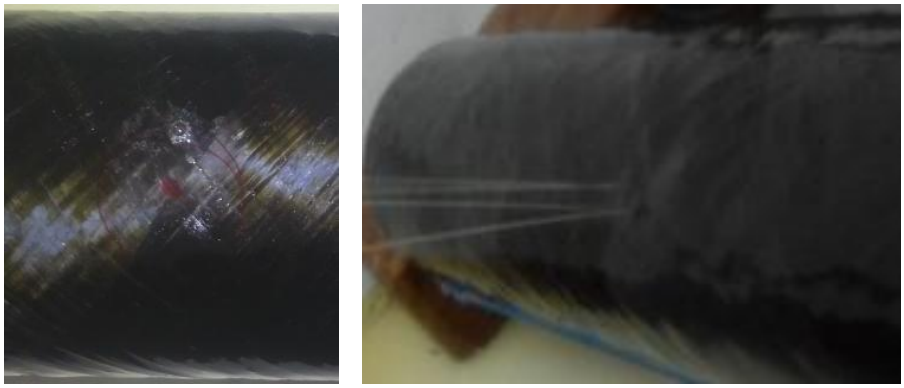
(c)

Şekil 7.43 Hasarsız hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri

7.5.2. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma hasar analizi

6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı Karbon, E-camı/epoksi kompozit borular yorulma ömrünü belirlemek amacıyla yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma deneyinde, iç basıncın etkisiyle darbe bölgesiyle beraber bütün tabakalardaki elyaflar teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmıştır. Elyafların teğetsel yönde gerilip tekrar eski haline dönmesi sonucu ± elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Bu gerilmelerin etkisi ile 20 J darbe enerjisinde hasarlandırılmış

darbe ön hasarlı boruların hasar bölgesinde hasarsız borulara kıyasla daha erken sonuç hasarı oluşmuştur. Boruların hasarsız kısımlarında tabakalar arası ayrılmalar ve elyaf matris ayrılmaları-debonding hasarsız numunelerle kıyaslanınca çok fazla gerçekleşmemiştir. Bölüm 7.3.7 de bahsedildiği gibi darbe ön hasarlı boruların hasar bölgelerinde darbeden kaynaklı oluşan dış yüzey matris çatlakları, iç yüzey matris çatlakları, radyal matris çatlakları ve tabaka ayrılmalarının (deleminasyonlar) yoğun olduğu tesbit edilmişti. Bu yoğun hasarlar 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış boruların hasar gelişimini; hasarsız, 12 MPa ve 18 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış borulardan daha etkili kılmıştır. 135,9 MPa düşük gerime değerinde darbe bölgesinden ilk sızıntı terleme şeklinde oluşurken 226,5 MPa gerilme değerinde sızıntı damlacık şeklinde gerçekleşmiştir. Her iki gerilme seviyesinde ilerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüş, kısa bir süre sonra boruda yoğun sızıntı ve yoğun tabaka ayrılması veya infilak şeklinde sonuç hasarları oluşmuştur. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların yorulma deneylerinde oluşan terleme ve su jeti hasarı Şekil 7.44'te görülmektedir.



Şekil 7.44 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların 135,9 MPa gerilme değerinde yorulma esnasında oluşan terleme ve su jetinin görünüşü

Şekil 7.45'de 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma deneyi sonrası dış ve iç yüzeylerinde oluşan sonuç hasarlarına ait fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde; uygulanan düşük gerilme değerlerinden yüksek gerilmelere doğru bakıldığında numunelerde uygulanan gerilme oranlarının artması ile oluşan hasarların arttığı görülmektedir. En yüksek gerilme değerlerinde numunede şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı oluşmuştur. Diger gerilme değerlerinde Gemi (2004)'de rapor ettiği gibi, yoğun su jeti sonrasında numunede patlama olmaksızın, hasarın bölgesel tabaka ayrılması ve yarılma şeklinde olduğu görüldü.



(a)

(b)

Şekil 7.45 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunelerinin farklı gerilme değerlerinde yorulma sonrası hasarların a) dış yüzey ve b) iç yüzey genel görünüşü

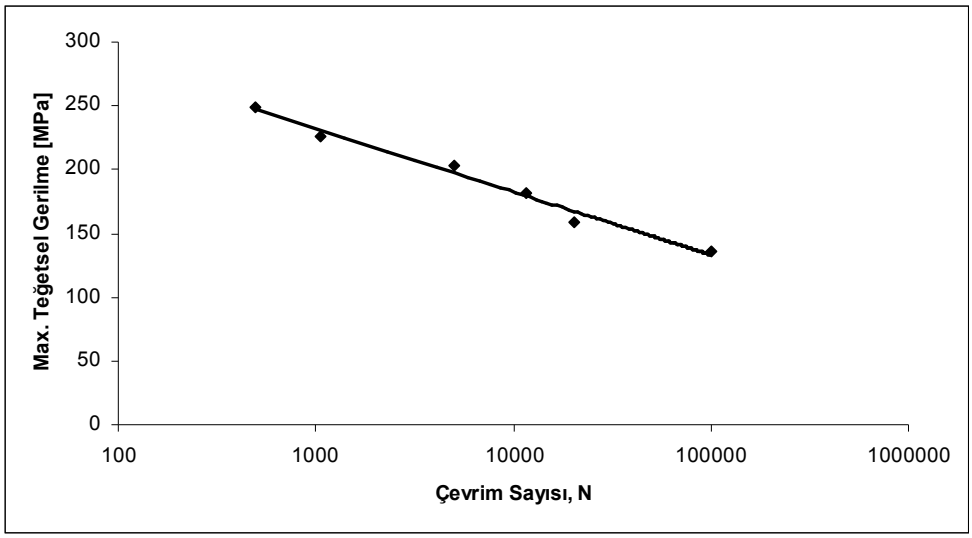
Numunelerin boyunda ve çapında belirgin bir deformasyon görülmemiştir. Çizelge 7.6'da darbe ön hasarlı numunelerle yapılan yorulma deneylerine ait ortalama deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 7.6 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayısı

Test no	% gerilme σ_{HS}=453 (MPa)	Maksimum teğetsel gerilme (MPa)	Minimum teğetsel gerilme (MPa)	Sonuç hasar çevrimi
1	30	135,9	6,8	99982
2	35	158,5	7,9	20449
3	40	181,2	9	11618
4	45	203,9	10,2	5026
5	50	226,5	11,3	1047
6	55	249,2	12,5	492

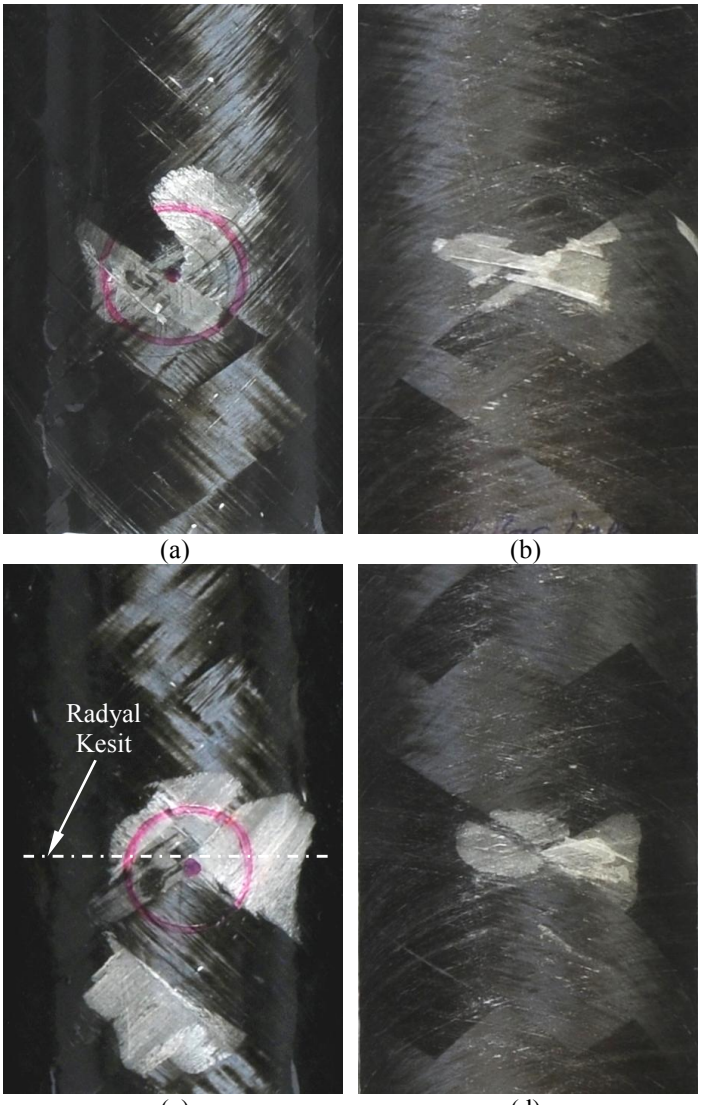
Çizelge 7.6'da yorulma çevrim sayıları incelendiğinde; 226,5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numunelerde darbe hasarsız borularda olduğu gibi 203,9 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numune ile kıyaslandığında yorulma ömründe ani bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. Bu gerilme değerlerine ait hasar fotoğraflarına bakıldığında 249,2 MPa gerilme değerinde hasarın tahribatlı elyaf hasarların oluştuğu görülmektedir.

Şekil 7.46'da darbe ön hasarlı boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi max. teğetsel gerilme değeri düştükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir.



Şekil 7.46 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği

6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı Karbon, E-camı/epoksi kompozit boru numunelerinde yorulma deneylerinde oluşan sonuç hasarlarının makro ve mikro yapılarınında incelemesi yapılmıştır. Hasar incelemelerinde yorulma sonrası $\%30\sigma_{HS}$ ve $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde hasara uğrayan deney numuneleri kullanılmıştır. Numunelerin makro hasar fotoğrafları Şekil 7.47'de görüldüğü gibi birebir aynı ölçekte aynı bölgeden alınmıştır. Mikro yapılarını inceleyebilmek için makro hasar incelemesinde kullanılan numuneler alınmıştır.

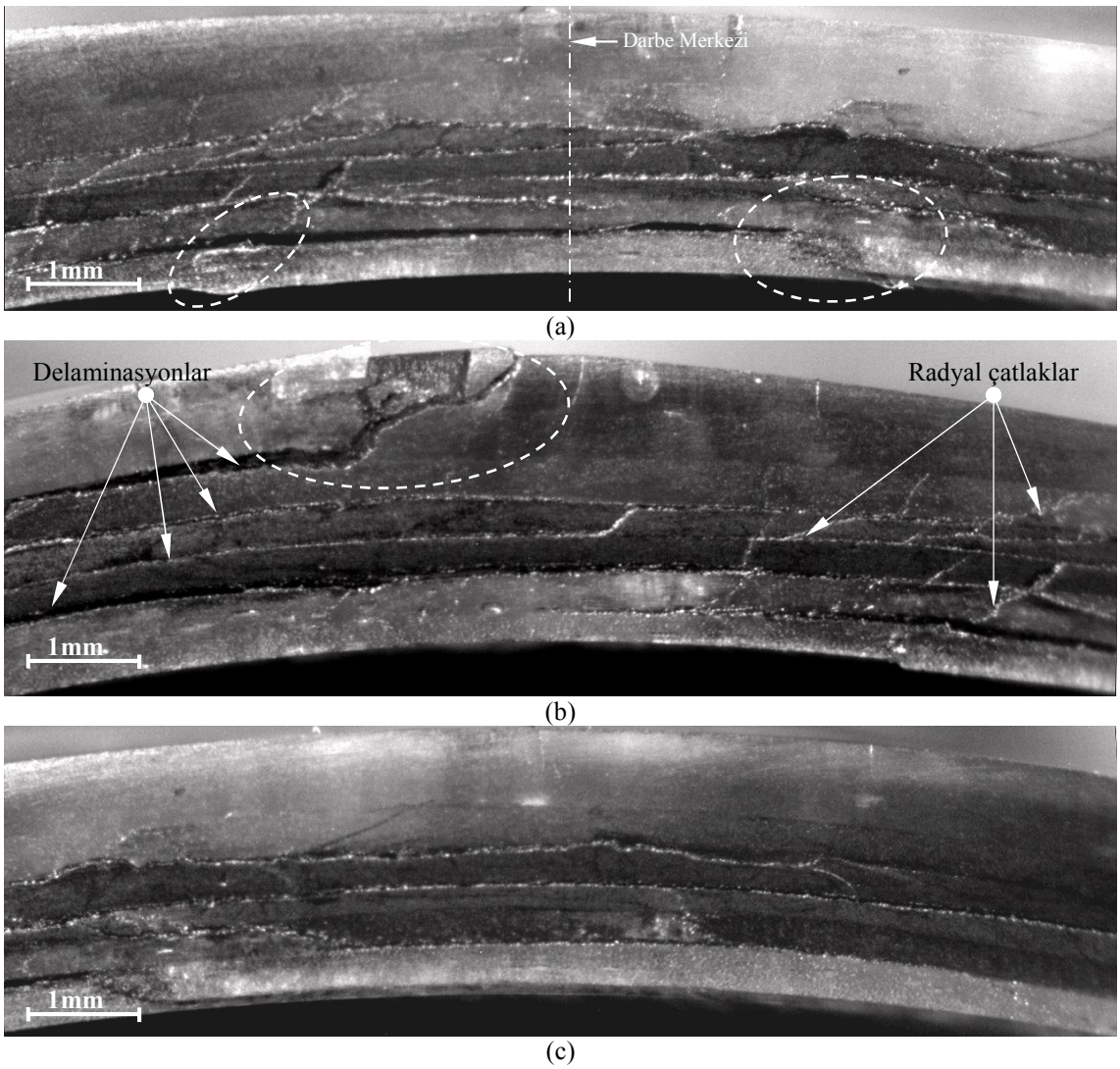


Şekil 7.47 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunelerinin (a-b) %30σ_{HS} ve (c-d) %50σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası dış ve iç görünüşü

Numuneler hasarın yoğun oluştuğu darbe bölgesinden radyal yönde kesilmiştir. Numuneler makro ve mikro hasar incelemeleri için hazırlanırken hasar bölgesinde ilave hasar oluşturulmamıştır.

%30σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.48, 49 ve 50'de 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde 99.982 çevrim yapmış numunenin radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde, darbe esnasında oluşan hasarlara ek olarak yorulma sonrası oluşan hasarlar çok rahat görülebilmektedir. Darbe ön hasarlı borularda darbeden kaynaklı dış ve iç yüzey matris çatlakları, radyal matris çatlakları ve tabaka ayrılmalarının oluşturduğu bir hasar mekanizması meydana gelmiştir.

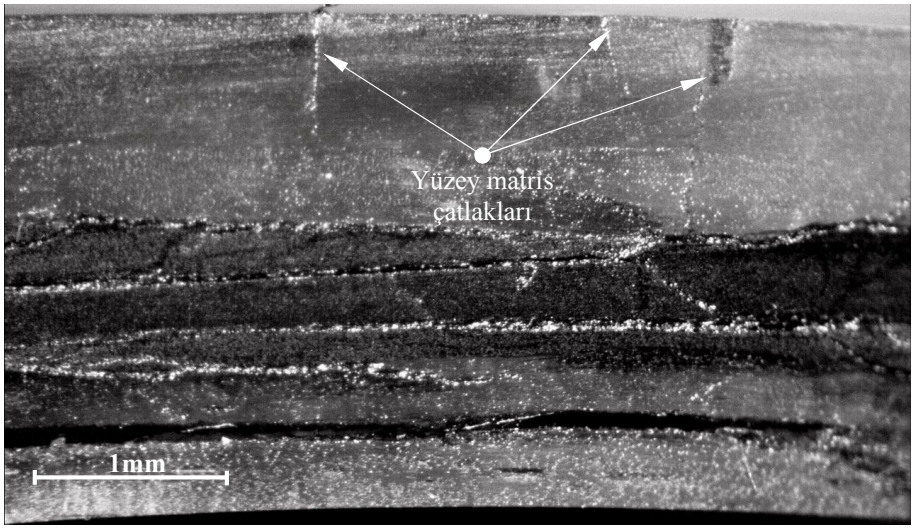
Bu hasarlar; düşük gerilme seviyesinde yorulma yapılmasına ragmen ilk çevrimlerde terleme şeklinde sızıntı hasarına sebep olmuştur. Şekil 7.48a'da görüldüğü ğibi darbe merkezinin hemen altında $+75^{o}$ cam tabakada iç yüzey matris çatlakları oluşmuştur.



Şekil 7.48 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin $\%30\sigma_{HS}$ gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan c) darbe merkezinin sağından

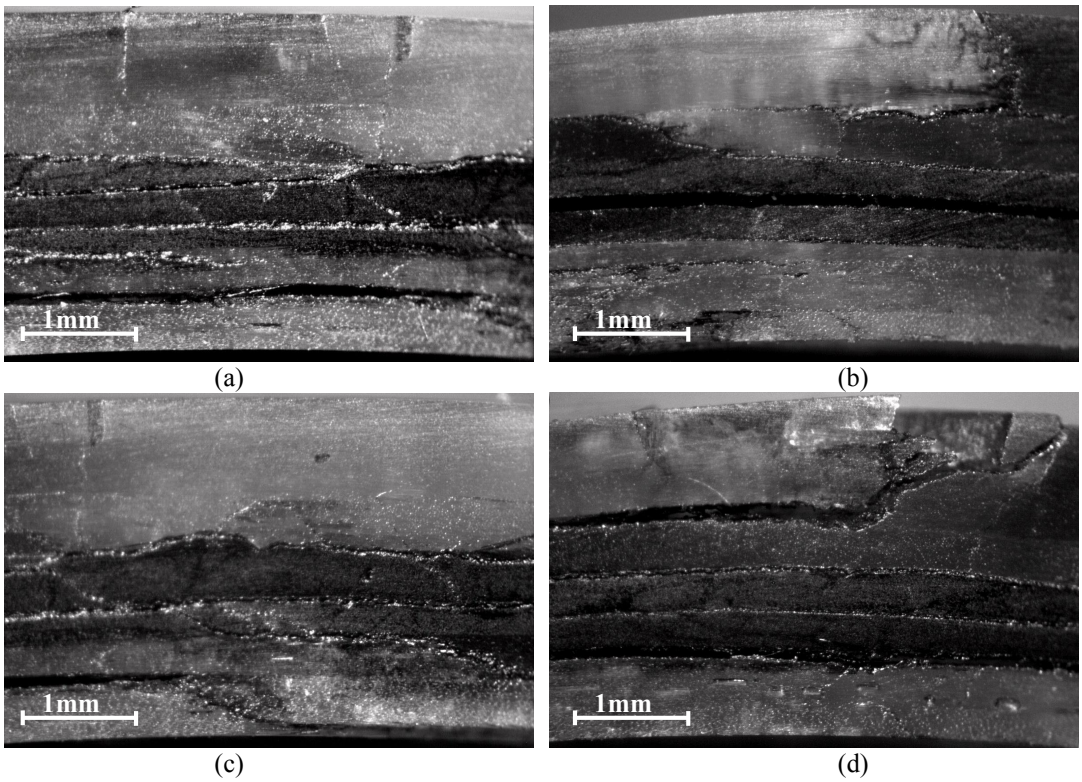
Şekil 7.48'de ve Şekil 7.49'da darbeden kaynaklı mevcut hasarların yorulmanın etkisi ile ilerlediği ve yeni radyal ve yüzey matris çatlaklarının oluştuğu görülmektedir.

Şekil 7.48b'de darbe merkezinden 1-1,5 cm mesafede yarılma şeklinde dış yüzey matris çatlağı görülmektedir. İç yüzey matris çatlağından geçen basınçlı yağ yorulmanın etkisiyle büyüyen tabaka ayrılmasını ve radyal çatlakları kullanarak karbon tabakasını geçmiş ve yüzey matris çatlaklarına ulaşmıştır. Terleme şeklinde başlayan sızıntı, bu hasarlar aracılığıla yoğun sızıntı hasarı şeklinde sonuç hasarına dönüşmüştür.



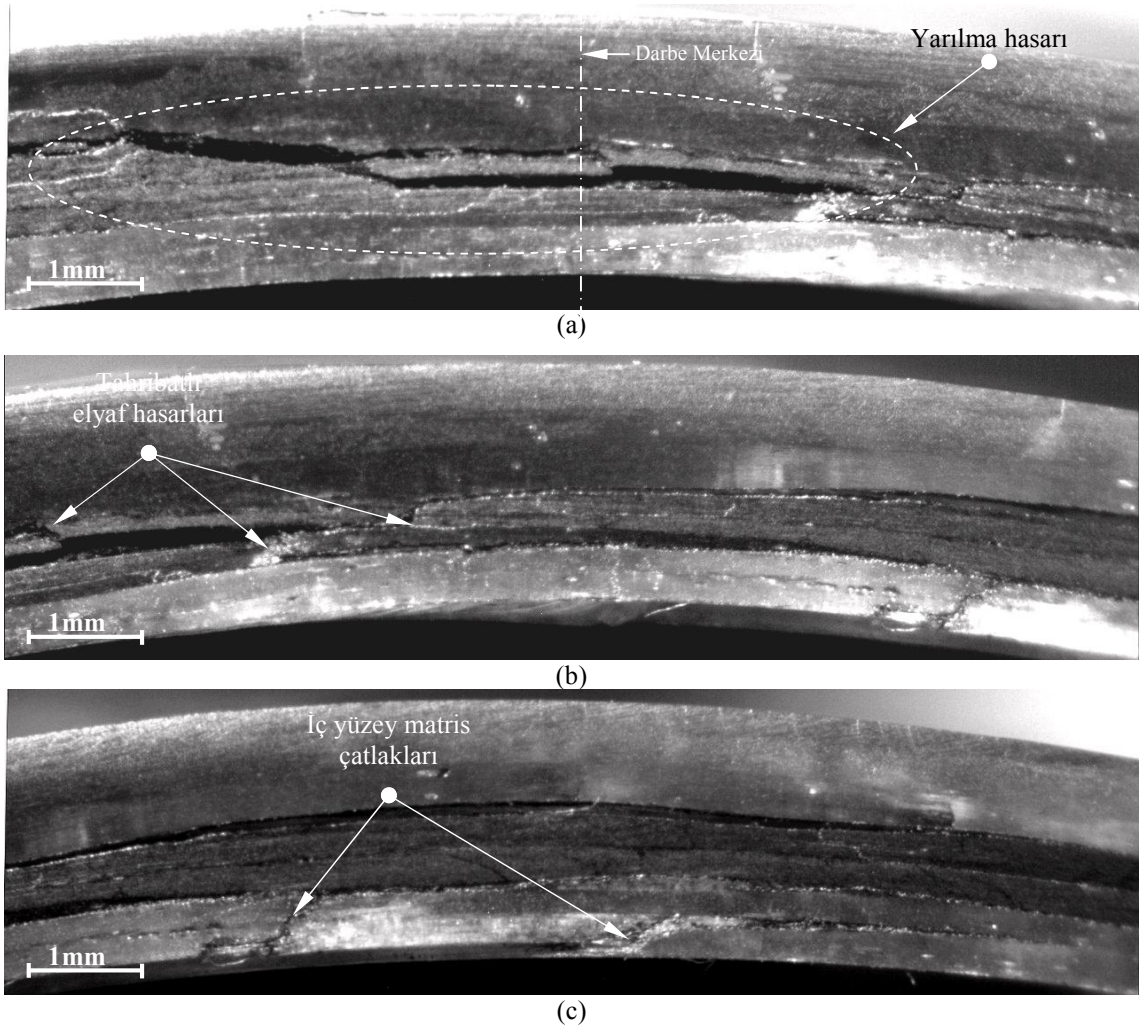
Şekil 7.49 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerlerinde darbe merkezinin yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi

Şekil 7.50'de yoğun sızıntıyı oluşturan hasarlar toplu şekilde verilmiştir.



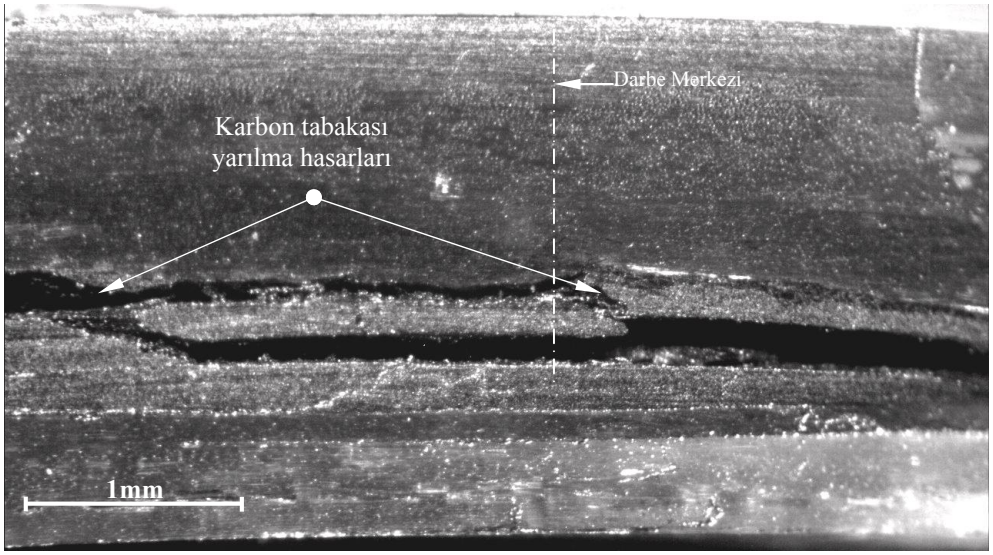
Şekil 7.50 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan iç ve dış yüzey matris çatlakları

%50σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.51, 52 ve 53'te 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde 1047 gibi düşük çevrimde oluşan radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde darbe hasarlarına ek olarak; yorulma sırasında oluşan tabaka ayrılmaları, yarılma hasarı ve karbon tabakasında oluşan elyaf hasarları çok rahat görülebilmektedir.

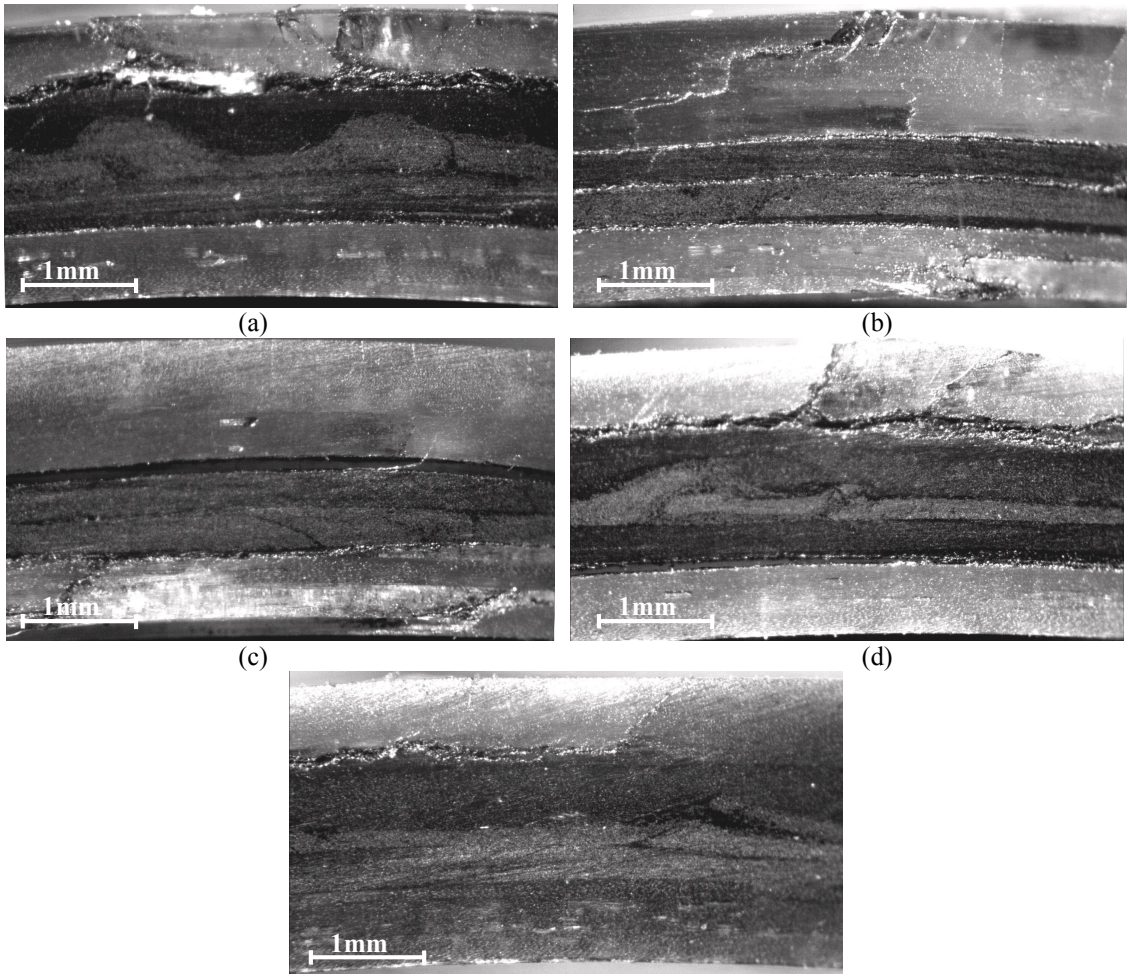


Şekil 7.51 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri a) darbe merkezi b) darbe merkezinin sağından görünüş-1 c) darbe merkezinin sağından görünüş-2

Bu gerilme değerinde, sonuç hasarı kısa bir çevrimde gerçekleştiği için radyal çatlaklar fazla oluşmamıştır. Karbon tabakası gerilme yükünün büyük bir kısmını taşıdığından dolayı darbe merkezinin hemen altında ani yarılma şeklinde hasara uğramıştır. $\pm 75^{o}$ cam tabakasında bulunan iç yüzey matris çatlaklarından geçen basınçlı yağ kısa bir çevrim sonra karbon tabakasında oluşan yarılmadan geçerek $\pm 45^{o}$ cam tabakasında bulunan yuzey matris çatlaklarına ulaşmıştır. Şekil 7.52'de darbe merkezinden alınan mikro yapı resiminde $\pm 55^{o}$ karbon tabakasında oluşan hasar daha net görülmektedir. Darbe merkezinde yoğun su jetini oluşturan hasarlar Şekil 7.53'de mikro yapı resimlerinde daha net olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.52 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde darbe merkezinin yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi



Şekil 7.53 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası iç ve dış yüzey matris çatlakları görünüşü

7.5.3. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma hasar analizi

12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı Karbon, E-camı/epoksi kompozit borular yorulma ömrünü belirlemek amacıyla yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Bu gerilme değerinde darbe ön hasarlı boruların hasar bölgesinde hasarsız borulara kıyasla daha erken, 6 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış borulardan daha geç sonuç hasarı oluşmuştur. Bölüm 7.3.7 de bahsedildiği gibi 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı boruların hasar bölgelerinde darbeden kaynaklı oluşan dış yüzey matris çatlakları, iç yüzey matris çatlakları, radyal matris çatlakları ve tabaka ayrılmalarının (deleminasyonlar) 6 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış borulardan daha az yoğun olduğu tesbit edilmişti. Bu borularda 135,9 MPa düşük gerime değerinde ve 226,5 MPa gerilme değerinde ilk sızıntı darbe bölgesinden terleme şeklinde oluşmuştur.



(a)



(b)

Şekil 7.54 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunelerinin farklı gerilme değerlerinde yorulma sonrası hasarın a) dış yüzey ve b) iç yüzey genel görünüşü

Her iki gerilme seviyesinde ilerleyen çevrimlerde sızıntı su jetine dönüşmüştür. 135,9 MPa en düşük gerilme değerinde kısa bir süre sonra boruda yoğun sızıntı ve yoğun tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı oluşurken 249,2 MPa yüksek gerime değerinde Şekil 7.54'de görüldüğü gibi elyafların kopması ile infilak şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur.

Şekil 7.54'de 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma deneyi sonrası dış ve iç yüzeylerinde oluşan sonuç hasarlarına ait fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde; uygulanan düşük gerilme değerlerinden yüksek gerilmelere doğru bakıldığında 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde numunelere benzer şekilde, uygulanan gerilme oranlarının artması ile oluşan sonuç hasarların arttığı görülmektedir. Numunelerin boyunda ve çapında belirgin bir deformasyon görülmemiştir.

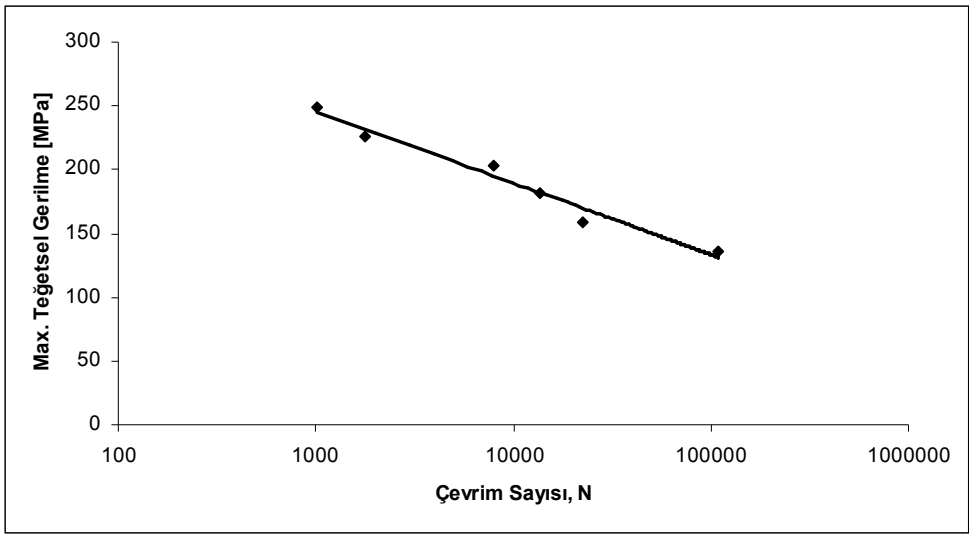
Çizelge 7.7'de 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde, darbe ön hasarlı numunelerle yapılan yorulma deneylerine ait ortalama deney sonuçları verilmiştir.

Çizelge 7.7. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayısı

Test no	% gerilme σ_{HS}=453 (MPa)	Maksimum teğetsel gerilme (MPa)	Minimum teğetsel gerilme (MPa)	Sonuç hasar çevrimi
1	30	135,9	6,8	109531
2	35	158,5	7,9	22341
3	40	181,2	9	13503
4	45	203,9	10,2	8012
5	50	226,5	11,3	1783
6	55	249,2	12,5	1018

Çizelge 7.7'de yorulma çevrim sayıları incelendiğinde; 226,5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numunelerde darbe hasarsız ve 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan borularda olduğu gibi yorulma ömürlerinde ani bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni; $\pm 55^{o}$ karbon tabakasında darbe ön hasar bölgesinin yüksek gerilme değerlerinde yorulma hasarının daha hızlı gelişmesidir. Bu gerilme değerlerine ait Şekil 7.54'de bulunan hasar fotoğraflarına bakıldığında 249,2 MPa gerilme değerinde hasarın özellikle $\pm 75^{o}$ cam ve $\pm 55^{o}$ karbon tabakasında elyaf kopması şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Şekil 7.55'de darbe ön hasarlı boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi, hasarsız ve 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan borulara benzer şekilde gerilme değeri düştükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir.

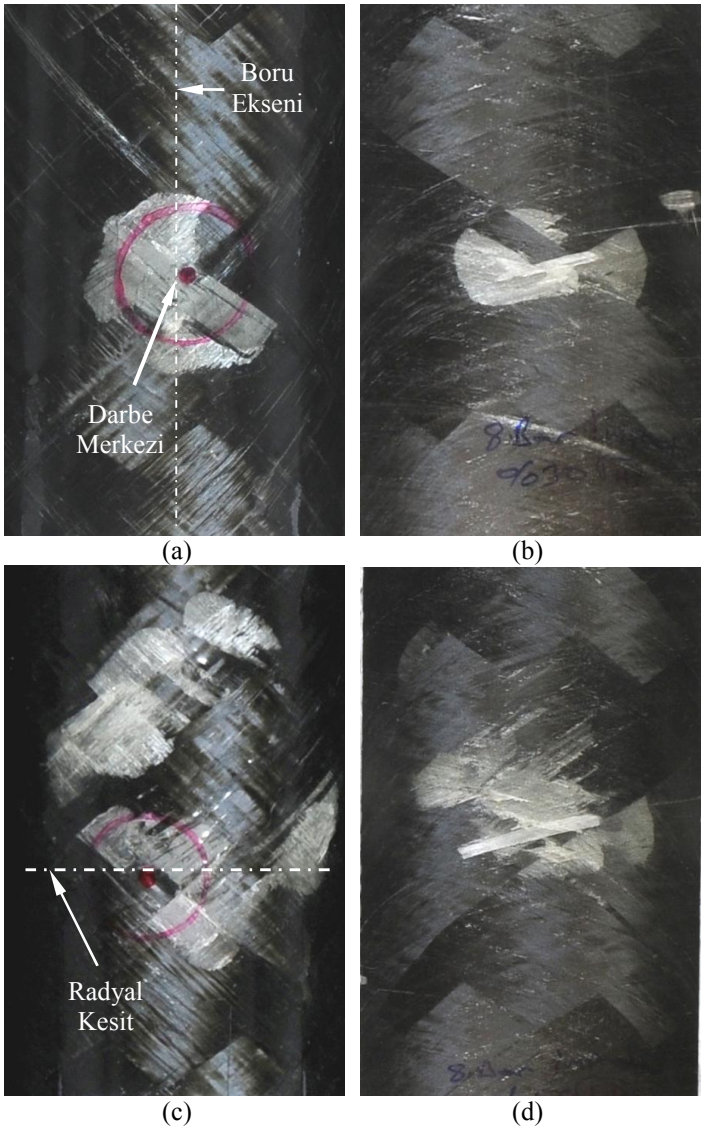


Şekil 7.55 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği

12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı Karbon, E-camı/epoksi kompozit boru numunelerinde yorulma deneylerinde oluşan sonuç hasarlarının makro ve mikro yapılarınında incelemesi yapılmıştır. Hasar incelemelerinde hasarsız ve 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan borularda olduğu gibi yorulma sonrası $\%30\sigma_{HS}$ ve $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde hasara uğrayan deney numuneleri kullanılmıştır. Numunelerin makro hasar fotoğrafları Şekil 7.56'de görüldüğü gibi birebir aynı ölçekte aynı bölgeden alınmıştır.

Yorulma sonrası $\%30\sigma_{HS}$ ve $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerlerinde hasara uğrayan deney numuneleri karşılaştırıldığında, $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerinde hem dış yüzeyde hemde iç yüzeyde oluşan hasarlar $\%30\sigma_{HS}$ gerilme oranına göre daha yüksek tahribatlı ve daha geniş bir alana yayılmıştır. Şekil 7.56'da $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerinde $\pm75^{o}$ cam tabakasında elyaf kopması şeklinde oluşan hasar net bir şekilde görülmektedir. Mikro yapılarını inceleyebilmek için makro hasar incelemesinde alınan numuneler kullanılmıştır.

12 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış numuneler hasarın yoğun oluştuğu darbe bölgesinden radyal yönde kesilmiş ve radyal kesitlerin mikro hasarı incelenmiştir. Numuneler makro ve mikro hasar incelemeleri için hazırlanırken hasar bölgesinde ilave hasar oluşturulmamıştır.

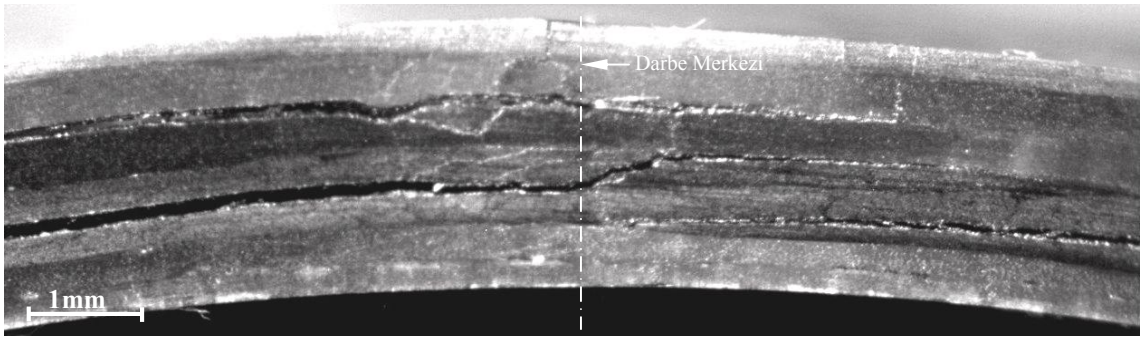


Şekil 7.56 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunelerinin (a-b) %30σ_{HS} ve (c-d) %50σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası dış ve iç görünüşü

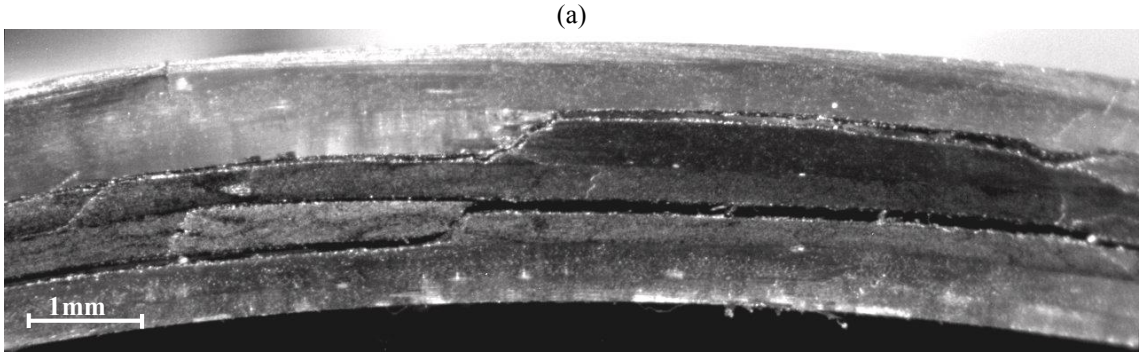
%30σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.57, 58 ve 59'da 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde 109.531 çevrim yapmış numunenin radyal kesit hasar bölgesi incelendiğinde, darbe esnasında oluşan hasarlara ek olarak yorulma sonrası oluşan hasarlar çok rahat görülebilmektedir. 12 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış darbe ön hasarlı borularda darbeden kaynaklı, dış ve iç yüzey matris çatlakları, radyal matris çatlakları ve tabaka ayrılmalarının oluşturduğu hasar mekanizmaları 6 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış darbe ön hasarlı borulardan daha az meydana

gelmiştir. Bundan dolayı sızıntı ve sonuç hasarı 6 MPa teğetsel ön gerilmeye göre daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir.

Bu hasarlar; ilerleyen çevrimlerde terleme şeklinde sızıntı hasarına sebep olmuştur. Şekil 7.57'de darbeden kaynaklı mevcut hasarların yorulmanın etkisi ile ilerlediği ve yeni radyal matris çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. Şekil 7.57a'da ve Şekil 7.59'da görüldüğü gibi darbe merkezinde -45^{o} cam tabakada dış yüzey matris çatlağı oluşmuştur.



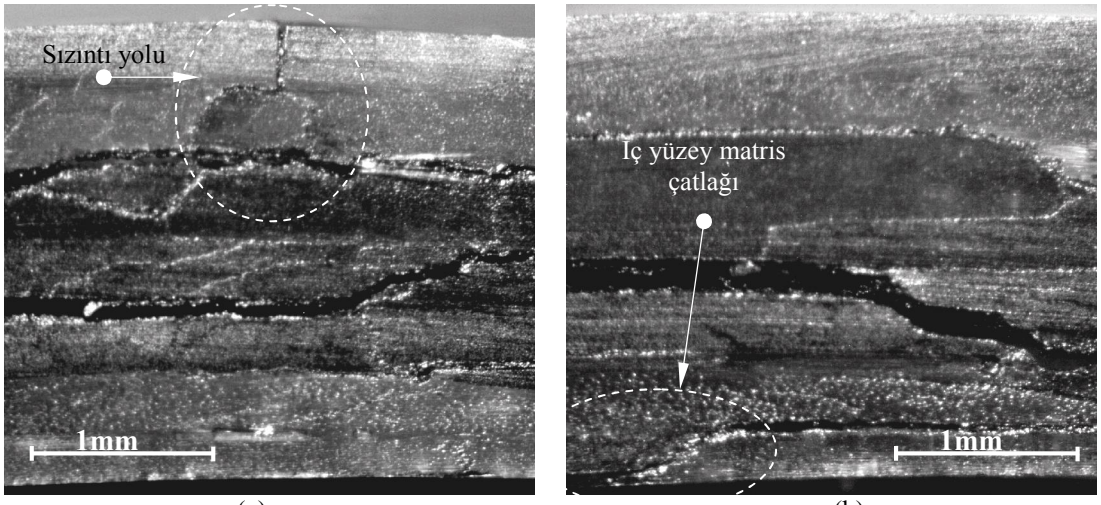
(a)



(b)

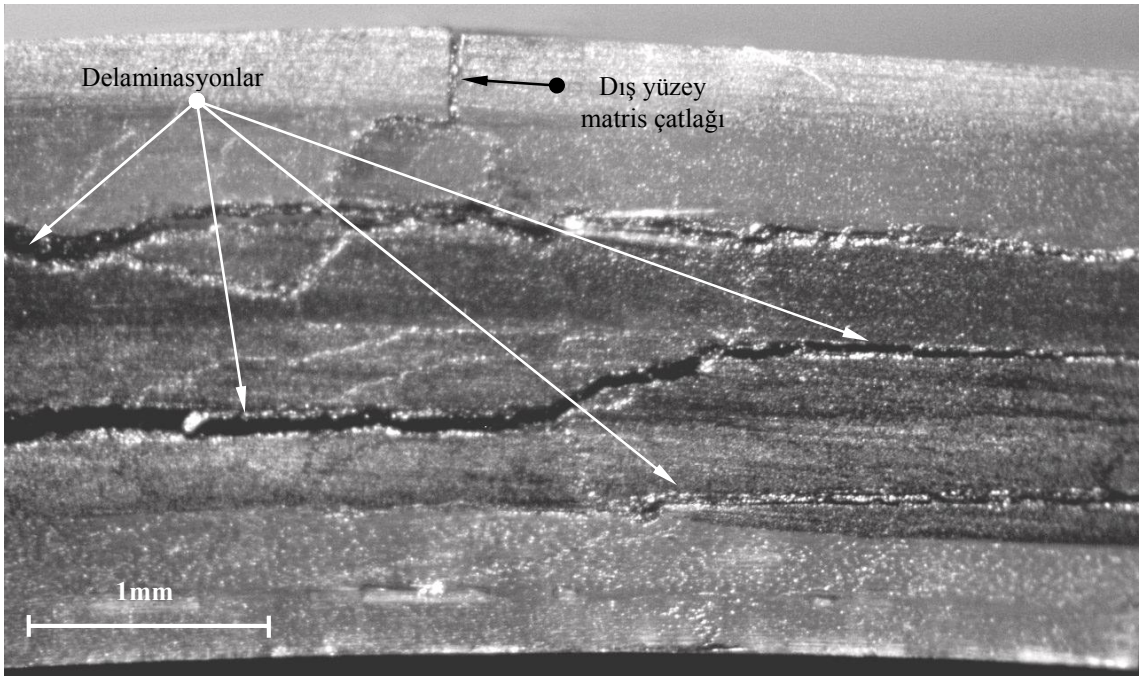
Şekil 7.57 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan görünüş

Yorulmanın etkisiyle ilerleyen çevrimlerde numunenin iç kısmında Şekil 7.58b'de görülen iç yüzey matris çatlağından dışa doğru tabakalar arasından ve radyal çatlaklarından ilerleyen basınçlı yağ Şekil 7.58a'de görülen yüzey matris çatlağını sızıntı yolu olarak kullanmıştır. Sızıntı bu hasar yolundan sonuç hasarına yakın çevrimlerde damlacık şeklinde gerçekleşmiş ve ilerleyen çevrimlerde de su jetine dönüşmüştür. 109.531 çevrimde yoğun su jeti ve tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur.



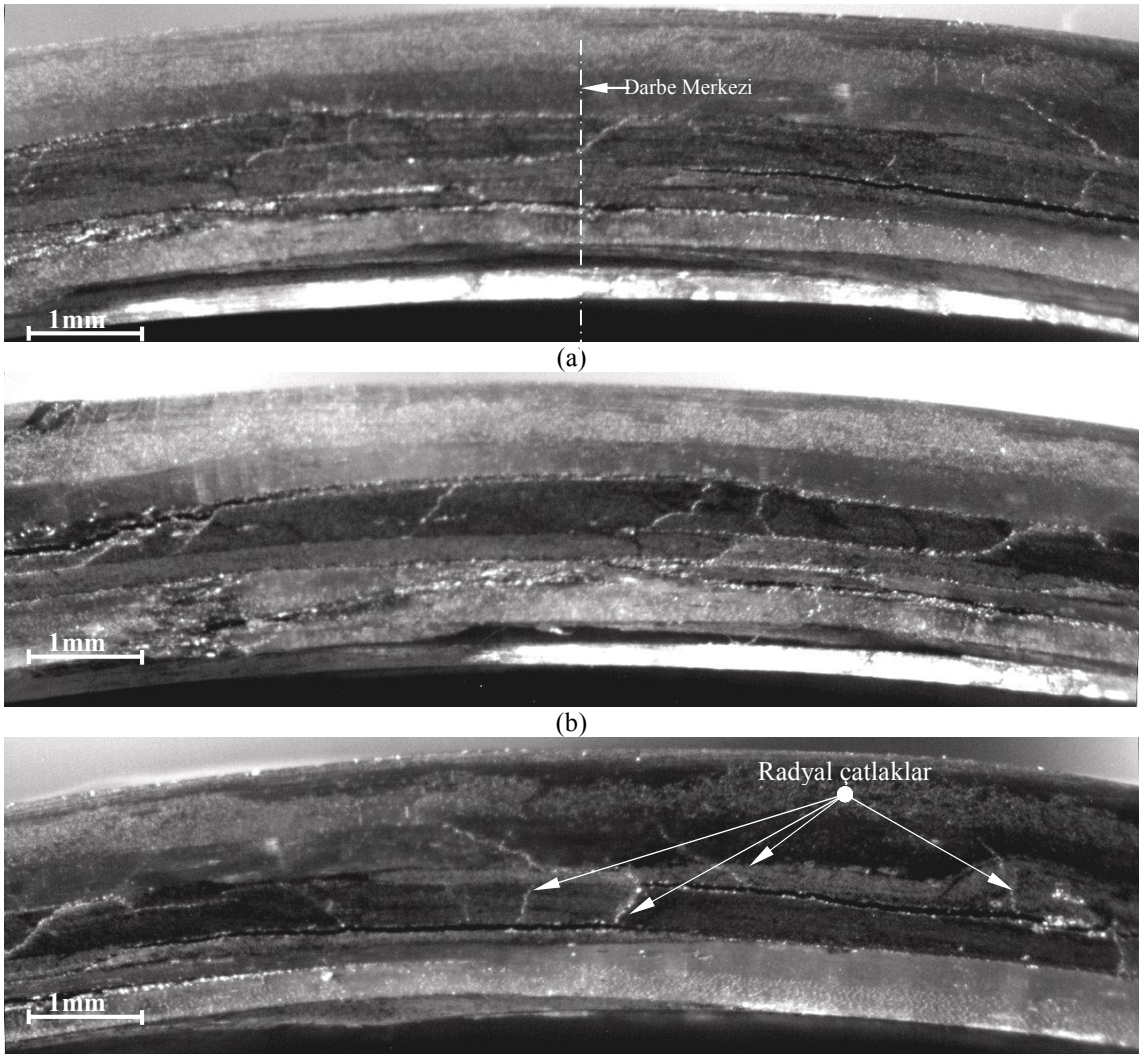
(a) (b)

Şekil 7.58 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan iç ve dış yüzey matris çatlakları



Şekil 7.59 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde darbe merkezinin yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi

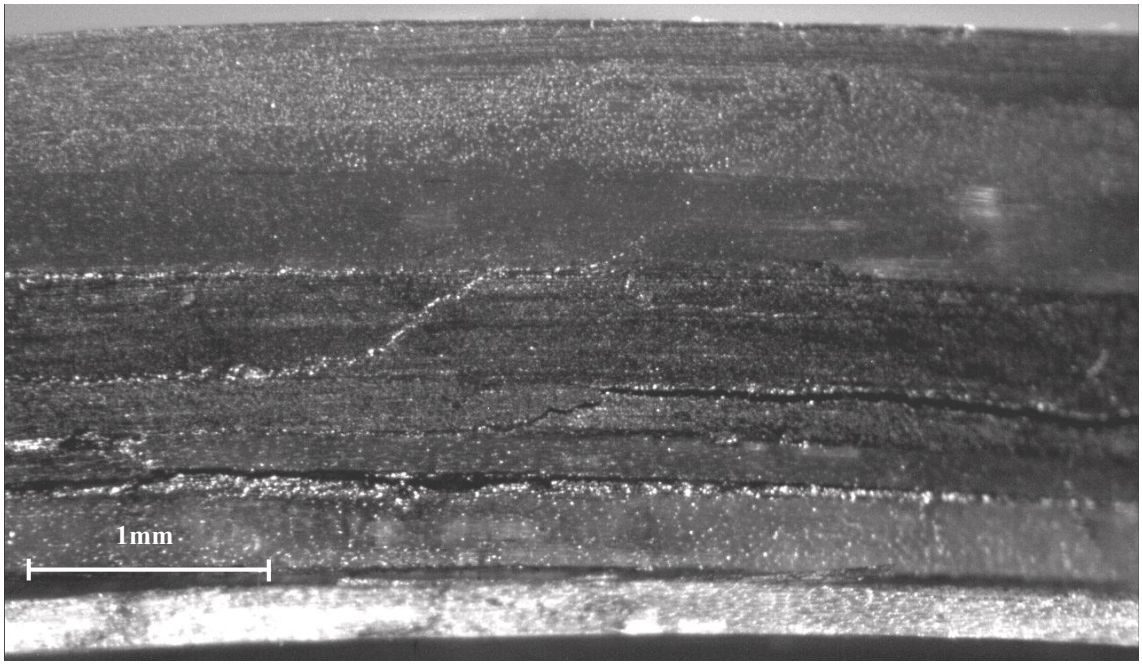
%50σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.60, 61 ve 62'de 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde 1783 gibi düşük çevrimde oluşan radyal kesit hasar bölgeleri incelenmiştir. Darbe hasarlarına ek olarak; yorulma esnasında oluşan ve ilerleyen tabaka ayrılmaları, tabakaları birbirine bağlayan transfer ve radyal çatlaklar, yüksek gerilme değerinden dolayı ±45^o ile ±75^o cam tabakasında oluşan dış ve iç yüzey matris çatlakları çok rahat görülebilmektedir.



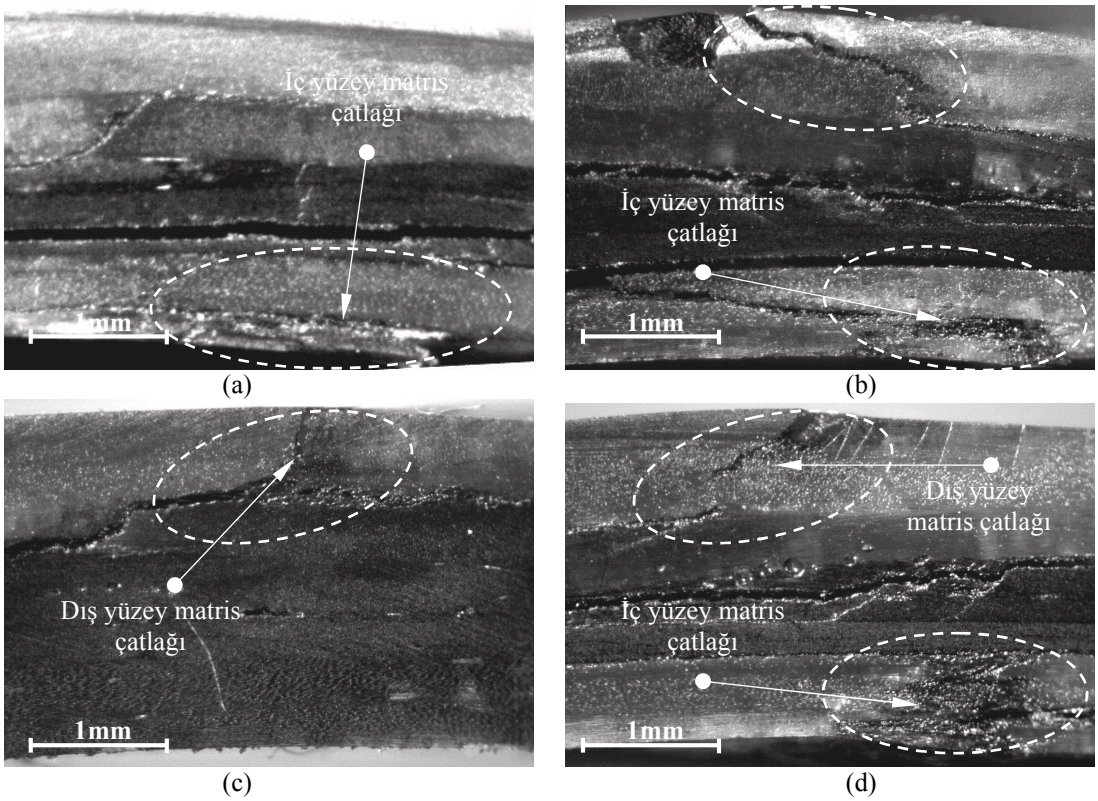
Şekil 7.60 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan görünüş c) darbe merkezinin sağından görünüş

Yorulma deneylerinin sonucunda 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde oluşan hasarlar 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde oluşan hasarlardan daha çok ve daha tahribatlı elyaf hasarların olduğu anlaşılmıştır.

Bu gerilme değerinde sonuç hasarı kısa bir çevrimde gerçekleşmiştir. Şekil 7.62a ve d'de görülen $\pm 75^{o}$ cam tabakasında bulunan iç yüzey matris çatlaklarından geçen basınçlı yağ kısa bir çevrim sonra karbon tabakasında oluşan delaminasyon alanlarına ulaşmıştır. İlerleyen çevrimlerde radyal matris çatlakları vasıtası ile Şekil 7.62b, c ve d'de görülen $\pm 45^{o}$ cam tabakasında bulunan dış yüzey matris çatlaklarına ulaşmıştır. Darbe merkezi çevresinde birçok noktadan yoğun su jetini oluşturan hasarlar, geniş bir deleminasyon alanı ve tahribatlı elyaf hasarlı bir sonuç hasarına sebep olmuşlardır.



Şekil 7.61 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde darbe merkezinin yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi



Şekil 7.62 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan iç ve dış yüzey matris çatlakları

7.5.4. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma hasar analizi

18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı Karbon, E-camı/epoksi kompozit borular yorulma ömrünü belirlemek amacıyla yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Bu gerilme değerinde darbe ön hasarlı boruların hasar bölgesinde hasarsız borulara kıyasla daha erken, 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış borulardan daha geç sonuç hasarı oluşmuştur. Bölüm 7.3.7 de bahsedildiği gibi; hibrit borular ince cidarlı olmalarına rağmen uygulanan ön gerilmenin artışından dolayı serbest bir şekilde eğilemediklerinden; oluşan hasarın dış yüzey, iç yüzey ve radyal matris çatlaklarından ziyade sadece tranfer çatlaği ve tabaka ayrılmasına doğru yöneldiği tespit edilmişti. Dış yüzey, iç yüzey matris çatlaklarının olmayışı, delaminasyon ve radyal matris çatlaklarınında az oluşu özellikle yorulma deneylerinde sızıntı hasarının geç oluşmasına sebep olmuştur.

18 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunelerinin hasar gelişimine genel olarak bakıldığında hasarsız boruların hasar gelişimine benzemektedir. 135,9 MPa en düşük gerilme değerinde 124.962 yüksek çevrimlerde numunenin dışında bulunan $\pm 45^{o}$ cam tabakasında elyaf sarım açısı doğrultusunda oluşan çatlakların yani elyaf matris ara yüzeyi ayrılmasının (debonding) mikro çatlak şeklinde oluştuğu görülmüştür. Aynı gerilme değerinde yorulmanın etkisi ile yüksek çevrimlerde oluşan matris yüzey çatlaklarında ilk sızıntı darbe bölgesinden terleme şeklinde oluşmuştur. İlerleyen çevrimlerde matris yüzey çatlaklarınında büyümesiyle sızıntı su jetine dönüşmüştür. Bu gerilme değerinde kısa bir süre sonra borularda yoğun sızıntı ve yoğun tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur.

226,5 MPa yüksek gerilme değerinde terleme ve damlacık şeklinde sızıntı hasarı tesbit edilmemiştir. 2169 sonuç hasar çevriminde karbon tabakasını ani tahribatı ile basınçlı sıvı $\pm 45^{o}$ cam tabakasına ulaşmıştır. Bu durum darbe merkezi yakınlarında basınçlı sıvınında etkisi ile ani dış yüzey matris çatlakları oluşturmuştur. Çok kısa bir çevrimde darbe merkezi çevresinde birçok noktadan yoğun su jetini oluşturan hasarlar, geniş bir deleminasyon alanı ve tahribatlı elyaf hasarlı bir sonuç hasarına sebep olmuşlardır. 249,2 MPa en yüksek gerime değerinde Şekil 7.63'de görüldüğü gibi elyafların kopması ile infilak şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur.

Şekil 7.63'de 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılmış darbe ön hasarlı hibrit boruların yorulma deneyi sonrası dış ve iç yüzeylerinde oluşan sonuç hasarlarına ait fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde; uygulanan düşük gerilme değerlerinden yüksek gerilmelere doğru bakıldığında 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde numunelere benzer şekilde, uygulanan gerilme oranlarının artması ile oluşan sonuç hasarların arttığı görülmektedir. Numunelerin boyunda ve çapında belirgin bir deformasyon görülmemiştir.



(a)

(b)

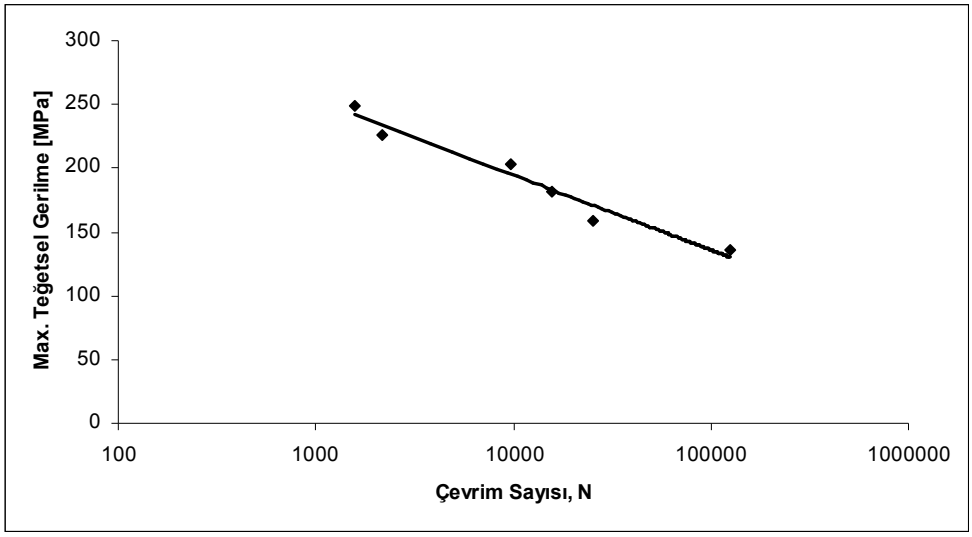
Şekil 7.63 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunelerinin farklı gerilme değerlerinde yorulma sonrası hasarın a) dış yüzey ve b) iç yüzey genel görünüşü

Çizelge 7.8'de 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı numunelerle yapılan yorulma deneylerine ait ortalama deney sonuçları verilmiştir. Yorulma çevrim sayıları incelendiğinde; 225.5 MPa ve 249,2 MPa gerilme değerlerinde yorulmaya tabi tutulan numunelerde darbe hasarsız ve 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan borularda olduğu gibi yorulma ömürlerinde ani bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir

Çizelge 7.8. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların ortalama yorulma sonuç hasar çevrim sayısı

Test no	% gerilme σ_{HS}=453 (MPa)	Maksimum teğetsel gerilme (MPa)	Minimum teğetsel gerilme (MPa)	Sonuç hasar çevrimi
1	30	135,9	6,8	124962
2	35	158,5	7,9	25375
3	40	181,2	9	15823
4	45	203,9	10,2	9763
5	50	226,5	11,3	2169
6	55	249,2	12,5	1560

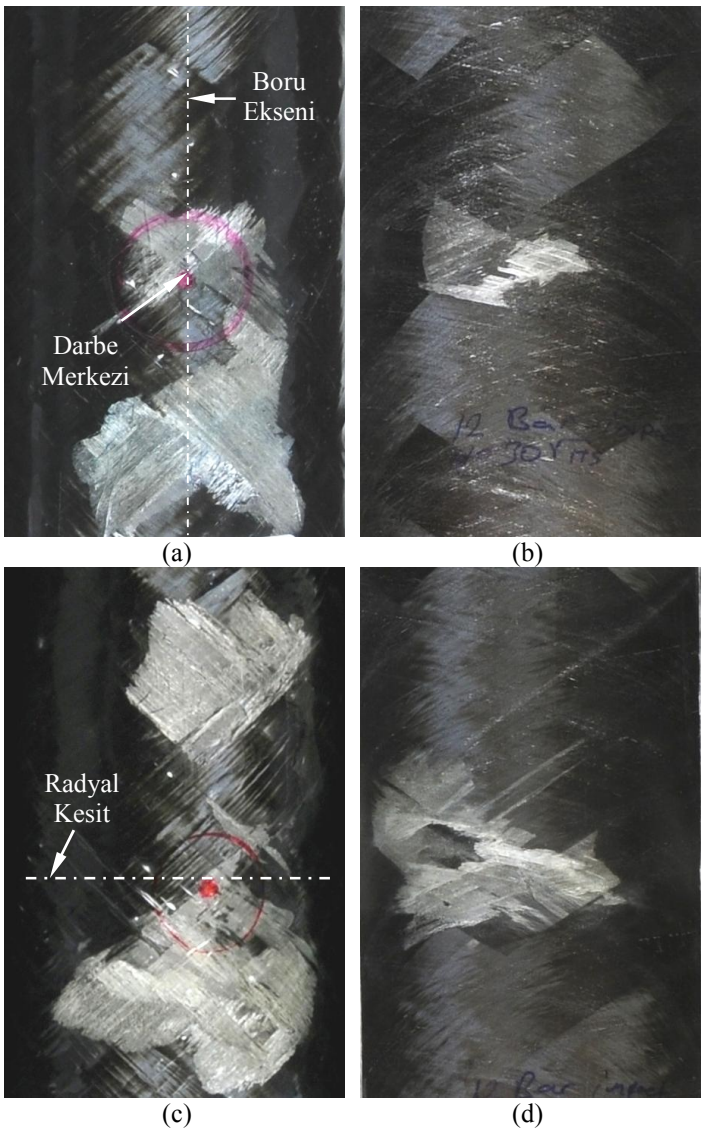
Şekil 7.64'de darbe ön hasarlı boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı gerilme-çevrim sayısı grafiği verilmiştir. Grafikte'de görüldüğü gibi, hasarsız ve 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan borulara benzer şekilde gerilme değeri düştükçe yorulmaya tabi tutulan numunelerde sonuç hasarı daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir.



Şekil 7.64. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği

18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı Karbon, E-camı/epoksi kompozit boru numunelerinde yorulma deneylerinde oluşan sonuç hasarlarının makro ve mikro yapılarınında incelemesi yapılmıştır. Hasar incelemelerinde hasarsız, 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulan borularda olduğu gibi yorulma sonrası %30σ_{HS} ve

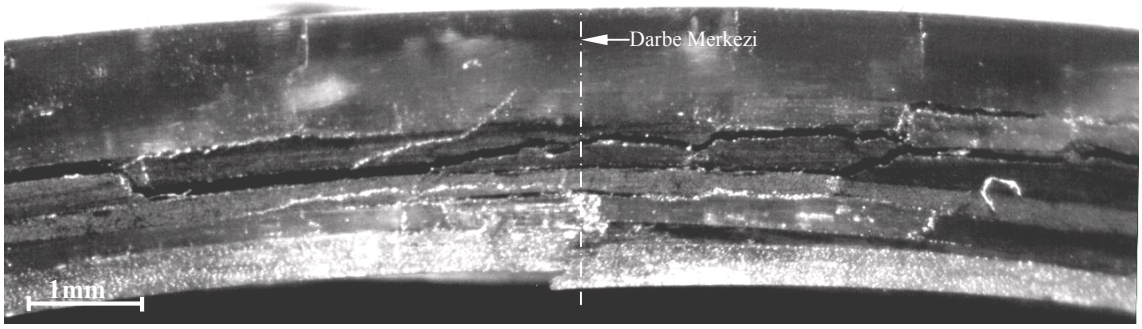
%50σ_{HS} gerilme değerlerinde hasara uğrayan deney numuneleri kullanılmıştır. Yorulma sonrası %30σ_{HS} ve %50σ_{HS} gerilme değerlerinde hasara uğrayan deney numuneleri karşılaştırıldığında, %50σ_{HS} gerilme değerinde hem dış yüzeyde hemde iç yüzeyde oluşan hasarlar %30σ_{HS} gerilme oranına göre daha yüksek elyaf hasarlı ve daha geniş bir alana yayılmıştır. Mikro yapılarını inceleyebilmek için makro hasar incelemesinde alınan numuneler kullanılmıştır.



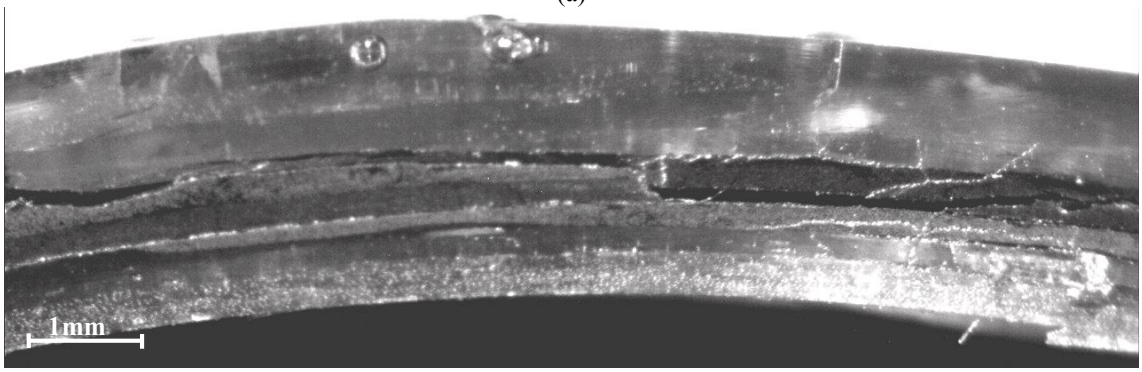
Şekil 7.65. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunelerinin (a-b) %30σ_{HS} ve (c-d) %50σ_{HS} gerilme değerlerinde yorulma sonrası dış ve iç yüzey görünüşü

18 MPa teğetsel ön gerilmede hasarlandırılmış borularda mikro yapı hasarını incelenmek için numuneler hasarın yoğun oluştuğu darbe bölgesinden radyal yönde kesilmiştir.

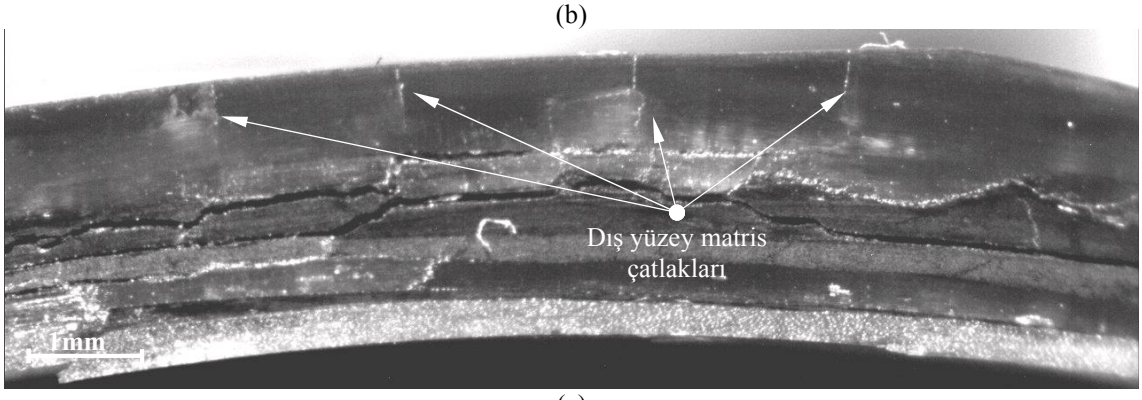
%30σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.66, 67 ve 68'de 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde 124.962 çevrim yapmış numunenin radyal kesit hasar bölgesi incelenmiştir. Darbe esnasında oluşan hasarlara ek olarak yorulma sırasında oluşan; dış yüzey matris çatlakları, iç yüzey matris çatlakları, radyal matris çatlakları ve tabaka ayrılmaları çok rahat görülebilmektedir. Bu hasarların yorulma esnasında oluşmasından dolayı sızıntı ve sonuç hasarı 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilmelere göre daha yüksek çevrimlerde gerçekleşmiştir. Şekil 7.66'da görüldüğü gibi darbe merkezinde ve çevresinde -45^{o} cam tabakada dış yüzey matris çatlağı hasarı oluşmuştur. Bu hasarlar; ilerleyen çevrimlerde terleme şeklinde sızıntı hasarına sebep olmuştur.



(a)

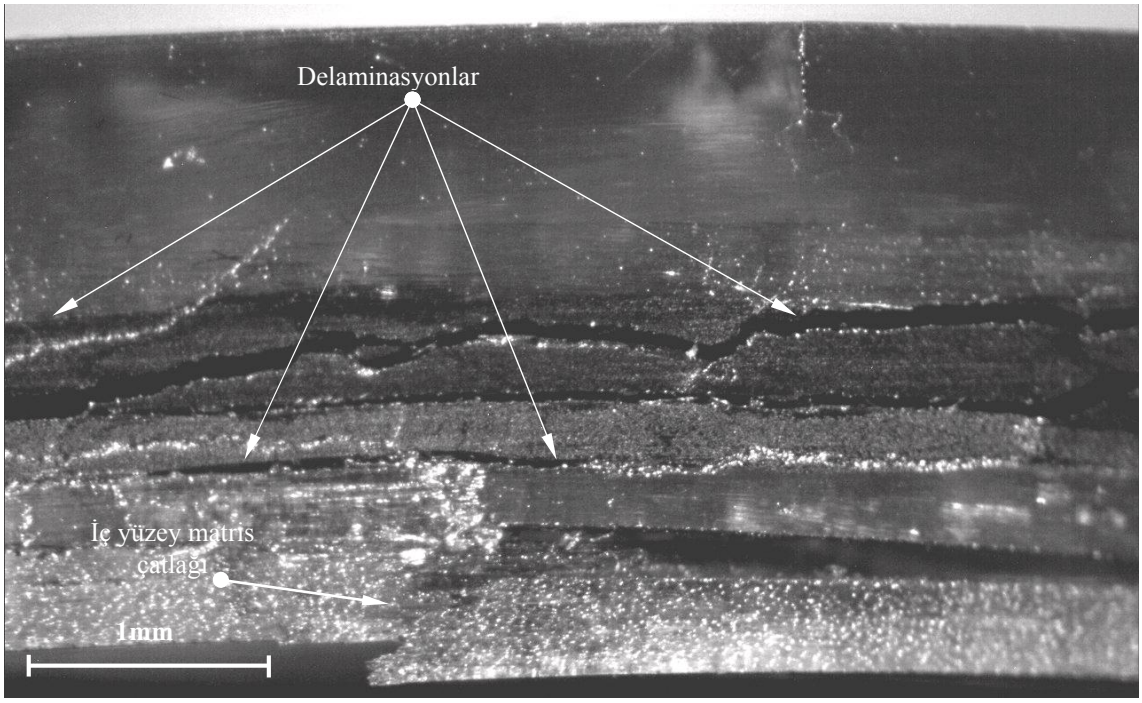


(b)



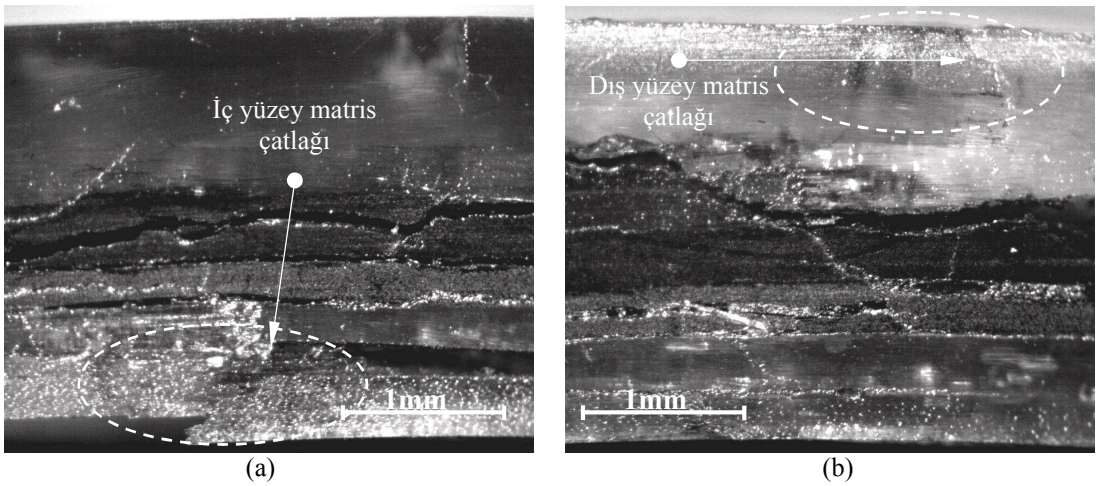
(c)

Şekil 7.66 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan görünüş c) darbe merkezinin sağından görünüş



Şekil 7.67 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde darbe merkezinin yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi

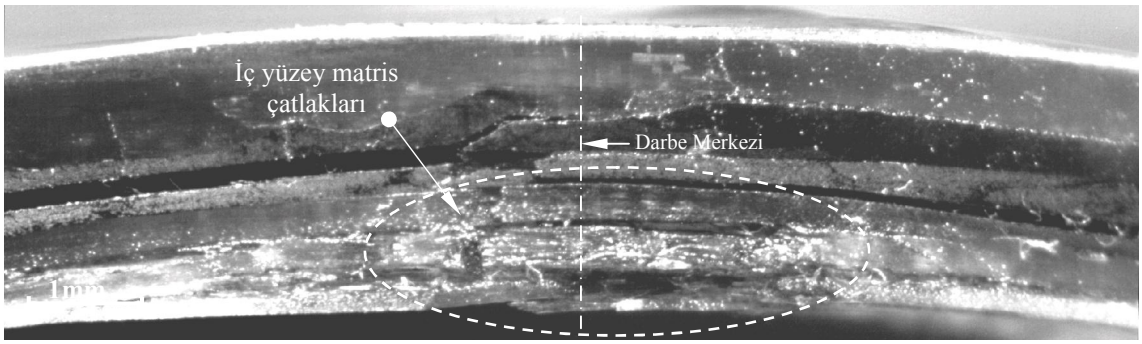
Yorulmanın etkisiyle ilerleyen çevrimlerde numunenin iç kısmında Şekil 7.67'de görülen iç yüzey matris çatlağından dışa doğru tabakalar arasından ve radyal çatlaklarından ilerleyen basınçlı yağ Şekil 7.66c'de görülen yüzey matris çatlağını sızıntı yolu olarak kullanmıştır. Sızıntı bu hasar yolundan sonuç hasarına yakın çevrimlerde damlacık şeklinde sızıntı hasarına, ilerleyen çevrimlerde de su jetine dönüşmüştür. 124.962 çevrimde yoğun su jeti ve yoğun tabaka ayrılması şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur. Şekil 7.68'de iç ve dış yüzey matris çatlakları gösterilmiştir



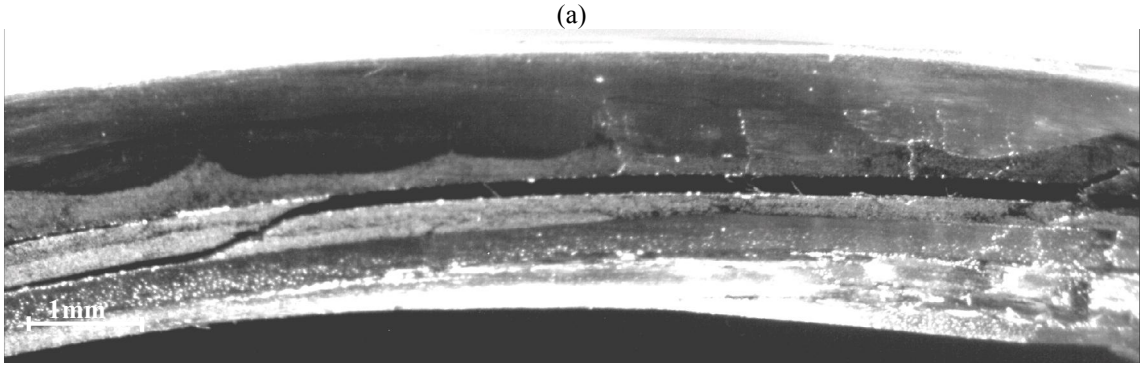
(a) (b)

Şekil 7.68 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %30σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan iç ve dış yüzey matris çatlakları

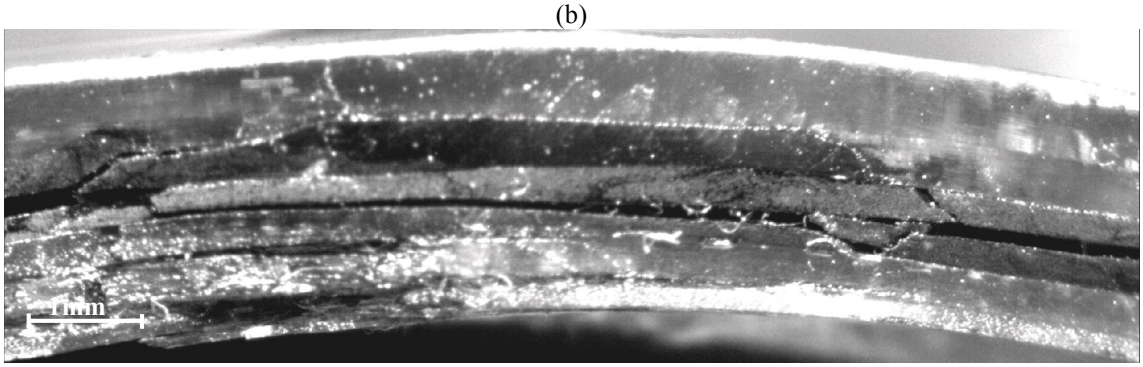
%50σ_{HS} gerilme değerinde; Şekil 7.69, 70, 71, 72 ve 73'de 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinde 2169 gibi düşük çevrimde oluşan radyal kesit hasar bölgeleri incelenmiştir. Darbe hasarlarına ek olarak; yorulma esnasında oluşan ve ilerleyen tabaka ayrılmaları, tabakaları birbirine bağlayan transfer ve radyal çatlaklar, yüksek gerilme değerinden dolayı ±55^o karbon tabakasında oluşan elyaf hasarları, ±45^o ile ±75^o cam tabakasında oluşan dış ve iç yüzey matris çatlakları çok rahat görülebilmektedir.



(a)



(b)

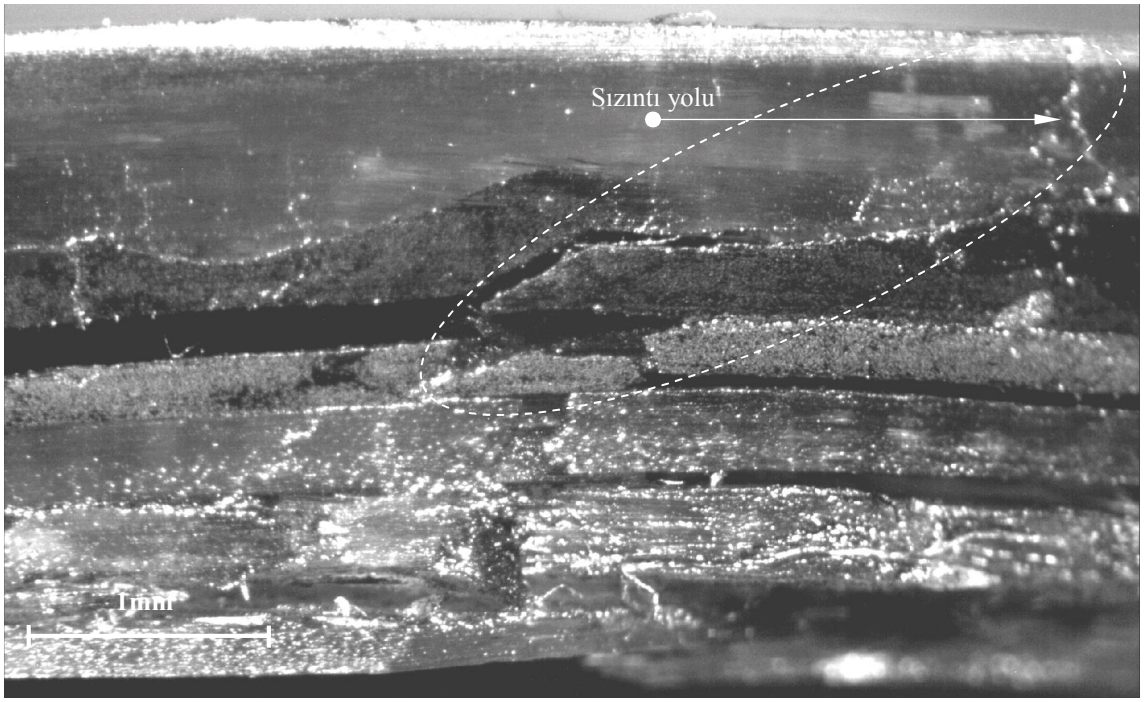


(c)

Şekil 7.69 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgeleri a) darbe merkezinden b) darbe merkezinin solundan görünüş c) darbe merkezinin sağından görünüş

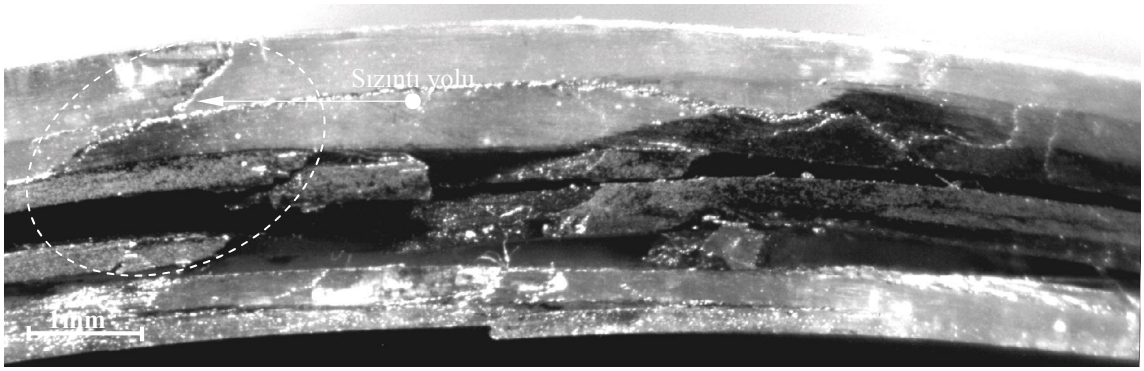
Şekil 7.69'da yorulma deneylerinin sonucunda 226,5 MPa yüksek gerilme etkisi ile oluşan hasarlar 135,9 MPa düşük gerilme değerlerinde oluşan hasarlardan daha çok ve daha tahribatlı elyaf hasarların oldugu görülmektedir. Bölüm 7.3.7 de bahsedildiği gibi; teğetsel ön gerilme değerinin artışıyla darbe ön hasarının daha az ve daha küçük

bir alanda oluştugu tesbit edilmiştir. Bu gerilme değerinde darbe ön hasarının daha az olması sonuç hasar çevriminin 6 MPa ve 12 MPa teğetsel ön gerilme değerlerinden daha yüksek olmasına sebep olmuştur. Şekil 7.69a'da ve Şekil 7.70'de görülen ±75^o cam tabakasında bulunan iç yüzey matris çatlaklarından geçen basınçlı yağ kısa bir çevrim sonra karbon tabakasında oluşan delaminasyonlardan ve radyal matris çatlaklarından ilerleyerek ±45^o cam tabakasına ulaşmıştır. İlerleyen çevrimlerde Şekil 7.73a, b ve c'de görülen ±45^o cam tabakasında bulunan dış yüzey matris çatlaklarına ulaşmıştır. Darbe merkezi çevresinde birçok noktadan yoğun su jetini oluşturan hasarlar, geniş bir deleminasyon alanı ve elyaf kopması şeklinde bir sonuç hasarına sebep olmuşlardır.



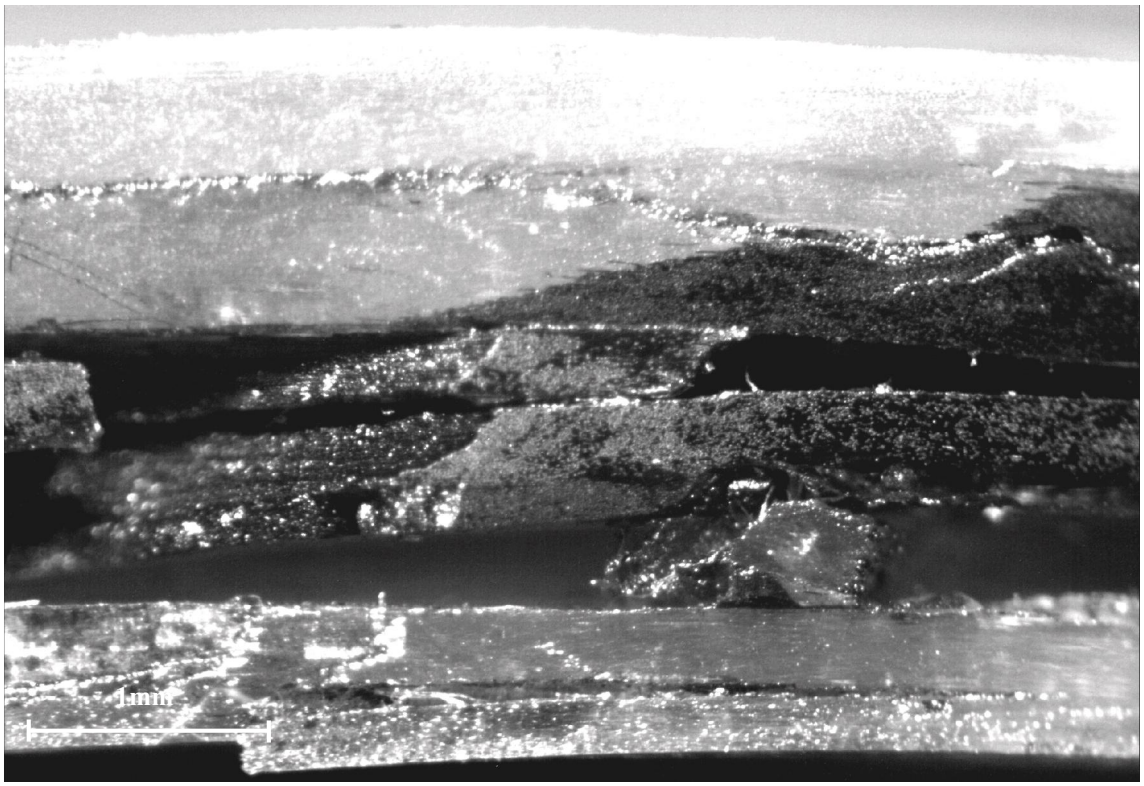
Şekil 7.70 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde darbe merkezinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi

Şekil 7.71 ve 72'de görüldüğü gibi 226,5 MPa yüksek gerilme değerlerinden dolayı karbon tabakasında oluşan tahribatlı elyaf hasarları çok rahat görülebilmektedir. Bu gerilme değerinde sonuç hasarını karbon tabakası belirlemiştir. ±75^o cam tabakasında bulunan tahribatlı hasarın ardından ±55^o karbon tabakasında bulunan elyafların kopmasıyla tahribatlı hasar neticesinde basınçlı sıvı ±45^o cam tabakasında darbe merkezi çevresinde terleme ve damlacık şeklinde sızıntı hasarı oluşmaksızın birçok noktadan yoğun su jetinin oluşmasıyla geniş bir deleminasyon alanı ve tahribatlı bir sonuç hasarına sebep olmuştur.



Şekil 7.71 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunesinin $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerinde darbe merkezinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi

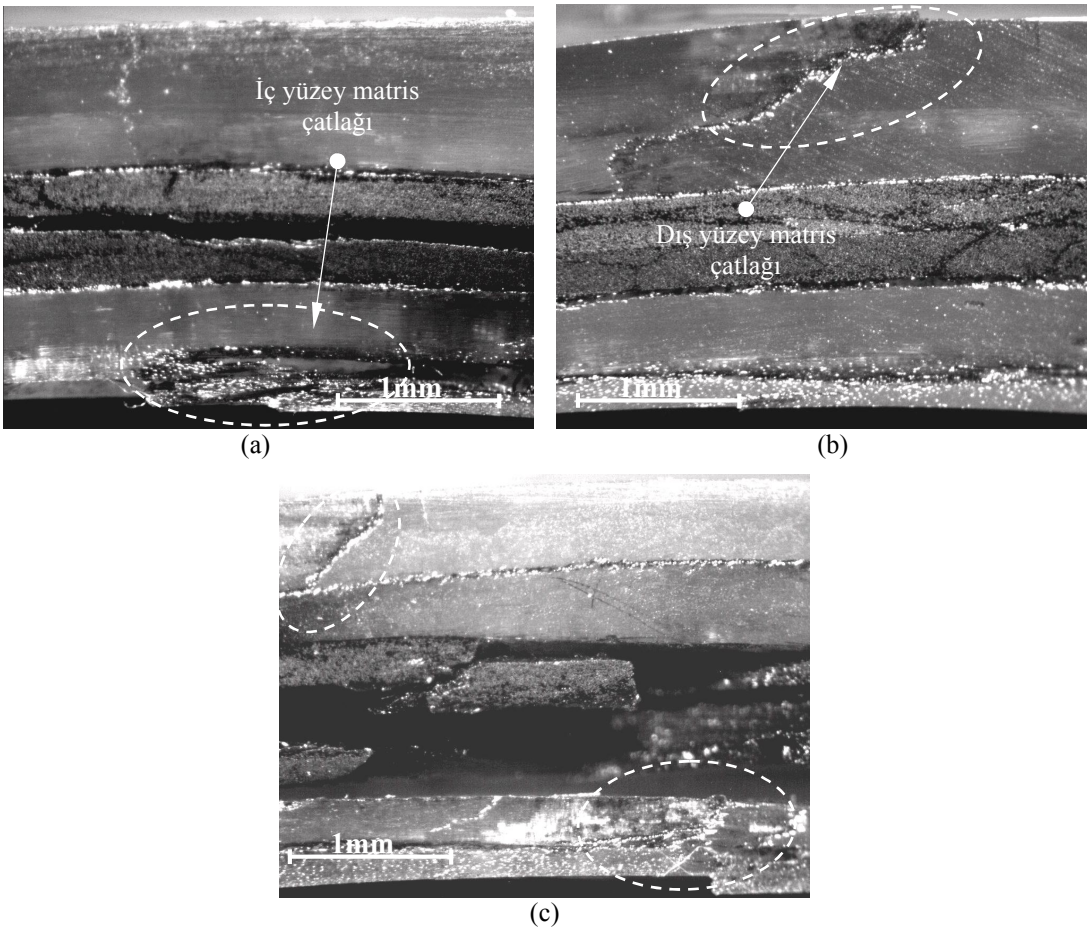
Şekil 7.72'de karbon tabakasında oluşan elyaf kopması ve tabaka parçalanması şeklinde tahribatlı hasarlar daha net görülebilmektedir. Özellikle yüksek gerilme değerlerinde karbon tabakalarında elyaf kopması şeklinde tahribatlı hasarlar oluştuğu deneyler neticesinde tesbit edilmiştir.



Şekil 7.72 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit boru numunesinin $\%50\sigma_{HS}$ gerilme değerinde darbe merkezinde yorulma sonrası oluşan radyal kesit hasar bölgesi

Şekil 7.73'de görüldüğü gibi yüksek gerilme değerlerinde sonuç hasarı oluşmadan hemen önce basınçlı yağ $\pm55^{o}$ karbon tabakası ile $\pm45^{o}$ cam tabakası arasında geniş bir deleminasyon alanı oluşturmaktadır.

Bu delaminasyon alanlarının sonlandığı bölgelerdede basınçlı yağın etkisiyle eğilmeden kaynaklanan matris çatlakları oluşmakta ve yoğun sızıntının birçok yerden bir anda oluşmasını sağlamaktadır.



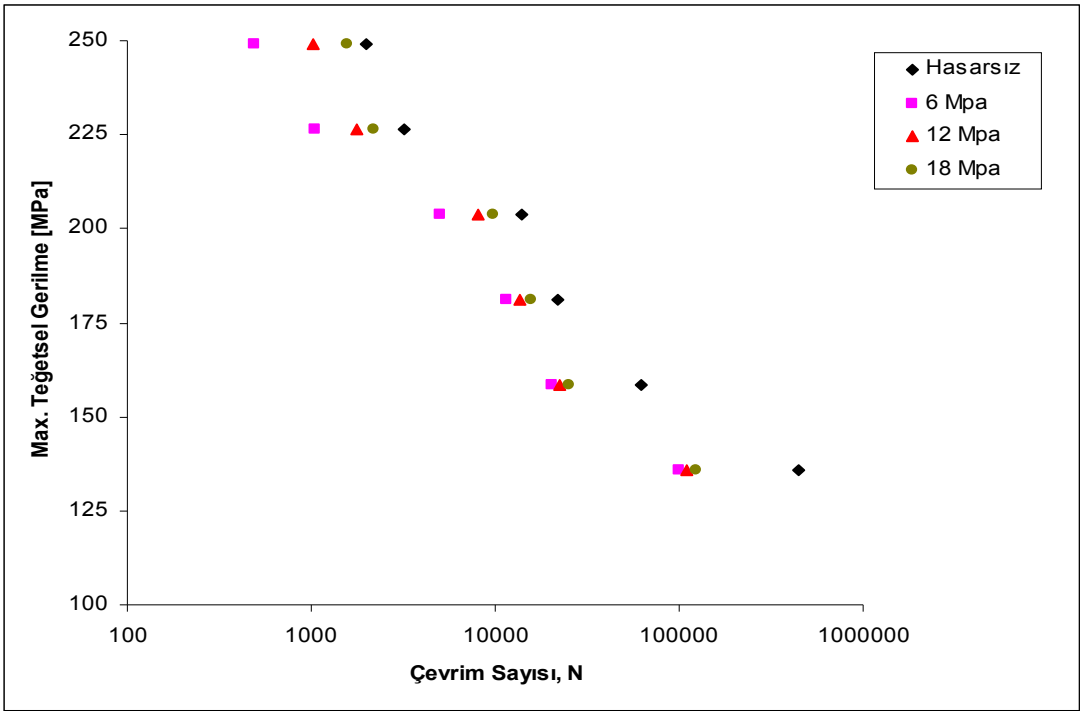
Şekil 7.73 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ile hasarlandırılmış hibrit kompozit boru numunesinin %50σ_{HS} gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan iç ve dış yüzey matris çatlakları

Yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarı yorulma çevrim sayıları Çizelge 7.9'da, gerilme-çevrim sayısı grafikleri Şekil 7.74'te birlikte verilmiştir. Grafik ve Çizelge genel olarak incelendiğinde; düşük gerilme seviyelerinde darbe ön hasarlı numunelerde 135,9 MPa gerilme değerinde sonuçlar 158,5 MPa gerilme değeri ile kıyaslandığında yorulma ömründe ≈ % 500 oranında ciddi bir artış gerçekleşmiştir. Hasarsız numunelerde bu oran ≈ % 700'e kadar çıkmaktadır.

Yüksek gerilme seviyelerinde darbe ön hasarlı numunelerde 203,9 MPa gerilme değerinde sonuçlar 226,5 MPa gerilme değeri ile kıyaslandığında yorulma ömründe ≈%450 oranında ciddi bir artış gerçekleşmiştir. Hasarsız numunelerde bu oran ≈ %435'e kadar çıkmaktadır.

Çizelge 7.9 Hasarsız ve 6, 12 ve 18 MPa ön gerilme değerlerinde darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların sonuç hasarı ortalama yorulma çevrim sayıları

Test no	% gerilme σ_{HS}=453 (MPa)	Maks. teğetsel gerilme (MPa)	6 MPa ön gerilmede darbe hasarlı numunelerde	12 MPa ön gerilmede darbe hasarlı numunelerde	18 MPa ön gerilmede darbe hasarlı numunelerde	Hasarsız numunelerde
1	30	135,9	99982	109531	124962	444200
2	35	158,5	20449	22341	25375	62327
3	40	181,2	11618	13503	15823	21883
4	45	203,9	5026	8012	9763	13878
5	50	226,5	1047	1783	2169	3184
6	55	249,2	492	1018	1560	1971



Şekil 7.74. Hasarsız ve darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasar gerilme-çevrim sayısı grafiği

Bu çalışmalarda kullanılan hasarsız ve darbe ön hasarlı numuneler için 135,9 MPa düşük gerilme değeri ve 203,9 MPa yüksek gerilme değeri yorulma ömrü açısından kritik gerilme değerleri olarak tanımlanabilir. Yorulma deneylerinde kullanılan bütün gerilme değerlerinde Şekil 7.74'te görüldüğü gibi 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde darbe ön hasarlı numunelerden darbe hasarsız numunelere dogru yorulma ömrünün arttığı anlaşılmaktadır.

8. SONUÇLAR

Hibrit kompozit boru tasarımı aşamasında; ±55° sarım açısında karbon/cam/cam, cam/karbon/cam ve cam/cam/karbon malzeme sıralarında üç farklı boru üretilmiştir. Yapılan ön çalışmalarında cam/karbon/cam malzeme sıralamasında üretilen borunun darbe ve statik patlatma deneylerinde diğer borulara nazaran daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Statik patlatma deneylerinde oluşan hasarın ilk karbon tabakasında oluştuğu gözlenmiştir. Darbe deneylerinde ise öncelikle karbon tabakasında oluşacak darbe hasarının engellemek amacı ile; hasarın borunun dış yüzeyinde bulunan tabakada yoğunlaşması istenmiştir. Aynı zamanda üretilen borular hem darbeye karşı hemde yorulmaya karşı dirençli olması düşünülmüştür. Yapılan ön çalışmalar ve literatür araştırması dikkate alınarak cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açısına sahip hibrit borular üretilmiştir. Yüksek sarım açısı ile yüksek rijitlik sağlama açısından borunun iç yüzeyine cam elyaflar ±75° sarılmıştır. Statik ve yorulma yükünü taşıması açısından ve yüksek rijitlik sağlamak için yüksek elastiklik modüllü karbon elyaflar borunun orta tabakasına ±55° sarılmıştır. Düşük hızlı darbe enerjisini absorbe etmede en etkili olan dış tabakaya; darbe yükünü yüzeye eşit dağıtması ve eğilme yüklerini karşılaması amacı ile cam elyaflar ±45°'de sarılmıştır. Üretilen hibrit kompozit borularla yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların başlıcaları aşağıda verilmiştir;

1. Bu çalışmadan elde edilen bulgular daha önce yapılmış olan çalışmalardan elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır. Kara (2012, 2014)'nın çalışması ile mevcut çalışmada aynı şartlarda üretilen borular, ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 32 bar iç basınç (ön gerilme) değerinde, farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Kara (2012, 2014)'nın yaptığı çalışmada, $(\pm 55°)_3$ sarım açılı boruları 5, 10 ve 15 J enerjili düşük hızlı darbe deneylerinden sonra iç basınç patlatma testlerine tabi tutmuştur. Her bir enerji seviyesinde hasarlanan numuneler darbe noktasından hasara uğramış ve patlama mukavemetlerinde düşme meydana gelmiştir. Mevcut çalışmada ise Kara (2012, 2014)'dan farklı olarak, karbon takviyesi ile cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açılı 6 tabakalı hibrit kompozit borular kullanılmıştır. Kullanılan borulara 32 bar iç basınç (ön gerilme) değerinde 10 ve 15 J enerjili düşük hızlı darbe deneylerinde hasarlandırılan numuneler, iç basınç patlatma testlerine tabi

tutulmuştur. Darbe hasarlı numunelerde sonuç hasarı darbe noktasından farklı yerlerde meydana gelmiş ve patlama mukavemetlerinde düşme meydana gelmemiştir. Darbe hasarlı borular, yüksek rijitlik ve yüksek ön gerilme değerlerinden dolayı hasarsız borular gibi davranmıştır. Bu çalışma neticesinde, düşük hızlı darbe deneylerinde kullanılacak darbe enerjisi 20 J olarak belirlenmiştir.

2. Üretilen deney numunelerine ANSI/AWWA C950 standardına göre belirlenen işletme basınçlarından 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 ve 32 bar iç basınçlar uygulanmış; 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, ve 48 MPa teğetsel ön gerilme değerleri elde edilmiştir. Teğetsel ön gerilme uygulanan hibrit boru numunelerine 20 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda F-t (temas kuvveti-zaman), F-d (kuvvet-yer değiştirme) grafikleri elde edilmiştir.

3. Farlı teğetsel ön gerime değerlerinde sabit bir enerji seviyesinde düşük hızlı darbe uygulanan hibrid borularda oluşan hasarlar Bölüm 7.3.2'de verilen Çizelge 7.2 yardımı ile yorumlanmıştır. Darbe esnasında yutulan enerji; düşük ön gerilme değerlerinde hasarlandırılan numunelerde, ağırlıklı olarak yoğun hasar gelişimine sebep olmuştur. Buna bağlı olarak malzemenin çok hasarlı ve kısa ömürlü olduğu anlaşılmaktadır (Ön gerilme, σ = 3 MPa / Yorulma ömrü, N= 713). Yüksek ön gerilme değerlerinde ise yutulan enerjinin ağırlıklı olarak elastik şekil değişimine harcandığı, böylece malzemenin az hasarlı ve uzun ömürlü olduğu anlaşılmaktadır (Ön gerilme, σ = 30 MPa / Yorulma ömrü, N= 3230).

4. Düşük hızlı darbe deneylerinde darbe öncesinde uygulanan iç basınçtan kaynaklanan teğetsel ön gerilmenin 6 MPa ile 48 MPa aralığında artmasıyla hibrit kompozit boru numunesi üzerinde oluşan en büyük temas kuvveti artmakta, vurucu ile numune arasındaki temas süresi ve yer değiştirme miktarı azalmaktadır. Herbir ön gerilme değerinde oluşan hasarlar incelendiğinde, uygulanan ön gerilme değeri arttıkça darbe ön hasarının azaldığı tespit edilmiştir.

5. Statik iç basınç ve yorulma deneylerinde kullanılacak borulara uygulanacak ön-gerilme değerlerinin tespiti yapılmıştır. Darbe ön hasarlı borular 226,5 MPa (%50 σ_{HS}) gerilme değerinde yorulma yüküne maruz bırakılmıştır. 24 MPa ön gerilme değerinden daha yüksek seviyelerde darbe gören borularda yorulma sonuç hasarının darbe bölgesinin dışında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu nedenle statik iç basınç ve yorulma testleri için 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme değerleri seçilmiştir.

6. Hibrit kompozit boru numunelerinde darbeden dolayı oluşan hasarlar darbe öncesi uygulanan teğetsel ön gerilmenin azalması ile artış göstermektedir. 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılan numunelerde yüzeyde çok küçük matris çatlamaları ve küçük bir delaminasyon alanı oluşmuştur. İlaveten numune kesitinde tabakalar arasında çok az radyal çatlaklar oluşmuştur. 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılan numunelerde yüzeyde belirgin matris çatlamaları oluşurken delaminasyon alanı büyümüştür. Numune kesitinde oluşan tabakalar arası radyal çatlaklar 18 MPa teğetsel ön gerilme değerine göre daha fazladır. 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlandırılan numunede ise en büyük delaminasyon alanı oluşmuştur. Ayrıca yüzeyde oluşan matris çatlamaları, transfer çatlakları ve kesitte oluşan tabakalar arası radyal çatlaklar diğer ön gerilme değerlerindeki darbe hasarlarına göre çok daha fazla olmuştur.

7. Numunede oluşan hasarların artmasıyla beraber numunenin statik iç basınç patlama değeri düşmüştür. Hasarsız boruların statik iç basınç patlama değerlerine göre, 18 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin teğetsel patlama mukavemetinde %9, 12 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin teğetsel patlama mukavemetinde %14,8 ve 6 MPa teğetsel ön gerilme değerinde hasarlanmış numunenin teğetsel patlama mukavemetinde %22,9'luk bir azalma meydana gelmiştir. Darbe deneyleri öncesinde numunelerin teğetsel ön gerilme etkisinde olması nedeniyle, darbe ön hasar bölgesinde tahribatın fazla meydana gelmemesi teğetsel patlama mukavemet değerinde düşmenin çok daha büyük olmasını engellemiştir. Uygulanan ön gerilme değeri arttıkça darbe ön hasarının azaldığı ve statik patlama mukavemetininde arttığı tespit edilmiştir.

8. Hasarsız ve darbe ön hasarlı boruların statik iç basınç patlama deneylerinde oluşan sonuç hasarı numunenin infilak etmesi şeklindedir. 6, 12 ve 18 MPa gerilme değerinde hasarlandırılmış numunelerde sonuş hasarları darbe ön hasar noktalarında gerçekleşmiştir.

9. Cam/karbon/cam malzeme sırasında $\pm 75_g°/\pm 55_c°/\pm 45_g°$ sarım açısına sahip darbe hasarsız ile 6, 12 ve 18 MPa teğetsel ön gerilme altında 20 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış darbe ön hasarlı hibrit kompozit boruların yorulma ömrünü belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelere yorulma yük oranı R=0,05 ve gerilme değeri; hasarsız numunelerin açık uçlu iç basınç patlatma deneylerinde elde edilen teğetsel yönde σ_{HS} maksimum mukavemet değerlerinin %30, %35, %40, %45, %50 ve %55'ı olacak şekilde tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır.

Yorulma deneyleri esnasında tespit edilen üç önemli hasar aşaması belirlenmiş ve sonuç hasar çevrimine göre teğetsel gerilme-çevrim sayısı grafikleri verilmiştir. Bu hasar aşamalarından birincisi, numunelerde terleme veya damlacık şeklinde ilk sızıntının başladığı aşamadır. İkinci hasar aşaması olarak numunede yoğun sızıntının (su jeti) başlaması dikkate alınmıştır. Üçüncü hasar aşaması ise sonuç hasarıdır. Sonuç hasarı; numunenin patlaması veya yoğun tabaka ayrılması neticesinde deneyin sonlandırılmasıdır. Uygulanan ön gerilme değeri arttıkça darbe ön hasarının azaldığı ve yorulma ömrünün arttığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

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

Akkus, N., Kawahara, N., 2000, Bending behaviours of thin composites pipes with reinforced nodes, *Materials Science Research International*, 6:131-5.

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.

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 Standard D2992, 2006, "Standard practice for obtaining hydrostatic or pressure design basis for *fiberglas*s (glass-fiber-reinforced thermosetting-resin) pipe and fittings", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/D2992-06, www.astm.org.

ASTM Standard E1823, 2010a, "Standard terminology relating to fatigue and fracture testing", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, DOI: 10.1520/E1823-10A, www.astm.org.

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

Boniface, L., Ogin, S.L., 1989, Application of the Paris equation to the fatigue growth of transverse ply cracks, *J. Composite Materials*, 23: 735-54.

Bredemo, R., 1992, Damage development during uniaxial fatigue of filament wound tubes, SICOMP Report 92-001. Pitea (Sweden), Swedish Institute of Composites.

Cantwell, W.J., 1988, The influence of target geometry on the 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.

Conder, RL., Newhouse, NL., 1980, Cyclic pressure test of a filament wound vessel containing liquid nitrogen, *Cryogenics*, December, 697-701.

Coo, V.K.S., 1985, Effect of loading path on the failure of fibre reinforced composite tubes, *Journal of Composite Materials*, 19: 525-533.

Curtis, J., Hinton, M.J., Li, S., Reid, S.R., Soden, P.D., 2000, Damage, deformation and residual burst strength of filament-wound composite tubes subjected to impact or quasi-static indentation, *Composites Part B*, 31: 419-433.

Deniz, ME., Karakuzu, R., 2012, Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes, *Composites Part B,* 43: 1130–1138.

Deniz, ME., Ozen, M., Ozdemir, O., Karakuzu, R., Icten, B.M., 2013, Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading, *Composites Part B,* 44: 304-312.

Dieter, G.E., 1976, Mechanical Metallurgy, 2nd Ed; Mc Graw Hill Co. Tokyo, 403-447.

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., 1998, Detection of low-velocity impact damage in glass/epoxy tubes by penetrant method, *Insight, (The Journal of the British Institute for NDT),* 40(2):117-121.

Eldeniz, İ., 1992, Yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde yorulma çatlak büyümesi ve tabaka ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.

Ellyin, F., Martens, M., 2001, Biaxial fatigue behaviour of multidirectional filament wound glass-fiber epoxy pipe, *Composites Science and Technology*, 61: 491-502.

Erkendirci, Ö.F., 2006, Tel takviyeli termoplastik kompozitlerde kırılma davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.*

Ferry, L., Perreux, D., Rousseau, J., Richard, F., 1998, Interaction between plasticity and damage in the behaviour of $[+\Phi,-\Phi]_n$ fibre reinforced composite pipes in biaxial loading (internal pressure and tension), *Composites Part B*, 29B:715-723.

Fuchs, H.O., Stephens, K.I., 1980, Metal Fatigue in Engineering, J. Wiley Sons Inc, N. York, 1-35.

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

Gemi, L., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., Sahin, O.S., 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy $(\pm 75°)_2$ filament-wound pipes under pure internal pressure, *Materials and Design*, 30: 4293-4298.

Güldü, İ., 1995, Cam takviyeli plastik malzemelerde takviye açısının kırılma davranışına etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, *Konya.*

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.

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

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

Günaydın, B., 2003, Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 88s

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

Harris, C.E., Allen, D.H., Nottorf, E.W., 1989, Prediction of Poisson's ratio in cross ply laminates containing matrix cracking and delaminations, *J. Comp. Tec. & Research*, 11(2):53-58.

Hashin, Z., Rotem, A., 1973, A fatigue criterion for fiber reinforced materials, *Journal of Composite Materials*, 7: 448-464.

Henaff- Garden, C., 1990, Influence de la séquence d'empilement sur la fissuration en fatigue des plis transverses de stratifiés a fibres longues, Thèse de Doctorat, *Université de Poitiers*, France.

Hosur, M.V., Adbullah, M., Jeelani, S., 2005, Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites, *Composite Structures*, 67: 253-262.

Hull, D., Legg, M.J., Spencer, B., 1978, Failure of glass polyester filament wound pipe, *Composites*, 9: 17-24.

Hull, D., 1981, An Introduction of Composite Materials, *Cambridge University Press*, 246s

Hwang. W., Han, K.S., 1986, Fatigue of composite material- damage model and life prediction, Composite material Fatigue and fracture, 2nd. Volume ASTM STP 1012, Paul A.Lagace (Vol.Ed.) *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 87-102.

Hwang, W., Han, KS., 1986, Fatigue of Composites–fatigue modulus concepts and life prediction , *Journal of Composite Materials*, 20:154-65.

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.

Jones, C.J., Dickson, R.F., Adam, T., Reiter, H., Harris, B., 1984, The environmental fatigue behaviour of reinforced plastics, Proceedings of the Royal society London Series A: *Mathematical and Physical Sciences*, 396: 31538.

Jones, M.L.C., Hull, D., 1979, Microscopy of failure mechanisms in filament wound pipe, *J. Material Science*, 14:165-174.

Kaddour, AS, Soden, P.D, 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.

Kara, M., 2012, Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 141s.

Kara, M., Uyaner, M., Avcı, A., Akdemir, A., 2014, Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength, *Composites Part B*, 60:507-514.

Kaynak, C., Mat, O., 2001, Uniaxial fatigue behaviour of filament wound glass-fiber epoxy composite tubes, *Composites Science and Technology,* 61: 1833-1840.

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, L.J., Tang, J.N., Sheu, D.Y., 1993, Prediction of fatigue life for matrix dominated composite laminates, *Composites Science and Technology,* 46:21-28

Mahdi, E., Hamouda, A.M.S., Sahari, B.B., Khalid, Y.A., 2003, Effect of hybridisation on crushing behaviour of carbon/glass fibre/epoxy circular–cylindrical shells, *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 49-57.

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.

Martens, M.G., 1999, Biaxial monotonic and fatigue behaviour of a multidirectional glass fibre reinforced epoxy pipe, Ph. D. *Thesis University of Alberta*, 279p

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

Misag-39-Tübitak projesi, 2001, Filaman sargı tekniği ile kompozit malzeme kullanılarak yüksek basınca dayanıklı optimum boru tasarımı, Barış Elektrik End. A.Ş.

Nishiwaki, T., Yokoyama, A., Mackawa, Z., Hamada, H., Mori, S., 1995, A quasi three dimensional lateral compressive analysis method for a composite cylinder, *Composite Structures*, 32:293-8.

O'brıen, T.K., Reisfinder, K.L., 1981, Fatigue damage evaluation through stiffness measurement in boron/epoxy laminates, *Composite Materials,* 15:55-70.

Onoda, Y., 1985, Optimal laminate configurations of cylindrical shells for axial buckling, AIAA J. 23(7):1093-8.

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

Parton, V.Z., Morozov, E.M., 1978, Elastic-Plastic Fracture Mechanics, Mir Publishers, Moskow, 30-37.

Perreux, D., Joseph, D., 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament wound pipes under biaxial fatigue experimental results and damage model, *Composites Science and Technology,* 57:353-364.

Rebiere, J.L., Maatallah, M.N., Gamby, D., 2001, Initiation and growth of longitudional and transverse cracks in composite cross ply laminates, *Composite Structures*, 53:173-187.

Reisfinder, K.L., 1977, Some fundamental aspects of the fatigue and fracture response of composite materials, In: Proceeding of 30^{th} annual society of engineering meeting, 14-6, *Lehigh University Bethlehem PA.*

Richard, F., Perreux, D., 2000, A reliability method for optimization of $\pm\theta$ fiber reinforced composite pipes, *Reliability Engineering and System Safety*, 68:53-59.

Rotem, A., 1979, A fatigue failure of multidirectional laminate, AIAA J., 7(3):271-7.

Rousseau, J., Perreux, D., Verdiere, N., 1997, Motifs d'enroulements et endommagement dans les tubes composites verre/époxy, *Mécanique Indus Matér* 50(3).

Sarı, M., Karakuzu, R., Deniz, ME., Icten, BM., 2012, Residual failure pressures and fatigue life of filament-wound composite pipes subjected to lateral impact, *Journal of Composite Materials,* 46 (15): 1787-1794

Sarıtaş, S., 1987, Yorulmuş kırık yüzeylerin mikroskopla incelenmesi, *İkinci Ulusal Kırılma Konferansı*, Trabzon, 189-196.

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

Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F., B. Raju, B., 2009, Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites, *Composites Part A*, 40: 1090-1110.

Shan, Y., Liao, K., 2001, Environmental fatigue of unidirectional glass–carbon fiber reinforced hybrid composite, *Composites Part B*, 32: 355-363.

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

Smerdov, A.A., 2000, A computational study in optimum formulations optimization problems on laminated cylindrical shells for buckling: I Shells under axial compression, *Composites Science and Technology,* 60:2057-60.

Smith, P.A., Wood, J.R., 1990, Poisson's ratio as damage parameter in the static tensile loading of simple cross laminates, *Composites Sci. and Technology,* 38:85-93.

Spencer, B., Hull, D., 1978, Effect of winding angle on failure of filament wound pipe, *Composites*, 9: 263-271.

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

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.

Tarakçıoğlu, N., 1992, Yüzey çatlaklı ve çatlaksız filaman sarma cam-epoksi borularda sarım açısının malzeme özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 116s

Tarakçıoğlu, N., Gemi, L., Yapıcı, A., 2005, Fatigue failure behavior of glass/epoxy ±55° filament wound pipes under internal pressure, *Composites Science and Technology*, 65:703-708.

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

Vanpaepegem, W., Degrieck, J., 2001, Fatigue degradation modelling of plane woven glass/epoxy composites, *Composites Part A* ,32:1433-1441.

Wakayama, S., Kabayashi, S., Imai, T., Matsumoto, T., 2006, Evaluation of burst strength of FW-FRP composite pipes after impact using pitch-based low-modulus carbon fiber, *Composites: Part A*, 37: 2002-2010.

Wang, S.S., Srinivasan, S., Cole, B., 1997, Long term leakage failure and life prediction fiber composite laminate tubing under combined internal pressure and axial loading, *Theory and Experiments 2.nd International Conference on Comp. Materials for Offshore Operations CMOO-2*, University of Houston, Houston TX

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

Wolodgo, J.D., 1999, Biaxial fatigue and leakage characteristics of fiber reinforced composite tubes, *Ph.D. Thesis University of Alberta.*

Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., 2001, Analysis of multilayered filament wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures*, 53:483-491.

Zuraida, A., Khalid, A.A., Ismail A.F., 2007, Performance of hybrid filament wound composite tubes subjected to quasi static indentation, *Materials and Design*, 28: 71-77.

ÖZGEÇMİŞ

Lokman GEMİ; 1977 yılında Nevşehir'in Derinkuyu ilçesinde doğdu. 2000 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı İmalat Öğretmenliği Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamladı.

2001-2004 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu Makine Programında Misafir Öğretim Görevlisi olarak görev yaptı. 2004-2005 yılları arasında Medikal 2000 A.Ş.'de Yeni Ürün Tasarımı, Üretimde Arge Çalışmaları ve CNC Tezgahlarda Program Yazılımı ve İşletmesi konusunda çalıştı. 2005-2008 yılları arasında S.Ü. Vakfı bünyesinde Konlazer Ltd. Şti. de CNC CO_2 Lazer Tezgâhının Sanayide Kurulumu ve İşletilmesi ile beraber Şirket Müdürü olarak çalıştı. 2009-2013 yılları arasında çeşitli firmalara danışmanlık hizmeti ile beraber doktora çalışmalarına yoğunlaştı. Evli ve üç çocuk babasıdır.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Lokman GEMİ
Uyruğu	**:**	Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Derinkuyu 23.10.1977
Telefon	**:**	0 505 546 41 99
Faks	**:**	0 382 431 26 52
e-mail	**:**	lgemi@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Meram Teknik Lisesi, Konya	1995
Üniversite	:	Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Talaşlı İmalat Öğretmenliği Bölümü, Ankara	2000
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Konya	2004
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2001-2004	Selçuk Üniversitesi Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu	Misafir Öğretim Görevlisi
2004-2005	Medikal 2000 A.Ş.	ArGe Yöneticisi
2005-2008	Konlazer Ltd. Şti. " S.Ü. Vakıf Kuruluşu"	Şirket Müdürü

UZMANLIK ALANI

Talaşlı İmalat, Kompozit Malzemeler, Düşük hızlı darbe deneyleri, Yorulma

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

ULUSLARARASI HAKEMLİ MAKALELER:

1. Necmettin Tarakçioğlu, **Lokman Gemi,** Ahmet Yapici, "Fatigue Failure Behaviour Of Glass/Epoxy $(\pm 55)_2$ Filament Wound Pipes Under Internal Pressure" Composites Science and Technology, Volume 65 Pages 703-708, 2005. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

2. A. Esen, H. Ataoğlu, **L. Gemi,** "Comparison of stability of titanium and absorbable plate and screw fixation for mandibular angle fractures" Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, Volume 106, Issue 6, Pages 806-811, 2008

3. Ömer Sinan Şahin, Ahmet Akdemir, Ahmet Avcı, **Lokman Gemi,** "Fatigue Crack Growth Behavior of Filament Wound Composite Pipes in Corrosive Environment" Journal of Reinforced Plastics and Composites, July 31, 2008

4. **Lokman Gemi,** Necmettin Tarakçioğlu, Ahmet Akdemir, Ömer Sinan Şahin, "Progressive Fatigue Failure Behaviour of Glass/Epoxy $(\pm 75)_2$ Filament Wound Pipes Under Pure Internal Pressure" Materials Design, Volume 30, Issue 10, Pages 4293-4298, 2009. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

ULUSLARARASI KONGRE BİLDİRİLERİ:

1. Necmettin Tarakçioğlu, **Lokman Gemi,** Muciz Özcan, "±45° Filaman Sarım Cam/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Hasar Davranışı" 6th International Fracture Conference, Konya, September 2003. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

2. Necmettin Tarakçioğlu, **Lokman Gemi,** Ahmet Yapici, "±55° Filaman Sarım Cam/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Hasar Davranışı" 6th International Fracture Conference, Konya, September 2003. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

3. **L Gemi,** A Samancı, Ö S Şahin, N Tarakçıoğlu, "Serbest Uçlu İç Basınç Etkisi Altında Flaman Sarım CTP Borularda Sarım Açısının Mekanik Özelliklere Etkisi" Proceeding of 11th International Material Symposium, Denizli, 2007. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

4. 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.

ULUSAL HAKEMLİ MAKALELER:

1. Gürol Önal, Ahmet Yapıcı, **Lokman Gemi,** "Fiber takviyeli termoplastik kompozit levhalarda farklı delik çaplarına göre elasto-plastik gerilmelerin analizi", S.Ü. Tek. Bil. Meslek Yüksek Okulu Teknik-Online Dergisi, Vol 4, Cilt 4, ,ISSN 1302/6178, 39-52, 2-2005