



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇ BASINÇ ALTINDA YORULMUŞ FİLAMAN SARIM CTP BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE SONRASI HASAR DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Muhammed KIRICI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2016
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed KIRICI tarafından hazırlanan "İÇ BASINÇ ALTINDA YORULMUŞ FİLAMAN SARIM CTP BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE SONRASI HASAR DAVRANIŞININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması 08/12/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Mesut UYANER	.....
Danışman Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA	.....
Üye Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ	.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza 

Muhammed KIRICI

Tarih: 08.12.2016

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İÇ BASINÇ ALTINDA YORULMUŞ FİLAMAN SARIM CTP BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE SONRASI HASAR DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Muhammed KIRICI

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA

2016, 115 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Mesut UYANER
Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Bu çalışmanın amacı iç basınç altında yorulmuş filaman sarım cam takviyeli plastik (CTP) boruların darbe hasar davranışlarının incelenmesidir. CTP borularda meydana gelen patlatma hasarları incelenmiş ve boruların patlama basınçları tespit edilmiştir. $(\pm 55°)_3$ sarım açısına sahip E-camı/epoksi kompozit numuneler filaman sarım metoduyla imal edilmiştir. ASTM-D 2992 standardına uygun olarak (R=0.05 gerilme oranı ve 0.42 Hz frekansta) numunelere yorulma testleri uygulanmıştır. Numuneler statik patlama basınının %35'i olacak şekilde belirlenen gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. Yorulmuş ve yorulmamış kompozit boru numunelere 32 bar iç basınç uygulanarak ön gerilme oluşturulmuştur. İç basınç uygulanan CTP borulara çeşitli (5 J, 10 J ve 15 J) enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Temas kuvveti-zaman eğrileri elde edilmiştir. Yer değiştirme, yutulan enerji gibi darbe özelliklerini; temas kuvveti-zaman eğrilerine dayanarak hesap edilmiştir. Ayrıca numunede oluşan hasar bölgeleri değerlendirilmiştir. Farklı çevrim sayılarında yorulmuş ve 10 J enerji seviyesinde darbeye maruz bırakılmış CTP numuneler ASTM D 1599-14e1 standardına göre statik iç basınç patlatma testi ile patlatılmıştır. Bu çalışmada; tüm enerji seviyeleri için 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim sayılarında eğilme rijitliği yaklaşık olarak aynı çıkarken, 10.000 çevrim yorulmuş boruda en düşük eğilme rijitliği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Cam takviyeli plastik, düşük hızlı darbe, yorulma, hasar davranışı,

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF FAILURE BEHAVIOUR AFTER LOW VELOCITY IMPACT OF FILAMENT WOUND GRP PIPES THAT EXPOSED FATIGUE UNDER INTERNAL PRESSURE

Muhammed KIRICI

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

Advisor: Asst. Prof. Dr. Memduh KARA

2016, 115 Pages

Jury
Prof. Dr. Mesut UYANER
Asst. Prof. Dr. Memduh KARA
Asst. Prof. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

The aim of this paper is about investigation of the impact damage behaviors of filament wound glass reinforced plastic (GFRP) tubes that were fatigued under internal pressure. Afterwards, the burst damages occurred on GFRP tubes were investigated and the bursting pressures of tubes were determined. $(\pm 55°)_3$ E-glass/epoxy composite specimens were manufactured by the method of filament winding. Fatigue tests were applied the specimens which have the stress rate of 0.05 and frequency of 0.42 in accordance with ASTM-D 2992 standard. The specimens were subjected to fatigue tests at a stress level of 35% static burst pressure. Fatigued and non-fatigued composite tube specimens were pre-stressed by applying 32 bar internal pressure. After applying internal pressure, low velocity impact tests at various energy levels (5 J, 10 J and 15 J) were performed on GFRP tubes. Plots of contact force-time history were obtained. For impact characteristics such as deflection, absorbed energies were calculated based on the force–time histories. The damage areas developed on the specimen were also evaluated. The specimens that fatigued and impacted at only 10 Joule energy level were burst in accordance with ASTM D 1599 standard. It was concluded that, for all the energy levels employed in this work, as rigidity of tubes for 0 cycle, 1000 cycle and 2500 cycle was about the same, the lowest rigidity was found at 10.000 cycle fatigue pipes.

Keywords: Glass-reinforced plastic, low-velocity impact, fatigue, damage behavior

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, danışmalığımı yaparak her türlü desteği hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA'ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmama değerli vaktini ayırıp, katkıda bulunan, bilgi ve tecrübesinden faydalandığım, değerli hocam Prof. Dr. Mesut UYANER'e de çok teşekkür ederim.

Çalışmada bilgi ve tavsiyelerinden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasına başlamamda, teşvikini hiç unutmayacağım Araştırma Görevlisi Gökhan ARICI'ya ve yüksek lisans sürecinde beraber vakit geçirdiğim, yardımını hiçbir vakit esirgemeyen Mustafa ARAT'a da teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi olarak desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme de çok teşekkür ederim.

Son olarak; bu çalışmayı Türkiye Cumhuriyeti Devletinin halen bağımsız olduğu bu topraklarda onurla bitirebilmeme sebep olan başta Şehit Ömer Halisdemir'e ve tüm 15 Temmuz Şehit ve Gazilerine minnet ve teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammed KIRICI
KONYA-2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET **1**

ABSTRACT **2**

ÖNSÖZ **3**

İÇİNDEKİLER **4**

SİMGELER VE KISALTMALAR **7**

1. GİRİŞ **9**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **12**

3. KOMPOZİT MALZEMELER **27**

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı 27
3.2. Matris Malzemeleri 28
3.2.1. Polimer matrisler 29
3.2.2. Termoset matrisler 30
3.3. Takviye Malzemeleri 33
3.3.1. Cam elyaflar 34
3.4. Tabakalı Kompozitler 34
3.5. Kompozit Üretimi 35
3.5.1. Filaman sarım yöntemi 35
3.5.2. CTP kompozit borulara etkiyen gerilmeler 37

4. YORULMA **39**

4.1. Giriş 39
4.2. Yorulma Testi 40
4.2.1. Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi 42
4.2.2. Gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi 42
4.3. Kompozitlerde Çekme ve Basma Hasarları 44
4.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma 45
4.5. Yorulma Olayının Gelişimi 49

5. DÜŞÜK HIZLI DARBE VE HASAR ANALİZİ **51**

5.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği 51
5.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları 52
5.1.2. Normal temas kuvvetinin işi 53
5.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı 53
5.3. Darbe Testleri 54
5.3.1. Ağırlık düşürme darbe testi 54
5.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları 56
5.4.1. Matris hasarı 57
5.4.2. Delaminasyon 58
5.4.3. Elyaf hasarı 60

5.4.4. Ara yüzey elyaf-matris ayrılması 61
5.4.5. Nüfuziyet 61

6. MATERYAL VE YÖNTEM 62

6.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi 62
6.2. Yakma Deneyi 63
6.3. Serbest Uçlu CTP Kompozit Boruların Değişken İç Basınç Altında Yorulma Deneyleri 63
6.3.1. İç basınç yorulma deney cihazı 64
6.4. Halka Çekme Deneyi 65
6.5. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri 66
6.5.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı 67
6.5.2. CTP kompozit boru yataklama ve iç basınç uygulama ünitesi 68
6.5.3. Elektronik kontrol ünitesi 69
6.6. CTP Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi 70
6.6.1. Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri 71
6.6.2. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri 72
6.6.3. Absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrileri 73
6.6.4. Hız-zaman (V-t) eğrileri 74
6.7. Statik İç Basınç Deneyleri 74
6.7.1. Statik iç basınç test düzeneği 75

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 77

7.1. CTP Boruların Yakma Deney Sonuçları 77
7.2. CTP Boruların Mekanik Özellikleri 77
7.3. CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi 77
7.3.1. Farklı Çevrim Sayılarında Yorulmuş CTP Boruların Halka Çekme Testi ile Teğetsel Gerilme Dayanımının Bulunması 78
7.3.2. Farklı Çevrim Sayılarında Yorulmuş CTP Borularda Halka Çekme Deneylerinde Oluşan Hasar Gelişimi 79
7.4. CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları 80
7.4.1. Temas kuvveti-zaman değişimi 81
7.4.2. Değişik enerji seviyeleri için çevrim sayısının temas kuvvetine etkisi 82
7.4.3. Değişik çevrim sayıları için darbe enerji seviyesinin temas kuvvetine etkisi 84
7.4.4. Temas kuvveti-çökme değişimi 86
7.4.5. Değişik enerji seviyeleri için çevrim sayısının temas kuvveti-çökme değişimine etkisi 87
7.4.6. Değişik çevrim sayıları için darbe enerji seviyesinin temas kuvveti-çökme değişimine etkisi 89
7.4.7. Enerji-zaman değişimi ve enerji dağılımı 91
7.4.8. Hız-zaman değişimi 94
7.4.9. Düşük hızlı darbe hasar analizi 95
7.5. Yorulmuş ve Darbe ile Hasarlandırılmış CTP Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları 100
7.5.1. Yorulmaya maruz kalmış darbe hasarlı boruların patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi 101
7.5.2. Darbe hasarlı boruların patlama hasar analizi 102

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 104

8.1. Sonuçlar 104
8.2. Öneriler 105

KAYNAKLAR 106

ÖZGEÇMİŞ 112

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

T_g : Camsı geçiş sıcaklığı

E : Elastisite modülüsü

σ_t : Teğetsel gerilme

σ_a : Eksenel gerilme, gerilme genliği, akma veya çekme mukavemet değeri

P : İç basınç

σ_r : Gerilme aralığı

σ_m : Ortalama gerilme

R : Yorulma gerilme oranı

S : Maksimum yorulma gerilmesi

σ_{tu} : Ortalama statik mukavemet

N : Hasara sebep olan çevrim sayısı

C : Sabit

da/dN : Çatlak büyüme hızı

$K, \Delta K$: Gerilme şiddet faktörü, dinamik gerilme şiddet faktörü

σ : Çatlağa dik olarak etki eden gerilme, eğilme mukavemeti

r : Çatlak ucundan uzaklık

a_i : İlk çatlak boyu

a_c : Hasara karşılık gelen kritik çatlak boyu

V_y : İzafi hız

F : Temas kuvveti

δ : Kompliyans

δ_f : Kalıcı kompliyans

t : Zaman, cidar kalınlığı

p_c : Sıkışma süresince uygulanan impuls

p_f : Ayrışmadaki son impuls

W_n : Parçacık üzerinde yapılan iş

V_0 : Vurucunun başlangıçtaki çarpma hızı

V_f : İlk temastan sonraki hız

g : İvme

h : Serbest düşme mesafesi

m : Sabit, vurucu kütlesi

E_0 : Darbe öncesindeki maksimum enerji

τ : Tabakalar arası kesme mukavemeti

w : Genişlik

L : Desteklenmemiş uzunluk

E_f : Eğilme modülüsü

W_f : Elyafın kütlesi

W_c : Kompozitin kütlesi

ρ_f : Elyafın yoğunluğu

ρ_c : Kompozitin yoğunluğu

P_b : Maksimum veya kırılma yük değeri

A_m : Daraltılmış kesit alan

d : Sabit, daraltılmış alandaki kalınlık, yer değiştirme

b : Sabit, daraltılmış alandaki genişlik

E_a : Absorbe edilen enerji

Kısaltmalar

ASTM: American Society for Testing and Materials

ANSI: American National Standards Institute

AWWA: American Water Works Association

CTP: Cam takviyeli plastik

DAQ: Data Acquisition

Hz: Hertz

NI: National Instruments

PLC: Programmable Logic Controller

PVC: Polyvinyl chloride

SEM: Scanning Electron Microscope

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler; 20. yüzyılın ortalarında modern teknolojinin yeni beklentilerini karşılamak için, mühendislik malzemelerinin gelecek vadeden bir sınıfı olarak ortaya çıkmıştır. Yeni malzemelere olan gereksinimin sebebi; malzemeden beklenen performansın daha iyi olmasıdır. Performansın ise, yalnız yüksek mukavemetin sağlanması ile değil, bunun yanında daha düşük bir ağırlığa sahip olup, diğer geleneksel malzemelerden üstün özelliklere sahip olması istenmektedir.

Şüphesiz ki, istenilen özelliklerin aynı malzemede olması mümkün değildir. Bu sebeple; üstün özellikler elde etmek için, birbirlerinin zayıf yönlerini kompanse ederek bir araya getirilen iki veyahut ikiden fazla malzemenin makro boyutta birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Kompozitlerin yüksek mekanik özelliklere sahip olması sebebiyle, onların birçok mühendislik alanında kullanılmasını sağlamıştır. Bu malzemeler; havacılık, uzay, savunma ve askeri uygulamalarda; yapı sektöründe, korozyon dayanımlı ürünlerde, ev aletleri ve iş ekipmanlarında, tüketim malları, spor ve eğlence araç ve gereçlerinde; elektrik-elektronik, denizcilik, taşımacılık ve otomotiv uygulamalarında, tarım ve gıda sektörüne ait araç ve gereçler olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, matris ve takviye edici (kuvvetlendirici) malzeme olmak üzere iki kısımdan meydana gelirler. Kompozit malzemeleri matris malzemelerine göre; plastik, metal ve seramik olmak üzere üç kısımdan oluşurken; kullandıkları takviye malzemesine göre de parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve yapısal (tabaka ve sandviç) olarak 3 kısma ayrılırlar. Plastik matrise sahip kompozitlerde, matris malzemesi olarak epoksi, polyester, Nylon 6.6, vinilester, polypropilen, polyether keton gibi reçineler kullanılırken; takviye malzemesi olarak da E-camı, S-camı, karbon elyaf, aramid (kevlar) elyaf, bor fiber gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Matris malzemesi olarak belirlenen reçine içerisine, takviye edici malzeme olarak cam elyafı katılmasıyla elde edilen malzemeye Cam elyafı takviyeli plastik malzeme (CTP) denilmektedir. Elyaflar; sürekli bir formda yönlenmiş biçimde ya da süreksiz bir yapıda yönlenmiş olarak veya rastgele olacak şekilde matris yapısında bulunurlar. CTP'lerin; yüksek mukavemet, birçok kimyasala karşı korozyon dayanımı, üretimlerinin seri olması, çok geniş boyutlarda üretim imkânı, metal ve alaşımlarına kıyasla daha hafif olmaları gibi avantajlı özellikleri, CTP'lerin birçok alanda uygulanmasını önemli kılmıştır.

CTP'lerin uygulama alanlardan biri olan boru imalatı, endüstri de önemli bir yere sahiptir. CTP borular; içme suyu hatları, kapalı sistem sulamaları, atık su tesislerinin deniz deşarj hatları, hidroelektrik santrallerin iletim hatları, yol altı geçişleri, CTP tank ve siloları olmak üzere birçok kullanım alanına sahiptir.

Kompozitler, metal ve alaşımlarından oluşan malzemelere kıyasla bir darbe karşısında daha hassas davranırlar ve hasara uğrayabilirler; üstelik hasar darbeye maruz kalan yüzeyde görülmeyip, çoğunlukla iç kısımlarda hasarların oluşması gibi durumlarla karşılaşılmaktadır. Böyle bir durum neticesinde de, malzemenin mukavemetinde azalma ve nihayetinde servis ömründen daha önce hasarın gerçekleşmesi söz konusudur. Bu sebeple; darbe sonrası oluşan hasarın boyutunun, malzemenin mekanik özelliklerine ve servis ömrüne etkisi en önemli konulardan biridir.

Geniş bir kullanım alanı olan kompozitlerin maruz kalacağı darbe türü de farklı olmaktadır. Darbeler; düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılmaktadır. Kategorize bu şekilde olup; ancak bu sınıflandırma henüz bir netlik kazanmamıştır.

CTP borular; ANSI/AWWA-C950-07 (2006) standardına göre basınç sınıflandırmasına ayrılmıştır ve bu borulara ait çalışma basınç değerleri bulunmaktadır. Birçok alanda kullanılan CTP borular, üretimleri esnasında, servis ortamında ve bakım-onarım işlemleri esnasında düşük hızlı darbeye maruz kalabilirler ve darbenin malzeme performansına etkisi önemli bir konudur. CTP boruların sadece statik bir iç basınç altında düşük hızlı bir darbeye maruz kalmaları sonucunda, darbenin hasar davranışına olan etkisi incelenmektedir. Böyle bir durum; kompozit borunun servis ortamında henüz bir yorulmaya maruz kalmadan önce, darbe sonrası hasar davranışını göstermektedir. Ancak kompozit boruların belirli bir çevrim tekrarından sonra, düşük hızlı darbeye maruz kalmaları işletme şartlarında mümkün bir durum olup, bu hasar sonucu malzemede artan darbe enerjisine göre mekanik özelliklerin değişimi ve hasar gelişimi, kompozit boruların ömürlerine doğrudan etki edeceği için önem arz eder.

Bu çalışmada E-camı/epoksi malzeme kullanılarak filaman sarım yöntemiyle üretilen ±55° sarım açılı CTP borular kullanılmıştır. Izoreel firması tarafından $[\pm 55°]_3$ olacak şekilde 6 tabakaya sahip CTP borular üretilmiştir. Üretilen deney numunelerine, yorulma deneyleri için PLC kontrollü hidrolik iç basınç yorulma deney seti hazırlanmıştır. ASTM-D2992-12 (2012) standardına göre (R=0.05 gerilme oranı ve 0.42 Hz frekansta) yorulma testi uygulanmıştır. Numuneler, statik patlama basıncının %35'i olacak şekilde belirlenen gerilme değerinde; 1000, 2500, 5000 ve 10.000 çevrim sayılarında yorulmaya tabi tutulmuştur. Yorulma sonrası deney numunelerine 32 bar iç

basınç uygulanarak ön gerilme altında 5 J, 10 J ve 15 J enerji değerlerinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Numuneler tarafından yutulan enerji miktarı tespit edilmiş ve numunelerde oluşan darbe hasarları incelenmiştir. Darbe sonrası numunelerden elde edilen kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri değerlendirilmiştir. Ayrıca belirlenen çevrim sayılarında yorulmuş borulara; 10 J enerji seviyesinde darbe yapıldıktan sonra, ASTM-D1599-14e1 (2014) standardına göre statik iç basınç patlatma testleri yapılmıştır. Çalışma neticesinde; belirli çevrimlerde yorulmaya maruz kalmış CTP kompozit boruların düşük hızlı darbe sonucu hasar davranışları incelenmiş, boruların patlama mukavemetindeki değişimler tespit edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde kullanım alanı oldukça genişleyen kompozit malzemelerin; geleneksel malzemelere kıyasla sağladığı avantajlar, birçok mühendislik uygulamalarının ilgi odağına kompozit malzemeleri geçirmiş, üzerine çalışılması gereken birçok araştırmaya da kapı açmıştır. Filaman sarım yöntemiyle üretilen cam elyaf takviyeli plastik (CTP) kompozit borular da; hafiflikleri, korozyona karşı dirençleri, sızdırmazlıkları, düşük montaj maliyetleri ve uzun servis ömürlerine sahip olmaları sebebiyle içme suyu hatlarında, tank ve silolarda, yağmur suyu hatlarında, sıvılaştırılmış petrol gazın ve sıkıştırılmış doğalgazın iletiminde olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Farklı alanlarda kullanılan CTP borular; üretim, servis ve bakım işlemleri esnasında dışarından yabancı cisimlerin darbelerine maruz kalmaları mümkündür. Gözle görülmesi zor olan küçük hasarlar, malzemede mekanik özellikleri büyük ölçüde değiştirebilir ve beklenilmeyen hasarlara neden olabilir. Bu sebeple de kompozit malzemelerin darbe karşısında geliştirdikleri davranış cevabı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birçoğu kompozit levhalar üzerine olurken; kompozit boru ve tüpler, kompozit kap ve basınçlı kazanlar üzerine de yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Kompozit boru ve tüpler, kompozit kap ve basınçlı kazanların darbe davranışı üzerine deneysel ve nümerik olarak birçok çalışma yapılmıştır.

Alshahrani ve ark. (2016) cam elyaf takviyeli epoksi kompozit borular için bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Düşük hızlı darbe altında numunede oluşan tabaka hasarını tespit etmek için, üç boyutlu hasar kriter bağlantısını kullanmışlardır. Numerik modelin gösterdiği performansın, deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan yük-zaman eğrileri ve maksimum sapmaların, deneysel olarak ölçülmüş olanlarla ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Geçerli modeli daha sonra; iki farklı boru kalınlığı (4.5 mm ve 6 mm) ve dört farklı (12, 35, 80 ve 110 J) darbe enerji seviyesi için, hasar haritalarını geliştirmede kullanmışlardır. Sonlu eleman sonuçlarından; düşük darbe enerjisinde, başlıca hasarın matris çatlaması ve delaminasyon olduğunu; orta ve yüksek enerjilerde ise deneysel sonuçlarla uyumlu elyaf kırılması meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca; daha ince borularda, tüm darbe enerji seviyelerinde daha fazla hasar olduğunu belirtmişlerdir. Farklı darbe enerjileri altında; hasar mekanizması ve hasar şiddetinin, elde edilen deneysel sonuçlarla iyi bir uyuma sahip olduğunu bulmuşlardır.

Gemi ve ark. (2016) cam ve karbon elyafları ±55° sarım açısında fonksiyonel olarak derecelendirip, filaman sarım yöntemi ile 8 tabakalı boru üretmişlerdir. Borulara 4, 16 ve 32 bar değerinde farklı iç basınçlar uygulayıp 5, 10, 15 ve 20 J darbe enerji seviyesinde darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Hibrid boruların, enerji yutma ve darbe cevabını incelemişlerdir. Deney numunelerinde delaminasyonlar, radyal ve yüzey matris çatlakları oluşmuştur. Ayrıca; hibrid borulara uygulanan ön gerilme basıncının artışıyla, darbe hasarının etkisinin azaldığını bulmuşlardır. Son olarak; numunelere farklı iç basınçlar uygulayıp, 20 J enerji seviyesinde darbe testi yaptıktan sonra, patlama testlerini gerçekleştirmişlerdir. 32 bar iç basınca sahip numunenin, 303 bar basınçta en yüksek patlama mukavemet değerine ulaştığını tespit etmişlerdir.

Hawa ve ark. (2016) saf su içerisinde farklı sürelerde yaşlandırmaya maruz bırakılmış E-camı/epoksi kompozit boruların darbe davranışlarına, yaşlandırma sürelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada; filaman sarım yöntemi ile üretilmiş, ±55° sarım açısında 6 kat tabakalı boruları kullanmışlardır. İlk olarak yaşlandırma deneyinde; numuneleri 80°C sıcaklıktaki suda daldırılmış olarak 500, 1000 ve 1500 saat bekletmişlerdir. Daha sonrasında 5, 7.5 ve 10 J seviyelerinde darbeleri gerçekleştirip, ardından patlatma testlerini yapmışlardır. SEM görüntülerini elde etmişler, boruların patlama mukavemeti üzerine darbe enerji seviyesi ile yaşlandırma süresi arasındaki bağıntıyı belirlemişlerdir. Sonuçlarda; darbe enerji seviyesinin artmasıyla, en büyük temas kuvvetinin ve çökmenin arttığını ifade etmişlerdir. Yaşlandırılmış ve daha yüksek enerji seviyelerinde darbe yapılmış numunelerin, patlama mukavemetlerinin daha düşük çıktığını bulmuşlardır. Uygulanan darbe enerjilerine bağlı olarak terleme ve patlama hasarlarını elde etmişlerdir.

Sebaey ve Mahdi (2016) E-camı/epoksi malzemeden ürettikleri ±56° sarım açılı kompozit tüplere; Charpy test cihazı ile darbeler uygulamışlardır. Darbe hasarlı numuneleri yanlamasına sıkıştırma işlemine tabi tutmuşlardır. Çalışmalarında; darbe enerji seviyesi ile kalıntı ezme dayanıklılık parametrelerini ilişkilendirmeye çalışmışlardır. Darbe enerji seviyeleri; 41 J ile 171 J aralığında uygulanmıştır. Numunede darbe hasarı meydana gelmesiyle en büyük yükün, ezme kuvveti verimliliğinin ve ezme yükü kararlılığının büyük ölçüde etkilendiğini bildirmişlerdir. 114.3 J darbe enerji değerinde 4 kez darbe yapılan numunede; en büyük yükün, orijinal numuneye göre %44 azaldığını; fakat ezme kuvveti verimliliğinin ve ezme yükü kararlılığının %61 ve %53 değerinde arttığını bulmuşlardır. Diğer test parametrelerinin darbe hasarı üzerine önemli

bir bağımlılık göstermediğini ifade etmişlerdir. Genel olarak; sıkıştırmadan önceki darbelerin, hasar başlatıcı olduğunu belirtmişlerdir.

Demir ve ark. (2015) basınçlı kompozit kapların patlama mukavemeti üzerine, enine tekrarlı darbenin etkisini incelemişlerdir. Basınçlı kapları; filaman sarım yöntemi ile ±55° sarım açısına sahip E-camı/epoksi malzemeden dört tabaka olacak şekilde üretmişlerdir. Darbe testlerinde boş kaplar için; 10, 15, 20, 25 ve 30 J enerji seviyelerini; 25°C ve 70°C'de su ile doldurulmuş kaplar için ise 10, 15, 20 ve 25 J enerji seviyelerini seçmişlerdir. Enine darbe yükünü; tek ve üç kez tekrarlı darbe olacak şekilde yapmışlardır. Deneyler sonucunda; içi boş basınçlı kapların patlama basıncının içi su dolu kaplardan daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Tekrarlı yükün, kapların patlama mukavemetini azalttığını belirtmişlerdir. 25°C'de su ile dolu kabın patlama basıncının, 70°C'de olana kıyasla daha yüksek olduğunu; böylelikle patlama basıncının su sıcaklığının artışı ile de azaldığını bulmuşlardır.

Kara ve ark. (2015) düşük hızlı darbe ile hasarlanmış, farklı tabaka sayılarında kompozit yamalar ile hasar bölgesi onarılmış cam/elyaf takviyeli borularda; yama tabaka sayısının patlama basıncı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Borulara; 32 bar iç basınç altında 5, 10 ve 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerini uygulamışlardır. Darbe uygulanan boruların hasar bölgelerine cam/elyaf kumaşından 2, 4 ve 6 kat tabaka olacak şekilde kompozit yamalar uygulamışlardır. Onarılmış borulara iç basınç patlama testi gerçekleştirerek, patlama mukavemet değerlerini tespit etmişlerdir. Çalışmadaki tüm enerji seviyeleri için; 6 kat yamanın, boruların eski patlama mukavemet değerini tekrardan sağlamasından dolayı en uygun olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca; hiçbir enerji seviyesinde darbe hasarından kaynaklı elyaf kopmasına rastlamadıklarını ifade etmişlerdir.

Perillo ve ark. (2015) filaman sarım yöntemi ile polietilen astar üzerine; vinilester reçine ve E-camı takviyesi kullanılarak basınçlı kap üretmişlerdir. Üretilen kompozit kaplar üzerine, darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca; üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanarak darbe testlerini nümerik olarak incelemişlerdir. Geliştirilmiş numerik modelin kapasitesini ve ortaya çıkacak hasarı ölçmek için, kompozit kabın farklı yerlerine farklı enerji seviyelerinde testler yapmışlardır. Bu modelin, "Intralaminar (matris çatlaması ve elyaf hasarı)" ve "Interlaminar (delaminasyon)" hasar modellerine dayandığını ifade etmişlerdir. Farklı darbe yerleri ve enerji seviyeleri için deneysel olarak elde ettikleri darbe eğrilerinin, numerik model aracılığıyla doğru tahmin edildiğini açıklamışlardır. Tüm konfigürasyonlar için bütün hasarların beklenenin çok az üstünde

tahmin edildiğini belirtmişlerdir. Gerçek büyüklükteki kompozit yapılar üzerine düşük hızlı darbe durumunun simule edildiği modelin geçerliliğini göstermişlerdir.

Perillo ve ark. (2015) filaman sarım ile üretilmiş cam elyaf takviyeli/epoksi kompozit borulara deneysel olarak darbe testleri gerçekleştirmişler ve numerik olarak darbe testlerini modellemişlerdir. Yapısal mukavemet üzerine; dışarıdan hidrostatik basınç uygulandığında meydana gelecek çökmeye karşı, darbe enerjisi ve çember rijitliğinin etkisini değerlendirmişlerdir. Darbe durumunu simule etmek için; gelişmiş bir üç boyutlu sonlu eleman modelini kullanmışlardır. Numerik simülasyonların; deneysel darbe durumlarındaki hasar gelişimini ve darbe kuvvetlerini, tam olarak tahmin ettiğini belirtmişlerdir. Çember rijitliği yüksek boruların, dış basınca karşı yüksek dirençleri olduğunu; ancak sonradan hasarlandıklarında, dış basınca karşı daha az dirence sahip olduklarını ve darbe hasarının daha çok geliştiğini bulmuşlar. Çember rijitliğindeki bir artışın; hasarın başlaması için, gerekli eşik enerjisi değerinin azalmasına neden olacağını ifade etmişlerdir.

Kara ve ark. (2014) düşük hızlı darbeye maruz ön gerilmeli cam elyaf takviyeli kompozit boruların hasar davranışını incelemişlerdir. Boruları; filaman sarım yöntemi ile ±55° sarım açılı, E-camı/epoksi malzemeden üretmişlerdir. 32 bar ön gerilmeli ve ön gerilmesiz kompozit borulara; 5, 10 ve 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerini uygulamışlardır. Temas kuvveti ve iç basıncın zamana göre değişim grafikleri ile kuvvet-yer değiştirme grafiğini elde etmişlerdir. Belirgin bir elyaf kırılmasının görülmediğini; ancak katmanlar arasında delaminasyon, elyaf-matris ara yüzey ayrılmaları ve matris çatlakları tespit etmişlerdir. Darbe hasarlı kompozit boruları; ASTM D 1599-99 standardına göre, statik patlama testine maruz bırakmışlardır. Borulardaki patlama hasarlarını incelemişlerdir ve darbe enerjilerine göre patlama mukavemetinin değişimlerini bulmuşlardır. Ayrıca; test sırasında, iç basınç ile çap değişimini belirlemişlerdir. Darbe yapılmış ve darbe yapılmamış olan borular için, iç basınç ile çap değişiminin aynı olduğunu bulmuşlardır.

Demirci ve ark. (2014) ±55° sarım açısına sahip 6 tabakalı basalt ve cam elyaf ile takviye edilmiş kompozit borulardan yay şeklinde numuneler çıkarıp, farklı oranlarda çentikler açtıktan sonra numunelerin Charpy darbe davranışlarını incelemişlerdir. Deney sonuçlarında; basalt takviyeli kompozitlerin, cam takviyeli kompozitlerden daha yüksek darbe enerji seviyesi ve darbe kırılma tokluğuna sahip olduğunu belirlemişlerdir. Cam takviyeli kompozitlerdeki delaminasyon hasarının, basalt takviyeli kompozitlerdekinden daha baskın olduğunu tespit etmişlerdir. Kompozitler için; çentik derinlik oranlarının

artışıyla, hasar modlarının da değiştiğini fark etmişlerdir. Basalt takviyeli kompozitlerde, SEM analizleri ve deneylerin sonucu olarak; birincil baskın hasar modunun, elyaf kırılması olduğunu tespit etmişlerdir.

Deniz ve ark. (2013) polimer matrisli kompozit boruların deneysel olarak darbe davranışları ve hasar basıncı üzerine deniz suyunun etkisini araştırmışlardır. Deneylerde; 100 mm iç çapta, yaklaşık olarak 1.75 mm et kalınlığında E-camı/epoksi malzemeden, filaman sarım yöntemi ile ±55° sarım açısında 6 tabakalı üretilmiş boruları kullanmışlardır. Kuru ortamdaki numuneleri ve %3.5 tuz oranına sahip yapay deniz suyuna 3, 6 ve 9 aylık sürelerde daldırılmış numuneleri; darbe öncesinde ve sonrasında, statik patlatma testine maruz bırakmışlardır. Testlerde; oda sıcaklığında hasar basıncındaki azalmayı belirlemişlerdir. Test sonuçlarında; farklı darbe enerji seviyeleri ve çevresel durumlarda kalıntı hasar basıncı değişimini incelemek için, kuru şartlarda ve darbe yapılmamış numuneler ile kıyaslama yapmışlardır. Sonuçlarda; deniz suyunun ve enine darbenin; kompozit boruların hasar basıncı üzerine önemli etkisi olduğunu ifade etmişlerdir.

Deniz ve Karakuzu (2012) E-camı/epoksi malzemeden yapılmış $[\pm 55°]_3$ sarım açılı kompozit boruların darbe davranışı üzerine, deniz suyunda bekleme sürelerinin etkisini incelemişlerdir. Kompozit boruları 50, 75, 100 ve 150 mm olacak şekilde dört farklı çapta seçmişlerdir. Boruları; laboratuvar şartlarında 3, 6, 9 ve 12 ay boyunca, yaklaşık %3.50 tuzluluk oranına sahip yapay deniz suyuna daldırmışlardır. Belirlenen süreler sonunda, numunelere oda sıcaklığında 15, 20 ve 25 J enerji seviyelerinde darbe testlerini yapmışlardır. Darbe testlerinden elde edilen temas kuvveti, yer değiştirme ve absorbe edilen enerji verilerini kullanarak, kuru ve daldırılmış durumlar arasında kıyaslamalar yapmışlardır. Deney sonuçlarında; temas kuvveti-yer değiştirme eğrilerinin iki parçalı eğim içerdiğini göstermişlerdir. Eğimler arasında daha küçük farkların, daha küçük hasarlara işaret ettiğini belirtmişlerdir. Geniş çapa sahip boruların da bu tür eğrileri olduğunu ifade etmişlerdir. Boru çapının azalmasıyla, kuvvet-yer değiştirme eğrisinin eğim farklılığının arttığını; hasar alanının, numune çapının artışıyla azaldığını açıklamışlardır. Deniz suyunda tutulma süresine göre, kompozit boruların darbe karakteristiği ve hasarı üzerine; nem yutmanın, deniz suyundaki tuzun, numune çapının ve üretimden gelen kalıntı gerilimlerin önemli etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Deniz ve ark. (2012) $[\pm 55°]_3$ sarım açılı filaman sarım ile üretilmiş cam/epoksi kompozit boruların darbe davranışları üzerine; darbe enerji seviyesinin ve numune çapının etkisini incelemişlerdir. Deneylerde 50, 75, 100 ve 150 mm çaplı dört numune

seçmişler ve oda sıcaklığında 15, 20 ve 25 J darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerine maruz bırakmışlardır. Darbe yapılmış ve darbe yapılmamış numuneleri eksenel basma testlerine maruz bırakmışlardır. Deneyler sonucunda; numune çapı ve darbe enerji seviyesinin, kompozit boruların darbe sonrası basma mukavemetini ve darbe cevabını büyük ölçüde etkilediğini göstermişlerdir. Daha esnek olan geniş çaplı boruların; elastik olarak daha çok enerji absorbe edebildiğini, küçük çaplı borular kadar hasara uğramadıklarını belirtmişlerdir. Maksimum temas kuvvetinin; daha geniş çaplı borularda önemli bir değişimi olmazken, daha küçük çaplı numunelerde ise darbe enerjisinin artışıyla bu kuvvetin arttığını tespit etmişlerdir. Absorbe edilen enerjinin; her bir darbe enerji seviyesi için çap artışıyla azaldığını bulmuşlardır. Darbe sonrası basma mukavemetinin; boru çapındaki artışla arttığını, darbe sonrası basma hasarının; en küçük çaplı borunun elyafı yönünde geliştiğini göstermişlerdir.

Kim ve ark. (2012) deneylerinde kullandıkları kompozit basınçlı kabı; en iç katmanı kauçuk astar, ara katmanları $(\pm 20°)_4$ sarım açısında karbon elyaf/epoksi ve dış katmanları $(90°)_4$ sarım açısında karbon elyaf/epoksi malzemeden, filaman sarım yöntemi ile üretmişlerdir. Çalışmalarında; silindirik kompozit kapların darbe analizini ve kalıntı patlama basınç analizini gerçekleştirmişlerdir. Kullanmış oldukları hasar modelinin "intralamina (elyaf hasarı ya da matris çatlağı)" hasarlar için kullanıldığını belirtmişlerdir. Sunmuş oldukları kompozit hasar modeliyle birleştirilmiş ABAQUS programını kullanarak, numerik analizleri yapmışlardır. Silindirik kompozit basınçlı kapların darbe ve patlatma testlerini de, kalıntı patlama basıncı üzerine darbe hasarının etkisini incelemek için gerçekleştirmişlerdir. Hasar modeli ve analiz yöntemini doğrulamak için; numerik analiz ile elde edilen darbe davranışları, darbe hasarları ve kalıntı patlama basınçlarını, deney verileriyle karşılaştırmışlar ve kıyaslanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Silindirik kompozit basınçlı kaplarda, kalıntı patlama basıncının; teğetsel sarımın olduğu en dış tabakada olabilecek elyaf hasarına ciddi biçimde bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Sunulan hasar modelinin ve analiz modelinin; kalın tabakalı silindirik kompozit basınçlı kapların kalıntı patlama mukavemetini, darbe davranışını ve darbe hasarını güvenilir bir şekilde tahmin ettiğini tespit etmişlerdir.

Kobayashi ve Kawahara (2012) statik yüklemeye veya darbeye maruz bırakılmış karbon elyaf takviyeli kompozit silindirlerde, numune kalınlığının mikroskobik hasar davranışına etkisini incelemişlerdir. Hem darbe testinden hem de statik yükleme testinden; daha kalın kompozit yapının, silindirin rijit yapısını geliştirdiğini ve nüfuziyetten dolayı meydana gelecek plastik deformasyonu azalttığını belirtmişlerdir.

Elyaf kırılmasının; darbe testlerinde 10 ve 15 tabakalı numunelerde görüldüğünü, statik batma testinin yapıldığı numunelerde ise 15 tabakalı yapı ile sınırlandığını tespit etmişlerdir.

Kaneko ve ark. (2008) iç basınç altındaki CTP silindirlerin, sonlu elemanlar yöntemi ile darbe analizini yaparak; iç basıncın hasar moduna, nüfuziyete, yapılan işe ve yüke olan etkisini incelemişlerdir. Malzeme olarak; hem helisel hem de çevresel sarımın olduğu silindirin en dış yüzeyinde cam/epoksi tabaka, diğer katmanlarda ise karbon/epoksi malzemeyi tercih etmişlerdir. Darbe analizinde 25 mm yarıçaplı yarı küresel uca sahip, 554 kg ağırlığında vurucuyu seçmişlerdir. Çalışmalarında; iç basıncın, güvenli çalışma basıncından daha yüksek olduğu durumda nüfuziyetteki elyaf hasarının, eksenel yönde ilerlediğini tespit etmişler ve sonlu elemanlar modelinin sayısal geçerliliğini göstermişlerdir. Bu eğilimin farklı kalınlıktaki silindirlerde de ortaya çıktığını bulmuşlardır. Çok yüksek iç basınç yüklendiğinde, hasar modunun değiştiğini ve patlama hasarının olabileceğini öne sürmüşlerdir. Basıncın patlamaya neden olmayacak kadar düşük olması durumunda; iç basınç artarken, nüfuziyete neden olacak gerekli yüklemenin de arttığını ortaya koymuşlardır.

Tarfaoui ve ark. (2008) cam/epoksi malzemeden filaman sarım yöntemi ile kalın tabakalı olarak üretilen tüpler üzerine, statik ve dinamik testleri sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının ilk kısmında; dinamik testlerde hasarın başlama ve gelişmesinin belirlenmesine, elastik özelliklerin geçerliliğine değinmiştirler. Çalışmalarının ikinci kısmında ise; hasar tahmini için malzeme özelliğini belirleyen darbe modeliyle ilgilenmişlerdir. Simule edilen hasarı; deneysel olarak elde edilenle kıyaslamışlardır. Öngörülen yüzeylerin boyutlarının, deneysel ölçümlerdeki gibi aynı büyüklük sırasında olduklarını belirtmişlerdir. Bu olayların iyi anlaşılmasının ve tahmin edici araçların gelişmesinin; sualtı uygulamalarda kompozit yapıların uzun vadeli yapısal bütünlüğünü iyileştirmeye katkısı olduğunu ifade etmişlerdir.

Tarfaoui ve ark. (2007) cam epoksi malzemeden oluşan boru şeklindeki yapıların hasarı ve dinamik cevabı üzerine; numune boyutlarının etkisini incelemişlerdir. Deneylerinde ±55° derece sarım açısında E-camı/epoksi malzemeden farklı boyutlarda ve ölçeklerde numuneler üretmişlerdir. Üretimdeki parametrelerin; numunenin dinamik cevabına, numunedeki oluşacak hasara büyük oranda etki ettiğini belirlemişlerdir. Boyut etkisinin de önemli olduğunu tespit etmişlerdir. Test sonuçlarında, bölgesel hasar gelişimi ve elastik deformasyon arasındaki ilişkinin belirlenmesinde, numune boyutlarının birinci derece önemli olduğunu göstermişlerdir.

Wakayama ve ark. (2006) filaman sarım karbon elyaf takviyeli kompozit boruların darbe sonrası patlama mukavemetini geliştirmek için; kompozit boruların yüzeyine, basma hasar dayanımı yüksek, düşük modülüse sahip katran esaslı üç tip karbon elyaf sarmışlardır. 3, 10 ve 20 mm yarıçaplı vurucular ile darbe testlerini numuneler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Elyafların mikro seviyede burkulması ve delaminasyon gibi darbe hasarını değerlendirmek için, yanal kesit incelemesini yapmışlardır. Mikro seviyedeki burkulmaların neden olduğu elyaf kırılmasının, düşük modüllü katran esaslı karbon elyaf içeren numunelerde, önlendiğini belirtmişlerdir. Darbe testleri sonrası, numunelere iç basınç testleri uygulamışlardır. Deneyler sonucunda; kalıntı patlama mukavemetinin, düşük modüllü katran esaslı karbon elyaf uygulaması ile arttığını ifade etmişlerdir.

Zheng ve ark. (2006) düşük hızlı darbe altında metal astara sahip filaman sarımlı silindirik kompozit kapların, iç basınç altında veya iç basınçsız mekanik darbe davranışlarını sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Farklı darbe hızları altında kompozit kabın hasar biçimini ve hasar dağılımlarını göstermişlerdir. Aynı kinetik enerji seviyesinde, düşük hızlı darbe altında iç basınç uygulanmış olan numunenin darbe hasar boyutunun; iç basınç uygulanmadan yapılan numuneye göre daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

Gning ve ark. (2005) kompozit silindirlerde darbe sonrası hasarın tahmini üzerine iki kısımdan oluşan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada; filaman sarım metodu kullanılarak E-camı/epoksi malzemeden $[\pm 55°]_{10}$ sarım açılı silindirik numuneler kullanmışlardır. Çalışmalarının ilk kısmı, ağırlık düşürmeyle darbeye maruz cam takviyeli epoksi kompozit silindirlerde hasar başlamasının/gelişmesinin belirlenmesi ve modellenmesini içermektedir. İkinci kısmı, hidrostatik basınç yükü altında darbe hasarının kalıntı mukavemet üzerine etkisinin incelenmesiyle ilgilidir. Darbe hasarının, cam/epoksi silindirlerin kalıntı patlama mukavemetini önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir. 12 J darbesinin, patlama mukavemetini %40 kadar azalttığını tespit etmişlerdir.

Gning ve ark. (2005) filaman sarım yöntemi ile ±55° sarım açısında E-camı/epoksi malzemeden 20 tabaka olacak şekilde üretilmiş tüplere, statik batma ve düşük hızlı darbe testleri yapmışlardır. Darbe testlerini; 55 mm iç çapa, 6 mm kalınlığa sahip tüplere 2 J ile 45 J aralığında toplam dokuz farklı darbe enerjisi seviyesinde gerçekleştirmişlerdir. İlk olarak, hasar alanlarını ultrasonik görüntüleme ile tespit etmişlerdir. Numunelerin kesit görüntülerini, sıvı penetrant tekniğiyle incelemişler ve gerçek hasar alanlarını

bulmuşlardır. Patlama basıncı üzerine darbe hasarının etkisini değerlendirmişler ve darbe enerjisi seviyesinin artışıyla, patlama basıncının azaldığını ifade etmişlerdir.

Krishnamurthy ve ark. (2003) tabakalı kompozit silindirik kabuğun darbe cevabını hem klasik Fourier serileri ile hem de sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen darbe cevabı; ayrıca Choi-Chang'ın yarı ampirik hasar tahmin modelini de içermektedir. Analitik yöntemde daha önceki bir çalışmada kullanılan Laplace dönüşüm tekniği yerine, darbeye maruz kalan yüzeyde vurucu tarafından oluşturulan nüfuziyet alanını dikkate alan, doğrusal olmayan Hertz temas kanununu kullanarak sonuç elde etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile darbe cevabı, darbe ile oluşturulmuş hasar üzerindeki vurucu kütlesi, yaklaşma hızı, kabuk kavisi gibi kontrol parametrelerinin değişimlerinin etkisini tespit etmek için parametrik bir çalışma yürütmüşlerdir.

Krishnamurthy ve ark. (2001) tabakalı kompozit kabuk numunelerin; metalik bir vurucu ile darbe cevabını ve hasar oluşumunu, sonlu elemanlar metoduyla incelemişlerdir. Tabakaların istiflenme sırası, kabuk eğriliği, vurucunun kütlesi ve hızı gibi parametrelerin etkilerini belirlemişlerdir. Silindirik yüzeyli bir levha için, geniş deformasyonların sebebi olan darbe kuvveti ve yapısal cevabını incelemişlerdir. Uygun hasar kriteri kullanarak darbe ile oluşan matris çatlaması ve delaminasyonların tahmin edilebildiğini, ayrıca hasarlı bölgelerin çizilebildiğini ifade etmişlerdir. Oluşan hasarı dikkate almak için, matris rijitliğinin; her bir zaman adımında değiştirildiğini belirtmişlerdir.

Kompozit boru ve tüplerin, yorulma davranışı üzerine yapılan çalışmalarda bulunmaktadır.

Ustun ve ark. (2016) yorulma yüklemesi altındaki filaman sarım kompozit borularda, başlangıç hasar mekanizması olan matris çatlamasının, boruların katastrofik hasarı ile sonuçlanabilen bir dizi hasarı başlatabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca; yorulma dirençli kompozit boruları geliştirmede öne çıkan bir yaklaşımın da, nano yapılı dolgular kullanarak matris modifikasyonun olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında; karbon nano tüp ve bor nitrür plakalar ile güçlendirilmiş filaman sarımlı karbon elyaf/epoksi kompozit boruların, makro ve mikro düzeyde hasar mekanizmalarını gözlemlemiş, deneysel olarak yorulma performansını incelemişlerdir. Yorulma hasar gelişimi üzerine farklı morfolojide nano dolguların etkisini ve mikro/nano düzeydeki takviye edici mekanizmaları ele almışlardır. Statik patlama basıncının %50, %60 ve %70'i olacak şekilde üç farklı yük seviyesinde yorulma testlerini gerçekleştirmişlerdir.

Yorulma testine göre S-N eğrisini elde etmişler, üretilen hibrid kompozit boruların ömürlerini hesap etmişlerdir. Nano ölçekte takviye edici ilavesinin, tüm durumlar için kompozit boruların yorulma performansını arttırdığını bulmuşlardır. Kırılmış yüzeylerin analizi neticesinde; nano dolguların morfolojisinin, mikro ve nano ölçekte farklı güçlendirme mekanizmalarını üreterek mekanik performansın geliştirilmesinde kilit bir rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Gemi ve ark. (2009) iç basınç altında $[\pm 75°]_2$ sarım açılı E-camı/epoksi malzemeden yapılmış filaman sarımlı kompozit boruların yorulma hasar davranışlarını incelemişlerdir. Yorulma testlerini; ASTM D 2992 standardına göre, dakikada 25 çevrim ve R=0.05 gerilme oranı olacak şekilde yapmışlardır. Testleri; boruların teğetsel gerilme mukavemeti değerinin %30'u ile %70'i arasında değişen farklı yük seviyelerinde olacak şekilde gerçekleştirmişlerdir. Hasar gelişimindeki aşamaları içeren S-N eğrisini elde etmişlerdir. Deney sonuçlarında; uygulanan gerilim arttığında, beklenen ani hasar oluşumunun gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Hasarın; beyazlaşma, sızıntı başlaması ve sonuç hasarı olarak üç ana aşamaya ayrılabildiğini göstermişlerdir. Hasarın matris çatlaması ve beyazlaşma ile başladığını belirtmişlerdir. Uygulanan yük, yüksek olduğunda; sızıntı olmadan kompozitin borunun aniden infilak ettiğini ve uygulanan yükün düşük olduğu durumda ise ilk önce sızıntının olduğunu sonrasında sonuç hasarın meydana geldiğini açıklamışlardır.

Samanci ve ark. (2008) E-camı/epoksi malzemeden filaman sarım yöntemi ile üretilen $[\pm 75°]_3$ sarım açısına sahip kompozit boruların yorulma hasar davranışını incelemişlerdir. Numuneleri açık uçlu yorulma testlerine oda sıcaklığında maruz bırakmışlardır. Testler ASTM D 2992 standardına göre yapılıp, düşük çevrimli testler olarak 0.42 Hz frekansında ve R=0.05 oranında gerçekleştirmişlerdir. Yüzey çatlaklarını; derinlik-kalınlık oranı 0.25-0.38-0.50 ve derinlik-uzunluk oranı 0.20 olacak şekilde boruların eksenel yönünde açmışlardır. Testleri, çentiksiz boruların teğetsel gerilme mukavemetinin %50, %40 ve %30'u olacak şekilde üç farklı yükte gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçlarında hasar davranışları elde edilmiş olup; delaminasyon hasar alanı-çevrim sayısı ve mukavemet-çevrim sayısı eğrilerini sunmuşlardır. Sonuçlarda; hasarın başlıca yüzey çatlaklarının cam elyaf demetlerini kestiği bölgede meydana geldiğini belirtmişlerdir. Çatlak yayılmasının etkili biçimde delaminasyon olarak meydana geldiğini; delaminasyonların da hızlıca artıp daha sonrasında yavaşladığını bildirmişlerdir. Derinlik-kalınlık oranı arttığında, yorulma ömrünün epeyce azaldığını; uygulanan yükün artışıyla da delaminasyonun daha hızlı arttığını ifade etmişlerdir.

Avci ve ark. (2007) değişken iç basınç altında, yüzey çatlağına sahip filaman sarım kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Filaman sarım boruları; E-camı/epoksi malzemeden, $[\pm 75°]_3$ sarım açılı olacak şekilde üretmişlerdir. Korozif ortam için; seyreltik hidroklorik asiti, borunun dış yüzeyindeki yüzey çatlağı bölgesine uygulamışlardır. Korozif yorulma testlerini; borunun eksenel yönde serbestçe hareket edebildiği açık uçlu şartlarda iç basınç yüklemesine maruz bırakarak, çatlak yayılmasını ve yağ sızıntı hasarını elde etmek için gerçekleştirmişlerdir. Yorulma testlerini; dakikada 25 çevrim ve R=0.05 gerilme oranı olacak şekilde ASTM D 2992 standardına göre yapmışlardır. Çatlak ağzında meydana gelen yağ sızıntısının; kritik gerilme şiddeti seviyesine ulaşmasından sonra elde edildiğini belirtmişlerdir. Çevresel ortama maruz bırakılmış borunun yorulma çatlak yayılması davranışının güçlü bir biçimde çatlak parametrelerine bağlı olduğunu açıklamışlardır. Çatlaktan sızıntı başlamasına neden olan çevrim sayısının; çatlak derinliği-et kalınlığı oranı 0.25 olan boruda, daha fazla elde edildiğini bulmuşlardır.

Tarakcioglu ve ark. (2007) değişken iç basınç altında; yüzey çatlağına sahip $[\pm 55°]_3$ sarım açısında, filaman sarımlı E-camı/epoksi malzemeden yapılmış kompozit boruların açık uçlu şartlarda yorulma davranışını incelemişlerdir. Kompozit boruların üzerine, eksenel yönde açılan çentiklerin derinliğinin çentik uzunluğunun yarısına oranı 0.20 ve çentik derinliğinin numune et kalınlığına olan oranı 0.25, 0.38, 0.50 olacak şekilde numuneleri hazırlamışlardır. Yorulma testini, ASTM D 2992 standardında belirtilen dakikada 25 çevrim ve R=0.05 gerilim oranı sağlanarak gerçekleştirmişlerdir. Yorulma testlerini, teğetsel gerilme mukavemetinin %50'si, %40'ı ve %30'u olacak şekilde, üç farklı maksimum gerilme seviyesinde gerçekleştirmişlerdir. Yorulma testlerinde; hasarın yalnızca, yüzey çatlağının elyafları kestiği noktalarda meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca; hasarın çatlak uzunluğunu aşmadığını ve çatlağın yayılmasının etkili olarak Mod II biçiminde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Delaminasyon yayılmasının ilk evresinde, delaminasyon alanının hızlıca arttığını ve sonrasında yavaşladığını belirtmişlerdir. Bir yüzey çatlağı altında çentiğin ulaşmadığı tabakaların yorulma durumunun, hiç çentik içermeyen kompozit boruyla tamamen aynı davrandığını bulmuşlardır. Son olarak ise; çentik derinliğinin numune et kalınlığına olan oranları (0.25, 0.38, 0.50) için maksimum yorulma ömürlerini bulmuşlardır.

Ellyin ve Martens (2001) filaman sarımlı çok yönlü cam elyaf/epoksi boruların iki eksenli yorulma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Kompozit boruları farklı teğetsel ve eksenel yüklere maruz bırakarak sızıntı hasarını tespit etmişlerdir. Rijitliğin

eksenel ve teğetsel yönlerde değiştiğini belirtmişlerdir. Temel yönlerde elyafın optimum yerleşiminin; orta seviyede yüklemeler için zayıf bir davranış gösterebileceğini ifade etmişlerdir. Daha önceki çalışmalarından elde ettikleri patlatma test verilerinin, yorulma davranışının iyi bir göstergesi olmadığını bulmuşlardır. Ayrıca; üretim prosesinde bulunan kusurların, yorulma esnasında hasarın erkenden başlamasına öncülük ettiğini; böylelikle de sızıntının olmasına kadar geçen sürede yorulma ömrünün daha da kısalacağını belirtmişlerdir.

Kaynak ve Mat (2001) eksenel (tek eksenli) çevrimli yükleme altında, filaman sarımlı kompozit tüplerin makroskobik ve mikroskobik hasar mekanizmalarını gözlemlemişler ve yorulma verilerini belirlemişlerdir. ±55° sarım açılı E-camı/epoksi kompozit numunelerin yorulma ömürlerini; çekme mukavemetinin %60, %70 ve %80'i olacak şekilde farklı gerilme seviyeleri için belirlemişlerdir. R=0.1 gerilme oranıyla sabit büyüklükte sinüzoidal yükleme altında; her bir gerilme seviyesinde, üç farklı frekans değeri (0.1 Hz, 1 Hz, 10 Hz) uygulamışlardır. Üç aşamalı yorulma hasarının üzerine; yükleme frekansı ve gerilme seviyesinin etkilerini göstermek için, S-N eğrisi biçiminde sonuçları değerlendirmişlerdir. Bu üç aşamanın ise; ilk olarak matriste çatlağın başlaması, sonra çatlağın yayılması ve elyaf sarım açısı doğrultusunda yoğunlaşması, son olarak da parçalanmaya neden olan elyafların kopması olarak ifade etmişlerdir. Numunelerin yorulma ömürlerinin; gerilme seviyesinin artışıyla, azaldığını; frekansın artışıyla da genel olarak arttığını belirtmişlerdir.

Kompozit boru ve tüplerin, yorulma ve darbe davranışının birlikte incelendiği çalışmalarda yapılmıştır.

Uyaner ve ark. (2014) düşük hızlı darbeyle hasarlandırılmış filaman sarımlı E-camı/epoksi kompozit boruların yorulma davranışını incelemişlerdir. Darbe testleri 5 J ve 10 J enerji seviyelerinde yapılmış olup, kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerini elde etmişlerdir. Ayrıca hasarlı bölgelerini incelemişlerdir. Darbe sonrası ve öncesi olmak üzere boruların patlama mukavemetini ASTM D 1599 standardına göre bulmuşlardır. Hasarlı ve hasarsız borular ASTM D 2992 standardına göre yorulma testine tabi tutmuşlardır. Yorulma testlerini, numunelerin patlama mukavemetinin %30, %35, %40, %50 ve %60'ı olacak şekilde beş farklı gerilme seviyesinde yapmışlardır ve S-N diyagramlarını elde etmişlerdir. Deneyler sonucunda; darbe enerjisi artışıyla, maksimum temas kuvvetinin, yer değiştirmenin ve hasarın arttığını tespit etmişlerdir. Düşük darbe enerjisinde, matris çatlakları ve delaminasyonların içteki tabakalarda, yüksek enerjili darbede ise kalınlık boyunca tüm tabakalarda oluştuğunu tespit etmişlerdir. Düşük hızlı

darbeyle hasarlanan borularda, darbe enerjisi artışıyla boruların patlama mukavemetinin ve yorulma ömrünü azaldığını; ancak yorulma ömründeki azalmanın çok daha fazla olduğunu bulmuşlardır.

Deniz ve ark. (2013) E-camı/epoksi malzemeden filaman sarım yöntemi ile üretilmiş kompozit boruların, değişken iç basınç altında yorulma ömrü üzerine darbe yüklemesinin ve deniz suyunun etkisini incelemişlerdir. İlk olarak kompozit boruları; 3, 6 ve 9 aylık zaman süresince deniz suyunda bekletip; sonrasında 5, 7.5 ve 10 J enerji seviyelerinde darbe testlerini yapmışlardır. Darbeye maruz bırakılmış numuneleri yorulma testlerine tabi tutmuşlardır. Çalışmalarında; hem darbe enerjisinin hem de deniz suyunda bekleme süresinin, yorulma ömrünü değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Darbe görmemiş numunenin yorulma ömrünün, darbe görmüş olandan daha fazla olduğunu; darbe görmüş numunelerde ise 3 aya kadar yorulma ömrünün arttığını ve genellikle maksimum değere ulaştığını göstermişlerdir.

Sari ve ark. (2012) kompozit boruların statik hasar basınçları ve yorulma ömürleri üzerine, darbe enerjisinin etkisini incelemişlerdir. Numuneleri; 100 mm iç çap ve 400 mm uzunluğunda olacak şekilde üretmişlerdir. Darbe testlerini; 5, 7.5 ve 10 J olarak üç farklı enerji seviyesinde gerçekleştirip, kuvvet-yer değiştirme eğrilerini elde etmişlerdir. Darbe yapılmış ve darbe yapılmamış numunelerin, yorulma ömrünün ve hasar basıncının elde edilmesi için statik ve dinamik olarak iç basınç testine maruz bırakmışlardır. Deney sonuçlarında; statik test için, sızıntı ve patlama basınç değerlerinin darbeyle azaldığını göstermişlerdir. Darbe yapılmış boruların yorulma ömrünün, darbe yapılmamış borular ile kıyaslandığında azaldığını bulmuşlardır. Maksimum temas kuvveti, maksimum yer değiştirme ve absorbe edilen enerji gibi kompozit boruların darbe özelliklerinin; darbe enerjisinin artışıyla arttığını tespit etmişlerdir.

Kompozit kap, kompozit boru ve tüplerin patlatma hasarına yönelik deneysel ve nümerik çalışmalarda yer almaktadır.

Zheng ve ark. (2015) içeriden patlama yüklemesine maruz kompozit kapların, delaminasyon hasarı üzerine çalışmışlardır. Deneylerinde, alüminyum astarlı E-camı/epoksi kaplar kullanmışlardır. Mikro seviyede gözlemler ve kırılma analizleri neticesinde; delaminasyon hasarının, çok çeşitli miktarlardaki patlayıcı yükleri altında meydana geldiğini bildirmişlerdir. Bir sonlu eleman modelini de; delaminasyon başlama mekanizması ve dinamik davranışın gelişimini açıklamak için sunmuşlardır. Sonlu eleman analizinden elde edilen numerik sonuçların, deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığını; dinamik davranış ile delaminasyon hasarının iyi bir uyuşma

gösterdiğini belirtmişlerdir. Delaminasyon hasarının ana sebebi olduğunu düşündükleri titreşim süreci esnasında (kompozit kapta patlayıcı, etkisini gerilim şok dalgası şeklinde yerine getirir), bitişik tabakalar arasında büyüklük ve faz uyumsuzluğunu, dinamik tepki analizinde belirtmişlerdir. Farklı patlayıcı yükleme şartları altında, delaminasyonun dinamik davranış gelişimini incelemek için; numerik modelde, küçük bir ön delaminasyon sağlamışlardır. Sonuçlarda; ön delaminasyonun farklı ölçekteki uzunluklarda sürekli olarak delaminasyonu tetiklediğini belirtmişlerdir. Patlayıcı yükünün artışıyla; ön delaminasyonun, yeni delaminasyonlarla hızlı bir şekilde birleştiğini ifade etmişlerdir.

Martins ve ark. (2012) iç basınca maruz filaman sarım kompozit tüplerin hasar basıncını incelemek için nümerik ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada; farklı sarım açılarında ($[\pm45°]_4$, $[\pm55°]_4$, $[\pm60°]_4$, $[\pm75°]_4$), E-camı/epoksi malzemeden dört farklı kalınlıkta (0.386, 0.344, 0.318, 0.313) kompozit tüpler üretmişlerdir. Deneyleri kapalı uçlu şartlar altında yapmışlardır. Kaplama yapılmamış tüpleri, sızıntı hasarını bulmak için ilk olarak test etmişlerdir; daha sonra patlama hasar basıncı için PVC ile kaplamışlardır. Testleri; özellikle bu çalışma için yapılmış yüksek basınçlı bir sistemde gerçekleştirmişlerdir. Numerik ve deneysel sonuçları kıyaslamışlar; çalışmada yer alan tüm elyaf sarım açıları için iyi bir uyum gözlendiğini belirtmişlerdir.

Arikan (2010) iç basınç altında, eğimli yüzey çatlağına sahip E-camı/epoksi malzemeden yapılmış $[\pm55°]_3$ sarım açılı filaman sarımlı kompozit boruların statik patlama hasar davranışlarını incelemiştir. Testlerinde; çatlak-numune kalınlığı oranını 0.50 olarak belirleyip; 0°, 15°, 30°, 60°, 45°, 75° ve 90° olmak üzere altı farklı çatlak açısı olacak şekilde numuneler hazırlamıştır. Eğimli çatlağa sahip numunelerin patlama mukavemet değerini belirlemiş ve patlama mukavemetinin çatlak açısına bağımlılığını incelemiştir. Deney sonucunda; numunelerde çatlak açısının büyümesiyle, patlama mukavemetinin arttığını gözlemlemiş ve çatlak açısının etkisinin azaldığını bulmuştur. ±55° sarım açılı kompozit borular için; patlama mukavemetindeki en yüksek değere 90° eğimli yüzey çatlağına sahip borulardan elde edildiğini belirtmiştir. Patlama mukavemetindeki artışın bir diğer sebebi olarak da, çatlak eğim açısının 0°'den 90°'ye doğru artarken, çatlak uzunluğunun kısalması olarak ifade etmiştir.

Chang (2003) hasarlı ve hasarsız grafit/epoksi silindirik kompozit boruları iç basınca maruz bırakarak meydana gelecek hasar modlarını incelemiştir. Bazı borularda elyaf hasarını simule etmek için boyuna bir çizik ya da tek bir darbe noktası olacak şekilde bölgesel bir hasar meydana getirmiştir. Numuneleri; üç farklı basınçlandırma yöntemi ile

iç basınca maruz bırakmıştır. Boyuna çizik olan borunun; bölgesel bir sızıntı, kesikten başlayan kırılmayla patlama ve borunun tamamının parçalanarak patlaması şeklinde üç farklı mod ile hasarlandığını tespit etmiştir. Darbe ile hasarlandırılmış numunelerde ise; darbe yükünün artışıyla, patlama basıncının azaldığını bulmuştur.

Bu çalışmaların yanında; sarım açısının etkileri ve teğetsel/eksenel gerilmelerin değiştirilmesiyle hasar gelişimi üzerine çalışmalar da bulunmaktadır.

Krishnan ve ark. (2015) çok eksenli dinamik yükleme altında cam/epoksi kompozit boruların davranışı üzerine sarım açısının etkisini incelemişlerdir. Cam elyaf takviyeli epoksi kompozit boruları $[\pm 45°]_4$, $[\pm 55°]_4$ ve $[\pm 63°]_4$ sarım açısında olacak şekilde imal ederek yorulma testlerine tabi tutmuşlardır. Deneyleri; tek başına eksenel yüklemeden tek başına teğetsel yükleme aralığında, beş tane gerilme oranını sağlayacak şekilde yeni bir otomatik test düzeneği ile gerçekleştirmişlerdir. Yorulma testine, borunun dış yüzeyinde su damlacıkları görünene kadar devam etmişlerdir. Çalışmalarında; her sarım açısının farklı bir optimum basınç yükleme şartına sahip olduğunu bulmuşlardır. Hasar davranışlarının; gerilme oranına ve sarım açısına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Meijer ve Ellyin (2008) ±60° sarım açısında filaman sarım tekniği ile üretilmiş, cam elyaf/epoksi kompozit tüpler üzerine çok eksenli gerilme testleri uygulamışlardır. Tüplerde meydana gelen ilk hasar modlarını elde etmişler, gerilim ve gerinim hasar diyagramlarını kaydetmişlerdir. Numunelere, iç basıncın uygulanmasını geliştirilmiş bir test sisteminde, farklı eksenel ve teğetsel gerilme oranlarında yapmışlardır. Çalışmalarında; beş farklı hasar modu elde etmişlerdir. Bu hasarların; eksenel çekme hasarı, damlama, bölgesel sızıntı, patlama ve eksenel basma hasarı olduğunu ifade etmişlerdir.

Xia ve ark. (2001) filaman sarım yöntemi ile karbon/epoksi malzemeden çok tabakalı olarak ürettikleri kompozit boruların; iç basınç altında, gerilim ve deformasyon analizini yapmak için basitleştirilmiş bir elastik çözüm sunmuşlardır. İç basınç altında; farklı açıya sahip tabakalar ile tasarlanan üç boru için, ayrıntılı olarak gerilim ve çökme dağılımlarını incelemişlerdir. Sonuçlarda; tabakalı boruların, gerilme ve deformasyonlarının güçlü bir şekilde tabakaların dizilme sırasına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Boruların et kalınlığıyla gerilme dağılımındaki değişimin de kuvvetlice et kalınlığına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Silindirik basınçlı kaplar ve farklı açılı tabakalardan oluşan borular için; uygulanan teğetsel-eksenel gerilme oranının, her tabakada değiştiğini açıklamışlardır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

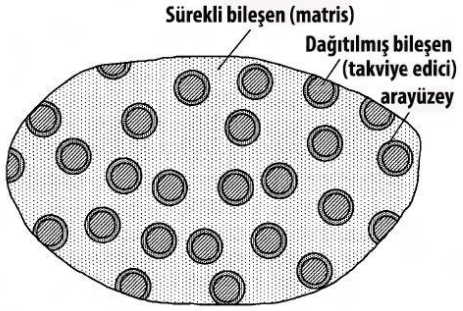
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

Üstün özellikler elde etmek için, birbirlerinin zayıf yönlerini kompanse ederek bir araya getirilen iki veya daha fazla malzemenin makro boyutta birleştirilmesi ile elde edilen malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir. Kompozit malzemeler; uzay, havacılık, savunma, denizcilik, yapı sektörü ve otomotiv alanları başta olmak üzere, birçok alanda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin birçok alanda kullanılmasını sağlayan üstün özellikler aşağıda sıralanmıştır:

- Yüksek mukavemet
- Hafiflik
- Esnek bir tasarım
- Boyutsal kararlılık
- Yüksek dielektrik direnci
- Korozyon dayanımı
- Kompozit parçaların üretimi (tek parçadan oluşma)
- Yüzey uygulamaları
- Düşük araç/gereç maliyeti
- Çok sayıda üretim tekniği
- Işık geçirgen özellikte üretilebilmesi

Kompozit malzemeyi oluşturan; "takviye edici" malzeme olarak adlandırılan bileşen genellikle süreksiz (sürekli mümkün), daha katı ve daha sağlam iken; "matris" adındaki diğer bileşen daha zayıf ve daha esnektir (Şekil 3.1). Bazen, kimyasal etkileşimler veyahut diğer işlemlerin etkisi sebebiyle, takviye edici ve matris bileşenlerine ilaveten "ara yüzey" adında ayrı bir bileşen var olmaktadır. Bir kompozit malzemenin özellikleri; bileşenlerinin özelliklerine, geometrisine ve dağılımına bağlıdır.

En önemli parametrelerden biri; takviye edicinin hacimsel oranı veyahut fiber hacim oranıdır. Takviye edicinin dağılımı, malzeme sisteminin homojenliğini ve tekdüzelik olan yapısını belirler. Takviye edicinin geometrisi ve yönelimi, sistemin anizotropisini etkiler.



Şekil 3.1 Bir kompozit malzemenin bileşenleri (Daniel ve Ishai, 2006)

Kompozit malzemenin uygulama ve türüne bağlı olarak, kompozit sistemin bileşenleri farklı roller oynar. Orta ve düşük performanslı kompozit malzemeler olması durumunda; takviye edici, genellikle parçacıklar veya kısa fiberler şeklindedir, malzemenin bir miktar rijitlik kazanmasını ve aynı zamanda sınırlı ölçüde mukavemet elde etmesini sağlayabilir. Matris; malzemenin mekanik özelliklerini yöneten ana yük taşıyıcı bileşendir. Yüksek performanslı kompozit yapılar olması halinde ise; normal olarak sürekli fiber takviye edicisi, fiber yönünde mukavemeti ve rijitliği belirleyen malzemenin omurgasıdır. Matris bileşeni; hassas fiberler için korumanın yanında, yapışmayı, desteklemeyi ve bir fiberden başka bir fibere bölgesel gerilimi aktarmayı sağlar. Boyutları çok küçük olmasına rağmen ara yüzey ise; hasar mekanizmalarının, hasarın yayılmasının, kırılma tokluğunun ve malzeme hasarına kadar tüm gerilim-gerinim davranışının kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar (Daniel ve Ishai, 2006).

3.2. Matris Malzemeleri

Fiberle takviye edilmiş kompozitlerde matrisin rolleri şunlardır:

- Fiberleri yerinde tutmak
- Fiberler arasında gerilimleri aktarmak
- Kötü ortama karşı bir bariyer sağlamak (kimyasal ve nem gibi)
- Fiberlerin yüzeyini mekanik bozulmadan (aşınma gibi) korumak

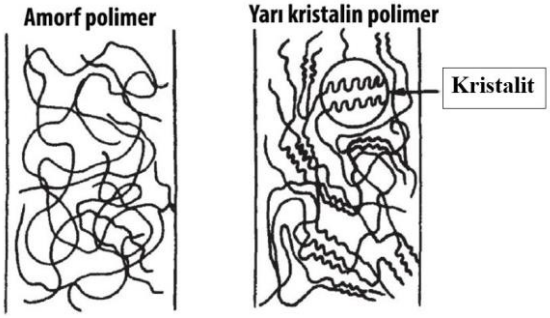
Matris; kompozit bir yapının çekme yükünü taşıma yeteneğinde, ikincil bir rol oynar. Ancak; matris türünün seçimi, kompozit malzemenin basma, tabakalar arası kayma hem de düzlemsel kayma özellikleri üzerinde birincil bir etkiye sahiptir. Matris, basma yükü altında fiberin eğilme ihtimaline karşı yanal destek sağlar.

Matris ve fiberler arasındaki etkileşim; hasara toleranslı yapıların tasarımında da önemlidir. Kompozit malzemede imalat ve kusurlar; güçlü bir şekilde matrisin üretilme niteliklerine bağlıdır.

Ticari olarak veyahut araştırmalarda kullanılan çeşitli matris malzemeleri bulunmaktadır. Matris malzemeleri üç bölümden oluşmaktadır. Metalik ve seramik matrisler birincil olarak yüksek sıcaklık uygulamaları için bulunmaktadır. Polimer esaslı matrisler ise molekül yapılarının birbirlerine bağlanma şekillerine göre termoset ve termoplastik olarak iki kısımdan oluşurlar.

3.2.1. Polimer matrisler

Bir polimer, atomların güçlü kovalent bağlar ile bağlandığı, bir veya daha fazla tekrarlanma birimi içeren, uzun bir zincir molekülü olarak tanımlanmaktadır. Bir polimerik malzeme; benzer kimyasal yapıda (uzunlukları eşit değil) olan çok sayıdaki polimer moleküllerin yığınıdır. Katı haldeki bu moleküller, amorf polimerlerde rastgele biçimde; yarı kristalin polimerlerde ise rastgele karışmış ve sıralı biçimde (kristalit), yapı içerisinde bulunmaktadırlar (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Moleküllerin diziliş biçimi (Mallick, 2008)

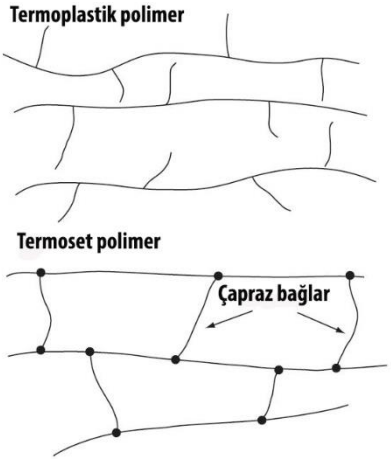
Bir matrisin seçiminde göz önüne alınacak birincil durum, matrisin temel mekanik özellikleridir. Yüksek performanslı kompozitler için, bir matrisin en çok istenen mekanik özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Kompozitin basma mukavemetini etkileyen, yüksek elastisite modülü
- Tabakalı bir kompozitte tabaka içi çatlamayı kontrol eden, yüksek çekme mukavemeti
- Çatlak büyümesini ve tabakaların ayrılmasını kontrol eden, yüksek kırılma tokluğu

Bir polimer kompozit için; yüksek sıcaklıklarda iyi bir boyutsal kararlılık, çözücülere veyahut neme karşı direnç gibi, diğer önemli hususlar da yer alabilir.

Polimerler, moleküllerin birbirlerine bağlanma biçimine göre, termoplastik ve termoset olarak iki ana başlığa ayrılmaktadır. Termoplastik bir polimerde, moleküller tek başlarına kimyasal olarak birbirlerine bağlanmazlar. Bu moleküller, zayıf ikincil bağlar veyahut moleküller arası kuvvetler (Hidrojen bağları ve Van der Walls bağları gibi) tarafından tutulurlar. Termoplastiklere ısının uygulanmasıyla bu ikincil bağlar geçici olarak kırılır; böylece moleküller birbirlerine göre hareket edebilirler veyahut moleküllere basınç uygulanırsa yeni konumlarına doğru hareket ederler. Soğutulduğunda ise, moleküller yeni düzenlerinde dondurulmaktadırlar ve ikincil bağlar, yeni katı şeklin oluşmasıyla tekrardan düzenlenir. Bu sebeple, termoplastik bir polimer; ısıtıp yumuşatılabilir, ergitilebilir ve tekrardan şekillendirilebilir.

Termoset bir polimerde ise; rijit, üç boyutlu ağ yapısının şekillendiği moleküller kimyasal olarak çapraz bağlar vasıtasıyla bağlanmaktadır (Şekil 3.3). Bu çapraz bağlar, bir defalığına polimerizasyon reaksiyonu esnasında oluşturulur ve termoset polimerler ısı uygulanmasıyla ergitilemezler. Ancak; çapraz bağ sayısı az ise, yüksek sıcaklıklarda onları yine de yumuşatmak mümkün olabilir.



Şekil 3.3 Termoplastik ve termoset polimerlerin şematik gösterimi (Mallick, 2008)

3.2.2. Termoset matrisler

Geleneksel olarak, epoksi, polyester gibi termoset polimerler; fiberlerle takviye edilmiş kompozitler için matris malzemesi olarak kullanılmaktadır (Çizelge 3.1). Bir termoset polimerin; polimerizasyonunda kullanılan başlangıç malzemeleri genellikle çok

düşük viskoziteli, düşük molekül ağırlıklı sıvı kimyasallardır. Fiberler, polimerizasyon reaksiyonu başlamadan önce, bu kimyasallara daldırılır. Fiberlerin birleşme zamanında polimerin viskozitesi çok düşük olduğu için; yüksek sıcaklık veya basınç yardımı olmadan matris ve fiberler arasında iyi bir ıslatma sağlanması mümkündür. Kompozitte fiber yüzeyi ıslatma; fiber-matris etkileşiminin sağlanmasında oldukça önemlidir. Termoset polimerleri kullanmanın diğer avantajları termal kararlılıkları ve kimyasal dirençleridir (Mallick, 2008).

Çizelge 3.1 Termoset ve termoplastik matris malzemeleri (Mallick, 2008)

Termoset polimerler	
Epoksiler	Başlıca uzay ve uçak uygulamalarında
Polyesterler Vinil ester	Yaygın olarak otomotiv, denizcilik, kimya ve elektrik uygulamalarında
Fenolikler	Hazır kalıplama bileşiminde kullanılır
Poliimidler polybenzimidazoles (PBI) polyphenylquinoxaline (PPQ)	Yüksek sıcaklık uzay uygulamaları için (sıcaklık aralığı: 250°C-400°C)
Cynate ester	
Termoplastik polimerler	
Naylonlar (Naylon 6, Naylon 6.6 gibi) Polietilen tereftalat (PET), Polibutilen tereftalat (PBT) Polikarbonat (PC)	Enjeksiyonla kalıplanmış parçalarda süreksiz fiberle kullanılır
Poliamid imide (PAI) Polieter eter keton (PEEK) Polysulfone (PSUL) Polifenilen sulfit (PPS) Polieterimid (PEI)	Sürekli fiberler ile kısmen yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur

Termoset polimerlerin en önemli olanlarından birisi; epoksi reçinelerdir. Çeşitli endüstri uygulamalarında, yüksek performanslı termoset reçine olarak geniş ölçüde kullanılmaktadırlar. Kullanışlı özellikleri sayesinde epoksi reçineler; fiberle güçlendirilmiş polimer kompozitlerde matris reçinesi olarak kullanımının yanında, koruyucu kaplamalar ve yapısal yapıştırıcı olarak kullanımı da söz konusudur.

Diğer termoset polimerlerle (polyester, vinil ester gibi) karşılaştırıldığında, epoksi reçinelerin maliyeti daha fazladır; ancak daha iyi mekanik özellikler, nemi soğurma, korozif ortama ve sıvılara karşı yüksek direnç özellikleri gösterirler. Çizelge 3.2'de epoksi döküm reçinesine ait özellikler verilmiştir. Servis ortamında dayanıklılığı ve fiziksel özelliklerinin iyi olması sayesinde, diğer termoset plastiklere kıyasla avantajlı bir maliyet-performans oranının elde edilmesine katkıda bulunurlar.

Epoksi reçineler, polyester matrislerle kıyaslandığında; yüksek sıcaklıklarda, yüksek elektriksel direnç ve iyi performans gösterirler. Diğer taraftan, kompozit

malzemelerde takviye edici olarak kullanılan fiberlere ve çeşitli altlıklara (metal veya plastik) optimum yapışma gösterirler. Epoksi reçinelerin diğer olumlu yönü; kürleme prosesi esnasında düşük çekme paylarıdır. Polyesterler ve vinil esterler hacimsel olarak % 12 ye kadar çekmektedirler. Bu durumun tersine epoksi reçineler %5 den daha az büzülürler ve epoksi bir tabaka; polyester ve vinil ester tabakalarından, uzun bir zaman sürecinde çok daha kararlıdır.

Epoksi reçinelerde stiren yapısı olmadığından, kürleme prosesi esnasında polyester ve vinil esterlere göre önemli bir şekilde daha az toksik salınıma sahiptirler. Epoksi reçineler; filaman sarım, el yatırması, vakum torba kalıplama, otoklav kalıplama, basınç-torba kalıplama, basınçlı kalıplama gibi pek çok kompozit üretim prosesi ile uyumludur.

Çizelge 3.2 Epoksi döküm reçinesine ait karakteristik özellikler (23°C) (Mallick, 2008)

Yoğunluk (g/cm^3)	1.2-1.3
Çekme mukavemeti (MPa)	55-130
Elastik modülüs (GPa)	2.75-4.10
Poisson oranı	0.2-0.33
Termal genleşme katsayısı (10^{-6} m/m, her °C)	50-80
Kür çekmesi (%)	1-5

Birçok mühendislik uygulamaları için termoset reçineler arasında en iyi seçenekleri sahip epoksi reçineler çeşitli özellikler gösterirler:

- Kürleme prosesi reaksiyonu esnasında tehlikeli ve uçucu ürünlerin salınımının olmaması
- Düşük T_g 'ye sahip kauçuklardan, yüksek T_g 'li malzemelere kadar; çeşitli ürünleri elde etmek için monomerlerin seçiminde esneklik
- Kürleme prosesi esnasında hacim büzülmesinin çok düşük veyahut bazı karışımlarda hiç olmaması
- Yapısındaki polar gruplarından dolayı, çeşitli malzemelere yüksek yapışma özellikleri
- Çeşitli iyi özelliklere (elektriksel veya termal) sahip bir reçine sistemi elde etmek için; farklı modifiye malzemelerin epoksi reçine içerisine katılma imkânı
- Kimyasallara ve çözücülere karşı yüksek dirençli olması

Kürleme; kimyasal reaksiyonlar ile termoset bir plastiğin özelliklerinin değişmesini içeren bir proses olarak tanımlanmaktadır. Epoksi sistemler tipik olarak reçine ve sertleştirici (kürleme ajanı) bileşenlerinden meydana gelirler. Birbirlerinden ayrı olarak tutulduklarında kararlı olan bu iki bileşen, beraber oda sıcaklığında bile karıştırıldığında üç boyutlu ağ yapısını oluşturmak için reaksiyon verirler (Bai, 2013).

Polimerizasyon reaksiyonunun tamamlanması için kürleme sıcaklık ve süresi; kürleme ajanının miktarına ve cinsine bağlıdır. Bazı kürleme ajanlarıyla reaksiyon başlar ve oda sıcaklığında devam eder; ancak diğerlerinde yüksek sıcaklık gereklidir. Kürleme süresini kısaltmak ve yavaş olan reaksiyonu hızlandırmak için sıvı karışıma zaman zaman hızlandırıcılar ilave edilmektedir.

Kürlenmiş bir epoksi reçinenin özellikleri başlıca çapraz bağ yoğunluğuna bağlıdır. Genelde; elastik modülüs, cam geçiş sıcaklığı, termal kararlılık ve kimyasal direnç; çapraz bağ yoğunluğunun artmasıyla geliştirilir, fakat kırılma tokluğu ve hasar gerinimi küçülmektedir. Çapraz bağ yoğunluğunu kontrol eden faktörler ise; başlangıçtaki sıvı reçinenin kimyasal yapısı, kürleme ajanının işlevselliği ve reaksiyon şartlarıdır (sıcaklık ve süre gibi).

3.3. Takviye Malzemeleri

Polimer esaslı kompozitlerin takviyesinde birçok malzeme kullanılmaktadır. Takviye malzemeleri doğada bulunan (selüloz gibi) işlenmemiş ürünler olabildiği gibi; bunun yanında birçok takviye malzemesi de endüstriyel olarak üretilmektedir. Bu takviye malzemeleri içerisinde en yaygın kullanılanı ise elyaflardır.

Elyaflar; fiber ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin ana bileşenidir. Kompozit bir tabakayı en geniş hacimli parça olarak kaplarlar ve kompozit bir yapı üzerine etkiyen yükün büyük bir bölümünü taşırlar. Uygun fiber tipinin seçilmesi, fiber hacim yüzdesi, fiber uzunluğu ve yönelişi; kompozit tabakanın aşağıdaki özelliklerini etkilediği için çok önemlidir:

- Yoğunluk
- Çekme, basma mukavemetleri ve modülüsleri
- Yorulma mukavemeti ve yorulma hasar mekanizmaları
- Elektriksel ve termal iletkenlik
- Maliyet

3.3.1. Cam elyaflar

Cam elyaflar; polimer matrisli kompozitler için bütün takviye edici fiberler arasında en yaygın olanıdır. Cam elyafların başlıca avantajları; düşük maliyetleri, yüksek çekme mukavemetleri, yüksek kimyasal dirençleri ve üstün yalıtım özellikleridir.

Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar; E, S, D ve C camı olmak üzere farklı sınıflara ayrılırken; endüstride kullanılan karbon elyaf, bor elyafı, kevlar gibi diğer elyaflar da bulunmaktadır. Çizelge 3.3'te E ve S cam elyafları, diğer elyaflar ve geleneksel malzemelere ait özellikler gösterilmektedir.

Çizelge 3.3 Elyafların ve geleneksel malzemelerin özellikleri (Mazumdar, 2001)

Malzeme	Çap (μm)	Yoğunluk (ρ) (g/cm^3)	Elastik modülüs (E)(GPa)	Çekme mukavemeti (σ)(GPa)	Özgül modülüs (E/ρ)	Özgül mukavemet (σ/ρ)	Kopmadaki uzama (%)
E-camı	7	2.54	70	3.45	27	1.35	4.8
S-camı	15	2.50	86	4.50	34.5	1.8	5.7
Karbon elyaf (y. modülüs)	7.5	1.9	400	1.8	200	0.9	1.5
Bor elyaf	130	2.6	400	3.5	155	1.3	-
Kevlar 49	12	1.45	130	2.8	89.5	1.9	2.5
Çelik	-	7.8	208	0.34-2.1	27	0.04-0.27	5-25
Alüminyum alaşımları	-	2.7	69	0.14-0.62	26	0.05-0.23	8-16

Cam elyaflar ile reçinenin; uygun üretim metoduyla birleştirilmesi sonucunda istenilen malzeme ortaya çıkar. Kompozit yapıdan beklenen özellikler arasında; öncelikle malzeme üzerine gelen yükün elyaflara iletilebilmesi için bileşenlerin (matris ve fiber) fiziksel ve kimyasal uyumunun iyi olması, ara yüzey yapısının kuvvetli olması gerekmektedir. Elyaf ve matris bileşenlerinin ısıl genleşme katsayılarındaki uygunluk, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması açısından önemlidir.

3.4. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit, temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile tabakalı (laminate) kompozitlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Tabakalar, matris içerisine rastgele yönlenmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakadan oluşabilirler.

Tabakalı kompozit için esas sebep, bu kompozitin maruz kalacağı yüklere uyum sağlaması için dayanım ve rijitliğin doğrusal bağımlılığından avantaj sağlamaktır. Bu nedenle, tabakalar/katmanlar sadece bu amaç için uygundur.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler özelliklerine bağlı olarak "tek kat tabakalı" veya "çok kat tabakalı" olarak da sınıflandırılabilir. Tek katlı kompozitler birkaç farklı tabakadan yapılabilir; her tabaka aynı yönelme ve özelliklere sahip, sonuçta tüm tabakalar tek kat tabakalı kompozit olarak düşünülebilir.

Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler çok katlıdır. Her tabaka, tasarım amaçlarına bağlı olarak değişen elyaf doğrultuları ile tek katlı kompozitten oluşabilir. Genellikle her katman çok ince olup yaklaşık 0.1 mm kalınlığında olduğundan dolayı bu şekilde kullanılmaz. Her katmandaki kompoziti oluşturan elemanlar aynı ise bunlar "izotropik-laminet" olarak adlandırılır. Çok katlı bir kompoziti oluşturan malzemeler farklı malzemelerden oluşuyorsa bunlar "ortohotropik-karma" ve "hibrid laminetler" olarak adlandırılır (Şahin, 2015).

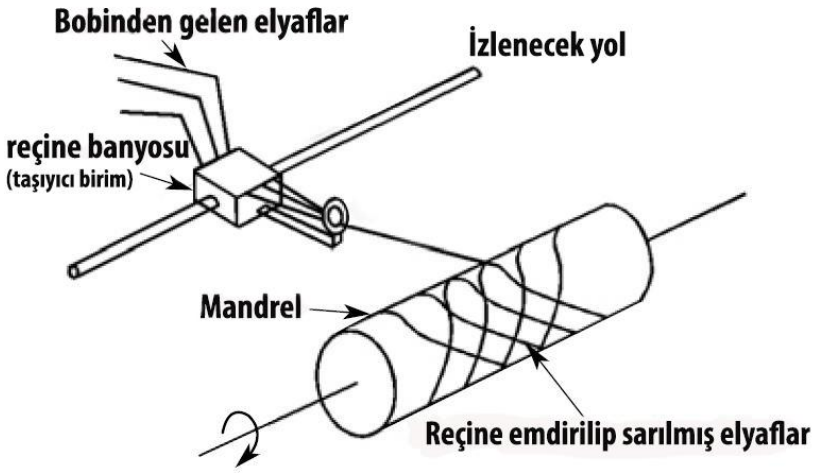
Farklı türdeki elyaflar ile çeşitli reçinelerin tabakalar halinde birleştirilmesi sonucunda polimer matrisli tabakalı kompozitler üretilmektedirler. Cam lifi veya asbest lifi dokumalara silikon kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanıklı tabakalı kompozit malzemeler elde edilir. Polimer matrisli tabakalı kompozitlerin birçok çeşidi olup, geniş bir alanda kullanımı söz konusudur.

3.5. Kompozit Üretimi

Kompozitlerin üretim yönteminin seçiminde; matris ve takviye edici malzemenin özellikleri, nihai ürünün şekli ve boyutu, tasarım detayları ve kullanılacağı servis ortamı göz önünde bulundurulur. Uçak kanadından sulama borularına, fren balatalarından tenis raketlerine kadar çok geniş bir alanda uygulaması olan kompozit ürünlerin, üretim yöntemi de bu sebeple çeşitlilik arz eder.

3.5.1. Filaman sarım yöntemi

Filaman sarım; reçine emdirilmiş fiberlerin (elyafların) istenilen açıda, dönen bir mandrel üzerine sarıldığı bir prosestir. Taşıyıcı bir birimin ileri geri hareket ettiği, mandrelin belirlenmiş bir hızda döndüğü; tipik bir filaman sarım prosesi Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Filaman sarım prosesinin şematik gösterimi (Mazumdar, 2001)

Taşıyıcı ünitenin ve mandrelin hareket kontrolünün sağlanmasıyla, istenilen elyaf sarım açısı sağlanır. Proses, boru şeklindeki parçaların yapımı için çok uygundur. Maliyetin ön planda olduğu yüksek hacimli parçaların yapımında, bu proses otomatik hale getirilebilir. Filaman sarım; basınçlı kaplar gibi özel hassasiyet gerektiren yapıları elde etmek için, üretime uygun olan tek yöntemdir.



Şekil 3.5 Filaman sarım tekniği ile üretilen kompozit izolatör gövdeleri (Barış Elektrik Endüstrisi A.Ş.)

Filaman sarım tekniği ile üretilen en yaygın ürünler; boru şeklindeki yapılar, basınçlı kaplar, borular, roket motoru gövdeleri, kimyasal depolama tankları ve roket fırlatma (lançer) borularıdır. Bunların yanı sıra, daha karmaşık şekillerin olduğu; golf ve hokey sopaları, takım kabzaları, bisiklet gidonu ve iskeletleri, balık oltaları, kayak sopaları, kürekler, tekerlek aksları, baskı makaraları ve benzeri ürünler de filaman sarım tekniği ile üretilmektedir.

Filaman yöntemle sarılmış cam elyaf takviyeli plastikler; temiz ve kurşun içermediklerinden dolayı, su temini için borulama sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Filaman sarım borular; sünek çelik borular veyahut beton borular ile kıyaslandığında, pürüzsüz iç yüzeylerinden dolayı iletilecek su için gerekli olan pompalama enerjisini %10 ile %35 arasında azaltırlar. Bu yöntemle üretilen CTP boruların ağırlığı; sünek çeliğin dörtte biri, betonun ise onda biri kadardır. Bu sebeple de, boruların kurulum ve taşınmasında büyük bir avantaj sağlanmış olur.

Genellikle, filaman sarım için başlangıç malzemeleri sürekli fiberler (elyaflar) ve sıvı termoset reçinelerdir. Elyaflar, makaraya sarılmış biçimde arka rafta tutulurlar ve taşıyıcı ünite içerisinde bulunan reçine banyosundan geçen elyaflar ıslanırlar, böylece sarıma hazır hale gelmiş olurlar. Cam, karbon ve kevlar fiberler filaman sarım yöntemi için uygundur; ancak cam fiberler düşük maliyetleri sebebiyle daha yaygındır. Epoksi, polyester ve vinil ester, reçine olarak kullanılmaktadır. Bazı zaman da başlangıç malzemesi olarak, "prepreg" adında önceden reçine emdirilmiş hazır kalıplama sistemleri kullanılır. "Prepreg" kullanımı eşit fiber dağılımını ve parçanın kalınlığı boyunca etkin reçine bulunmasını sağlar.

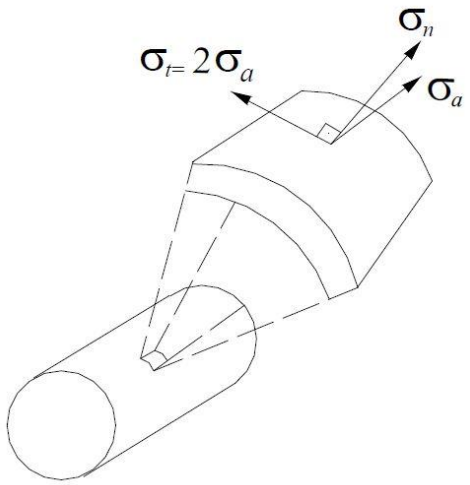
Filaman sarım prosesinde en çok bilinen malzeme, çelik mandreldir. Çelik mandreller; kompozitin iç yüzeyinde üstün parlaklık elde etmenin yanında mandrelin kolay bir şekilde çıkması için, kromla kaplanırlar. Ancak basınçlı kaplar gibi bazı uygulamalar için, mandrel çıkarılmaz ve kompozit yapının ayrılmaz bir parçası olurlar. Çıkarılmayan mandrel, iç yüzeyde kompozitte sızdırmaz bir tabaka/bariyer yüzeyi sağlar ve bu sayede basınçlı tanklar içerisinde sıkıştırılmış sıvı veya gazın sızması engellenir.

Filaman sarım esnasındaki sıkıştırma, fiberlere bir gergi kuvvetinin oluşturulmasıyla sağlanır. Genellikle, fiberlerdeki gergi; bazı gerdirme araçları kullanılarak veyahut gergiyi oluşturacak biçimde taşıyıcı ünitenin içinden fiberlerin geçmesiyle sağlanır. Üretilen kompozitler oda sıcaklığında veyahut daha yüksek bir sıcaklıkta ocaklarda kürlenir (Mazumdar, 2001).

3.5.2. CTP kompozit borulara etkiyen gerilmeler

İnce cidara sahip silindirik basınçlı kaplarda, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi teğetsel (σ_t) ve eksenel (σ_a) yönde olmak üzere iki tür gerilme bulunmaktadır. Basınçlı kabın yüzeyine dik olarak etkiyen, basınçlı kabın dışarı doğru deformasyonuna neden olacak σ_n gerilmesi bulunmaktadır; ancak pratikte bu gerilme ihmal edilmektedir (Roberts, 1995).

Borunun üretiminde kullanılan malzemenin dayanımı ile borunun patlama basıncı arasında bir ilişki bulunmaktadır. Borunun yarıçapı cidar kalınlığına oranlandığında; bu oranın 10'dan büyük olması durumunda, ince cidarlı borularda teğetsel gerilmenin bulunmasına yönelik Barlow'un belirlediği bağıntı (3.1) kullanılır (Alexander ve Wilson, 1999).



Şekil 3.6 İki ucu kapalı basınçlı kaptaki gerilmeler (Roberts, 1995)

$$\sigma_t = \frac{p.r}{t} \tag{3.1}$$

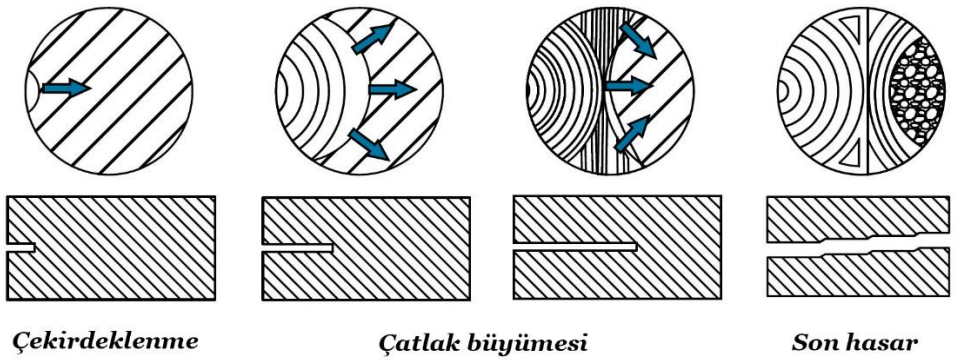
Bu bağıntıda; σ_t teğetsel gerilmeyi, r iç yarıçapı, p iç basıncı ve t cidar kalınlığını temsil etmektedir.

4. YORULMA

4.1. Giriş

Yorulma; ASTM-E1823-10a (2010) standardına göre şöyle tanımlanmaktadır: Malzemelerin tekrarlı bir gerilme ve uzamasının gerçekleştiği, belirli bir çevrim sayısına ulaşıldıktan sonra; çatlakların büyümesi ve nihayetinde kırılmanın olduğu, yapıdaki kalıcı değişimdir. İkinci olarak yapılan tanımda ise dört önemli husus şunlardır: Olayın tekrarlı olup gelişmesi, bölgesel olması, çatlağın büyümesi ve nihayetinde kırılmanın gerçekleşmesidir. Endüstride kullanılan makine ve parçalar; büyüklüğü ve yönü zamana bağlı olarak değişebilen kuvvetlere, gerilmelere, eğilme ve burulma momentlerine maruz kalırlar. Makine elemanları bu gibi zorlayıcı şartlar altında; normal şartlarda sahip oldukları akma sınırlarının altında bir gerilmeye maruz kaldıklarında umulmadık bir biçimde kırılabilirler. Bu şekilde gerçekleşen kırılmalar yorulma kırılması olarak ifade edilmektedir.

Metallerde yorulmadan dolayı gerçekleşen kırılmada, kırılma yüzeyi incelendiğinde diğer hasarlardan kolay bir şekilde ayırt edilebilir. Oluşan kırığın ilerlemesi ve kırılmış kesitin birbiri ile sürtünmesi sonucunda, o bölge parlak bir görüneme sahip olur. Malzemenin sağlam olan kesiti uygulanan yükü karşılayamayacak duruma geldiğinde ise ani bir kırılma gerçekleşecek olup, kaba bir görünüm oluşacaktır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Yorulma çatlağının karakteristik olarak yayılması (Campbell, 2012)

Yorulma kırılması gerçekleşen yüzeyde; duraklama çizgilerinin ve tekrar izlerinin oluştuğunu gözlemleyebilmek mümkündür. Yorulmanın durduğu süreçlerde veyahut yorulmaya neden olan yük değerlerindeki değişimden dolayı, yorulma çatlağının

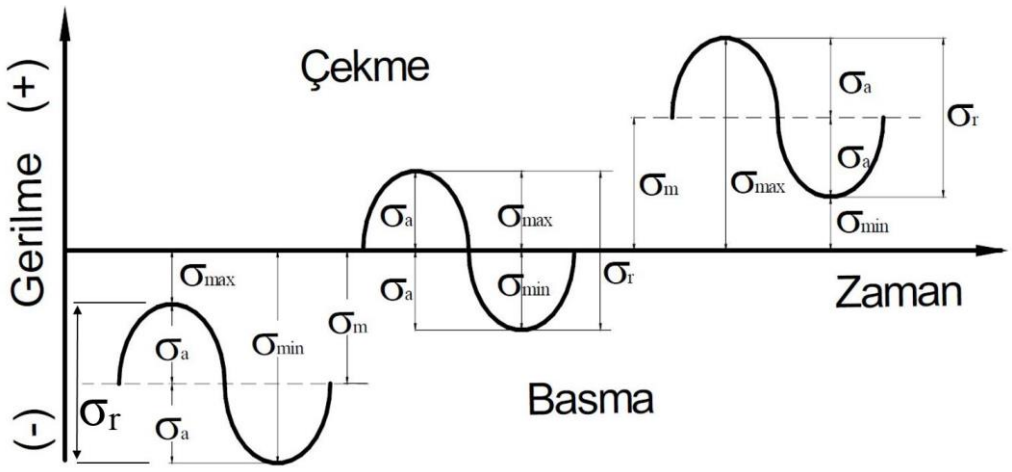
kesitinde ağaçlarda da gözlemlenen yaş halkaları gibi duraklama çizgileri oluşabilir. Yorulmadaki çatlak ucunun farklı zaman aralıklarında bulunduğu konumu, bu çizgiler göstermektedir. Yorulmaya neden olan gerilmeye ait her çevrimin duraklama çizgileri oluşur. Kırık bir yüzeyde duraklama çizgilerinin bulunması, bu malzemenin yorulmaya maruz kaldığını gösterir. Fakat kırık yüzeyinde bu çizgilerin olmaması, yorulmaya maruz kalınmadığı anlamına gelmez. Malzeme yeterince sünek olduğu takdirde, duraklama çizgileri oluşur. Yorulma kırılmasındaki; olayın başlama ve yayılmasıyla ilgili bilgiler, duraklama çizgilerinin şekli incelenerek elde edilebilir.

4.2. Yorulma Testi

Yorulma testi, makinalar vasıtasıyla yorulma cihazları tarafından malzemeye uygulanır. Bu cihazlar ile malzeme üzerine zamanla değişen sinüzoidal dalgaya sahip gerilmeler tatbik edilir. Sinüzoidal dalga şeklinde oluşturulan gerilimin, artmasıyla bir maksimum değere ve tekrardan azalmasıyla da bir minimum değere ulaşması sağlanır. Düzenli olarak değişen gerilimler, malzemenin iç kısmında deformasyonlara ve ayrılmalara neden olmasından dolayı kopma süreci, statik mukavemet değerlerinin altında gerçekleşir. Değişken ve tekrarlı gerilimler nedeniyle malzemenin içyapısındaki değişimler sürecine yorulma, malzemenin kopmasına kadar geçen süre ise yorulma ömrü olarak ifade edilmektedir.

Yorulma testinde genelde sinüzoidal salınımlı gerilim uygulanmaktadır. Yorulma yükünün sinüzoidal olması Şekil 4.2'de gösterilmiş olup; yorulma testine ait parametreler de eğri üzerinde kolayca hesaplanabilir. Bu parametreler şunlardır: Maksimum ve minimum gerilme değerleri belirlenerek; gerilme aralığı σ_r, gerilme genliği σ_a, ortalama gerilme σ_m ve yorulma gerilme oranı olan R'dir.

Yorulma testinde, malzemeye uygulanan tekrarlı gerilmenin çekme veyahut basma olması durumuna göre üç farklı çevrim bölgesinin var olduğu düşünülür. Birinci bölge; negatif değerli bir kuvvetin tekrardan negatif değere sahip bir kuvvete değişimi söz konusudur; aynı zamanda bu bölgenin adı negatif tekrar bölgesi veyahut basma tekrar bölgesi olarak da ifade edilir. İkinci bölgede ise değişken olan gerilme; malzemenin hem çekme hem de basma gerilmelerine maruz bırakarak, bu şekilde gerilim değerleri değişecektir. Bu bölgeye de alternatif bölge adı verilmektedir. Üçüncü bölgedeki değişken gerilme; pozitif bir değere sahipken bir başka pozitif değere değişmesi söz konusudur. Bu bölgeye pozitif tekrar bölgesi ya da çekme tekrar bölgesi de denilmektedir.



Şekil 4.2 Tekrarlı gerilme-zaman eğrileri (Erkendirci, 2006)

Şekil 4.2'de gösterilen parametreler arasındaki bağıntılar şu şekildedir:

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{4.1}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \tag{4.2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \tag{4.3}$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{4.4}$$

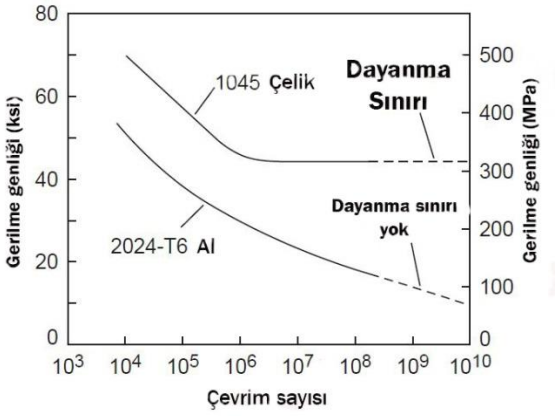
Yorulma yükleme durumunu gösteren *R* değeridir. Çizelge 4.1'de bazı yükleme durumları gösterilmiştir. Yorulma testleri; yüksek frekanslarda ısının daha fazla birikmesi ve testin daha etkili olması için genellikle 10 Hz' den daha düşük frekans değerlerinde yapılır.

Çizelge 4.1 R değerleri için yorulma yük durumları (Gemi, 2014)

Yorulma yük oranı	*Yorulma yük durumu*
R=1	Sabit Yük
R=0	Çekme-yükünü boşaltma
0<R<1	Çekme-Çekme
R=-1	Çekme-Basma (σ_m=0)
-1<R<0	Çekme-Basma

4.2.1. Yorulma dayanımına ortalama gerilmenin etkisi

Ortalama gerilme (σ_m); yorulma testi sonrasında elde edilen çevrim sayısına karşılık malzemenin yorulma dayanımını etkilemektedir. Yorulma ömrü aynı olduğu takdirde; ortalama gerilme arttıkça, gerilme genliği (σ_a) azalacaktır. Çelikler; yorulma dayanım değerinin altında sonsuz çevrime sahiptirler (Şekil 4.3). Ancak alüminyum alaşımları gibi demir dışı metaller, sürekli mukavemet sınırı olarak da adlandırılan net bir yorulma dayanım değerine sahip değillerdir. Bu durum; numune üzerine uygulanan gerilmenin ne kadar azaltılırsa azaltılsın malzemenin belirli bir gerilme devrinden sonra hasara uğrayacağı anlamına gelmektedir. Bu tür malzemeler için belirli bir dayanım değerine karşılık yorulma ömrü belirlenir.



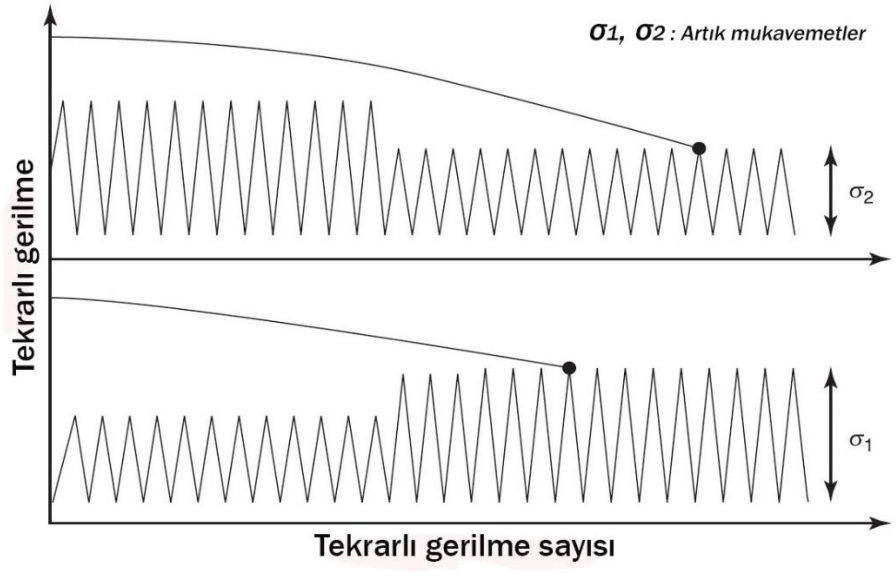
Şekil 4.3 Çelik ve alüminyumun yorulma davranışının karşılaştırılması (Campbell, 2012)

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

Yorulma testinde malzemenin maksimum gerilmeye maruz kalmasıyla hasarın meydana geleceği zamana kadar geçen çevrim sayısı, yorulma ömrü olarak tanımlanmaktadır. Yorulma ömrünü net olarak söylenmesi için; ortalama gerilme veyahut yorulma gerilme oranı olan R'nin bilinmesi gereklidir. Test sonuçları, logaritmik ölçeğe sahip hasarın gerçekleştiği çevrim sayısına karşılık, maksimum yorulma gerilmesi olacak şekilde S-N (Gerilme-Çevrim sayısı) eğrileri olarak verilir. Bu sayede malzemenin yorulma davranışı hakkında genel bir bilgi S-N eğrisinden sağlanabilir. *S* gerilme genliği ve *N* hasarın oluşması için çevrim sayısı olarak temsil edilir. Malzemenin yorulma direnci hakkında; S-N eğrisinin eğimi bize yorum yapılmasını sağlar ve bu eğim her malzeme için farklılık gösterir.

Tabakalı kompozitlerde yorulma ömrüne; malzemeye uygulanan tekrarlı yükün serisi (sıralaması) da etki etmektedir. Çentiksiz tabakalı kompozitlerin yorulma hasarı; artık mukavemetin sürekli azalmasıyla karakterize edilir. Artık mukavemet; uygulanan gerilme seviyesine azaldığında, yorulma kırılması meydana gelir. Yük serisinin etkilerine katkısı bulunan faktörler şu şekildedir: (1) Sınır etkisi olarak da adlandırılan yorulma kırılması meydana geldiğinde, artık mukavemet seviyesindeki fark. (2) Önceden maruz kalınmış yük geçmişine göre malzemenin "hafıza etkisi-(memory effect)".

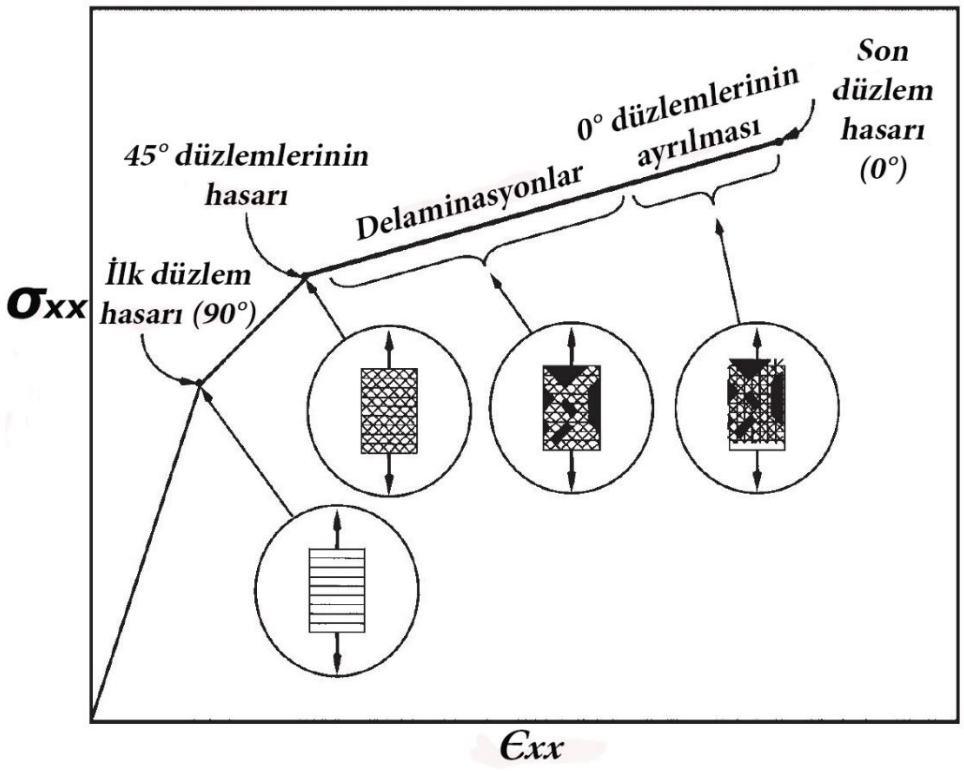
Bir numune; (önce) düşük-(sonra) yüksek yük serisine veya (önce) yüksek-(sonra) düşük yük serisine maruz kaldığında, yorulma hasarları farklı artık mukavemet seviyelerinde meydana gelecektir (Şekil 4.4). "Hafıza etkisi" faktörü; matrisin viskoelastik davranışından dolayı, önceki yük geçmişinin birikmesiyle kompozitin mukavemet/yorulma özelliklerini etkiler. Sonuç olarak; malzeme "hafıza etkisi" ihmal edilirse, yorulma söz konusu olduğunda düşük-yüksek yük serisi, yüksek-düşük yük serisinden daha çok hasar vericidir. Düşük-yüksek yük serisi altında, daha yüksek bir artık mukavemet seviyesinde yorulma prosesi sona erer. Bu nedenle; bir yükleme spektrumunda yük serisinin uygulama sırası, aynı kompozit malzeme için önemli bir şekilde farklı yorulma ömürleri elde edilir (Guedes, 2011).



Şekil 4.4 Yüksek-düşük ve düşük-yüksek yük serilerinin gösterimi (Guedes, 2011)

4.3. Kompozitlerde Çekme ve Basma Hasarları

Çekme Hasarı: Tabakalı kompoziti hasara uğratmak için çekme yükü uygulandığında, tüm düzlemler aynı anda hasara uğramazlar. $[0°/45°/90°/-45°]_s$ tabakalı kompozitte hasarın ilerleyişi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Düzlemler, yükleme yönünde gerilimin düzenli artışıyla, art arda hasarlanmaktadır. Çünkü tek yönlü düzlemlerin enine mukavemeti, boylamasına olan mukavemetinden düşüktür ve ilk hasar enine düzlemlerde oluşacaktır. Hasar oluşumu (90°) düzlemlerinde gerçekleştikten sonra, genellikle diğer açılı (±45°) düzlemlerde oluşacak şekilde takip eder ve son olarak da daha güçlü (0°) düzlemleri hasara uğrar. İlk düzlem hasarının oluşumu; uzay endüstrisinde hasarlı tabakaları fark edebilmek için sık sık kullanılır.

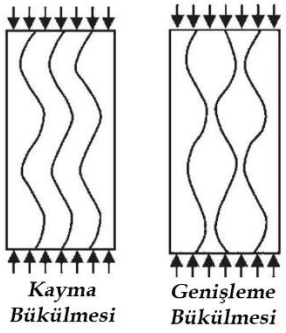


Şekil 4.5 $[0°/45°/90°/-45°]_s$ tabakalı kompoziti için düzlem hasarının ilerleyişi (Campbell, 2012)

Basma Hasarı: Boylamasına (0°) bir numune eksenel bir basma yüküne maruz kaldığında, elyafların mikro seviyede bükülmesi olarak bilinen; ya "kayma modu" ya da "genişleme modu" meydana gelebilir (Şekil 4.6). Genişleme modunda; elyaflar, bitişiğindeki elyaflara zıt yönde bükülürler. Bu mod adını gerçekleşen durumdan almaktadır ki; matrisin ana deformasyonu, elyaflara dik bir yönde matris malzemesinin genişlemesidir. Kayma modunda; elyaflar, aynı dalga boyu ve fazında bir başka elyaf ile

bükülürler. Öyle ki; bitişik elyaflar arasındaki matris malzemesi, kayma ile öncelikli olarak deforme olur. Kayma modu; daha yüksek elyaf hacim oranına sahip kompozitlerde meydana gelir ve bu yüzden yüksek mukavemetli karbon fiber kompozitlerde baskın olan hasar modudur.

Testler göstermektedir ki; matrisin elastik modülüsü de önemlidir. Elyaflara daha iyi destek sağlanması, daha rijit matrislerle olur ve böylelikle daha yüksek basma mukavemetleri sağlanmış olur.



Şekil 4.6 Basma yüküne maruz tek yönlü kompozitler için bükülme modları (Campbell, 2012)

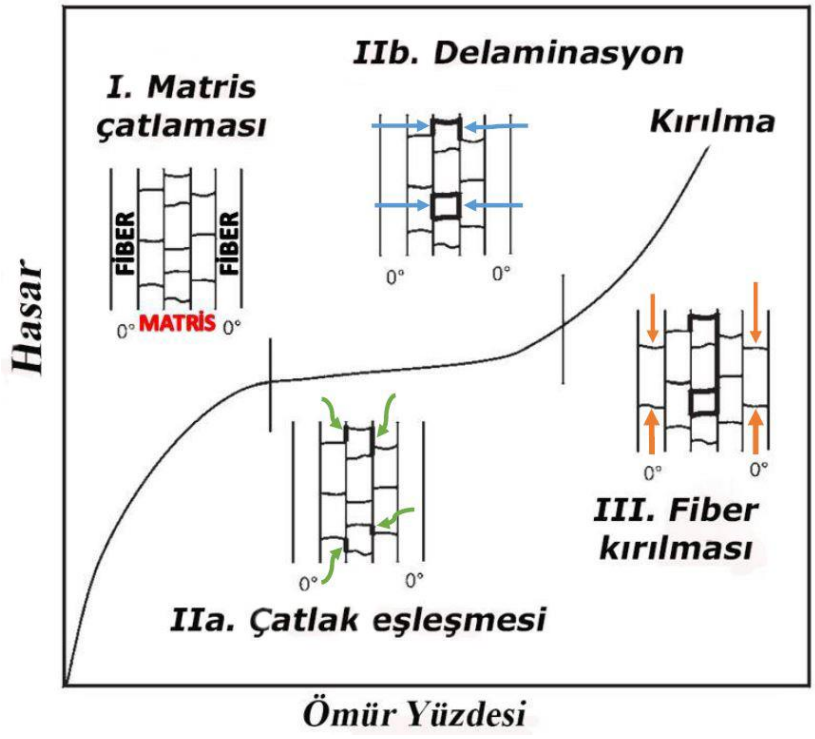
4.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma

Metallerde ve kompozitlerde yorulma hasar mekanizması çok farklıdır. Metallerde yorulma hasarı normal olarak; tek bir çatlağın kesit içerisine yavaş yavaş yayılıp, kalan kesitin daha fazla yükü destekleyemeyecek hale gelmesiyle sonuçlanır ve hasar meydana gelir (Şekil 4.7). Kompozitlerin yorulması ise oldukça farklıdır. Metallerde görülen ayrık bir çatlağın aksine; farklı yerlerde, çok farklı hasar türü oluşur ve nihayetinde hasara neden olmak için birleşirler. Beş ana hasar mekanizması bulunmaktadır: Matris çatlaması, fiber kırılması, çatlak birleşmesi (eşleşmesi), delaminasyon başlangıcı ve delaminasyon büyümesidir.



Şekil 4.7 Metal ve kompozitler arasında birikimli hasarın karşılaştırılması (Jollivet ve ark., 2013)

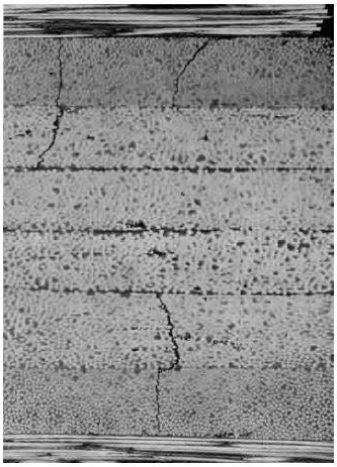
Hasar ilerleyişinin üç aşaması boyunca; çekme-basma yorulma yüklemesine maruz yarı-izotropik bir kompozitte, yüzde yorulma ömrüne karşılık hasar durumu Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Yorulma hasarının ilerleyişi (Campbell, 2012)

I. Aşama: Matris çatlaması. Birince aşama süresince, eksen dışı düzlemlerde çekme yüklerinden dolayı matris çatlakları gelişir. $[0°/90°/\pm45°]_s$ karbon/epoksi düzlemlerine sahip kompozitin matrisinde çatlak izleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir. 90° düzlemindeki çatlaklar, 45° düzlemindeki çatlaklara bağlantı kurmuştur. Ancak 0°

düzlemlerinde çatlaklar çoğalamamıştır. Matris çatlakları; malzemenin özellikleri ve tabaka kalınlığının bir fonksiyonu olan, doyma seviyesine veyahut kararlı bir hale ulaşana kadar gittikçe gelişir. I. aşama sırasında hasar, görece küçük seviyededir ve yorulma ömrünün başta %10 ile %25'i esnasında meydana gelir. Mukavemet kaybı ihmal edilebilir ve rijitlik kaybı %10'dan daha az olmasına rağmen; oluşan matris çatlakları gelecekte oluşacak hasarların habercisidir. Bunlara ilaveten; matris çatlakları yüzeye açık ise (neredeyse her zaman böyledir), hasar prosesini hızlandırabilen nemin, girmesi için yol sağlayabilirler.



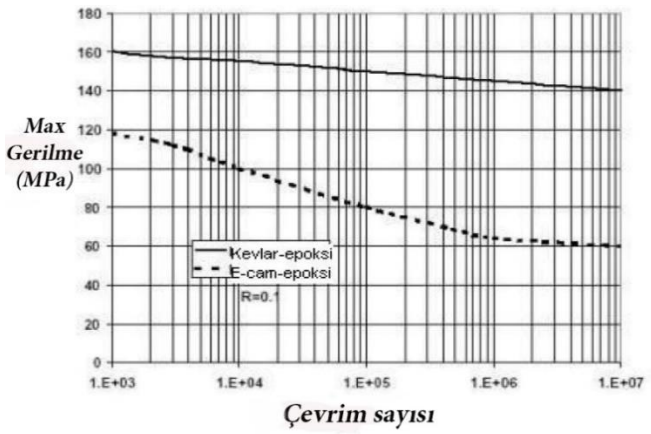
Şekil 4.9 $[0°/90°/\pm45°]_s$ açılı karbon/epoksi tabakalarının matrisinde çatlak izini gösteren resim (Campbell, 2012)

II. Aşama: Çatlak eşleşmesi, delaminasyon başlaması ve fiber kırılması. Matris çatlakları eksen dışı düzlemlerde büyürken, en sonunda matris çatlakları ana yükü taşıyan 0°yönündeki düzlemleri keser. 0° yönündeki düzlemler çatlak büyümesini köreltir; ancak bu durum, bitişik düzlemlerde elyaf kırılmasını başlatan gerilim konsantrasyonlarını meydana getirir. Matris çatlaklarının ucunda bulunan bu büyük çekme gerilmeleri; matris çatlaklarına dik ve 0° yönündeki elyaflara paralel uzanan boyuna çatlaklara neden olur. Boyuna çatlaklar ve matris çatlaklarının bu kombinasyonu "çatlak eşleşmesi" olarak adlandırılır.

II. aşamanın sonraki evreleri esnasında; yaygın çatlak eşleşmesinin bir sonucu olarak, boyuna çatlaklar ve matris çatlakları kesiştiğinde katmanlar arası büyük gerilimler gelişir, bu ise delaminasyonların başlamasına neden olur ve II. aşamanın sonraki evrelerinde baskın hasar mekanizması delaminasyonlar olacaktır. II. aşamadaki hasar; I. aşamadaki hasardan daha yavaş hızda meydana gelir ve gelecekteki ömrün %70 ile %80'i için hasar oluşturmaktadır.

III. Aşama: Delaminasyon büyümesi ve Kırılma. Son aşamada; delaminasyon büyümesi ve 0° yönündeki düzlemlerin nihai hasarı, baskındır. II. aşama esnasında başlayan delaminasyonlar; 0° yönündeki düzlemler haricinde, diğer düzlem ara yüzeyleri arasında büyümeye başlar. Delaminasyonlar yeteri kadar genişlediğinde, tabakalar arası ayrışma (alt tabakalaşma) gerçekleşir ve rijitlikte büyük bir düşüş meydana gelir. III. aşama sırasında basma yüklerinin varlığı özellikle zararlıdır. Çünkü basma yükleri eğilmeyi başlatmak için tabakaların ayrışmasına neden olur. En sonunda mukavemet ve rijitlik öyle azalır ki; kaba kesit hasarı meydana gelir (Campbell, 2012).

ASTM-D2992-12 (2012) standardında silindirik boruların iç basınca maruz kaldığı yorulma deneylerinde uygulanacak gerilme oranı R=0.05 olarak belirtilmiştir. Uygulanan basınç; hidrolik sistemler aracılığıyla iletildiğinden basıncın sıfıra indirilmesi mümkün olmayacağı için gerilme oranı R=0.05 belirlenmiştir. Yorulma ömrü genellikle maksimum gerilme ve çevrim sayısının logaritması olarak S-N eğrisi şeklinde çizilir. 2 farklı kompozite ait S-N eğrileri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 İki farklı kompozite ait S-N eğrisi (Gemi, 2014)

Birçok metalin yorulma davranışına benzeyen E-camı/epoksi kompozite, düşük seviyede gerilmeler uygulandığında çok yüksek çevrimlere ulaşılabilmektedir. S-N eğrisini ifade eden bağıntı (4.5) aşağıda verilmiştir.

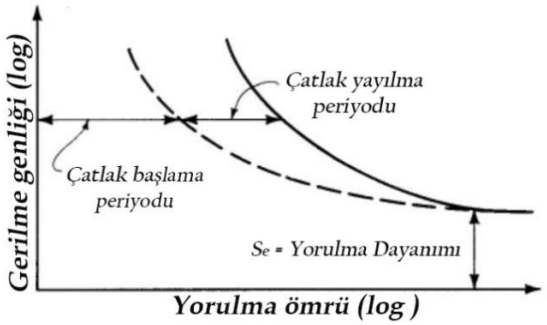
$$S = \sigma_{tu}.(m \log N + b) \tag{4.5}$$

Bu bağıntı da; S maksimum yorulma gerilmesini, σ_{tu} ortalama statik mukavemeti, N hasara sebep olan çevrim sayısını, m ve b de sabitleri temsil etmektedir. Bu sabitlerden; eğimi m sayısı, S-N eğrisinin kesmiş olduğu gerilmeyi ise b sayısı ifade etmektedir.

m değerinin düşük, *b* değerinin yüksek olduğu durum; yüksek yorulma mukavemetini göstermektedir. S-N grafiği üstel bir fonksiyon olarak da bağıntı (4.6)'da verilmiştir. Burada c ve d ise birer sabittir (Sakin, 2004).

$$\frac{S}{\sigma_{tu}} N^d = c \qquad (4.6)$$

S-N eğrisi; uygulanan gerilmeye bağlı olarak yorulma ömrünü gösterirken; aslında çatlağın başlayıp ilerlemesi sonucu toplam yorulma ömrü gösterilmektedir (Şekil 4.11). Malzemeye uygulanan değişken gerilme miktarı arttıkça, yorulma ömrü kısalacaktır. Çünkü çatlağın başlaması için gereken eşik enerji miktarı daha kısa sürede elde edilecektir. Malzeme üzerinde çatlaklar, düzensizlikler bulunuyor ise çatlağın oluşması için süre (enerji) harcanmaz, böylelikle de toplam yorulma ömrü kısalmış olur.



Şekil 4.11 Yorulma ömrünün başlama ve yayılma kısımları (Totalmateria)

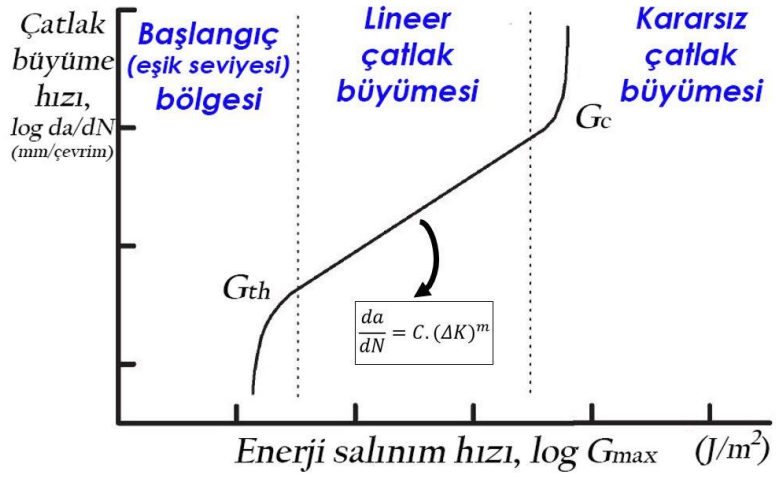
4.5. Yorulma Olayının Gelişimi

Yorulma olayında çekme gerilmesinde değişimler ve dalgalanmalar; yorulma çatlağını başlatan ve ilerlemesini sağlayan mekanizmadır. Dinamik şartlarda çevrim başına oluşan çatlak büyüme oranı *da/dN*; çatlak ucundaki dinamik gerilme şiddet faktörü *ΔK*' nın bir fonksiyonu olarak ifade edildiği, Paris-Erdoğan eşitliği (4.7) ile dinamik şartlarda çatlak büyümesi olarak ortaya konmuştur. Burada *a* çatlak uzunluğu, *N* çevrim sayısı, *ΔK* dinamik gerilme şiddet faktörü ve *C* ile *m* ise malzemeye, çevreye ve test şartlarına (yükleme oranı *R*, test sıcaklığı, dalga biçimi vb.) bağlı deneysel sabitlerdir. *m* değeri, malzemenin izotrop olmasına bağlı olarak boyuna veya enine yüklemelerden etkilenir. Malzemeye ait işletme ömrüne de (4.8) bağıntısından ulaşılabilir. Burada, a_i ilk çatlak boyu, a_c ise hasara karşılık gelen kritik çatlak boyudur (Saatçi ve Tahralı, 2003).

$$\frac{da}{dN} = C.(\Delta K)^m \tag{4.7}$$

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C.(\Delta K)^m} \tag{4.8}$$

Yükleme şartlarında; çatlağın ilerlemesi için sistemden açığa çıkan enerji oranı olan *G*'nin, çatlak büyüme hızı *da/dN* ile olan ilişkisi Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Ancak birçok durumda *G*'yi hesaplamak yerine $K=(EG)^{1/2}$ ile tanımlanan "Gerilme şiddet faktörü" olan *K* parametresi hesaplanır. Çatlağa dik olarak etki eden gerilme (σ); çatlağın ilerleme yönünde olup (4.9) bağıntısından elde edilir. Burada *r* çatlak ucundan uzaklık olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.12 Yorulma çatlak büyümesi da/dN-G eğrisindeki üç bölge (Harris, 2003)

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \tag{4.9}$$

Bir malzemenin ömrü kırılma mekaniğine göre üç başlıkta incelenir. İlk olarak; üretimden kaynaklanan kusurlar nedeniyle veyahut yorulma, sürünme hasar mekanizmalarına maruz kalarak mikro seviyede çatlağın oluştuğu çatlak başlama aşamasıdır. İkinci olarak; kırılma tokluğu veyahut gerilme şiddet faktörü ile çatlak büyümesinin kontrol altında olduğu (artış hızı) kararlı çatlak ilerleme aşamasıdır. Ve son olarak çatlağın kararsız biçimde hızlı ilerlemesiyle ani olarak kopmanın olacağı kırılma aşamasıdır (Güldü, 1995).

5. DÜŞÜK HIZLI DARBE VE HASAR ANALİZİ

5.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekaniği

Bir sopa ile topa veyahut bir çekiç ile çiviye vurulduğunda; iki cismin yüzeyleri, başlangıç anı çarpışma olarak adlandırılan, göreceli hızları ile bir araya gelirler. Çarpışma sonrası; iki cisim arasında küçük bir temas alanında ortaya çıkan ara yüzey basıncı oluşmasa, cisimlerin birbirine geçmesi veya etkileşimi söz konusu olur. Temas süresi boyunca her bir anda, temas alanındaki basınç; bölgesel bir deformasyona ve nihayetinde bir girinti (nüfuziyet) oluşumuna sebep olur. Cisimler deforme olmamış olsa; bu girinti, meydana gelecek olan etkileşime eşittir.

Darbe esnasında her bir anda bulunan ara yüzey veyahut temas basıncı; çarpışan iki cisim üzerinde zıt yönlerde etkisi olan, etki veya tepki bileşke kuvvetine sahiptirler, dolayısıyla da cisimlerin birbiri içine geçmesi engellenir. Başlangıçta, nüfuziyetin artışı ile kuvvet artar ve birbirine yaklaşan cisimlerin hızları bu kuvvet tarafından azaltılır. Darbe esnasında belirsiz bir anda temas kuvveti tarafından yapılan iş, iki cismin yaklaşma hızlarını sıfıra getirmek için yeterlidir. Daha sonrasında, sıkışma esnasında depolanan enerji iki cismi ayrı olarak hareket etmeye zorlayacaktır ve nihayetinde bu iki cisim görece hızlarla birbirinden ayrılırlar. Katı cisimler arasında darbe için, çarpışma esnasında etki eden temas kuvveti; iki cismin yüzeylerinin temas alanındaki uyumları için gerekli olan bölgesel deformasyonların bir sonucudur.

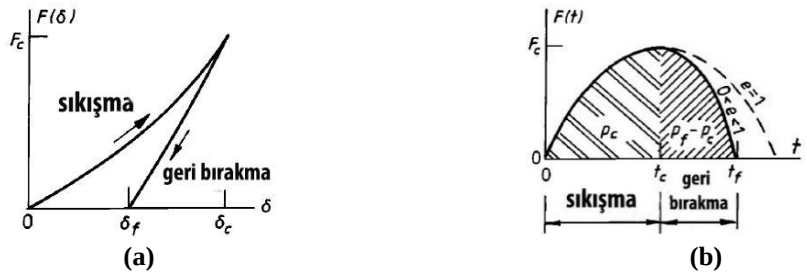
Darbe süresince meydana gelen bölgesel deformasyonlar; temas başlangıcındaki göreceli hıza ve de çarpışan cisimlerin sertliğine göre değişir. Düşük hızlı çarpışmalar yalnız küçük deformasyonlara sebep olan; temas basınçları ile sonuçlanır. Bunlar yalnızca, temas alanına bitişik küçük bir bölgede önemlidir. Daha yüksek hızlarda; plastik akmadan kaynaklanan, temas alanının yanında geniş deformasyonlar oluşur. Bu geniş bölgesel deformasyonlar; nüfuz etme (penetration) veya krater oluşturma (cratering) gibi bariz belirtilere sahip olduğu için; kolaylıkla fark edilir. Her bir durumda deformasyonlar; çarpışan cisimlerde hız değişimlerine neden olan temas kuvveti ile tutarlıdır. Yumuşak bir cisimde plastik akmayı başlatmak için gerekli olan minimum izafi hızın V_y olduğu bir durumda; geniş plastik deformasyonun oluşması için gereken normal darbe hızı $10^2 \text{x} V_y$ ile $10^3 \text{x} V_y$ arasındadır. Metaller için akmadaki normal çarpışma hızı 0.1 m/s düzeyindedir (Stronge, 2000).

5.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları

Çarpışan cisimlerin ilk teması sonrası deforme olabilen parçacık sıkıştırılırken, temas kuvveti *F(t)* artar. Deforme olabilen parçacığın sıkışması veya girinti oluşturması δ olsun. Çarpışan cisimlerin kompliyansı ile ilgili hususta, detaylı bilgi olmadan δ'yı doğrudan bulmanın bir yolu yoktur. Buna rağmen, kompliyans hıza bağımlı ise; göreceli hızın normal bileşeni sıfır olduğunda, aynı anda maksimum girinti oluşumu ve maksimum kuvvet meydana gelir. Şekil 5.1; δ girintisinin ve zamanın bir fonksiyonu olarak normal temas kuvvetini göstermektedir. Şekil 5.1; sıkışma veyahut ilk yaklaşma aşamasından sonra, geri bırakma aşamasında; temas süresinin ayrıldığını göstermektedir. Sıkışma süresince, göreceli kinetik enerji hareketi; temas kuvveti tarafından deformasyon iç enerjisine dönüştürülür. Temas kuvveti, çarpışan cisimlerin başlangıçtaki normal göreceli hızlarını azaltan bir iş yapar; ancak aynı anda eşit ve zıt yönde bir temas kuvveti de, deforme olabilen parçacığın iç deformasyon enerjisini arttıran bir iş yapar.

Temas noktasının normal göreceli hızı sıfır olduğunda, sıkışma aşaması biter ve geri bırakma aşaması başlar. Geri bırakma aşaması boyunca; iç enerjinin elastik kısmı geri bırakılır. Sıkışma süresince depolanan elastik gerinim enerjisi; geri bırakma süresince cisimleri ayrı olarak hareket etmeye zorlayan kuvvet meydana getirir. Bu kuvvetin yaptığı iş; başlangıçta olan göreceli kinetik enerji hareketinin bir kısmını geri getirmektir. Geri bırakma süresi boyunca deforme olmuş bölgenin kompliyansı, sıkışma esnasında olan kompliyanstan daha küçüktür. Bundan dolayı; temas sonlandığında, deforme olabilen parçacığın en sonunda bir miktar kalıcı sıkışma δ_f vardır.

Çarpma sonrası herhangi bir *t* zamanında; temas kuvveti *F*'nin normal bileşeni, Şekil 5.1'de gösterilen kuvvet eğrisi altındaki alana eşit olan, bir *p* impulsa sahiptir.



Şekil 5.1 (a) izafi yer değiştirmenin δ (b) *t* zamanının bir fonksiyonu olarak normal temas kuvveti *F* (Stronge, 2000)

5.1.2. Normal temas kuvvetinin işi

Ayrı olan sıkışma ve geri bırakma aşamaları boyunca, normal temas kuvveti tarafından yapılan iş; sıkışma süresince uygulanan impuls p_c ile ayrışmadaki son impuls p_f arasındaki bağıntıyı verir. Sıkışma süresince normal temas kuvveti, deforme olabilen parçacık üzerinde iş yapar (aslında, başlangıçtaki temas noktasını çevreleyen her cisimde deforme olmuş küçük bir bölgede). Bu iş, parçacığı deforme eder ve iç enerjisini arttırır. Parçacığı sıkıştıran kuvvete karşılık, eşit fakat zıt yönde olan bir kuvvet ise sıkışma süresince normal göreceli kinetik enerji hareketini azaltır. Parçacığın sıkışma süresi boyunca yutmuş olduğu enerjinin bir kısmı, geri bırakma esnasında tekrardan kazanılabilir. Geri alınabilen kısım; elastik gerinim enerjisi olarak bilinir.

Kuvvetin F normal bileşeni tarafından sıkıştırılabilir parçacık üzerinde yapılan iş W_n; impulsun türevinin $dp=Fdt$ kuvvet ile ilişkili olduğu bağıntı hatırlanarak hesaplanabilir (Stronge, 2000).

$$W_n = \int_0^t Fvdt' = \int_0^p vdp' \tag{5.1}$$

5.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Kompozitlerde plastik deformasyonun eksikliği; belirli bir gerilim seviyesinde bölgesel veya yapısal zayıflamanın meydana gelip, kalıcı hasara geçildiği anlamına gelir. Plastik deformasyona uğrayabilen bir metalden farklı olarak kompozitler, bütünlüğünü (örneğin su geçirmezlik) kaybetmeyebilir. Ancak; her ne kadar bazı yapısal özelliklerini mümkün olduğunca kaybetmese de, belirli bir seviyenin üzerinde gerilime sahip kompozit kalıcı olarak hasar uğrar. Yaklaşık 1J kadar bir enerji veyahut 2 m/s ’den daha az hızla gerçekleşen bir darbe, gerçeğe uygun kompozit bir tabakada onarılmaz bir hasara sebep olabilir. Düşük darbe mukavemetinin sebepleri özetlenecek olursa şu şekilde sıralanabilir (Reid ve Zou, 2000):

- Çapraz ve tabakalar arası kayma mukavemetinin düşük olması
- Katman yapısı (takviye edici fiberlerin etkili biçimde kullanılması ve anizotropinin azaltılması gereklidir)
- Plastik deformasyonun olmaması

5.3. Darbe Testleri

Kompozit malzemelerin darbe davranışını incelemek amacıyla standart bir test yöntemi uygulanmayıp, günümüzde yaygın olarak kullanılan bazı test yöntemleri ve cihazları bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

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

5.3.1. Ağırlık düşürme darbe testi

Darbe testi için ağırlık düşürme test düzeneği Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Ağırlık düşürme darbesinin fiziği; serbest düşme hareketinden dolayı enerjinin korunumu ile ilgilidir. Darbe enerji seviyesi; kütle ve düşme mesafesi bilinerek, belirlenebilir. Darbe mekaniği; Newton'nun ikinci hareket kanunu ve enerjinin korunumu ile analiz edilebilmektedir. Ağırlık düşürme darbe testinde; vurucunun başlangıç çarpma hızı V_0 (5.2), g ivmesi ve h serbest düşme mesafesi ile bağlantılıdır. m kütleli vurucunun, darbe öncesindeki maksimum enerjisi E_0 (5.3)' dir. Vurucu test numunesine temas ettiğinde ise, vurucunun enerjisi azalır (5.4). Vurucunun ucu ile numune arasındaki ilk temastan sonraki zamanda olan hız ise V_f 'dir. Yutulan enerji; zamanın bir fonksiyonu olarak eşitlik (5.5)'den belirlenebilir.

$$V_0 = \sqrt{2gh} \tag{5.2}$$

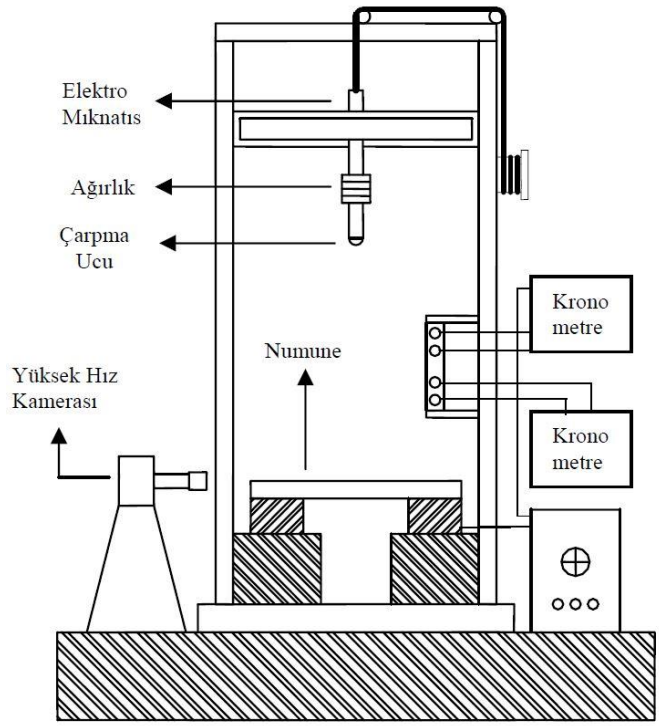
$$E_0 = \frac{1}{2}mV_0^2 \tag{5.3}$$

$$\Delta E_0 = \frac{1}{2}m\left(V_0^2 - V_f^2\right) \tag{5.4}$$

$$E_{ab} = \frac{1}{2}mV_0^2 - \frac{1}{2}m\left(V_0^2 - \frac{1}{m}\int_0^t F dt\right)^2 \tag{5.5}$$

Ağırlık düşürme darbe test cihazlarından bazıları; yer değiştirmeyi veyahut ivmelenmeyi ölçerken; böylelikle yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde de, en uç noktadaki yük ve absorbe edilen enerji gibi özellikler malzemede meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilir. Ağırlık düşürme darbe test cihazını meydana getiren ekipmanlar; platformlarla desteklenen numune, tüp içerisine yerleştirilen yük ölçme cihazı (yük hücresi), çarpışmadan bir an önceki tüp hızını ölçen fotoelektrik hücreler ve darbe olayını görüntülemede kullanılan yüksek hız kamerasıdır (Ceyhun ve Turan, 2003).

Kompozit malzemelere ait darbe özellikleri; darbe test cihazından (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah vb.), çarpacak cismin yapısal özelliğinden (içi dolu veya boş, uç şekli ve boyutu vb.), çarpacak cismin hızı ve kütlesinden (veya enerjisi), numuneye ait konfigürasyondan (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi vb.) etkilenmektedir. Bundan dolayı kompozit malzemelerin darbe özellikleri söz konusu olduğunda tüm bu kriterlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Ceyhun ve Turan, 2003).

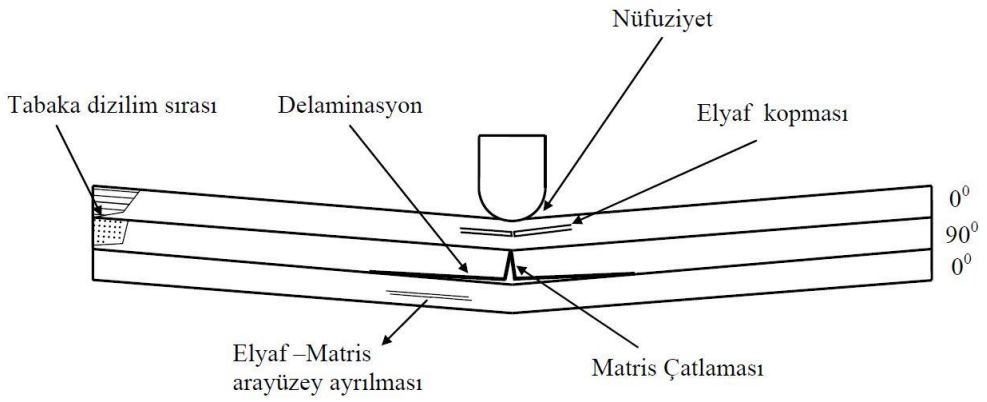


Şekil 5.2 Ağırlık düşürme test düzeneği (Ceyhun ve Turan, 2003)

5.4. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Kompozit malzemelerin en hassas olduğu yükleme durumu; tabaka veya fibere dik yükleme olacak şekilde düzlem dışına doğru olanıdır. Çünkü kalınlık doğrultusunda, tabaka düzlemindeki yapısından daha zayıftır. Sonuç olarak; enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, toplam yük taşıma kapasitelerinde önemli düşüşlere sebep olan hasarlara uğrarlar. Kompozit malzemelerin bu darbe yüklerine karşı gösterdikleri cevap çok komplekstir. Bu durum, kompozit malzemeyi meydana getiren her bir bileşenin kendi özellikleri kadar yapısal durumuna da bağlıdır. Ayrıca, darbeye verilen cevap; çarpan cismin geometrisine, hızına ve kütlesine de bağlıdır. Her biri enine darbenin toplam etkisini karakterize etmede önemli bir rol oynar. Darbe sonrasında çarpan cismin gözle görülemeyen veya zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetine kadar değişebilen farklı şekillerde hasar modları bulunmaktadır. Düşük hızlı darbeler kompozit yapı üzerinde gözle görülemeyen hasarlar oluşturabilir. Bunlar kompozit yapıda tabaka içerisinde; matris kırılması, delaminasyon ve/veya fiber kırılması şeklinde hasarların oluşması söz konusudur. Bu hasarlar sebebiyle de mukavemette önemli bir seviyede düşüş olmaktadır. Ayrıca; ciddi bir seviyede olmamasına rağmen rijitlikte de düşüş görülebilmektedir (Ceyhun ve Turan, 2003).

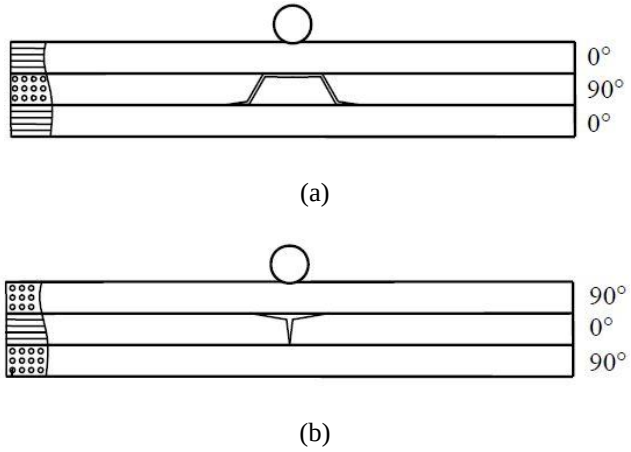
Düşük hızlı darbe sonrasında; hasar, matris çatlağı ile başlayıp; daha sonrasında farklı sarım açılarına sahip tabakların ayrılması (delaminasyon) ile devam eder. Numuneye uygulanan darbe enerjisi artışıyla da, delaminasyon miktarının artması ve nihai olarak elyaf hasarları oluşacaktır. Şekil 5.3'te, darbe sonrası oluşabilecek hasar modları şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Darbe sonrasında kompozit yapıda oluşabilecek hasar modları (Kara, 2012)

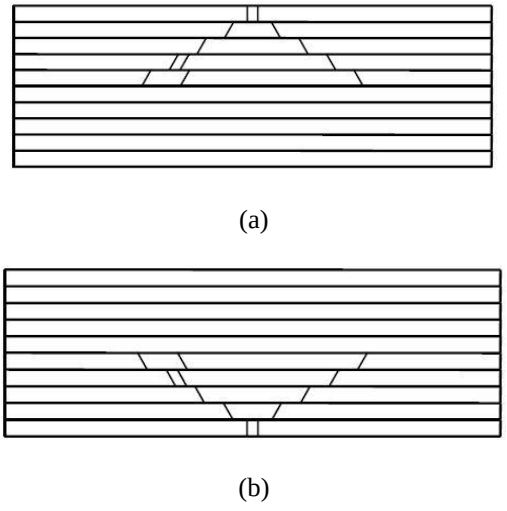
5.4.1. Matris hasarı

Düşük hızlı darbe sonrası kompozit malzemede görülen ilk hasar çeşididir ve matrisin çatlaması şeklinde ortaya çıkar. Matriste oluşan çatlaklar, tek yönlü elyaflardan oluşan tabakalarda genellikle elyaf yönüne paralel olan düzlemlerde gerçekleşir. Matris çatlakları ile başlayan hasar süreci, devamında bu çatlakların tabakaların ayrılmasına (delaminasyon) neden olması ile sonuçlanır. İki tip matris çatlağı elde edilmektedir. Bunlar; çekme ve kayma çatlakları olarak Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Çekme çatlakları; düzlem içindeki normal gerilimlerin tabakanın enine çekme mukavemetini aştığında ortaya çıkmaktadır. Kayma çatlakları; enine kayma gerilimlerinin bu çatlakların oluşumunda önemli bir rol oynadığını gösteren, katman yüzeyinin ortasında açılı biçimde bulunurlar.



Şekil 5.4 Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı (Abrate, 1998)

Kalın tabakalı kompozitlerde; matris çatlağı, yüksek bölgesel temas gerilimleri sebebiyle vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar ilerleyişi yukarıdan aşağıya doğru çam ağacı deseninde gerçekleşir (Şekil 5.5a). İnce tabakalı kompozitler için; tabakanın arka kısmındaki eğilme gerilimleri, en alt katmanda matris çatlaklarına sebep olur. Matris çatlaklarını ve delaminasyonları içeren desen tekrar başlar ve böylece ters çevrilmiş çam ağacı deseni sürdürülür (Şekil 5.5b) (Abrate, 1998).



(a)

(b)

Şekil 5.5 (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı desenli hasar örnekleri (Abrate, 1998)

Darbe enerjisine dönüşecek olan başlangıç kinetik enerjisi; kuvvetlice matrisin özelliklerinden etkilenir ve esasen fiberin, ister örgü veya örgüsüz yapıda olsun, özelliklerinden de bağımsızdır. Griffin (1987), aynı matris malzemeli beş farklı fiber takviyesi kullanarak, beş kompozit için darbe deneyleri yapmış ve deneyler sonucunda; hasara neden olan başlangıç hasar enerjisinin aynı olduğunu ve hasar başlangıcının baskın olarak matristen kaynaklandığını göstermiştir.

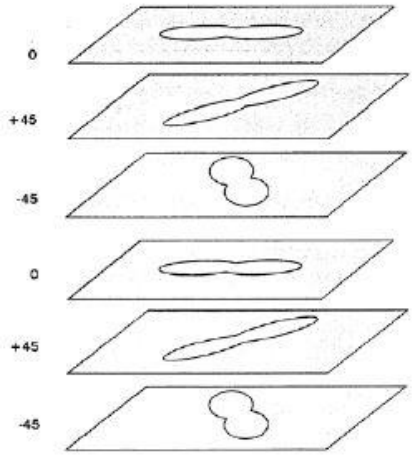
Hasar, matris çatlağı ile başlamaktadır ve bir matris çatlağı farklı fiber yönlenmelerine sahip katmanlar arasındaki ara yüzeye ulaştığında, delaminasyon başlar. Çünkü takviye edici fiberlerin elastik modülüsü genellikle matrisinkinden çok daha yüksektir. Bu fiberlerin aslında rijit olduğunu gösterir. Bu nedenle, kullanılan fiber tipleri matris çatlamasının ve delaminasyonların başlamasına etki ediyor gibi görünmemektedir. Daha yüksek enerjili darbeler için, fiberlerin özellikleri ve istiflenme biçimi önemlidir.

5.4.2. Delaminasyon

Bitişik tabakalar arasında ayrışma olarak tanımlanan delaminasyonlar; tabakaların mukavemetinin önemli biçimde azaldığı bir hasar türüdür. Deneysel çalışmalar sürekli olarak; delaminasyonların, ancak farklı yönelime sahip düzlemler arasındaki ara yüzeyde meydana geldiğini bildirmiştir. İki bitişik düzlem aynı fiber yönelimine sahip olursa, düzlem arasındaki ara yüzeyde delaminasyon olmayacaktır. Tabakalı kompozitte, her bir katman farklı elyaf yönelimlerine sahip olduğunda, bu katmanlara ait eğilme rijitliği de farklı olacaktır. Eğilme rijitliğindeki farklılık ve eğilmeden dolayı oluşan kayma

gerilmeleri, delaminasyonun oluşmasındaki en önemli sebeplerdir. Her bir tabakanın eğilme rjitliğindeki birbirine olan uyumsuzluğu arttıkça, delaminasyon alanı da artmış olacaktır. Delaminasyonu etkileyen bileşenler arasında; malzemeye ait özellikler, istiflenme düzeni ve tabaka kalınlığı gibi başka etkenler de bulunmaktadır.

Numunenin en üst yüzeyinden darbe görmüş tabaka için, farklı elyaf yönelimine sahip düzlemler arasındaki ara yüzeyde ve daha aşağıdaki düzlemlerin ara yüzeylerinde; delaminasyon alanı fiber doğrultusunda dikdörtgen veyahut yer fıstığı şeklinde olmaktadır. Bu duruma ait şematik gösterim Şekil 5.6'da gösterilmiştir (Abrate, 1998).



Şekil 5.6 Elyaf yönlenmesine göre delaminasyon alanlarının şekilleri (Abrate, 1998)

Delaminasyonun başlamasına sebep olan başlangıç kinetik enerjisinin eşik değerini belirlemek ise oldukça zordur ve bu sebeple birkaç test yapılması gereklidir. Ayrıca oluşabilecek delaminasyon şekilleri düzensizdir ve yönelimlerinin tespiti zordur.

Delaminasyon alanı; genellikle vurucunun başlangıç kinetik enerjisine dayalı olarak çizilir ve delaminasyonun boyutu; kinetik enerjinin lineer artışı ile beraber artar. Delaminasyon boyutu; genellikle ultrasonik C-scan cihazından ölçülen hasarlı alan olarak belirlenir. Genelde, delaminasyonlar birkaç ara yüzeyde ortaya çıkar ve C-scan cihazı tek bir düzlem üzerine tüm hasarlı yüzeylerin izdüşümünü sağlar.

Delaminasyon, matris çatlağının bulunduğu durumda gelişir. Enine darbenin neden olduğu delaminasyon; bir eşik enerjisine ulaştıktan sonra, meydana gelir. Ayrıca; delaminasyonlar her zaman bütünüyle ara yüzey bölgesinde ilerlemez, oysa ara yüzeye yakın da yayılabilir.

Enine darbe altında delaminasyon hasarının olduğu noktada absorbe edilen elastik gerinim enerjisini hesaplamak için; deneysel bir bağıntı (5.6) aşağıda verilmiştir.

$$E = \frac{2\tau^2 wL^3}{9E_f t} \tag{5.6}$$

Bu bağıntıda kullanılan ifadeler; t kalınlığı, τ tabakalar arası kesme mukavemetini, w genişliği, L desteklenmemiş uzunluğu, E_f eğilme modülüsünü temsil etmektedir. Absorbe edilen elastik gerinim enerjisi; kalınlık ve eğilme modülüsünün artışıyla, azalmaktadır.

Delaminasyon; katmanlar arası ara yüzey boyunca, yüksek kesme gerilimlerinin ve matris çatlaklarının neden olduğu; yüksek seviyedeki düzlem dışı normal gerilimler sebebiyle, baskın olarak Mod I kırılması şeklinde başlamaktadır. Matris çatlağının delaminasyonu başlatması; genellikle katmanlar arası ara yüzeyde normal ve kesme gerilimlerinin gelişmesinden kaynaklanmaktadır. Eğme çatlakları ve kesme çatlakları delaminasyonu başlatır; ancak kesme çatlakları tarafından oluşan delaminasyon kararsızdır ve eğme çatlakları tarafından başlatılan delaminasyon ise uygulanan yüke orantılı olarak kararlı bir tarzda büyür.

Delaminasyonun büyümesinde birim alan için absorbe edilen enerjinin sabit olduğu bulunmuştur. Katmanlar arası kırılma tokluğu; delaminasyon boyutundan bağımsızdır ve delaminasyon alanı; üretilen en yüksek darbe kuvvetinden tahmin edilebilir. En yüksek kuvvet ile delaminasyon alanı, lineer bir ilişkiyi takip eder. Delaminasyonun yayılmasında; Mod II kırılması baskın olan hasar modudur (Vaidya, 2011).

5.4.3. Elyaf hasarı

Elyaf hasarı; kırılma sürecinde, matris çatlaması ve delaminasyondan daha sonra meydana gelmektedir ve ciddi biçimde nüfuz etmenin gerçekleştiğinin habercisidir. Elyaf hasarları; yüksek eğilme gerilimlerinden dolayı darbe görmemiş yüzeyde olacağı gibi, nüfuziyet etkisi ve bölgesel olarak yüksek gerilimlerden dolayı vurucunun tam altında da meydana gelmektedir. Arka yüzeyde eğilmeden dolayı oluşacak elyaf hasarı için gerekli enerji aşağıdaki bağıntıda (5.7) verilmiştir.

$$E = \frac{\sigma^2 wtL}{18E_f} \quad (5.7)$$

Bu bağıntıda kullanılan ifadeler; σ eğilme mukavemetini, E_f eğilme modülüsünü, w genişliği, L desteklenmemiş uzunluğu ve t numune kalınlığını temsil etmektedir (Vaidya, 2011).

5.4.4. Ara yüzey elyaf-matris ayrılması

Fiberle takviye edilmiş bir kompozitin performansı; matris reçine ve fiber arasındaki ara yüzeyin özellikleri tarafından önemli derecede etkilenir. Ara yüzeydeki yüzeyde yapışma bağı; kompozitin makroskopik mekanik özelliklerini etkiler. Ara yüzey; matris ve fiber arasında gerilim transferinde önemli bir rol oynar. Örneğin; elyaflar matris tarafından zayıf bir şekilde tutulursa, kompozit göreceli olarak düşük bir gerilimde matris çatlağı oluşturmaya başlar. Diğer taraftan, elyaflar matrise güçlü biçimde bağlanırsa, matris çatlaması geciktirilir ve kompozit; matris çatlakları olarak elyaf kırılmasından dolayı katastrofik olarak bozulur. Aynı zamanda elyaf ve matris arasındaki zorlama, elyaf sıyrılması ve ara yüzey kayması gibi diğer hasar mekanizmalarını etkiler. Ara yüzey özelliklerine hâkim olmak; kompozit bir yapının performansını kontrol etmeye bir yol temin edebilir (Talreja ve Singh, 2012).

5.4.5. Nüfuziyet

Nüfuziyet; hasarın makroskopik bir modudur ve vurucunun malzemeye bütünüyle nüfuz etmesi etkin olduğunda; elyaf hasarının kritik bir alana ulaşmasıyla nüfuziyet meydana gelir. Nüfuziyeti oluşturacak darbe enerjisi eşik değeri; numune kalınlığıyla hızlıca artar.

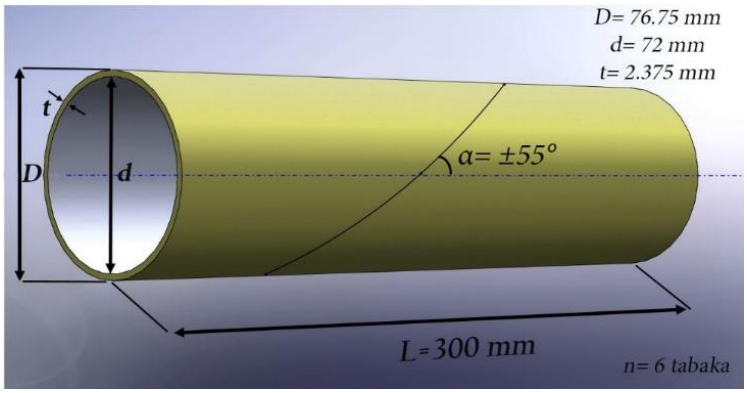
6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi

Bu çalışmada kullanılmış olan ±55° sarım açısına sahip E-camı/epoksi kompozit borular, filaman sarım tekniği ile üretim yapan İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. (İzmir, Türkiye) tarafından yaş sargı yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Kompozit boruyu oluşturan elyaf malzemesi 17 µm çapına sahip Vetrotex 1200 teks E camı olup, matris malzemesi olarak ise Momentive, Bisphonel A, Epikote 828 reçinesi kullanılmıştır. Elyafların sarımına başlamadan önce, mandrel üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı sürülmüştür ve daha sonrasında sarım işlemi yapılmıştır. Yaş sarım yönteminde; 60°C'deki reçine banyosundan geçirilen elyaflar, 72 mm çapında 1 m uzunluğundaki mandrellerin üzerine boru ekseni ile ±55° açı yapacak şekilde sarılmıştır. Bu işlem, istenilen toplam tabaka sayısı 6 olana kadar devam etmiştir. Sarım sonrası kürleme işlemi; öncelikle 135°C'de 2 saat, daha sonrasında 150°C'de 2 saat olacak şekilde fırında yapılmıştır. Kürleme işlemi sonrasında, numunelerin uzunluğu 300 mm olacak şekilde kesilmiştir. Çalışmada kullanılan elyaf ve matrise ait özellikler Çizelge 6.1'de, test numunelerine ait boyutsal parametreler ise Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Çalışmada kullanılan elyaf ve matrise ait özellikler (Samancı, 2004)

	E (GPa)	$\sigma_{çekme}$ (MPa)	ρ (g/cm^3)	ε_{kopma} (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2.6	4-5
Matris: Epoksi reçine	3.4	50-60	1.2	1.5-2



Şekil 6.1 Test numunelerine ait boyutsal parametreler

Çalışmada her bir deney, üç kez tekrar edilmiştir. Farklı çevrim sayılarında yorulmuş, 10 J darbe ile hasarlandırılmış numunelerin; statik patlatma testleri de üçer kez tekrar edilmiştir. Grafiklerde ortalama sonuç değerleri verilmiş, standart sapmalar hata çubukları olarak eğrilerde verilmiştir.

6.2. Yakma Deneyi

Çalışmada kullanılacak CTP kompozit boruların elyaf hacim oranlarını belirlemek için ±55° sarım açısına sahip borudan üç adet yakma deney numunesi kesilip, ASTM-D2584-11 (2011) standardına göre yakma işlemi yapılmıştır. İlk olarak; numunelerin hacimleri tespit edildikten sonra, numuneler 600°C sıcaklığa sahip fırında reçine malzemesinin tamamı yanana kadar tutulmuştur. Bu işlem sonrası numuneden arta kalan malzeme cam elyafıdır. Daha sonra bu elyaflar hassas bir terazide tartılarak kütleleri tespit edilmiştir. Toplam kütleden elyafın kütlesinin çıkarılması ile de reçineye ait kütle belirlenmiştir.

ASTM-D2584-11 (2011) standardına göre elyaf hacim oranını (V_f) veren bağıntı (6.1) şu şekildedir: Bu bağıntıda; W_f ve W_c elyafın ve kompozitin kütlesini, ρ_f ve ρ_c ise elyafın ve kompozitin yoğunluğunu temsil etmektedir.

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

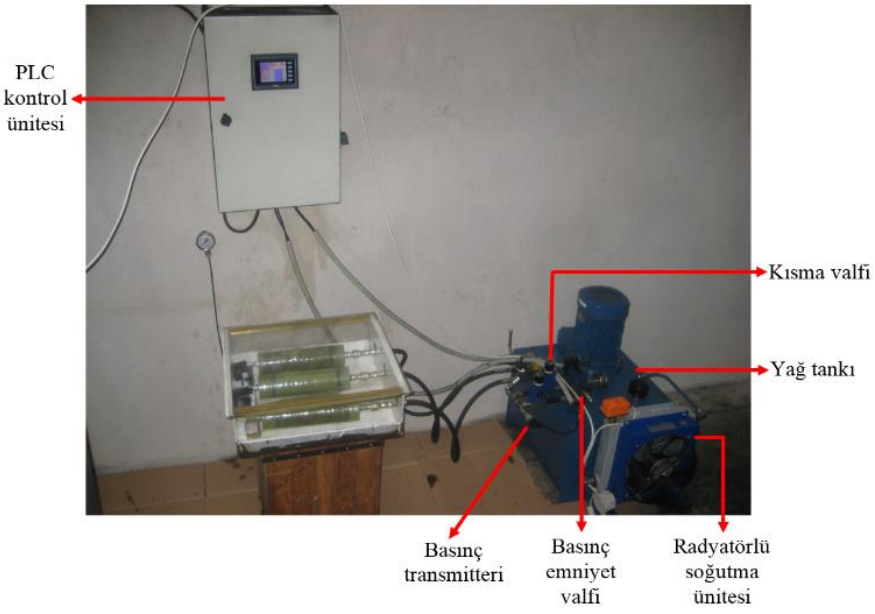
6.3. Serbest Uçlu CTP Kompozit Boruların Değişken İç Basınç Altında Yorulma Deneyleri

PLC ile kontrol edilen yorulma deney cihazı vasıtasıyla; numuneler, ASTM-D2992-12 (2012) standardında belirtilen şartlara göre değişken iç basınca maruz kalarak yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Kompozit boru içerisine, serbest uçlu iç basınca maruz kalmasını sağlayan aparat yerleştirildikten sonra borular patlatma kabinine konulmuştur. PLC ünitesinden uygulanacak üst ve alt basınç değerleri girildikten sonra kompozit borular ile hidrolik güç ünitesi arasında bağlantı sağlayıp, sonrasında yorulma cihazı çalıştırılmıştır. Deney numunelerine etki edecek olan üst basınç değeri; statik patlatma basıncının %35'i olacak şekilde sisteme girilmiştir. Deney süresi boyunca

R=0.05 $(\sigma_{min}/\sigma_{max})$ ve uygulanan frekans değeri f=0.416 Hz (25 çevrim/dakika) olarak belirlenip, bu değerlerde sabit tutulmuştur.

6.3.1. İç basınç yorulma deney cihazı

Yorulma deneylerinde kullanılan PLC ile kontrol edilebilen iç basınç yorulma test cihazı Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Deney cihazı 60 litrelik bir yağ tankıyla, dakikada 8 litre akışkanı pompalayabilme (debi) ve 250 bar basıncı uygulayabilme kapasitesine sahiptir. Deneydeki alt ve üst basınçların, mekanik olarak ayarlanabildiği birer tane basınç emniyet valfi bulunmaktadır. Bunların üzerinde PLC ünitesinden sinyal alan, 2x2'lik bir yön kontrol valfi yer almaktadır. Bu valflerin çıkış kısmına ise sistemdeki yağ basıncını algılayacak SIEMENS marka analog bir basınç transmitteri konulmuştur. Deney cihazı aynı anda üç adet numunenin yorulması için tasarlanmıştır. Numunelerin hidrolik sisteme bağlanması için esnek hidrolik hortumlar kullanılıp, bu hortumların kolay ve çabuk takılıp çıkarılması için ise uçlarında quick kaplin bulunmaktadır. Yorulma testinde sinüzoidal gerilme değişimini sağlamak için de, gidiş ve dönüş hatları ayrı olarak ayarlanabilen kısma valfi konulmuştur. Sistemde kullanılan hidrolik akışkan 46 numara hidrolik yağdır. Test cihazının uzun çevrim sürelerine maruz kalmasından dolayı yağ sıcaklığının yükselmesini engellemek için radyatörlü bir soğutma sistemi de yer almaktadır.

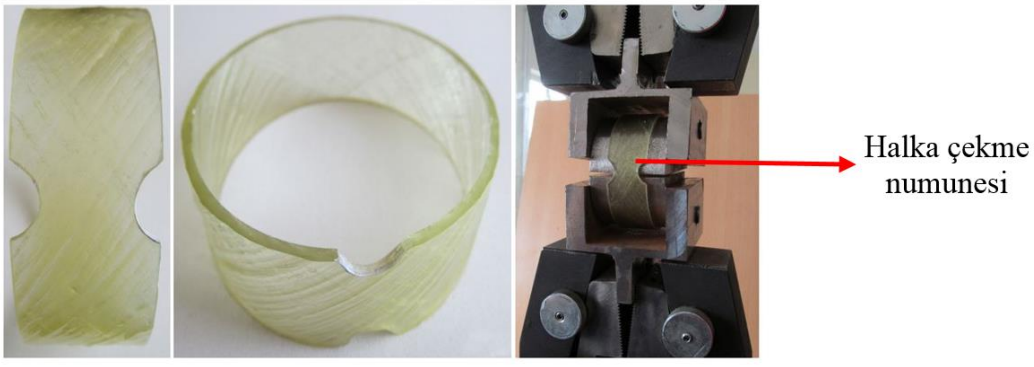


Şekil 6.2 PLC ile kontrol edilen iç basınç yorulma deney cihazı (Şahin, 2011)

Sistemin çalışması şu şekildedir: Numune içerisinde uygulanan basınç; istenilen üst basınç değerine ulaştığında, basınç sensöründen gelen sinyali kontrol ünitesi algılar ve basınçlı yağın tanka boşaltılması için selenoid valfi yönlendirir. Başlangıçta girilen frekans değeri sağlanacak şekilde, bir müddet sonra valf yeniden eski konumunu almaktadır. Bu işlem istenilen toplam çevrim sayısı elde edilene kadar devam etmektedir. PLC kontrol ünitesinin dijital ekranından, hattaki yağ basıncı ve çevrim sayısı devamlı olarak yenilenerek görünmekte ve değerler kaydedilmektedir.

6.4. Halka Çekme Deneyi

CTP kompozit boruların teğetsel gerilme dayanımlarını belirlemek için kullanılan yöntemlerden biri halka çekme testleridir. Halka çekme testi; ön işlem, sıcaklık, nem ve test cihazı hızının belirlenmiş şartları altında, bölünmüş bir disk veya bir halka parçası biçiminde deney numunesinden yararlanılarak, birçok plastik ürünün göreceli olarak belirgin olan çekme mukavemetinin belirlenmesini kapsar. Bu test metodu; üretim yönteminden bağımsız olarak takviye edilmiş termoset reçineli borulara uygulanabilir. Ayrıca bu metod; ekstrüzyon ve kalıplama yöntemleri ile üretilen termoplastik borulara da uygulanabilir. Takviye edilmiş termoset reçineli borular için ASTM-D2290-12 (2012) standardındaki Prosedür A kullanılmaktadır. Bu çalışmada da ASTM-D2290-12 (2012) Prosedür A kısmına göre halka çekme testi yapılarak, CTP kompozit boruların teğetsel yöndeki özellikleri tespit edilmiştir. Şekil 6.3'te; halka çekme deneyinde kullanılan numunelerin şekli ve test cihazına yerleştirilmiş hali gösterilmiştir.



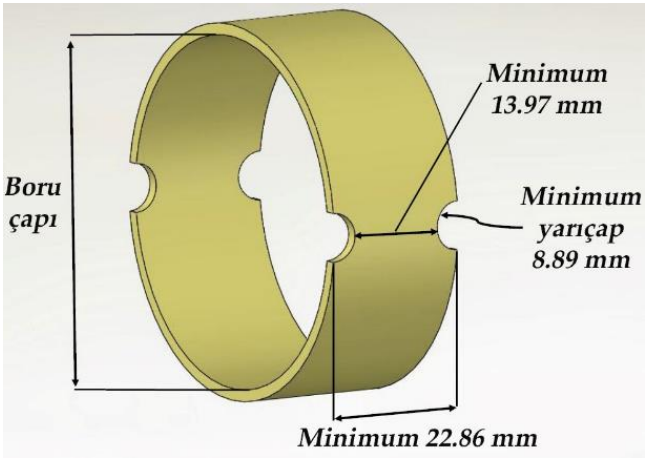
Şekil 6.3 Halka çekme numunelerinin şekli ve test cihazına yerleştirilmiş hali

Prosedür A için test numunesi halkaları; herhangi bir araç vasıtasıyla takviye edilmiş termoset reçineli borudan kesilmiş, tam çapta ve tam numune kalınlığında olmalıdır. Numuneler, Şekil 6.4'te belirtilen geometrilere uygun olması gerekmektedir. Numunelerin bir uçtan bir uca minimum genişliği 22.86 mm, çentikler nedeniyle iki çentik arasındaki (küçültülmüş kesit) genişlik ise minimum 13.97 mm olmalıdır. Küçültülmüş alan sayısı bir veya iki olmalıdır. Eğer iki ise, bunlar 180° aralıklar ile yer almalıdır. Küçültülmüş alanlar numune genişliğine göre 1.27 mm içeride merkezlenmiş olmalıdır ASTM-D2290-12 (2012).

Testte; çekme hızı 5 mm/dakika, sıcaklık standart olarak laboratuvar koşullarında 23°C ± 2°C, nem ise %50±5 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu testin uygulanmasıyla, gerilme değerinin hesaplanması aşağıda verilen bağıntı ile sağlanır:

$$\sigma_a = \frac{P_b}{2A_m} \tag{6.2}$$

Bu bağıntıda; σ_a numunenin belirgin akma veya çekme mukavemet değerini (MPa), P_b maksimum veya kırılma yük değerini (N), A_m iki ölçüme (*dxb*) ait minimum kesit alanını (mm^2), *d* ve *b* ise daraltılmış alandaki kalınlık (mm) ve genişliği (mm) temsil etmektedir.



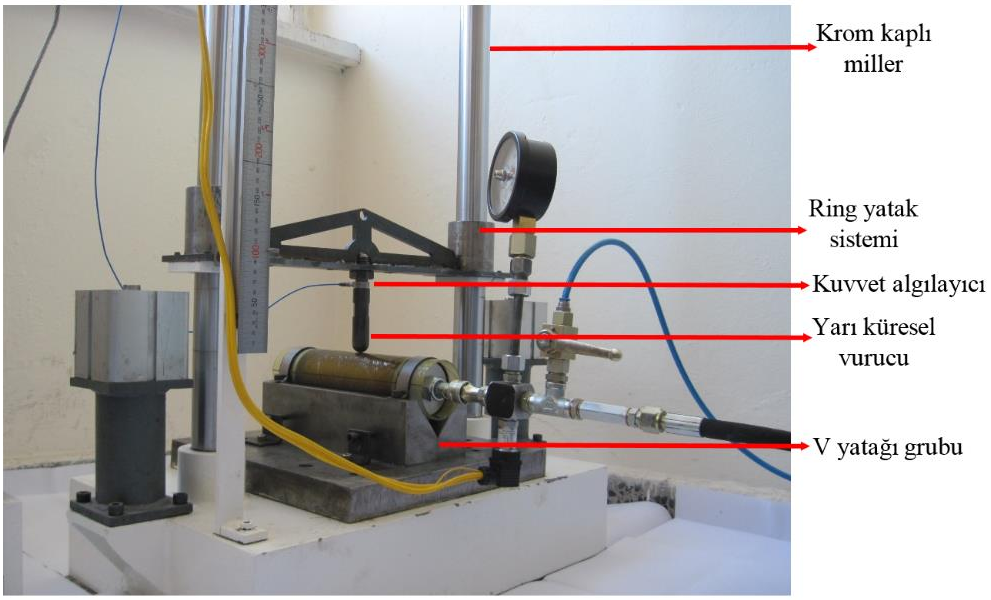
Şekil 6.4 Prosedür A için küçültülmüş kesit numuneleri (ASTM-D2290-12)

6.5. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

CTP kompozit boruların iç basınç etkisi altında düşük hızlı darbeye maruz kaldıklarında, malzemenin bu duruma olan cevabını araştırmak üzere özel olarak

üretilmiş düşük hızlı darbe cihazı kullanılmıştır. Şekil 6.5'te çalışmada kullanılan düşük hızlı darbe test cihazı gösterilmektedir. Bu test cihazı vasıtasıyla; farklı darbe enerjisi seviyelerinde veyahut farklı darbe hızlarında, darbe deneyleri yapma imkânı bulunmaktadır. Deneyin başlamasından bitmesine kadar geçen sürede darbeyi kaydetme ve değerlendirme imkânı vardır.

Test cihazı üç ana yapıdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki; krom kaplı mil üzerinde düşey hareketini sağlayan, vurucu kütlesini ve kuvvet algılayıcısını üzerinde bulunduran lineer ring yatak sistemidir. İkinci olarak; CTP boruların sabitlenmesini sağlayan V yatağı kısmıdır. Sonuncusu ise sistemin elektronik kontrol ünitesidir.



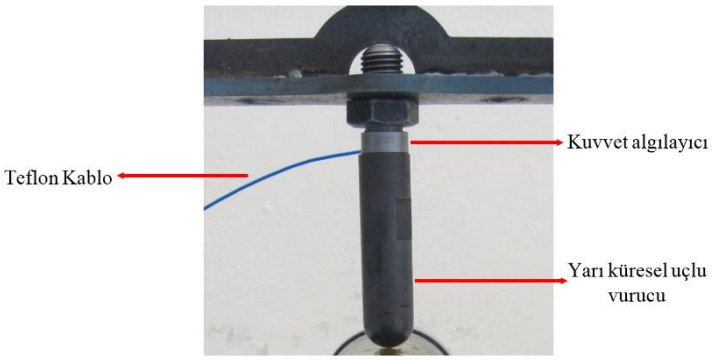
Şekil 6.5 Düşük hızlı darbe test cihazı (Kara, 2012)

6.5.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı

Darbeyi gerçekleştirecek vurucu kütlesi serbest düşme hareketi yaparken sürtünmeyi minimum seviyede tutmak için ring yataklamalı krom ile kaplanmış miller kullanılmıştır. İki tane çelik milin üzerinde hareketini sağlayan karşılıklı lineer rulmanlı yatak, Şekil 6.5'te gösterildiği gibi vurucu kütlesinin her iki uç kenarında bulunmaktadır. Vurucunun kendi kütlesi, bağlı olduğu lineer yatak ve bağlama parçalarıyla birlikte toplam 6.35 kg'dır. Vurucu 24 mm çapa, yarı küresel bir uca sahiptir.

Şekil 6.6'da vurucu ile kuvvet algılayıcı arasındaki bağlantı gösterilmektedir. Çalışmada, 22.6 kN ölçme kapasitesine sahip PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04)

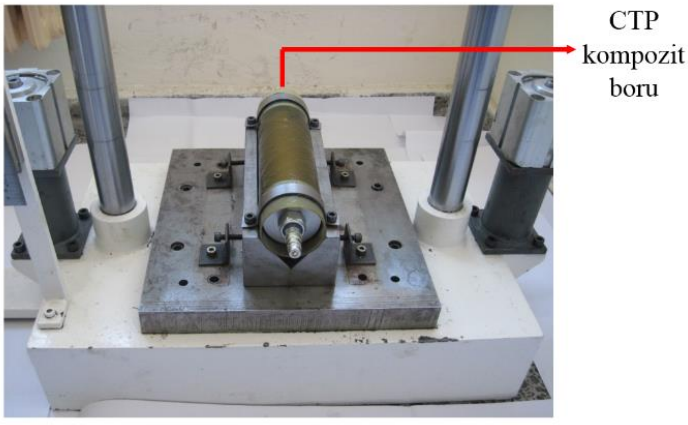
modelinde kuvvet algılayıcı kullanılmıştır. Kuvvet algılayıcıdan alınan sinyal düşük gürültülü teflon kablo yardımıyla, elektronik kontrol ünitesine iletilmektedir.



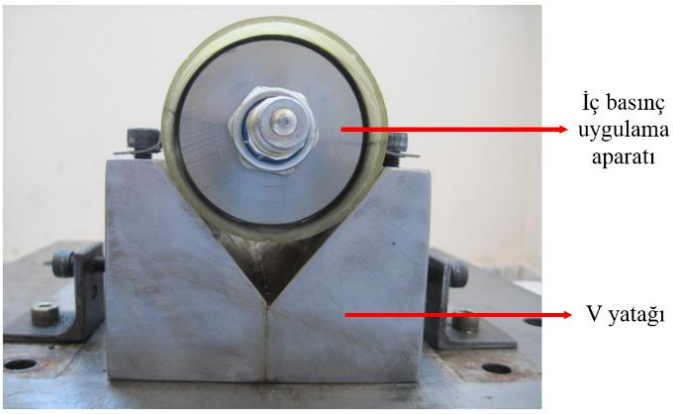
Şekil 6.6 Vurucu-kuvvet algılayıcı bağlantısı (Kara, 2012)

6.5.2. CTP kompozit boru yataklama ve iç basınç uygulama ünitesi

CTP kompozit borulara düşük hızlı darbe deneyleri uygulanması için numuneler Şekil 6.7'de gösterildiği gibi V yatağı üzerine sabitlenmiştir. CTP kompozit boruların 32 bar iç basınç etkisi altında düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8'de iç basınç uygulama ünitesi gösterilmiştir. CTP boruların içerisine hidrolik pompa vasıtasıyla basılan yağın oluşturduğu iç basınç değeri manometreden ve basınç sensöründen ölçülmüştür. Basınç sensörü; düşük hızlı darbe gerçekleştiği anda, numune içerisindeki iç basınç değişimini kaydetmek için kullanılmıştır. Darbe sebebiyle oluşabilecek basınç değişimlerini doğru ölçmek için hidrolik hortumlar ile basınç sensörü arasına tersimez vana konularak borudaki esnemeler engellenmiştir.

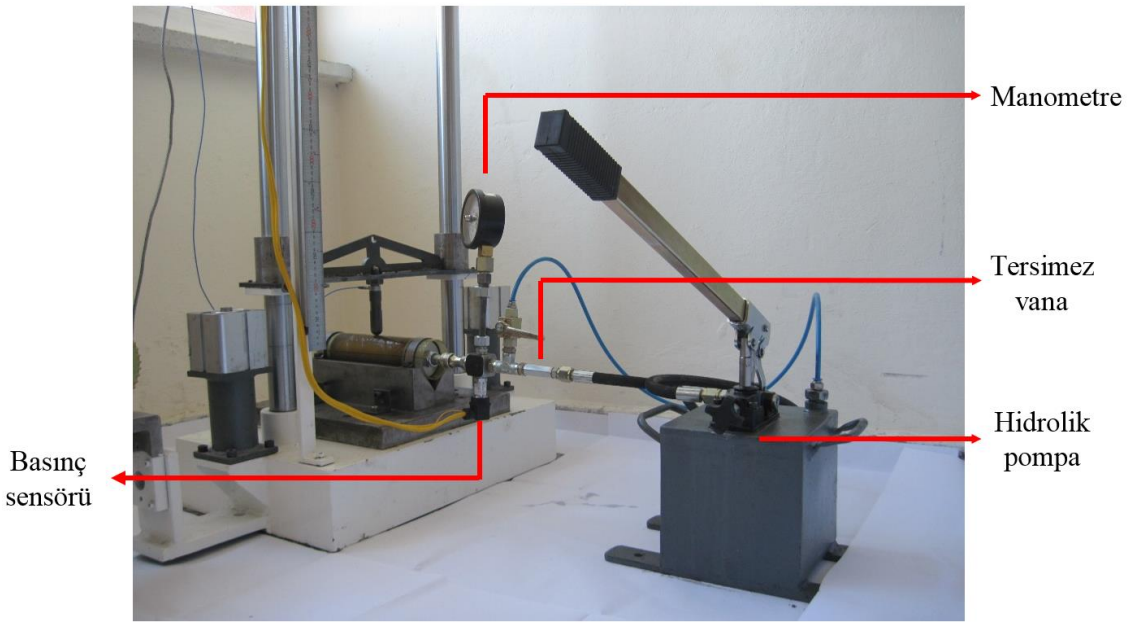


(a)



(b)

Şekil 6.7 CTP kompozit boru yataklama ünitesi (Kara, 2012)

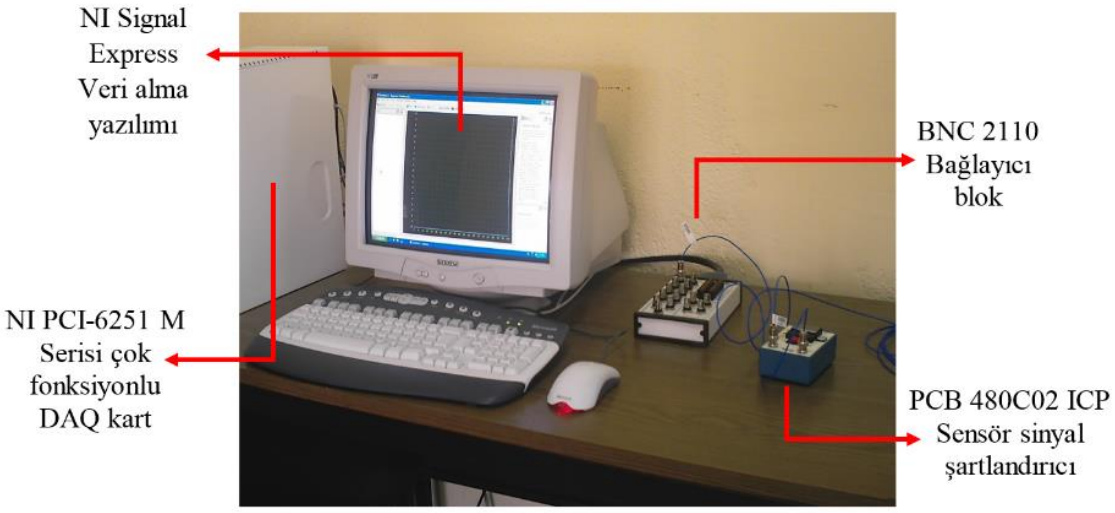


Şekil 6.8 İç basınç uygulama ünitesi (Kara, 2012)

6.5.3. Elektronik kontrol ünitesi

Kuvvet algılayıcıdan iletilen sinyal değerinin yükseltilmesi için PCB 003C30 teflon kablo aracılığıyla gelen sinyal, PCB 480C02 ICP tipinde sinyal şartlandırıcıya iletilmektedir. Basınç sensöründen gelen sinyal ve sinyal şartlandırıcıda yükseltilen sinyal ise BNC bağlayıcı bir blok kullanılarak DAQ karta iletilmektedir. Sinyal şartlandırıcı ile bağlayıcı blok arasında da PCB 003D03 modelinde teflon kablo kullanılmıştır. Bağlayıcı blok ve DAQ kart arasında ise SHC 6868EPM modelinde kablo kullanılmıştır. Sinyali algılayıp işleme ise bilgisayar ana kartına yerleştirilmiş DAQ kartta

gerçekleştirilmektedir. Çalışmada NI PCI-6251 M serisi çok fonksiyonlu DAQ kart tercih edilmiştir. DAQ kart; aynı anda çok sayıda farklı sinyali alıp işleyip, istenilen özellikte sinyaller üretebilme kapasitesine sahiptir. Bu sinyalleri bağlayıcı blok vasıtasıyla alarak başka sistemleri çalıştırabilmektedirler. Zamana göre kuvvet değişiminin elde edildiği grafik NI Signal Express yazılımı ile sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan elektronik kontrol ünitesi Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Elektronik kontrol ünitesi (Kara, 2006)

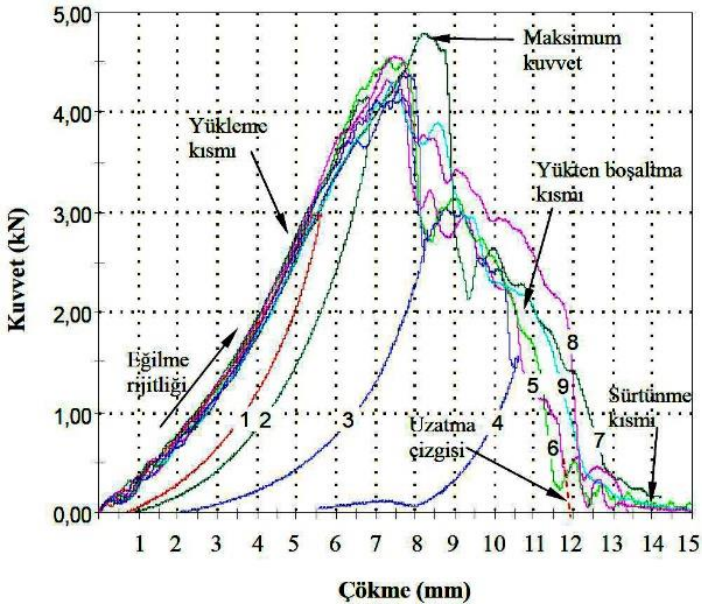
6.6. CTP Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Darbe cihazı vasıtasıyla numunelere farklı darbe enerji seviyesinde düşük hızlı darbeler uygulanarak, boruların darbe davranışlarını gösterecek farklı grafikler elde etmek mümkündür. Numunelerin darbe sonrası cevabına ait üç özel durum söz konusu olup, elde edilen eğriler ile durumun tespiti yapılmaktadır. Bu olası durumlar; numune yüzeyine çarpan vurucunun geri sekmiş olması (rebounding), vurucunun numuneye çarpmasıyla saplanmış olması (penetration) ve vurucunun numuneye çarpmasıyla delip geçmiş olmasıdır (perforation). Kompozit numunelerin darbe davranışını belirlemek için; kuvvetin çökmeye göre değişimi (F-d), kuvvetin zamana göre değişimi (F-t), absorbe edilen enerjinin zamana göre değişimi (E_a-t) ve hızın zamana göre değişimini (V-t) gösteren eğriler elde edilebilir. (Sayer, 2009).

6.6.1. Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri

Kompozit boruların darbe davranışlarını belirlemek üzere kullanılan eğrilerden birisi kuvvet-yer değiştirme (*F-d*) grafikleridir. Darbe enerji seviyesinin artmasıyla beraber, temas kuvvetinin çökme karşısındaki değişimi Şekil 6.10'daki *F-d* grafiğinde verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi tüm eğriler; yükün uygulanmasıyla artışın olduğu bir kısma, en büyük temas kuvvetinin elde edildiği bir değere ve uygulanan yükün kalkmasıyla beraber azalmanın olduğu bir kısma sahiptirler. Uygulanan darbe karşısında, numunenin kendi rijit yapısını korumak amacıyla gösterdiği direnç, kuvvet-çökme eğrilerinde *eğilme rijitliği* olarak ifade edilen artışın olduğu kısımdır. Darbe enerji seviyesinin artışıyla elde edilmiş olan bu eğriler, kapalı ve açık tip eğri olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Darbe testinde vurucu numune üzerine temas edip sonrasında numunenin yüzeyinden geri sektiği takdirde kapalı tip eğriler elde edilir. Böyle olduğu durumlarda, tatbik edilen enerji seviyesinin büyük bir miktarı numune üzerine harcanmış, kalan miktar ise vurucuya sıçrama enerjisi olarak için geri dönmüştür. Kapalı tip eğriye örnek Şekil 6.10'daki 1, 2 ve 3 numara ile adlandırılan eğrilerdir.

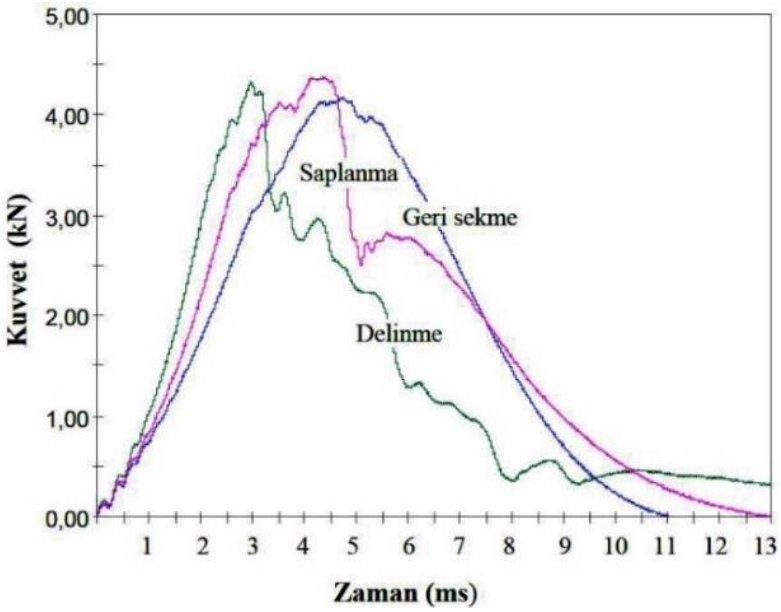
Darbe enerji seviyesinin arttırılması; geri sekme için harcanacak enerji miktarlarının azalmasına, kapalı tip eğrilerin genişlemesine ve çökme miktarlarının da artmasına neden olacaktır. 4 numaralı eğri kapalı tip eğri iken, darbe enerji seviyesi arttırıldığı takdirde, açık tip eğriye dönüşeceği Şekil 6.10'da görülmektedir. Açık tip eğri olma durumunda ise; vurucunun numune üzerine saplanması ya da numuneyi delmesi söz konusudur. Numune üzerine saplanan vurucu; aşağı yöne doğru numunenin kalınlığı kadar hareket etme şansı bulur; ancak numune üzerinden sıçraması mümkün değildir. Bundan dolayı; şekilde de görüldüğü gibi 5 numaralı eğrinin çevresinde, saplanma ya da delip geçme durumu olmuştur. Darbe enerjisi seviyesi çok daha fazla arttırılırsa; ilk olarak vurucunun numuneye saplanması sonrasında kesit boyunca hareket etmesi ve son olarak da numuneyi delmesiyle beraber alt yüzeyden çıkması gerçekleşecektir. Şekil 6.10'da verilen kuvvet-yer değiştirme grafiğinde 6, 7, 8 ve 9 numaralı eğriler, vurucunun numuneyi deldiği durumlardır. Bu eğrilerin yatay eksende bitiş yerlerine bakıldığında; o kısımların, vurucu ile numune arasında oluşan sürtünmeden dolayı, kapandıkları görülmektedir. Bundan dolayı; delinme durumunun olduğu darbe enerji seviyesinden, daha yüksek enerji seviyelerinde darbe gerçekleştirildiğinde kompozit numunenin bundan sonra enerji absorblama yeteneğinin kalmadığı bilinmektedir (Sayer, 2009).



Şekil 6.10 Artan darbe enerjisi altında oluşan kuvvet-çökme (F-d) eğrileri (Sayer, 2009)

6.6.2. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri

Vurucunun numune üzerinden sekmesi, numune üzerine saplanması ve numuneyi delerek geçmesi durumunda; kuvvet-zaman (*F-t)* eğrisinde nasıl bir eğri görünümü aldıkları Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11 Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri (Sayer, 2009)

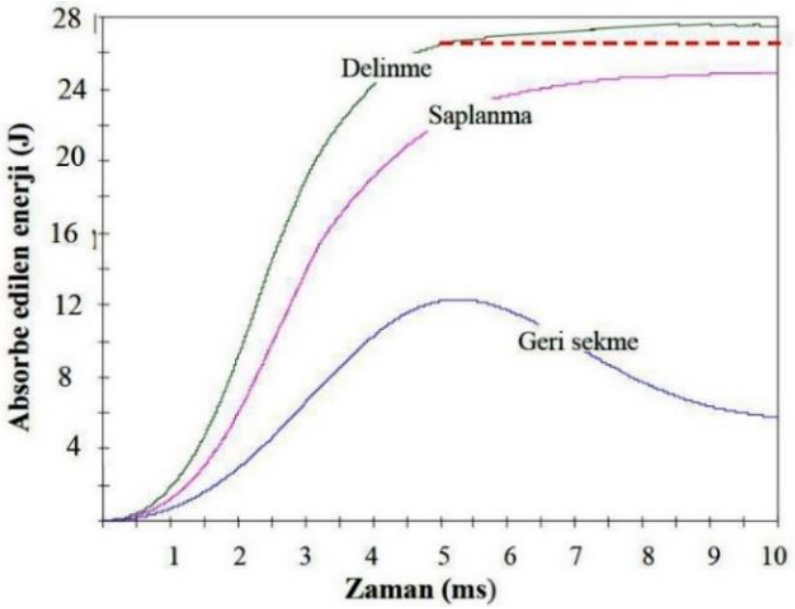
Düşük darbe enerji seviyesi uygulandığında, Şekil 6.11'deki geri sekme durumunda görülen dağ şekline benzer parabolik eğri elde edilmektedir. Darbe enerji

seviyesinin arttırılmasıyla ortaya çıkan temas kuvvetlerinin arttığı; hemen hemen belirgin bir en büyük temas kuvveti değerinde, saplanma veyahut delinmenin olduğu görülmektedir. Vurucunun numuneyi deldiği durumda, numune ile vurucu arasında sürtünmeden dolayı kuvvet oluştuğu için şekilde de görüldüğü gibi eğriye ait son kısım yatay şekilde devam etmiştir (Sayer, 2009).

6.6.3. Absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrileri

Şekil 6.12'de; vurucunun numune üzerinden geri sekmesini, numune üzerine saplanmasını ve numuneyi delerek geçmesini ifade eden eğriler, absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) grafiğinde görülmektedir.

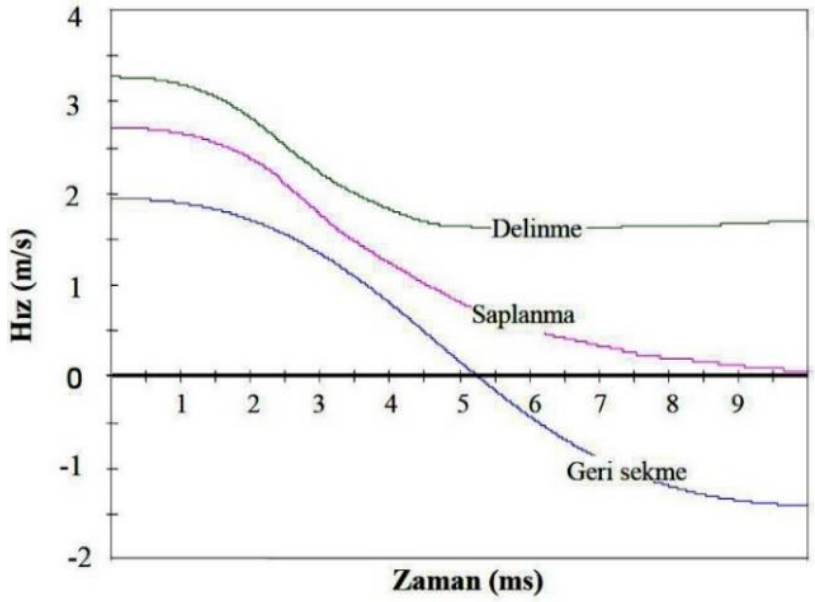
Kuvvet-yer değiştirme (F-d) eğrisinin altındaki alanın hesaplanmasıyla absorbe edilen enerji değeri bulunabilmektedir. Geri sekme durumu olduğunda, vurucu sahip olduğu enerjinin tamamını numuneye aktaramaz ve bir miktarını belirli yüksekliğe tekrar çıkmak için geri sekmede harcar. Saplanma durumu olduğunda; vurucu sahip olduğu enerjinin tamamını numuneye aktarır ve eğride görüldüğü gibi yatay biçimde seyreder. Delip geçme durumunda ise; sürtünme nedeniyle kuvvet-yer değiştirme eğrisinde oluşan yatay kuvvetin altındaki alan, numunenin absorbe ettiği enerji miktarına dâhil edilmez. Bu nedenle; numunenin yutmuş olduğu enerji miktarı, Şekil 6.12'de kesikli çizgiye karşılık gelen enerji seviyesidir (Sayer, 2009).



Şekil 6.12 Absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrileri (Sayer, 2009)

6.6.4. Hız-zaman (V-t) eğrileri

Şekil 6.13'te; vurucunun numune üzerinden geri sekmesi, numune üzerine saplanması ve numuneyi delerek geçmesi durumlarında, vurucu hızının zamana göre nasıl bir değişim gösterdiği hız-zaman (*V-t*) grafiğinde verilmiştir. Darbe enerji seviyesinin arttırılarak yapıldığı testlerde; belirli bir hızda numuneye çarpan vurucu hızını kaybeder, numune yüzeyinden geri sekme durumu olduğu vakit, vurucunun negatif hıza sahip olarak yükselmesi beklenmektedir.



Şekil 6.13 Hız-zaman (V-t) eğrileri (Sayer, 2009)

Vurucu, numune üzerine saplandığı vakit vurucunun sıçrama durumu olmadığı için hız sıfıra inecektir. Numune delindiği durumda ise; oluşan hasar ve numune kalınlığı boyunca sürtünmeden dolayı vurucunun hızı azalır, numunenin alt yüzeyinden vurucu çıktığı zamanda belirli bir pozitif hızda olması beklenmektedir (Sayer, 2009).

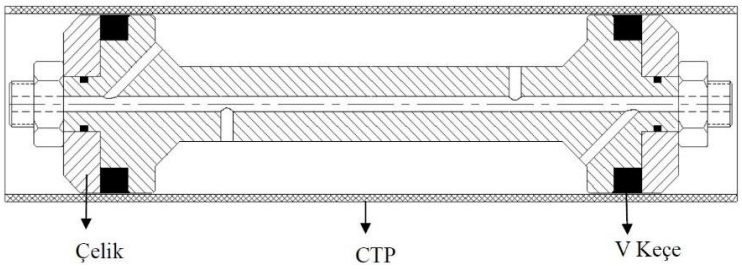
6.7. Statik İç Basınç Deneyleri

Farklı çevrimlerde yorulmaya maruz kalmış CTP kompozit borulara; yalnız bir enerji seviyesinde darbe testleri uygulanarak, boruların patlama mukavemet değerleri, çevrim sayısının ve darbe hasarının patlama mukavemetine etkileri tespit edilmiştir. Çalışmada; yorulmaya maruz kalmış borulara ASTM-D1599-14e1 (2014) standardına göre statik iç basınç deneyleri uygulanmıştır. Belirtilen standarda göre iç basınç patlatma

deneyi; numune içerisindeki iç basıncın artmasının başlaması ile deney sonunda oluşacak hasar (örneğin patlama) arasında geçen sürenin 60-70 saniye aralığında olması gerekmektedir. Belirtilen süreden daha önce ya da daha sonra hasar oluşursa, deney tekrardan yapılmalıdır.

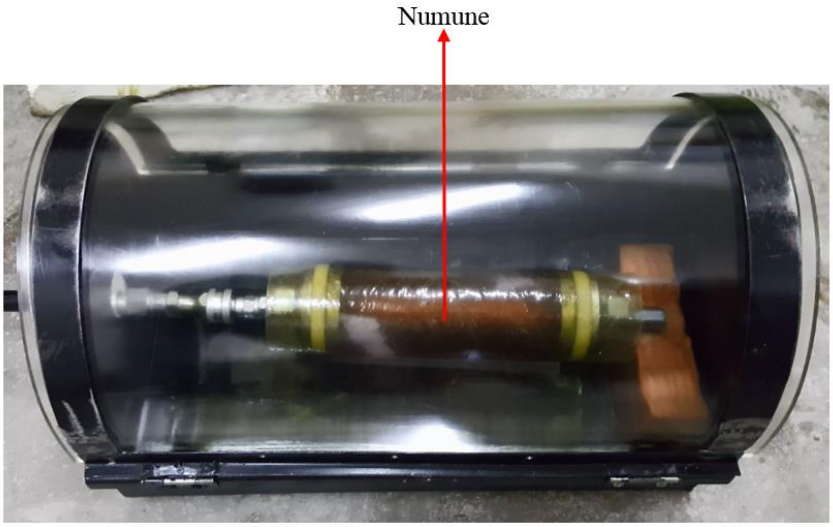
6.7.1. Statik iç basınç test düzeneği

Çalışmada; statik iç basınç patlama deneylerinde kullanılan serbest uçlu iç basınç test aparatı Şekil 6.14'te gösterilmiştir. CTP boru içerisine yerleştirilen, her iki ucuna vida açılmış çelik milin; deneyde sızdırmazlık sağlanması için her iki uç kısmına keçe yatağı açılmıştır. Yataklarına yerleştirilen keçeler yüksek basınca dayanıklı olup, çelik flanşlar ile de desteklenmiştir.



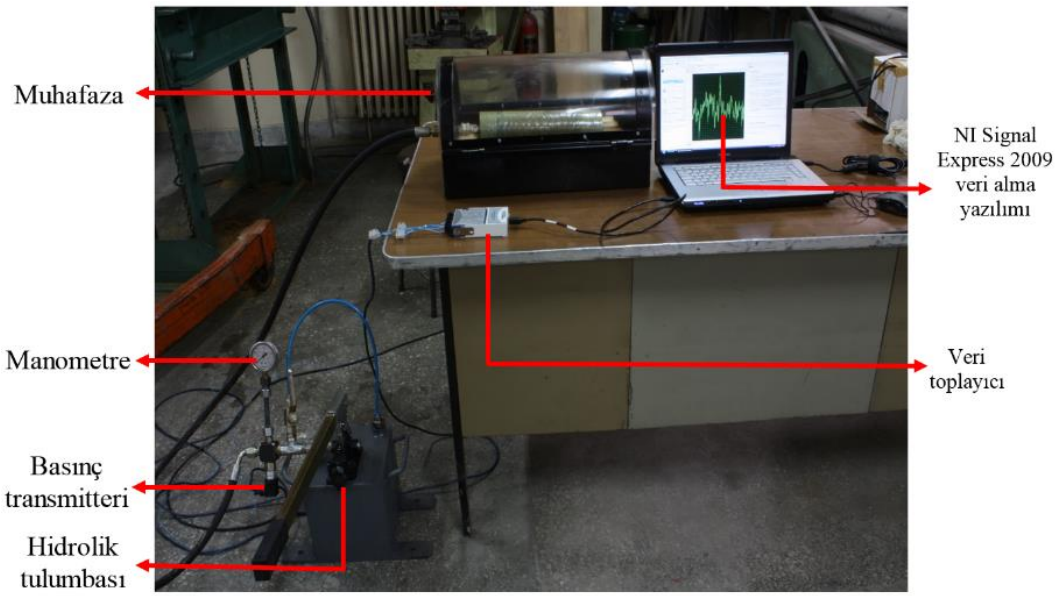
Şekil 6.14 Serbest uçlu iç basınç test aparatı (Şahin, 2011)

Şekil 6.15'te gösterilen test düzeneği, CTP kompozit boru içerisindeki her iki uçta bulunan sızdırmazlık keçeleri üzerine yerleştirilmiştir. Borunun iç basıncı arttığında, borunun boyu kısalabileceğinden dolayı serbest uçlu iç basınç deneyi olarak tanımlanmıştır. CTP kompozit borular yüksek basınçlara maruz kaldıklarında hasar gerçekleşmektedir. Deney sırasında oluşabilecek tehlikeleri önlemek ve güvenliği sağlamak için, iç basınç patlama deneyi Şekil 6.15'te gösterilen koruma kabini içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.15 İç basınç test aparatı yerleştirilmiş deney numunesi ve koruma kabini

Serbest uçlu iç basınç deney seti Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Boru numuneler içerisindeki iç basıncın artışı hidrolik pompa vasıtasıyla yağ basılarak gerçekleştirilmiştir. Basıncın artışının lineer olmasına dikkat edilmiştir. Deney sırasında basınç artışı hem manometreden takip edilip hem de elektronik bir sistem aracılığıyla basıncın zamana göre olan değişimi kaydedilmiştir. Elektronik düzenekteki basınç sensörü, kendisine uygulanan basıncın değişmesine göre ürettiği gerilimi, toplayıcı aracılığıyla NI Signal Express 2009 veri alma yazılımına iletmiştir. Yazılım aracılığıyla da basıncın zamana göre değişiminin grafiği elde edilmiştir (Şahin, 2011).



Şekil 6.16 Serbest uçlu iç basınç deneyi seti (Şahin, 2011)

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. CTP Boruların Yakma Deney Sonuçları

Deneylerde; 6 tabakalı, ±55° sarım açısına sahip kompozit boruların elyaf hacim oranının tespiti için ASTM-D2584-11 (2011) standardına göre yakma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1'de gösterilen deney numunelerinin yakma işlemi sonrasında, elyaf hacim oranı $V_f=0.50$ olarak tespit edilmiştir. Ayrıca; darbe ile hasarlandırılmış numunelere, yakma deneyleri yapıldığında elyaf hasarının olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.1 Yakılmış deney numunesi

7.2. CTP Boruların Mekanik Özellikleri

Deneyler sonrasında, kompozit boruya ait mekanik özellikler Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

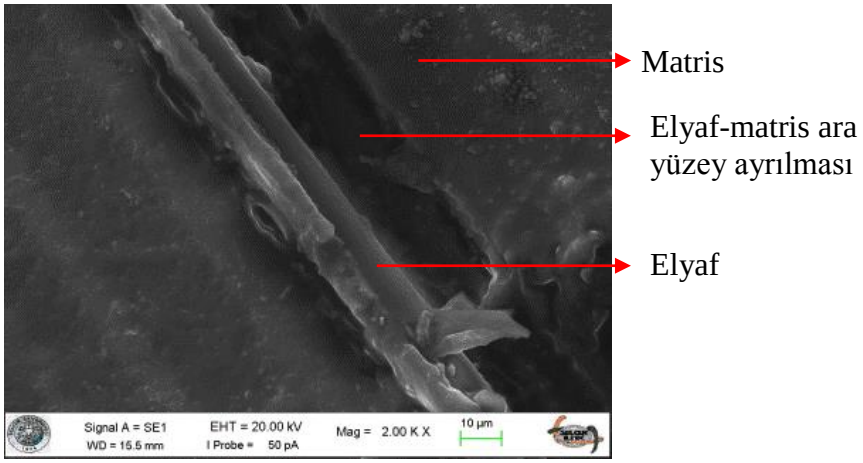
Çizelge 7.1 Kompozit boruya ait mekanik özellikler (Kara, 2012)

Θ: Elyaf sarım açısı	±55°
σ_t: Teğetsel hasar gerilmesi (MPa)	428.96
ν_y: Poisson oranı	0.525
E_y: Elastisite Modülü (GPa)	20.48

7.3. CTP Boruların Yorulma Hasar Analizi

Yorulma deneylerinde iç basıncın etkisiyle; CTP borularda ±55° sarım açısına sahip elyaflar, teğetsel doğrultuya yönelmeye çalışmaktadır. Buna bağlı olarak deney numunesinin boyunda kısalma olurken, çapında artma meydana gelmektedir. Elyafların

teğetsel yönde gerilip tekrar eski haline dönmesi sonucunda ise ± elyaf demetlerinin kesiştiği noktalarda kayma ve basma gerilmeleri oluşmuştur. Çevrim sayısı arttıkça; elyafa dik çekme gerilmeleri ve elyafa paralel kayma gerilmelerinin etkisiyle, elyaf doğrultusunda ince beyaz çizgiler oluşmaya başlamıştır. Belirlenen hasar aşamalarından birincisi elyaf doğrultusunda oluşmaya başlayan bu ince beyaz çizgilerdir (Uyaner ve ark, 2014). 1000 çevrim, 2500 çevrim ve 5000 çevrim yorulmaya maruz bırakılan numunelerde herhangi bir hasar gözlenmemiştir. 10.000 çevrim yorulmaya maruz bırakılan numunelerde ise bir miktar beyazlaşma oluşmuştur. Bu beyazlaşma elyafların matristen ayrılmaya başladığını ifade etmektedir. 10.000 çevrim değerinde yorulmanın ilk hasarlarının oluşmasından dolayı, CTP borular daha yüksek çevrimlerde yorulma deneylerine maruz bırakılmamıştır. Şekil 7.2'de 10.000 çevrim yorulmuş borunun iç yüzeyinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde, yorulma neticesinde elyaf matris ara yüzey ayrılma hasarı açıkça görülmektedir.

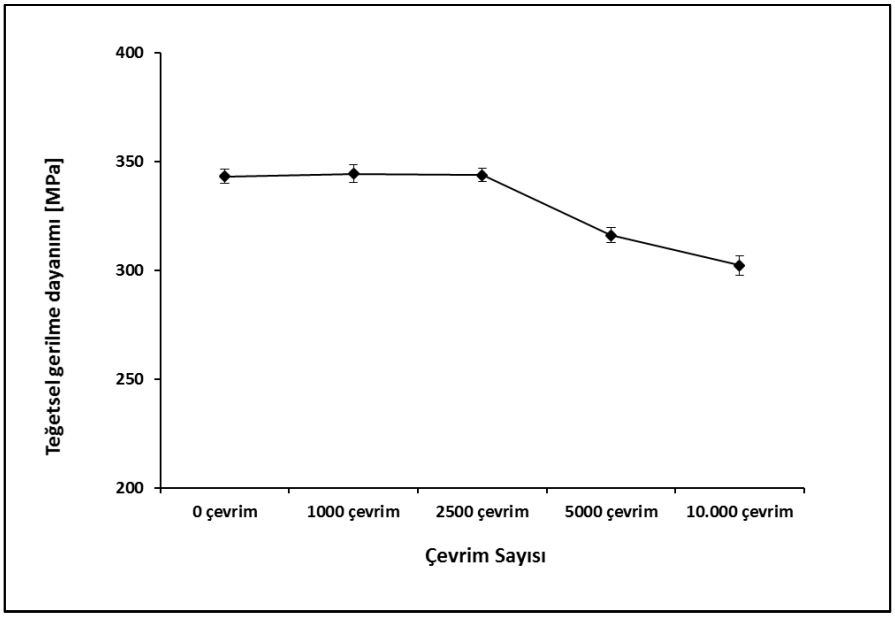


Şekil 7.2 10.000 çevrim yorulmuş borunun iç yüzeyinden alınan SEM görüntüsü

7.3.1. Farklı Çevrim Sayılarında Yorulmuş CTP Boruların Halka Çekme Testi ile Teğetsel Gerilme Dayanımının Bulunması

Farklı çevrim sayılarında yorulmuş borulardan alınan test numuneleri halka çekme deneyinde kullanılmıştır. Halka çekme testleri numuneler kopuncaya kadar devam etmiştir. Çekme deneylerinde numuneler için elde edilen ortalama en büyük çekme kuvveti değerleri tespit edilmiştir. Bu değerler kullanılarak bağıntı (6.2) yardımıyla her bir numunenin teğetsel gerilme dayanımı bulunmuştur. Yorulma çevrim sayısına göre teğetsel gerilme dayanımındaki değişim Şekil 7.3'te verilmiştir. 0 çevrim, 1000 çevrim

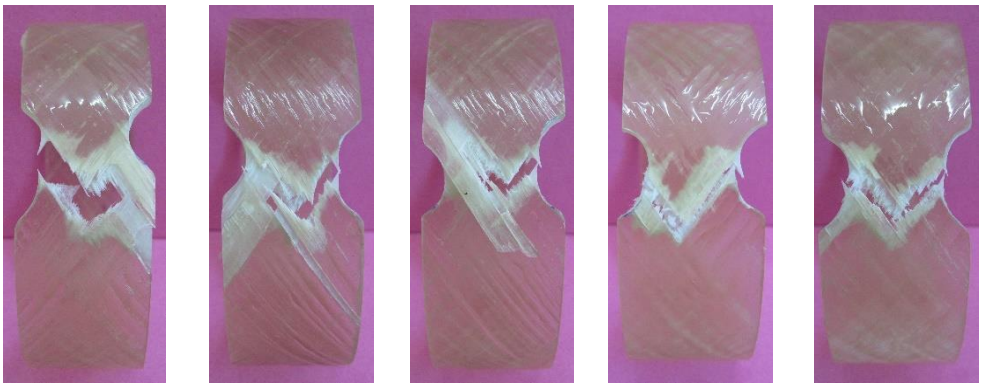
ve 2500 çevrim değerleri için; teğetsel gerilme dayanımları yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulma değerleri için teğetsel gerilme dayanımı sırasıyla %7.9 ve %11.9 azalmıştır.



Şekil 7.3 CTP boruların yorulma çevrim sayısına göre halka çekme deneylerinden elde edilen teğetsel gerilme dayanımındaki değişim

7.3.2. Farklı Çevrim Sayılarında Yorulmuş CTP Borularda Halka Çekme Deneylerinde Oluşan Hasar Gelişimi

Şekil 7.4'te, sırasıyla a) 0 çevrim, b) 1000 çevrim, c) 2500 çevrim, d) 5000 çevrim ve e) 10.000 çevrim yorulmuş CTP kompozit boruların halka çekme testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları verilmiştir. Tüm numunelerde teğetsel gerilme dayanımı değerine ulaşıldığında, elyafların kopması gerçekleşmiş ve deney numuneleri azaltılmış bölgeden yarılarak ikiye ayrılmıştır. Yarılmanın ±55° sarım açısı yönünde olduğu tüm numunelerde görülmektedir.



(a) (b) (c) (d) (e)

Şekil 7.4 a) 0 çevrim, b) 1000 çevrim, c) 2500 çevrim, d) 5000 çevrim ve e) 10.000 çevrim yorulmuş CTP boruların halka çekme testi sonucu numunelerde oluşan son hasar görüntüleri

7.4. CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

PLC ile kontrol edilebilen iç basınç yorulma test cihazına bağlanan CTP boruların, 1000 çevrim, 2500 çevrim, 5000 çevrim ve 10.000 çevrim olacak şekilde öncelikle yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi sonrasında, belirli çevrimlerde yorulmuş CTP boruların ve 0 çevrimli (yorulma olmayan) CTP boruların iç basınç etkisi altında düşük hızlı darbe davranışlarını belirlemek üzere, tüm numunelere 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyeleri tatbik edilmiştir. Numunelere uygulanacak düşük hızlı darbelerin belirlenen darbe enerji değerlerinde yapılması için, 6.35 kg kütleye sahip vurucunun bırakılması gereken yükseklik mesafesi, potansiyel enerji formülünden hesaplanmıştır. Vurucunun; 5 J darbe enerjisi için 0,0827 m yükseklikten, 10 J darbe enerjisi için 0,1605 m yükseklikten, 15 J darbe enerji seviyesi için de 0,2407 m yükseklikten bırakılması gerektiği bulunmuştur. V yatağı üzerine sabitlenmiş numunelere; hidrolik pompayla uygulanan yağ basıncının manometreden ve yazılım vasıtasıyla bilgisayardan takip edilerek, 32 bar iç basınç değeri uygulanmıştır. Yarı küresel uca sahip vurucu ile de tüm numunelerin orta kısmına darbe gerçekleştirilmiştir. Numunede meydana gelecek hasar mekanizmalarının doğru tespiti için ilk darbenin yapılmasından sonra, numune üzerinde aynı veya farklı bir bölgede tekrarlı darbe engellenmiştir. Darbenin başladığı andan vurucunun numune üzerinden sekmesine kadar geçen zamanda kuvvetin değişimi, kuvvet algılayıcı vasıtasıyla elektronik veri toplayıcıya iletilmiştir. Signal Express yazılımı aracılığıyla bu veriler, kuvvetin zamana göre değişim grafiği olarak gösterilmiştir. Düşük hızlı darbenin kinetik analizleri yapılmasıyla da temas kuvveti-yer değiştirme (çökme), enerji-zaman ve hız-zaman değişimlerini gösteren grafikler elde edilmiştir.

7.4.1. Temas kuvveti-zaman değişimi

Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testleri sonrasında darbe davranışlarını tespit etmek için kullanılan eğrilerden bir tanesi, temas kuvveti-zaman değişimi eğrileridir. Çalışmada; yorulmaya maruz bırakılmamış (0 çevrim), 1000 çevrim, 2500 çevrim, 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numuneler 5 J, 10 J ve 15 J'lük çarpma enerji seviyelerinde, düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonrasında; çevrim sayısı ve darbe enerji seviyesinin, kuvvet-zaman değişimi eğrilerine olan etkileri görülmektedir. Eğriler; vurucunun numuneye temasının başlamasıyla beraber, vurucunun numune üzerinden sekmesiyle tekrarlı darbe gerçekleşmeden elde edilen veriler ile çizilmiştir. Bu nedenle de tüm kuvvet-zaman eğrileri; ilk olarak yükün uygulanmasıyla eğride artış kısmına, daha sonrasında kuvvetin ulaştığı en büyük değere ve son olarak yükün numune üzerinden kalkmaya başlamasıyla eğride azalma kısmına sahiptirler. Uygulanan tüm darbe enerji seviyelerinde; numune, enerjinin büyük bir miktarını yutmuştur; geri kalan enerji de sıçrama için kullanılmıştır.

Eğriler üzerinde; hasar mekanizmalarının gerçekleştiğini gösteren yerler, kuvvette iniş çıkışların olduğu salınımlı kısımlardır. Kuvvet-zaman diyagramları incelendiğinde; darbe enerji seviyesinin artışıyla, meydana gelen salınımların ve en büyük temas kuvveti değerinin arttığı görülmektedir. En büyük temas kuvvetlerinin; 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrimlerinden elde edildiği ve yaklaşık olarak benzer çıktığı; 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerde ise temas kuvvetlerinin daha düşük çıktığı görülmektedir. En düşük temas kuvveti değeri 10.000 çevrim yorulmuş numunede meydana gelmiştir. Aynı enerji seviyesi için temas sürelerinin yaklaşık olarak eşit çıktığı; darbe enerji seviyesinin artmasıyla da temas sürelerinin uzadığı görülmektedir.

Çevrim sayısının ve darbe enerji seviyesinin artmasına göre elde edilen en büyük temas kuvvetleri, temas süreleri ve çarpma hızları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Farklı çevrim sayılarında yorulmuş numunelerin düşük hızlı darbe deneyleri sonrasında elde edilen en büyük temas kuvveti ve vurucu temas süresi değerleri (X±Sx)

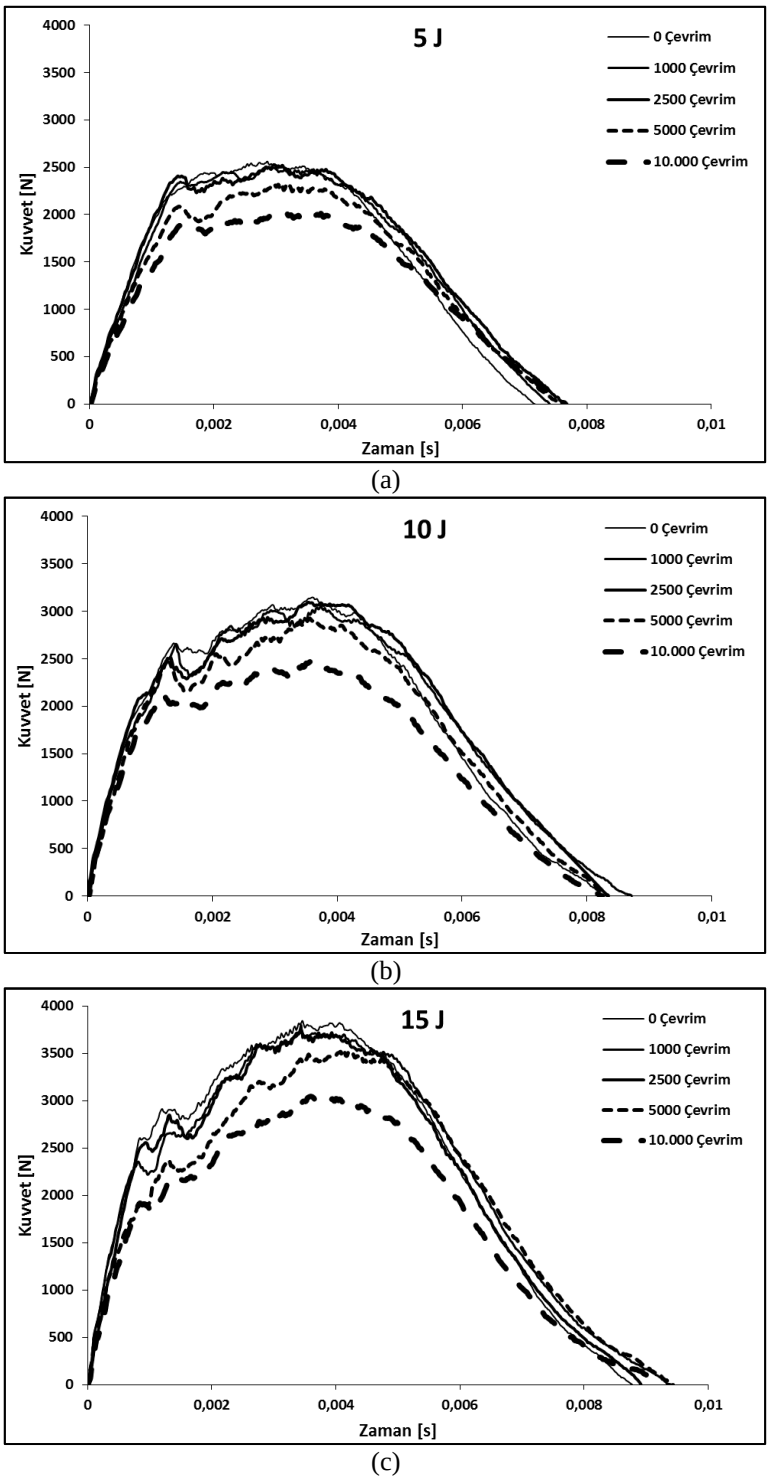
Çevrim Sayısı	Darbe Enerjisi [J]	Çarpma Hızı [m/s]	En Büyük Temas Kuvveti [N]	Temas Süresi [s]
0	5	1,255	2561,220±77,716	0,00716±0,000105
0	10	1,775	3147,909±76,752	0,00828±0,000110
0	15	2,174	3845,034±75,890	0,00878±0,000117
1000	5	1,255	2525,198±69,546	0,00740±0,000153
1000	10	1,775	3096,461±57,650	0,00872±0,000151
1000	15	2,174	3795,740±66,018	0,00942±0,000104
2500	5	1,255	2503,156±76,490	0,00764±0,000100
2500	10	1,775	3057,056±60,092	0,00834±0,000101
2500	15	2,174	3749,127±55,379	0,00892±0,000107
5000	5	1,255	2323,285±60,504	0,00760±0,000173
5000	10	1,775	2928,190±71,893	0,00834±0,000103
5000	15	2,174	3518,033±59,898	0,00944±0,000106
10.000	5	1,255	2023,269±71,763	0,00766±0,000182
10.000	10	1,775	2470,367±70,100	0,00824±0,000159
10.000	15	2,174	3043,972±60,297	0,00924±0,000129

7.4.2. Değişik enerji seviyeleri için çevrim sayısının temas kuvvetine etkisi

Şekil 7.5'te değişik çevrim sayılarında yorulmaya maruz kalmış numunelerin 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-zaman eğrilerine yorulma çevrim sayısının etkileri gösterilmiştir. Şekil 7.5 incelendiğinde; aynı enerji seviyesi için temas sürelerinin yaklaşık olarak aynı olduğu, darbe enerji seviyesinin artmasıyla da temas sürelerinin uzadığı görülmüştür.

Aynı enerji seviyesinde, en büyük temas kuvvetlerinin 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrimleri için benzer çıktığı; fakat 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin temas kuvvetinin daha düşük olduğu diyagramlardan görülmektedir. En düşük temas kuvveti değerleri 10.000 çevrim yorulmuş numunelerde meydana gelmiştir. Halka çekme testi sonuçları ve yorulmamış numunenin kuvvet-zaman eğrileri incelendiğinde; 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmuş numunelerde, yorulmadan kaynaklı herhangi bir hasar gelişimi tespit edilememiştir. 5000 çevrim yorulmuş numunede gözle görülebilir herhangi bir hasar tespit edilemediği halde kuvvet değerlerinin daha düşük çıkmış olması, elyaf matris arası bağların zayıflamış olduğunu işaret eder. 10.000 çevrim yorulmuş numune de ise gözle görülebilen beyazlaşmalar saptanmıştır. Bilindiği üzere beyazlaşmalar; elyaf ile matris ara yüzeyinde ayrılmaların oluştuğunu, bu iki yapı arasında bağların zayıfladığını belirtmektedir. Aynı enerji seviyesinde temas kuvvetinin daha düşük çıkmış olması, daha yüksek yorulma çevrim

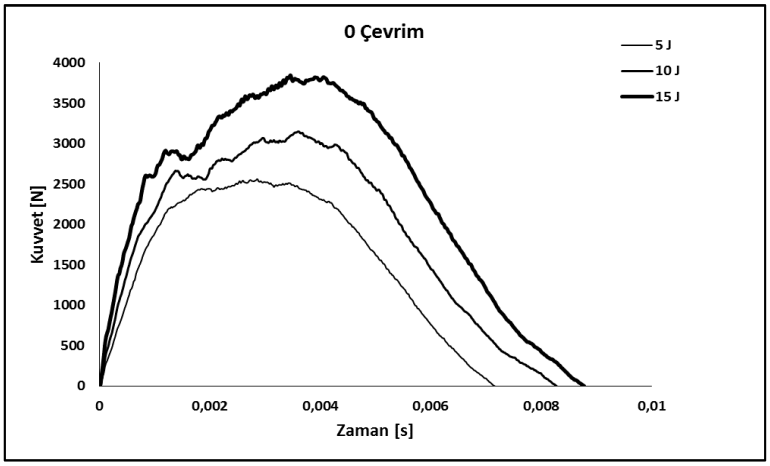
sayısına maruz kalınarak numune rijitliğinde kaybın olduğuna işaret etmektedir. (Kara ve ark, 2014) yaptığı çalışmada, rijitliğin azaldıkça en büyük temas kuvvetinin de azaldığını ifade etmişlerdir.



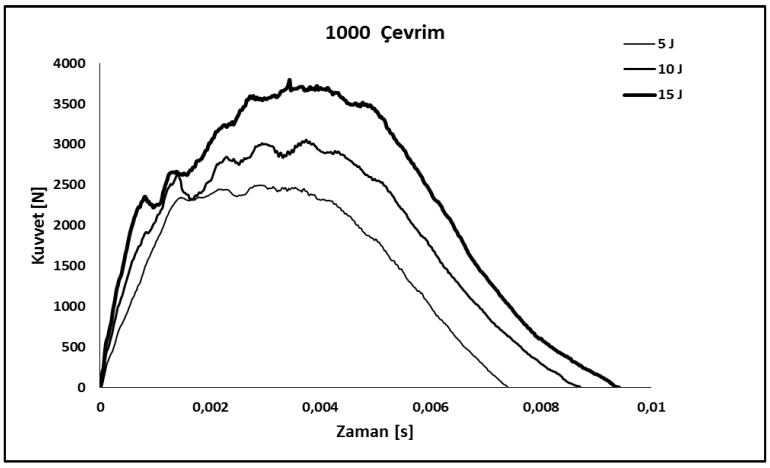
Şekil 7.5 a) 5 J, b) 10 J ve c) 15 J darbe enerjisi için çevrim sayısının temas kuvveti-zaman eğrisine etkisi

7.4.3. Değişik çevrim sayıları için darbe enerji seviyesinin temas kuvvetine etkisi

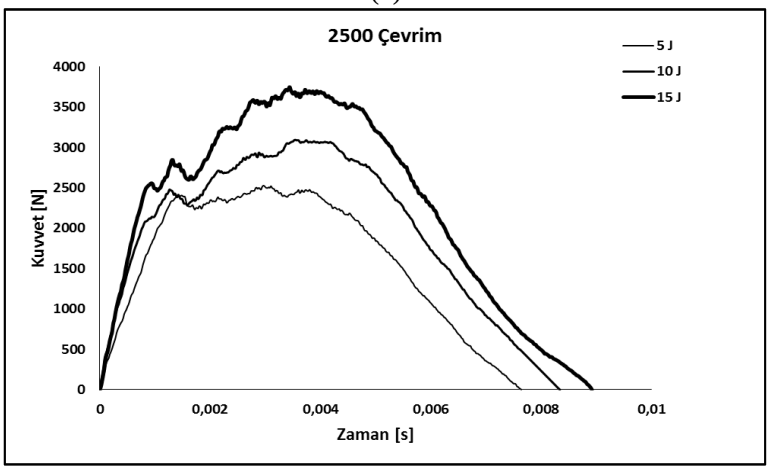
Şekil 7.6'da değişik çevrimlerde yorulmaya maruz bırakılmış numunelerin 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-zaman eğrilerine darbe enerji seviyesinin etkileri gösterilmiştir. Şekil 7.6 incelendiğinde; tüm yorulma çevrim sayılarında (0 çevrim, 1000 çevrim, 2500 çevrim, 5000 çevrim ve 10.000 çevrim), darbe enerji seviyesinin artmasıyla temas sürelerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Herhangi bir çevrim için; darbe enerji seviyesinin artışıyla, hasarın meydana geldiğini gösteren salınımların daha fazla olduğu ve numuneye uygulanan en büyük temas kuvvetlerinin de arttığı görülmektedir. 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmaya maruz kalmış numuneler, aynı enerji seviyelerinde karşılaştırma yapıldığında en büyük temas kuvvetlerinin yaklaşık olarak benzer çıktığı görülmektedir. Ancak aynı durum 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerde rastlanılmamıştır; bu çevrimlerde en büyük temas kuvvetleri değerleri, diğer çevrimlerden daha düşük değerlerde çıkmıştır. 10.000 çevrim yorulmuş numunenin her enerji seviyesi için; en büyük temas kuvvetleri değerinin diğer çevrimlerden çok daha düşük çıkması ise, yorulmadan kaynaklı numune rijitliğinin azalması sebebiyledir.



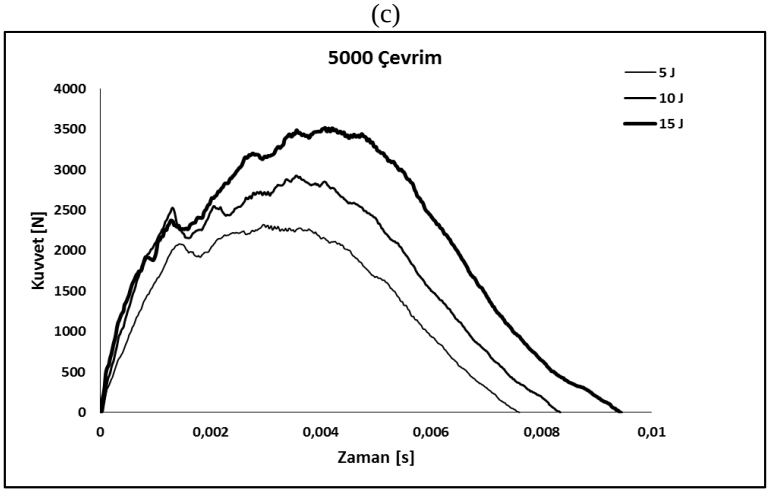
(a)


1000 Çevrim
5 J
10 J
15 J
Kuvvet [N]
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
0,002
0,004
0,006
0,008
0,01
Zaman [s]

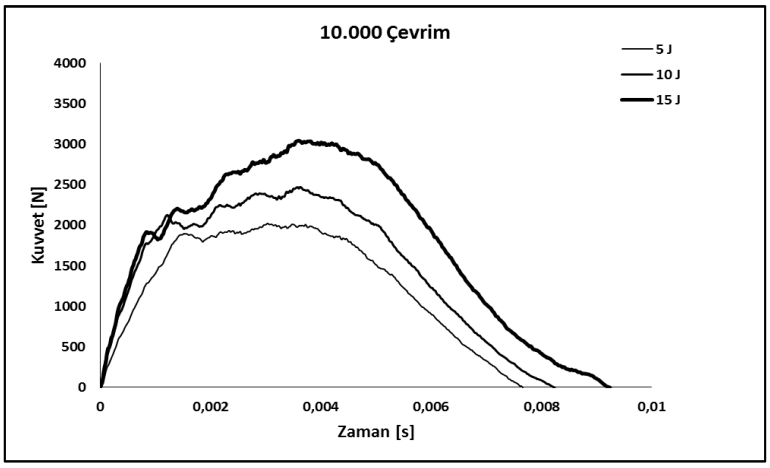
(b)


2500 Çevrim
5 J
10 J
15 J
Kuvvet [N]
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
0,002
0,004
0,006
0,008
0,01
Zaman [s]

(c)


5000 Çevrim
5 J
10 J
15 J
Kuvvet [N]
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
0,002
0,004
0,006
0,008
0,01
Zaman [s]

(d)



(e)

Şekil 7.6 a) 0 çevrim, b) 1000 çevrim, c) 2500 çevrim, d) 5000 çevrim ve e) 10.000 çevrim için darbe enerji seviyesinin temas kuvveti-zaman eğrisine etkisi

7.4.4. Temas kuvveti-çökme değişimi

Düşük hızlı darbe ile hasarlandırılmış kompozit malzemelerin, darbe davranışının belirlenmesinde kuvvet-yer değiştirme (deplasman, çökme) eğrileri de kullanılmaktadır. Çalışmada; 0 çevrim, 1000 çevrim, 2500 çevrim, 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş CTP kompozit numunelere; 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulanıp, kinetik analizler neticesinde çevrim sayısının ve darbe enerji seviyesinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerine olan etkileri sunulmuştur.

Numunede yer değiştirme (çökme); darbe esnasında vurucunun numune üzerine temas etmesiyle başlayıp, en büyük temas kuvveti değeri elde edilene kadar devam etmiştir. Eğriler incelendiğinde; aynı enerji seviyesinde, en büyük temas kuvveti değerinin daha rijit davranan 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmuş numunelerden elde edildiği; en büyük yer değiştirmenin ise 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerden elde edildiği görülmektedir.

Darbe esnasında numunenin mevcut rjit yapısını korumaya çalışması, uygulanan darbe yüküne karşılık direnç göstermesinin bir ifadesi olarak tanımlanan *eğilme rijitliği,* kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde artan kısımdaki eğime denilmektedir. 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim için eğilme rijtliği benzerlik gösterirken; 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin ise eğilme rijitliğinde azalma meydana gelmiştir.

Kuvvet-yer değiştirme eğrileri aynı zamanda, eğri altındaki alanın hesaplanmasıyla numunenin absorbe etmiş olduğu enerjiyi vermektedir. Darbe enerji seviyesinin ve yorulma çevrim sayısının, yutulan ve sıçramaya harcanan enerji

miktarlarına olan etkisi "7.4.7. Enerji-zaman değişimi ve enerji dağılımı" başlığında detaylı ele alınmıştır.

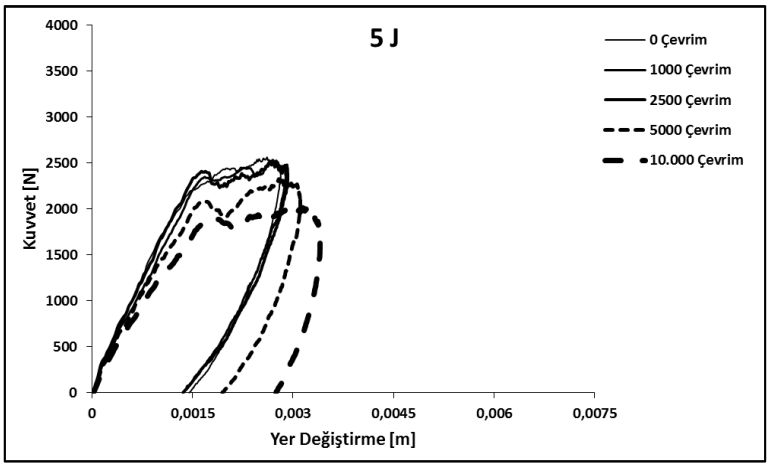
7.4.5. Değişik enerji seviyeleri için çevrim sayısının temas kuvveti-çökme değişimine etkisi

Şekil 7.7'de değişik çevrimlerde yorulmaya maruz bırakılmış numunelerin 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-çökme eğrilerine, yorulma çevrim sayısının etkileri gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde; 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmuş numunelerin eğilme rijitliklerinin yaklaşık olarak benzer olduğu gözlemlenirken; 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerde ise elyaf matris arası bağların yorulmadan dolayı zayıflamasıyla eğilme rijitliğinde azalma görülmüştür.

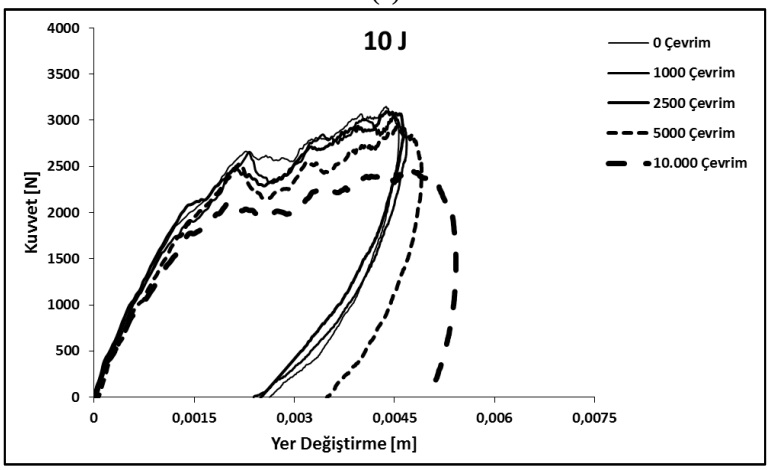
Tüm enerji seviyeleri için; en büyük temas kuvvetleri 0 çevrim, 1000 çevrim, 2500 çevrim yorulmuş numunelerden elde edilmiştir. Ancak 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin eğilme rijitliğindeki azalmalar sebebiyle, en büyük temas kuvvetlerinin daha düşük çıktığı eğrilerden görülmektedir. 10.000 çevrim yorulmuş numunede yorulmadan kaynaklı rijitlik kaybının daha fazla olması, tüm enerji seviyeleri için en büyük temas kuvvetlerinin çok daha düşük çıkmasına neden olmuştur.

Her bir enerji seviyesi için; en büyük yer değiştirme miktarının 10.000 çevrim yorulmuş numunelerden elde edildiği Şekil 7.7'de görülmektedir. 10.000 çevrim yorulmuş numunede rijitlik kaybının daha fazla olması, en büyük çökmenin daha fazla olmasına neden olmuştur.

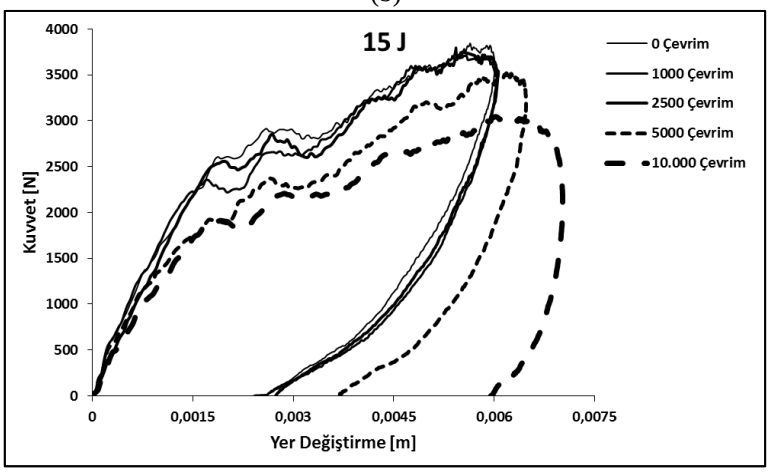
Şekil 7.7'deki kuvvet-yer değiştirme eğrileri altında kalan alan incelendiğinde; tüm enerji seviyeleri için 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim için alanların yaklaşık olarak aynı olduğu; 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin ise altındaki alanın daha fazla olduğu görülmektedir. 10.000 çevrimli numunede ise bu alanın diğer numunelerden (0 çevrim, 1000 çevrim, 2500 çevrim) çok daha fazla olduğu görülmüştür.



(a)



(b)



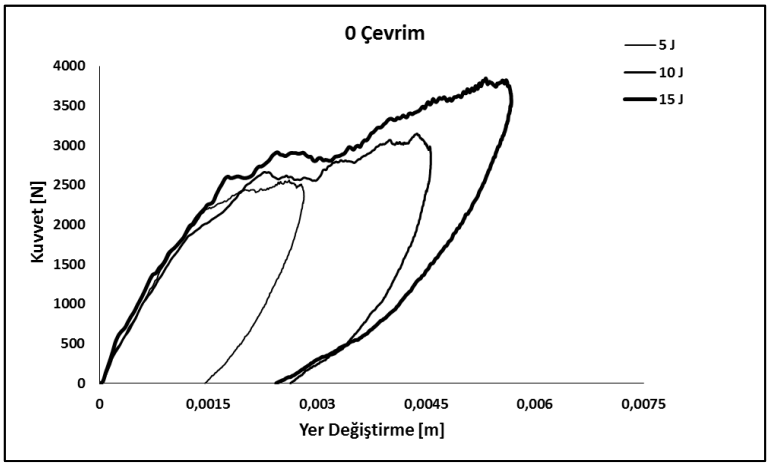
(c)

Şekil 7.7 a) 5 J, b) 10 J ve c) 15 J darbe enerjisi için çevrim sayısının temas kuvveti-çökme eğrisine etkisi

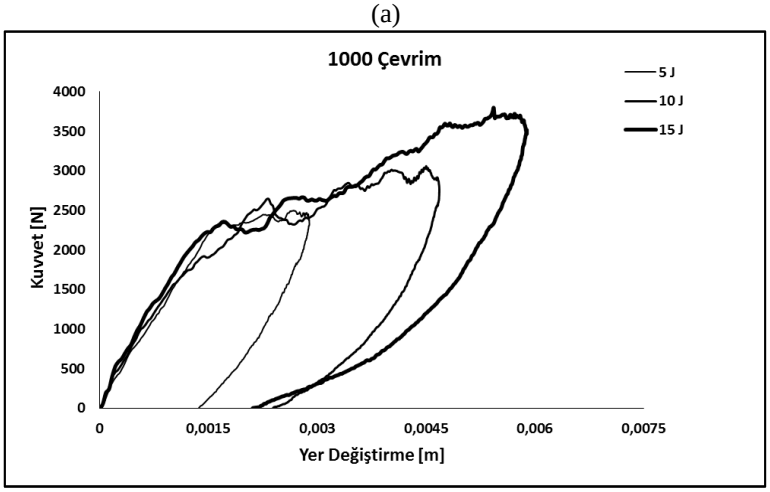
7.4.6. Değişik çevrim sayıları için darbe enerji seviyesinin temas kuvveti-çökme değişimine etkisi

Şekil 7.8'de değişik çevrimlerde yorulmaya maruz bırakılmış numunelerin 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen temas kuvveti-çökme eğrilerine, darbe enerji seviyesinin etkileri gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde; herhangi bir yorulma çevrim sayısı için darbe enerji seviyesinin artışıyla, deney başlangıcından belirli bir kuvvet değerine kadar eğilme rijitliklerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı görülürken; sonrasında genel olarak azalma görülmüştür.

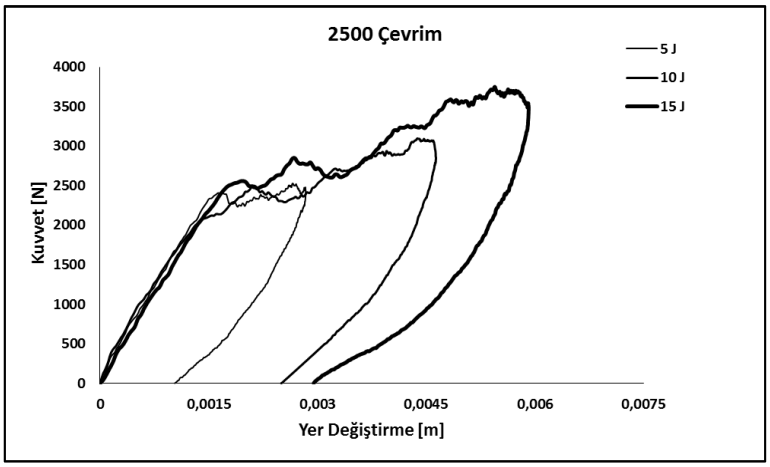
Tüm yorulma çevrimlerinde; darbe enerji seviyesinin arttırılmasıyla, en büyük temas kuvveti değeri ve en büyük çökme miktarları 15 J darbe enerjisi ile yapılmış deneylerden elde edilmiştir. Yine her bir yorulma çevrim sayısı için; eğri altında kalan alanlar incelendiğinde, darbe enerji seviyesinin artışıyla eğri altında kalan alanın arttığı böylelikle numunenin yutmuş olduğu enerjinin arttığı görülmektedir.



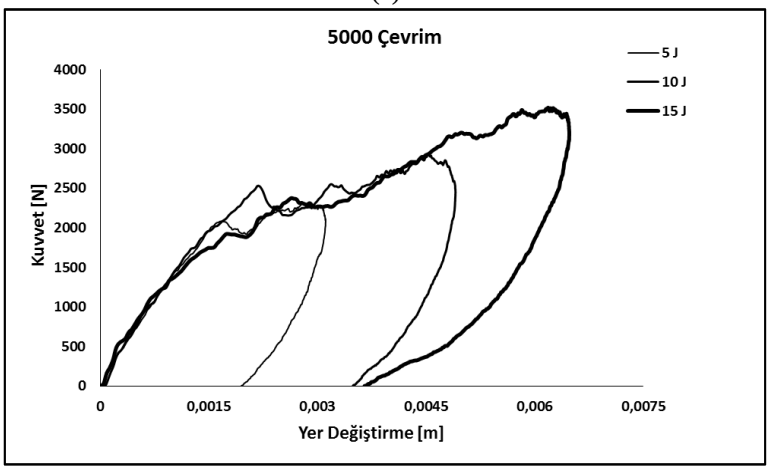
(a)



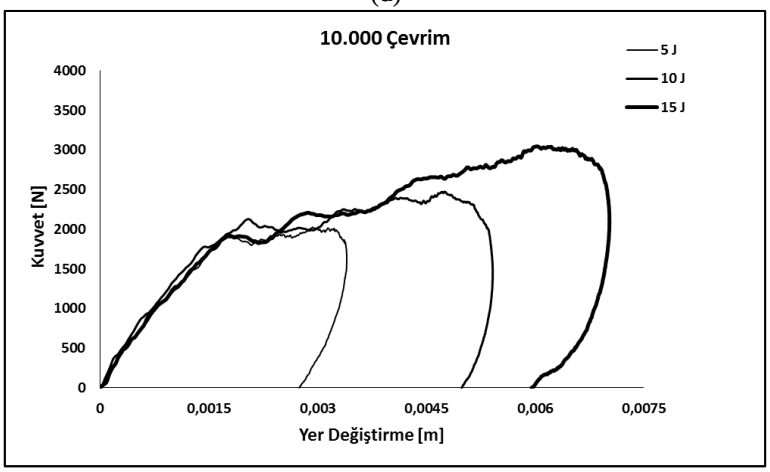
(b)



(c)



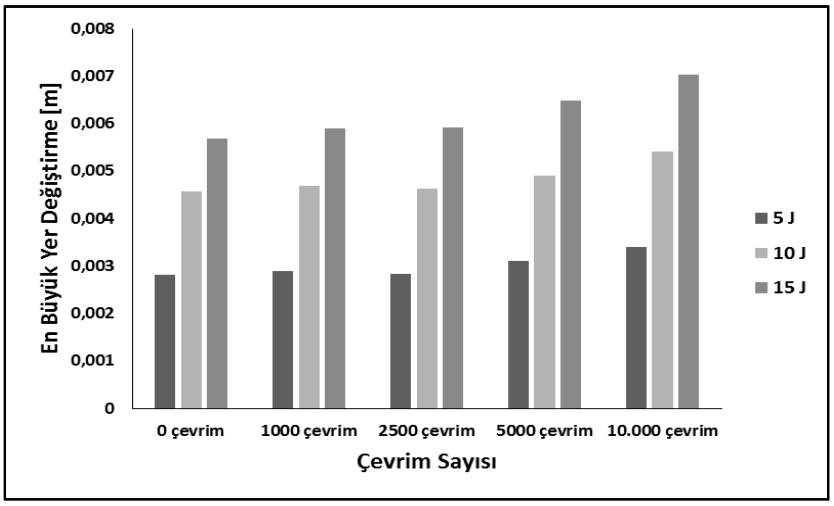
(d)



(e)

Şekil 7.8 a) 0 çevrim, b) 1000 çevrim, c) 2500 çevrim, d) 5000 çevrim ve e) 10.000 çevrim için darbe enerji seviyesinin temas kuvveti-çökme eğrisine etkisi

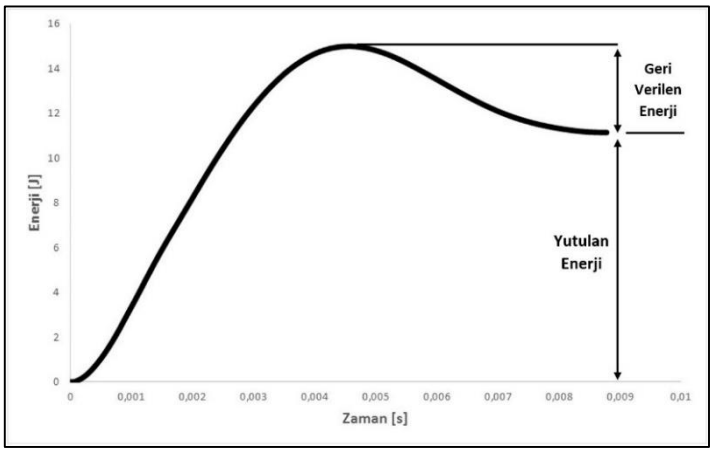
Kuvvet-çökme eğrilerinin tümü incelendiğinde; yorulma çevrim sayıları ve darbe enerji seviyelerinin, en büyük çökme miktarlarına olan etkisi açık bir şekilde Şekil 7.9'da görülmektedir.



Şekil 7.9 CTP kompozit boru numunelerinin farklı yorulma çevrim sayılarına maruz kalıp, farklı darbe enerji seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme miktarları

7.4.7. Enerji-zaman değişimi ve enerji dağılımı

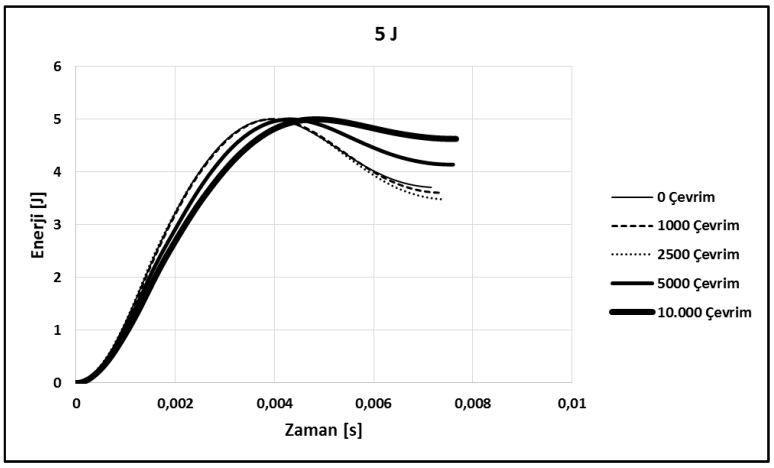
Düşük hızlı darbe deneyinde; numune üzerinden vurucunun geri sektiği durumda, vurucu başlangıçta sahip olduğu enerjinin tamamını numuneye aktaramayıp, geriye kalan bir miktar enerjiyi de sıçrama (geri sekme) için harcamaktadır. Uygulanan darbe enerjisine karşılık, numunenin yutmuş olduğu enerjiyi ve vurucunun geri sekmeye harcadığı enerji miktarı Şekil 7.10'da verilmiştir.



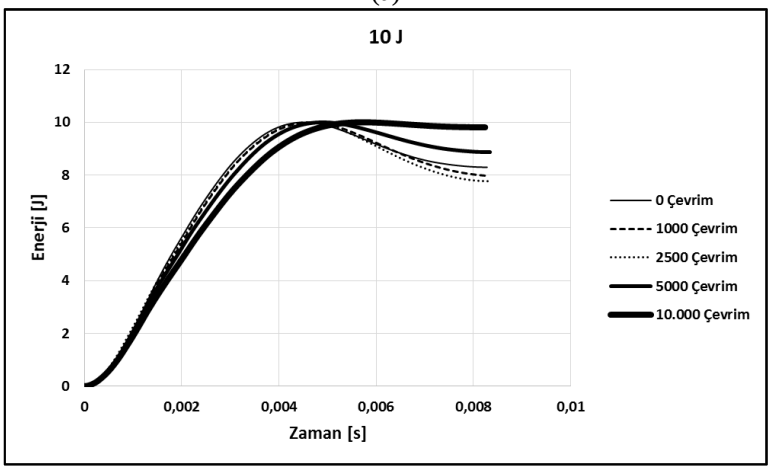
Şekil 7.10 Enerji-zaman değişimi

Şekil 7.11'de; farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP kompozit boru numunelerinin 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinden elde edilen enerji-zaman değişimi grafikleri verilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde görüldüğü gibi, enerji-zaman grafikleri de incelendiğinde; darbe enerji seviyesinin artışıyla, numunelerin

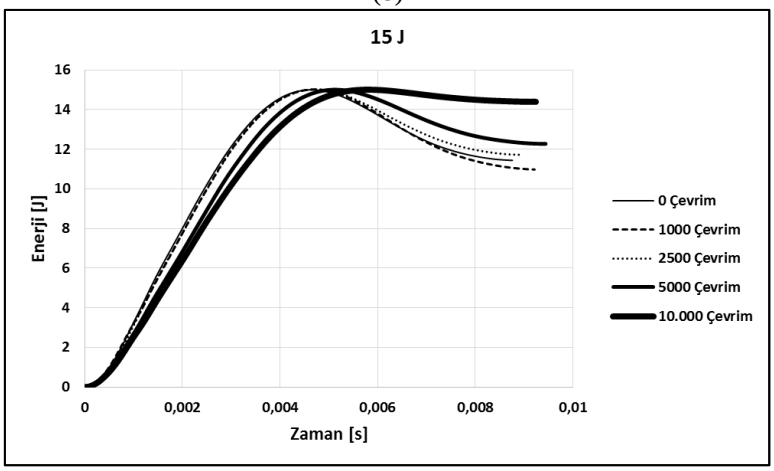
yutmuş oldukları enerji değerleri artmıştır. Aynı darbe enerji seviyesinde; 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmuş numunelerin yutma enerjileri yaklaşık olarak aynıyken; 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerde ise yutma enerjilerinin daha fazla olduğu görülmektedir.



(a)



(b)



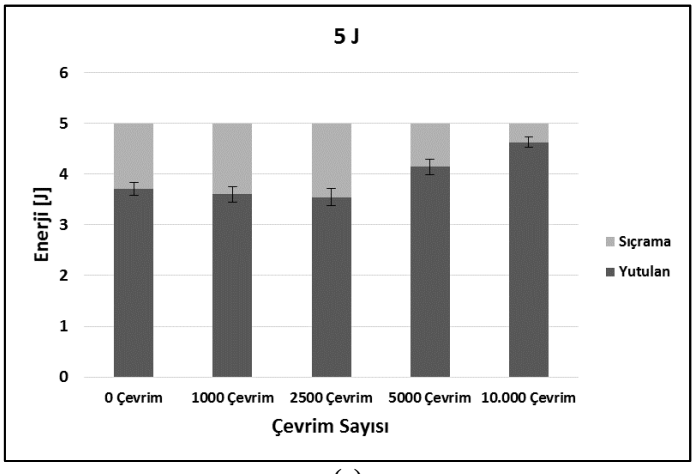
(c)

Şekil 7.11 Farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP kompozit boru numunelerinin a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J darbe enerji seviyesi için elde edilen enerji-zaman değişimi

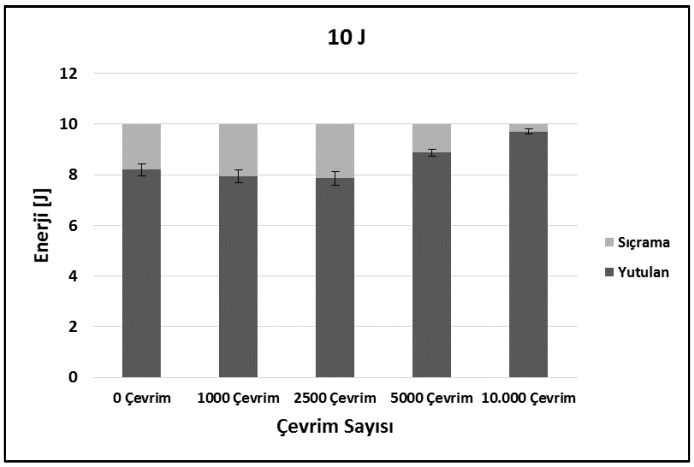
Enerji-zaman grafiklerinden, absorbe edilen ve sıçramaya harcanan enerji değerleri elde edilebildiği gibi, kuvvet-yer değiştirme eğrileri altındaki alanın hesaplanmasıyla da yutulan enerji değerleri bulunabilmektedir. Toplam enerji değerinden, yutulan enerji değerinin çıkarılmasıyla da sıçrama enerjisi tespit edilebilmektedir.

Şekil 7.12'de; farklı çevrimlerde yorulmuş CTP kompozit boru numunelerinin 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyeleri için elde edilen yutma ve sıçrama enerji dağılım miktarları verilmiştir. Görüldüğü üzere; aynı darbe enerji seviyesinde 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmuş numunelerin yutma enerji değerleri yaklaşık olarak benzer olurken; 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin ise yutma enerji değerlerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Darbe enerji seviyesinin arttırıldığı durumda, tüm numunelerin yutmuş olduğu enerji miktarları da artmıştır.

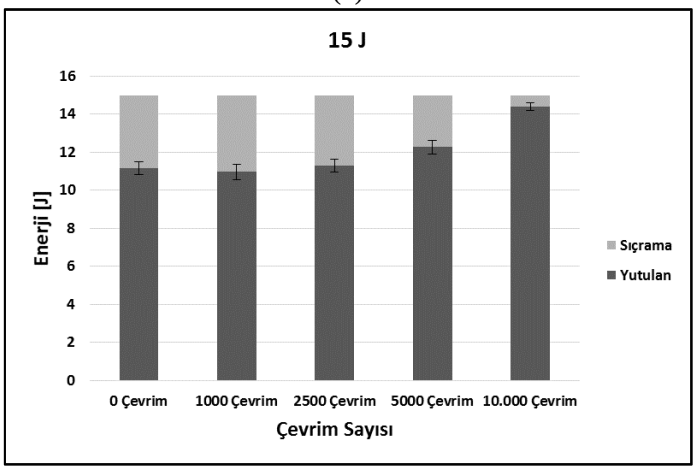
Tüm enerji seviyelerinde, en büyük yutulan enerji miktarları, 10.000 çevrim yorulmuş numunelerden elde edilmiştir. Numune tarafından yutulan enerji; matris çatlağı, delaminasyon ve nüfuziyet gibi farklı hasar mekanizmalarının oluşumuna neden olmuştur. Numunelerin yutmuş olduğu enerji miktarlarının artışına bağlı olarak, numunede meydana gelen hasarlarda da artış görülmüştür. 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin; 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinin %93, %97 ve %96'sını yutmuş oldukları bulunmuştur.



(a)



(b)

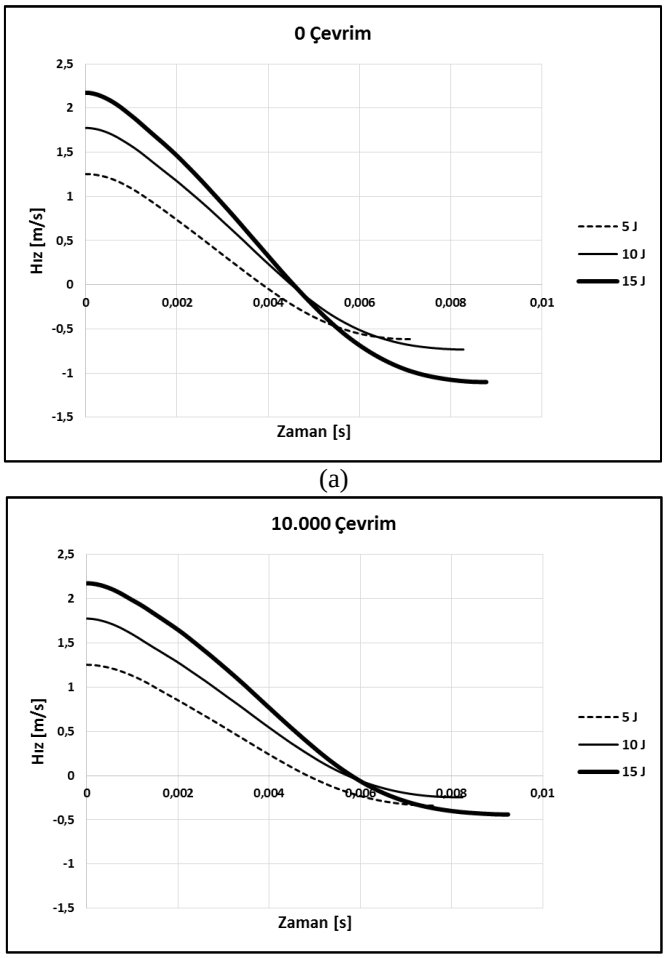


(c)

Şekil 7.12 Farklı çevrimlerde yorulmuş CTP kompozit boru numunelerinin a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J darbe enerji seviyesi için elde edilen enerji dağılımı miktarları

7.4.8. Hız-zaman değişimi

Şekil 7.13'te; yorulma yapılmamış (0 çevrim) ve 10.000 çevrim yorulmuş CTP kompozit boru numunelerinin farklı darbe enerji seviyelerinden elde edilen hız-zaman değişimleri verilmiştir. Darbe testlerinde; belirli bir hıza sahip vurucunun, numune üzerine temas etmesiyle beraber hızı azalmış ve sıfıra düşmüştür. Vurucu, numune üzerinden sıçradığında ise yukarı yöne doğru, Şekil 7.13'teki gibi negatif hızda yükselmeye başlamıştır.



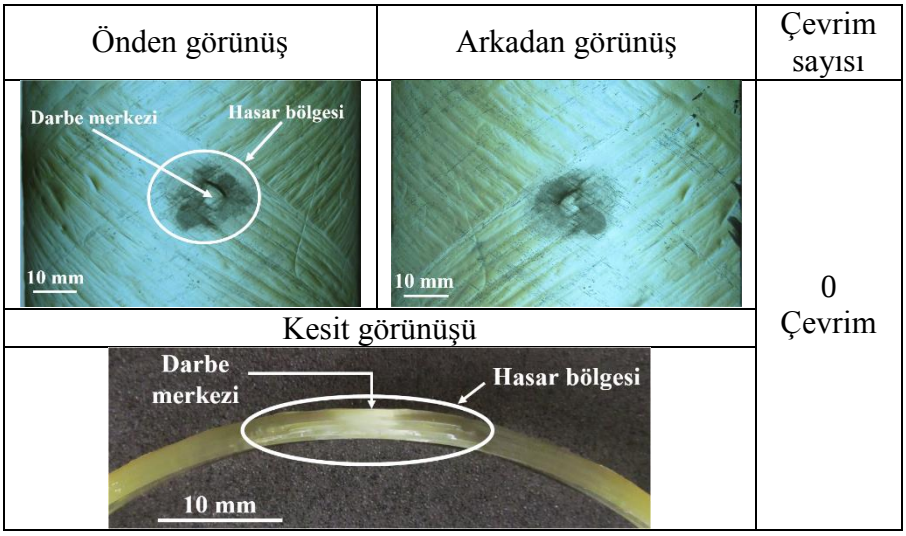
Şekil 7.13 a) 0 çevrim ve b) 10.000 çevrim yorulmuş CTP kompozit boru numunelerinin farklı darbe enerji seviyelerinden elde edilen hız-zaman değişimi

7.4.9. Düşük hızlı darbe hasar analizi

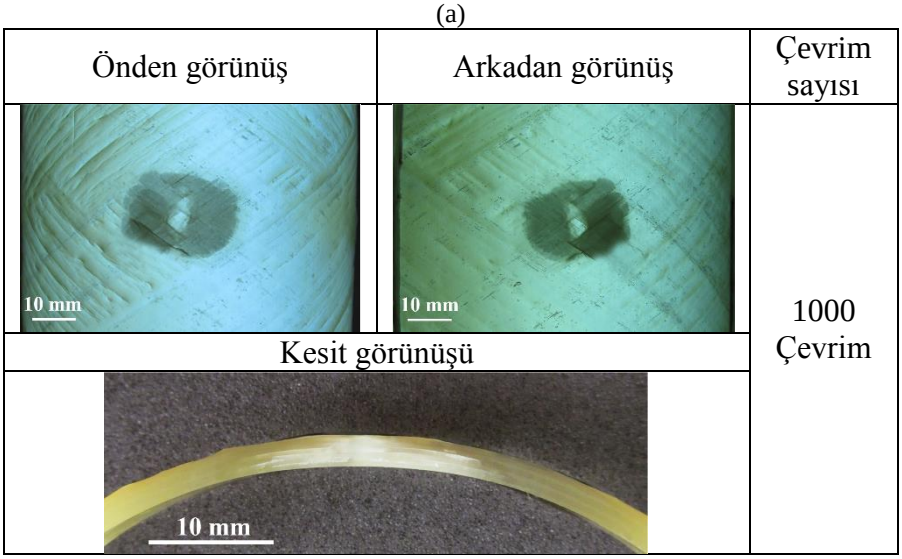
Hasarlı bölgenin arkasına ışık tutularak Kevlar ve cam/epoksi kompozit numunede meydana gelen hasarlar belirlenebilir. Tabakalar arası ayrılmaların boyutu ve şekli ile mevcut olan matris çatlakları çıplak göz ile tespit edilebilir (Abrate, 1998). Kompozit CTP boru numunelerine iç basınç altında darbe yapıldıktan sonra; ön, arka ve kesit bölgelerinin ışık altında, yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiş ve incelenmiştir. Farklı çevrim sayılarında yorulmuş ve iç basınç altında 10 J enerji seviyesinde darbeye maruz bırakılmış CTP kompozit boruların hasar görüntüleri Şekil 7.14'te verilmiştir. Şekil 7.14'te görüldüğü gibi, en büyük delaminasyon alanı 10.000 çevrim yorulmuş numuneden elde edilmiştir. Yorulmanın etkisiyle elyaf matris ara yüzeyindeki bağların zayıflaması; darbe yüklemesiyle ortaya çıkan gerilmelerin, numunede daha fazla delaminasyon alanı oluşturmasına neden olmuştur. Tüm numunelerin darbe merkezinde

vurucunun nüfuziyet alanı görülmektedir. Ayrıca numunelerde, yüzey matris çatlakları oluştuğu görülmektedir.

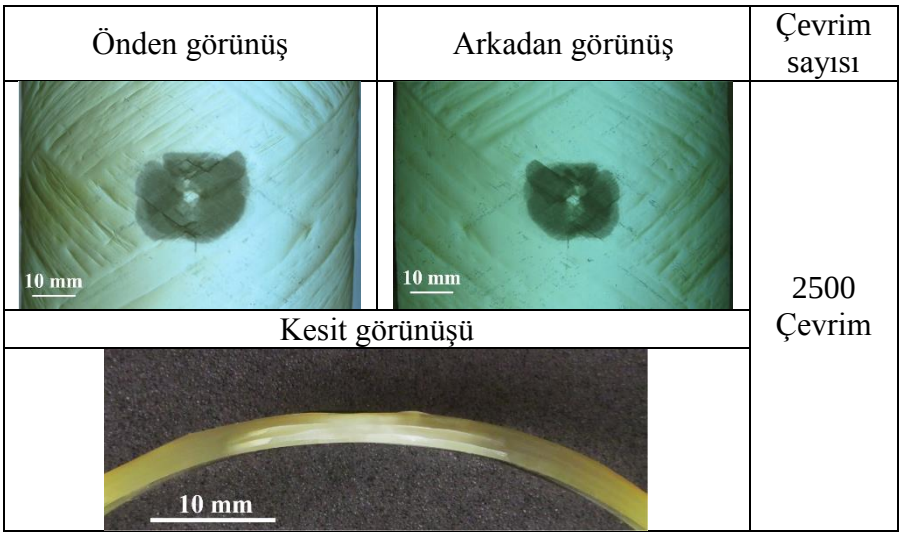
Kalın tabakalı kompozitlerde; yüksek yerel gerilmeler nedeniyle, matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler. İnce tabakalı kompozitler için; kompozitin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri, en alt katmandan itibaren matris çatlakları ve delaminasyonları başlatarak, ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir hasar görüntüsü verir (Abrate, 1998). Kompozit borular ince cidarlı olmalarına rağmen; iç basınç etkisinden dolayı serbest bir şekilde eğilemediklerinden dolayı, darbeden kaynaklanan hasarın yayılımı çam ağacı görünümlü olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 7.14'te verilen numunelerin kesit görüntülerine bakıldığında, bu durum açık şekilde görülmektedir.



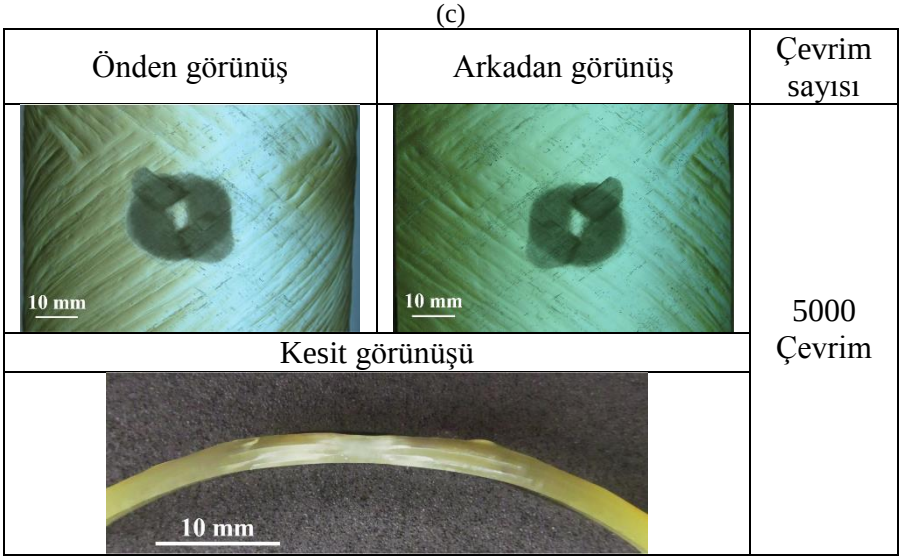
(a)



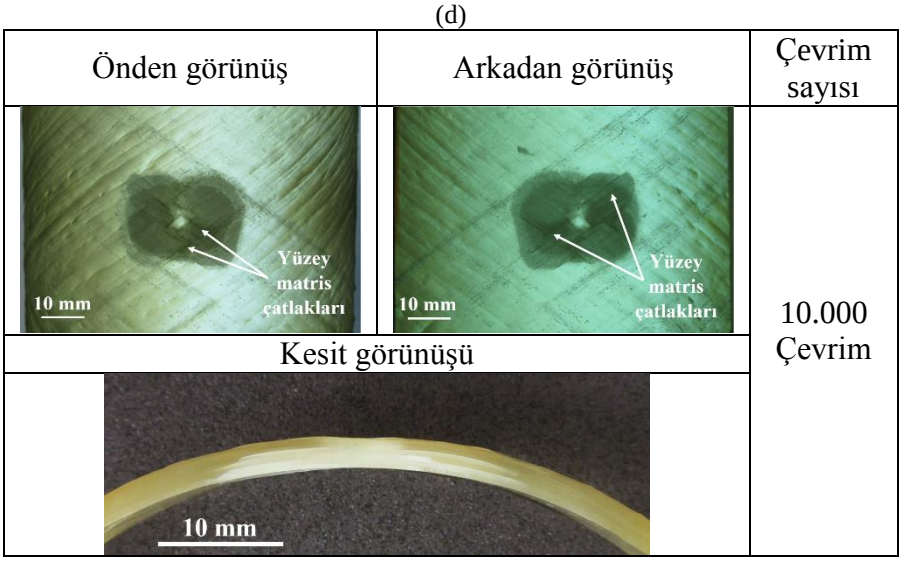
(b)



(c)



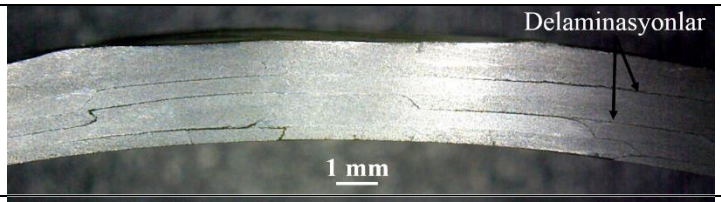
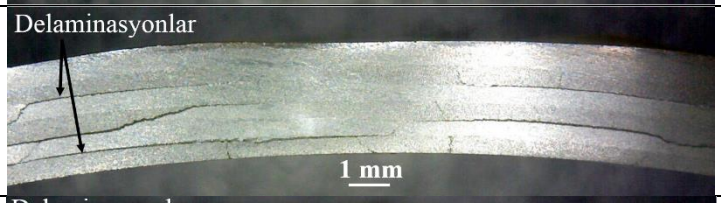
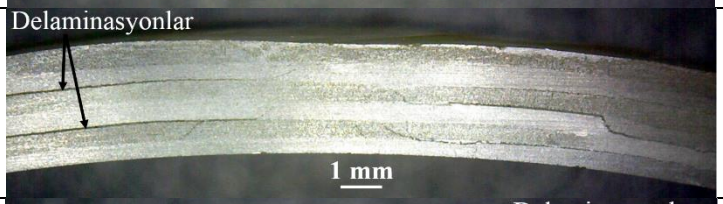
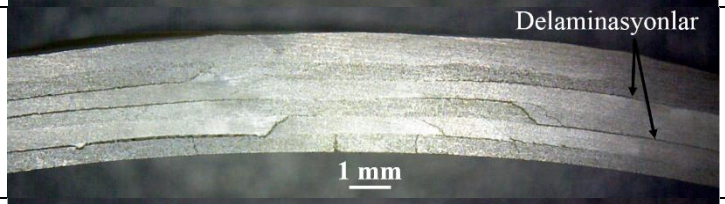
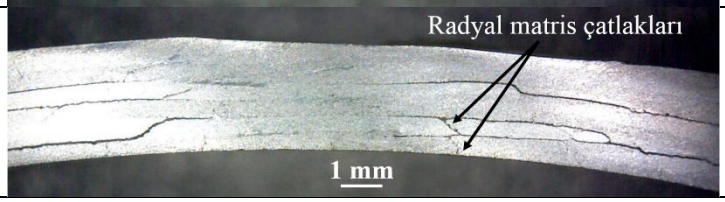
(d)



(e)

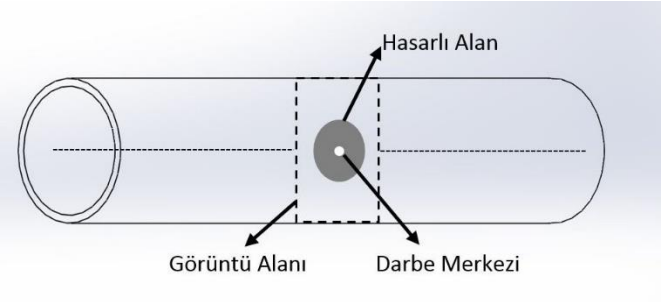
Şekil 7.14 a) 0 çevrim, b) 1000 çevrim, c) 2500 çevrim, d) 5000 çevrim ve e) 10.000 çevrim yorulmuş, 10 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe yapılmış CTP numunelerde oluşan ön, arka ve kesit hasar görüntüleri

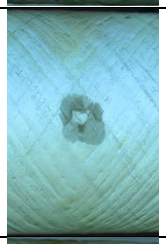
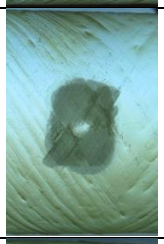
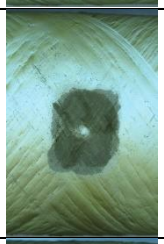
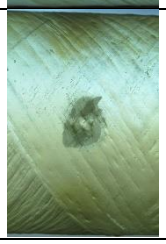
Şekil 7.15'te; 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelere ait kesitlerin, optik mikroskop kullanılarak elde edilen görüntüleri verilmiştir. Darbe hasarının çoğunlukla, darbe merkezinin etrafına doğru yayıldığı ve büyük bir bölümünün delaminasyonlardan oluştuğu görülmektedir. Delaminasyonlara ilaveten radyal matris çatlakları oluşmuştur. Hasar bölgesi incelendiğinde, 10.000 çevrim yorulmuş boruda meydana gelen hasarlar, diğerlerine göre çok daha fazladır.

Çevrim sayısı	Kesit görünüşü
0 Çevrim	
1000 Çevrim	
2500 Çevrim	
5000 Çevrim	
10.000 Çevrim	

Şekil 7.15 Farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP boruların,10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış kesit görüntüleri

Şekil 7.16'da; farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP kompozit borulara 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmasıyla elde edilen hasar görüntüleri bulunmaktadır. Şekil 7.16 incelendiğinde; darbe enerji seviyesinin artışıyla, hasar alanlarının genişlediği görülmektedir.

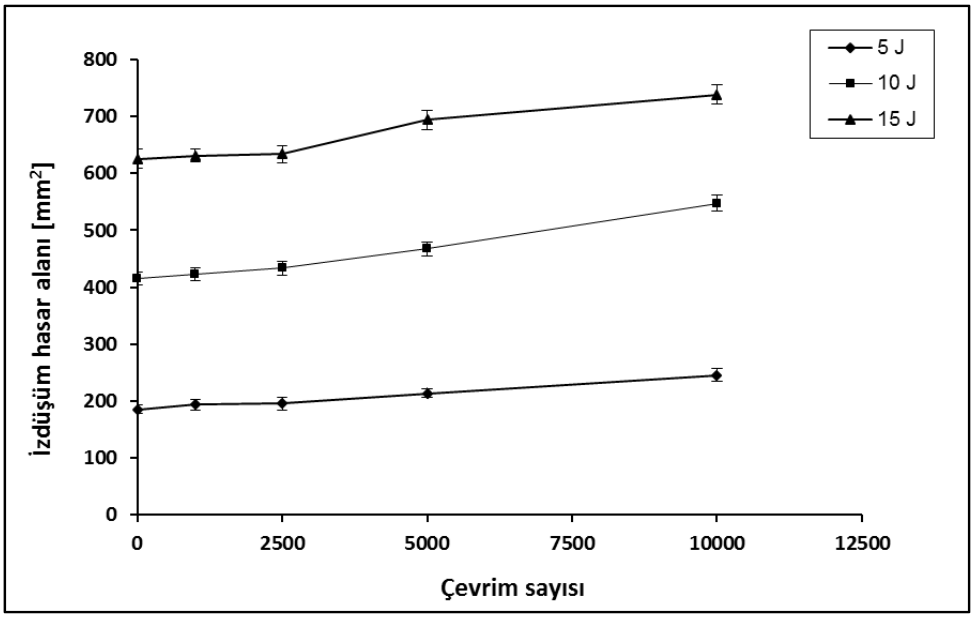


Darbe seviyeleri			Yorulma çevrim sayısı
5 J	10 J	15 J	
			0 Çevrim
			1000 Çevrim
			2500 Çevrim
			5000 Çevrim
			10.000 Çevrim

Şekil 7.16 Farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP kompozit boruların 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerji seviyelerinden elden edilen ön hasar görüntüleri

Şekil 7.17'de; 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyeleri için, yorulma çevrim sayılarına göre hasar alanlarının değişim grafiği verilmiştir. Yorulma çevrim sayılarının hepsi için,

darbe enerjisinin artmasıyla darbe hasar bölgesinin genişlediği açık bir şekilde görülmektedir. CTP borularda, +55° ve -55° olmak üzere, elyafların iki farklı yönlenme açısı vardır. Yönlenme açılarının farklı olmasında dolayı, bu katmanlar arasındaki eğilme rijitliği farklılık göstermektedir. Darbe esnasında ortaya çıkan tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarlarının en önemli sebebi; tabakalar arasındaki eğilme rijitliği farklılığı ve buna bağlı olan gerilmelerdir. Bu sebeple, darbe enerjisinin artışıyla; numunelerde daha fazla çökme olduğundan dolayı, delaminasyon alanı da daha fazla olmaktadır. Çevrim sayısı arttıkça; elyaf matris arası bağların zayıflamasından dolayı aynı enerji seviyesi için en büyük hasar alanı, 10.000 çevrim yorulmaya maruz kalmış numunelerde oluşmuştur.



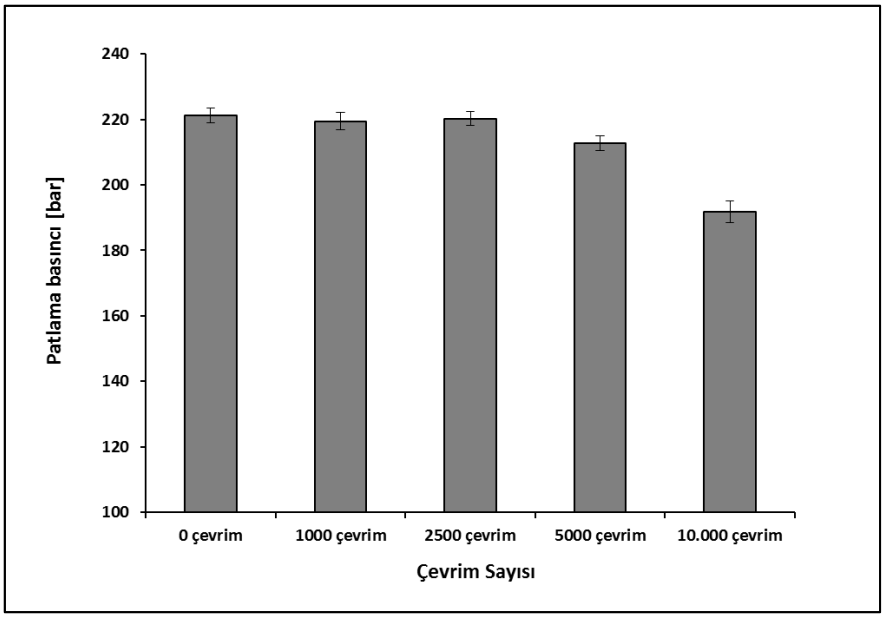
Şekil 7.17 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyeleri için, yorulma çevrim sayılarına göre hasar alanlarının değişimi grafiği

7.5. Yorulmuş ve Darbe ile Hasarlandırılmış CTP Boruların Statik İç Basınç Patlama Deney Sonuçları

Farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP kompozit borulara 10 J darbe enerji seviyesinde düşük hızlı darbeler uygulandıktan sonra, ASTM-D1599-14e1 (2014) standardına göre statik iç basınç patlatma deneyleri uygulanmıştır.

7.5.1. Yorulmaya maruz kalmış darbe hasarlı boruların patlama basıncı-darbe enerjisi değişimi

Şekil 7.18'de; farklı çevrim sayılarında yorulmuş CTP kompozit boruların 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırıldıktan sonra, statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen patlama basıncı-çevrim sayısı değişimi verilmiştir. 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmaya maruz kalmış ve 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış boruların, patlama basıncı yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin ise patlama basıncında sırasıyla %4.97 ve % 13.57'lik bir azalma meydana gelmiştir.



Şekil 7.18 Farklı çevrimlerde yorulmuş 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin statik iç basınç patlama deneyleri sonrasında elde edilen patlama basıncı-çevrim sayısı değişimi

Farklı çevrim sayılarında yorulmaya maruz bırakılmış ve 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış numuneler, ASTM-D1599-14e1 (2014) standardına göre statik iç basınç patlatma testi ile patlatılmıştır. Farklı çevrim sayılarının, numunelerin patlama testindeki hasar gelişimine de etkisi olmuştur. Yorulmaya maruz kalmış darbe hasarlı tüm numunelerde; statik iç basınç değeri yaklaşık olarak 170 bara ulaştığında, darbe bölgesindeki darbe hasarından kaynaklanan beyazlaşma artmaya başlamıştır. Beyazlaşma ifadesi; CTP kompozit boru numunelerinin iç kısmından ışık geçirilerek fotoğraf çekildiğinde, boruda şeffaflığın kaybedildiği bölgelerde mat bir görüntü oluşması durumunda kullanılmaktadır. Numunelere statik iç basınç patlama testleri uygulanırken

de ortaya çıkan hasarın gelişmesini değerlendirmede, bu durumun göz önüne alınması önemlidir. Çünkü beyazlaşmanın artmaya başlaması; numunede darbe hasarının dışında başka kalıcı hasarların oluşmaya başladığını, darbe hasarından kaynaklanan delaminasyonların artmasını ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının oluştuğunu göstermektedir.

Yorulmamış (0 çevrim) darbe hasarlı numunenin; statik iç basınç patlatma testi esnasında, basıncın artmasıyla darbe hasarlı bölgeden damlama ve terleme şeklinde sızıntı başlangıcı meydana gelmiştir. Basıncın artmaya devam etmesiyle, damlama şeklinde olan sızıntı su jetine dönüşmüş ve sonuç hasarı yoğun su jeti şeklinde gerçekleşmiştir. Numune kesitinde darbe neticesinde oluşan tabakalar arası radyal çatlaklar nedeniyle, numunede infilak etme şeklinde bir patlama meydana gelmemiştir. İç basıncın etkisiyle radyal çatlaklar ilerlemiş ve basınçlı yağ delaminasyon bölgesine dolarak yüzeye doğru yükselmiştir. Yüzeyde bulunan matris çatlakları da büyümüş ve numunede infilak olmaksızın basınçlı yağ sızmaya başlamıştır. Basıncın artmasıyla, çatlaklar açılarak yoğun su jeti oluşmasına sebebiyet vermiştir.

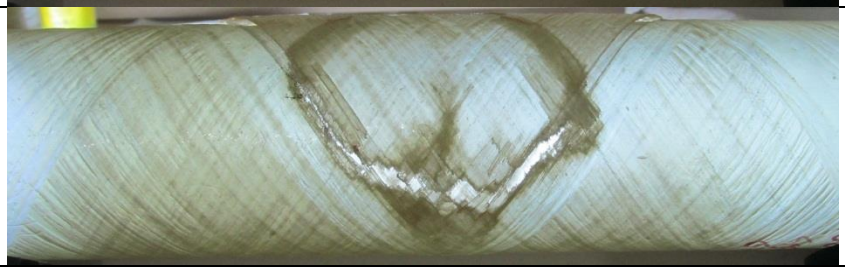
7.5.2. Darbe hasarlı boruların patlama hasar analizi

Şekil 7.19'da; yorulmaya maruz bırakılmamış (0 çevrim) 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış borunun, statik iç basınç patlama deneyi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde; numunede oluşan delaminasyonlar ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarının, darbe hasarlı bölgeye doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Yoğun su jetinin oluştuğu bölgede, yarılma meydana gelmediği ve boruda bir miktar sehim oluştuğu görülmektedir (Uyaner ve ark, 2014).



Şekil 7.19 Yorulmaya maruz bırakılmamış, 10 J darbe enerji seviyesinde hasarlandırılmış CTP borunun statik iç basınç patlatma testi sonucu oluşan son hasar görüntüsü

Şekil 7.20'de sırasıyla 1000 çevrim, 2500 çevrim, 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulduktan sonra 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış boruların, statik patlatma testinden elde edilen sonuç hasarı görüntüleri verilmiştir. 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmaya maruz kalmış darbe hasarlı numunelerin; statik iç basınç patlama testinde meydana gelen hasar gelişimi, yorulmamış (0 çevrim) boruda meydana gelen hasar gelişimi ile benzerlik göstermektedir. 5000 çevrim yorulmuş darbe hasarlı numunede oluşan sonuç hasarı, darbe bölgesinde su jeti oluşumundan sonra bir miktar yarılma şeklinde gerçekleşmiştir. 10.000 çevrim yorulmuş numunede ise yarılma daha fazla olmuş ve boru infilak ederek sonuç hasarına ulaşmıştır. 10.000 çevrim yorulmuş numunede; elyaf matris ara yüzey bağlarının zayıflamış olması, numunenin infilak ederek sonuç hasarına ulaşmasının en büyük nedenidir.

Çevrim sayısı	
1000 Çevrim	
2500 Çevrim	
5000 Çevrim	
10.000 Çevrim	

Şekil 7.20 Farklı çevrim sayılarında yorulmuş, 10 J darbe enerji seviyesinde hasarlandırılmış CTP borularda statik iç basınç patlatma testi sonucu oluşan son hasar görüntüleri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

1. Yorulmaya maruz kalmış CTP kompozit boru numunelerde 1000 çevrim, 2500 çevrim ve 5000 çevrim değerlerinde gözle görülebilir herhangi bir hasar oluşmamıştır; ancak 10.000 çevrim yorulmuş numunelerde yorulma hasarlarının ilki olan ve elyaf matris ara yüzey ayrılmalarını işaret eden beyazlaşmalar oluşmuştur.
2. Kuvvet-zaman diyagramlarında aynı enerji seviyesi için temas süreleri yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. En büyük temas kuvvetinin ise 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrimleri için yaklaşık olarak eşit olduğu; ancak 5000 ve 10.000 çevrim yorulmuş numunenin temas kuvvetinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Aynı enerji seviyesi için en düşük temas kuvveti, 10.000 çevrim yorulmuş numuneden elde edilmiştir.
3. Tüm çevrim değerleri için darbe enerjisinin artmasıyla en büyük temas kuvveti ve temas süresi de artmaktadır.
4. 0 çevrim, 1000 çevrim ve 2500 çevrim değerleri için eğilme rijitliği yaklaşık olarak aynı olurken, elyaf matris arası bağların yorulmaya bağlı olarak zayıflaması nedeniyle 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş numunelerin eğilme rijitliğinde azalma meydana gelmiştir.
5. Tüm yorulma çevrim sayıları için; darbe enerjisinin artmasıyla, darbe hasar bölgesi genişlemektedir. Aynı enerji seviyesi için en büyük delaminasyon alanı, 10.000 çevrim yorulmuş numunelerden elde edilmiştir.
6. Darbe hasarları çoğunlukla darbe merkezinin etrafına doğru yayılmış ve büyük bir bölümünü delaminasyonlar oluşturmuştur. Darbe hasarlı numunelerin yakma testi neticesinde, hasar bölgesinde elyaf kopmasının olmadığı gözlenmiştir.
7. Aynı darbe enerji seviyesi için 2500 çevrim değerine kadar numune tarafından yutulan enerji değerleri yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. 5000 çevrim ve 10.000 çevrim değerlerinde numune tarafından yutulan enerji miktarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Tüm enerji seviyelerinde 10.000 çevrim yorulmaya maruz kalmış numunede, yutulan enerji miktarı en büyük değerine ulaşmıştır.
8. 2500 çevrim değerine kadar yorulmaya maruz kalmış boruların, patlama basıncı yaklaşık olarak eşit çıkmıştır. 5000 çevrim ve 10.000 çevrim yorulmuş ve 10 J darbe enerjisiyle hasarlandırılmış numunelerin patlama basıncında sırasıyla %4.97 ve % 13.57'lik bir azalma meydana gelmiştir.

9. Yorulmamış (0 çevrim), 1000 çevrim ve 2500 çevrim yorulmuş boruların; statik patlama testindeki sonuç hasarları yoğun su jeti şeklinde oluşurken, 10.000 çevrim yorulmuş numunenin sonuç hasarı borunun infilak ederek yarılması şeklinde gerçekleşmiştir.

8.2. Öneriler

Bu çalışmada numuneler statik patlama basınının %35'i olacak şekilde belirlenen gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. İlerleyen çalışmalarda statik patlama basıncının %40, %45, %50'si gibi farklı gerilme değerlerinde numuneler yorulmaya tabi tutularak, farklı gerilme değerlerinin etkileri araştırılabilir.

Ayrıca bu çalışmada yorulmuş numunelere uygulanan iç basınç değerinden farklı bir ön gerilme değeri uygulanarak darbe testleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

http://www.bariselektrik.com.tr/urun/izolator-govdeleri/ [Erişim tarihi: 08.12.2016].

http://www.totalmateria.com/articles/Art45.htm [Erişim tarihi: 08.12.2016].

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

Alexander, C. R., Wilson, F. D., 1999, Development and testing of the armor plate pipe wrap repair system, *1999 Energy Sources Technology Conference and Exhibitions*, Houston, Texas, s1.

Alshahrani, R. F., Merah, N., Khan, S. M. A., Al-Nassar, Y., 2016, On the impact-induced damage in glass fiber reinforced epoxy pipes, *International Journal of Impact Engineering*, 97, 57-65.

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

Arikan, H., 2010, Failure analysis of (+/- 55 degrees)(3) filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure, *Composite Structures*, 92, 1, 182-187.

ASTM-D1599-14e1, Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, DOI: 10.1520/D1599-14E01, www.astm.org.

ASTM-D2290-12, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D2290-12, www.astm.org.

ASTM-D2584-11, Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, DOI: 10.1520/D2584-11, www.astm.org.

ASTM-D2992-12, Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D2992-12, www.astm.org.

ASTM-E1823-10a, Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, DOI: 10.1520/E1823-10A, www.astm.org.

Avci, A., Sahin, O. S., Tarakcioglu, N., 2007, Fatigue behavior of surface cracked filament wound pipes with high tangential strength in corrosive environment, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 38, 4, 1192-1199.

Bai, J., 2013, Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications, *Woodhead Publishing*, United Kingdom, 88-90.

Campbell, F. C., 2012, Fatigue and fracture: Understanding the basics, *ASM International*, United States, 154-394.

Ceyhun, V., Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, *Mühendis ve Makine*, 44 (516), 36-38.

Chang, D. J., 2003, Burst tests of filament-wound graphite-epoxy tubes, *Journal of Composite Materials*, 37, 9, 811-829.

Daniel, I. M., Ishai, O., 2006, Engineering mechanics of composite materials, Second Edition, *Oxford University Press*, New York, 1-2.

Demir, I., Sayman, O., Dogan, A., Arikan, V., Arman, Y., 2015, The effects of repeated transverse impact load on the burst pressure of composite pressure vessel, *Composites Part B-Engineering*, 68, 121-125.

Demirci, M. T., Tarakcioglu, N., Avci, A., Erkendirci, O. F., 2014, Fracture toughness of filament wound BFR and GFR arc shaped specimens with Charpy impact test method, *Composites Part B-Engineering*, 66, 7-14.

Deniz, M. E., Karakuzu, R., 2012, Seawater effect on impact behavior of glass-epoxy composite pipes, *Composites Part B-Engineering*, 43, 3, 1130-1138.

Deniz, M. E., Karakuzu, R., Sari, M., Icten, B. M., 2012, On the residual compressive strength of the glass-epoxy tubes subjected to transverse impact loading, *Journal of Composite Materials*, 46, 6, 737-745.

Deniz, M. E., Ozdemir, O., Ozen, M., Karakuzu, R., 2013, Failure pressure and impact response of glass-epoxy pipes exposed to seawater, *Composites Part B-Engineering*, 53, 355-361.

Deniz, M. E., 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-Engineering*, 44, 1, 304-312.

Ellyin, F., Martens, M., 2001, Biaxial fatigue behaviour of a multidirectional filament-wound glass-fiber/epoxy pipe, *Composites Science and Technology*, 61, 4, 491-502.

Erkendirci, Ö. F., 2006, Tel takviyeli termoplastik kompozitlerde kırılma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s21.

Gemi, L., 2014, Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 37-39.

Gemi, L., Kara, M., Avci, A., 2016, Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes, *Composites Part B: Engineering*.

Gemi, L., Tarakcioglu, N., Akdemir, A., Sahin, O. S., 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (+/- 75)(2) filament-wound pipes under pure internal pressure, *Materials & Design*, 30, 10, 4293-4298.

Gning, P. B., Tarfaoui, M., Collombet, F., Davies, P., 2005, Prediction of damage in composite cylinders after impact, *Journal of Composite Materials*, 39, 10, 917-928.

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-Engineering*, 36, 4, 306-318.

Griffin, C. F., 1987, Damage tolerance of toughned resin graphite composite, In: Toughned Composites, Eds: Johnston, N.J., *ASTM Special Technical Publication 937*, Philadelphia, 23-33.

Guedes, R. M., 2011, Creep and fatigue in polymer matrix composites, *Woodhead Publishing*, United Kingdom, 503-504.

Güldü, İ., 1995, Cam takviyeli plastik malzemelerde takviye açısının kırılma davranışına etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s5.

Harris, B., 2003, Fatigue in composites, 1th Edition, *CRS Press*, England, s627.

Hawa, A., Majid, M. S. A., Afendi, M., Marzuki, H. F. A., Amin, N. A. M., Mat, F., Gibson, A. G., 2016, Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes, *Materials & Design*, 89, 455-464.

Jollivet, T., Peyrac, C., Lefebvre, F., 2013, Damage of Composite Materials, *Procedia Engineering*, 66, 746-758.

Kaneko, T., Ujihashi, S., Yomoda, H., Inagi, S., 2008, Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transverse impact loading, *Thin-Walled Structures*, 46, 7-9, 898-904.

Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s47.

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, 24-66.

Kara, M., Uyaner, M., Avci, A., 2015, Repairing impact damaged fiber reinforced composite pipes by external wrapping with composite patches, *Composite Structures*, 123, 1-8.

Kara, M., Uyaner, M., Avci, 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-Engineering*, 60, 507-514.

Kaynak, C., Mat, O., 2001, Uniaxial fatigue behavior of filament-wound glass-fiber/epoxy composite tubes, *Composites Science and Technology*, 61, 13, 1833-1840.

Kim, E. H., Lee, I., Hwang, T. K., 2012, Low-Velocity Impact and Residual Burst-Pressure Analysis of Cylindrical Composite Pressure Vessels, *Aiaa Journal*, 50, 10, 2180-2193.

Kobayashi, S., Kawahara, M., 2012, Effects of stacking thickness on the damage behavior in CFRP composite cylinders subjected to out-of-plane loading, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 43, 1, 231-237.

Krishnamurthy, K. S., Mahajan, P., Mittal, R. K., 2001, A parametric study of the impact response and damage of laminated cylindrical composite shells, *Composites Science and Technology*, 61, 12, 1655-1669.

Krishnamurthy, K. S., Mahajan, P., Mittal, R. K., 2003, Impact response and damage in laminated composite cylindrical shells, *Composite Structures*, 59, 1, 15-36.

Krishnan, P., Majid, M. S. A., Afendi, M., Gibson, A. G., Marzuki, H. F. A., 2015, Effects of winding angle on the behaviour of glass/epoxy pipes under multiaxial cyclic loading, *Materials & Design*, 88, 196-206.

Mallick, P. K., 2008, Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, Third Edition, *CRC Press*, United States, 58-75.

Martins, L. A. L., Bastian, F. L., Netto, T. A., 2012, Structural and functional failure pressure of filament wound composite tubes, *Materials & Design*, 36, 779-787.

Mazumdar, S. K., 2001, Composites manufacturing: materials, product, and process engineering, *CRC Press*, United States, 29-149.

Meijer, G., Ellyin, F., 2008, A failure envelope for +/-60 degrees filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 39, 3, 555-564.

Perillo, G., Grytten, F., Sorbo, S., Delhaye, V., 2015, Numerical/experimental impact events on filament wound composite pressure vessel, *Composites Part B-Engineering*, 69, 406-417.

Perillo, G., Vedivik, N. P., Echtermeyer, A. T., 2015, Numerical and experimental investigation of impact on filament wound glass reinforced epoxy pipe, *Journal of Composite Materials*, 49, 6, 723-738.

Reid, S. R., Zou, G., 2000, Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures, *CRC Press*, England, s8.

Roberts, P. D., 1995, Crack growth retardation by carbon fibre composite patching: An application to steel pressure vessel repair, Master of Science Thesis, *University of Alberta Department of Mechanical Engineering*, Alberta, 5-6.

Saatçi, G. E., Tahralı, N., 2003, Birikimli hasar teorileri ve yorulma çatlağına göre ömür değerlendirmeleri, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri*, 1 (2), 35-36.

Sakin, R., 2004, Bilgisayar destekli, çok numuneli eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve cam-fiber takviyeli polyester kompozitlerde eğilme yorulması davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, s41.

Samancı, A., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, s44.

Samanci, A., Avci, A., Tarakcioglu, N., Sahin, O. S., 2008, Fatigue crack growth of filament wound GRP pipes with a surface crack under cyclic internal pressure, *Journal of Materials Science*, 43, 16, 5569-5573.

Sari, M., Karakuzu, R., Deniz, M. E., Icten, B. M., 2012, Residual failure pressures and fatigue life of filament-wound composite pipes subjected to lateral impact, *Journal of Composite Materials*, 46, 15, 1787-1794.

Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 48-53.

Sebaey, T. A., Mahdi, E., 2016, Crashworthiness of pre-impacted glass/epoxy composite tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 92, 18-25.

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

Şahin, A., 2011, Düşük hızlı darbe görmüş filaman sarım E-camı/epoksi boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 50-53.

Şahin, Y., 2015, Kompozit malzemelere giriş, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 43-45.

Talreja, R., Singh, C. V., 2012, Damage and failure of composite materials, *Cambridge University Press*, United Kingdom, 37-38.

Tarakcioglu, N., Samanci, A., Arikan, H., Akdemir, A., 2007, The fatigue behavior of (+/- 55 degrees)(3) filament wound GRP pipes with a surface crack under internal pressure, *Composite Structures*, 80, 2, 207-211.

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, 5, 547-558.

Tarfaoui, M., Gning, P. B., Hamitouche, L., 2008, Dynamic response and damage modeling of glass/epoxy tubular structures: Numerical investigation, *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 39, 1, 1-12.

Ustun, T., Eskizeybek, V., Avci, A., 2016, Enhanced fatigue performances of hybrid nanoreinforced filament wound carbon/epoxy composite pipes, *Composite Structures*, 150, 124-131.

Uyaner, M., Kara, M., Sahin, A., 2014, Fatigue behavior of filament wound E-glass/epoxy composite tubes damaged by low velocity impact, *Composites Part B-Engineering*, 61, 358-364.

Vaidya, U. K., 2011, Impact response of laminated and sandwich composites, In: Impact engineering of composite structures, 526, Eds: Abrate, S., *SpringerWienNewYork*, United States, 108-109.

Wakayama, S., Kobayashi, 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-Applied Science and Manufacturing*, 37, 11, 2002-2010.

Xia, M., Takayanagi, H., Kemmochi, K., 2001, Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures*, 53, 4, 483-491.

Zheng, C. L., Ren, M. F., Zhao, W., Chen, H. R., 2006, Delamination prediction of composite filament wound vessel with metal liner under low velocity impact, *Composite Structures*, 75, 1-4, 387-392.

Zheng, J. Y., Hu, Y., Ma, L., Du, Y., 2015, Delamination failure of composite containment vessels subjected to internal blast loading, *Composite Structures*, 130, 29-36.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Muhammed KIRICI
Uyruğu	**:**	TC
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Keçiören-07.12.1987
Telefon	**:**	-
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	muhammedkirici.mk@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Atatürk Lisesi, Osmangazi, Bursa	2005
Üniversite	:	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze, Kocaeli	2013
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Selçuklu, Konya	2014(Bahar)-…

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2015(Şub-Tem)	Yenmak Piston Segman San. ve Tic. A.Ş.	Dökümhane M.Yardımcısı

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce-Orta seviyede

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Kara M., Kırıcı M., "İç Basınç Altında Yorulmuş Filaman Sarım CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Sonrası Hasar Davranışlarının İncelenmesi" *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2016) Afyon Kocatepe University, April 21-22, 2016 – Afyon/Turkey* (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)

Kara M., Kırıcı M., Uyaner M., "Tekrarlanan Darbeye Maruz E-Camı/Epoksi Kompozit Boruların Hasar Davranışları" *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2016) Afyon Kocatepe University, April 21-22, 2016 – Afyon/Turkey*