



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**FİLAMAN SARIM CTP BORULARDA DARBE
SONRASI BASMA (CAI) DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Dilek SOYLU GEMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Dilek Soylu Gemi tarafından hazırlanan "FİLAMAN SARIM CTP BORULARDA DARBE SONRASI BASMA (CAI) DAVRANIŞININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması 05/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM

Danışman

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Tarafından 18201014 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Dilek Soylu Gemi
Tarih: 05.07/2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİLAMAN SARIM CTP BORULARDA DARBE SONRASI BASMA (CAI) DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Dilek SOYLU GEMİ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2019, 82 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM
Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

Filaman sarım tekniği ile üretilen CTP (Cam Takviyeli Polimer) kompozit borular basınçlı kimyasal madde içeren sıvıların, endüstriyel sıvıların iletiminde, petrol ve doğalgaz iletimi ve çeşitli alanlarda konstriksiyon malzemesi olarak birçok alanda kullanılmaktadır. CTP kompozit borular gerek montaj gerekse servis esnasında çeşitli sebeplerden dolayı düşük hızlı darbelere maruz kalabilmektedir. Darbenin etkisiyle CTP kompozit boru cidarında; matris çatlağı, elyaf hasarı ve tabakalar arası ayrılma gibi gözle görülmeyen hasarlar meydana gelebilir. Darbe sonucu oluşan bu hasarlar ile mukavemet kaybına uğrayan kompozit borular, servis esnasında beklenen mukavemet değerlerini verememektedir. Düşük hızlı darbe sonrası oluşan hasarların incelenmesi ve bu hasarların kompozit borunun mukavemet kayıplarına etkisinin araştırılması için $(\pm 55^\circ)_3$ konfigürasyonuna sahip üç farklı çapta ($\emptyset 54$, $\emptyset 72$ ve $\emptyset 96$ mm) kompozit boru üretilmiştir. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla, yukarıda belirtilen çaplardaki borular üzerine ASTM D 7136 standardına göre, 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarda darbe uygulanmış ve ön hasar oluşturulmuştur. Düşük hızlı darbe sırasında Kuvvet-Zaman, Kuvvet-Deplasman ve Enerji-Zaman grafikleri çıkartılarak boruların dinamik davranışları ve oluşan hasarlar incelenmiştir. Darbe sonrası borularda oluşan hasarların kalan mukavemete etkilerinin incelenebilmesi için ön hasarlı borulara ASTM D 7137 standardına göre Darbe Sonrası Basma (CAI) testleri yapılmış ve Kuvvet-Deplasman grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, darbe hasarsız numunelerin davranışlarıyla karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbe ve darbe sonrası basma deneyleri sırasında elde edilen veriler ve oluşan hasarlar kaydedilmiştir. Deneyler sonrasında CTP boruların optik mikroskop ve SEM görüntüleme ile makro/mikro hasar analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe (LVI), Darbe sonrası basma (CAI), Elyaf takviyeli plastik (CTP), Filaman sarım, Hasar davranışı, Kompozit boru

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF COMPRESSION AFTER IMPACT (CAI) RESPONSE OF FILAMENT WOUND GRP PIPES

Dilek SOYLU GEMİ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
2019, 82 Pages**

**Jury
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM
Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL**

The GRP (Glass Reinforced Polymer) composite pipes produced by filament winding technique are used in many fields such as the transmission of pressurized chemical liquids, industrial liquids, oil and natural gas transmission and construction materials. GRP composite pipes may be subjected to low speed impacts for various reasons both during installation and service. The impact on the CTP composite pipe wall may lead to some nonvisible damages such as matrix crack, fiber damage, and inter-layer separation. Composite pipes suffered strength loss due to these damages caused by impact cannot support the expected strength values during service. Pipes with three different diameters (Ø54, Ø72 and Ø96 mm) were produced to investigate the damage caused by low velocity impact and to determine the effect of these damages on the strength losses of the composite pipe. In order to investigate the influence of low velocity impact damage, the produced pipes were subjected to impacts at the velocity of 1.5, 2, 2.5 and 3 m/s according to ASTM D 7136 and preliminary damage was formed. During low velocity impact tests, Force-Time, Force-Displacement and Energy-Time graphs were obtained and dynamic behavior of the pipes were examined. In order to examine the effects of damages on the strength of post-impact pipes, Compression after impact (CAI) tests were performed on pre-damaged pipes according to ASTM D 7137 and Force-Displacement graphs were obtained. The results of impacted samples were compared with the behavior of non-impacted samples. Damages and data obtained during low velocity impact and compression after impact tests were recorded. After the experiments, macro/micro damage analyses of GRP pipes were performed by optical microscope and SEM imaging.

Key words: Composite pipe, Compression after impact (CAI), Damage behavior, Fiber reinforced plastic (FRP), Filament winding, Low velocity impact (LVI)

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği sağlayan Tez Danışmanım Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e,

Çalışmalarımın özellikle deneysel kısımlarının yapılması esnasında teorik, deneysel bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Dr. Öğr. Üyesi Lokman GEMİ'ye,

Basma deneylerinde deney cihazı ve donanımlar noktasında Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı imkânlarını açtığı için Doç. Dr. Necati ATABERK'e,

Tezimin okunması, düzeltmelerinin yapılması ve grafiklerin oluşturulması esnasında çalışmalarına zaman ayırdığı için Dr. Öğr. Gör. Şakir YAZMAN'a

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için deney numunelerin temin edilmesi ve incelenmesi gibi konularda 18201014'nolu proje ile maddi destek veren Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne,

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

SONSUZ TEŞEKKÜRÜ BİR BORÇ BİLİRİM.

Dilek SOYLU GEMİ
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	11
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı	11
3.2. Matris Malzemeleri.....	11
3.2.1. Termoset matrisler	12
3.3. Takviye Malzemeleri	12
3.3.1. Cam elyaflar.....	13
3.4. Tabakalı Kompozitler	13
3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler	14
3.5. Kompozit Üretimi	14
3.5.1. Filaman sarım yöntemi	15
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
4.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi	17
4.2. CTP Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Deneyleri.....	18
4.3. CTP Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi.....	20
4.3.1. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri	20
4.3.2. Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri	21
4.3.3. Absorbe edilen enerji-zaman (E_a -t) eğrileri	22
4.4. Darbe Sonrası Mikro Hasarlarının İncelenmesi.....	24
4.5. Darbe Sonrası Basma Deneyi (CAI).....	27
4.6. Eksenel Basma Sonucu Oluşan Hasar Modları	29
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	32
5.1. CTP Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları.....	32
5.1.1. Temas kuvveti-zaman değişimi	34
5.1.2. Temas kuvveti-deplasman değişimi.....	37
5.1.3. Enerji-zaman değişimi	39
5.2. CTP Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Makro Hasar Analizi	41
5.2.1. Ø54 mm CTP kompozit borularda makro hasar analizi	42
5.2.2. Ø72 mm CTP kompozit borularda makro hasar analizi	43
5.2.3. Ø96 mm CTP kompozit borularda makro hasar analizi	44

5.3. CTP Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mikro Hasar Analizi.....	45
5.3.1. Ø72 mm borularda optik mikroskop hasar analizi.....	45
5.3.2. Ø72 mm borularda SEM hasar analizi.....	47
5.4. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Basma Deney (CAI) Sonuçları	52
5.4.1. Ø54 mm borularda darbe sonrası basma (CAI) deney sonucu	54
5.4.2. Ø72 mm borularda darbe sonrası basma (CAI) deney sonucu	55
5.4.3. Ø96 mm borularda darbe sonrası basma (CAI) deney sonucu	56
5.4.4. Basma sonrası gerilme, deplasman ve tokluk karşılaştırması.....	57
5.5. Darbe Sonrası Basma Deney (CAI) Numunelerinin Hasar Analizi	59
5.5.1. Ø54 CTP borularda basma sonrası hasar analizi	60
5.5.2. Ø72 CTP borularda basma sonrası hasar analizi	62
5.5.1. Ø96 CTP borularda basma sonrası hasar analizi	64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
6.1. Sonuçlar	66
6.2. Öneriler	68
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_a	Absorbe edilen enerji
E_{a-t}	Absorbe edilen enerji-zaman eğrileri
σ	Çekme dayanımı
d-t	Çökme-zaman eğrileri
E_i	Darbe enerjisi
E	Elastiklik modülü
V_f	Fiber hacimsel oranı
V-t	Hız-zaman eğrileri
F-d	Kuvvet-çökme eğrileri
F-t	Kuvvet-zaman eğrileri
σ/ρ	Özgül dayanım
E/ρ	Özgül modül
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

GGC	Cam/Cam /Karbon istifleme sırası
GCG	Cam/Karbon/Cam istifleme sırası
GFRP	Cam fiber takviyeli plastik
CTP	Cam takviyeli plastik
CAI	Darbe sonrası basma
FRP	Fiber takviyeli plastik
CGG	Karbon/Cam/ Cam istifleme sırası
CFRP	Karbon fiber takviyeli plastik

1. GİRİŞ

Günümüzde filaman sarım Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) borular doğal gaz ve petrol iletim hatları başta olmak üzere askeri amaçlı portatif köprü konstrüksiyonları gibi birçok uygulamada yapısal eleman olarak kullanılmaktadır. Söz konusu CTP borular kullanıldıkları uygulamalarda çeşitli sebeplerden dolayı şok biçiminde yüklemelere maruz kalabilmektedirler. Bu durum CTP boruların gözle görülemeyecek düzeyde hasarlanmasına sebep olabilmektedir. Bu durum CTP boruların mekanik özelliklerinin düşmesine ve yapıda yıkıcı hasar gelişimine yol açabilmektedir. Bu bakımdan CTP boruların maruz kalabilecekleri darbe yüklerinin mekanik özellikleri ne ölçüde etkilediğinin belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu sayede CTP boruların kullanıldığı doğal gaz ve petrol iletim hatları başta olmak üzere birçok uygulamada tasarımın daha sağlıklı yapılmasını sağlayacak bilgi birikimi elde edilmiş olacaktır.

Polimer matrisli kompozit malzemeler; yüksek mukavemetli, sert fiberlerin daha zayıf ve daha az katı matris malzemeler içerisinde sıkıca sarılmasıyla elde edilir. Bu birleşim sonucunda güçlü, sert ve sıklıkla düşük yoğunlukta yapılar oluşur. Bu iki malzeme grubundan fiber malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matrisin rolleri; fiberleri bir arada tutma, yükü fiberlere eşit miktarda dağıtma, plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleme ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmeden oluşur.

Cam liflerinin sanayide kullanımıyla ilgili ilk kayıt 1877 tarihlidir. Liflerle takviye edilmiş sentetik reçineler 1950’li yıllardan itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en tanınmış grubunu “Cam elyaf Takviyeli Polyester (CTP)” oluşturmaktadır. Ülkemizde “fiber-glass” diye tanınan bu malzemeler, 1960’lı yıllardan itibaren sıvı tankları, çatı levhaları, küçük boy deniz tekneleri gibi elemanların imalatında kullanılmaktadır. Ülkemizde seri üretimi yapılmış ilk yerli otomobil olan “Anadol”un kaportası da bu malzemedendir.

Kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılır. Her sektörün farklı ihtiyaçları ve beklentileri olduğundan, kompozit malzemelerin, ürün esneklikleri önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozitler, farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi imalat yardımcı ekipmanları olarak da kullanılırlar.

Kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı başlıca sektörler ve bu sektörlerde kullanılan ürün tipleri aşağıda kısaca özetlenmektedir:

- Havacılık/uzay/savunma sanayi,
- Ev aletleri ve iş ekipmanları,
- Tarım/gıda sektörü,
- Yapı sektörü,
- Denizcilik sektörü,
- Elektrik/elektronik sektörü,
- Tüketim malları/spor/eğlence,
- Askeri uygulamalar,
- Taşımacılık ve otomotiv sektörü,

olarak sıralanabilir (Güvensoy, 2010).

Kullanım alanı hızla artmakta olan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için birçok test yöntemi geliştirilmiştir. Başlıca testler çekme, basma, eğme, tabakalar arası kayma (interlaminar shear), kat ayrışma testi, kat kesme, Darbe sonrası basma (Compression After Impact - CAI), kırılma tokluğu, yorulma testi gibidir. Malzeme test tekniklerinde, standardize edilen numune gövdeleri üzerinde gerilim senaryoları üretmektedir. Bu testler uluslararası ISO standardına ek olarak; ulusal ve yerel standartlara (ASTM, EN, DIN, TSE) ve firmaların kendi düzenlemelerine (Airbus AITM, Boeing BSS) uygun yapılmaktadır. Bu sayede yaklaşık 20 genel test yöntemini açıklayan, 150'den fazla standart oluşmaktadır.

Bu çalışmada darbe yüklemesi altında ön hasara uğramış CTP borulara basma yüklemesi ve hasar gelişiminin CTP boruların mekanik davranışları üzerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe testi sonrası basma yüklerine karşı dayanım büyük oranda düşmektedir. Bu durum tabakalı kompozitler için kritik bir durum olduğundan ağırlık düşürme testi sonrası kompozit malzemelerde basma dayanımlarının belirlenmesi çok önemlidir. Darbe sonrası kalan basma dayanımını belirlemek için Darbe Sonrası Basma (CAI) testi kullanılmaktadır. Darbe sonrası basma testinin yapılmasının amacı, darbe hasarından sonra oluşan elyaf, matris ve tabaka hasarlarının basmaya karşı kompozit malzemeyi ne derecede zayıflatmakta olduğunu belirlemektir. Bu hasarlar çekme testinde çok belirgin sonuçlar göstermezken basma testinde ciddi mukavemet kayıplarına sebep olmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin hasar sonrası kalan mukavemetlerinin tespiti

kullanım alanında hasarın gelişiminin tahmin edilebilmesi açısından önemlidir. Bu yüzden bu çalışma da darbe sonrası basma (CAI) üzerinde durulacaktır. Böylece literatürde oldukça sınırlı bilgilerin olduğu CTP boruların CAI testi davranışları incelenmiştir. Farklı hız değerleri ile ön hasar oluşturulmuş farklı çaplardaki boruların mukavemet kayıplarının hasarsız numunelerle deneysel sonuçları mukayese edilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

CTP borular yüksek mukavemete, çok sayıda kimyasal maddeye, hava koşullarına, UV ışınlarına dayanım ile farklı mekanik özellikler elde etmek için farklı katmanlarda ve konfigürasyonlarda ve istenilen boyutlarda üretilme, seri üretim gibi üstün özellikleri sayesinde birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Birçok alanda kullanılan CTP kompozit borular çeşitli nedenlerden dolayı darbeye maruz kalabilirler. Darbelere karşı duyarlı olan CTP borularda darbe sonrasında gözle muayenede belirlenemeyen lokal iç hasarlar oluşur. Bu hasarlar CTP boruların mukavemetinde azalmaya sebep olduğu gibi, yük veya alternatif yük altında büyürler. Oluşan bu hasarlar ilerleyen zamanlarda sızıntı hasarlarına yol açarlar. Bu nedenle kompozit yapıların düşük hızlı darbe cevapları ve darbe etkisiyle oluşan hasar modlarının belirlenmesi gereklidir. Tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalı ve darbe cevabı iyi olan kompozit borular tasarlanmalıdır. Ayrıca, tasarlanan kompozit boruların boyut faktörünün düşük hızlı darbe cevabı ve performansına etkilerinin de incelenmesi önem arz etmektedir.

Literatürde kompozit boruların düşük hızlı darbe cevapları ve hasar analizleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Doyum ve Altay (1997), filaman sarım yöntemi ile S-camı ve E-camı kullanarak üretilmiş ince cidarlı CTP borulara ağırlık düşürme testleri uygulamışlar ve hasar gelişimini araştırmışlardır. Bu çalışmalarını için $(\pm 45^\circ)_2$, 90° , $(\pm 54^\circ)_3$ ve 90° konfigürasyonunda borular üretmişlerdir. Çalışmalarında 3,5 J ile 8,5 J arasında değişik enerji seviyelerinde darbe üretebilen bir cihaz kullanmışlardır. Değişen darbe enerjisine göre CTP borularda oluşan hasar tiplerini ve hasar yoğunluğunu tespit etmişlerdir. E-camı borularda geniş ölçüde dış yüzey matris çatlağı ve malzeme kesiti içerisinde tabakalar arası ayrılma hasarı tespit etmişlerdir.

Gning ve ark. (2004), filaman sarım yöntemiyle üretilmiş $(\pm 55^\circ)_{10}$ konfigürasyonunda cam epoksi borularda meydana gelen darbe hasarının hidrostatik basınç direncine etkisini incelemişlerdir. Kullandıkları CTP boruların iç çapı, et kalınlığı ve uzunlukları sırasıyla 55, 6 ve 110 mm'dir. Darbe hasarının cam/epoksi boruların patlama basıncını önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir. 12 J darbe enerjisi ile ön hasar oluşturulan borularda, patlama basıncını %40 a kadar azalmıştır.

Tarfaoui ve ark. (2006), CTP silindir yapıların hasarına ve dinamik cevabına ölçek ve boyut etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında farklı boyutlarda ve ölçeklerde $\pm 55^\circ$ E-camı epoksi CTP numuneler kullanmışlardır. İmalat parametrelerinin

numunenin dinamik cevabına ve numunede meydana gelen hasara önemli ölçüde etki ettiğini tespit etmişlerdir.

Uyaner ve ark. (2010), filaman sarım yöntemiyle üretilmiş CTP boruların düşük hızlı darbe sonrası mukavemetini araştırmışlardır. $(\pm 55^\circ)_5$ konfigürasyonunda borulara 24 mm yarı küresel vurucu ile 2.0, 3.0 ve 4.0 m/s'lik çarpma hızlarında düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, darbe hasarlı CTP borular ASTM D 1599-99 standardına uygun statik patlatma testi yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneylerinde çarpma hızı arttıkça en büyük temas kuvveti, temas süresi, yer değiştirme miktarı, malzeme tarafından yutulan enerji ve numunelerde oluşan hasar miktarı artmaktadır. Darbe enerjisinin artmasıyla CTP boruların patlama basıncı değerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Gemi ve ark. (2018), 72 mm iç çapında CTP borulara 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarında düşük hızlı darbe testleri yapmışlardır. Bu çalışmalarında $(\pm 55^\circ)_3$ konfigürasyonun da borular kullanılmıştır. CTP borunun farklı hızlara olan darbe cevabı incelenmiş ve darbe sonrası elde edilen veriler kullanılarak darbe cevabı istatistiksel bir yaklaşım ile tartışılmıştır. Farklı hızlarda oluşan hasarlar makro ve mikro boyutta SEM analizi ile incelenmiştir. Gemi (2018), cam ve karbon elyaf kullanarak ürettiği hibrid borulara 32 bar iç basınç altında ön gerilme uygulayarak 5, 10, 15 ve 20 J darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmiştir. $(\pm 55^\circ)_3$ konfigürasyonunda CGG, GCG ve GGC istifleme sırasında ürettiği kompozit boruların istifleme sırasının düşük hızlı darbe cevabını araştırmıştır. GCG istif sırasında üretilen kompozit borunun darbe cevabı ve hasar gelişimine en iyi cevabı verdiğini yorumlamıştır. Gemi ve ark. (2017), filaman sarım yöntemiyle ürettikleri $\pm 45_g^\circ / \pm 55_c^\circ / \pm 75_g^\circ$ sarım açılı hibrid kompozit boruya farklı iç basınçlarda 20J enerjide düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. İç basınç etkisi ile oluşturulan ön gerilmenin düşük hızlı darbe cevabına etkilerini araştırmışlardır. Ön gerilme arttıkça kompozit borularda oluşan çökmenin azaldığı ve bununla beraber hasarında azaldığını tespit etmişlerdir. Darbe hasarlı borular sabit bir gerilme değerinde yorulmaya tabi tutulmuştur. 24 MPa ön gerilme değerinden sonra yapılan yorulma deneylerinde hibrid kompozit borunun hasarsız gibi davrandığını yorumlamışlardır. Gemi ve ark. (2016), filaman sarım yöntemi ile ürettikleri $(\pm 55^\circ)_4$ sarım açılı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FGM) tasarımında üretilen hibrid borulara düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Cam ve karbon elyaf kullanarak ürettiği FGM borulara 4, 16 ve 32 bar iç basınç altında 5, 10, 15 ve 20 J darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir.

FGM boruların düşük hızlı darbe cevabı ve darbe sonrası hasar analizini incelemişlerdir. Darbe hasarlı boruların kalan mukavemetlerini tespit etmek için ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testi uygulamışlardır.

Curtis ve ark. (2000), darbeye ya da statik batmaya maruz kalan filaman sarım kompozit tüplerin hasar, deformasyon ve kalan patlama mukavemetini incelemişlerdir. Statik batma ve düşük hızlı darbe sonuçları karşılaştırılmıştır. Bir başka çalışmada Gning ve ark. (2005), kalın $\pm 55^\circ$ filaman sarımlı cam epoksi tüplerine yarı-statik batma ve düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Ağırlık düşürme darbe testleri, 55 mm iç çaplı 6 mm kalınlığındaki tüplere 45 J enerji seviyesine kadar gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik inceleme ile hasar alanları belirlenmiştir.

Literatürde kompozit boruların mekanik özelliklerini belirleme ile alakalı birçok çalışma yapılmıştır. Gemi (2004), farklı sarım açılarda üretilmiş CTP kompozit borulara statik patlatma ve yorulma deneyleri yapmıştır. Çalışmalarında $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açılarında üretilmiş borularda sarım açısının statik patlatma mukavemetine ve yorulma ömrüne etkisini deneysel olarak incelemiştir. Başka bir çalışmasında Gemi (2014), filaman sarım yöntemiyle ürettiği hibrid kompozit borulara ANSI/AWWA C950 standardına göre iç basınç altında düşük hızlı darbe deneyleri yapmış ve bu darbe hasarlı boruların yorulma davranışlarını incelemiştir. Farklı iç basınçlar altında darbe hasarı oluşturulan boruların yorulma ömür grafikleri çıkartılmış ve iç basınç etkisi ile oluşturulan ön gerilmeli darbenin yorulma ömrüne etkisi incelenmiştir.

Zorlu (2016), kompozit malzemeler kullanım alanları gereğince farklı geometrilerde üretilip aksenal yüklemelere maruz kalabilmektedirler. Bu yüklemeler gerçek hayatta statik basma kuvveti veya dinamik darbe kuvveti şeklinde olabilirler. Ayrıca kompozit malzemeler kullanıldıkları yere göre farklı ebatlarda ve uzunluklarda kullanım gereksinimleri olabilmektedir. Literatürde hasar görmemiş kompozit boru veya profillerin enerji absorpsiyonu, yük ve darbelere karşı gösterdiği davranış ile hasar analizi hakkında birçok çalışma yapılmıştır.

Kakogiannis ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada 100 mm uzunluğunda, 2 mm kalınlığa sahip 23 mm ve 30 mm çapında, ağızları eğimli ve tırtıklı şekilde kesilerek özel ürettikleri E-camı polimer matrisli 4 çeşit kompozit boruya aksenal dinamik darbe kuvveti uygulayarak deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kompozit malzemenin çapındaki büyümenin maksimum enerji absorpsiyonu ve toplam enerji absorpsiyonu değerlerini arttırdığını, ağız kısmındaki eğimin artmasının ise enerji absorpsiyon değerlerini azalttığını gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra, çalışmalarında

sonlu elemanlar yöntemleri kullanarak, bilgisayar ortamında aynı şekillerde modelledikleri borulara kuvvet uyguladıklarında elde ettikleri sonuçlarla gerçek yapılan deneydeki sonuçlar karşılaştırıldığında, sonuçların birbirlerine benzedikleri ancak bilgisayar ortamında yapılan deneylerin sonuçlarının daha düşük değerlerde çıktığı belirlenmiştir.

Ataollahi ve ark. (2012), yaptıkları araştırmada doğal ipek-epoksi kare kompozit tüpler kullanmışlardır. Bu tüplerin mekanik kuvvet altındaki enerji absorpsiyonları ve hata davranışları incelenmiştir. Kullanılan numunelerin sarım sayıları aynı, uzunlukları farklıdır. Kompozit boruların üretiminde termoset reçine tercih edilmiştir. Araştırma sonucunda farklı uzunluklardaki kompozit tüplerin aksel statik basma kuvvetine karşı oluşturdukları hata modları incelenmiştir.

Kompozit malzemeler, elyaf ve matris bileşenlerinden meydana gelmiştir. Bu durum malzemenin hasar davranışını karmaşık hale getirmektedir. Mekanik kuvvet sonucunda kompozit malzeme farklı hasar oluşumları meydana gelmektedir. Bu hasar oluşumlarının meydana gelmesi, kompozit malzemenin sahip olduğu mekanik ve geometrik özelliklere bağlıdır. Bunun yanında kuvveti uygulayan geometrinin ve hızının da önemli bir yeri vardır (Karadayı, 2012).

Bambach ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada polimer matrisli karbon fiber takviyeli kare kesitli kompozit borular kullanmışlardır. Bu çalışmada, kullanılan kompozit boruların üretilmesinde elyaf malzemeleri aksel veya radyal olarak yönlendirilmiştir. Üretilmiş olan kare kesitli kompozit borular aksel darbeye maruz bırakılmıştır. Deneyin uygulanmasının ardından oluşan farklı hasar modlarını incelemişlerdir. Yapılan deney sonucunda kompozit borularda 2 farklı hasar modunu gözlemlemişlerdir. Bu hasar modları ilerlemeli hasar ve yıkımsal hasardır.

Guades ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada ise polimer matrisli fiber takviyeli kare kesitli kompozit borular kullanmış ve bu borulara 130 sefer tekrar eden darbe deneyleri uygulamışlardır. Deneyin uygulandığı borular 100 mm, kenar uzunluğa ve 5.25 mm kalınlığa sahiptir. Deney sonucunda kaçınıcı darbe sonrasında malzeme hangi hasar mekanizmaları oluştuğunu incelemişlerdir. Tüm numunelerde darbe sayısı arttıkça numunenin absorbe edebildiği enerji miktarının azaldığını gözlemişlerdir. Ayrıca tüm numunelerde ilerlemeli hasar modu oluşmuş ve matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında ayrılmalar oluşmuştur.

Karadayı (2012), yaptığı çalışmada farklı geometride, farklı hızlara sahip vurucunun, tabakalı kompozit malzemedeki etkilerini sonlu elemanlar metodu (SEM)

kullanılarak ANSYS LS-DYNA yazılımı ile ortaya koymuştur. Düşük hızlı darbe şartlarında tabakalı kompozit malzemenin, tabaka sayısının, tabaka kalınlığının, takviye açısının, E1/E2 oranının, sınır şartlarının ve yüzey alanının değişimi gibi durumlarda kompozit malzemenin mekanik davranışının nasıl değiştiğinin cevabı ortaya konulmuştur.

Liu ve ark. (2015), çalışmalarında polimer matrisli karbon elyaf takviyeli kompozitten çift katlı imal edilmiş tüplerin çarpışma karakteristiğini ve deney sonucunda oluşan hasarları incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada 3 farklı kalınlık ve uzunluğa sahip kompozit borular kullanılmıştır. Dinamik çarpışma testlerinden 3 belirgin hata modu gözlenmiştir. Bunlar; ilerlemeli hasar ve yıkımsal hasar türlerinden olan orta yüzey hasarı ve boyuna hasardır.

Aynı şekilde darbe hasarlı kompozit malzemelerde basma yüklerine maruz kalabilirler. Darbe sonrasında kompozit malzemelerin kalan mukavemetlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Hasarlı kompozit malzemelerin kullanılacağı veya kullanıldığı yerde taşıyacağı yükleri karşılaması noktasında bir öngörü sunulabilmesi için bir yaklaşım ortaya konmalıdır. Darbe hasarlı kompozit malzemelerin basma yükü altında davranışının belirlenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışmalar mevcuttur. Çalışmaların çoğunun kompozit plakaların darbe sonrası basma (CAI) çalışmaları üzerine olduğu görülmüştür.

Mahdi ve ark. (2003), farklı konfigürasyonlarda üretilen cam epoksi ve karbon epoksi hibrit kompozit boruların basma yükü altındaki hasar davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada darbe davranışında, enerji yutmada, hasar mekanizmalarında ve kompozit silindir modlarında hibritasyonun etkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Hasar modlarında hibritasyonun etkisinin son derece baskın olduğunu ve diğer test edilmiş silindirlerle karşılaştırıldığında cam-karbon-cam/epoksi malzeme sırasındaki (material sequence) yapının iyi enerji emme kabiliyetini ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak hibrid silindirlerin başlangıç çökme yükleri cam tabakasının değil karbon tabakanın sıralamasına bağlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Aktaş ve ark. (2009), çalışmalarında düşük hızlı darbe esnasındaki yüksek sıcaklıklar darbe sonrası (CAI) basma üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, oda sıcaklığında (20 °C) ve yüksek sıcaklıklarda (40 °C, 60 °C, 80 °C ve 100 °C) farklı darbe enerjilerine maruz bırakılan cam/epoksi kompozit plakalar üzerinde darbe sonrası basma (CAI) testleri gerçekleştirmişlerdir. CAI kuvveti ve CAI hasar mekanizması üzerindeki tabaka yönlendirme etkilerini araştırmak için $[0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}]$ ve

[0°/90°/45°/-45°] konfigürasyonlu test numunesi üretilmiştir. Oluşan hasarları düşey ve yatay olarak incelenmişlerdir. Sonuçlar, darbe test sıcaklığının kompozit plakaların CAI mukavemeti üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. CAI mukavemeti için uygun tabakalama, tüm çarpma test sıcaklığı için düşey darbe hasarına sahip [0°/90°/45°/-45°] sarım açılı plakaların olduğu test edilmiştir.

Andrew ve ark. (2015), yaptığı çalışmada, el yatırma yöntemi ile üretilen ve bir basınçlı kalıplama makinesinde kürlenmiş plakalardan elde edilen cam/epoksi kompozit numuneler, yama ile onarımın etkilerini araştırmak için düşük hızlı darbe hasarına maruz bırakılmıştır. Darbe sonrası onarılan plakaların kalan mukavemetleri, akustik emisyon izleme (AE) tekniği kullanılarak darbe sonrası basma (CAI) yüklenmesi araştırılmıştır. Yama ile onarılmış ve onarılmamış plakaların yapısal performansları karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Puhui ve ark. (2002) yaptıkları çalışma da, darbe hasar bölgesi eşdeğer bir delik olarak modellemişlerdir. Metodun en belirgin özelliği, darbe hasarının sadeleştirilmesinin, darbe görmüş laminatların basma hasar mekanizmalarına dayandırılmasıdır. Eşdeğer deliğin şeklini ve boyutunu belirlemek için bir teknik oluşturulduğu rapor edilmiştir. Yazarların bilgisine göre, bir delik olarak çarpma hasarını basitleştirmenin ilk pratik yöntemi ve şu andaki çalışma, darbe hasarını bir delik olarak modelleyerek CAI kuvvetini tahmin etmeye yönelik ilk girişimdir. Hasar etrafındaki gerilme dağılımı kompleks potansiyel yöntemi ve klasik laminasyon teorisi kullanılarak hesaplandığı görülmüştür. CAI mukavemetini tahmin etmek için, bağımsız bir hasar kriteri ölçüt kullanılmıştır.

Montaj ve servis esnasında hasarlanmış kompozit boruların kalan mukavemetlerinin belirlenmesi, bakım onarımının yapılması veya değiştirilmesi açısından önem arz etmektedir. Kompozit boruların darbe sonrası basma (CAI) mukavemetlerinin belirlenmesi noktasında çok az sayıda çalışma mevcuttur.

Deniz ve ark. (2012), deneysel çalışmalarında, deniz suyuna daldırılmış (± 55)₃ flaman sarım cam/epoksi CTP kompozit borularında boru çapının ve darbe enerji seviyesinin darbe ve basma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında 50, 75, 100 ve 150 mm olmak üzere dört farklı kompozit boru çapı seçilmiştir. Kompozit borular, oda sıcaklığında 15, 20 ve 25 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Hasarlı ve hasarsız numuneler eksenel basma testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar hem numune çapı hem de darbe enerjisinin, kompozit boruların basma mukavemetinde büyük ölçüde etkilediğini rapor etmişlerdir. Deniz ve ark. (2013) başka

bir çalışmalarında, deniz suyunun ve darbe yükünün, etkisinde bırakılan cam/epoksi kompozit boruların darbe davranışı ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Örnekler laboratuvar koşullarında 3, 6, 9 ve 12 ay boyunca yapay deniz suyuna daldırılmıştır. İlk olarak, kompozit borular üzerinde darbe testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve sonra eksenel sıkıştırma testleri yapıldı. Suya batırılmış numunelerin sonuçları, referans numunelerin sonuçlarıyla (kuru) karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, 54, 72 ve 96 mm iç çaplara sahip $(\pm 55)_3$ konfigurasyonunda kompozit borular üretilmiştir. Üretilen CTP kompozit borulara 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s temas hızlarında düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Darbe deneyleri sonucunda Kuvvet-Zaman, Kuvvet-Deplasman ve Enerji-Zaman grafikleri çıkartılmış ve her bir boru için ayrı ayrı yorumlanmıştır. Düşük hızlı darbe hasarının daha iyi anlaşılması için 72 mm çapında kompozit boruya makro ve mikro hasar analizi yapılmıştır. Her bir hızda darbe hasarı oluşturulan CTP borular darbe sonrası basma (CAI) testine tabi tutulmuş ve hasarlar gözlemlenerek yorumlanmıştır. Kompozit boruların düşük hızlı darbe ve darbe sonrası basma cevabı darbe hızı ve CTP boru çapı dikkate alınarak incelenmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

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

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

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

3.2. Matris Malzemeleri

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

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

Kompozitlerde metal, seramik ve plastik esaslı matrisler kullanılmaktadır. Plastik esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler şeklinde ikiye ayrılır.

3.2.1. Termoset matrisler

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

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

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

3.3. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye malzemeleri elyaflardır. Elyaf lar uzunluğu çaplarına göre çok büyük olan malzemelerdir. Kompozit malzemelerdeki elyafların en önemli fonksiyonu yükü taşımasıdır. Elyaf lar, kompozit malzemeye dayanım sağlarken rijitlik de sağlar. Kompozit malzemedeki sürekli elyaflara filaman, metalik filamanlara ise tel adı verilir. Eğer elyafların şekli dikdörtgen

prizması şeklinde ise yani kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgen kenarlarından biri diğerinin dört katından fazla olursa bu tür elyaflara şerit adı verilir.

3.3.1. Cam elyaflar

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

Cam elyaflar reçine ile birleşerek uygun bir malzeme ortaya çıkar. Elyaflar ile matris malzeme arasındaki bağların yetersiz olması iç yüzey hatalarını oluşturabilir. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmamaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matris, kompozit malzemenin rijitliğini ve mukavemet performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için, elyaf kimyasallarla kaplanır. Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar, E, C, D ve S camı olarak adlandırılırlar. Çizelge 3.1’de E camı ile karbon elyaflarının özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. E cam elyafın özellikleri
(Cam Elyaf San. A.Ş. 2011)

Özellikler	E camı
Yoğunluk, ρ (g/cm ³)	2,6
Elastiklik modülü, E (GPa)	73
Çekme dayanımı, σ (GPa)	2,4
Çekme uzaması, (%)	4
Özgül modül, E/ ρ (MN/m)	28
Özgül dayanım, σ/ρ (MN/m/kg)	0,93

3.4. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit malzeme şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozit malzemeler denir. Ayrıca; tabakalar halinde bulunması her tabakanın ayrı bir kompozit olmasına izin vermektedir. Tabakalı kompozitlerin tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrolü diğer kompozitlerden daha kolay olmaktadır. Bu

kompozitlerde özel gereksinimleri karşılamak amacıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlara sandviç malzeme de denir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, rijitliği, aşınma direnci, ısı yalıtım özellikleri iyileştirilebilir.

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

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

Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden (hibrid) veya tek bir türden malzeme kullanılabilir. Tabakalı kompozitleri, üretimde kullanılan malzemelerin türlerinden hareketle, farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler ve tek tür malzemelerden oluşan tabakalı kompozit malzemeler, şeklinde iki grupta toplamak mümkündür.

3.4.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler

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

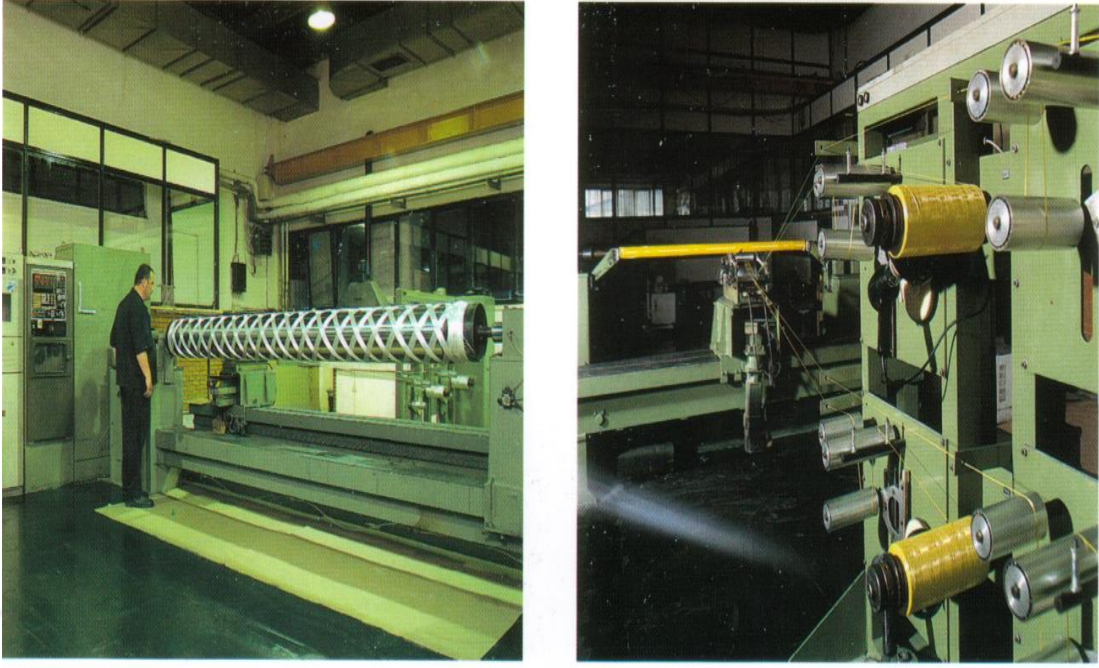
3.5. Kompozit Üretimi

Kompozit parçaların üretim yöntemi, malzeme bileşenlerinin özelliklerine, üretilen ürünlerin biçimlerine, ürünün boyutlarına, mühendislik detaylarına, son kullanımlarına bağlı olarak seçilir. Kompozit ürünlerin motor supabı, baskılı devre kart, tekne gövdesi, uçak kanadı gibi pek çok uygulama alanı vardır. Üretim yöntemi bir üründen diğerine değişiklik gösterir. Üretimde kullanılacak matris tipleri, üretim

prosesinin seçiminde önemli etkidir. Fiber takviyeli plastikler ve metal matris kompozitler ile yapılan bir motor pervane kanadını üretmek için farklı yöntemler kullanılır. Aynı matris malzeme kullanıldığında bile proses parametreleri değişebilir (Sinha, 2006).

3.5.1. Filaman sarım yöntemi

Filaman sargı tekniği, sürekli takviye elemanlarının dönel bir mandrel (kalıp) üzerini sarılması ile kompozit parça üretiminin gerçekleştirildiği, kompozit üretim teknikleri içinde nispeten basit sayılabilecek bir üretim yöntemidir. Tasarımları özel olarak yapılmış sargı makineleriyle kafa ve mandrel dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Şekil 3.1'de filaman sarım prosesi görülmektedir. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan desenlerin bütün mandreli kaplaması şeklinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açıları mandrel boyuna doğru 25° gibi düşük açılardan mandrel eksenine yaklaşık 88° - 89° lik açığa kadar değişebilir. Genellikle elyaflar arasındaki yapıştırıcı reçine olarak termoset reçine malzemesi kullanılır. Yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda, reçine sarım esnasında uygulanır. Alternatif metot olan kuru sarımda ise, önceden reçine emdirilmiş, *prepreg* elyaf/reçine sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanır. Üretim prosesi, mandrelin çıkarılmasıyla tamamlanır. Gerekli durumlarda parça üzerinde talaşlı imalat teknikleri uygulanabilir. Üretim prosesinin parça tipine, tasarım özelliklerine, malzeme kombinasyonlarına ve cihazlara bağlı olarak birçok çeşidi vardır. Filaman sargı tekniği ile üretilen yapılar genel olarak dönme yüzeyleri şeklindedir, bazı özel durumlarda bir takım sınırlamalarla asimetric şekiller de üretilebilir. Ürünler, birkaç santimetreden metre boyutuna kadar değişebilen silindirik, borular ve tüpler olabilir. Küresel yâda konik şekiller özel uygulamalarla üretilebilir. Basınçlı tanklar ve depolama tankları da bu tekniğin yaygın uygulamalarındandır. Yapılar, kullanılacakları alanlara ve maruz kalacakları yüklerle göre özel olarak tasarlanır. Ayrıca gerekli hallerde kombinasyonlu üretimler de yapılabilir, bunlara örnek olarak termoplastik boru üzerine sarım, ince metal basınçlı kap üzerine sarım verilebilir.



Şekil 3.1 CNC helisel filaman sargı makinesi (Gemi, 2004)

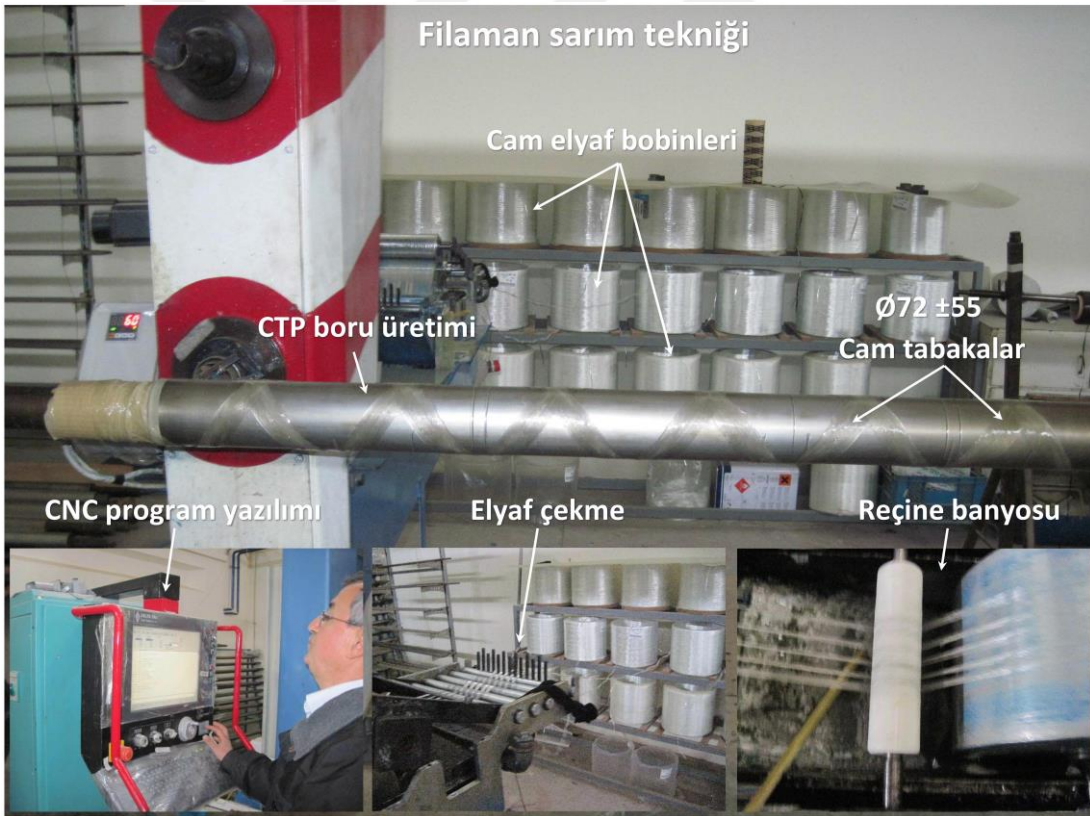
Filaman sarım tekniğinde hemen her tip sürekli elyaf kullanılabilmesine rağmen filaman sarım metodu, esas olarak bir cam elyafı sarım metodudur. Grafit, aramit ve Kevlar49 gibi elyaflar, yüksek özgül dayanım ve elastiklik modülü gerektiren havacılık ve uzay alanlarında kullanılmaktadır. Bu teknikte kullanılan başlıca reçine malzemeleri ise epoksi, polyester ve vinilester olarak özetlenebilir. Filaman sargı makinelerinin tamamen bilgisayar kontrollü üç veya dört eksenli olan kadar birçok çeşitleri vardır.

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

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi

Cam elyaf/epoksi CTP boruların hazırlanmasında, elyaf malzemesi olarak Cam Elyaf San. A.Ş. 1200 teks (17 μm çapında) E camı, matris malzemesi olarak da Momentive, Bisphenol A, Epikote 828 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhydride) kullanılmıştır. Üretim Şekil 4.1’de verilen filaman sarım yöntemi ile yaş sarım metodu kullanılarak yapılmıştır. Elyaf lar bobinlerden çekilerek silindirler üzerinden geçirilerek belli bir gerginlikte bir reçine banyosuna daldırılmıştır. Reçinenin viskozitesini düşürmek ve ıslatılabilirliği artırmak için malafa sarım öncesi kür fırınında 150 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Reçine banyosunda reçine karışımının sıcaklığı 60 °C de kontrol altında tutulmuştur. Mandrellerin üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülmüştür.



Şekil 4.1. Filaman sarım cam/epoksi CTP boruların üretimi

Üretimi tamamlanan CTP borular malafa ile döner bir kürlenme fırınına konulmuştur. Kür işlemini ise 2 saat 135 °C ve 2 saat 150 °C de yapılmıştır. Kullanılan malafa çapları 54, 72 ve 96 mm dir. Sarım işlemini sonunda 1 m uzunluğunda, ortalama

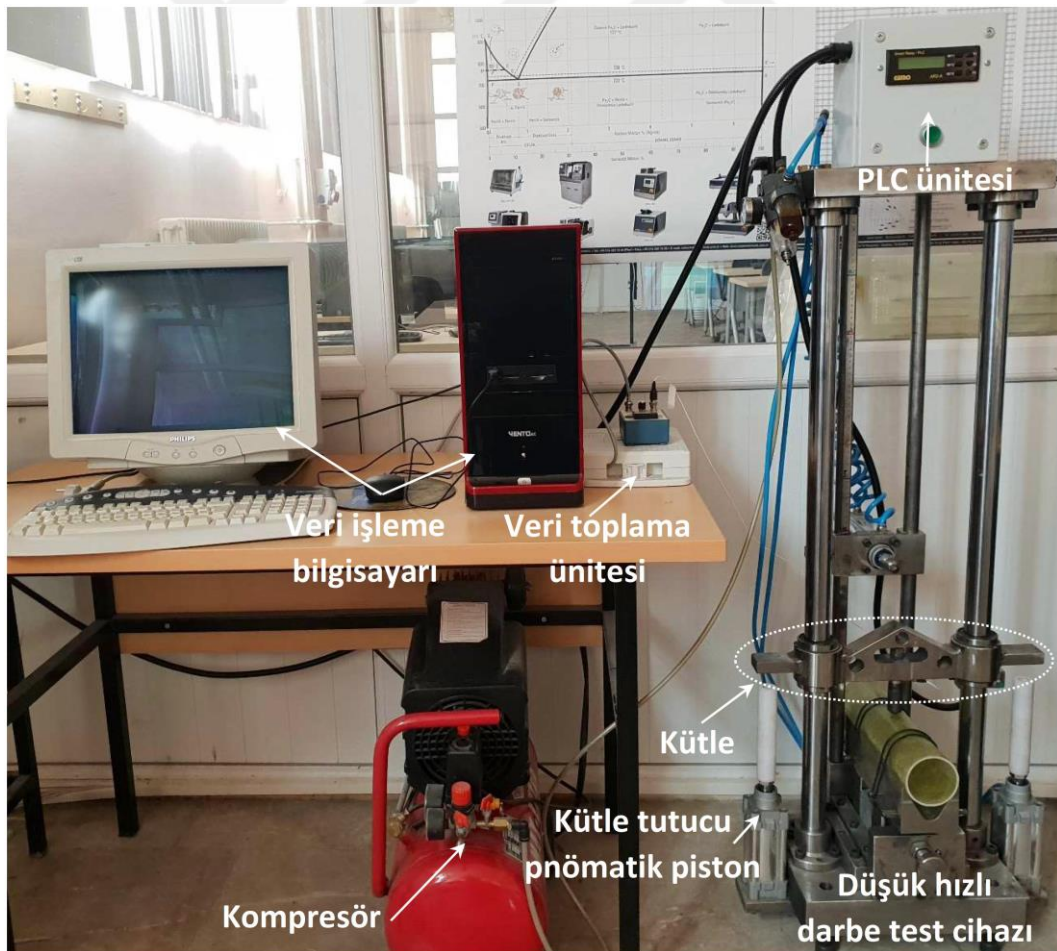
58.8, 76.8 ve 100.8 mm çaplarında 6 tabakalı borular elde edilmiştir. Üretilen borular deneysel çalışmalar için 155 mm boyunda kesilmiştir. CTP boruların üretimi ve fırında sertleştirme işlemleri için, İzmir İzoreel Komp. Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. imkanlarından yararlanılarak yapılmıştır. Üretimde kullanılan elyafın ve matrisin özellikleri Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kullanılan elyafın ve matrisin özellikleri

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

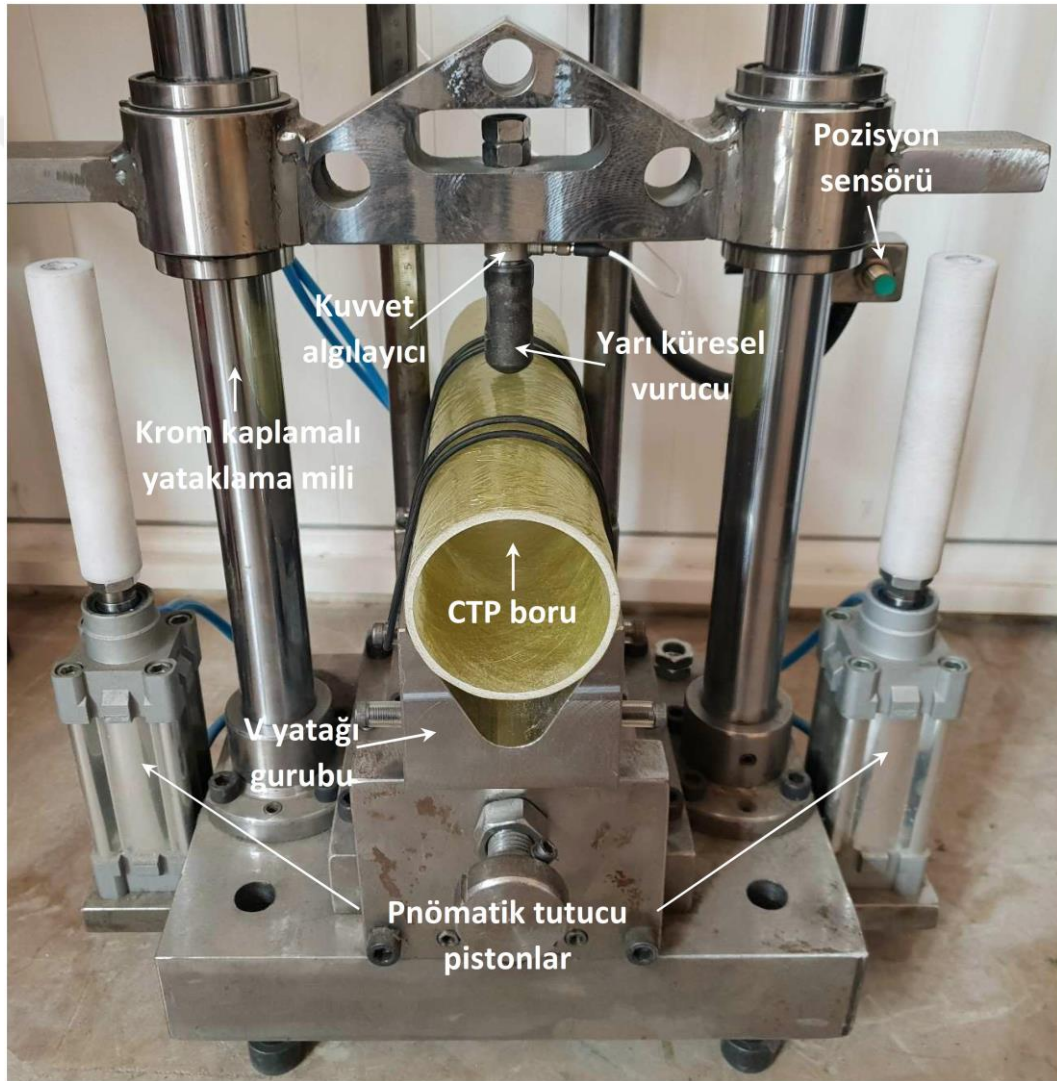
4.2. CTP Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

CTP kompozit boru numunelerin düşük hızlı darbe cevaplarının araştırılması için özel olarak imal edilmiş düşük hızlı darbe cihazı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe test cihazı Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. Düşük hızlı darbe test cihazı ve veri toplama ünitesi

Deneylerde kullanılan cihaz ile değişik darbe enerji seviyelerinde ve değişik darbe hızlarında darbe deneyleri yapılabilmektedir. Darbe esnasında cihazdan gelen bütün veriler bilgisayar ortamında kayıt altına alınabilmektedir. Deneylerde kullanılan cihaz üç ana elemandan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi karşılıklı iki krom kaplı mil üzerinde düşey hareket eden vurucu kütesinin ve kuvvet algılayıcının bağlı olduğu lineer ring yatak sistemidir. İkincisi ise Şekil 4.3’de verilen kompozit boru numunelerinin yataklanması için kullanılan V yatağı ve pnömatrik tutucu piston grubudur. Son eleman ise elektronik kontrol ünitesidir.



Şekil 4.3. Düşük hızlı darbe test cihazı ve veri toplama ünitesi

Düşük hızlı darbe deneylerinde vurucu kütesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlamak amacıyla ring yataklamalı krom kaplı miller kullanılmıştır. Çelik miller üzerinde hareket eden karşılıklı iki lineer rulmanlı yatak Şekil 4.3’te de

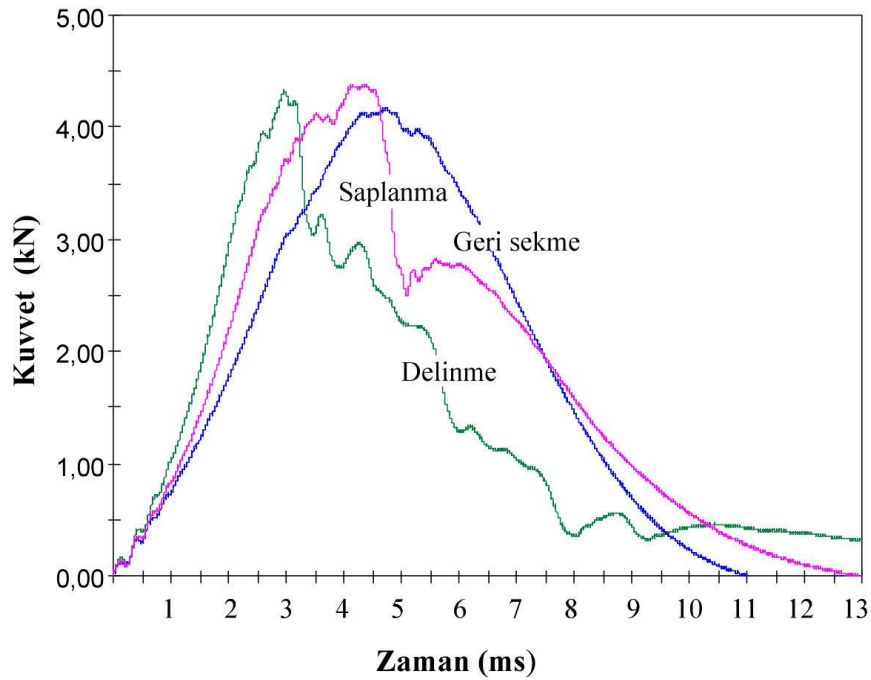
görüldüğü gibi vurucu kütesinin her iki kenarına bağlanarak monte edilmiştir. Vurucunun kütlesi, bağlı olduğu lineer yatak ve bağlama elemanlarıyla birlikte 6,6 kg dır. Vurucu 24 mm çapında yarı küresel uçlu bir geometriye sahiptir.

4.3. CTP Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

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

4.3.1. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri

Şekil 4.4'de numune yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel duruma ait kuvvet-zaman (F-t) grafiği görülmektedir.

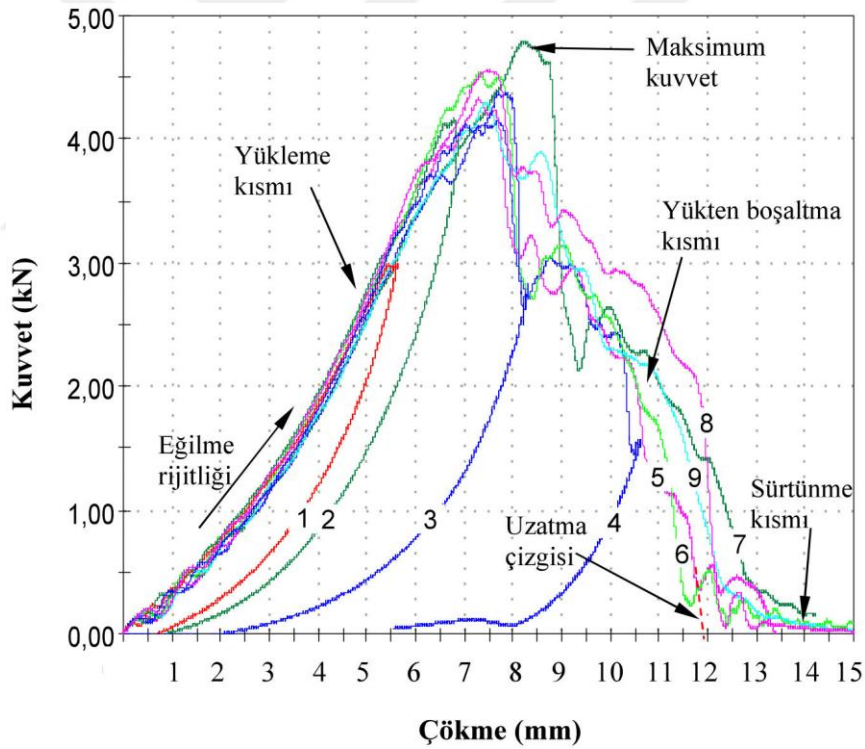


Şekil 4.4. Tipik kuvvet-zaman ($F-t$) eğrileri (Sayer 2009)

Şekilde görüldüğü gibi düşük enerjili darbelerde (örneğin geri sekme eğrisi gibi), eğri parabolik bir eğridir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmakta ve saplanma ve delinme eğrilerinde de görüldüğü gibi maksimum kuvvet değeri de hemen hemen sabit bir değer olmaktadır. Numunede delinme meydana geldiğinde kuvvetin sıfır olması gerekir ama şekilden de görüleceği üzere vurucu ve numune arasında sürtünme meydana geldiğinden eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel ilerlemiştir (Sayer 2009).

4.3.2. Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri

Kuvvet-çökme (yer değiştirme) (F-d) eğrileri darbe olayı esnasında kompozit malzemeye ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir. Şekil 4.5’de artan darbe enerjisi altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini gösteren bir F-d grafiği görülmektedir.



Şekil 4.5. Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik kuvvet-çökme (F-d) eğrileri (Sayer 2009)

Her bir eğri yüklemeye bir artma kısmına, ulaşılan bir maksimum kuvvet değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Kuvvet-çökme eğrisinde artma kısmı darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı *eğilme rijitliği* olarak adlandırılır. Artan darbe enerjisi altında oluşan bu eğriler kapalı tip ve

açık tip eğri olarak iki kısma ayrılır. Kapalı tip eğri vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından yutulmuş ve yutulamayan enerji de vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır. Buna göre şekilden de görüleceği üzere ilk üç numune için oluşan eğriler kapalı tip eğrilerdir. Darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve çökme de artar. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi numune 4, kapalı tip bir eğri olmasına rağmen kapalı tip eğriden açık tip eğriye geçiş noktasında bulunmaktadır ve darbe enerjisinin daha da arttırılmasıyla eğri tipi kapalı tipten açık tip eğriye dönüşür. Eğer bir eğri açık tip ise ya vurucu numuneye saplanmıştır ya da numune delinmiştir. Buna göre numuneye saplanan vurucu numune kalınlığı boyunca aşağı doğru hareket eder ve artık numune yüzeyinden geri sekme meydana gelmez. Dolayısıyla, şekilden de görüldüğü gibi numune 5 te ya saplanma ya da delinme meydana gelmiştir.

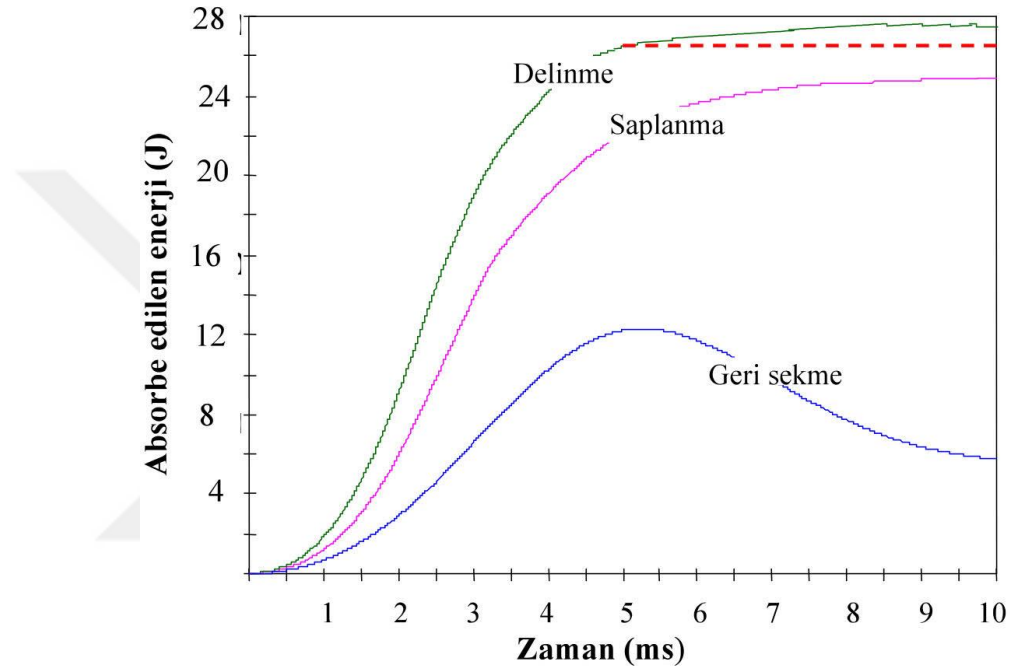
Darbe enerjisi daha da arttırıldığında vurucu numuneye saplanır, numune kalınlığı boyunca hareket eder ve sonunda da numuneyi delerek alt yüzeyden çıkar yani delinme olayı gerçekleşmiş olur. Şekil 4.5’de verilen kuvvet-çökme eğrisinde numune 6, 7, 8 ve 9, vurucu tarafından delinmiş numunelerdir. Eğrilerin uç kısımlarında yatay eksenin sonuna doğru kapanan kısım numune ve vurucu arasında sadece sürtünme meydana gelmesinden dolayı oluşan sürtünme kısmını ifade etmektedir. Dolayısıyla ulaşılan bu darbe enerjisinden sonra darbe enerjisi ne kadar arttırılırsa arttırılsın kompozitin daha fazla darbe enerjisini yutamayacağı anlaşılmaktadır (Sayer 2009).

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

Şekil 4.6’da numune yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel duruma ait absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) grafiği görülmektedir.

Absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme ($F-d$) eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilemez ve absorbe edilemeyen darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise vurucunun sahip olduğu darbe enerjisinin hepsi numune tarafından absorbe edilir ve eğrinin son kısmı şekilden de görüldüğü üzere hemen hemen yatay olarak devam eder.

Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanın da darbe cihazının programı tarafından hesaplanan absorbe edilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarı doğru yönlendiği Şekil 4.6'da görülmektedir. Bu sürtünme kısmının altında kalan alanın toplam absorbe edilen enerji miktarından çıkarılması gerekir. Buna göre, numune tarafından absorbe edilen enerji değeri ise şekilde görülen kesikli çizginin yaklaşık olarak denk geldiği enerji değeridir.



Şekil 4.6. Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik enerji-zaman (E_a-t) eğrileri (Sayer 2009)

Kompozitlerin darbe davranışlarının belirlenmesinde darbe enerjisi (E_i) ve absorbe edilen enerji (E_a) iki önemli parametredir. Darbe enerjisi (E_i), darbe olayı esnasında vurucunun sahip olduğu enerjinin numuneye aktarılması olarak tanımlanabilir. Bu darbe enerjisi vurucuya, vurucunun darbe test cihazında istenilen yüksekliğe çıkarılmasıyla potansiyel enerji olarak kazandırılmasıdır ve Denklem (4.1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$E_i = mgh + mgd_{max} \quad (4.1)$$

Burada m vurucu kütlesi, h vurucunun darbe test cihazında bulunduğu yükseklik ve d_{max} ise darbeden sonra numunenin maksimum çökmesidir. Darbe olayı esnasında vurucunun sahip olduğu bu darbe enerjisi, vurucunun serbest bırakılarak düşürülmesiyle

kinetik enerjiye dönüşür ve bu denklem, aşağıda verilen Denklem (4.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$mgh + mgd_{\max} = \frac{1}{2}mV^2 \quad (4.2)$$

Burada V vurucunun sahip olduğu hızdır. Vurucu ile numunenin temasından önce numunedeki çökme sıfır olduğundan ($d_{\max}=0$), Denklem (4.2) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2 \quad (4.3)$$

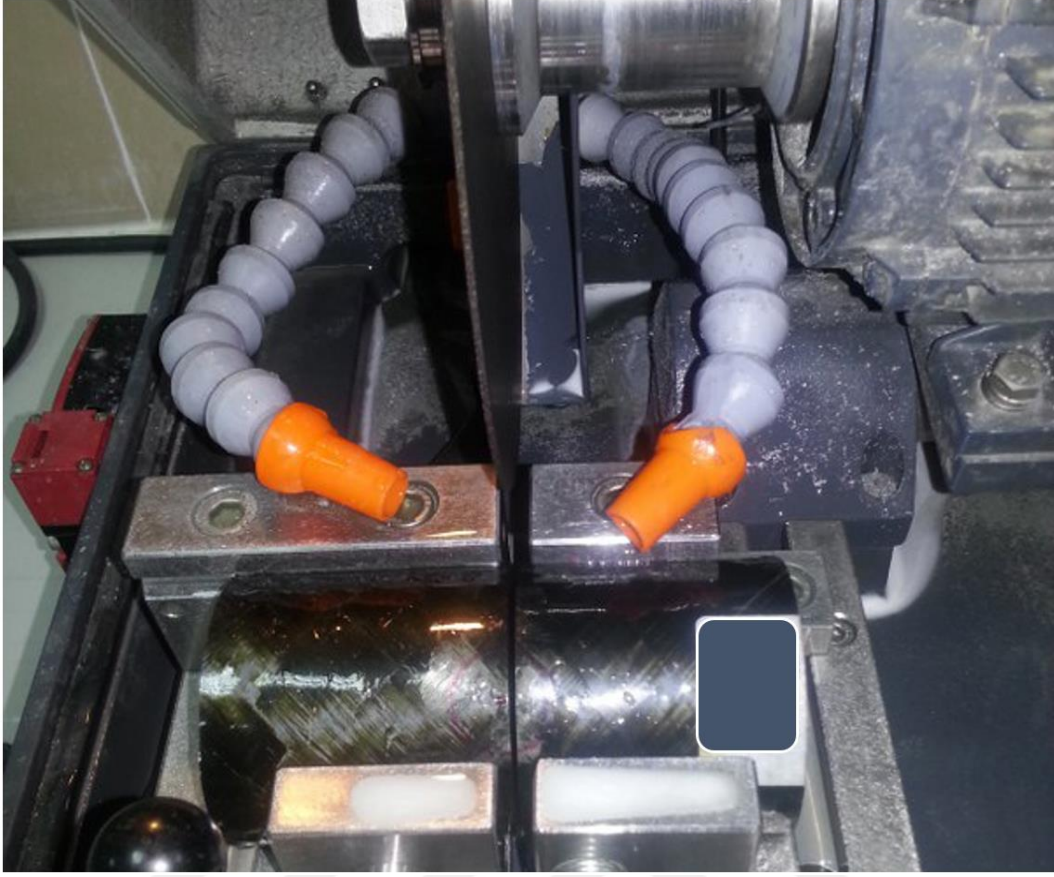
Denklem (4.3)'e göre vurucu ile numunenin temasından hemen önceki hızı da Denklem (4.4)'deki gibi ifade edebiliriz.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'de ifade edilen bu hız ifadesi vurucunun numuneye çarpma anındaki sahip olmuş olduğu teorik hızdır. Deneysel esnasında numuneye, vurucunun çarpma hızı hız detektörü tarafından ölçülmektedir (Sayer 2009).

4.4. Darbe Sonrası Mikro Hasarlarının İncelenmesi

Deneysel kullanımları numunelerin mikro hasar incelemesinden önce makro hasar incelemesi yapılmıştır. Darbe ve darbe sonrası basma (CAI) deneylerinden sonra gözle görülebilen makro hasarların oluşumu deney anında kayda alınıp ve deneylerden sonra yorumlanmıştır. Makro hasar incelemesi için CTP boru numunelerinin dış görünüş genel fotoğraflaması yapıldıktan sonra hasar bölgeleri boru numunelerinden kesilerek alınmıştır. CTP boru numunelerinin iç kısmında oluşan hasar bölgeleri de fotoğraflanmıştır. Makro hasarları incelenen numunelerin mikro hasar incelemeleri için hasar bölgeleri radyal ve aksel yönlere kesilmiştir. Oluşan hasarların belirginleşmesi için numuneler küçük bir mendeneye bağlanıp ve delaminasyon hasarları belirgin olarak görüntülenerek hasar bölgeleri makro ve mikro incelemeye hazır hale getirilmiştir. Kesme işlemi Şekil 4.7'de görülen METKON marka kesme cihazı ile uygun kesme takımı kullanılarak yapılmıştır. Darbe hasarlı numunelerde kesme işlemi darbe hasarının etkisini inceleyebilmek için darbe noktalarından yapılmıştır.



Şekil 4.7. Numunelerin kesme işleminde kullanılan METKON marka kesme cihazı

Numunelerin hasar yüzeyi Şekil 4.8a'da görülen METKON marka zımparalanma cihazında farklı zımparalama işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminde aşamalı olarak 400, 800, 1200 ve 2000 numaralı zımparalar kullanılmıştır.



(a)



(b)

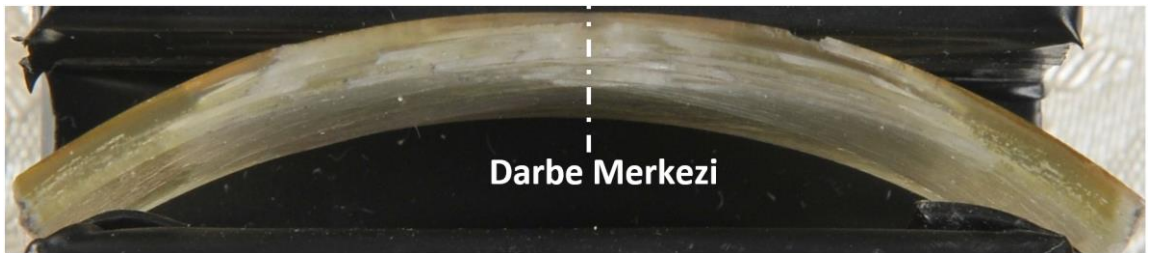
Şekil 4.8. Mikro yapının hazırlanmasında ve incelenmesinde kullanılan a) METKON marka zımparalanma ve parlatılma cihazı b) numune tutucu ve gerdirici mengine

Zımparalama işleminden sonra hasar yüzeylerine aynı cihazda parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan numuneler yıkandıktan sonra hasar bölgesinde bulunan zımpara ve su kalıntıları kuru hava ile temizlenmiştir. Temizlenen numuneler mikroskopta incelemek üzere Şekil 4.8b’de görülen numune tutucu ve gerdirici mengeneye bağlanmıştır. Numunede oluşan tabakalar arası ve tabaka içi hasarın daha net görüntülenebilmesi için ilave bir hasar oluşturmayacak şekilde hasarlı numuneler mengene ile sıkıştırılarak gerdirilmiştir. Numunelerin mikro hasar incelemesi için Şekil 4.9’da görülen KOZO marka USB mikroskop kameralar kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Mikro hasarın incelenmesinde kullanılan KOZO marka USB mikroskop kameralar

Mikro hasar incelemelerinde mevcut mikroskopla numune kesitinde oluşan hasar bölgesi darbe merkezlerinden görüntülenmiştir. Bu şekilde görüntüleme şekli ile tabaka ayrılmaları, dış yüzey ve iç yüzey matris çatlakları, radyal çatlaklar vb. hasarlar daha net incelenmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Mikro hasarın incelenmesinde görüntüleme şekilleri

4.5. Darbe Sonrası Basma Deneyi (CAI)

Darbe hasarlı boruların basma deneyleri için her üç boruya özel altlı-üstlü basma flanşları üretilmiştir. CTP kompozit boruların basma esnasında darbe hasarının etkilerinin incelenebilmesi için flanşlara boru uçlarının iç ve dış çaplarını içine alacak şekilde kanallar açılmıştır. ASTM D 7137 standardına uygun üretilen flanşlar sayesinde kompozit borularda oluşacak kenar etkileri bertaraf edilmiş oldu. Basma deneyleri için NEÜ makine mühendisliği laboratuvarından yararlanılmıştır. Basma deneyleri için Şekil 4.11’de görülen 100 kN kapasiteli SHIMADZU universal çekme test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.11. Basma deneylerinde kullanılan çekme test cihazı

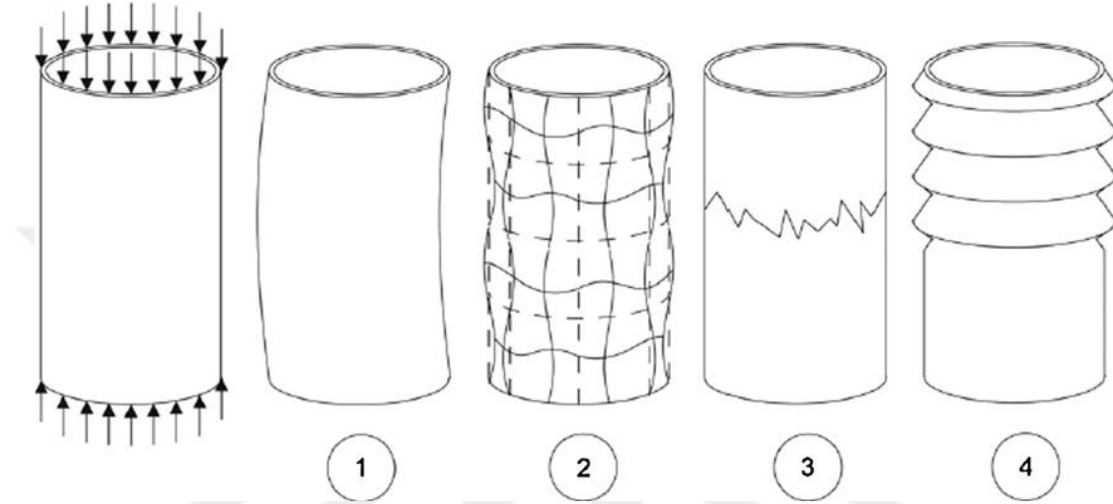
Deneylere başlamadan önce Şekil 4.12’de görüldüğü gibi bütün numunelerin flanşlara alıştırması yapılmıştır. Bütün deneylerde yükleme hız 2 mm/dak olarak alınmıştır. Deneylerde yükleme işleminden başlamak üzere deney sonlanmasına kadar her bir numune video kayıt altına alınmıştır. Basma esnasında darbe hasarlı ve hasarsız numunelerde oluşan hasarlar belirlenerek hasar modları tanımlanmıştır. Deneylerden sonra numunelerde oluşan hasarların daha net gözlenebilmesi ve yorumlanabilmesi için numuneler temizlenerek yeniden isimlendirilmiştir. Numunede oluşan hasarların karşılaştırılabilmesi için her üç çapta numuneler toplu olarak stüdyo ortamında dış yüzey ve iç yüzey hasar fotoğrafları alınmıştır.



Şekil 4.12. Basma deneyleri için hazırlanmış hasarsız ve 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda darbe ön hasarlı numunelerin flanşlı genel görünüşü

4.6. Eksenel Basma Sonucu Oluşan Hasar Modları

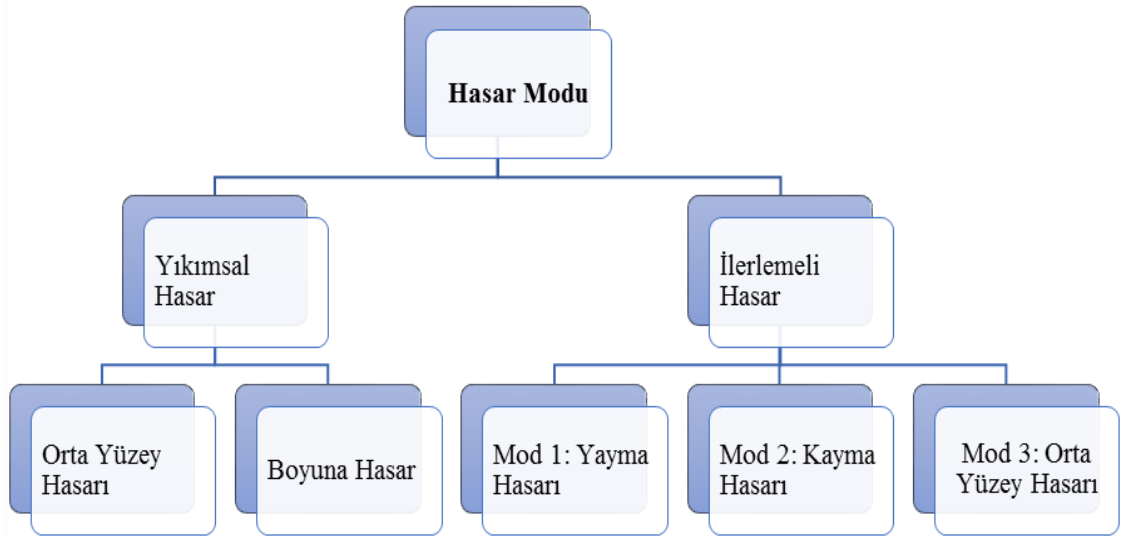
Kompozit malzemelerde eksenel basınç sonucu 4 farklı kırılma mekanizması oluşmaktadır. Bunlar genel burkulma, bölgesel burkulma, kırılma (çatlama) ve ilerleyen kırılmadır (Lau ve ark. 2012). Kompozit malzemelerde oluşan kırılma mekanizmaları Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Kompozit malzemelerdeki kırılma mekanizmaları 1) genel burkulma 2) bölgesel burkulma 3) kırılma 4) ilerleyen kırılma (Lau ve ark., 2012)

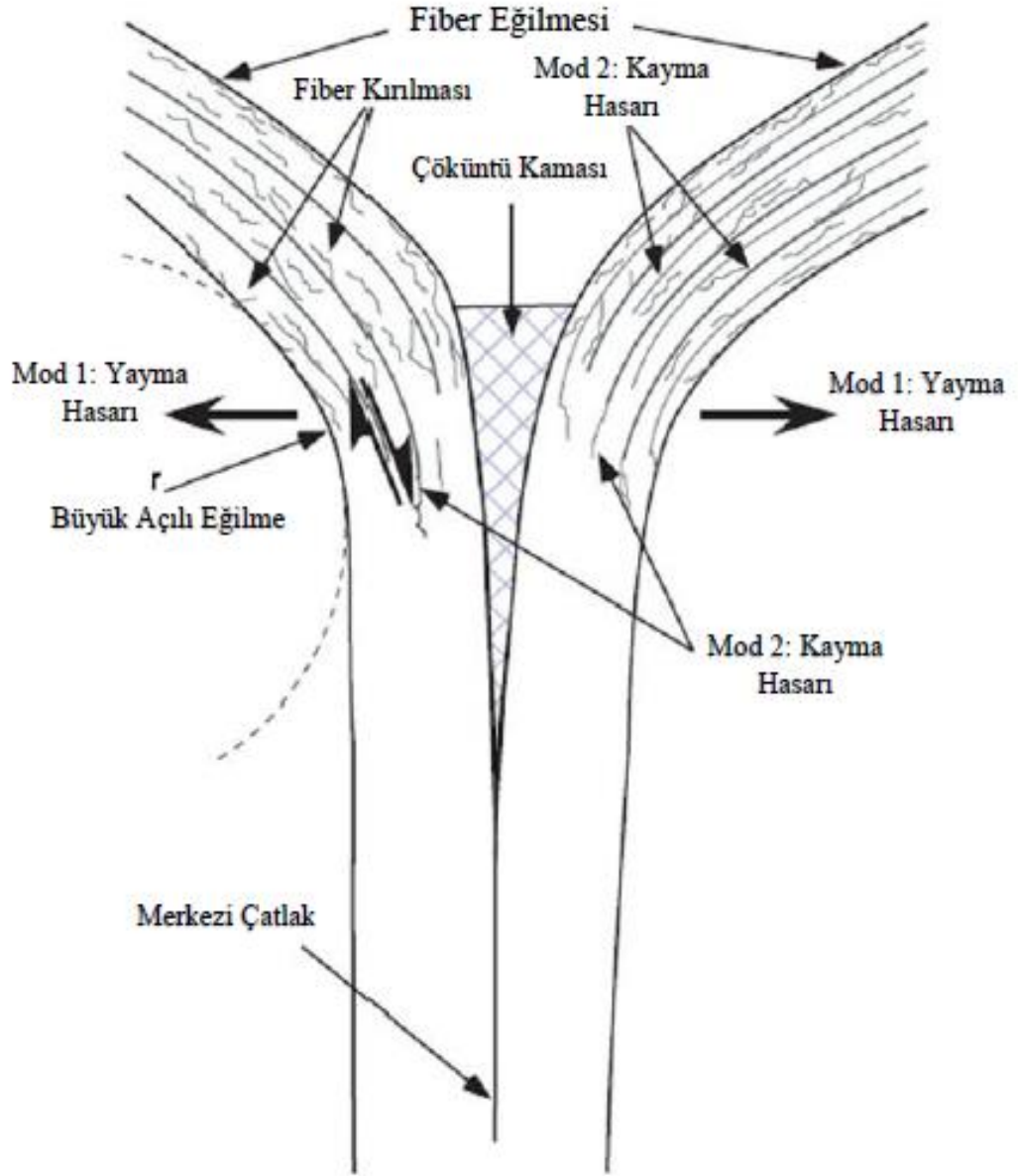
Bu kırılma türleri cam elyaf kompozit malzemelerde temel olarak iki farklı hasar modu oluşturmaktadır. Bunlar; yıkımsal (catastrophic) hasar ve ilerlemeli (progressive) hasardır. Yıkımsal hasar modu kendi içerisinde 2 farklı moda ayrılmaktadır. Bunlar; orta yüzey çatlakları ve boyuna çatlaklardır. İlerlemeli hasar modu ise 3 farklı moda ayrılmaktadır. Bunlar ise yama, kayma ve orta yüzey çatlağıdır. Yıkımsal hasarlar matris ve takviye elemanı boyunca oluşmaktadır. İlerlemeli hasar ise matristeki kırılmalardan ve tabakalar arasındaki ayrılmalar sonucu oluşmaktadır. Hasar modlarını Şekil 4.14’deki gibi sınıflandırılabilir.

Hasar modlarının oluşumunda kompozit malzemenin; matris malzemesinin, takviye elemanının, elyaf örgü açılarının ve numune geometrisinin önemli rolü vardır. Yıkımsal hasar ve ilerlemeli hasar birbirine zıt durumlardır. Yıkımsal hasar genel burkulma sonucu oluşmaktadır. Yıkımsal hasarda oluşan orta yüzey çatlakları ve boyuna çatlama kuvvet en yüksek seviyede hasar oluşmaktadır. Ancak bu ani kırılma sonucu malzeme daha fazla kuvveti taşıyabilir. Bu yüzden absorbe edeceği enerji miktarı da düşük olmaktadır (Cerit 2011; Lau ve ark. 2012).



Şekil 4.14. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları (Cerit 2011; Lau ve ark. 2012)

İlerlemeli hasar ise bölgesel burkulmalar sonucu oluşmaktadır. Oluşan bu burkulmalar sonucu ortaya çıkan hasarlar 3 şekilde meydana gelmektedir. Bunlardan silindirik veya kare profil kompozitlerde oluşan hasar modları, Mod-1 (yayma) ve Mod-2 (kayma) hasarlarıdır. Mod-3 (orta yüzey) hasarı ise eliptiklik oranı 2,0 olan eliptik geometrideki parçalarda oluşmaktadır (Mahdi ve ark., 2005). Mod-1 hasarı, kuvvet uygulanan kompozit profilin matris ve takviye fazının ana çatlaktan kırılarak iki yana doğru yayılmasını ifade etmektedir. Mod-2 ise takviye malzemesinin tabakalarının arasındaki kaymadan dolayı meydana gelmektedir. Mod-1 ve Mod-2 hasarında oluşan enerji absorpsiyonu Mod-3 hasarında oluşan enerji absorpsiyonundan daha fazla olmaktadır (Cerit 2011; Lau ve ark. 2012). Bunun nedeni bölgesel burkulma sonucu oluşan yayma ve kayma hasarının matris ve takviye elemanında yavaş bir kırılma oluşturmasıdır. Böylece enerji absorpsiyonu parça boyunca devam edebilir. Silindirik veya kare profillerde oluşan ilerlemeli hasar modları Şekil 4.15’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Hasar modlarının şematik görünümü (Lau ve ark. 2012)

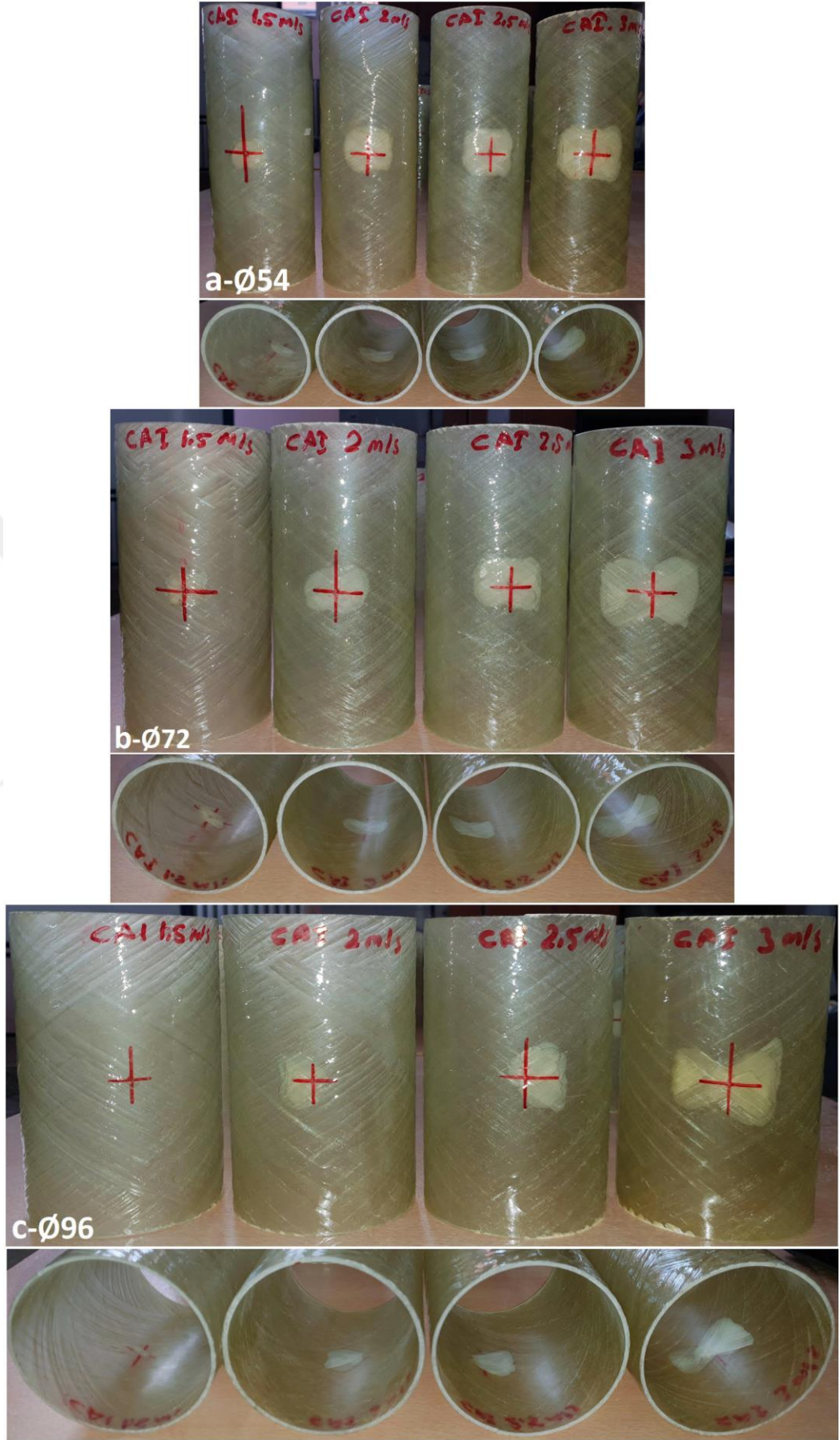
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. CTP Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

CTP boruların düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesi amacıyla darbe deneyi ile ilgili çalışmalar Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır.

Darbe enerji değerlerini elde edebilmek için vurucu kütlelerinin bırakılacağı yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. 24 mm çapında yarı küresel çelik vurucu; 1.5 m/s hız ve 6.3 J enerji seviyesi için 0.115 m yükseklikten, 2 m/s hız ve 11.2 J enerji seviyesi için 0.204 m yükseklikten düşürülmüştür. 2.5 m/s hız ve 17.5 J enerji seviyesi için 0.319 m yükseklikten, 3 m/s hız ve 25.2 J enerji seviyesi için 0.459 m yükseklikten düşürülmüştür. 60° açılı V yatağı üzerine yerleştirilen numunelere yarı küresel çelik uçlu vurucu ile her bir hız için darbe yapılmıştır. Darbe enerjisiyle, darbe sonrası numunede oluşan hasar mekanizmalarının ilişkilendirilebilmesi için ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütlesi pnömatik pistonlarla tutularak tekrarlı darbeler engellenmiştir. Darbenin başlangıcından sonuna kadar kuvvet değişim verileri kuvvet algılayıcı tarafından elektronik aksama iletilmiştir. Bu veriler Signal Express yazılımı ile elde edilen, kuvvetin zamana göre değişim grafiğinde gösterilmiştir. Temas kuvveti- yer değiştirme (çökme), ve hız-zaman değişimleri düşük hızlı darbenin kinetik analizi neticesinde elde edilmiştir.

Farklı geometrilerdeki boruların düşük hızlı darbe sonrası oluşan hasarların incelenmesi ve bu hasarların kompozit borunun mukavemet kayıplarına etkisinin araştırılması için $(\pm 55^\circ)_3$ konfigürasyonuna sahip üç farklı çapta ($\emptyset 54$, $\emptyset 72$ ve $\emptyset 96$) kompozit boru üretilmiştir. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla, yukarıda belirtilen çaplardaki borular üzerine ASTM D 7136 standardına göre, 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarında darbe uygulanmış ve ön hasar oluşturulmuştur. Düşük hızlı darbe testleri 5 tekrarlı olarak yapılmıştır. Darbe hasarlı borular Şekil 5.1’de toplu olarak verilmiştir. Düşük hızlı darbe sırasında Kuvvet-Zaman, Kuvvet-Deplasman ve Enerji-Zaman grafikleri çıkarılarak boruların dinamik davranışları incelenmiştir. Deney sonrasında tepe kuvvet, toplam süre, tepe deplasman, toplam impuls ve absorbe edilen enerji verileri hesaplanmış ve elde edilen veriler Çizelge 5.1’de toplu olarak verilmiştir. Kuvvet-Zaman, Kuvvet-Deplasman ve Enerji-Zaman grafikleri Çizelge 5.1 ile birlikte yorumlanmıştır.



Şekil 5.1. Düşük hızlı darbe sonrası hasarlı boruların dıştan ve içten görünüşleri

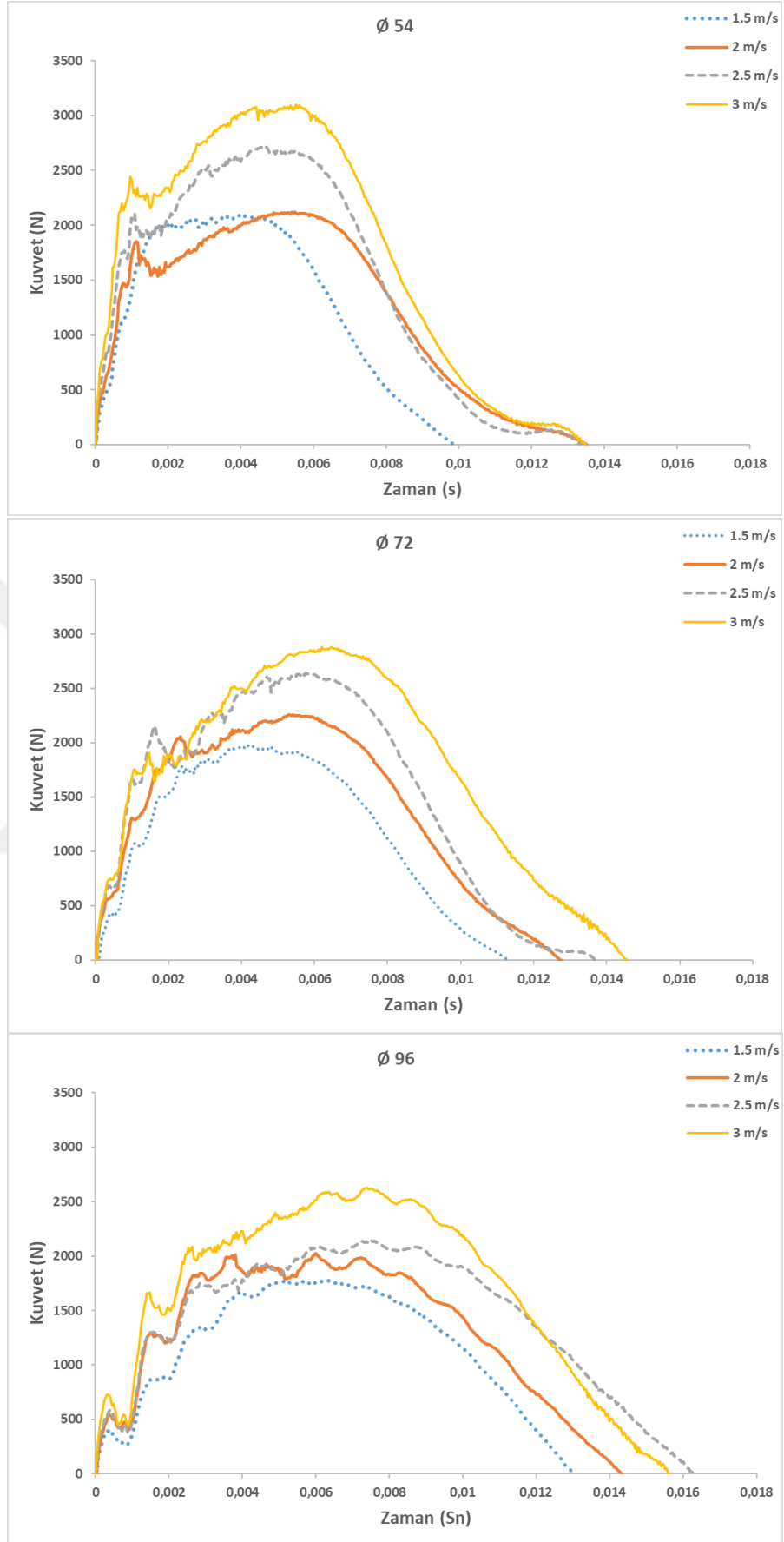
Çizelge 5.1. Düşük hızlı darbe sonrası elde edilen veriler

Boru iç çapı [mm]	Toplam enerji [J]	Darbe hızı [m/s]	Tepe kuvvet [N]	Toplam süre [s]	Tepe deplasman [mm]	Toplam impuls [Ns]	Absorbe edilen enerji [J]
Ø 54	6.3	1.5	2105.47	0.0098	0.0041	2630.587	4.378
	11.2	2	2322.07	0.0135	0.0070	4229.210	8.557
	17.5	2.5	2727.98	0.0133	0.0087	4706.071	14.644
	25.2	3	3101.49	0.0134	0.0108	5834.180	21.112
Ø 72	6.3	1.5	1978.20	0.0113	0.0049	3359.575	3.739
	11.2	2	2257.64	0.0127	0.0072	4781.301	7.194
	17.5	2.5	2639.45	0.0137	0.0097	5675.890	13.273
	25.2	3	2882.92	0.0145	0.0131	7965.963	18.302
Ø 96	6.3	1.5	1781.76	0.0130	0.0061	4787.948	2.127
	11.2	2	2028.00	0.0143	0.0084	6130.246	5.816
	17.5	2.5	2141.44	0.0162	0.0125	8526.736	10.347
	25.2	3	2625.62	0.0155	0.0147	9273.860	17.051

5.1.1. Temas kuvveti-zaman değişimi

Kompozit malzemelerin darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesi de temas kuvveti-zaman değişimi eğrileridir. Şekil 5.2’de artan darbe hızı altında, zamana göre temas kuvvetinin değişimini gösteren grafikler elde edilmiştir. Elde edilen temas kuvveti-zaman değişim grafiklerinin çan eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Bu eğriler incelendiğinde, yüklemde bir artma kısmına, ulaşılan en büyük bir temas kuvveti değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Bu veriler yarı küresel vurucunun numuneye temasından sonra numune üzerinde biriken enerjinin etkisi ile vurucunun geri sekmesinden elde edilen grafiklerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune üzerinde hasarların oluşumu esnasında kompozit boru tarafından yutulmuş geri kalan enerji ise vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır.

Grafikler incelendiğinde, yüklem esnasında artış kısmından sonra oluşan salınımlar numuneler üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang ve Vu-Khanh 1994). Temas kuvvetinin artışı ile numunede oluşan çökme miktarı artmış dolayısıyla bu durum hasar miktarını da artırmıştır. Temas kuvveti en büyük değerine ulaşınca kadar hasar gelişiminin hızla devam ettiği düşünülmektedir (Gemi 2014).

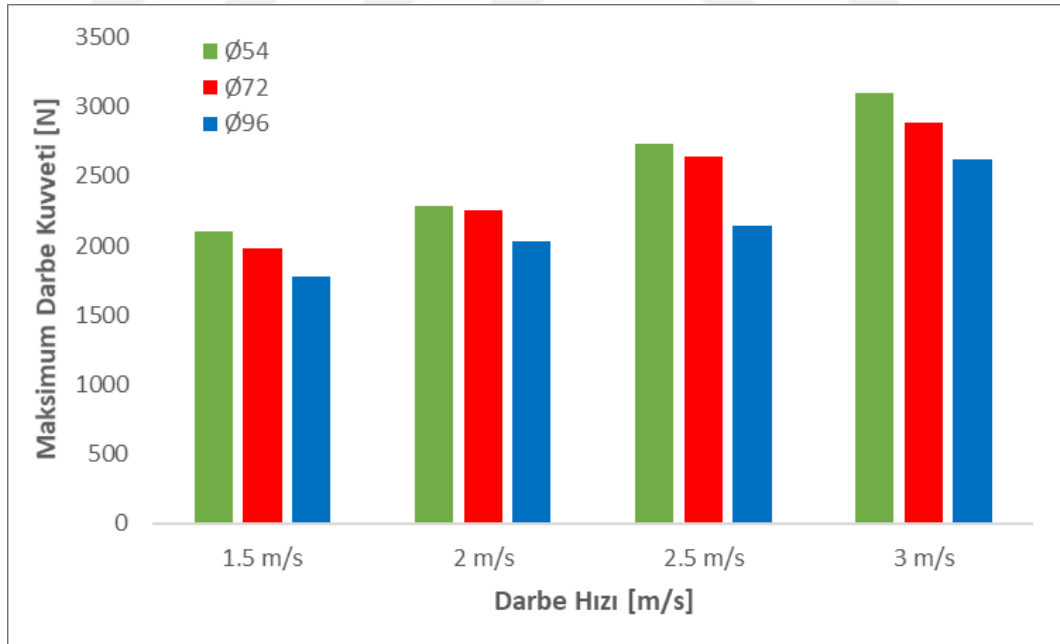


Şekil 5.2. Artan darbe hızı altında Ø54, Ø72 ve Ø96 borular için zamana göre temas kuvvetinin değişimini gösteren grafikler.

Her bir çapta kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, hız artışıyla birlikte temas kuvvetlerinde artış olduğu bununla birlikte temas sürelerinin de arttığı gözlenmiştir. Bu durum; kompozit borularda çap artışıyla darbe davranışlarının da değiştiğini göstermektedir. Çap artışıyla birlikte maksimum kuvvet değerlerinde azalma gerçekleşirken temas sürelerinde artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Farklı olarak Ø96 numunesinde 2.5 m/s hızla darbeye maruz kalan numunenin temas süresinin 3 m/s hızında yapılan darbenin önüne geçtiği görülmüştür.

Çap artışıyla birlikte maksimum kuvvet değerlerinde azalma görülme sebebinin, çap artışıyla birlikte yarı küresel vurucunun borulara olan temas noktasının nüfuziyeti'nin azalması ve temas kuvvetinin etkisiyle geometrik olarak borunun daha fazla esnemesinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.1. ve Şekil 5.3. birlikte incelendiğinde; darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede yer değiştirme (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşmaya kadar devam etmiştir. Darbe enerjisi arttıkça temas kuvveti ve numunede meydana gelen yer değiştirme miktarı artmaktadır. Kuvvet en büyük değerine ulaştığında yer değiştirme miktarı da en büyük değerine ulaşmaktadır.

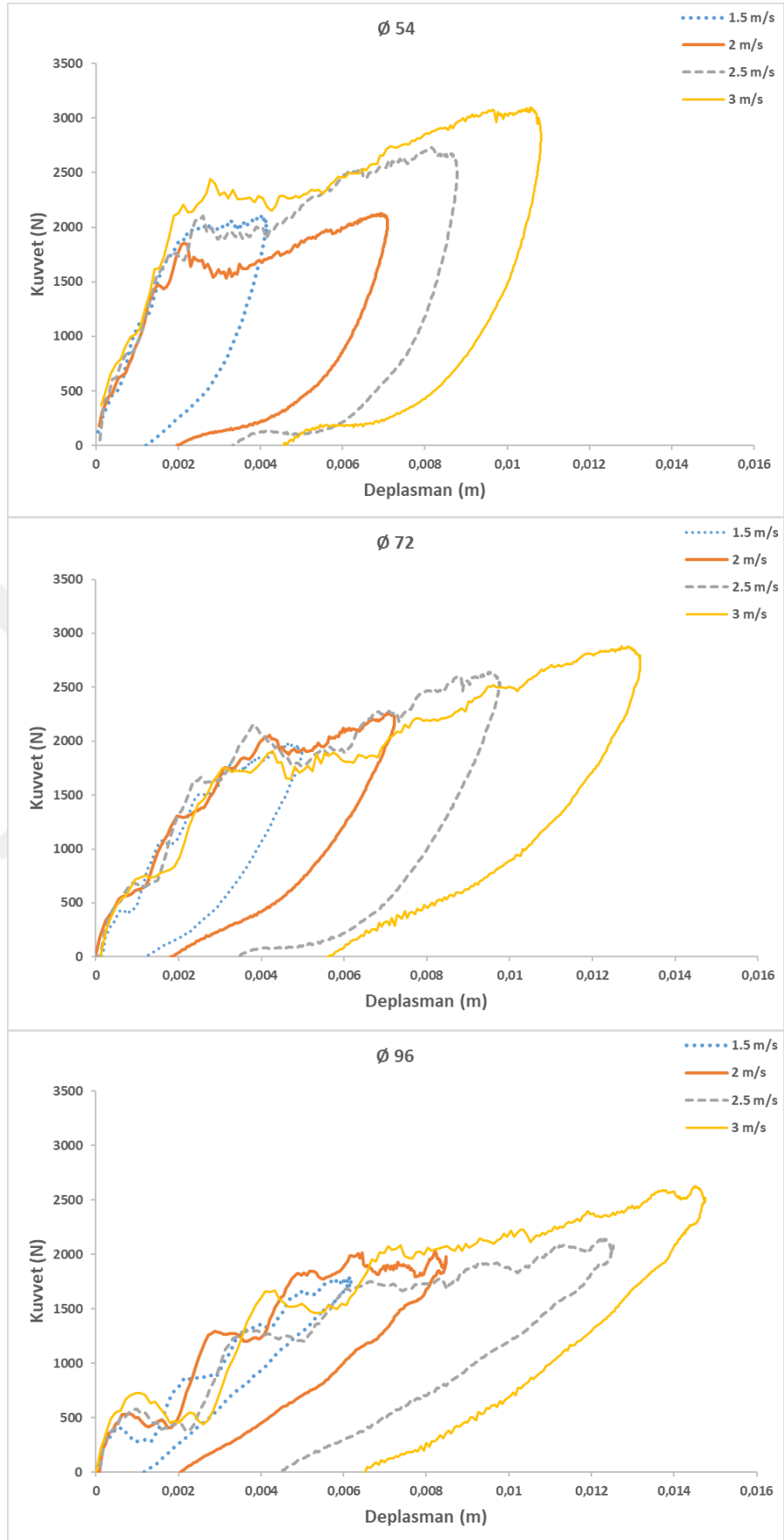


Şekil 5.3. Her bir boru için uygulanan bütün darbe hızlarında maksimum darbe kuvveti değişimini gösteren sütun grafiği

5.1.2. Temas kuvveti-deplasman değişimi

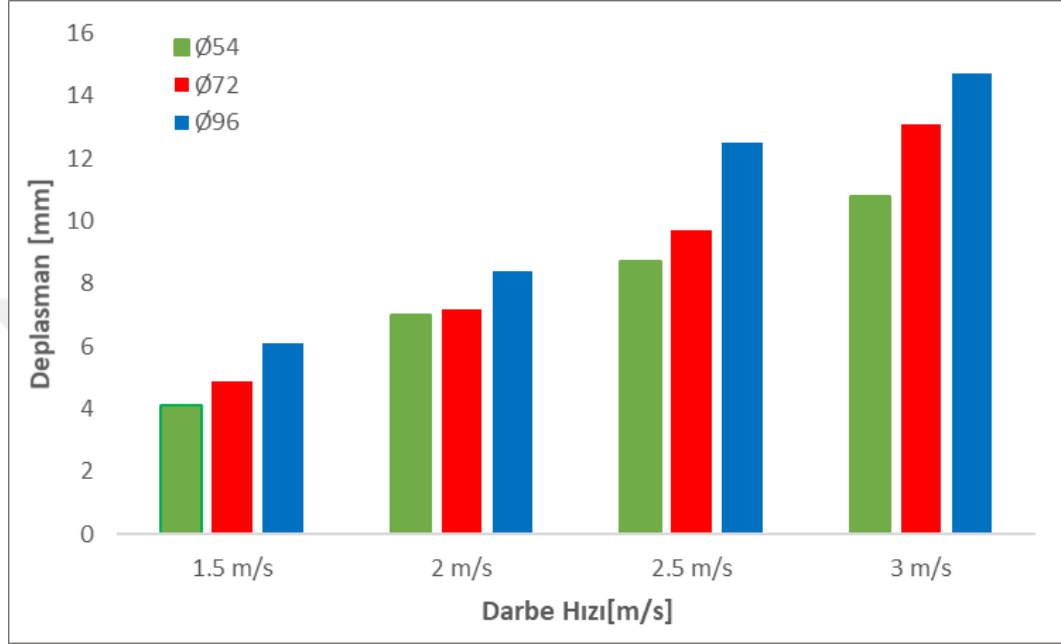
Düşük hızlı darbe sonrası kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-deplasman (kuvvet-çökme) değişim grafikleridir. Farklı hızlarda düşük hızlı darbeye maruz kalmış CTP kompozit borular için elde edilen kuvvete bağlı deplasman değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede deplasman (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. CTP kompozit borularda çap geometrisi büyüdükçe temas kuvveti azalmakta ve yer değiştirme miktarı artmaktadır.

Temas kuvvet-yer değiştirme eğrisinde artma kısmındaki eğim darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı *eğilme rijitliği* olarak adlandırılır. Eğilme rijitliğindeki salınımlar ve değişimler numunede oluşan hasarlanmayı göstermektedir. CTP boruların çaplarının artmasıyla numunelerin eğilme rijitliğinde büyük bir düşüş gözlenmiştir. Bunun en büyük nedeni yarı küresel ucun nufuziyeti haricinde numunelerin çap artışıyla daha esnek davranmasıdır. Eğilme rijitliğinde büyük bir değişimin olması özellikle küçük çaplı borularda hasarın daha yoğun olarak gerçekteşmesine neden olmaktadır.



Şekil 5.4. Artan darbe hızı altında Ø54, Ø72 ve Ø96 borular için temas kuvvetinin-deplasman değişimini gösteren grafikler

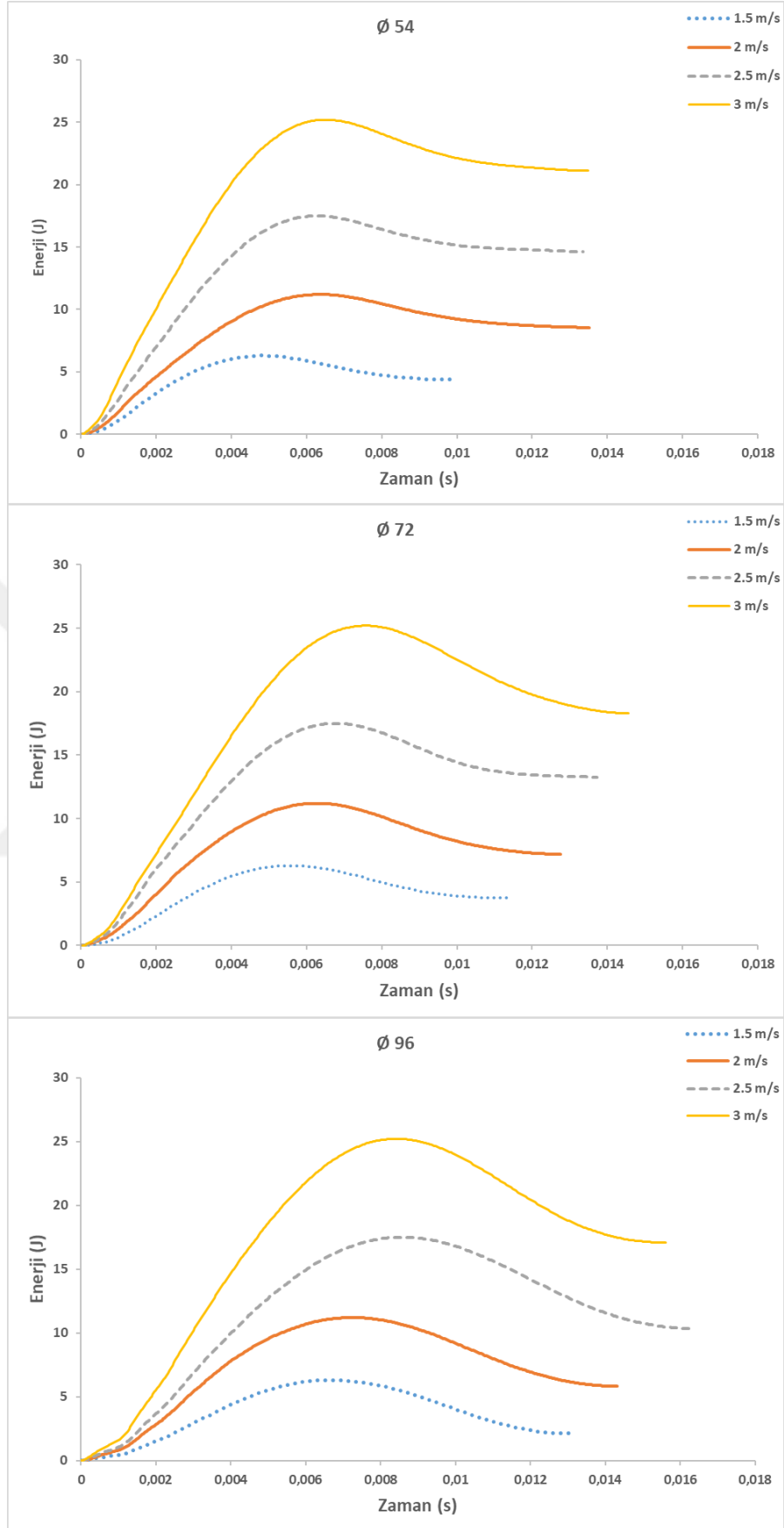
Şekil 5.5'te CTP kompozit numunelerde uygulanan her dört hızda da oluşan en büyük yer değiştirme miktarları verilmiştir. Boru çaplarının artmasıyla yer değiştirme miktarının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. 3 m/s hızda 54 mm çapında boruda tepe deplasman 10.8 mm değerinde oluşurken, 96 mm çapında boruda 14.7 mm tepe deplasman oluşmuştur.



Şekil 5.5. Her bir boru için uygulanan 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s darbe hızlarında tepe deplasman değişimini gösteren sütun grafiği

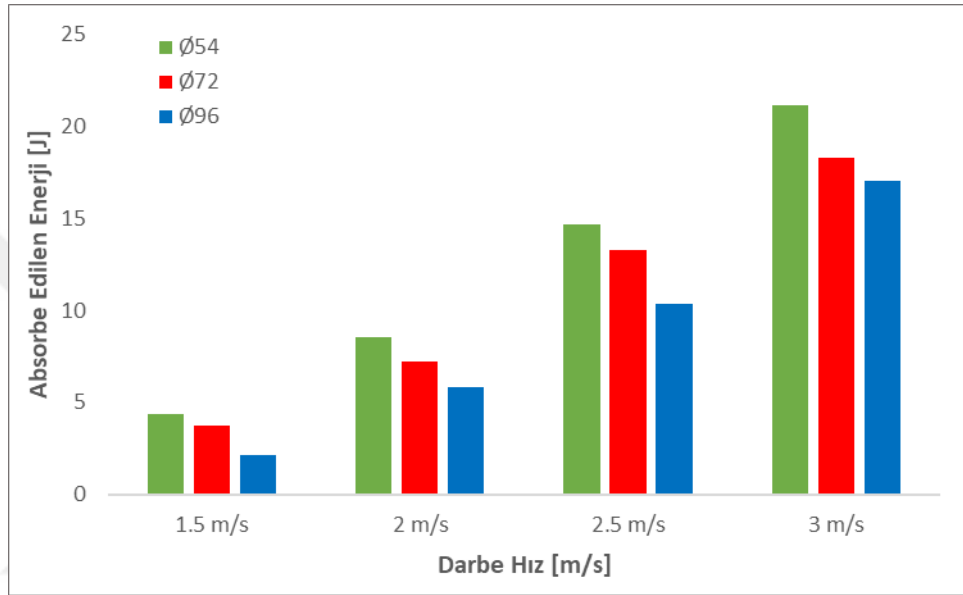
5.1.3. Enerji-zaman değişimi

Kuvvet-yer değiştirme grafiği içinde kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir (Kara, 2012). Şekil 5.6'da grafik içinde kalan alan hesaplanmış ve yutulan enerji miktarı elde edilmiştir. Çizelge 5.1'de dört farklı hızda darbe yapılan üç farklı boruya ait enerji-zaman grafikleri verilmiştir. Her üç boruyu kendi içinde yutulan enerjiler arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa darbe hızı arttıkça yutulan enerji miktarlarının da arttığı görülmektedir. Düşük hızlarda yutulan enerji miktarlarının fazla olduğu, hızın artmasıyla her enerji seviyesinde yutulan enerji miktarlarında azalışın olduğu görülmektedir. Farklı çaplarda bu durumu değerlendirdiğimizde, her enerji seviyesinde çap artışıyla yutulan enerji miktarlarında azalmanın ve geri sekme enerjilerinde artış olduğu görülmüştür.



Şekil 5.6. Artan darbe hızı altında Ø54, Ø72 ve Ø96 borular için enerji-zaman değişimini gösteren grafikler

Çizelge 5.1, Şekil 5.7 ve Şekil 5.1 birlikte incelendiğinde çap artışından dolayı oluşan absorbe edilen enerjilerdeki azalmanın geometri artışından kaynaklanan esneklikten olduğu anlaşılmaktadır. Bütün darbe hız seviyelerinde görülen bu durum CTP kompozit borularda çap artışıyla darbeye karşı cevaplarının değiştiğini göstermektedir. Küçük çaplı CTP kompozit borularda absorbe edilen enerjinin fazla olması boru üzerinde oluşan hasarında fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum hasar analizi kısmında ayrıntılı olarak incelenecektir.



Şekil 5.7. Her bir boru için uygulanan darbe hızlarında enerji-zaman değişimini gösteren sütun grafiği

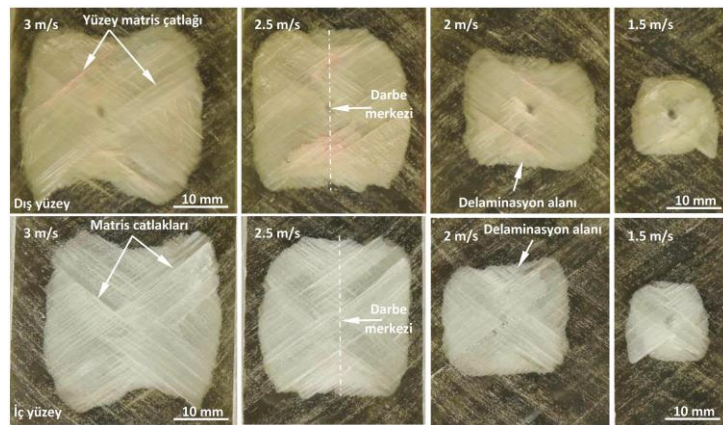
5.2. CTP Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Makro Hasar Analizi

CTP kompozit deney numunelerine farklı hızlarda yapılan darbe deneylerinden sonra numunede oluşan hasarlar tespit edilmiş ve değerlendirilmiştir. Aynı işlemler 54, 72 ve 96 mm iç çapındaki borular içinde yapılmış ve hasarlar makro olarak incelenmiştir. Stüdyo ortamında çekilen düşük hızlı darbe hasar bölgeleri ölçeklendirilmiş ve çap farkının darbe hasarına olan etkileri yorumlanmıştır. Tabakalar arası ayrılmaların boyutu ve şekli ile mevcut olan matris çatlakları çıplak göz ile belirlenebilir (Abrate, 1998). Üst yüzeyinden darbeye maruz tabakalı kompozit numune için, farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabaka ara yüzeylerinde ve alt tabaka ara yüzeylerinde elyaf açalarına göre meydana gelen delaminasyonlu alanlar dikdörtgen veya yarfıstığı şeklindedir (Abrate, 1991). Bu çalışmada da genel olarak tüm enerji seviyeleri için hasarlandırılmış CTP kompozit numunede oluşan delaminasyon alanının yer fıstığı şeklinde olduğu görülmektedir.

Darbe noktalarında oluşan hasarın dış ve iç bölgelerinin yüksek çözünürlükte fotoğrafları çekilmiş ve oluşan makro hasar modları çıkartılmıştır. Numunelerden 72 mm çapındaki boru darbe bölgelerinden kesilip optik mikroskop altında incelenerek kesit görüntüleri çıkarılmıştır. Aynı numunelerin SEM görüntüleri alınmış ve mikro hasar analizleri yapılmıştır. Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da 54, 72 ve 96 mm çaplarında CTP boru numunelere uygulanan 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç bölgelerine ait hasarlar görülmektedir.

5.2.1. Ø54 mm CTP kompozit borularda makro hasar analizi

Şekil 5.8'de verilen 54 mm iç çapa sahip boruların makro olarak hasarları incelendiğinde; delaminasyon hasarı numunenin dış ve iç yüzeylerinde net bir şekilde görüntülenmiştir. Yüksek hızlarda oluşan hasarlarda delaminasyon hasarının geniş bir alana sahip olduğu, uygulanan darbe hızının düşüşü ile hasar bölgelerinde azaldığı görülmektedir. Delaminasyon ve diğer hasarının net bir şekilde görüntülenmesi, kompozit boru üretiminde cam elyafların kullanılması ve delaminasyonla beraber oluşan matris hasarının matrisin şeffaflığını kaybetmesi şeklinde yorumlanabilir. Delaminasyon ve matris çatlaklarının oluşum şeklini $\pm 55^\circ$ elyaf konfigürasyonunun yönlendirdiği net bir şekilde görülmektedir. Düşük hızlı darbe uygulanan kompozit borunun çapının küçük olması ($\text{Ø}54$) oluşan delaminasyon ve iç-dış yüzey matris çatlak hasarının yoğun olarak belli bir bölgede toplanmasına sebep olmuştur. Bu durum, uygulanan dört hızda da darbe sonrası oluşan delaminasyon hasar genişliğinin aksel ve radyal yönde birbirine yakın olduğu görülmüştür.

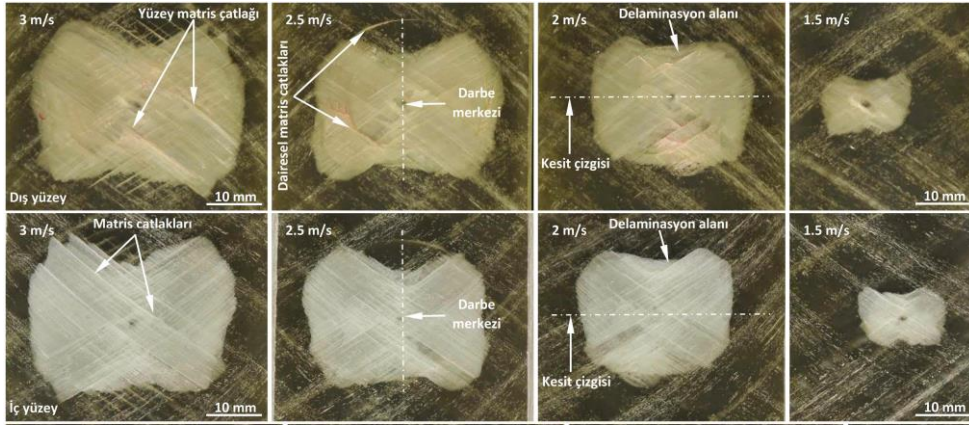


Şekil 5.8. Ø54 mm CTP borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri

Numunelerde dış yüzey delaminasyon alanlarında, darbe merkezlerinde yarı küresel vurucunun ilk temas ettiği noktalarda şeffaflığın bozulmadığı ve delaminasyon hasarının darbe merkezi etrafında olduğu gözlenmiştir. Dış yüzey delaminasyon alanı içerisinde \pm elyaf doğrultusunda oluşan matris çatlaklarının daha büyük ve belirgin olması, dış yüzeyde bulunan reçinece zengin bölgelerden kaynaklandığı şeklinde yorumlanabilir.

5.2.2. Ø72 mm CTP kompozit borularda makro hasar analizi

Şekil 5.9’da verilen 72 mm iç çapa sahip boruların makro olarak hasarları incelendiğinde; kompozit boru geometrisinin büyümesi ile oluşan delaminasyon hasarının, 54 mm çaptaki boruda oluşan hasara göre boru eksenı doğrultusunda kısmen azaldığı görülmüştür. Bunun yanında delaminasyon hasarının radyal yönde elyaf sarım açısı doğrultusunda genişlediği ve yer fıstığı görünümünü aldığı tespit edilmiştir. Radyol yönde genişleyen delaminasyon hasarının içinde oluşan matris çatlaklarında elyaf doğrultusunda büyüdüğü görülmektedir. Özellikle 2.5 m/s hızda darbeye maruz kalan numunede elyaf doğrultusunda oluşan matris çatlaklarının yanında vurucu geometrisinde dairesel yüzey matris çatlaklarında olduğu görülmüştür. Dış yüzeyde dairesel matris çatlakların ve elyaf doğrultusunda oluşan matris çatlaklarının yoğun oluşmasına reçinece zengin bölgelerin sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu numunede Ø54 mm numuneden farklı olarak, hem içyüzeyde hemde dış yüzeyde darbe merkezlerinde şeffaf bölgelerin olduğu görülmüştür. Bütün hızlarda uygulanan düşük hızlı darbe sonrasında, hızların azalmasıyla delaminasyon alanlarında azaldığı fakat hem dış yüzeyde hemde iç yüzeyde oluşan delaminasyon hasar tipinin geometrisinin birbirine benzer olduğu görülmüştür. 2 m/s hızda oluşan hasar dikkatli incelendiğinde delaminasyonun bütün tabakalarda gerçekleştiği görülmektedir. Her üç boruda oluşan hasarlar genel olarak incelendiğinde, 72 mm iç çapa sahip borularda oluşan hasarlarının diğer çaplarda oluşan hasarlarıda temsil ettiği görülmektedir. Bu sebepten dolayı, 72 mm iç çapa sahip borularda oluşan hasarlarının radyal kesitleri alınmış ve mikro hasar analizleri bu CTP boru numunesinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapılan mikro hasar analizi, optik mikroskop görüntüleri ve SEM analiz görüntüleri incelenerek “5.3. CTP Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mikro Hasar Analizi” adında ayrı bir başlık altında sunulmuştur.

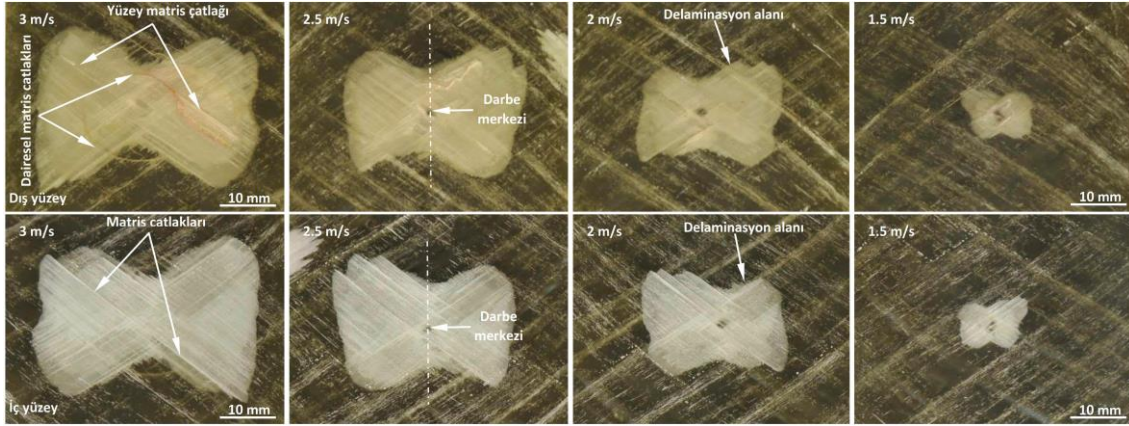


Şekil 5.9. Ø72 mm CTP borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri

5.2.3. Ø96 mm CTP kompozit borularda makro hasar analizi

Şekil 5.10'da verilen 96 mm iç çapa sahip boruların makro olarak hasarları incelendiğinde; 54 ve 72 mm iç çapındaki borularla kıyaslandığında delaminasyon hasar alanının boru eksenî yönünde azalma gösterirken radyal yönde dahada genişlediği görülmüştür. Bu durum özellikle 2.5 ve 3 m/s hızlarla düşük hızlı darbeye maruz kalan numunelerde daha belirgin olarak görülmektedir. Bu numunede hasar radyal yönde genişlemesine rağmen, hasar yoğunluğunun bütün hızlarda azaldığı görülmüştür. Delaminasyon hasar alanı Şekil 5.7 ile birlikte incelendiğinde bu durumun çap artışıyla enerji absorpsiyonunun azaldığı ve bunun ile beraber hasar yoğunluğunun azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Bu durumun daha net anlaşılması açısından bütün çaplarda 1.5 m/s hızlarda oluşan delaminasyon alanlarına birlikte bakıldığında, kompozit boru çapı artışıyla hem delaminasyon alanlarının hemde oluşan hasarların yoğunluğunun azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Diğer çaplarda da olduğu gibi bu numunede de, hem darbe noktasında şeffaflığın bozulmadığı hemde bütün hızlarda hasar geometrisinin yer fıstığı şeklini aldığı gözlenmiştir. 3 m/s hızda darbeye maruz kalan numunede dış yüzey delaminasyon alanı içerisinde elyaf doğrultusunda oluşan matris çatlakları ile beraber vurucu geometrisinin etkisiyle radyal matris çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. Dış ve iç yüzeyde elyaf doğrultusunda oluşan matris çatlaklarının uzunlukları diğer çaplara nazaran arttığı ve $\pm 55^\circ$ elyaf konfigürasyonunun doğrultusunda ilerlediği net bir şekilde görülmektedir. Yüksek hızlarda oluşan delaminasyon hasarlarının kompozit borunun bütün tabakalarında oluştuğu daha net gözlenebilmektedir.

Genel olarak bütün çaplarda 2.5 ve 3 m/s hızlarda oluşan hasarlar birlikte incelendiğinde, küçük çaplarda oluşan yoğun hasar tiplerinin (taka içi matris çatlakları, delaminasyon ve debonding hasarları) çap artışıyla azaldığı ve yoğun olarak delaminasyon hasarlarına dönüştüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 5.10. Ø96 mm CTP borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri

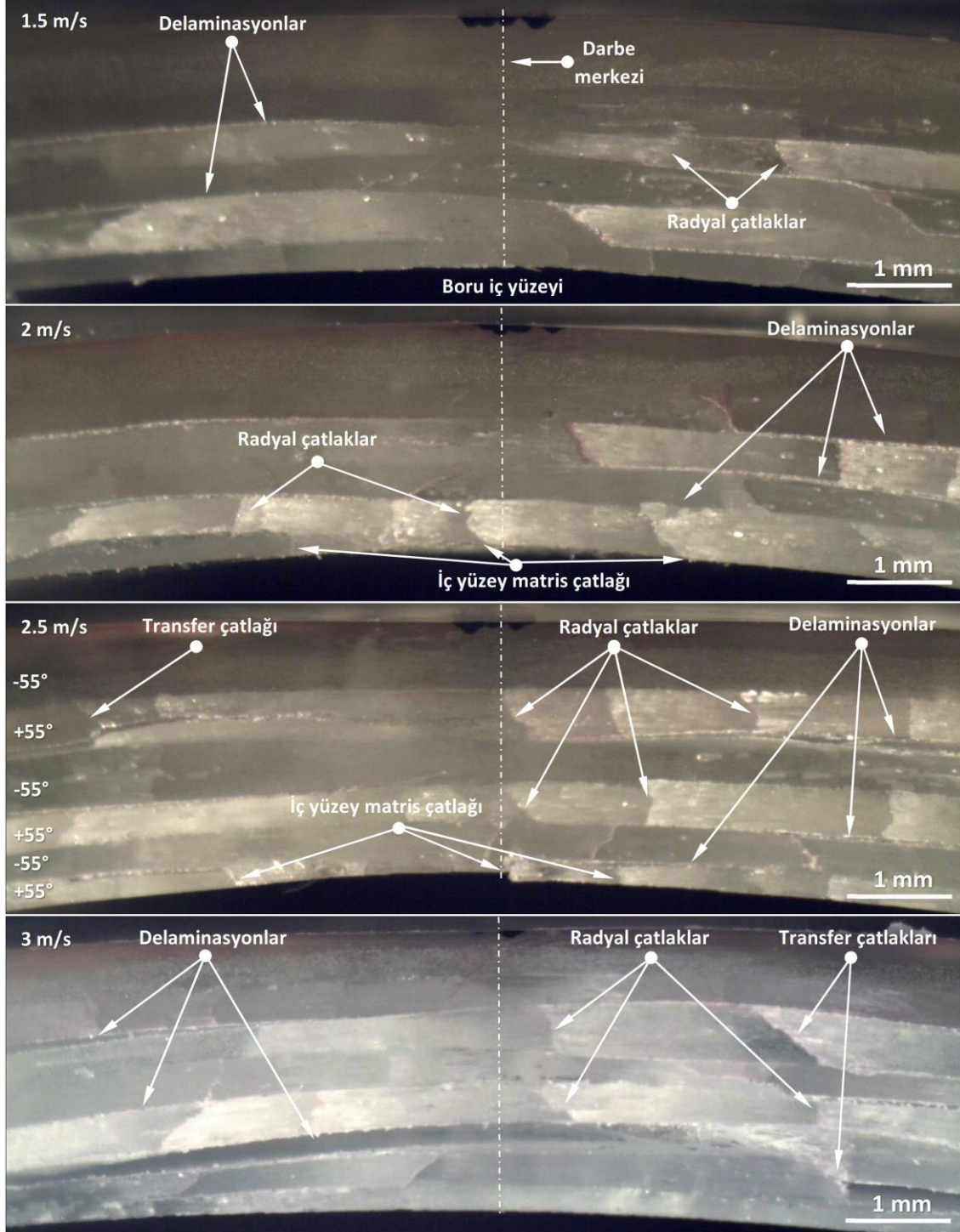
5.3. CTP Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mikro Hasar Analizi

Düşük hızlı darbe sonrası yapılan makro hasar analizinde gözle görülebilen hasarlar net bir şekilde incelenebilmektedir. Fakat kompozit malzemelerin kesiti içerisinde oluşan; delaminasyon, radyal matris çatlakları, debonding, elyaf kırılmaları ve mikro matris çatlaklarının görüntülenebilmesi için mikro hasar analizlerinin de yapılması gereklidir. Bunun için Ø72 mm CTP borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların tespiti için optik mikroskop ve SEM analiz görüntülerinin alınarak mikro yapı hasar analizleri yapılmış ve ayrıntılı olarak incelenerek yorumlanmıştır.

5.3.1. Ø72 mm borularda optik mikroskop hasar analizi

Şekil 5.11’de 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s temas hızları seviyesinde hasarlandırılmış CTP numunelere ait optik mikroskop kesit görüntüleri verilmiştir. Numunelerin kesit görüntüleri incelendiğinde radyal matris çatlakları ve delaminasyonlar açıkça görülmektedir. Temas hızının artmasıyla numune kesitinde meydana gelen radyal matris çatlaklarında ve delaminasyonlarda ciddi oranda artış göstermektedir. Numunelerden alınan radyal kesit (cross-section) görüntüleri incelendiğinde radyal matris çatlaklarının dış yüzeyden iç yüzeye doğru arttığı, iç yüzeye yakın tabakalarda radyal çatlakların ve

delaminasyonların daha çok olduğu görülmektedir. Borulara uygulanan artan hızlarda düşük hızlı darbe, numunelerde meydana gelen hasar mekanizmalarını etkilemiştir. Düşük hızlarda yutulan enerjinin az olması numunelerde daha az hasar olmasına katkı sağlamaktadır. Dış yüzeylerde özellikle yüksek enerji seviyeleri için ciddi oranda dairesel yüzey çatlakları oluşmuştur.

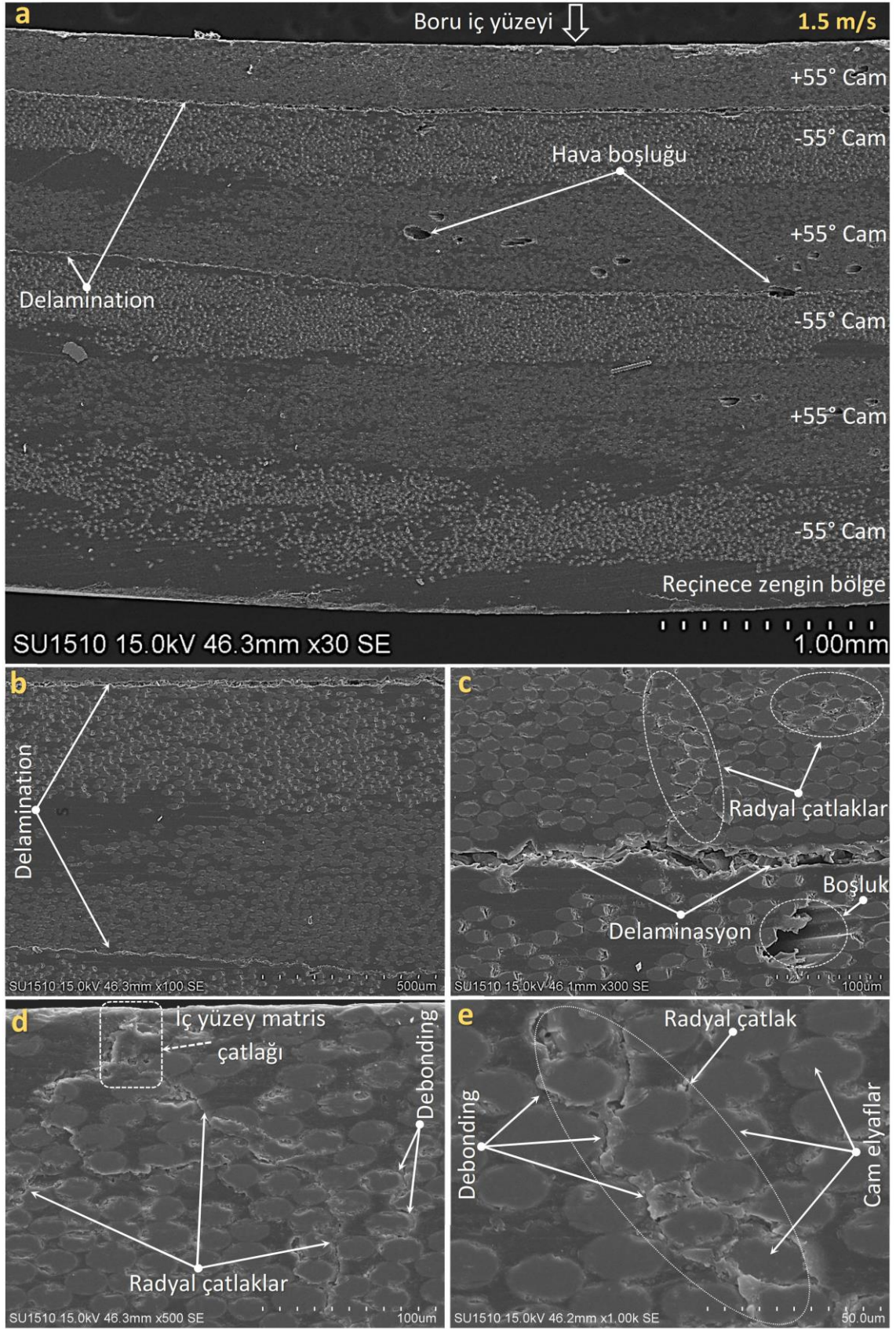


Şekil 5.11. Ø72 mm CTP borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri (Gemi 2018)

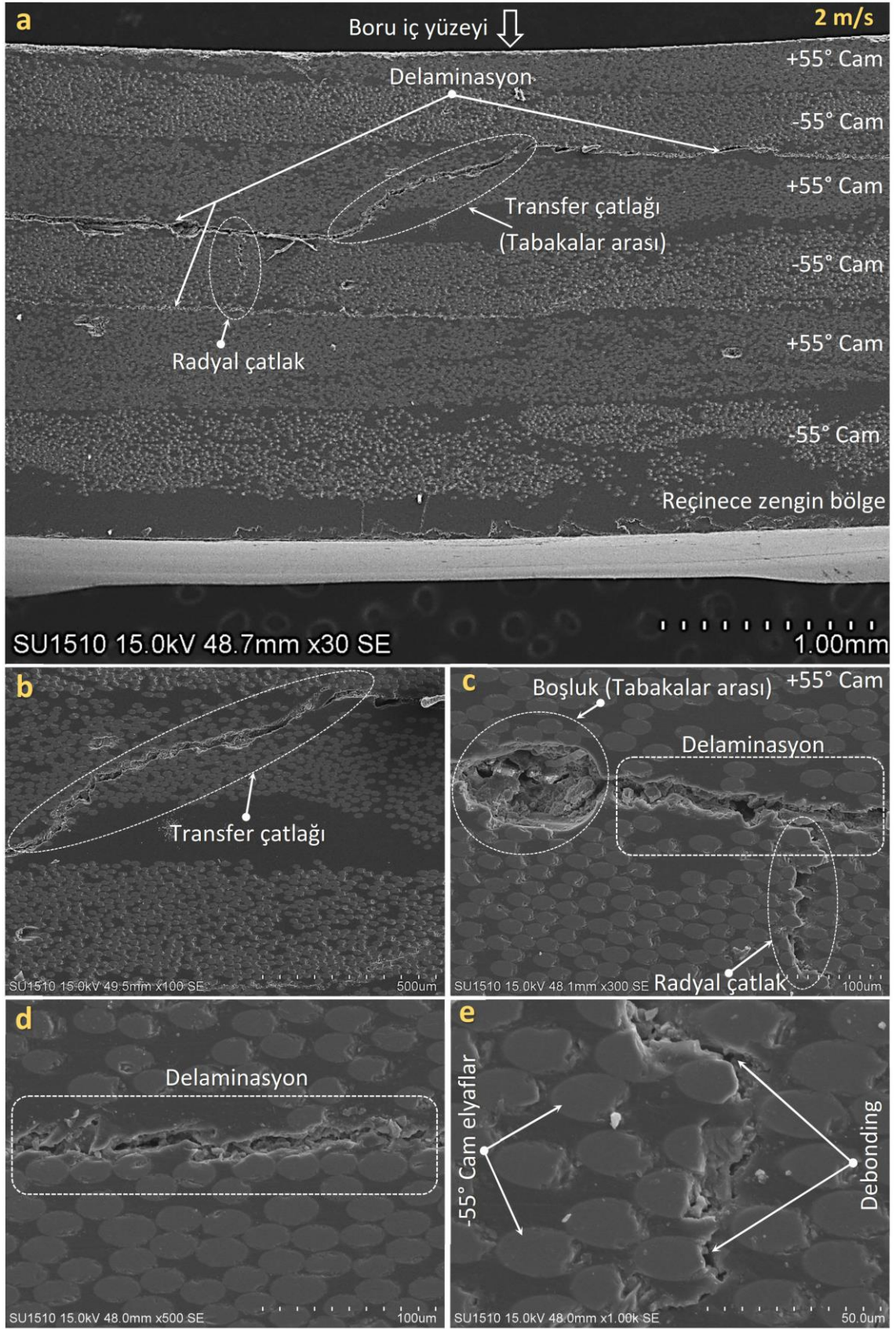
5.3.2. Ø72 mm borularda SEM hasar analizi

Düşük hızlı darbe sonrası kompozit borularda oluşan hasarların tespit edilmesi ve bu hasarların darbe sonrası basma testlerinde borunun davranışını nasıl etkilediğini belirleyebilmek için ayrıntılı bir hasar analizinin yapılması oldukça önemlidir. Hasar analizinin daha sağlıklı yapılabilmesi için optik mikroskopla yapılan incelemede tespit edilen bölgeler SEM analizi için hazırlanmıştır. SEM analizi için diğer çaplarda hasarlandırılmış boruları temsilen Ø72 mm borular seçilmiştir. Numune kesitlerinin SEM görüntüleri alınarak her hız seviyesinde mikro hasar analizleri için görüntüler işlenmiş ve Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’de sunulmuştur. Şekil 5.12’de 1.5 m/s en düşük hız seviyesinde oluşan hasarlar incelendiğinde oluşan hasar çoğunlukla delaminasyon hasarı şeklindedir. Delaminasyon hasarına yakın birkaç yerde oluşan radyal çatlakların görüldüğü ve bu çatlaklarında debonding hasarlarının birleşmesiyle oluştuğu anlaşılmaktadır. Oluşan radyal çatlakların delaminasyon hasarının gerçekleştiği bölgelerde başlayıp tabaka içerisine doğru ilerlediği görülmektedir. Radyal çatlakların oluşumunu ve ilerlemesini bulunduğu tabakanın istiflemesinde elyaf sarım açısının yönlendirdiği anlaşılmıştır. Bu ilerleme esnasında çatlakların oluşumu, cam elyaflar ile matris arasında bulunan ara yüzey bağının kırılıp debonding hasarını gerçekleştirdiği ve oluşan çoklu debonding hasarlarının birleşerek gerçekleştiği görülmüştür. En düşük hız seviyesi olmasına rağmen bu numunede azda olsa iç yüzey matris çatlaklarının da oluştuğu tespit edilmiştir.

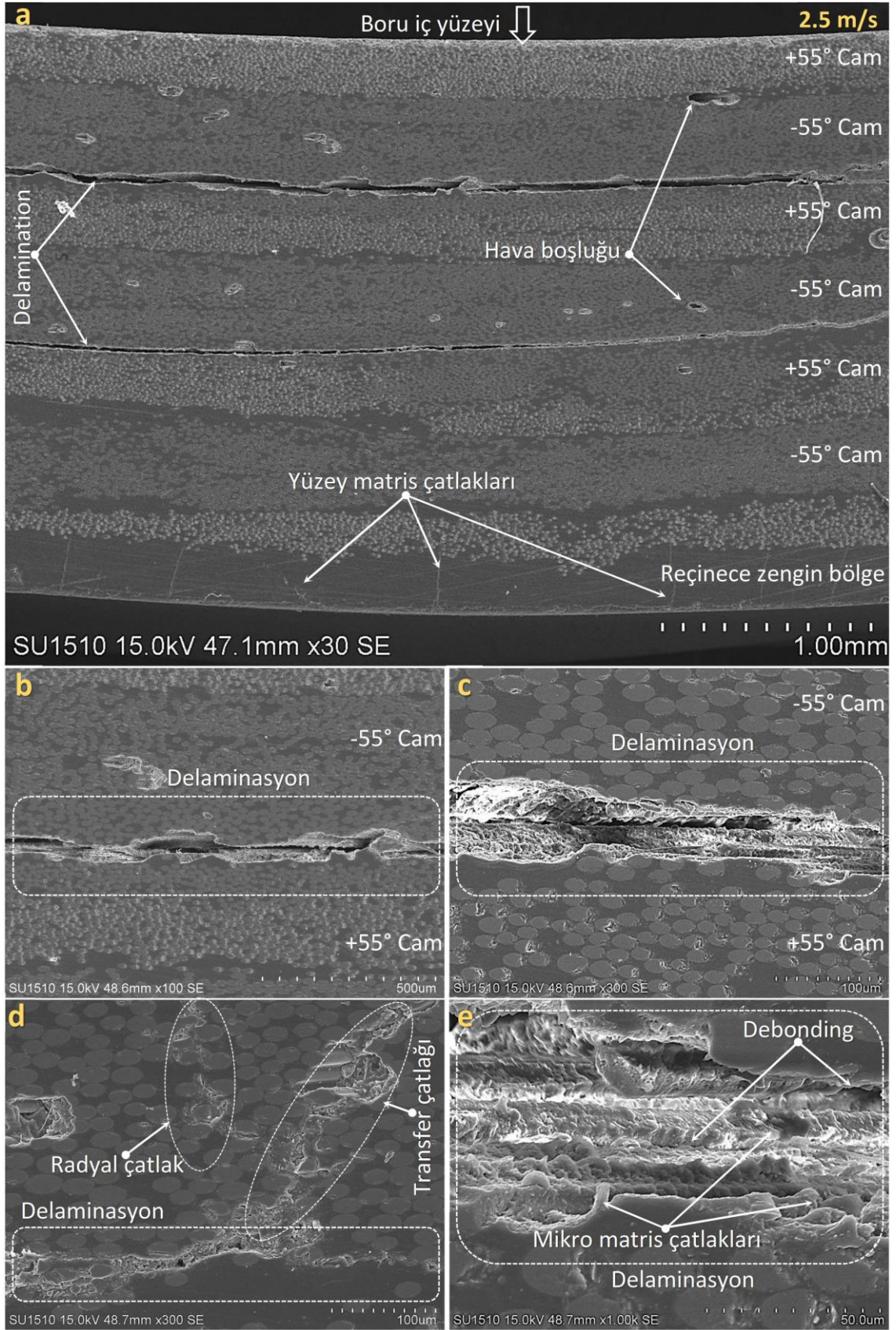
Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’de 2 m/s ve 2.5 m/s hız seviyelerinde oluşan hasarlar incelendiğinde; delaminasyonun hasarının biraz daha arttığı ve radyal çatlakların daha da belirginleştiği görülmüştür. Her iki hızda da radyal çatlakların dallanmasına ek olarak tabakalar arası transfer çatlaklarının oluştuğu ve özellikle 2.5 m/s hızında reçinece yoğun olan en dış tabakada dairesel matris yüzey çatlaklarının oluştuğu görülmüştür. Her iki numunede de üretimden kaynaklı hava boşluklarının varlığı tespit edilmiştir. Hava boşluklarının yoğun olarak tabakalar arasında oluştuğu ve düşük hızlı darbe esnasında delaminasyon hasarının oluşumunu yönlendirdiği düşünülmektedir. 2.5 m/s hızında yapılan darbe deneylerinde 1.5 ve 2 m/s hızlara oranla tabakalar arası transfer çatlakları, radyal çatlaklar ve debonding hasarlarının daha yoğun olarak oluştuğu gözlenmiştir. Debonding hasar oluşumu radyal çatlaklarında görülmekle beraber Şekil 5.14e’de de görüldüğü gibi oluşan delaminasyon hasar bölgesinde elyaf doğrultusunda elyaf matris ara yüzey kırılması şeklinde oluştuğu daha net olarak anlaşılmaktadır.



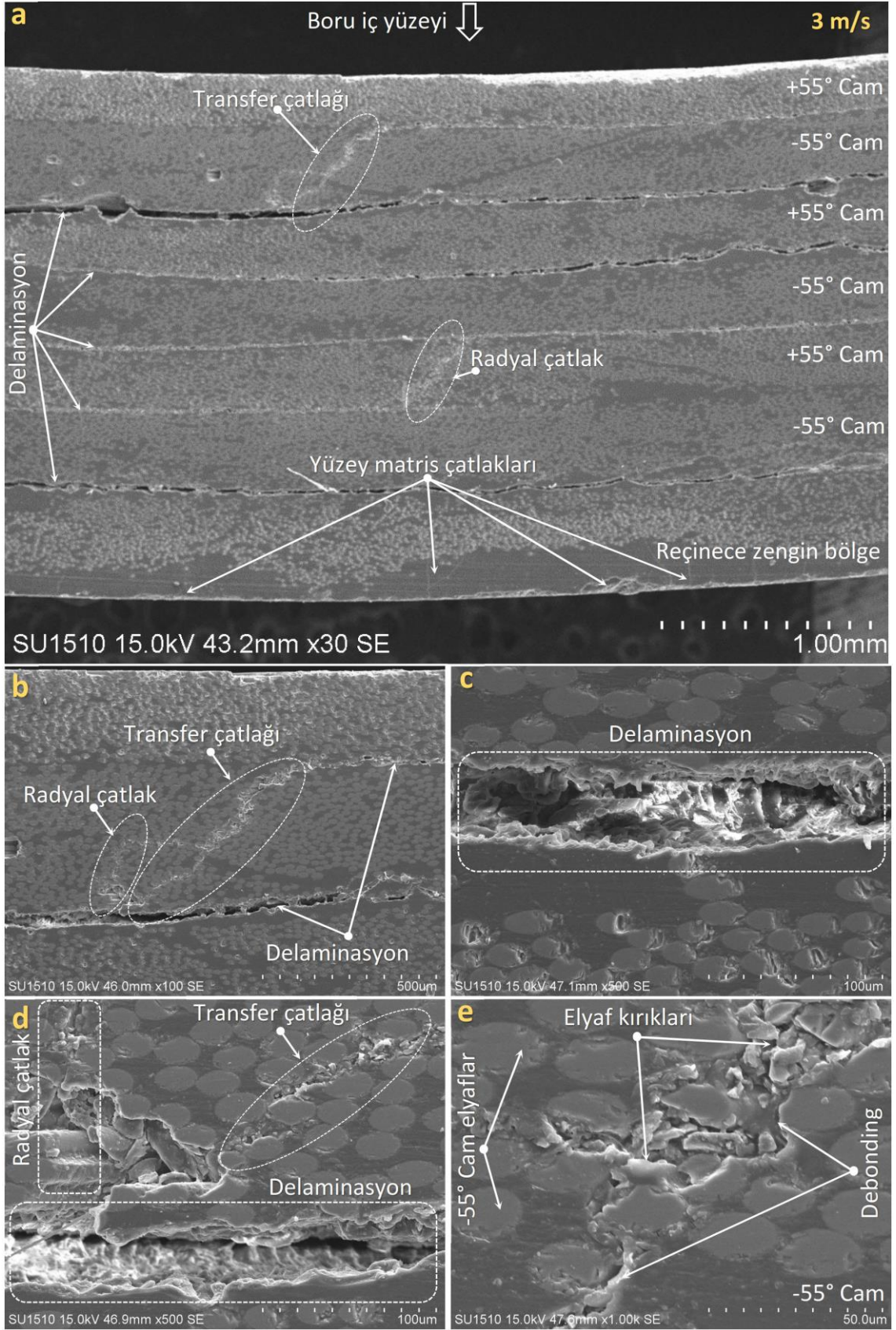
Şekil 5.12. Ø72 mm CTP borularda 1.5 m/s hız seviyesinde darbe testi sonrası oluşan hasarların radyal kesit SEM hasar görüntüleri



Şekil 5.13. Ø72 mm CTP borularda 2 m/s hız seviyesinde darbe testi sonrası oluşan hasarların radyal kesit SEM hasar görüntüleri



Şekil 5.14. Ø72 mm CTP borularda 2.5 m/s hız seviyesinde darbe testi sonrası oluşan hasarların radyal kesit SEM hasar görüntüleri



Şekil 5.15. Ø72 mm CTP borularda 3 m/s hız seviyesinde darbe testi sonrası oluşan hasarların radyal kesit SEM hasar görüntüleri

Şekil 5.15’de en yüksek 3 m/s hız seviyesinde oluşan hasarlar incelendiğinde; delaminasyon hasarı başta olmak üzere bütün hasar modları görülmektedir. Delaminasyon hasarının bütün tabakalarda yoğun olarak gerçekleştiği ve hasar boyutunun diğer hızlardan daha geniş olduğu görülmüştür. Tabakalar arası transfer çatlaklarının ve hava boşluklarının delaminasyon yoğunluğuna katkı sağladığı görülmüştür. Bu hızda yoğun tabaka ayrılmalarının sebep olduğu en geniş iç ve dış yüzey hasar alanının olduğu görülmektedir. Şekil 5.15bcde incelendiğine delaminasyon, radyal çatlaklar ve transfer çatlakların daha belirgin olduğu, transfer çatlakların dallanarak radyal çatlakları etrafında barındırdığı gözlenmiştir. Özellikle radyal çatlakların delaminasyon bölgelerine birleştiği noktalarda, matrisin döküldüğü elyafların açığa çıktığı ve delaminasyon bölgesine yakın transfer çatlaklarında elyaf hasarlarının da olduğu görülmüştür. Bu hızda delaminasyon hasarının çokluğu darbe sonrası basmada hasar gelişimini önemli bir şekilde etkileyeceği düşünülmektedir.

5.4. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Basma Deney (CAI) Sonuçları

CTP boruların düşük hızlı darbe sonrası basma davranışlarının belirlenmesi amacıyla basma deneyi ile ilgili çalışmalar Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır.

Düşük hızlı darbe sonrası oluşan hasarların basma deneylerinde Ø54, Ø72 ve Ø96 mm çapındaki boruların nasıl etkilediğinin incelenmesi ve bu hasarların kompozit borunun mukavemet kayıplarına etkisinin araştırılması amacıyla Darbe Sonrası Basma (CAI) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler her boru için özel olarak üretilmiş flanşlar kullanılarak 2 mm/dak yükleme hızı ile ASTM D 7137 standardına uygun olarak yapılmıştır. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla her bir boru çapında deney sonrası oluşan hasarlar Şekil 5.16’da toplu olarak verilmiştir. Deney verileri Yük (N)-Uzama (mm) şeklinde alınmış ve işlenerek Gerilme (MPa)/Birim şekil değiştirme (mm/mm) değerlerinde hesaplanıp grafik haline dönüştürülmüştür. Her bir çap için oluşturulan grafikler kendi içinde karşılaştırılabilmesi için peş peşe verilerek yorumlanmış ve elde edilen veriler Çizelge 5.2’de toplu olarak sunulmuştur. Ayrıca her üç çapta yapılan deney sonuçları; hasarsız borularla ve 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarında darbe hasarına uygulanmış boruların sonuçları Max. Gerilme, Deplasman ve Tokluk değerleri çubuk grafik olarak verilmiştir.



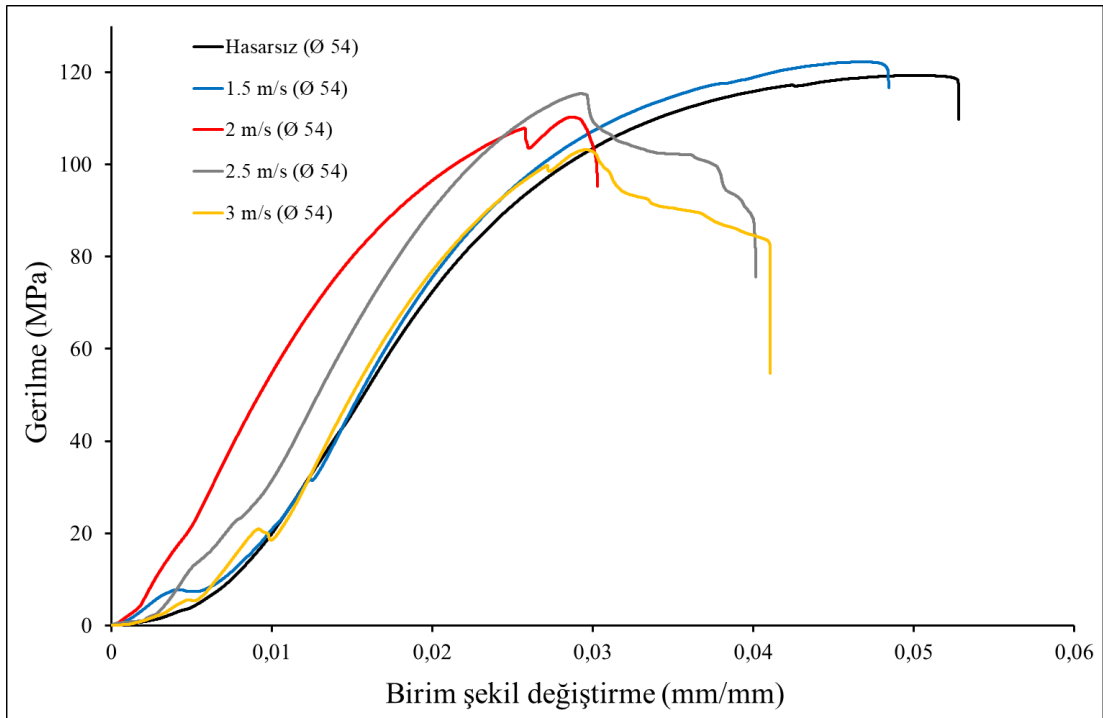
Şekil 5.16. CTP boruların CAI sonrası genel görüntüleri a) Ø54 mm b) Ø72 mm c) Ø96 mm

Çizelge 5.2. Darbe sonrası basma (CAI) sonucunda elde edilen veriler

Boru iç çapı [mm]	Darbe hızı [m/s]	Max. Gerilme [MPa]	Deplasman [%]	Tokluk [kJ/m ³]
Ø 54	0 (Hasarsız)	119.30	5.07	3806
	1.5	122.23	4.66	3435
	2	110.21	2.85	1919
	2.5	115.32	2.91	1718
	3	103.22	2.96	1459
Ø 72	0 (Hasarsız)	119.70	4.56	3182
	1.5	115.98	4.18	2846
	2	112.45	3.26	1934
	2.5	99.97	3.23	1420
	3	100.67	2.79	1543
Ø 96	0 (Hasarsız)	116.56	3.73	2695
	1.5	110.99	3.75	2396
	2	112.85	2.97	1861
	2.5	102.66	2.81	1596
	3	98.09	2.67	1364

5.4.1. Ø54 mm borularda darbe sonrası basma (CAI) deney sonucu

Ø54 mm CTP kompozit boruların basma (CAI) sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17’de toplu olarak verilmiştir. Darbe hasarının basma deneylerinde etkisinin anlaşılabilmesi için hasarsız numunelerde basma deneyi yapılmış ve Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiğine eklenmiştir. Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Çizelge 5.2 birlikte incelendiğinde, her beş numunede özellikle deplasman ve hasar gelişimi açısından belirgin farkların olduğu görülmektedir. Hasarsız numunede yük artışıyla beraber birim uzamada CTP kompozit boru konfigürasyonuna uygun bir eğilimde gelişme olduğu görülmektedir. Hasarsız numune yaklaşık 5.27 mm şekil değiştirme sonucunda ani bir şekilde sonuç hasarına ulaşmıştır. 4.25 mm deplasman 116 MPa gerilme değerinden sonra yük artışının azalması ve şekil değişiminin artıyor olması CTP boruda oluşan hasarların numune genelinde ilerlemeli bir hasarın gerçekleşmesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanabilir. 119.30 MPa yüksek bir gerilme değerinde yıkımsal bir hasar sonucunda ani yük düşüşü ile deney sonlanmıştır. 1.5 m/s hızda darbe hasarlı numunede genel olarak hasarsız gibi davranmakla beraber 3.82 mm şekil değişimi 117.5 MPa gerilme değerinden sonra darbe bölgesinde ilerlemeli bir hasar oluşumu gözlenmiştir.



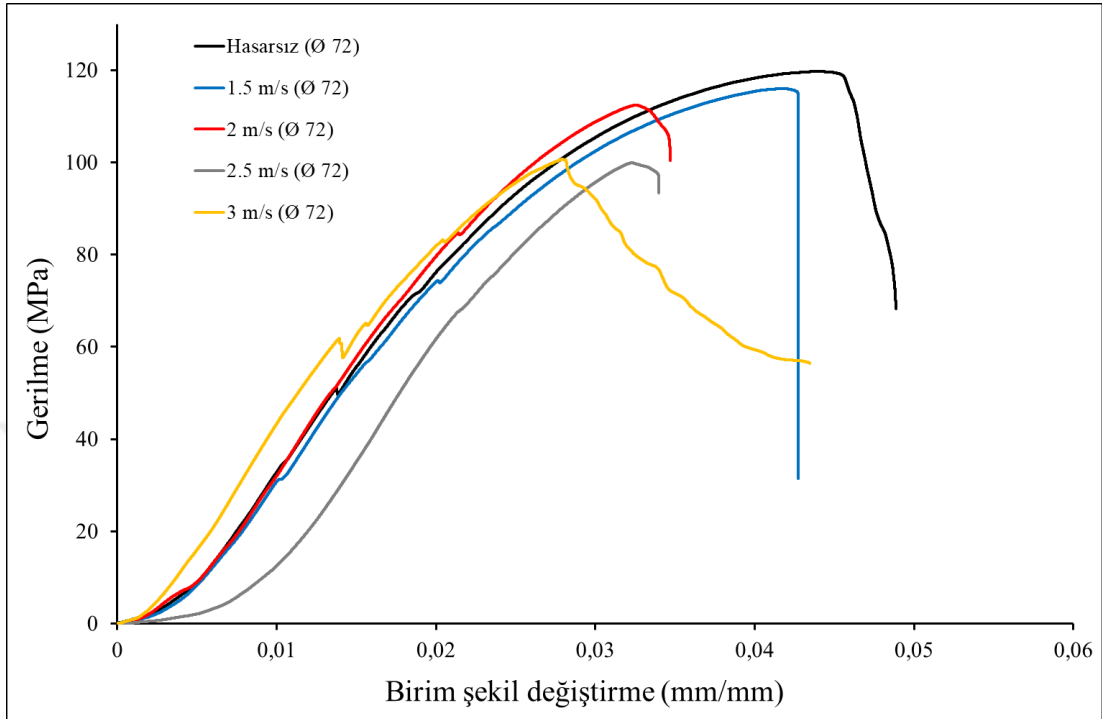
Şekil 5.17. Ø54 mm CTP kompozit boruların basma sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği

Yaklaşık 4.66 mm deplasman ve 122.23 MPa gerilme değerinde ani bir şekilde sonuç hasarına ulaşmıştır. 2 m/s hızda darbe hasarlı numunede yaklaşık 2.53 mm deplasman ve 107.8 MPa gerilme değerinde darbe bölgesinde gerçekleşen lokal burkulmadan kaynaklı bir yük düşüşü gerçekleşmiştir. Bu aşamada ilerlemeli hasar başlamış ve 2.85 mm deplasman 110.21 MPa gerilme değerine kadar yük artışı devam etmiş ve hasar gelişimi hızlanmıştır. 2.5 ve 3 m/s hızlarda 2.91 ve 2.96 mm gibi yakın bir deplasmanda darbe bölgelerinde oluşan lokal burkulmadan kaynaklı yıkımsal hasar oluşum başlangıcı gerçekleşmiştir. 4.01 ve 4.10 mm deplasman değerine kadar hasar elyaf doğrultusunda ilerlemeli olarak devam etmiş ve sonuç hasarları gerçekleşmiştir.

5.4.2. Ø72 mm borularda darbe sonrası basma (CAI) deney sonucu

Ø72 mm CTP kompozit boruların basma (CAI) sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.18'de toplu olarak verilmiştir. Şekil 5.16 ve Şekil 5.18 birlikte incelendiğinde, Ø72 mm hasarsız CTP kompozit boruların Ø54 mm boruya yakın bir eğilim göstermiş fakat 119.7 MPa gerilme değerinde deplasman 4.56 mm değerine kadar ulaşabilmiştir. Bu numunede Ø54 mm borudan farklı olarak yıkımsal hasarın tersine 4.56 mm'den 4.90 mm deplasman değerine kadar flanşa yakın bölgede CTP boru çevresince lokal burkulma şeklinde sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Hasarsız numunede hasarlı numunelere kıyasla hasar gelişimi matris çatlak sesleri ile başlamış ve matris hasarının yoğun olduğu bölgede lokal burkulma hasarına dönüşmüştür. 1.5 m/s hızda darbe hasarına uğrayan numune hasarsız numuneye kıyasla 4.18 mm deplasmanda 115.3 MPa gerilme değerinde darbe hasar bölgesinden başlayarak şiddetli bir yıkımsal hasarla sonuç hasarına ulaşmıştır. 2 m/s hızda hasarlanan numune 3.26 mm deplasman ve 112.45 MPa gerilme değerine kadar rijitliğini korumuştur. Bu noktadan sonra darbe bölgesinde oluşan lokal burkulma hasarıyla birlikte 3.47 mm deplasman değerine kadar yıkımsal hasar devam etmiş ve sonuç hasarına ulaşmıştır. 2.5 m/s hızda hasarlanan numune 2 m/s hasarlanan numuneye benzer bir davranış sergilerken darbe hasar alanının daha büyük olması 3.23 mm deplasmanda 99.97 MPa gibi düşük bir gerilme değerinde darbe bölgesinden başlayan bir yıkımsal hasara uğramıştır. 3 m/s hızda hasarlanan numunede yıkımsal hasar yine darbe bölgesinden başlayan burkulma hasarıyla 2.79 mm deplasman ve 100.67 MPa gerilme değerinde gerçekleşmiştir. Bu numunede diğerlerinden farklı olarak ilk lokal burkulma darbe hasar bölgesinde 1.39 mm deplasman 61.7 MPa gerilme değerinde

gerçekleşmiştir. Numune bu hasar oluşumundan sonra yük taşımaya devam etmiş, yük artışı ile birlikte darbe hasar bölgesinde oluşan yoğun delaminasyon hasarının etkisi ile küçük çaplı lokal burkulmalar devam etmiştir.

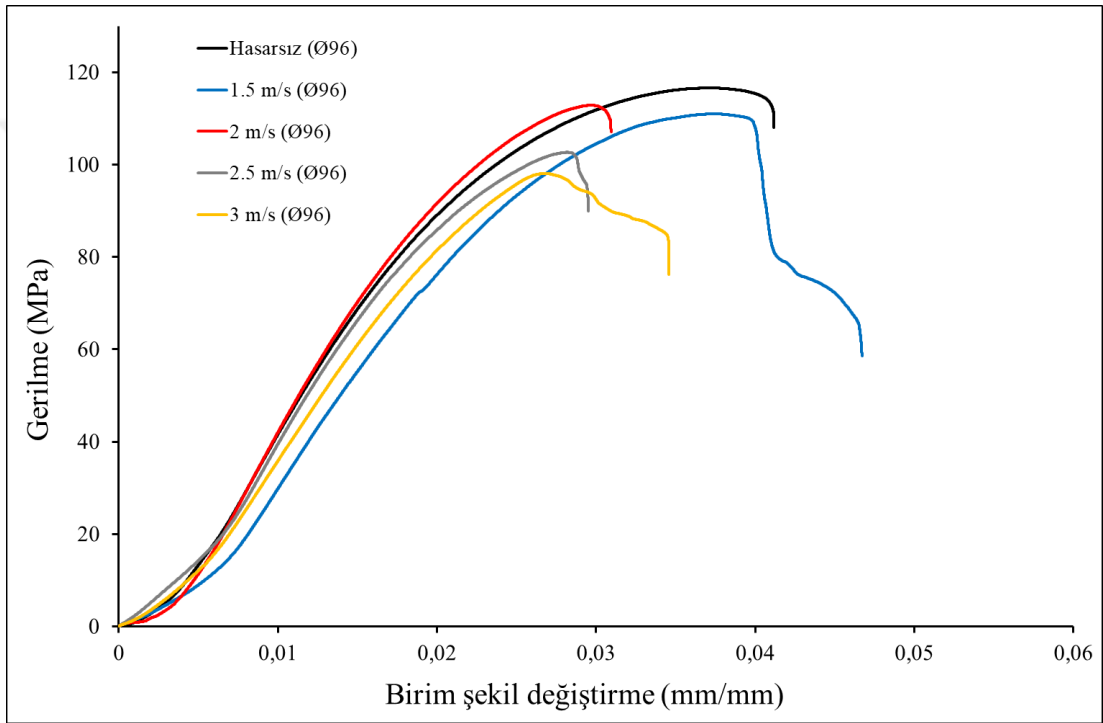


Şekil 5.18. Ø72 mm CTP kompozit boruların basma sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği

5.4.3. Ø96 mm borularda darbe sonrası basma (CAI) deney sonucu

Ø96 mm CTP kompozit boruların basma (CAI) sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.19'da toplu olarak verilmiştir. Şekil 5.16 ve Şekil 5.19 birlikte incelendiğinde, hasarsız ve 1.5 m/s hızda darbe hasarı oluşturulan numuneler Ø54 ve Ø72 mm numunelere benzer bir eğilim göstermiştir. Hasarsız numune 116.56 MPa gerilme değerine kadar çıkarken 3.73 mm deplasman değerinden sonra yıkımsal hasara uğramıştır. 1.5 m/s hızda darbe hasarı oluşturulan numune 3.75 mm deplasman ve 110.99 MPa gerilme değerinde hasarsız numune gibi davranmış ve darbe hasarının etkisi görülmemiştir. Her iki numunede flanşa yakın bölgelerde CTP boru çapı çevresinde lokal burkulma hasarı şeklinde sonuç hasarına uğramıştır. Bunun sebebi olarakta çap artışıyla birlikte darbe hasarının daha küçük oluşması ve basma hasarını yönlendirememesi olarak yorumlanabilir. 2 m/s hızda darbe hasarı oluşturulan numune 3 mm deplasman 112.85 MPa gerilme değerinden sonra darbe bölgesinde oluşan lokal burkulmanın neden olduğu bir yıkımsal hasara uğramıştır.

3.1 mm deplasman değerinden sonra lokal burkulma hasarı elyaf doğrultusunda çatlak oluşturmaya yönlendirmiş ve sonuç hasarı oluşmuştur. 2.5 m/s hızda darbe hasarı oluşturulan numunede yıkımsal hasar 2.81 mm deplasman ve 102.66 MPa gerilme değerinde başlamıştır. 3 m/s hızda darbe hasarı oluşturulan numunede 2.67 mm deplasman ve 98.09 MPa gerilme değerinde yıkımsal hasar darbe bölgesinde lokal burkulma hasarıyla başlamıştır. 2.5 m/s ve 3 m/s hızlı darbe hasarlı numuneler darbe hasar alanının büyük olması sebebi ile düşük gerilme ve deplasman değerlerinde yıkımsal hasara uğramışlardır.

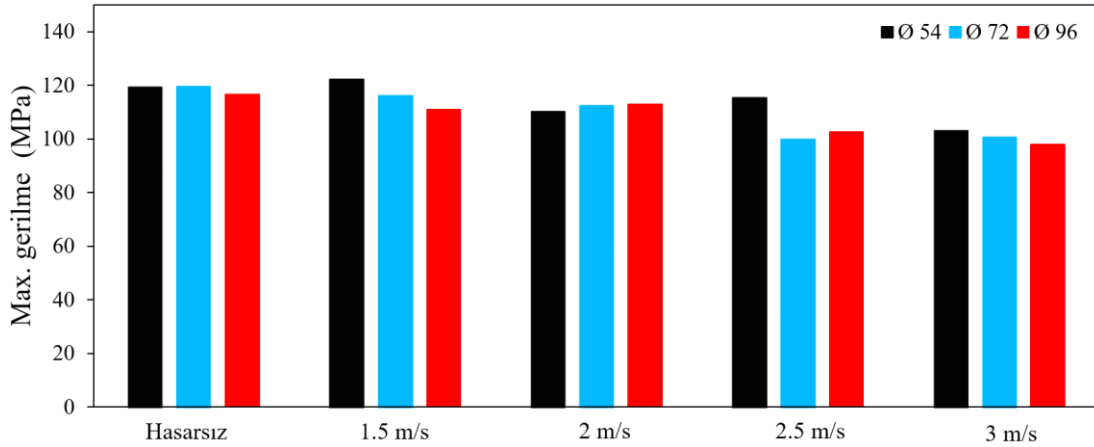


Şekil 5.19. Ø96 mm CTP kompozit boruların basma sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği

5.4.4. Basma sonrası gerilme, deplasman ve tokluk karşılaştırması

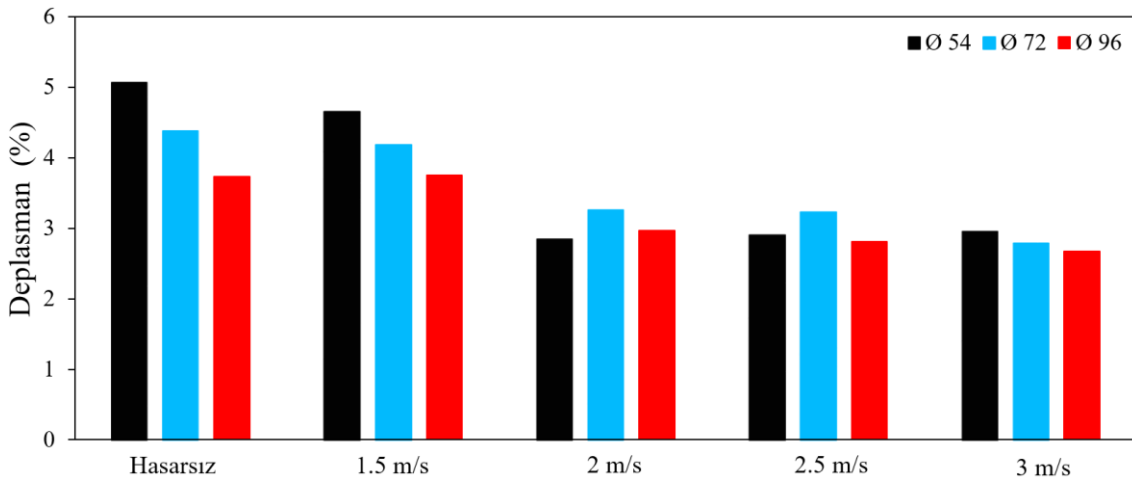
CTP kompozit boruların basma (CAI) sonrası elde edilen sayısal veriler ışığında her üç çapta borulara uygulanan yüke tekabül eden maksimum gerilme değerleri Çizelge 5.2'de ve Şekil 5.20'de çubuk grafiği şeklinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çizelge 5.2'de sunulan veriler Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiklerinde maksimum gerilme değerinden sonra oluşan yıkımsal hasarın başladığı noktalar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Şekil 5.20 genel olarak incelendiğinde düşük hızlı darbe temas hızı arttıkça bütün çaplarda maksimum gerilme değerlerinde bir azalma söz konusudur. Ancak bu fark 2.5 m/s ve 3 m/s hızlarda darbe hasarına uğramış numunelerde daha net

görülmektedir. Bütün çaplarda gerilmelerdeki düşüş darbe hasarının yoğunluğundan kaynaklanığı yorumu yapılabilir.



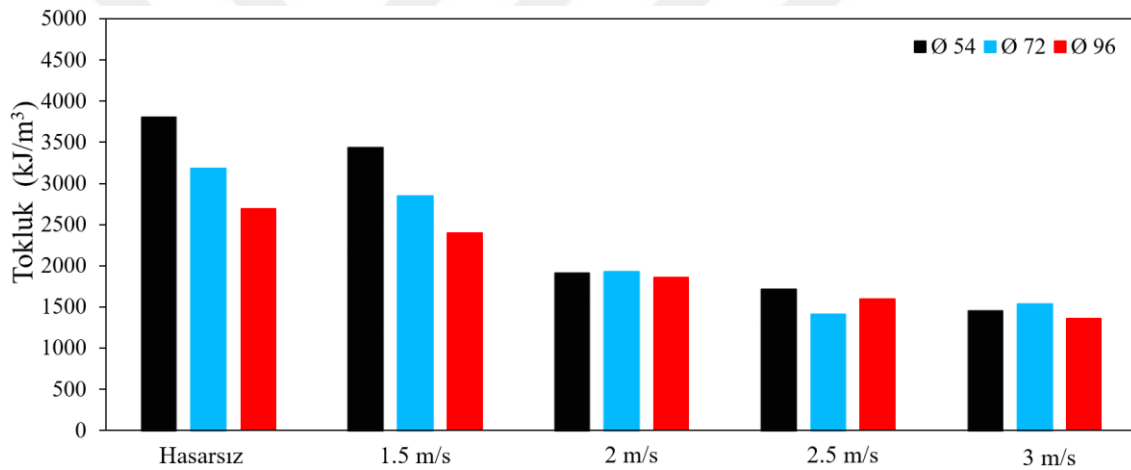
Şekil 5.20. Basma deneyi sonrası CTP borularda Max. Gerilme analizi

Şekil 5.21’de verilen deplasman değişim grafiği incelendiğinde, darbe hasarlı numuneler hasarsız numunelerle karşılaştırıldığında darbe temas hızı arttıkça basma sonuç hasarına ulaşana kadar gerçekleşen deplasmanlarda belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Darbe temas hızı arttıkça borularda oluşan darbe hasar yoğunluğu artmakta ve bunun eşliğinde basma deneylerinde darbe hasar kaynaklı erken hasar oluşmaktadır. Hasarsız numuneler incelendiğinde çap artışıyla beraber her üç borunun boyları aynı olmasına rağmen deplasmanda azalma olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda küçük çaplı boruların basma deneylerinde şekil değiştirmeye elverişli olduğu anlaşılmaktadır. 2 m/s ve 2.5 m/s hızlarda hasar görmüş boruların deplasman değişimindeki farklılıklar boru geometrisinin hasar oluşumuna gösterdiği cevap ve hasar oluşum şekli ile alakalı olduğu yorumlanabilir.



Şekil 5.21. Basma deneyi sonrası CTP borularda Deplasman analizi

Darbe sonrası basma (CAI) deneyi verilerinden elde edilen tokluk değişim grafiği Şekil 5.22’de verilmiştir. Öncelikle hasarsız numuneler incelendiğinde CTP kompozit boru çapının artışıyla tokluğunun azaldığı görülmektedir. Darbeli borular incelendiğinde, darbe temas hızı arttıkça bütün boruların tokluğunda azalma gerçekleştiği görülmektedir. CTP kompozit borularda lokal olarak oluşan darbe hasar bölgelerinin borunun hasar gelişiminde önemli bir rol oynadığı buradan da anlaşılmaktadır. Lokal oluşan darbe hasarının genişliği ve yoğunluğu kompozit boruların basma yüküne karşı cevabını olumsuz yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Özellikle 2 m/s ve üstü darbe hızlarında tokluktaki ani düşüş, kompozit borunun bütününde kademeli yani ilerlemeli hasar oluşumu gerçekleşmeksizin yıkımsal hasarın başlaması şeklinde yorumlanabilir. Borulara uygulanan darbe hasarı ilerlemeli hasarın önüne geçmiş boru genelinde beklenen hasar oluşumunu engellemiştir.



Şekil 5.22. Basma deneyi sonrası CTP borularda Tokluk analizi

5.5. Darbe Sonrası Basma Deney (CAI) Numunelerinin Hasar Analizi

Düşük hızlı darbe hasarı oluşturulan kompozit borular darbe sonrası basma (CAI) davranışlarının belirlenebilmesi için basma testlerine tabi tutulmuştur. 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s temas hızlarında darbe hasarına uğramış numunelerin darbe hasar bölgelerinde yüzey matris çatlakları, iç yüzey matris çatlakları, dairesel matris çatlakları, tabakalar arası delaminasyon transfer çatlakları, delaminasyonlar, tabaka içi radyal çatlakları, mikro matris çatlakları, debonding ve elyaf kırılma hasarlarının olduğu makro/mikro hasar analizlerinde tespit edilmiştir. Tespit edilen bu hasar modlarının yoğunluğu CTP kompozit borulara darbe esnasında uygulanan temas hızı değeri arttıkça hasar yoğunluğunda da artış görülmeye başlanmıştır. En yüksek 3 m/s temas hızında

hasarlandırılan numunelerde söz konusu hasar modlarının hepsi görülmektedir. Oluşan hasarlar CTP boruların çaplarının artışıyla nisbeten azalma eğiliminde olduğu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Ø54 mm CTP kompozit boruların geometrisinin verdiği dezavantajlarından biride yüksek darbe hızlarında dar bir darbe hasar alanında bütün hasar modlarının bir arada görülmesidir. Ø96 mm CTP kompozit boruların geniş bir geometride olması Ø54 mm CTP kompozit borulara kıyasla uygulanan temas kuvvetinin oluşturduğu enerjinin çoğunluğunu vurucunun geri sekmesinde kullanarak yutulan enerji miktarını azaltmasına neden olmuştur. Yutulan enerjinin azalması CTP kompozit borularda oluşan hasar modlarının azalması anlamına gelmektedir. Geometrik avantajından dolayı Ø96 mm CTP kompozit borularda en yüksek temas hızlarında bile bütün hasar modları görülmemiştir. Bu numunelerde oluşan hasarlar çoğunlukla delaminasyon hasarı ve bileşenleri şeklinde kendini göstermiştir. Bütün bu durumlar dikkate alındığında hem temas hızının artışı hemde CTP boru çapındaki artış darbe sonrasında basma (CAI) sonuçlarını etkilemesi kaçınılmaz olduğu anlaşılmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde; darbe esnasında vurucunun temas hızının artışıyla lokal olarak oluşan hasar yoğunluğu CTP kompozit borularda mukavemet, deplasman ve tokluğunda düşümlere neden olmaktadır. Aynı temas hızlarında hasarlandırılmış farklı çaplarda borular birlikte değerlendirildiğinde; çap artışıyla darbe temas hızının etkisinin azaldığı, bununla beraber lokal oluşan hasar bölgesi ve hasar yoğunluğunun azaldığı ve mukavemet, deplasman ve tokluklarında artışın gerçekleştiği deneysel çalışma sonrasında anlaşılmıştır. Aynı çaplarda boruların farklı hızlarda darbe ön hasarın etkisini incelemek için darbe sonrası basma testlerinin hasar analizleri yapılmıştır.

5.5.1. Ø54 CTP borularda basma sonrası hasar analizi

Farklı temas hızlarında darbe ön hasara uğratılmış Ø54 CTP kompozit borular darbe sonrası basma (CAI) testlerine tabi tutulmuş ve basmaya karşı davranışları incelenmiştir. Numunelerin darbe sonrası davranışlarının ve darbe etkisinin sağlıklı yorumlanabilmesi için hasarsız borulara basma testleri gerçekleştirilmiştir. Basmaya maruz bırakılan Ø54 CTP kompozit boruların hasar sonrası görüntüleri toplu olarak Şekil 5.23'de verilmiştir. Hasarsız numunede hasar oluşumu, numune genelinde beyazlaşma başlangıcı, yüklemenin devam etmesi ile yoğun beyazlaşma ve belli bir yük seviyesinde matris çatlak seslerinin duyulmaya başlaması şeklinde ilerlemeli bir hasar oluşumu gözlenmiştir. 4.29 mm deplasman ve 117 MPa gerilme seviyesinde yoğun

beyazlaşmanın en belirgin noktasında yıkımsal hasarın başladığı gözlenmiştir. 5.27 mm deplasman değerine kadar yıkımsal hasar devam etmiş ve sonuç hasarı kayma gerilmelerinin etkisi ile $\pm 55^\circ$ elyaf sarım açıları doğrultusunda yarıma şeklinde gerçekleşmiştir. Hasarsız borunun basma hasar bölgesi ve oluşan hasarlar Şekil 5.23a'da ayrıntılı olarak verilmiştir. Deney sonrasında hasarsız numune incelendiğinde deney esnasında numunenin alt kısmında flanşa yakın bölgede ilerlemeli hasarın lokal burkulma hasar seviyesine kadar ilerlediği görülmüştür.



Şekil 5.23. Ø54 CTP borularda basma deneyi sonrası oluşan hasar görüntüleri

1.5 m/s temas hızında darbe ön hasarı oluşturulan numunede hasar oluşumu, hasarsız numuneye benzer şekilde ilerlemiş fakat yıkımsal hasar davranışı 4.48 mm ve 4.84 mm gibi daha düşük deplasman aralığında darbe hasar bölgesinden başlamıştır. Matris çatlak seslerinin darbe bölgesinde oluşan lokal burkulma ile başladığı, burkulmanın etkisiyle darbe hasarı içerisinde bulunan delaminasyonların borunun dış ve iç kısmına doğru kabarak lokal burkulmalara dönüştüğü gözlemlendi. Lokal burkulmanın etkisiyle darbe delaminasyon bölgesinden başlamak üzere -55° elyaf sarım açısı

doğrultusunda yarıлма şeklinde yıkımsal hasara dönüştüğü görülmüştür. 2 m/s, 2.5 m/s ve 3 m/s temas hızlarında darbe ön hasarı oluşturulan numunelerde hasar oluşumu benzer davranışlar göstermiştir. Bu numuneler arasında oluşan basma hasarına uygulanan darbe hızlarının etkisi deplasmandan ziyade tokluklarında gerçekleşen düşüş ve oluşan basma hasarının alanı incelendiğinde daha net anlaşılmaktadır. Deney sonrasında elde edilen veriler vasıtasıyla yapılan tokluk hesaplamalarında sırasıyla; 1919, 1718 ve 1459 kJ/m³ değerleri elde edilmiş ve uygulanan darbe hızlarındaki artışla CTP kompozit boruların basma deneylerinde tokluklarının azaldığını bariz bir şekilde sergilemiştir (Çizelge 5.2). Şekil 5.23ab’de verilen basma hasar alanları incelendiğinde, darbe hızlarının artışıyla delaminasyon hasar bölgelerinde arttığı bununla beraber basma hasar alanlarında arttığı kompozit borunun dış ve iç kısımlarından alınan görüntülerden bariz bir şekilde anlaşılmaktadır.

5.5.2. Ø72 CTP borularda basma sonrası hasar analizi

Ø72 CTP kompozit boruların darbe sonrası basma (CAI) testlerinden elde edilen hasarlı numunelerin hasar fotoğrafları Şekil 5.24’de toplu olarak verilmiştir. Hasarsız numune incelendiğinde, Ø54 CTP kompozit boruların basma hasarına benzer bir davranış sergilese de çap farkından kaynaklı olarak yıkımsal hasar flanşa yakın bölgede ilerlemeli hasarla beraber boru çap çevresinde lokal burkulmalarla gerçekleşmiştir. 2.91 mm deplasman 103 MPa gerilme değerinde boru yüzeyinde elyaf sarım açısı doğrultusunda başlayan beyazlaşmalar yük arttıkça elyaf şeritleri halinde görülmeye başlanmıştır. 4 mm deplasman ve 118.4 MPa gerilme değerlerinde numunenin üst kısmında yoğun matris çatlak seslerinin duyulmasıyla hasarın hızlı bir şekilde yoğun beyazlaşmaya ilerlediği ve akabinde 4.5 mm deplasman değerinde lokal burkulmalara dönüştüğü görülmüştür. Lokal burkulmanın etkisiyle oluşan delaminasyon hasarları bölgesel olarak borunun dışına ve içine doğru yönlendirilerek yıkımsal hasar oluşumuna müsaade etmiştir. 1.5 m/s temas hızında darbe ön hasarı oluşturulan numunede hasar 4 mm deplasman 114 MPa gerilme değerine kadar hasarsız numuneye benzer bir basma hasar davranışı sergilemiştir. Hasarsız numune kadar yoğun beyazlaşma oluşmadan darbe hasar bölgesinde matris çatlak seslerinin duyulmasından hemen sonrasında 4.18 mm deplasman ve 115.98 MPa gerilme değerinde darbe hasar bölgesinden başlayarak ±55° elyaf sarım açıları doğrultusunda şiddetli bir yarıлма hasarı ile yıkımsal hasar gerçekleşmiştir. Oluşan hasarın şiddeti ile yarıлма hasarı elyaf doğrultusunda bütün

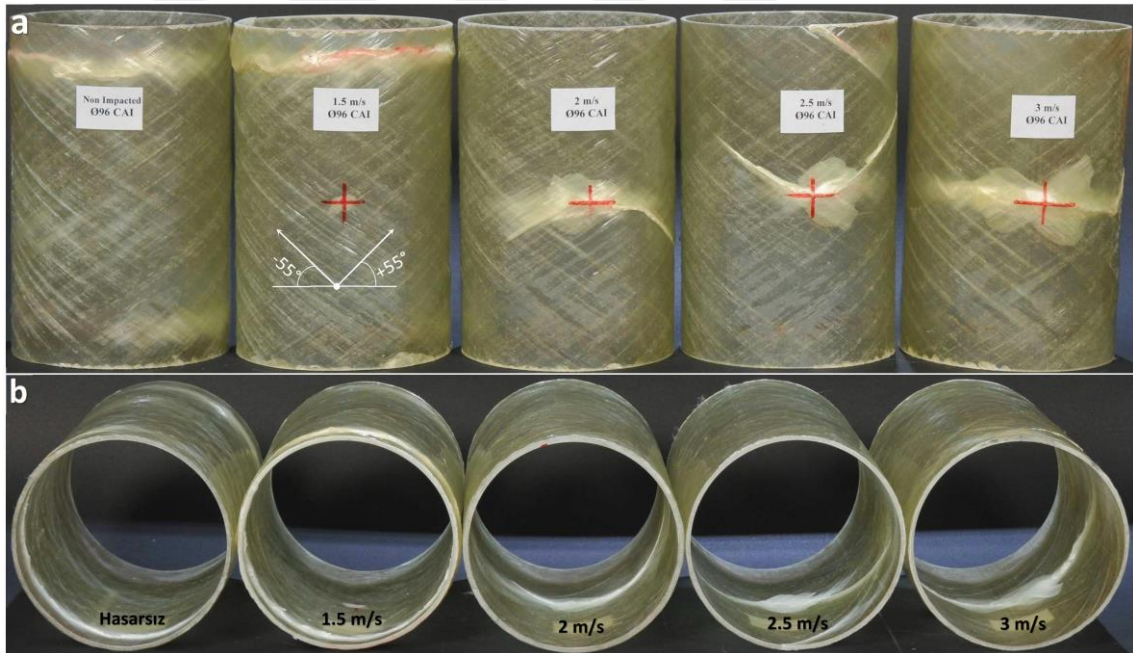
numuneyi dolaşarak sonuç hasar oluşumunu tamamlamıştır. 2 m/s ve 2.5 m/s temas hızlarında darbe ön hasarı oluşturulan numunelerde hasar oluşumu benzer davranışlar göstermiştir. Yaklaşık 3.2 mm deplasman değerine kadar basma yükünü karşılayan numuneler sırasıyla 112.45 MPa ve 99.97 MPa gerilme değerlerinde darbe hasar bölgelerinden oluşan lokal burkulma hasarı ile $+55^\circ$ elyaf sarım açıları doğrultusunda yarıлма şeklinde yıkımsal hasara uğramışlardır. 3 m/s temas hızında hasara uğrayan numune diğerlerinden farklı olarak ani bir yıkımsal hasar gerçekleşmeksizin ilerlemeli bir hasar sergileyerek sonuç hasara uğramıştır. 2.79 mm gibi düşük deplasman 100.67 MPa gerilme değerinde darbe hasar bölgesinde oluşan yeni matris çatlakları ve lokal burkulma etkisiyle ilerlemeli bir hasar oluşumu gözlenmiştir. Darbe hasar alanının genişliği CTP kompozit borunun gevrek kırılmasını engellemiş ve darbe hasar alanının her iki ucundan başlamak suretiyle $+55^\circ$ elyaf sarım açıları doğrultusunda hasar ilerlemeye devam etmiştir. Oluşan hasar sarım açısı doğrultusunda bütün numuneyi dolaşmış ve darbe hasar bölgesinde ezilme olmasına rağmen yük taşımaya devam etmiştir. Numunede oluşan yoğun hasar sonrasında deney sonlandırılmıştır. Ø72 CTP kompozit boruların basma testlerinde hasar başlangıcını darbe hasarının yönlendirdiği ve darbe hasar alanının genişliğinin hasar gelişimini önemli ölçüde etkilediği deneysel çalışma sonuçlarından anlaşılmıştır.



Şekil 5.24. Ø72 CTP borularda basma deneyi sonrası oluşan hasar görüntüleri

5.5.1. Ø96 CTP borularda basma sonrası hasar analizi

Şekil 5.25’de Ø96 CTP kompozit boruların darbe sonrası basma (CAI) testlerinden elde edilen hasarlı numunelerin hasar fotoğrafları toplu olarak verilmiştir. Hasarsız ve 1.5 m/s temas hızında darbe ön hasarlı numune basma testinde benzer bir hasar davranışı göstermiştir. Her iki numunede yaklaşık 3.75 mm deplasman değerinde sırasıyla 116.56 MPa ve 110.99 MPa gerilme değerlerinde sonuç hasarına ulaşmıştır. Her iki numunede de 3.55 mm deplasman değerine kadar elyaf doğrultusunda sırasıyla beyazlaşmalar, lokal yoğun beyazlaşma ve matris çatlak sesileri gibi ilerlemeli hasar davranışı göstermiştir. 3.65 mm deplasman değerinde bütün boru çapını çevreleyen bir yoğun bayazlaşma bölgesinin oluşumu ile lokal burkulmalarının gerçekleşmesi ve hızlı bir şekilde ilerlemesi düşük bir deplasman değerinde sonuç hasarının gerçekleşmesine yol açmıştır.



Şekil 5.25. Ø96 CTP borularda basma deneyi sonrası oluşan hasar görüntüleri

Ø54 ve Ø72 mm CTP kompozit borularından daha düşük deplasman değerlerinde yıkımsal hasara uğraması kompozit boru çapının büyük olması ve bununla beraber yük taşıma alanının daha geniş olmasından kaynaklanmaktadır. 1.5 m/s temas hızında darbe ön hasarlı numune de darbe hasarı oluşmasına rağmen hasar flanşa yakın bölgede gerçekleşmiş ve numune hasarsız gibi davranmıştır. 2 m/s temas hızında darbe ön hasarlı numune 2.97 mm deplasman değerinde hasarsız ve 1.5 m/s hızla

hasarlandırılmış numuneden geri kalırken, 112.85 MPa gerilme değerinde bir miktar yüksek çıkmıştır. Bu çalışmada hasarın etkisini deplasman ve tokluk değerlerinde daha net gördüğümüz için beklenen bir hasar davranışı gösterdiği yorumu yapılabilir. Ø96 CTP kompozit boruların basma (CAI) hasarı 2 m/s hız ve üzeri değerlerde oluşan darbe hasar mekanizmalarından kaynaklı olarak diğer çaplardan farklı bir davranış sergilemiştir. Uygulanan yükün artışıyla darbe hasar bölgesinde basma kaynaklı yeni matris çatlaklarının oluştuğu ve bu çatlakların borunun çap çevresine doğru yayıldığı gözlenmiştir. Boru yüzeyinde oluşan matris çatlakları akabinde delaminasyon alanının genişlemesi ile ilerlemeli bir hasar gelişimi sergilemiştir. Şekil 5.25ab ve Şekil 5.19 birlikte dikkatli incelendiğinde darbe hasar bölgesinin oluşan lokal burkulmanında etkisi ile çap doğrultusunda genişlediği ve özellikle 2.5 ve 3 m/s hızlarda burkulma sonrası ezilmesinde oluştuğu belirlenmiştir. Aynı davranışların kompozit borunun iç yüzeylerinde de oluştuğu dikkate alındığında darbe ön hasarının oluşturduğu delaminasyon ve bileşenlerinin basma hasarında direkt etkili olduğu, diğer numunelerden çapsal olarak daha büyük olması kompozit plakaların hasarına benzer bir davranış sergilemesine müsaade ettiği yorumu yapılabilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, yükleme esnasında artış kısmından sonra oluşan salınımlar numuneler üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang ve Vu-Khanh 1994). Temas kuvvetinin artışı ile numunede oluşan çökme miktarı artmış dolayısıyla bu durum hasar miktarını da artırmıştır. Temas kuvveti en büyük değerine ulaşıncaya kadar hasar gelişiminin hızla devam ettiği bilinmektedir.

Kompozit borulara uygulanan temas hızları arttıkça temas kuvvetlerinde ve temas sürelerinde artış olduğu görülmüştür. CTP kompozit boru çapındaki artış ile temas kuvvetlerinde azalma olduğu fakat bu durum karşısında temas sürelerinde artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. 3 m/s hızda Ø54 kompozit numuneye kıyasla Ø72 ve Ø96 borularda temas kuvvetlerinde sırasıyla %7 ve %15.3 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bununla beraber temas sürelerinde sırasıyla %8.2 ve %15.7 oranlarında artış gerçekleşmiştir.

Kuvvet-deplasman grafikleri incelendiğinde, kompozit boru çapında gerçekleşen artışın kuvvete bir azalışa sebep olmasına rağmen deplasman değerinde ciddi bir artışa sebep olduğu anlaşılmıştır. 3 m/s hızda Ø54 kompozit numuneye kıyasla Ø72 ve Ø96 borularda maksimum deplasman değerlerinde sırasıyla %21.2 ve %36.1 oranlarında artış gerçekleşmiştir. Kompozit borularda hasarın deplasman kontrollü olduğu düşünüldüğünde çap artışıyla oluşan deplasmanın bu kapsama girmediği belirlenmiştir.

Enerji zaman grafikleri incelemelerinde; her üç boruyu kendi içinde yutulan enerjiler arasında bir karşılaştırma yapılacak olursa darbe hızı arttıkça yutulan enerji miktarlarının da arttığı görülmektedir. Düşük hızlarda yutulan enerji miktarlarının fazla olduğu, hızın artmasıyla her enerji seviyesinde yutulan enerji miktarlarında azalışın olduğu görülmektedir. Farklı çaplarda bu durumu değerlendirdiğimizde, her enerji seviyesinde çap artışıyla yutulan enerji miktarlarında azalmanın ve geri sekme enerjilerinde artış olduğu görülmüştür. 3 m/s hızda Ø54 kompozit numuneye kıyasla Ø72 ve Ø96 borularda absorbe edilen enerji sırasıyla % 13.3 ve %19.2 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bu durum CTP kompozit borularda oluşan hasarla direk ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Düşük hızlı darbe sonrası yapılan makro hasar analizinde gözle görülebilen hasarlar net bir şekilde incelenebilmektedir. Fakat kompozit malzemelerin kesiti içerisinde oluşan; delaminasyon, radyal matris çatlakları, debonding, elyaf kırılmaları, tabakalar arası transfer çatlakları ve mikro matris çatlaklarının görüntülenebilmesi için mikro hasar analizlerinin de yapılması gereklidir. Optik ve SEM analiz incelemeleri sayesinde darbe hasar alanı içerisinde oluşan hasar modları belirlenebilmiş, bu sayede darbe sonrası basma (CAI) hasarları daha sağlıklı yorumlanabilmiştir.

Hasarsız numunelerin deneylerinde kompozit boru çaplarında artışla basma yüklerinde artışın gerçekleşmiş ve bunun yanında deplasman da belirgin düşüşlerin olduğu gözlenmiştir.

Darbe sonrası basma (CAI) deneylerinde farklı darbe hızlarında hasarlandırılmış aynı çaptaki borularda; darbe hızları arttıkça basma esnasında yıkımsal hasarın başladığı deplasmanlarda ciddi düşüşlerin gerçekleştiği görülmüştür. Ø54, Ø72 ve Ø96 borularda hasarsız numune ile 3 m/s hızda darbe ön hasarı oluşturulan numuneler kıyaslandığında, deplasmanlarda sırasıyla %41.6, %38.8 ve %28.4 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Maksimum gerilme değerlerinde sırasıyla %13.5, %15.8 ve %15.8 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

Her üç farklı kompozit boruda da darbe hasarının basma hasarını yönlendirdiği tespit edilmiştir. Darbe hasarlı borularda, hız arttıkça ilerlemeli hasar oluşumu boru genelinde oluşmaksızın darbe hasar bölgesinde gerçekleşmiştir. Basmanın etkisiyle yeni matris çatlaklarının oluştuğu ve delaminasyonların yük artışıyla genişleyerek yıkımsal hasarı hızlandırdığı tespit edilmiştir.

Yıkımsal hasar; hasarsız borularda genel olarak flanş bölgesinde bölgesel burkulma hasarı şeklinde gerçekleşirken, darbe hasarlı borularda darbe bölgesinden başlayarak elyaf sarın açısı doğrultularında yarıma şeklinde gerçekleşmektedir.

Basma testlerinde, sonuç hasar oluşumu, darbe hasar alanının genişlemesi ile başlamakta ve büyüyen delaminasyonların borunun iç ve dış kısımlarına burkulma hasarıyla devam etmektedir. Burkulma hasarının ve şekil değişimin etkisiyle kompozit boru elyaf sarım açısı doğrultusunda şiddetli bir şekilde yarılmış ve çoğunlukla oluşan yarıma borunun etrafını dolaşarak sonuç hasarını gerçekleştirmiştir.

6.2. Öneriler

Darbe sonrası basma (CAI) deneylerinin filaman sarım kompozit borularda farklı elyaf sarım açısı konfigürasyonlarında üretimi yapıp, sarım açısının düşük hızlı darbe ve darbe sonrası basma cevabının belirlenebilmesi ile ilgili çalışmaların devam ettirilmesi literatüre yenilik katacaktır.

Bu çalışmada yapılan ve önerilen bütün çalışmalar farklı elyaf takviye türleri ile de tekrarlanabilir. Bu durumda filaman sarım kompozit borularda elyaf takviye türünün darbe cevabı ve darbe sonrası basma davranışlarının incelenmesi ile ilgili çalışmalar yapılarak literatüre bir yenilik eklenebilir.



KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1991, Impact on laminated composite materials, *Applied mechanics reviews*, 44(4), 155-190.
- Abrate, S., 1998, Impact on composite structures. Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.
- Aktaş, M., Karakuzu, R., & Arman, Y., 2009, Compression-after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures, *Composite Structures*, 89(1), 77-82.
- Ataollahi, S., Taher, S. T., Eshkoor, R. A., Ariffin, A. K., & Azhari, C. H., 2012, Energy absorption and failure response of silk/epoxy composite square tubes: Experimental, *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 542-548.
- Bambach, M. R., Elchalakani, M., & Zhao, X. L., 2009, Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact, *Composite Structures*, 87(3), 282-292.
- Cerit, M. E., 2011, Şehirler arası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 139s.
- Curtis, J., Hinton, M. J., Li, S., Reid, S. R., & Soden, P. D., 2000, Damage, deformation and residual burst strength of filament-wound composite tubes subjected to impact or quasi-static indentation, *Composites Part B: Engineering*, 31(5), 419-433.
- Deniz, M., Karakuzu, R., Sari, M., & Icten, B., 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., & 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., & Icten, B. M., 2013, Transverse impact and axial compression behaviors of glass/epoxy pipes subjected to seawater and impact loading, *International Journal of Damage Mechanics*, 22(7), 1071-1085.
- Doyum, A. B., & Altay, B., 1997, Low-velocity impact damage in glass fibre/epoxy cylindrical tubes, *Materials & Design*, 18(3), 131-135.
- Gemi, L., 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 82s.
- Gemi, L., 2014, Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 164s.
- Gemi, L., 2018, Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study, *Composites Part B: Engineering*, 153, 217-232.

- Gemi, L., Kara, M., & Avci, A., 2016, Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes, *Composites Part B: Engineering*, 106, 154-163.
- Gemi, L., Kayrıçı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S., & Şahin, Ö. S., 2018, Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes, *Composites Part B: Engineering*, 149, 38-48.
- Gemi, L., Şahin, Ö. S., & Akdemir, A., 2017, Experimental investigation of fatigue damage formation of hybrid pipes subjected to impact loading under internal pre-stress, *Composites Part B: Engineering*, 119, 196-205.
- 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.
- Guades, E., Aravinthan, T., Manalo, A., & Islam, M., 2013, Experimental investigation on the behaviour of square FRP composite tubes under repeated axial impact, *Composite Structures*, 97, 211-221.
- Güvensoy, S., 2010, Filaman sarım kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışının simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 70s.
- Jefferson Andrew, J., Arumugam, V., Saravanakumar, K., Dhakal, H. N., & Santulli, C., 2015, Compression after impact strength of repaired GFRP composite laminates under repeated impact loading, *Composite Structures*, 133, 911-920.
- Kakogiannis, D., Chung Kim Yuen, S., Palanivelu, S., Van Hemelrijck, D., Van Paeppegem, W., Wastiels, J., Nurick, G. N., 2013, Response of pultruded composite tubes subjected to dynamic and impulsive axial loading, *Composites Part B: Engineering*, 55, 537-547.
- Kara, M., 2012, Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 141s.
- Karadayı, S., 2012, Düşük hızlı darbe yükü altında tabakalı kompozit malzemelerin mekanik davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 175s.
- Lau, S. T. W., Said, M. R., & Yaakob, M. Y., 2012, On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing: A literature review, *Composite Structures*, 94(3), 803-812.
- Liu, Q., Ou, Z., Mo, Z., Li, Q., & Qu, D., 2015, Experimental investigation into dynamic axial impact responses of double hat shaped CFRP tubes, *Composites Part B: Engineering*, 79, 494-504.
- Mahdi, E., Hamouda, A. M. S., Sahari, B. B., & Khalid, Y. A., 2003, Effect of hybridisation on crushing behaviour of carbon/glass fibre/epoxy circular-cylindrical shells, *Journal of Materials Processing Technology*, 132(1), 49-57.

- Puhui, C., Zhen, S., & Junyang, W., 2002, A new method for compression after impact strength prediction of composite laminates, *Journal of Composite Materials*, 36(5), 589-610.
- Sinha, P.K., 2006, Composite materials and structures. *Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur*.
- Şahin, Ö., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışı. Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 150s.
- Tarakçıoğlu, N., Gemi, L., & Yapıcı, A., 2005, Fatigue failure behavior of glass/epoxy ± 55 filament wound pipes under internal pressure, *Composites Science and Technology*, 65(3), 703-708.
- Tarfaoui, M., Gning, P. B., Davies, P., & Collombet, F., 2006, Scale and size effects on dynamic response and damage of glass/epoxy tubular structures, *Journal of Composite Materials*, 41(5), 547-558.
- Uyaner, M., Kara, M., & Gemi, L., 2010, Filaman sarım E-camı/epoksi kompozit boruların düşük hızlı darbe sonrası mukavemeti, *Paper presented at the 13th International materials symposium (IMSP'2010)*, Denizli, 644-652.
- Wang, H., & Vu-Khanh, T., 1994, Damage extension in carbon fiber/PEEK crossply laminates under low velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 28(8), 684-707.
- Zorlu, M. F., 2016, Kompozit tüplerin aksenal basma kuvvetleri altında ezilme davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çorum, 85s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Dilek Soylu GEMİ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : 30.05.1981
Telefon : 03322243200
Faks : 03322631245
E-Posta : dsgemi@msn.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Sorgun Sağlık Meslek Lisesi,	Sorgun,	Yozgat	1999
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi,	Selçuklu,	Konya	2004
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi,	Selçuklu,	Konya	Devam
Doktora	:			

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2001	Darende Devlet Hastanesi, Malatya	Hemşire
2002	Cihanbeyli Devlet Hastanesi, Konya	Hemşire
2007	28 No lu Sağlık Ocağı Konya	Hemşire
2008	Siirt Devlet Hastanesi , Siirt	Makine Mühendisi
2009-Devam	Beyhekim Devlet Hastanesi, Konya	Makine Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Makine Mühendisi, Kompozit Malzemeler, Düşük Hızlı Darbe Testi, İşlenebilirlik, Hasar Analizi

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

Sağlık Bakanlığı bünyesinde;
 Bina Enerji Yöneticisi,
 Klinik mühendislik sorumluluğu,
 Teknik servis bakım ve onarımlar,
 Temiz oda havalandırması validasyon ve partikül ölçüm işlemleri vs. mühendislik sorumlulukları tarafımdan yürütülmektedir.

YAYINLAR

Gemi, L., Kayrııcı, M., Uludağ, M., **Gemi, D. S.**, & Şahin, Ö. S. (2018). Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes. *Composites Part B: Engineering*, 149, 38-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.006> (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

Gemi, L., Kayrııcı, M., Uludağ, M., **Gemi, D. S.**, & Şahin, Ö. S. (2018). Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Kompozit Boruların Darbe Davranışı ve Hasar Analizi. 1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC'xx18) (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U., & **Gemi, D. S.** (2019). An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation. *Composites Part B: Engineering*, 172, 186-194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.023>