



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARBON ELYAF TAKVİYELİ FİLAMAN
SARIM KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK
HIZLI DARBE CEVABININ İNCELENMESİ**

Ozan KEKÜÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ekim-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Ozan KEKÜÇ tarafından hazırlanan “Karbon Elyaf Takviyeli Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Cevabının İncelenmesi” adlı tez çalışması 24/10/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Danışman

Doç. Dr. Lokman GEMİ

Üye

Doç. Dr. Mürsel EKREM

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Ozan KEKÜÇ

Tarih: 24.10.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON ELYAF TAKVİYELİ FİLAMAN SARIM KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE CEVABININ İNCELENMESİ

Ozan KEKÜÇ

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Lokman GEMİ
Doç. Dr. Şakir YAZMAN**

2022, 83 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ
Doç. Dr. Lokman GEMİ
Doç. Dr. Mürsel EKREM**

Filaman sarım yöntemi ile üretilen KTP (Karbon Takviyeli Polimer) kompozit borular, endüstride sıklıkla tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. KTP kompozit borular üretim veya kullanım esnasında çeşitli nedenlerden dolayı farklı hızlarda veya enerji seviyelerinde darbe ve iç gerilme yüklemeleri ile karşılaşabilmektedir. Karbon borularda darbe yükü altında oluşan hasarlar mukavemet değerlerini ve servis ömürlerini önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışmada farklı çaplara sahip kompozit boruların darbe ve çekme yükleri altındaki davranışını incelemek için $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip 54, 72 ve 96 mm çaplarında karbon elyaf takviyeli borular üretilmiştir. Üretilen boruların mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM D 2290 standardına göre halka çekme numuneleri hazırlanmış ve deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilerek karşılaştırmalı olarak yorumlanmış ve ayrıntılı olarak hasar analizleri yapılmıştır. Gerilme/Birim şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, Ø72 boru numunesinin Ø54 numuneye göre yer değiştirme miktarı %8.35 artmış fakat çekme dayanımı %7.33 oranında azalmıştır. Ø96 boru numunesi Ø72 numune ile kıyaslandığında yer değiştirme miktarı %16.64 oranında artmış, çekme dayanımı değeri %3.13 oranında azalmıştır. Deneylerden elde edilen veriler mukayese edildiğinde çap artışının yer değiştirme miktarlarını artırırken çekme dayanımını azalttığı görülmüştür. Benzer şekilde farklı çaplarda üretilmiş borular üzerine ASTM D 7136 standartına göre 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda darbe yüklemeleri uygulanmıştır. Düşük hızlı darbe testleri sırasında kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri elde edilerek karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Darbe sonrası numunelerin darbe bölgelerinden kesitler alınmış ve hasar bölgeleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Karbon kompozit borularda çap değişimi ile darbe cevabının değiştiği ve hız artışı ile darbe bölgesinde hasarların arttığı görülmüştür. Karbon kompozit boru cidarında; matris çatlağı, debonding, elyaf hasarı, transfer çatlağı ve delaminasyon hasar modlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çekme deneyi, delaminasyon, düşük hızlı darbe deneyi, elyaf kırılması, filaman sarım yöntemi, karbon fiber takviyeli kompozit borular.

ABSTRACT

MS

INVESTIGATION OF LOW VELOCITY IMPACT RESPONSE OF CARBON FIBER REINFORCED FILAMENT WINDING COMPOSITE PIPES

Ozan KEKÜÇ

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ
Assoc. Prof. Dr. Şakir YAZMAN

2022, 83 Pages

Jury
Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ
Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ
Assoc. Prof. Dr. Mürsel EKREM

CRP (Carbon Reinforced Polymer) composite pipes produced by filament winding method have become a frequently preferred material in the industry. CRP pipes can be exposed to impacts at different speeds or energies and internal loads during production and service. In this study, carbon fiber reinforced pipes of 54, 72 and 96 mm diameters with $\pm 55^\circ$ winding angle were produced to investigate the behavior of composite pipes with different diameters under impact and tensile loads. In order to determine the mechanical properties of the pipes, ring tensile test samples were prepared according to the ASTM D 2290 standard and their tests were carried out. Stress-strain graphs were obtained from the results obtained and interpreted comparatively and detailed damage analyzes were made. Comparing the stress/strain graphs, the displacement amount of the $\varnothing 72$ pipes compared to the $\varnothing 54$ sample increased by 8.35% but the tensile strength decreased by 7.33%. When the $\varnothing 96$ pipe sample is compared to the $\varnothing 72$ sample, the amount of displacement increased by 16.64% and the tensile strength value decreased by 3.13%. When the data obtained from the experiments are compared, it is seen that the increase in diameter increased the displacement amount and decreased the tensile strength. Similarly, impact loads at 1.5, 2, 2.5, 3 m/s velocities were applied according to ASTM D 7136 standard on pipes produced in different diameters. During low velocity impact tests, force-time, force-displacement and energy-time graphs were obtained and interpreted comparatively. After the impact tests, sections were cut from the impact areas of the samples and the damaged areas were examined in detail. It was observed that the impact response changed with the diameter change in carbon composite pipes and the damage in the impact area increased with the increase in impact speed. In carbon pipes, samples will be taken from diameter shrinkage and impact to impact and speed and impact. On the carbon composite pipe wall; matrix cracking, debonding, product webs, transfer cracking and damage modes were detected. On the carbon composite pipe wall, it was determined that matrix crack, debonding, fiber damage, transfer crack and delamination damage modes occur.

Keywords: Tensile test, delamination, low speed impact test, fiber breakage, filament winding method, carbon fiber reinforced composite pipes.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında maddi, manevi ve mesleki tecrübeleri ile her türlü desteği sağlayan Tez Danışmanım Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye,

Çalışmalarında teorik ve deneysel bilgilerinden ve tecrübelerinden yararlandığım Doç. Dr. Şakir YAZMAN'a,

Düşük hızlı darbe deney numunelerinin hazırlanması ve donanımları için Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı imkanları için Fen Bilimleri Enstitüsüne,

Çekme deney numunelerinin hazırlanması ve donanımları için Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarı için Fen Bilimleri Enstitüsüne, deneylerin yapılması ve yorumlanmasında katkı sağlayan Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ ve Arş. Gör. Sezer MORKAVUK hocalarıma,

Düşük hızlı darbe deney cihazı ve donanımları için Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı imkanları için Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne, Deney cihazının kullanımı ve deneylerin yapılması aşamasında katkılarından dolayı Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN hocama,

Çalışmalarımın başlangıcından bitimine kadar hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma,

SONSUZ TEŞEKKÜRÜ BİR BORÇ BİLİRİM.

Ozan KEKÜÇ
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER VE TABLOLAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	9
3.1. Matris Malzemeleri.....	11
3.1.1. Polimer matrisler.....	11
3.1.1. Termoplastik matrisler	14
3.1.2. Termoset matrisler	14
3.2. Takviye Malzemeleri	16
3.2.1. Karbon fiber elyaflar	17
3.3. Tabakalı Kompozitler	21
3.3.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler	22
3.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	23
3.4.1. El yatırma tekniği.....	23
3.4.2. Püskürtme yöntemi	24
3.4.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi	25
3.4.4. Filaman sarım yöntemi	26
3.4.5. Pultrüzyon yöntemi.....	27
3.4.6. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi	27
3.5. Düşük Hızlı Darbe Deneyi.....	28
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	30
4.1. Karbon Elyaf Takviyeli Boru Üretimi	30
4.2. Düşük Hızlı Darbe Testi.....	31
4.3. Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi	33
4.3.1. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri	33
4.3.2. Kuvvet-yer değiştirme (F-d) eğrileri.....	34
4.3.3. Absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrileri	35
4.4. Darbe Sonrası Mikro Hasarlarının İncelenmesi	36
4.5. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Boruların Çekme Gerilimi Davranışlarının Belirlenmesi	38

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	40
5.1. Karbon Elyaf Takviyeli Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları	40
5.1.1. Kuvvet-zaman grafikleri	42
5.1.2. Kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	44
5.1.3. Enerji-zaman grafiği	46
5.2. KET Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonrası Makro Hasar Analizi.....	48
5.2.1. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda makro hasar analizi	49
5.2.2. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda makro hasar analizi	51
5.2.3. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda makro hasar analizi	53
5.3. Karbon elyaf takviyeli Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mikro Hasar Analizi	55
5.3.1. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda optik mikroskop hasar analizi	55
5.3.2. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda optik mikroskop hasar analizi	56
5.3.3. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda optik mikroskop hasar analizi	57
5.4. Karbon Elyaf Takviyeli Borularda Çekme Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi	58
5.4.1. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda çekme deney sonuçları	59
5.4.2. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda çekme deney sonuçları	61
5.4.3. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda çekme deney sonuçları	62
5.4.4. Karbon elyaf takviyeli borularda karşılaştırmalı çekme deney sonuçları.	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
6.1. Sonuçlar	66
6.2. Öneriler	67
7. KAYNAKLAR	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3. 1. Kompozit Malzeme Çeşitleri: a) Fiber takviyeli kompozit b) Parçacık takviyeli kompozit c) Katmanlı kompozit.	11
Şekil 3. 2. Polimerlerin sınıflandırması.	12
Şekil 3. 3. Uzay havacılık malzemelerinin karşılaştırılması	13
Şekil 3. 4. Grafit kristalinde karbon atomlarının dizilişi	18
Şekil 3. 5. Grafit kristallerinin fiber ekseninin enine yönde dizilişi a)Çevresel, b)Radyal, c)Rasgele, d)Radyal-Çevresel, e)Rasgele-Çevresel.....	19
Şekil 3. 6. Karbon Fiber Üretiminin Akış Diyagramı	19
Şekil 3. 7. Oksitlenmiş Bir Poliakrilonitril Molekülünün Basamak Yapısı a) Poliakrilonitril Moleküler Yapısı, b)Rijit Basamak Yapısı	20
Şekil 3. 8. Isıl İşlem Sıcaklığının Karbon Fiberlerin Mukavemeti ve Modülü Üzerindeki Etkisi	21
Şekil 3. 9. Karbon/epoksi bir malzemenin bazı yüksek dayanımlı elyaflarla üretilen kompozit malzemelere göre mukavemet özelliklerinin karşılaştırılması	22
Şekil 3. 10. El yatırma yöntemi.	23
Şekil 3. 11. Püskürtme yöntemi.....	24
Şekil 3. 12. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	25
Şekil 3. 13. Filaman sarım yöntemi.	26
Şekil 3. 14. Filaman sarım uygulaması.....	26
Şekil 3. 15. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi.....	28
Şekil 3. 16. Düşük hızlı darbe deney cihazı.	29
Şekil 4. 1. Filaman sarım karbon/epoksi boruların üretimi	30
Şekil 4. 2. Düşük hızlı darbe deneyi cihazı ve veri toplama ünitesi.....	31
Şekil 4. 3. V yatağı üzerindeki deney numunesi	32
Şekil 4. 4. Tipik kuvvet-zaman ($F-t$) eğrileri.....	33
Şekil 4. 5. Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik kuvvet- yer değiştirme ($F-d$) eğrileri	34
Şekil 4. 6. Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik enerji-zaman ($Ea-t$) eğrileri.....	35
Şekil 4. 7. Numunelerin kesme işleminde kullanılan METKON marka kesme cihazı ..	36
Şekil 4. 8. Mikro yapının hazırlanmasında ve incelenmesinde kullanılan METKON marka zımparalanma ve parlatma cihazı	37
Şekil 4. 9. Mikro hasarın incelenmesinde kullanılan KOZO marka USB mikroskop kameralar	37
Şekil 4. 10. Mikro hasarın incelenmesinde görüntüleme şekli.....	38
Şekil 4. 11. Prosedür A'ya göre halka çekme deney numunesi.	39
Şekil 4. 12. Shimadzu AG – XD çekme deney cihazı.....	39
Şekil 5. 1. Düşük hızlı darbe sonrası hasarlı boruların dıştan ve içten görünüşleri. a) Ø96, b) Ø72, c) Ø54	41
Şekil 5. 2. Artan darbe hızı altında, a) Ø54, b) Ø72, c) Ø96 borular için zamana göre temas kuvvetinin değişimini gösteren grafikler.....	43
Şekil 5. 3. Her boru çapı için uygulanan darbe hızlarında maksimum darbe kuvvetini gösteren sütun grafikleri.	44
Şekil 5. 4. Artan darbe hızı altında, a) Ø54, b) Ø72, c) Ø96 borular için temas kuvvetinin deplasman değişimini gösteren grafikler.....	45
Şekil 5.5. Her boru çapı için uygulanan darbe hızlarında tepe deplasman değişimini gösteren sütun grafikleri.	46

Şekil 5. 6. Artan darbe hızı altında, a) Ø54, b) Ø72, c) Ø96 borular için enerji-zaman değişimini gösteren grafikler.	47
Şekil 5. 7. Her boru çapı için uygulanan darbe hızlarında absorbe edilen enerji değişimini gösteren sütun grafikleri	48
Şekil 5. 8. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri.	50
Şekil 5. 9. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri.	52
Şekil 5. 10. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri.	54
Şekil 5. 11. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri.....	56
Şekil 5. 12. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri.....	57
Şekil 5. 13. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri.....	58
Şekil 5. 14. Halka çekme deney numunesi	59
Şekil 5. 15. Ø54 mm karbon kompozit boruların halka çekme sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği	60
Şekil 5. 16. Ø54 mm karbon kompozit boruların halka çekme deneyi sonrası mikro hasar görüntüleri.	60
Şekil 5. 17. Ø72 mm karbon kompozit boruların halka çekme sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği.	61
Şekil 5. 18. Ø72 mm karbon kompozit boruların halka çekme deneyi sonrası mikro hasar görüntüleri.	61
Şekil 5. 19. Ø96 mm karbon kompozit boruların halka çekme sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği.	62
Şekil 5. 20. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruların çekme deneyi sonrası mikro hasar görüntüleri.....	63
Şekil 5. 21. Karbon elyaf takviyeli kompozit boruların karşılaştırmalı basma sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil 5. 22. Çekme deneyi sonrası elde edilen a) Max. gerilme, b) Kopma uzaması (%), c) Statik tokluk.....	65

ÇİZELGELER VE TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. ABD Kompozit Sevkiyatı.....	10
Çizelge 3.1. Termoset reçinelerin karşılaştırması.....	15
Tablo 3.2. Takviye malzemelerinin mekanik özellikleri.....	16
Çizelge 4.1. Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri.....	31
Çizelge 5.1. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonrası Elde Edilen Veriler.....	41
Çizelge 5.2. Çekme deneyi sonrası elde edilen veriler.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

T_g - Camı Geçiş Sıcaklığı
E - Elastikiyet Modülü
E_a - Eksenel Elastikiyet Modülü
E_θ - Çevresel Elastikiyet Modülü
E_r - Radyal Elastikiyet Modülü
α - Termal Genleşme Katsayısı



1. GİRİŞ

İnsanlar, yerleşik hayatın ilk geçiş dönemlerinde tuğlaların ot ve tahta ilaveleriyle dayanım kuvvetinin ve mukavemetinin iyileştirebildiğini fark etmişlerdir. Bununla birlikte, yaradılıştan gelen kemik ve ağaç gibi özünden kompozit olan malzemelerde vardır. Ahşap, selülozu elyaf olarak, lignini matris olarak kullanan doğal bir kompozit malzemedir. Kemikler, bir mineral matris içine gömülü kısa ve yumuşak kolajen liflerinden oluşur. Doğal kompozit malzeme örneklemeleri incelendiğinde, farklı çalışma şartları içerisinde üstün özellik ve konfigüre edilebilme özelliğini ön plana çıkarır. Kompozit malzemeler ana ölçekte, makro boyutta bir araya getirilen ve birbiri içerisinde çözünemeyen minimum iki bileşenli malzemeler olarak tanımlanabilir (Sheikh-Ahmad, 2009).

20. yüzyılda, dayanım değeri yüksek sentetik ve yapay lif çeşitlerinin keşfedilmesi ve polimer kimyasında ki muntazam geliştirmelerle alternatif malzeme türlerine yakın avantajlar sunarak tercih sebebi olmuşlardır. Kompozit malzemeler; alternatiflerine göre hafif olması, istenilen dayanımı sağlaması, uyarlanabilir sertlik özelliği, yorulma ömrünün iyileşmiş olması, korozyon dayanımı, optimum dizayn uyarlamaları, alternatiflerine göre az detay ürünü ve montaj elemanı ve montaj maliyetlerinin düşük olması gibi avantajları ile ön plandadır. Dayanım özelliği yüksek olan karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, özel dayanımı ve özel modülü alternatifleri olan metal bileşimlerinden daha yüksektir. Bu durum, ağırlıktan tasarruf, performansta artış, yük kapasitesinin artması, araçlar için daha uzun menzil ve yakıtta tasarruf sağlar (Campbell, 2010).

Karbon elyaf takviyeli filaman sarım yöntemi ile üretilmiş kompozit borular günümüzde askeri ve sanayi ortamında sıklıkla tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Söz konusu olan karbon elyaf takviyeli borular, kullanıldıkları uygulamalarda çeşitli sebeplerden dolayı şok şeklinde yüklemelere maruz kalmaktadır. Bu durum kompozit boruların gözle görülmeyecek şekilde hasar almasına sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeple, karbon elyaf takviyeli kompozit boruların maruz kalabilecekleri darbe yüklemelerinin, mekanik özellikleri ne ölçüde etkilediğinin belirlenmesi önemli bir konudur (Gemi, 2018). Bu çalışma sayesinde, karbon elyaf takviyeli kompozit boruların kullanımında tasarımın daha sağlıklı yapılabilmesi için bilgi birikimi sağlanacaktır.

Tabakalı kompozit ürünlerde, delaminasyon hasarı büyük bir sorun oluşturmaktadır. Patlamaların en etkili hasar mekanizması delaminasyon ve elyaf kırılmasıdır. Bu çalışmada, $\pm 55^\circ$ sarım açısında üretilen 54, 72 ve 96 mm iç çaplarına sahip karbon borular üzerine 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarında düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Karbon elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların çap değişimlerinde darbe cevabı ve hasar gelişimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışma sayesinde, karbon elyaf takviyeli kompozit boruların kullanımında çap farkının düşük hızlı darbe davranışına etkileri irdelenecek ve kompozit boru tasarımının daha sağlıklı yapılabilmesi için bilgi birikimi sağlanacaktır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen kompozit malzemelerin, günümüz şartlarında teknolojinin de gelişmesi ile birlikte üretim yöntemleri ve kullanım alanları artmaktadır. Mukavemet değerlerinin yüksek ve yoğunluk değerlerinin düşük olması ile dikkat çeken filaman sarım kompozit borular yüksek basınç ve korozif ortam dayanıklılığına sahip malzemelerdir. Kompozit malzemeler üzerinde teorik ve deneysel olarak birçok çalışma yapıldığı literatürde karşımıza çıkmaktadır. Bunlar; bir araya getirilmiş farklı malzemelerin oluşturduğu mekanik özellikler, elyafların bir araya getirilirken ki sarım açıları ve oluşabilecek yüzey hataları, dinamik yükleme koşullarında malzeme ömrüne olası etkileri gibi konuları kapsar. Oldukça farklı kullanım yerlerine sahip bu malzemeler imalat, servis ve bakım işlemleri sırasında dış ortamdan gelebilecek darbe yüklemelerine maruz kalabilirler. Bu yüklemelere maruz kalan malzemenin vereceği cevaplar hesap edilebilir olmalıdır. Bu cevapları incelemeye yönelik birçok literatür çalışması yapılmıştır. Bunlardan bazıları:

Literatür incelendiğinde genellikle darbeler, düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar. Fakat bu sınıflar arasında elle tutulur oranda bir geçiş yoktur. Yapılan literatür çalışmaları bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini gösterir. Malzemenin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve darbe yüklemesine maruz bırakan materyalin kütlelerine ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişken hızlardaki darbeler düşük hızlı darbe yüklemesi olarak değerlendirilmiştir. Düşük hızlı darbeler, oluşan hasar bakımından radyal matris kırılması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) ve transfer kırılmalarının görüldüğü darbelerdir (Şenel ve ark., 2009). Düşük hızlı darbeye sebep olabilecek ve karşılaşılması en muhtemel olan kompozit malzeme üzerine üretim veya servis sırasında bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler çarpma anında kompozit malzemenin mikro yapısında deformasyona sebep olan darbe türleridir. Literatürde düşük hızlı darbe yüklemesinin, düşük enerjili darbe yüklemesi olarak adlandırıldığı da görülmüştür. Düşük hızlı darbe yüklemesini yorumlayabilmek için kompozit malzemenin iç yapısında değişikliklere sebep olabilecek temas süresinin bilinmesi yeterlidir. Bu sebepten ötürü, kompozit malzemenin dinamik yapı cevabı büyük önem arz etmektedir (Mili ve Necib, 2001).

Gliszczynski ve ark. (2019), ince duvarlı plakalarda ve profillerde darbe yükünün düşük hızlı etkisini, sınır koşullarının bir fonksiyonu olarak hasar yayılımı, büyüklüğü ve şekli, katman düzenlemeleri ve darbe enerjisi arasındaki ilişkiyi ele almaktadır. Teorik ve deneysel model karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmalarının sonucu olarak, en etkili hasarın delaminasyon

hasarı olduğunu ve delaminasyonların ana yayılım yönünün, son katmandaki liflerin yönü ile ilgili olduğunu bulmuştur (Gliszczynski ve ark., 2019).

Kostopoulos ve ark. (2010), çalışmalarında çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT'ler) karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) laminatların etki ve etki davranışlarını araştırmaktır. Ağırlıkça % 0,5 MWCNT ile modifiye edilmiş, yarı izotropik bir CFRP laminat üretilmiştir. Üretilen kompozitler düşük hızlı darbe deneyine ve ardından basma deneyine tabi tutulmuştur. Darbe testine sokulmuş numuneler, darbe testine sokulmamış numunelerle karşılaştırıldığında radikal bir fark gözlemlenmemiştir. Farkları gözlemlmek için daha büyük ağırlık yüklemeleri ve daha yüksek hız kullanmak gerekmiştir. Ana hasar mekanizmaları olarak elyaf çekilmesi ve elyaf kırılması tespit edilmiştir (Kostopoulos ve ark., 2010).

Han ve Chang (2015), Tip III basınçlı tank üreterek düşük hızlı darbe deneyi ve patlatma deneyi uygulaması yapmıştır. Her bir arıza modunda malzeme arızasını belirlemek için bir kullanıcı alt rutini ile sonlu elemanlar analizini kullanarak, darbe yükü altındaki bir Tip III hidrojen basınçlı tankın yapısal bütünlüğünü değerlendirmeyi amaçlanmıştır. Basınç kabının kalın kompozit laminatları, her bir katmanda doğru gerilme dağılımı sağlayan kat bazlı modelleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. Düşük hızlı darbe deneyi için 488 J, otomatik sürtünme basıncı için 107 MPa, servis basıncı için 70 MPa tercih edilmiştir. Her moddaki malzeme arızası Hashin kriteri kullanılarak tahmin edilmiştir. Bazı katmanların enlemesine doğru delaminasyon veya matris hasarına uğradığı gözlemlenmiştir. Genel yapının darbe sonrasında servis şartlarında güvenli çalıştığı tespit edilmiştir (Han and Chang, 2015).

Uyaner ve ark. (2014), cam elyaf takviyeli tüplerin darbe sonrası yorulma ve patlama testlerini incelemiştir. Düşük hızlı darbe deneylerini 5 J ve 10 J enerji seviyesinde gerçekleştirmiştir. Kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiş ve hasar bölgeleri incelenmiştir. PLC kontrollü iç basınç yorulma teçhizatı kurulmuştur. Darbe hasarı görmüş ve görmemiş tüpler ASTM D 2992 standartına göre yorulma testine tabi tutulmuştur. Düşük hız çarpma testlerinde, çarpma enerjisi arttıkça maksimum temas kuvveti, yer değiştirme ve GRP kompozit tüpündeki hasar artmıştır. Düşük darbe enerjisi için iç tabakalarda matris çatlaması ve delaminasyonlar görülmüştür, ancak tüm katlarda kalınlık boyunca yüksek enerji çarpması hasarı görülmüştür. 5 J darbe enerjisi ile zarar görmüş numunelerde, hasarlı yüzeyde matris çatlakları, enine kesitte delaminasyonlar ve iç yüzeye yakın katmanlardaki radyal matris çatlakları gözlenmiştir. Ancak hem zarar görmüş yüzeyde hem de 10 J darbe ile zarar görmüş numunelerin iç yüzeyinde matris çatlakları meydana gelmiştir. Tüm katmanlar arasında delaminasyonlar meydana gelmiştir ve radyal matris çatlakları oluşmuştur. Düşük hızlı darbeleri hasarlı tüplerde, çarpma enerjisi arttıkça tüplerin patlama mukavemeti azalmıştır.

Düşük hızlı darbe hasarı, numunelerin yorulma ömrünü azaltmıştır. Bu azalma patlama kuvvetindeki azalma ile karşılaştırıldığında daha fazladır. Darbe hasarına uğramamış numunelerde, yorgunluk hasarı, numunelerin yüzeyindeki herhangi bir yerde başlamıştır, ancak darbeden etkilenen numunelerde temas yerinde hasar başlamıştır ve aynı yerde hasar ile sonuçlanmıştır. Darbe hasarına uğramış ve uğramamış numunelerde, 5 J darbe enerjisi seviyesinde, son başarısızlık şiddetli bir patlama şeklinde olmuştur. Bununla birlikte, 10 J darbe enerjisinde zarar görmüş numunelerde, nihai başarısızlık, numunenin iç basınca dayanamadığından dolayı sızıntı nedeniyle olmuştur (Uyaner ve ark., 2014).

Gemi ve ark. (2018), çalışmalarında 55 derece açı ile sarılmış cam fiber takviyeli kompozit boruların düşük hızlı darbe deneylerini incelemiştir. Cam fiber olarak 17 µm e-cam fiberi kullanmıştır. Reçine olarak Bisophenol A, Epoxy CY 225 reçineleri kullanılmıştır. Daha sonra fırında 2 saat 135 derecede, 2 saat 150 derecede kürleme işlemi yapılmıştır. Testler 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s darbe hızı seviyelerinde 13-17 kez tekrarlanmıştır. Borular çeşitli enerji seviyelerinde darbe yüklemesine maruz bırakılmıştır. Kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme ilişkileri incelenmiştir. Borulardaki hasar gelişiminin, yer değiştirme radyal yönü ile kontrol edildiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar Weibull yaklaşımı ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Etkilenen bölgenin mikroskopi analizi, debonding, radyal çatlaklar, transfer çatlakları ve delaminasyon hasarı modlarının ana gözlenen hasar modları olduğunu ortaya koymuştur (Gemi ve ark., 2018).

Richardson ve Wishear (1996), çalışmalarında kompozit malzemelerin yük konteynerlerine uygulanabilirliğini ele almışlardır. Konteyner yapılarında, genellikle metal malzemeler tercih edilmektedir. Metallerin darbe yüklerine karşı dayanımı, sünekliğinden dolayı oldukça fazladır. Metaller Darbe yüklerinin olduğu yerden hasara başlar. Fakat kompozit malzemeler bu şekilde değildir. Kompozit malzemeler, gevrek malzemeler olduğu için hasar elastik deformasyonla başlamaz direk plastik deformasyon olarak kendini gösterir. Kompozit malzemelerde, hasar darbe yükünün uygulandığı yerden başlamaz. Elyaf kırılmaları ve delaminasyon sonucu olarak herhangi bir yerden hasar başlangıcı gözlemlenebilir. Sertleştirilmiş reçineler ve termoplastikler, hasarı bir nebze olsa azaltmak için tasarlanabilir, fakat asıl yükü taşıyan elyaflar olduğu için hasar kaçınılmazdır. Rastgele lif tek yönlü laminat kombinasyonlarının düşük hızlı darbe tepkisi ve karmaşık geometri üzerindeki etkilerinin daha az belgelenmesi ve kompozit laminatların daha yapısal uygulamalarda kullanılması durumunda bu alanlarda ilerleme sağlanması gerekmekte olduğunu tespit etmişlerdir (Richardson ve Wisheart, 1996).

Hull, Legg, ve Spencer (1978), çalışmalarında $\pm 55^\circ$ ve $\pm 44^\circ$ açı ile filaman sarım yöntemiyle üretilmiş kompozit boruların, kapalı uç ve açık uçlu basınç deney düzenekleri kullanarak test etmiştir. Elastik özellikler ve borudaki farklı başarısızlık işlemleriyle ilişkili gerilme seviyeleri ölçülmüş ve filaman sarım tekniği ile üretilmiş kompozitler için mevcut teorilerin tutarlı olduğu bulunmuştur. İki test modundaki arıza süreçleri oldukça farklı bulunmuştur. Kapalı uç deneyinde, reçine etkisi doğrusal olmayan bir gerilme tepkisi üretmiştir ve yüksek basınçlarda borularda fiber/reçine ayrılması meydana gelmiş gibi davranmıştır. Kapalı uç deneyindeki son patlama, büyük ölçekli fiber kırılmasından meydana gelirken, açık uç deneyinde reçine hasarının baskın olduğu saptanmıştır (Hull ve ark., 1978).

Cantwell (2007), çalışmasında cam elyaf ile güçlendirilmiş polyesterin, düşük hızlı darbe deneyi altında hasar kuvvetlerinin uygunluğunu incelemiştir. Deney için dairesel ve kare plakalar kullanılmıştır. Dairesel plakaların çapları 50 ile 300 mm arasında, kare plakaların kenar uzunlukları ise 75 ile 200 mm arasında değişen ölçülerde tercih edilmiştir. Hasar çarpma noktasından başlayıp, yayılan şekilde delaminasyon hasarı olarak gözlemlenmiştir. Delaminasyon hasarını başlatan kuvvetin büyüklüğü ise, 600 ile 800 Newton arasında gözlemlenmiştir (Cantwell, 2007).

Heimbs ve ark. (2009), çalışmalarında sıkıştırılmış ön yüklemeli ve sıkıştırmasız lamine karbonlu elyaf/epoksi levhaların düşük hızlı darbe davranışı incelenmiştir. Deneyler önceden yüklenmiş kompozit plakalar için artan bir sapma göstermiştir. Absorbe edilen toplam enerji önceden yüklenmiş plakalar için daha yüksek tespit edilmiştir. Delaminasyon hasarı, NCF materyali için daha düşük sertlik ve mukavemet özelliklerinden kaynaklanan ön hazırlık malzemesine kıyasla daha yüksektir. Hasar delaminasyon hasarı olarak gözlemlenmiştir ve sıkıştırmasız plakaların daha çok hasar aldığı gözlemlenmiştir (Heimbs ve ark. 2009).

Arıkan (2010), çalışmasında açık uçlu iç basınç altında açılı bir yüzey çatlağına sahip E-cam/epoksi yapılmış filaman sarım cam takviyeli plastik (GRP) boruların hasar analizini gerçekleştirmiştir. Test numuneleri $(\pm 55^\circ)_3$ sarma açısına sahip altı antisimetrik katmandan oluşur. Testler yedi farklı çatlama açısında gerçekleştirildi: 0° , 15° , 30° , 60° , 45° , 75° ve 90° . GRP borularındaki çatlak açısı arttıkça, patlama basıncı artmış ve çatlak açılarının etkisi azalmıştır. Bu nedenle, patlama mukavemeti, 90° yüzey çatlama açısına sahip 55° CTP borular için en yüksektir. Patlama basıncının artmasının diğer sebeplerinden biri de çatlak uzunluğunun 0° 'den 90° 'ye düşürülmesidir. Çatlak bölgesi incelenmiştir ve çatlak büyümesinin delaminasyon ile başladığı gözlemlenmiştir. Hasar, çatlak bölgesinden ani sızıntı şeklinde gerçekleşmiştir (Arıkan, 2010).

Hawa ve ark. (2007), çalışmalarında su yaşlanması ve düşük hızlı darbe yüklerinin, iç basınca maruz kalan kompozit boruların patlama davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney için $\pm 55^\circ$ açı ile filaman sarım tekniğiyle üretilmiş kompozit boru numuneler hazırlanmıştır. Numuneler istenen test uzunluğuna göre ayarlanmıştır. Daha sonrasında 500, 1000 ve 1500 saat olmak üzere 80°C musluk suyuna batırılarak, yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonrasında 5, 7.5, 10J darbe yükleri uygulanmıştır. Ardından patlatma testine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, darbe enerjisi arttıkça tepe kuvveti ve yer değiştirmenin arttığını göstermiştir. Patlatma testi sonuçları, yaşlanmış ve daha yüksek enerji uygulanmış numunelerin, daha düşük patlama mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir. Hasar, sızıntı ve patlama olarak gözlemlenmiştir (Hawa ve ark., 2016).

Shao ve ark. (2016), çalışmalarında matrislerin mekanik davranış üzerindeki etkisi ve hasar gelişimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. $[90^\circ / \pm 15^\circ]$ laminasyonlu karbon fiber takviyeli vinilester ve epoksi basınçlı kaplar, filaman sarım yöntemi ile üretilmiştir. Ardından patlama basıncına kadar yüklenmiştir. Deney sonucunda, karbon/vinilester basınçlı tankın, karbon elyaf ve epoksi matris ile üretilen basınçlı tanktan %20 daha yüksek bir patlama basıncına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kırılma başlangıcı karbon/epoksi tanklarda 20 MPa basınçta başlarken, karbon/vinilester tanklarda 35 MPa basınçta başladığı görülmüştür (Shao ve ark., 2016).

Hawa ve ark. (2015), çalışmalarında düşük hızda darbe yükünün E-cam elyaf/epoksi kompozit boruların basınç taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kompozit borular $\pm 55^\circ$ sarma açısı ile filaman sarım tekniği kullanılarak üretilmiştir. Numuneler, darbe test cihazı kullanılarak 5J, 7.5J ve 10J darbe enerjilerine maruz bırakılmıştır. Darbe deneyinin ardından patlatma testlerine tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar darbe yükü arttıkça, patlama mukavemetinin azaldığını göstermiştir. Hasar tipi olarak; sızıntı ve su jeti gibi birkaç hasar tipi gözlemlenmiştir (Hawa ve ark., 2015).

Bai ve Zhang (2016), çalışmalarında, çekme deneyi için deneysel fikstür sistemi, bir çekme test makinesine dayalı olarak tasarlanmıştır. Kusurun mekanik özellikler üzerindeki etkisini ve boruların hasar değerlendirmesini belirlemek için açık bir delik düşünülmüştür. Sonuçlar, çentiğin boyutunun özellikleri etkilediğini gösterir niteliktedir (Bai ve Zhang, 2016).

Barbinou ve ark. (1999) çalışmalarında, 0° tek sarım yönlü karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerde fiber mikro burkulmasının basınç hatasının ilişkisini incelemiştir. Sonuç olarak, deneysel verilerin 0° tek yönlü laminantta ki bükülme hatlarının, sıkıştırma şeklinde üç adımda yüklendiğini tespit etmişlerdir. Elastik bükülme, plastik bükülme ve daha

sonra bükülme sınırlarında elyaf hatasının bir sonucu olarak son çökme tespit edilen hasar tipleridir (Berbinau ve ark., 1999).

Demirci ve ark. (2017) çalışmalarında, %4 SiO₂ nanoparçacık dolgululu ve dolgusuz ±[55]₆ filaman sarım yöntemiyle üretilmiş bazalt/epoksi kompozit halka numunelerinin, halka çekme dayanımı, gerinim ve kırılma tokluğu (Mod I) bölünmüş disk yöntemi uygulanarak incelenmiştir. Ağırlıkça %4 SiO₂ nano parçacığının eklenmesiyle Mod I kırılma tokluğunda %43 ila %50'lik etkili bir artış gözlemlenmiştir (Demirci ve ark., 2017).

Kara ve Uyaner (2017) çalışmalarında, 6, 8 ve 10 tabakalı cam takviyeli kompozit boruların ASTM D 1599 standardına göre patlama deneyi ve ASTM D 2290 standardına göre halka çekme testi deneyi yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, tüm numuneler azaltılmış bölgelerden sarım açısı yönünde kopmuştur. Kopmalar teğetsel mukavemet değerine ulaşınca gerçekleşmiştir. Tabaka sayısının artmasının mukavemet değerini artırdığı tespiti yapılmıştır (Kara ve Uyaner, 2017).

Taşıyürek ve Ekinci (2021) çalışmalarında, karbon nano tüp takviyeli plastik boruların deniz suyu içerisinde kullanılabilirliğini ve bunun sonucunda mekanik özelliklerdeki değişimini incelemişlerdir. Sonuç olarak, nano tüp ilavesinin çekme dayanımına ilk ayda %18 gibi bir etkisi varken 9 ay sonunda %168 değerlerine ulaştığını tespit etmişlerdir. Bunun sebebi olarak tuzlu suyun tabakaları ayırması olarak yorumlamışlardır (Taşıyürek ve Ekinci, 2021).

Subaşı (2015) çalışmalarında, filaman sarım yöntemiyle üretilen kompozit borularda farklı elyaf ve reçine malzemelerin iç basınç mukavemet değerlerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda seçilen malzeme türünün patlama basıncına doğrudan etkisi olduğunu tespit etmişlerdir (Subaşı, 2015).

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, minimum iki malzemeyi makro ölçekte bir araya getirerek oluşturulan ve birbirlerinin içinde çözünemeyen malzeme türleridir. Bileşenlerin tek başına elde edilemeyen mekanik özellikleri, fiziksel olarak bir araya getirilmesi sonucu oluşur. Kompozit malzemeler, iki bileşenli bileşenler içerebilen ancak döküm gibi işlemlerle kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan alaşımlardan ayırt edilmelidir. İstenilen özelliklerin elde edilebilmesi için kompozit malzemelerin bileşim oranları, matris dağılımları, morfolojileri, kristallik dereceleri, kristallografik dokuları, bileşenler arasındaki ara yüz yapısı ve kompozisyonu uyarlanabilir (Chung, 2010). Uyarlanabilir olması nedeniyle, kompozit malzemelerin havacılık, otomobil, elektronik, inşaat, enerji, biyomedikal ve diğer birçok sanayi alanının ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanabilir.

Kompozit malzemeler genel olarak metaller, seramikler, cam ve polimerler olarak dört ana sınıfa ayrılır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin bu gruplar arasından herhangi birinin elyaf ile takviye edilmesiyle elde edilebilirler (Tolun, 2008). Elyafın takviye edildiği malzemeye matris adı verilir. Matrislerin üç ana görevi vardır. Bunlar, elyafları rijit hale getirmek, yüklemeleri elyaflara dağıtmak ve elyafları dış etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi, düşük viskoziteli yapıda iken kürlendikten sonra elyafları sağlam bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir (Türkmen and Koksall 2013).

Kompozit malzemeler, her geçen gün hayatımızın içerisinde ki yerini arttırmaya devam etmektedir. 1990'lı yılların başlarında hayatımızdaki yerini yıllık bazda %10 büyüme ile sağlamlaştırmıştır. Tablo 3.1 ABD'nin 1990 yılı ile 1995 yılları arasında yapmış olduğu kompozit malzeme sevkiyatlarına bakıldığında her geçen yıl büyümeye devam ettiği gözlemlenebilir.

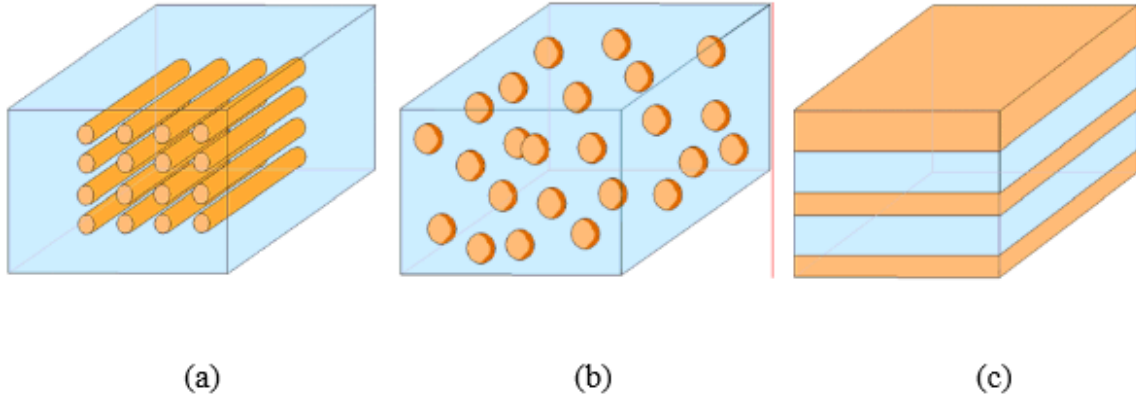
Polimer matrisli kompozitlerin kullanım alanları otomotiv, havacılık ve uzay, inşaat endüstrilerinden spor aletleri gibi birçok alana yayılmıştır. En yaygın kullanım alanlarından birine sahip olan cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerdir. Kimya endüstrisinde tanklar, basınçlı veya basınçsız reaksiyon kapları, atık madde ve proses boruları çoğunlukla cam elyaf takviyeli kompozitlerden yapılmaktadır. Cam elyafı kompozit malzemelerden imal edilmiş yürüyüş yolları ve birçok deniz üzeri yapılar pultrüzyon tekniği ile üretilmektedir. Cam ve aramid elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler, sivil uçakların zeminleri ve depolarında kullanılmaktadır. Ayrıca, uçakların kapı kısımlarında, kaplama uygulamalarında ve burun bölgesinde polimer matrisli kompozitler kullanılmaktadır. Helikopterler ve küçük uçakların bazı kritik kısımları ise aramid elyaf takviyeli kompozitlerden yapılmaktadır. Aramid elyaflar

çoğu uygulama da cam elyafın yerini tercih edilebilir ancak maliyet olarak cam elyafa nazaran yukarıda kalır. Performansın maliyete göre ön planda olduğu uygulamalarda aramid elyaf cam elyafa alternatif olarak tercih edilebilir. Batari bagetleri, aramid elyaf kullanılarak enjekte edilen pultrüzyon yöntemiyle üretilir. Ahşap bagetlere göre yamulması daha güç, ağırlığı daha düşük ve ömrü daha yüksek olur. Savunma sanayinde polimer matrisli kompozitler miğferlerden roket kılıflarına kadar kullanım alanı geniştir. Aramid elyafların kullanıldığı basma, kayma ya da enine çekme gerilmeleri içeren bileşimlerde, aramid elyafın yanına ikinci bir elyaf kullanımı önerilir. Polimer matrisli kompozit malzemeler genellikle savunma sanayi için ve ticari olarak üretilen helikopterlerin ağırlıklarının azaltılması için kullanılmaktadırlar (Balasubramanian, 2013).

Tablo 3.1. ABD Kompozit Sevkiyatı (Aboudi ve ark., 2013)

Market	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Havacılık/Askeri	39	38.7	32.3	25.4	24.2	24
Alet / İş Ekipmanı	153	135.2	143.2	147.5	160.7	166.5
Konstrüksiyon	468	420	483	530	596.9	626.9
Tüketim Ürünleri	165	148.7	162.2	165.7	174.8	183.6
Korozyona Dayanıklı Ekipman	350	355	332.3	352	376.3	394.6
Elektrik/Elektronik	241	231.1	260	274.9	299.3	315.1
Denizcilik	375	275	304.4	319.3	363.5	375.1
Ulaşım	705	682.2	750	822.1	945.6	984
Diğer	79	73.8	83.4	89.3	101.8	106.6
Toplam (Ton/Yıl)	2575	2360	2551	2726	3043.1	3176.4

Kompozit malzemeler, üretim proseslerine göre farklı dayanım özellikleri gösterirler. Kullanım amaçlarına göre düşük veya yüksek mukavemet, ısıl dayanım, elektrik iletkenliği vs. özellikler istenilebilir ve kompozit malzemelerin en büyük özelliklerinden biri olan uyarlanabilirlik kullanılır (Dokur, 2009). Kompozit malzemeler; sürekli fiber takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler ve katmanlı kompozitler olarak (Şekil 3.1) üretim tipine göre, polimer takviyeli kompozitler, metal takviyeli kompozitler, seramik takviyeli kompozitler ve karbon takviyeli kompozitler olarak takviye tipine göre sınıflandırılır (Aboudi ve ark., 2013).



Şekil 3. 1. Kompozit Malzeme Çeşitleri: a) Fiber takviyeli kompozit b) Parçacık takviyeli kompozit c) Katmanlı kompozit (Aboudi ve ark., 2013).

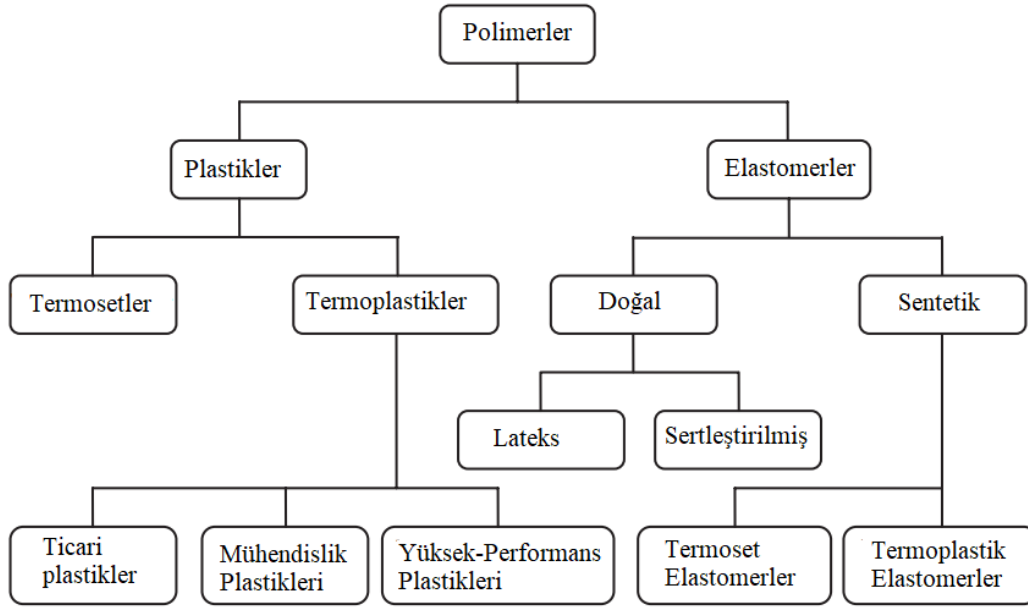
3.1. Matris Malzemeleri

Bileşenlerin, yalnızken veremediği mekanik özellikleri sağlayabilmesi için kompozit malzemeler farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Literatürde bu bileşenler elyaf lifler ve matris olarak adlandırılır. Matris malzemeleri, elyafların istenilen yönelimde ve aralıkta tutulması, korozyona uğramaması ve çevre etkilerinden korunması gibi birçok kritik görevi üstlenir (Campbell, 2010).

3.1.1. Polimer matrisler

Polimer matrisler, genel olarak kompozit malzemenin reçine yapısını oluştururlar. Takviye liflerini sararak yapıyı bir arada tutmanın yanı sıra malzemenin basma veya kayma gerilmesi direncinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Bunun yanında, polimer matrisin özellikleri kompozitin dayanım sıcaklığını, neme direncini, akışkanlara olan direncini, termal ve oksidatif kararlılığı belirler. Sertlik ve mukavemete özgü özellikler, düşük ağırlık, korozyon önleme, daha yüksek doğal frekanslar ve yorgunluğa karşı uzun ömür olmak üzere daha yüksek mekanik özelliklerden oluşan polimerik kompozit malzemelerin üstünlükleri, onları birçok farklı kullanım alanı için rekabetçi bir aday haline getirmiştir (Rafiee, 2016).

Polimerler, monomerlerin sürekli kendini tekrarlamasıyla oluşan, yüksek moleküler yoğunluklu organik bileşiklerdir. 10^3 ila 10^6 monomer kimyasal reaksiyonlar sonucu bir araya gelerek polimerleri oluştururlar. Organik polimerler genel olarak plastikler ve elastomerler olarak sınıflandırılır. Başlıca farkı, elastomer malzemeler hasardan önce elastik deformasyona uğrarken, plastomer malzemeler plastik deformasyona uğrar. Polimerlerin sınıflandırması Şekil 3.2'de verilmiştir (Balasubramanian, 2013).



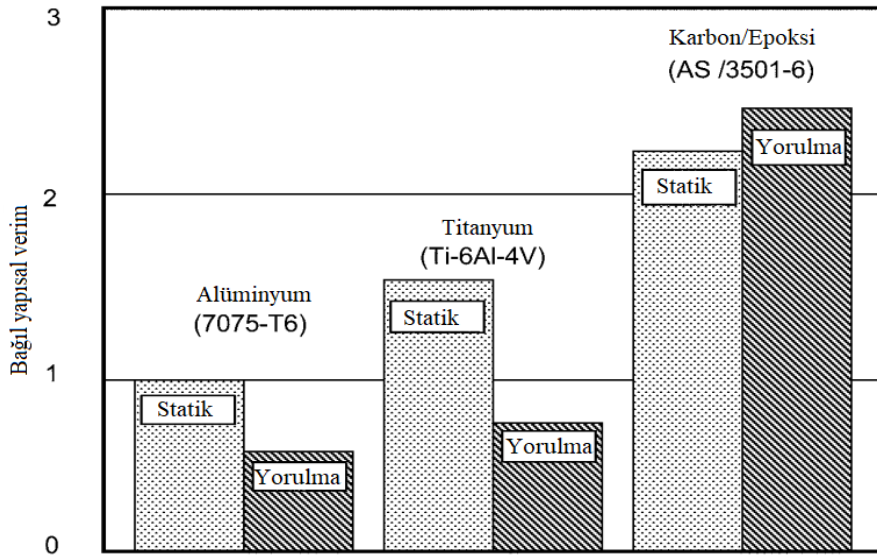
Şekil 3. 2. Polimerlerin sınıflandırması (Balasubramanian, 2013).

Polimer matrisler, kullanım alanlarına göre tercih edilir. En çok kullanılan polimer matrisler, termoplastik ve termoset matrisler olarak iki ana gruba ayrılır. Kompozit malzemelerin kullanım alanının artmasıyla birlikte yalnızca takviye elemanları değil matris malzemeleri de geliştirilmeye başlanmıştır. Karbon, cam veya aramid gibi yüksek performanslı takviye malzemelerinin yanı sıra mühendislik ihtiyaçlarının sağlanmasında matris malzemelerinin geliştirilmesinin de rolü büyüktür. Her ne kadar kompozit malzemeler için polimer malzemeler çok yaygın olarak kullanılsa da, metaller ve seramiklerin sağladığı rijitliği ve mukavemeti sağlayamazlar (Sheikh-Ahmad, 2009). Bunun yanı sıra polimer malzeme kullanımı, yüksek sıcaklıklar ve yüksek basınçlar gerektirmediği için karmaşık yapıların imalatında ve yapı bozulmasının istenmediği alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Sonuç olarak, bu alanlarda yapılmış ve yapılmaya devam eden çalışmalar sayesinde, kompozit malzemelerin kullanım alanları her geçen gün artmakta ve yaygınlaşmaktadır.

Polimer takviyeli kompozitlerin; hafif olması, mekanik özelliklerinin uyarlanabilmesi için elyaf dizaynlarının yapılabilmesi, yorulma ömrünün geliştirilmiş olması, korozyon dayanımının yüksekliği, daha az detay ve montaj malzemesi kullanımı sonucunda montaj maliyetlerinin düşük olması gibi farklı avantajları vardır. Mukavemet dayanımı yüksek olan elyafların özgül dayanım ve özgül modül değerleri uzay ve havacılık sanayide tercih edilen alternatif metal alaşımlarına nazaran oldukça yukarıdadır. Bu durumun neticesinde; daha hafif, gelişmiş performans, yüksek taşıma kapasitesi, menzilin artması ve yakıtta tasarruf elde edilir. Korozyon dayanımı ise hava araçlarında önemlidir, bu açıdan da kompozitler tasarruf sağlayabilmektedir. Örneğin, alüminyum doğrudan metal yüzeye temas ettiğinde, alüminyum

malzemede galvanik korozyon meydana gelmektedir ancak ara yüzeye ilave edilen cam elyaflar elektrik yalıtımı görevi görerek bu sorunu ortadan kaldırır. Diğer taraftan kompozitlerin yorulma dayanımları alternatifleri olan metallere göre yüksektir. Karbon elyaf takviyeli bir kompozit malzemenin, yüksek dayanım değerlerine sahip metallere göre verimlilik karşılaştırması Şekil 3.3’de sunulmuştur. Bu avantajlarla birlikte, polimer takviyeli kompozitler bir defa da üretilebilir olduğundan veya detay parçaları ikinci bir yapıştırma ile yapılabilir olduğundan işçiliği ve montaj malzemesi olduğu için montaj maliyeti de düşmektedir (Campbell, 2010).

Polimer takviyeli kompozitlerin dezavantajları ise, ham madde maliyetlerinin yüksekliği, üretim ve montaj maliyetlerinin yüksek olması, sıcaklığın ve nemin olumsuz yönde etkili olması, matris statik yük altında iken dinamik yüklemelere karşı mukavemetinin zayıf olması, darbe hasarına, delaminasyon hasarına duyarlı olması ve tamirlerinin çok daha zor olması sıralanabilir.



Şekil 3. 3. Uzay havacılık malzemelerinin karşılaştırılması (Campbell, 2010).

Polimer bir malzemenin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), rijit bir yapıda olduğunu kabul edilen polimer malzemenin rijitliğini kaybettiği viskoz özellik kazanmaya başladığı sıcaklık değeridir. Bu sıcaklık noktasında, polimerin yapısı hala bozulmamıştır fakat çapraz bağlar artık kilitli pozisyonda değildir. Bu sebeple, kompozit veya yapıştırıcı malzemeler için T_g maksimum çalışma sıcaklığı olarak tanımlanabilir. Bu değer üstüne çıktığında malzemenin mekanik özellikleri büyük oranda düşecektir ve istenilen özellikleri sağlayamayacaktır. Termoset polimerlerin çalışma sıcaklıkları ıslak ya da doymuş T_g değerinden $30\text{ }^\circ\text{C}$ daha düşük olmalıdır. Bunun sebebi, T_g değerini büyük ölçekte etkileyen nemi daha çok absorbe etmeleridir.

Malzemenin yapısına giren nem matris bazlı mekanik özellikleri negatif yönde etkilemektedir. Matris kabarmasına yol açabilir ve bu durum yüksek sıcaklıklarda uygulanan küremeler de kompozitin yapısında var olan termal gerilmeleri ortaya çıkarır. Bu gerilmeler, köşelerinden montajlanmış büyük panellerde şişme yapabilir ve panelin plastik deformasyonuna sebep olabilir. Soğuk tavlama çevrimi sırasında bu nem kabarmaları matrisi çatlatabilir ve ani ısı yükselmelerinde buhara dönüşebilir. İç buhar basıncı kompozitin yatay çekme (kalınlık boyunca) mukavemetini aştığı anda tabaka delaminasyon olacaktır (Campbell, 2010).

3.1.1. Termoplastik matrisler

Termoplastikler, yeterli ısı ile homojen şekilde eriyen ve soğutulduğunda katılaşabilen ve ısıtıldığında geri dönüşü olan plastik çeşididir. Metal ve seramiklere göre düşük elastikiyet modülü, kolay şekillenmesini sağlar. Ortam sıcaklığının üzerlerindeki etkileri büyüktür. Ortam sıcaklığı arttıkça istenilen özellikleri sağlayamaz ve kimyasal bozulmalara uğrarlar.

Polimer molekülleri zayıf Van Der Waals bağları ve hidrojen bağları ile bir arada tutulmaktadır. Yükselen sıcaklıkla birlikte frekans, genlik ve sinüzoidal hareketlerin sayısı artar. Bu sebeple ortam sıcaklığı, polimerin özelliklerine doğrudan etki eder. Sıcaklık artırıldığında, sinüzoidal hareketlerin genliği artar ve polimer molekülleri bir arada tutan bağlar daha da zayıf bir hal alır. Malzeme Tg olarak bilinen sıcaklık değerine ulaştığında, rijitliğini kaybederek viskoz hal almaya başlar. Malzeme bu hale ulaştığında ufak bir kuvvet deforme etmeye yetecektir. Sıcaklık değeri tekrar düşürülmeye başlandığında, moleküller yeni yerlerinde kürlenecektir. Bu sebeptendir ki, teoride termoplastik malzemelere istenilen şekil verilebilir (Balasubramanian, 2013).

Termoplastikler, yüksek ısıyla bozulma sıcaklığı, şeffaflık, alev direnci, boyutsal kararlılık ve uygulama alanlarını genişleten yüksek darbe dayanımı gibi çeşitli özelliklere sahiptir. Bir matris malzemesi olarak termoplastikler, kompozit malzeme üretimi için mükemmel karakterlere sahip olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoplastikler ayrıca doldurma, takviye ve harmanlama için çok uygundur. Doğal lifli polimerler içeren termoplastikler, doğal-sentetik polimer kompozitler oluşturmak için en umut verici yollardan biridir (Shubhra ve ark., 2013).

3.1.2. Termoset matrisler

Termosetler, ilk durumda normalde sıvı veya sıvılaştırılabilir reaktif reçinelerdir. Yüksek ısı kararlılık ve kimyasal direnç ile birlikte yüksek sertlik gerektiren birçok

uygulamada bulunabilirler. Mükemmel işlenebilirlikleri, onları kısa vade de ideal hale getirirken, makul fiyatları onları büyük ölçekli üretim için tercih edilebilir kılar (Bittmann, 1999). Isı ve kimyasal reaksiyonlar ile katılaştıran, geri dönüşü çok zor olan matris malzemeleridir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamaz, yapıları bozularak özelliklerini kaybederler. Elyaf takviyeli kompozit yapılarda yaygın olarak polyester, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon matris malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Düşük ağırlık ve yüksek dayanım istenen uzay ve havacılık sanayi gibi yerlerde epoksi reçine sıklıkla tercih edilir. Diğer reçine çeşitlerine göre tercih edilme sebebi daha iyi mekanik özellikler, yorulma dayanımı, ısıl dayanım, elyaflara daha iyi yapışma ve kürlenme sırasında çekme oranının düşük kalması olarak değerlendirilebilir.

Epoksi reçine, epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Kompozit malzeme tasarımında doğru epoksi reçine seçimini yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, malzemenin özelliklerine yüksek oranda etki eder. Reçinenin homojen olarak sertleşmemesi, özellikle gerilmeli korozyon olayında reçinenin çok farklı tepkiler vermesine neden olur. Sertleşme belirli sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir.

Termosetleri plastik deformasyona uğratmak zordur. Çünkü çapraz bağları güçlü kovalent bağlar oluşturduğundan moleküler hareketler çok zordur. Yüksek çapraz bağ yoğunluğu içerdikleri için kırılmandır ve toklukları düşüktür. Termoset reçinelerin karşılaştırması Çizelge 3.1’de verilmiştir (Campbell, 2010).

Çizelge 3.1. Termoset reçinelerin karşılaştırması (Campbell, 2010).

Polyesterler	Ağırlıklı olarak ticari uygulamalarda tercih edilirler. Ucuz ve işlenmeleri kolaydır. Sürekli ve süreksiz elyaflı kompozitlerin üretiminde tercih edilirler.
Epoksiler	Ağırlıklı sürekli elyaflı kompozitlerin üretiminde tercih edilen yüksek performanslı matris türüdür. 120-135 °C’ye kadar olan uygulamalarda kullanılırlar. Polyester ve vinil ester reçinelere göre yüksek sıcaklıklarda daha yüksek performans verirler.
Vinil esterler	Polyester reçinelere benzer ancak daha tok ve daha iyi nem direncine sahiptirler.
Polyamidler	290-315°C’ye kadar olan uygulamalarda kullanılırlar. İmalleri çok zordur.
Bizmalemidler	135-175 °C aralığında kullanılan yüksek sıcaklık matrisidir ve epoksi gibi imal edilir. Yüksek sıcaklıkta post-kür gerektirir.
Siyanat esterler	135-175 °C aralığında kullanılan yüksek sıcaklık matrisidir ve epoksi gibi imal edilir. Yüksek sıcaklıkta post-kür gerektirir.
Fenolikler	Duman ve alev direnci yüksek olan yüksek sıcaklık reçine sistemidir. Çoğunlukla hava taşıtlarının iç kısımlarında kullanılırlar. Üretimleri zor olabilir.

Termoset polimerler, çeşitli ürünlerde kullanılan fiber takviyeli kompozitlerde matrisi oluşturur. Bunlar; tüketici ürünleri, oto gövde panelleri, baskılı devre kartları (PCB'ler) için gelişmiş bileşimler, uzay mekiği yük bölmesi, kapısı, jet motoru kaputları, kanalları gibi hava boşluğu yapısal bileşenleri, pahalı yüksek performanslı spor ekipmanları, PCB'ler için koruyucu solvent maskeleri dahil olmak üzere, yapıştırıcılar, kalıplama bileşikleri ve yüzey kaplamaları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Franck, 2004).

3.2. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemelerin oluşturulabilmesi için iki ana bileşene ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar matris ve takviye malzemeleridir. Takviye malzemeleri aynı zamanda kompozit malzemelerin dayanım özelliklerinin de belirleyicisidir. Kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye elemanları elyaflardır. Takviye çeşitlerine göre; polimer, metal ve seramik takviyeli olarak gruplandırılır.

- Polimer takviyeli kompozitler; kendi aralarında düşük mukavemet ve sertliğe sahiptir fakat üstün özellikleri ve fiyat olarak uygun olması sebebiyle en çok tercih edilen sınıftır,
- Metal takviyeli kompozitler; ara mukavemet ve sertliğe sahiptir,
- Seramik takviyeli kompozitler; yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir ancak kırılmandır.

Uygulamalarda, takviye elemanı olarak birçok elyaf çeşidi kullanılmaktadır. İnorganik elyaf çeşitlerinden en bilinenleri cam elyaf, karbon elyaf, aramid, boron, seramik, mineral ve metaliktir. Elyaf seçimini belirleyen temel hususlar, mekanik ve çevresel özelliklerin uygulamadaki etkinliği ve maliyettir (Barbero, 2010).

Tablo 3.2. Farklı liflerin mekanik özellikleri (Aboudi ve ark., 2013)

Lif	Çekme Mukavemeti (MPa)	Young Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
Pamuk	330-585	4,5-12,6	1,5-1,54
Keten	345-1035	27,6-45	1,43-1,52
Kenevir	690-1000	50	1,47-1,5
Jüt	393-800	13-26,5	1,3-1,45
İpek	650-750	16	1,3-1,38
Kenaf	930	53	1,5
Rami	400-1000	61,5	1,5-1,6
Sisal	511-635	9,4-15,8	1,16-1,5
Muz	500-700	7-20	1,4
Yumuşak ahşap	100-170	10-50	1,4
Parke	90-180	10-70	1,4
E-cam	1800	69-73	2,5
Yüksek modül karbon	2400	380	1,95
Yüksek mukavemetli karbon	3400	230	1,75
Kevlar 49	3000	130	1,45

3.2.1. Karbon fiber elyaflar

Karbon fiber elyaflar, bileşimde ağırlıkça en az %92 karbon olan fiberleri belirtir. Yüksek mukavemet özellikleri sayesinde sanayide birçok kullanım alanına sahiptir. Karbon fiber elyaflar, çelikten 4.5 kat hafif olmalarına rağmen 3 kat daha mukavemettir. Yüksek gerilme mukavemeti, sertliği, düşük yoğunlukları, yüksek termal stabiliteleri ve uygun elektrik iletkenliği gibi mükemmel özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamaları için ideal bir malzemedir. Havacılık, otomotiv ve spor endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Zhang, 2012). Kırılma direnci, düşük darbe direnci, düşük kırılma uzaması, bası direncinin çeki direncinden düşük olması ve maliyetinin yüksek olması dezavantajlarıdır (Campbell, 2010).

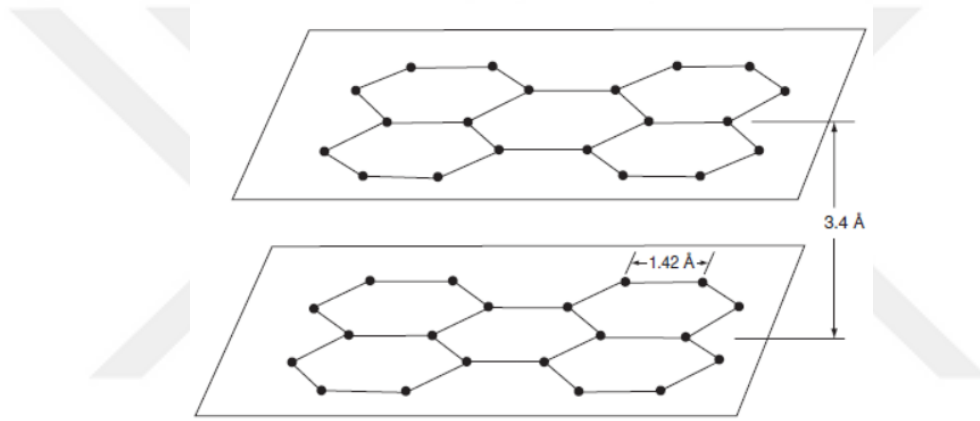
KFE üretildiği öncü maddelere göre; Poliakrilonitril, rayon ve zift temelli olarak sınıflandırılabilir. Son zamanlarda daha çok poliakrilonitril ve zift temelli karbon fiber elyaflar üretilmektedir. Zift temelli karbon fiber elyaflar genellikle elyaf yönünde daha yüksek Young modülüne, daha iyi ısı ve elektriksel iletkenliğe sahipken, poliakrilonitril temelli karbon fiber elyaflar daha yüksek bir çekme dayanımı sergiler. Fakat genel olarak, zift temelli karbon fiber elyaflar özellikleri poliakrilonitril temelli olana göre daha düşüktür. Çünkü zift temelli elyaf, özel olarak yüksek sıcaklıklarda piroliz işleminden geçirilmediğinde izotropik bir yapıya sahiptir. Bu işlem karbon fiber elyaflar mükemmel özellikler kazandırsa da oldukça pahalıdır (Chand, 2000; Akay, 2015).

Poliakrilonitril gibi daha düşük karbon içeriğine sahip organik lifler, 5 ile 10 µm çap arasında değişen birkaç bin filamanın ısı dönüşümü ile üretilirler. Yukarıda da bahsedilen tüm bu avantajlar, karbon fiber elyaflar takviyeli kompozit parçaların mükemmel mekanik özelliklerini vermek için yeterli (polimer reçine) bir matris malzemesi ile birleştirilebilir. Bu kompozit bileşenler, alüminyum veya diğer fiber takviyeli kompozitler gibi metallere yapılmış parçalara kıyasla da çok yüksek mekanik özelliklere sahip ve hafiftir. Bu durum cam, organik lifler veya metal gibi diğer elyaf takviyeli malzemelerle kıyaslandığında karbon liflerinin kullanımını haklı çıkarır (Pusch ve ark., 2018).

Karbon fiberlerin piyasada 207-1035 GPa arasında değişen çekme modüllerine sahip çeşitleri bulunur. Genellikle düşük modüllü fiberler, yüksek yoğunluklu fiberlere göre daha düşük yoğunluklara, daha az maliyetlere, daha yüksek çekme dayanımlarına, daha yüksek basma dayanımlarına ve kopma dayanımına sahiptir. Karbon fiberlerin avantajları arasında son derece yüksek çekme dayanımı-ağırlık oranı kadar iyi çekme modülü-ağırlık oranı, çok düşük doğrusal termal genleşme katsayısı (uzay anteni gibi uygulamalarda boyutsal kararlılık sağlayan), yüksek yorulma mukavemeti ve yüksek termal iletkenlik (bakırdan bile daha yüksek)

sıralanabilir. Dezavantajları, düşük kopma gerilmesi dayanımı, düşük darbe direnci ve yüksek elektriksel iletkenliktir. Koruması elektrik makinelerinde kısa devreye sebep olabilirler. Yüksek maliyetleri piyasada yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Çoğunlukla uzay uygulamalarında ve ağırlığın maliyetten daha önemli olduğu uygulamalarda kullanılır.

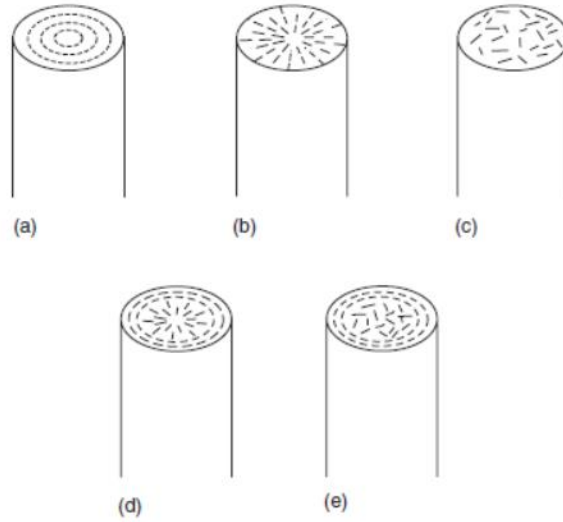
Yapı bakımından karbon fiberler, amorf karbon ve grafit karbon karışımı içerirler. Yüksek çekme modülü, karbon atomlarının paralel düzlemler veya katmanlardan oluşan bir kristallografik yapıda düzenlendiği grafitik formdan kaynaklanır. Her düzlemdeki karbon atomları birbirine bağlı düzenli altıgenlerin köşelerinde dizilmiştir (Şekil 3.4). Her düzlemde karbon atomlarının arasında güçlü kovalent bağlar bulunur fakat düzlemler arasındaki mesafe çok daha zayıf olan van der Waals bağlarının kuvvetlerden kaynaklanmaktadır.



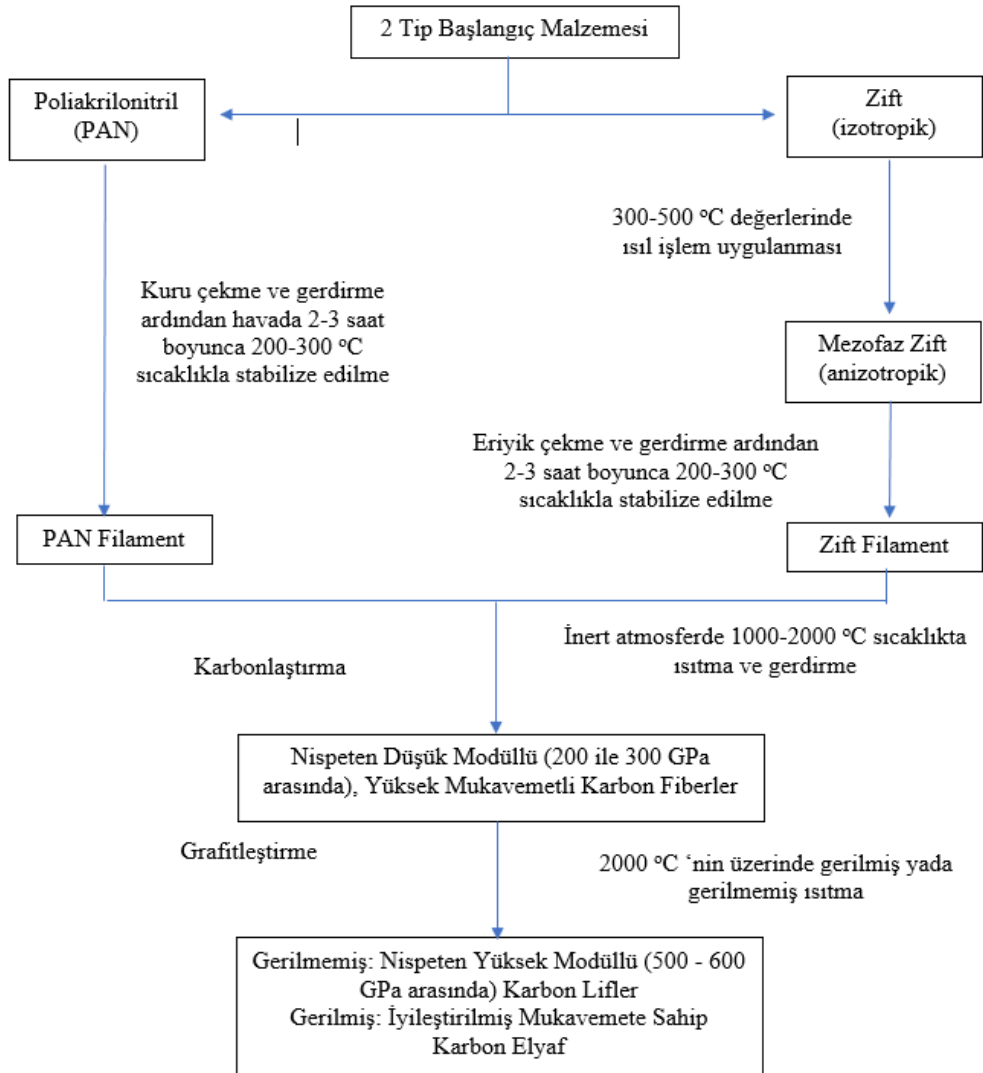
Şekil 3. 4. Grafit kristalinde karbon atomlarının dizilişi (Mallick, 2007).

Grafit kristallerinde bazal düzlemler, fiber eksenleri boyunca hizalanmıştır. Bununla birlikte enine yönde hizalama çevresel, radyal, rasgele ve bu dizilişlerin kombinasyonu şeklinde olabilir. Bu dizilişlerden hangisinin bulunduğu olarak fiberin çevresel ya da radyal doğrultularında ki elastikiyet modülü (E) ve termal genişleme katsayısı (α) gibi termoelastik özellikler aksenal ya da boylamsal yönden farklı olabilir. Örneğin; eğer diziliş çevreselse $E_a = E_\theta > E_r$ olur ve fiberin çevresel olarak ortotropik olduğu söylenir. Radyal diziliş için $E_a = E_r > E_\theta$ olur ve fiber radyal olarak ortotropiktir. Rasgele dizildiğinde $E_a > E_\theta = E_r$ olur ve fiber enlemesine izotropiktir. Ticari fiberlerde dış yüzeyde çevresel diziliş, çekirdekte radyal veya rasgele dizilişe sahip iki bölge bir yapı yaygın olarak gözlemlenir (Şekil 3.5).

Karbon fiberler iki tip başlangıç malzemesinden oluşurlar. Bunlar dokuma ve zift malzemelerdir. Her iki başlangıç malzemesinden üretim süreci ana hatlarıyla Şekil 3.6'te gösterilmiştir.

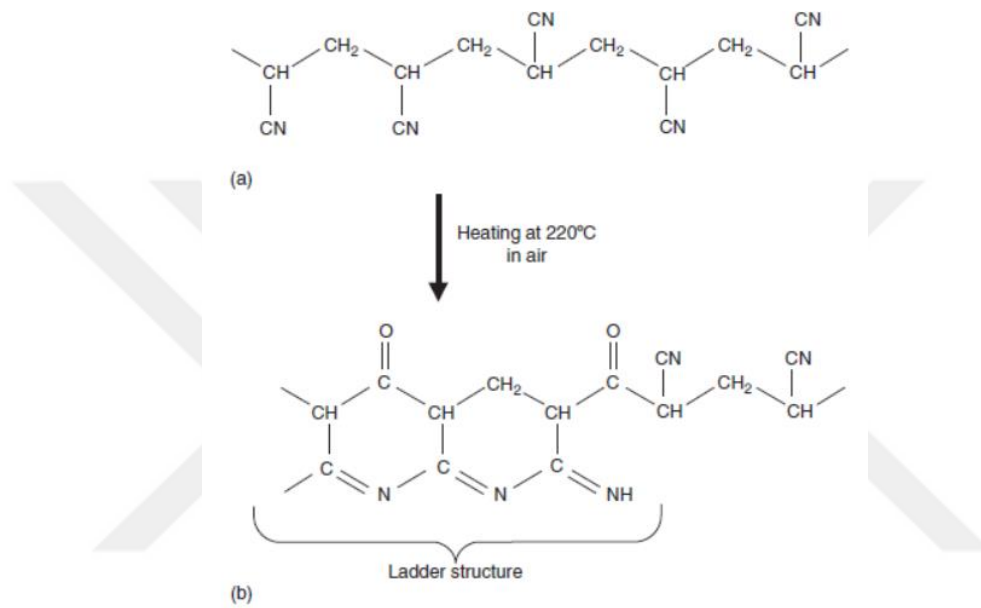


Şekil 3. 5. Grafit kristallerinin fiber ekseninin enine yönde dizilişi a) Çevresel, b) Radyal, c) Rasgele, d) Radyal-Çevresel, e) Rasgele-Çevresel (Mallick, 2007).



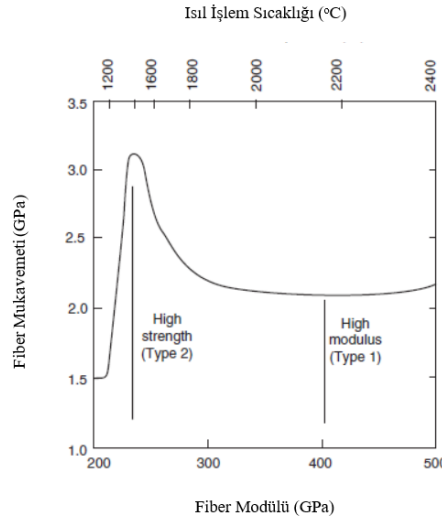
Şekil 3. 6. Karbon Fiber Üretim Akış Diyagramı (Mallick, 2007).

En yaygın dokuma malzemesi poliakrilonitril. Poliakrilonitrilin moleküler yapısı Şekil 3.7(a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Zincir her iki tarafında rasgele dizilmiş yüksek polarlıkta CN grupları içerir. Filamentler bir poliakrilonitril solüsyonundan ıslak olarak çekilir ve filaman yönünde hizalanan polimer zincirleri yüksek bir sıcaklıkta gerilir. Gerilen filamentler havada 200-300 °C sıcaklıkta birkaç saat ısıtılır. Bu esnada, orijinal zincir kombinasyonu aynı tarafta bulunan CN grupları daha kararlı ve daha rijit bir basamak yapısı oluşturmak için birleşirler ve bazı CH₂ grupları oksitlenirler Şekil 3.5(b).



Şekil 3. 7. Oksitlenmiş Bir Poliakrilonitril Molekülünün Basamak Yapısı a) Poliakrilonitril Moleküler Yapısı, b)Rijit Basamak Yapısı (Mallick, 2007).

Sonraki adımda poliakrilonitril filamanları atmosferde kontrollü bir oranda ısıtılarak karbonize edilir. Büzüşmeyi engellemek ve moleküler yönelimi iyileştirmek için filamanların üzerindeki gerilme korunur. Oksijen ve nitrojen atomlarının eklenmesiyle filamanlar paralel düzlemdeki aromatik halka desenlerinde daha çok karbon atomlarını içerir. Kömürleşmiş filamanlar daha sonra 2000 °C veya üzerinde ısıl işlem gördüğü için yapıları daha düzenli hale gelir ve artan ısıl işlem sıcaklığıyla doğru bir grafitik forma döner. Grafitleşmiş filamanlar yüksek bir çekme modülüne ulaşır fakat çekme gerilimleri nispeten daha düşük olabilir (Şekil 3.8). Çekme gerilimi 2000 °C'nin üzerinde sıcak gerilme tarafından grafitik düzlemlerin filaman yönünde hizalanmasıyla artırılabilir (Mallick, 2007).



Şekil 3. 8. Isıl İşlem Sıcaklığının Karbon Fiberlerin Mukavemeti ve Modülü Üzerindeki Etkisi (Mallick, 2007).

3.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit yapılar, en eski ve en yaygın kullanıma sahip olan kompozit türüdür. Farlı açılarda örülmüş veya sarılmış elyaflara sahip tabakaların birleşimi ile mukavemet değerleri çok yüksek malzemeler elde edilir (Toma, 2007). Tabakalı kompozit, ana açı doğrultusunda, değişik açılardaki katmanların üst üste serilerek veya sarılarak bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu oluşumun durumu kompozit malzemenin maruz kalacağı yüklere göre tasarlanır.

Tabakalı kompozit malzemeler, adından da anlaşılacağı üzere iki veya daha fazla tabakanın birleşimiyle oluşurlar. Dayanım ve mekanik özelliklerin önem taşıdığı uygulamalarda, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Yapı oluşturulurken homojen olabileceği gibi hibritte olabilir. Yapının oluşumunda ki ana ilke mekanik özellikleri olumlu yönde artıracak bir kompozisyon oluşmasıdır.

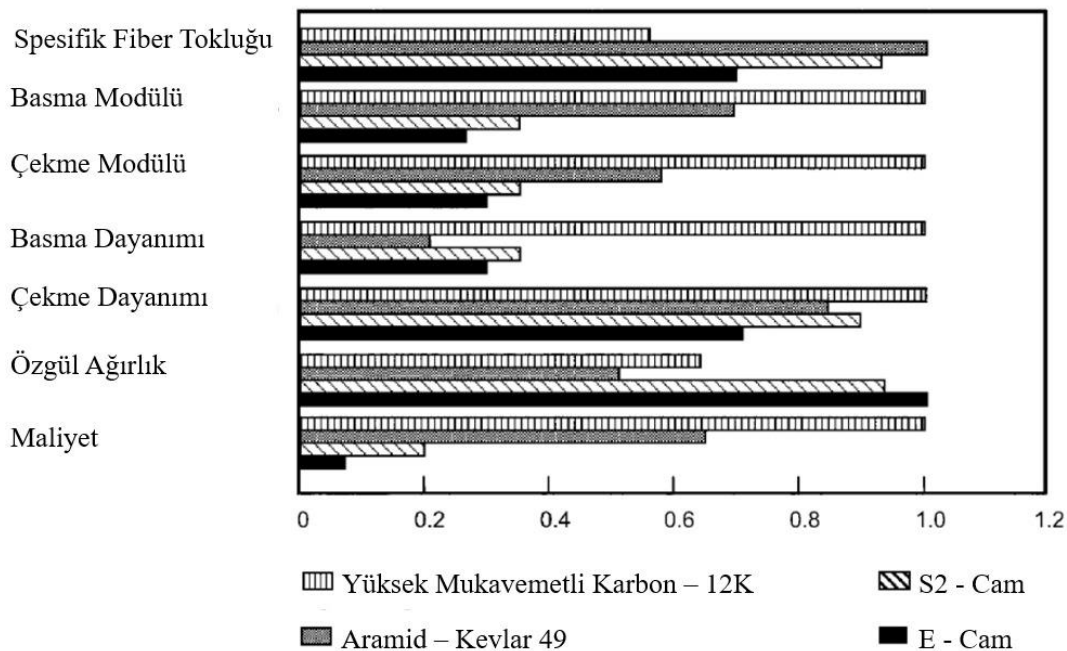
Tabakalı kompozit üretiminde farklı türden (hibrit) veya tek bir türden malzeme kullanılabilir. Tabakalı kompozitlerin, üretiminde kullanılan malzemelerin türlerinden hareketle, farklı malzemelerden oluşan Tabakalı kompozit malzemeler ve tek tür malzemelerden oluşan Tabakalı kompozit malzemeler, şeklinde iki grupta toplamak mümkündür (Gemi, 2018). Tabaka sayılarının artması oluşturulan kompozitin özelliklerinin artmasını sağlar. Günümüzde yapılan çalışmalar teğetsel gerilme dayanımı, iç basınç dayanımı gibi birçok özelliğin arttığını bize göstermiştir (Kara ve Uyaner, 2017).

3.3.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler

En yaygın kullanılan kompozit türleri, küçük çaplı elyaf lifleriyle takviye edilmiş bir matristen oluşan polimer takviyeli kompozit malzemelerdir (Kaw, 2006). Polimer takviyeli kompozit, yapısal mühendislik malzemeleri arasında en önemli ve en tercih edilen malzemeler arasına girmeyi başarmıştır. Bu durum sadece yüksek performanslı elyafların geliştirilmesinden değil, yeni geliştirilen polimer matrislerin sayesinde.

Polimerlerin mekanik özellikleri genellikle mühendislik uygulamaları için yetersizdir. Bu sebeple, takviye elemanları ile iyileştirmeler yapılır. Sonuç olarak, ortaya geliştirilmiş özellikleriyle dikkat çeken, üretimi oldukça kolay olan polimer takviyeli kompozitler çıkmıştır. Polimer takviyeli kompozit, metal ve seramik takviyeli kompozitlere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer takviyeli kompozit üretebilmek için yüksek sıcaklık ve basınç gerekmediğinden, karmaşık şekilde ki parçaların üretilmesi daha kolaydır. Üretimi için gerekli ekipmanlar daha basittir (Balasubramanian, 2013).

Şekil 3.9'da karbon/epoksi bir malzemenin bazı yüksek dayanımlı elyaflarla üretilen kompozit malzemelere göre mukavemet özelliklerinin karşılaştırılması yapılmış ve mukavemet özellikleri olarak kıyas yapılan malzemelere göre üstünlükleri görülmüştür (Campbell, 2010).



Şekil 3. 9. Karbon/epoksi bir malzemenin bazı yüksek dayanımlı elyaflarla üretilen kompozit malzemelere göre mukavemet özelliklerinin karşılaştırılması (Campbell, 2010).

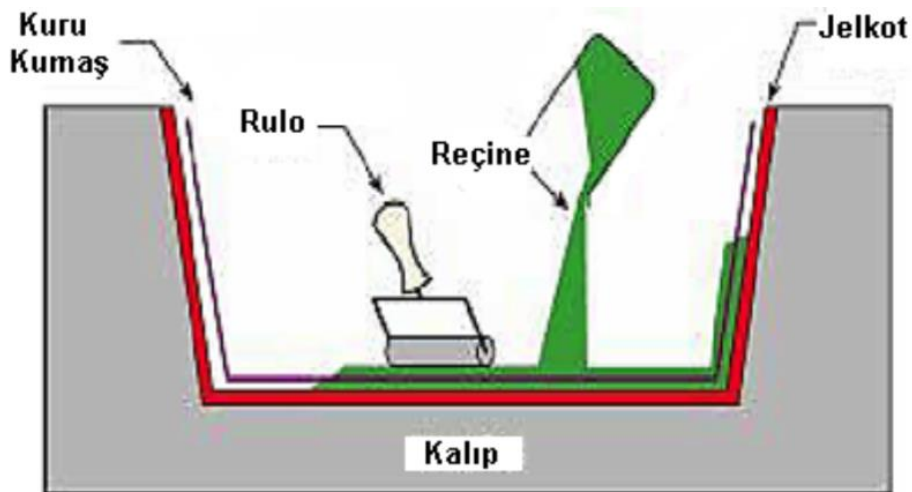
3.4. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri için; bileşim malzemelerinin özelliklerine, tasarlanan malzemenin ebatlarına, malzeme boyutlarına, mühendislik detaylarına ve kullanım alanlarına göre seçim yapılır. Kompozit malzemelerin motor komponenti, PCB, deniz araçlarının gövde parçaları, hava araçlarının kanatları vs. kullanım alanları vardır. Üretim yöntemleri üründen ürüne değişebilir. Tasarımda tercih edilen matris tipi, proses seçimine önemli bir faktördür. Fiber takviyeli plastikler ve metal takviyeli kompozitler ile yapılan bir motor pervane kanadını üretmek için farklı yöntemler kullanılır. Aynı matris malzeme kullanıldığında bile proses parametreleri değişebilir (Sinha, 2006).

Polimer takviyeli kompozit malzemeleri üretmek için birçok teknik geliştirilmeye birlikte kullanılan matris malzemelerine göre ya termoset reçineli ya da termoplastik reçineli olarak üretilmektedir.

3.4.1. El yatırma tekniği

El yatırma yönteminde reçine, keçe ya da kumaş formunda ki lifler kalıba yerleştirilir ve reçine fırça veya rulo yardımıyla emdirilir. Kürtleme prosesi atmosfer koşullarında ilave bir sisteme gerek duyulmaksızın gerçekleştirilir. Uygulayıcı personelin kalitesinin ürün kalitesini belirlemesi bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Bu durum, uygulamayı yapan personelin sağlığına risk teşkil etmesinin yanı sıra üretilen malzemenin mekanik ve termal özellikleri tehlikeye girer. Bu yöntemde kullanılan reçinelerin viskozitelerinin düşük olması elzemdir.



Şekil 3. 10. El yatırma yöntemi (Çalışkan, 2021).

3.4.2. Püskürtme yöntemi

Bu yöntemde, parçalanmış elyafı ve matris sprey tabancasıyla doğrudan kalıba sıkılır ve küreleme için koşul oluşturmaya ihtiyaç olmaz. Yöntemin maliyeti düşüktür fakat ciddi dezavantajları vardır. Püskürtmenin hiç kesilmeden devam etmesi reçine oranını ciddi miktarda artırır. Bu da otomatik olarak ürün ağırlığını artırır. Yalnızca parça elyaf ve viskozite değeri düşük matrisler kullanılabildiği için mekanik özelliklerini ciddi oranda sınırlar. Bununla birlikte, uygulayıcının yüksek stiren reçinelere maruz kalması sağlığı için tehlikelidir.

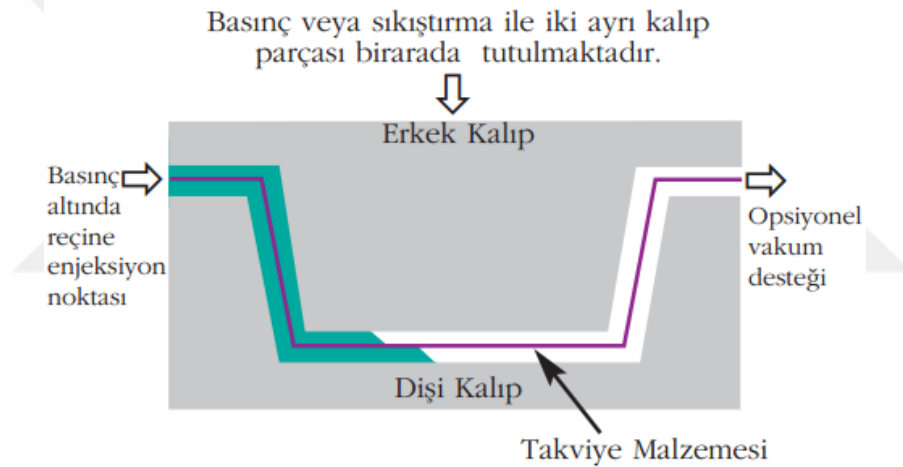


Şekil 3. 11. Püskürtme yöntemi.

Yöntemin uygulanırken ortaya çıkardığı problem, imalat sırasında ortaya çıkan organik bileşenlerin ve hava kirliliği oluşturan malzemelerin idaresidir. Bu bileşenlerin imalat sırasında idaresi maliyetlidir. Bu yöntemi tercih eden üreticiler havanın kirlenmesini engellemek için kapalı kalıp imal sistemlerine geçiş yapmıştır. Diğer üretim tekniklerinde elde edilen hassasiyet ve kalite bu teknikle sağlanamaz. Bu sebeple, banyo küvetleri, yüzme havuzları vb. gibi büyük ölçekli ürünler ve hasarlı kompozitlerin onarımı gibi kullanım alanları sınırlıdır (US Department of Energy, 2015).

3.4.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi

Reçine transfer kalıplama yönteminde, imal edilen kompozit malzemenin kuru fiber örgüleri ya da elyaflar dişi kalıba yerleştirilir. Sonrasında erkek kalıp konulur ve sıkıştırılır. İki ucu açık olan kalıbın bir tarafından reçine enjekte edilir (Şekil 3.12). Bu üretim tekniğinin en büyük dezavantajı, basınç dayanımı yüksek olan kalıpların maliyetlerinin yüksek olması ve kalıp içerisinde üretildiği için malzeme ebatlarının sınırlı olmasıdır. Kalıp içerisinde müdahale mümkün olmadığı için reçine emilmemiş bölgeler meydana gelebilir. Bu durum hurda maliyetlerini artırır. Bu teknik diğer tekniklere kıyasla karmaşık yapılarda ve otomobil komponentlerinde yüksek bir potansiyel taşır. Örneğin; 2013 yılında tanıtılan BMW i3 modelinin kaportası, reçine transfer kalıplama metodu kullanılarak şekillendirildi ve robotik kollar yardımıyla montajlandı. Ayrıca bu metot şasi/süspansiyon, tavan ve kaporta içinde güçlü bir adaydır.

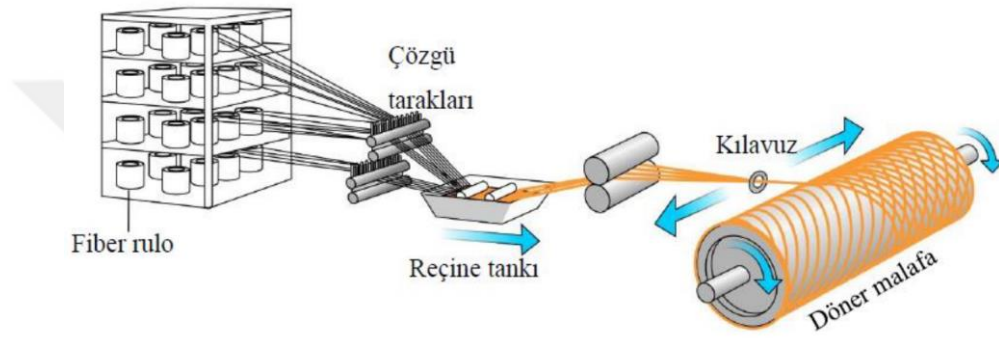


Şekil 3. 12. Reçine transfer kalıplama yöntemi (US Department of Energy, 2015).

Reçine transfer kalıplama ile seri üretilen termoset parçaların sanayide yer tutması hızlı kürlenen termoset reçinelerin geliştirilmesidir. Karbon fiber kompozitlerde belirli epoksilerin ve poliüretanların mükemmel performansları kanıtlanmıştır. Yüksek basınçlı reçine transfer kalıplama yönteminin ısıllı şekillendirme ile birleştirilmesi, reçine transfer kalıplama metodunun döngü süresinin geliştirilmesi için umut verici bir yeniliktir. Mevcut reçine transfer kalıplama uygulamalarında 20 dakikalık bir döngü süresi hızlı reaksiyona giren termoset reçinelerin kullanımıyla yüksek basınçta enjekte edilerek emdirilme süresi dakikalar yerine saniyelere indirilmiştir. Bütün büyük tedarikçiler termoset reçineler için 2 dakika döngü süresinin altında laboratuvar ölçekli reçine sistemleri geliştirmiştir. Hedef otomobil parçası uygulamalarında döngü süresini 3 dakikadan daha aza indirmektedir (US Department of Energy, 2015).

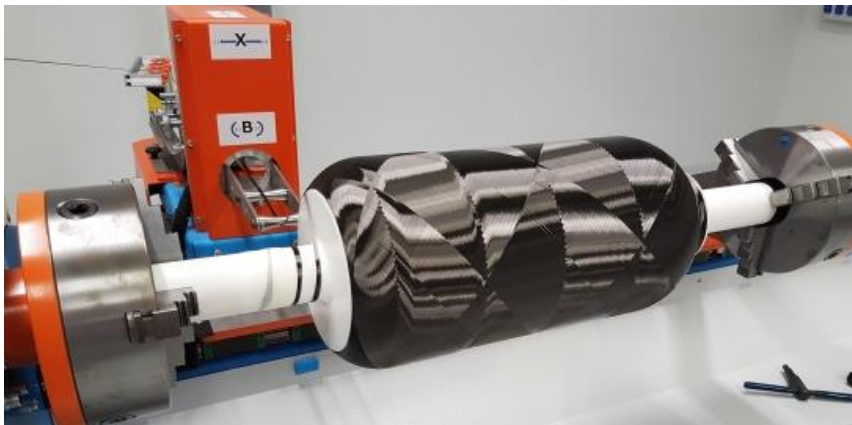
3.4.4. Filaman sarım yöntemi

Filaman sarım yöntemi, reçine banyosundan geçirilen elyafın, yüzeyine ayırıcı sürülmüş olan dönen bir kalıbın üzerine istenilen açı, desen ve kalınlıkta kontrollü şekilde sarılması yöntemidir. Kürleme işlemi kalıbın üzerinde yapıldıktan sonra özel bir makine tarafından kalıptan ayrılarak ürün kalıptan çıkarılır. Filaman sarım yöntemi ile üretilen malzemelerin takviye oranı yüksek olduğu için mukavemetli ve kaliteli ürünler elde etmek mümkündür. Ayrıca, reçineye ilave edilecek nano katkılarla ürünün UV dayanımı, sertlik ve yangın dayanımı gibi özellikleri modifiye edilebilir. Silindirik forma sahip her türlü form bu yöntem ile üretilmektedir.



Şekil 3. 13. Filaman sarım yöntemi.

Filaman sarım yöntemi; boru ve tanklar gibi içi boş, silindirik kesitli bileşenler için en uygun üretim yöntemidir. Bu yöntemin dezavantajı elyafların aksenal yönde sarılamaması ve genellikle düşük viskozite değeri düşük reçine kullanımının gerekmesidir. Filaman sarım yöntemi boru hatları ve basınçlı tanklar gibi asimetric kompozit malzemeler için baskın üretim yöntemidir. Basınçlı tank üretiminde yüksek yoğunluklu bir polietilen reçine üzerine epoksi reçineden geçirilmiş fiberler kullanıldığını varsayarsak karbon fiber lifler üretim maliyetinin %60'ını kapsar (US Department of Energy, 2015).



Şekil 3. 14. Filaman sarım uygulaması.

Filaman sarım yöntemiyle üretilmiş kompozit borular yüksek rijitlik ve mukavemet özellikleriyle basınçlı sıvılar için iyi bir alternatif malzemedir. Bu borular çelik, beton ve asbest borularla kıyaslandığında pürüzsüz iç yüzeyleri sayesinde düşük sürtünmelere ve düşük basınç kayıpları ile verimlidirler. Bu sebepten dolayı birçok araştırmacı tarafından boruların mekanik özellikleri ve hasar modları incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, hasarların matris çatlağıyla başladığı ve sızıntı yoluyla devam ettiği, akabinde delaminasyon ve elyaf kırılması ile sonuç hasarı olduğu görülmüştür (Gemi ve ark., 2018). Filaman sarım boruları üretmek için gelişen üretim teknolojisiyle birlikte, filaman sarım yöntemi ile üretilmiş fiber takviyeli silindirik kompozit yapıların uygulanmasına artan bir ilgi olmuştur. Polimerik kompozitler, oldukça yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle metallere göre birçok maliyet avantajı sunar (Tarakçıoğlu ve ark., 2005).

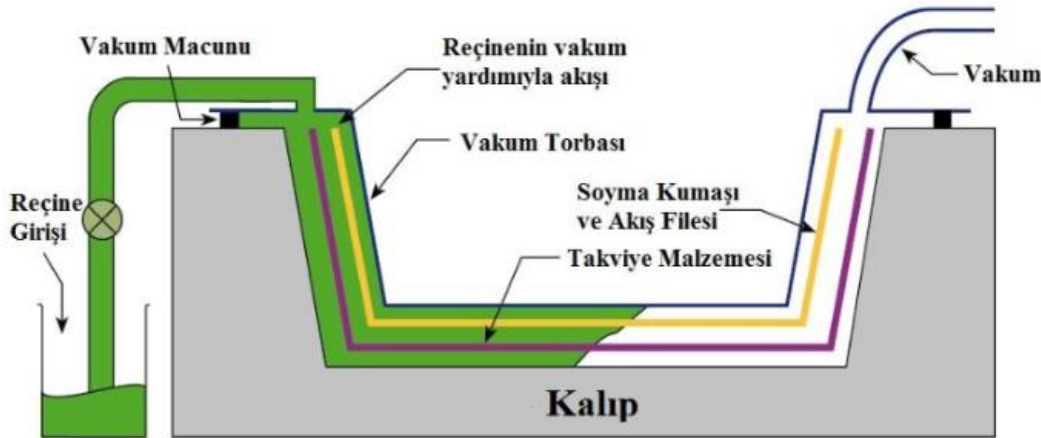
3.4.5. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon (çekme) yönteminde genellikle fiberler reçine banyosundan geçtikten sonra bir kalıp boyunca çekilir ve çeşitli geometrilere sahip profil çubuklar elde edilir. Bu yöntemle sabit kesitli ve sürekli uzunluğa sahip parçaların üretimi mümkündür. Fiberler ısıtılmış bir kalıp içerisinden sabit bir hızla çekildiği için kompozit parça kalıptan kurlenmiş olarak veya yarı kurlenmiş olarak çıkar. Genellikle kalıptan çıkan parçalara ilave bir yüzey işlemi yapılmaz. Pultrüzyon yöntemi düşük maliyetli, yüksek hacimde üretime imkân veren, sürekli ve otomatik bir proses olmasından kaynaklı tercih edilmektedir fakat sınırlı geometrilerde kullanılabilir. Aynı zamanda bu yöntem akslar, dikmeler, tahrik milleri gibi parçaların üretiminde hız ve maliyet avantajları sunar.

3.4.6. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi

Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi, reçine transfer kalıplama yönteminde birkaç değişiklik yapılarak oluşturulmuştur. Temel değişiklik reçine transfer kalıplama yönteminde kullanılan üst kalıp bu yöntemde kullanılmamaktadır (Şekil 3.15). Vakum destekli reçine infüzyon yöntemleri; Seemann Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama İşlemi (SCRIMP), Esnek Kalıpta Reçine İnfüzyonu (RIFT) ve Vakum Torbalama (VARTM) olarak üçe ayrılır. Reçinenin parçanın her yerinde hızlı bir şekilde dağılmasını kolaylaştırmak için bir soyma kumaş veya yapısal olmayan örgü kumaş gibi geçirgen bir katman sıklıkla eklenir. Bu işlemler; basitlik ve bir kalıp kullanımı avantajıyla demiryolu vagonları ve köprü parçaları gibi parçaların üretilmesi gibi özelliklerinden dolayı reçine transfer kalıplama yönteminin yerini almıştır. Bu

uygulamaların dezavantajları; torbalama tarafında zayıf yüzey kalitesi, neredeyse düz yapılarla sınırlı kompozit parçaların üretilebilmesi, malzeme hazırlanırken geçen süre, zayıf ölçüsel toleranslar ve otomasyon eksikliğidir.



Şekil 3.15. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (US Department of Energy, 2015).

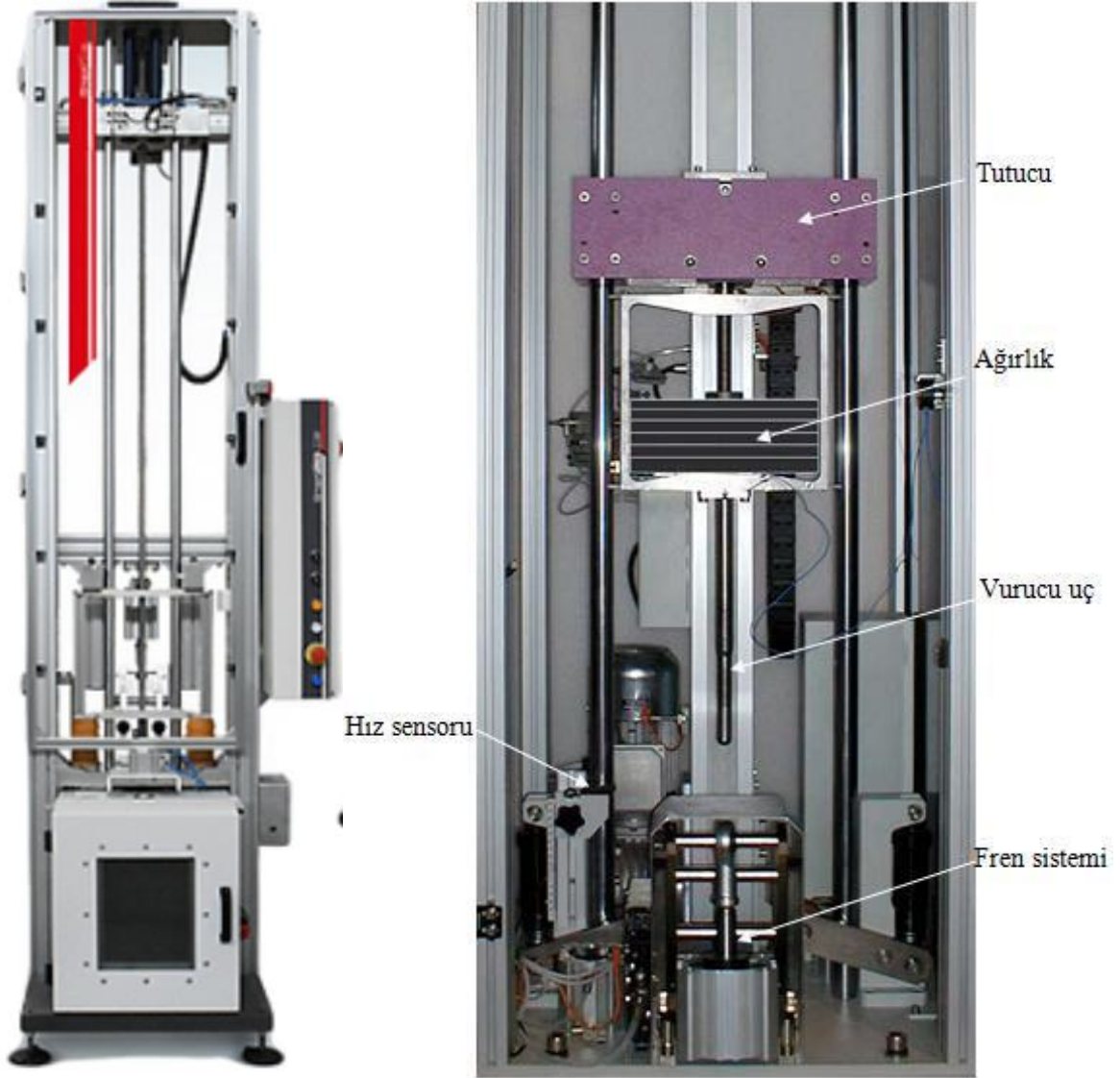
3.5. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Günümüz dünyasında malzemelerin tekil özellikleri ihtiyaçları karşılamamaktadır. Ağırlık/mukavemet oranlarını istenilen ölçüde yakalayabilmek için kompozit malzemelere olan ihtiyaç artmıştır. Birbirinin üstün özelliklerini kullanarak pasif özelliklerini bastıran kompozit malzemeler bu ihtiyaçlara cevap olarak tasarlanmaktadır. İstenilen malzemeler tasarlanırken, çalışma ömrünün ve uğrayabilecekleri hasarlara verecekleri cevapların bilinmesi gerekmektedir. Hasar tespitleri laboratuvar ortamında gerçeğe en yakın modellemeler kullanılarak tespit edilmeye çalışılmaktadır. Darbe hasarlarının tespitinde kullanılan önemli yöntemlerden birisi de düşük hızlı darbe deneyi yöntemidir. Bu test sayesinde malzemenin darbe karşısında vereceği tepkiler tahmin edilebilir hale gelmektedir (Gemi 2018; Cantwell 2007; Uyaner ve ark., 2014; Gemi ve ark., 2016; Gliszczynski ve ark., 2019; Richardson ve ark., 1996; Hawa ve ark., 2016; Gemi ve ark., 2018).

Darbe testleri, genellikle günlük yaşamda karşılaştığımız çivi çakmak, çekiçle dövmek, otomobil çarpışmaları, araçların küçük tampon darbeleri, hareket halinde araca sıçrayan taş, yoldaki çukura hızla ve aniden düşen bir araba tekerleği ve kompozit bir kanat yapısı üzerine bakım esnasında düşürülen bir aletin darbe etkileri gibi gerçek olaylarla bir benzetme yapılarak oluşturulmaktadır (Şenel ve ark., 2009).

Yöntemde kullanılan mermi hızlarının ve oluşturduğu delaminasyon hasarlarının etkisi (Mili ve Necib, 2001), elyaf kırılması ve matris kırılması olarak tespit edilmiştir. Kompozit malzemelerin tasarımında kullanılan önemli yöntemlerden biri olan düşük hızlı darbe deneyi

yöntemi literatürde, 1-10 m/s aralığındaki hızlarda uygulanan darbeler olarak tanımlanmıştır. Şekil 3. 16'da düşük hızlı darbe örnek test cihazları verilmiştir.



Şekil 3. 16. Düşük hızlı darbe deney cihazı.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Karbon Elyaf Takviyeli Boru Üretimi

Bu çalışmada karbon elyaf/epoksi boruların hazırlanmasında, elyaf malzemesi olarak 12K A49 karbon elyaf, matris malzemesi olarak da Hunstman MY740, HY918, DY062 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhydride) kullanılmıştır. Üretim esnasında ıslak sarım metodu kullanılmıştır (Şekil 4.1). Elyaf bir reçine banyosundan geçirilmiştir. Sarım işlemi başlamadan önce sarım esnasında soğuk mandrelin reçine sıcaklığını düşürmemesi için mandrel 60 °C'ye ısıtılmıştır. Reçine banyosunda reçine karışımının sıcaklığı 60 °C'de kontrol altında tutulmuştur. Mandrellerin üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülmüştür. $(\pm 55^\circ)_4$ konfigürasyonuna sahip üç farklı çapta (Ø54, Ø72 ve Ø96 mm) kompozit boru üretimi yapılmıştır.



Şekil 4. 1. Filaman sarım karbon/epoksi boruların üretimi

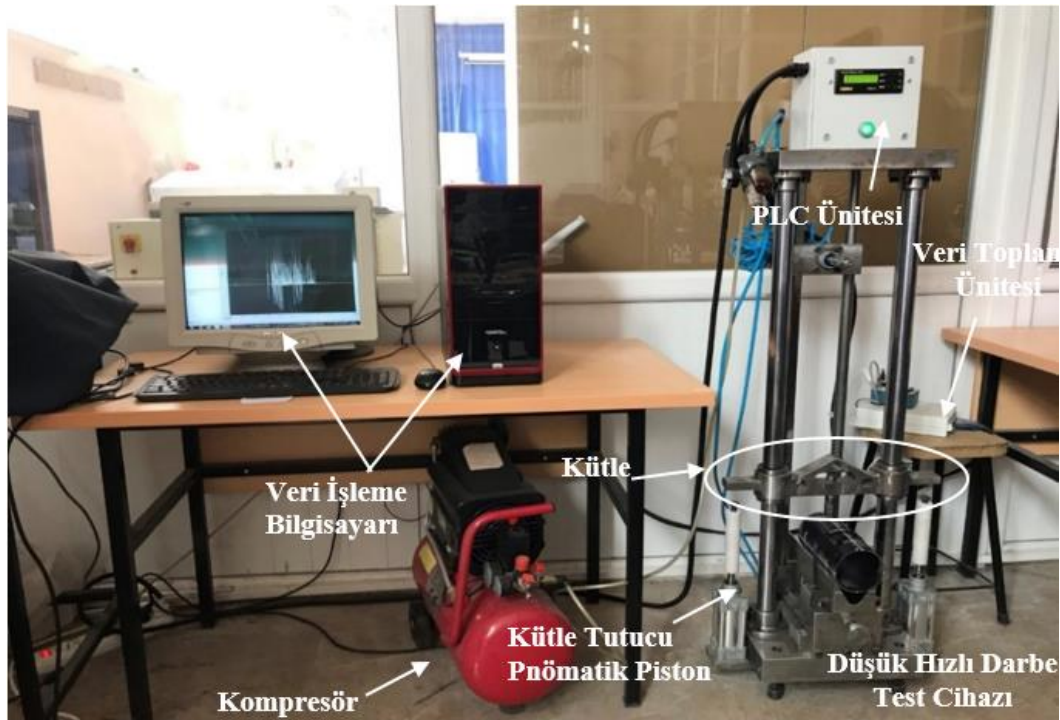
Üretimi tamamlanan karbon elyaf takviyeli borular malafa ile döner bir küreleme fırınına konulmuştur. Küreleme işlemi ise 4 saat 120 °C de yapılmıştır. Sarım işlemi sonunda 1 m uzunluğunda ve 54, 72 ve 96 mm çaplarında 8 tabakalı borular elde edilmiştir. Üretilen borular deneysel çalışmalar için 200 ve 100 mm boyunda kesilmiştir. Karbon elyaf takviyeli boruların üretimi ve küreleme işlemleri İzmir İzoreel Komp. Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. imkanlarından yararlanılarak yapılmıştır. Üretimde kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri

	E (GPa)	$\sigma_{çek}$ (MPa)	ρ (g/cm ³)	ϵ_{kop} (%)
Elyaf: Karbon elyaf	240	4900	1.79	1 - 1.5
Epoksi Reçine	3.4	50 - 60	1.2	4 - 6

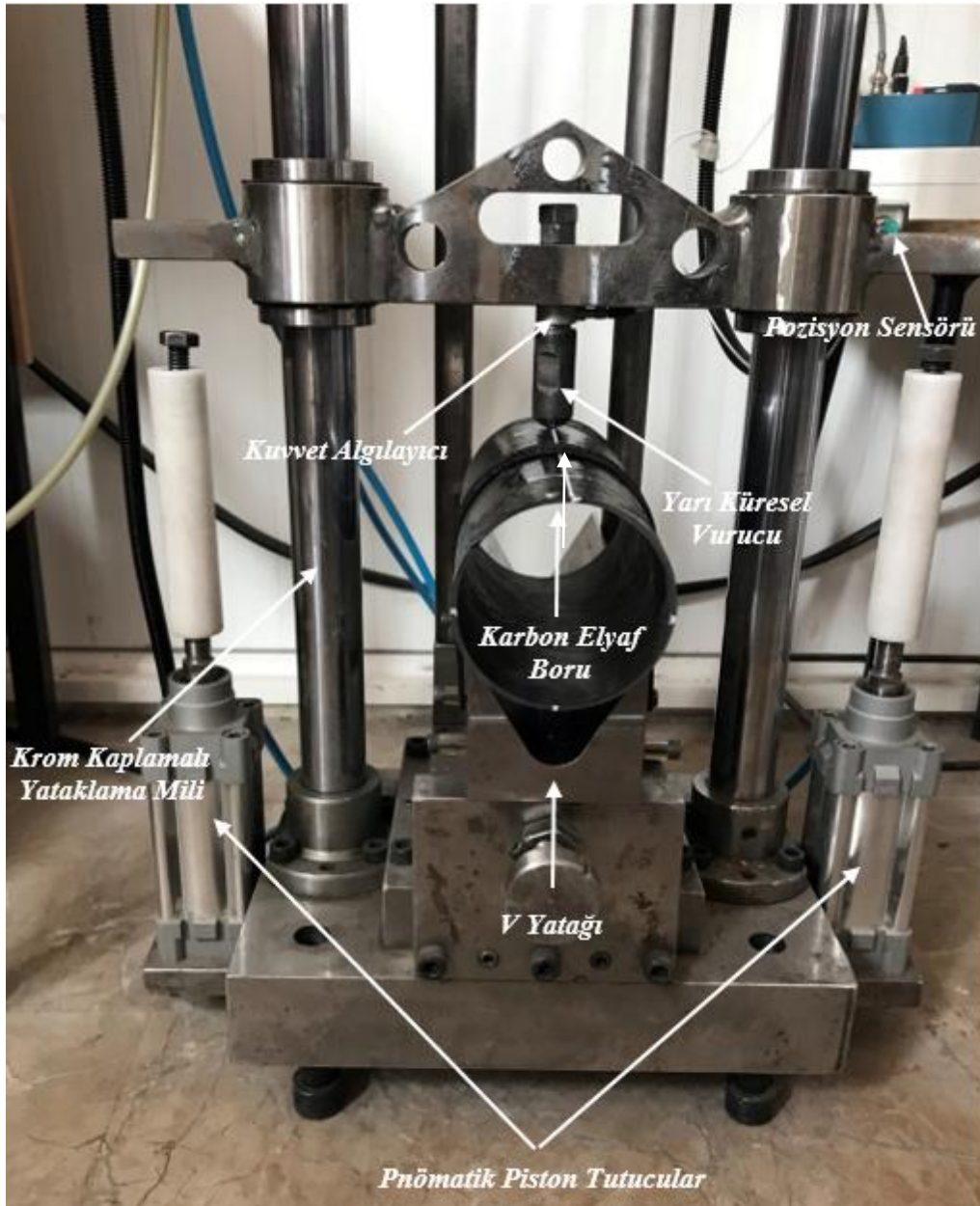
4.2. Düşük Hızlı Darbe Testi

Karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunelerinin, düşük hızlı darbe yüklemelerine vereceği cevapların araştırılması için özel olarak imal edilmiş düşük hızlı darbe deney cihazı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla; Ø54, Ø72 ve Ø96 çaplarındaki borular üzerine ASTM D 7136 standardına göre, 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarda darbe uygulanarak hasar oluşturulmuştur. Şekil 4.2’de deneylerde kullanılan düşük hızlı darbe deney cihazı görülmektedir.



Şekil 4. 2. Düşük hızlı darbe deneyi cihazı ve veri toplama ünitesi

Deneylerde kullanılacak cihaz ile değişik enerji seviyelerinde ve değişik hızlarda darbe deneyleri yapılabilir. Deney sırasında elde edilen bütün veriler hassas bir şekilde yazılımsal olarak kaydedilebilir. Düşük hızlı darbe deney cihazı üç ana elemanın biraraya gelesiyle oluşturulmuştur. 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.



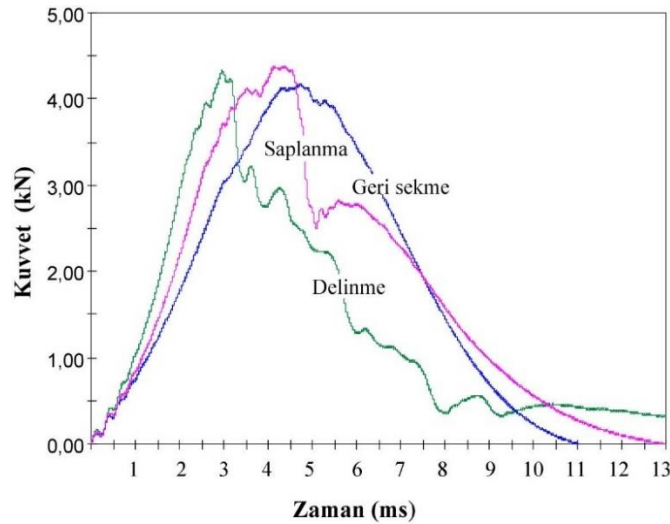
Şekil 4. 3. V yatağı üzerindeki deney numunesi

4.3. Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Darbe testleriyle numuneler üzerine farklı hız seviyelerinin uygulanmasıyla, veri toplama ve işleme cihazlarından kompozit malzemelerin darbe yüklemelerine karşı verdiği cevapları gösteren birçok veri elde edilebilmektedir. Bu veriler, kompozitlerin darbe yüklemesine maruz bırakan vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi üç özel durumun anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu grafiklerden; Kuvvet-Yer değiştirme (F-d), Kuvvet-Zaman (F-t) eğrileri gibi kompozit malzemenin darbe yükü altında davranış şeklini belirlemede kullanılan grafikler elde edilebilir. Bu grafikler, kompozit malzemelerin darbe yüklemelerine karşı verdiği cevapların incelenmesinde ve yorumlanmasında bize önemli bilgiler verir.

4.3.1. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri

Şekil 4.4’de verilen grafiği incelediğimizde üç tip darbe hasarı görülmektedir. Bunlar; en düşük enerji seviyesine sahip olan ve grafikte geri sekme (rebounding) olarak belirtilen eğri yani vurucunun malzemeye vurup absorbe edilemeyen enerjiyle geri sekmesi, saplanma (penetration) vurucu ucun numuneye saplanması ve delip geçmesi (perforation) vurucunun malzemeyi delip geçmesi olarak belirtilmiştir.



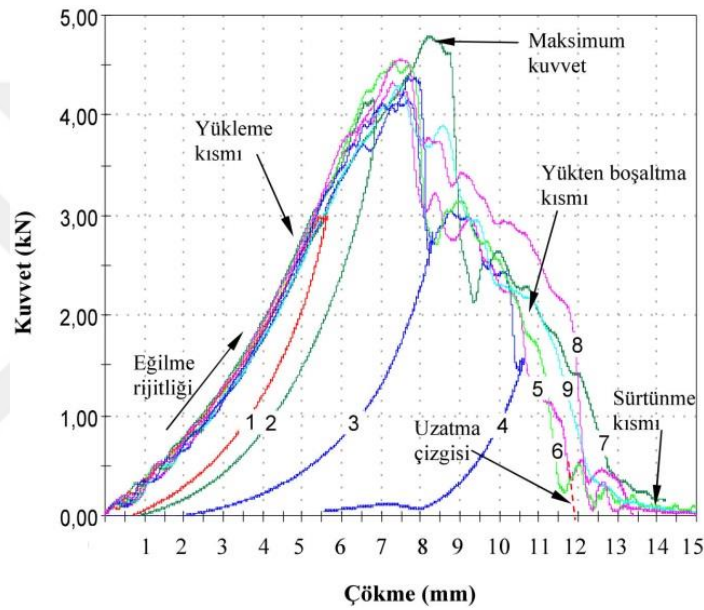
Şekil 4. 4. Tipik kuvvet-zaman (F-t) eğrileri (Gemi, 2019).

Kuvvet-zaman grafiğinden yola çıkarak gibi eğriler parabolik olarak oluşurlar. Uygulanan darbe yükünün artmasıyla penetration ve perforation eğrileri, bir süre sonra vurucuya karşı mukavemet uygulayan bir yüzey kalmadığı için kuvvet değeri yatay bir hal alır. Penetration eğrisi incelendiğinde, saplanma söz konusu olduğu için karşı bir mukavemet

olmayacaktır fakat vurucu cidarı ve kompozit malzemenin delinen kısmındaki yüzey arasında oluşan sürtünme kuvvetinden dolayı kuvvet değeri yatayda yol aldıktan bir süre sonra sonlanır (Sayer ve ark., 2009).

4.3.2. Kuvvet-yer değiştirme (F-d) eğrileri

Şekil 4.5’de verilen grafiği incelediğimizde eğriyi üç bölüme ayırabiliriz. Bunlar; vurucu ucun bırakılması ile enerjinin yüklendiği bölüm, vurucunun numune yüzeyi ile temas ettiği ve enerjisini boşaltmaya başladığı tepe noktası ve vurucu enerjisinin boşaltıldığı yükten boşalma kısımlarıdır.



Şekil 4. 5. Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik kuvvet- yer değiştirme (F-d) eğrileri (Gemi, 2019).

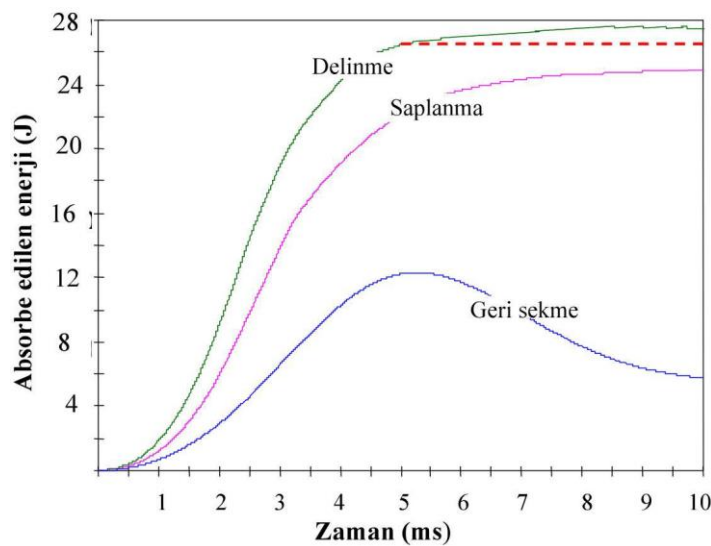
Şekil 4.5’de verilen grafiği incelediğimizde her eğri kendi içerisinde vurucunun bırakıldığı andan itibaren ki yüklemeye kısmına, enerjinin maksimuma ulaştığı noktaya ve enerjinin absorbe edildiği yükten boşalma kısmına sahiptir. F-d eğrisinde, eğilme rijitliği malzemenin darbe yüküne karşı göstermiş olduğu mukavemet değeri olarak adlandırılabilir. Darbe yüklemeleri ile iki tip parabolik eğri oluşabilir. Bunlar, açık ve kapalı uçlu eğriler olarak ayrıştırılabilir. Kapalı uçlu eğriler, kuvvet-zaman eğrilerinde de örneklediğimiz gibi vurucu ucun malzeme yüzeyinden geri sekmesi (rebounding) sonucu oluşan parabolik eğrilerdir. Uygulanan darbe enerjisini malzeme büyük ölçekte absorbe eder, absorbe edilmeyen enerji vurucuyu geri fırlatır. Yani delinme gerçekleşmez. Darbe kuvveti artırıldıkça yer değiştirme miktarı dolayısıyla hasar miktarı artar, parabolik eğriler genişler. Açık uçlu eğrilerde ise vurucu uç malzemeye saplandığı veya deldiği için sürtünmeden kaynaklı yatay bir doğru oluşumu

gözlemlenir. 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 absorbe edemeyeceği anlaşılmaktadır (Sayer ve ark., 2009).

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

Şekil 4.6'da verilen grafiği incelediğimizde üç tip darbe hasarı görülmektedir. Bunlar; en düşük enerji seviyesine sahip olan ve grafikte geri sekme (rebounding) olarak belirtilen eğri yani vurucunun malzemeye vurup absorbe edilemeyen enerjiyle geri sekmesi, saplanma (penetration) vurucu ucun numuneye saplanması ve delip geçmesi (perforation) vurucunun malzemeyi delip geçmesi olarak belirtilmiştir.

Absorbe edilen enerji miktarı, F-d eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Vurucu uç numuneye temas ettiğinde enerji numune tarafından tamamen absorbe edilemez. Kalan enerji miktarı vurucunun numuneye temasından sonra enerjisinin bir miktarını boşaltması ve kalan enerji yüküyle geri sekmesinde harcanır. Vurucunun geri sekmediği durumlarda numuneye saplanır veya delip geçer. Bu durumda enerji tamamen absorbe edilir ve eğri şekilden de görüldüğü üzere yatayda paralel olarak devam eder.



Şekil 4. 6. Artan darbe enerjisi altında oluşan tipik enerji-zaman (E_a-t) eğrileri (Gemi, 2019).

Vurucu ucun malzemeyi delmesi halinde, vurucu cidarı ile malzemenin delinen yüzeyi arasında oluşan sürtünme kısmının altında kalan alan aslında saplanma eğrisi ile aynıdır. Düşük

hızlı darbe deney cihazı verileri okurken, buradaki enerjiyi de dahil eder. Bu alandaki enerji dahil edildiği için eğri yukarı doğru yönlenmiş olarak karşımıza çıkar. Sürtünme kısmının altında kalan alan, toplam absorbe edilen enerji miktarından çıkarılır. Bu işlem yapıldığında şekil 4.6'da sonuca daha yakın olan kesik çizgiler ile belirtilen alan karşımıza çıkar (Sayer ve ark., 2009).

4.4. Darbe Sonrası Mikro Hasarlarının İncelenmesi

Deneylerde kullanılan numunelerin önce makro sonrasında mikro hasar incelemeleri yapılmıştır. Deney anları kayda alınıp, oluşan makro hasarlar deneylerden sonra tartışılmış ve yorumlanmıştır. Makro hasar incelemelerini yapabilmek için karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunelerinin dış görsel genel fotoğrafları çekilmiş, hasar bölgeleri numunelerden hassas bir şekilde kesilerek ayrılmıştır. Bütün halde iken ulaşılamayan iç bölgeler numuneler kesildikten sonra iç kısımlarında fotoğraflaması yapılmıştır. Kesme işlemi Şekil 4.7'de görseli verilen METKON marka kesme cihazı ile uygun kesme takımı kullanılarak yapılmıştır. Kesme işlemi darbe hasarının etkisini daha doğru inceleyebilmek adına darbe noktalarından yapılmıştır.



Şekil 4. 7. Numunelerin kesme işleminde kullanılan METKON marka kesme cihazı

Deney için hazırlanan numuneler şekil 4.8'de gösterilen METKON marka zımparalama ve parlatma makinesinde farklı zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemleri tamamlandığında numunelerin parlatılan yüzeyleri su ve kuru hava ile temizlenmiştir.

Numunelerin hasar yüzeyi Şekil 4.8’de görülen METKON marka zımparalama ve parlatma cihazında farklı zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Parlatılan numuneler yıkandıktan sonra hasar bölgesinde bulunan zımpara ve su kalıntıları kuru hava ile temizlenmiştir.



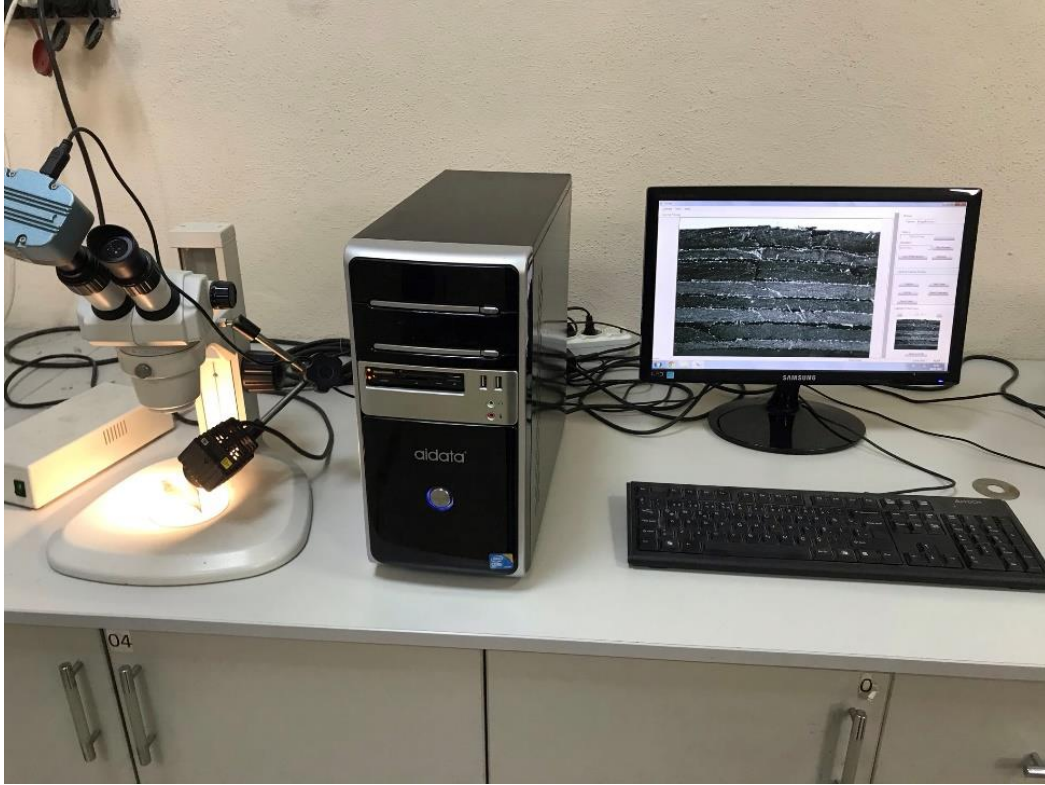
Şekil 4. 8. Mikro yapının hazırlanmasında ve incelenmesinde kullanılan METKON marka zımparalanma ve parlatma cihazı

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

Hasar bölgelerinin daha detaylı incelenebilmesi için numunelerin hasar bölgelerinde kesitler oluşturulmuştur. Darbe merkezlerinde oluşturulan kesitler sayesinde tabaka ayrılmaları, dış yüzey ve iç yüzey matris çatlakları, radyal çatlaklar vb. hasarlar daha net incelenmiştir (Şekil 4.10).

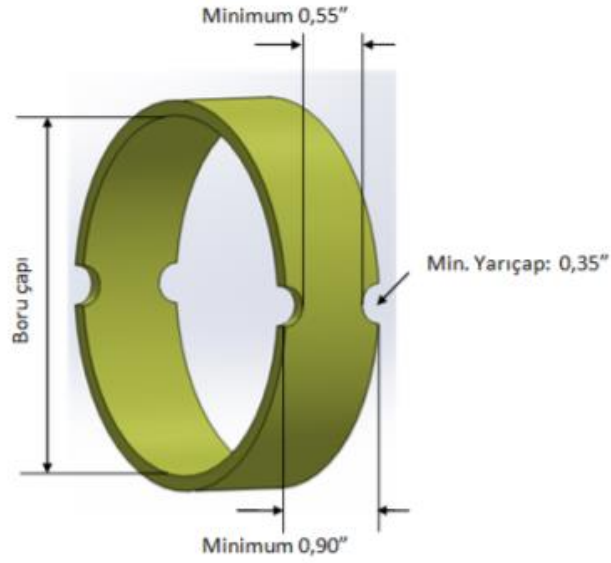


Şekil 4. 10. Mikro hasarın incelenmesinde görüntüleme şekli.

4.5. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Boruların Çekme Gerilimi Davranışlarının Belirlenmesi

Karbon fiberler, epoksi reçine malzeme ile kıyaslandığında gerilim dayanımı çok yüksek olan malzemelerdir. Karbon fiber takviyeli kompozitlere uygulanan herhangi bir kuvveti karbon fiber lifleri taşımaktadır. Malzeme özelliği olarak karbon fiberler gevrek malzemeler olduğu için sünekliği düşük olan malzemelerdir. Bu sebeple çekme testi uygulamalarında dayanım değeri yüksek, birim yer değiştirme düşük değerlerde kalmaktadır.

Karbon elyaf takviyeli kompozit boruların çekme gerilim dayanımı ASTM D 2290 Prosedür A'ya göre halka çekme deneyi ile tespit edilmektedir. Şekil 4.11' de verilen ölçülere uygun olarak halka çekme numuneleri hazırlanmıştır. Prosedür A'ya göre numunenin her iki tarafına azaltılmış bölge açılması kullanıcının kendi tercihinin bırakılmıştır.



Şekil 4. 11. Prosedür A'ya göre halka çekme deney numunesi.

Halka çekme deneylerinde çekme kuvveti, sıcaklık, nem ve numune çapları gibi şartlar dikkate alınmıştır. Şekil 4.12’de halka çekme deneylerinde kullanılan Shimadzu AG-XD halka çekme deney cihazı görülmektedir. Cihaz uygun yazılımıyla tüm test sonuçlarını raporlayabilmekte ve istenildiği takdirde saklanabilmektedir. Cihaz çok sayıda test sonucunu (gerilme, kopma kuvveti, kopma uzaması, % uzama vb.) verebilme kabiliyetine sahiptir.



Şekil 4. 12. Shimadzu AG – XD çekme deney cihazı.

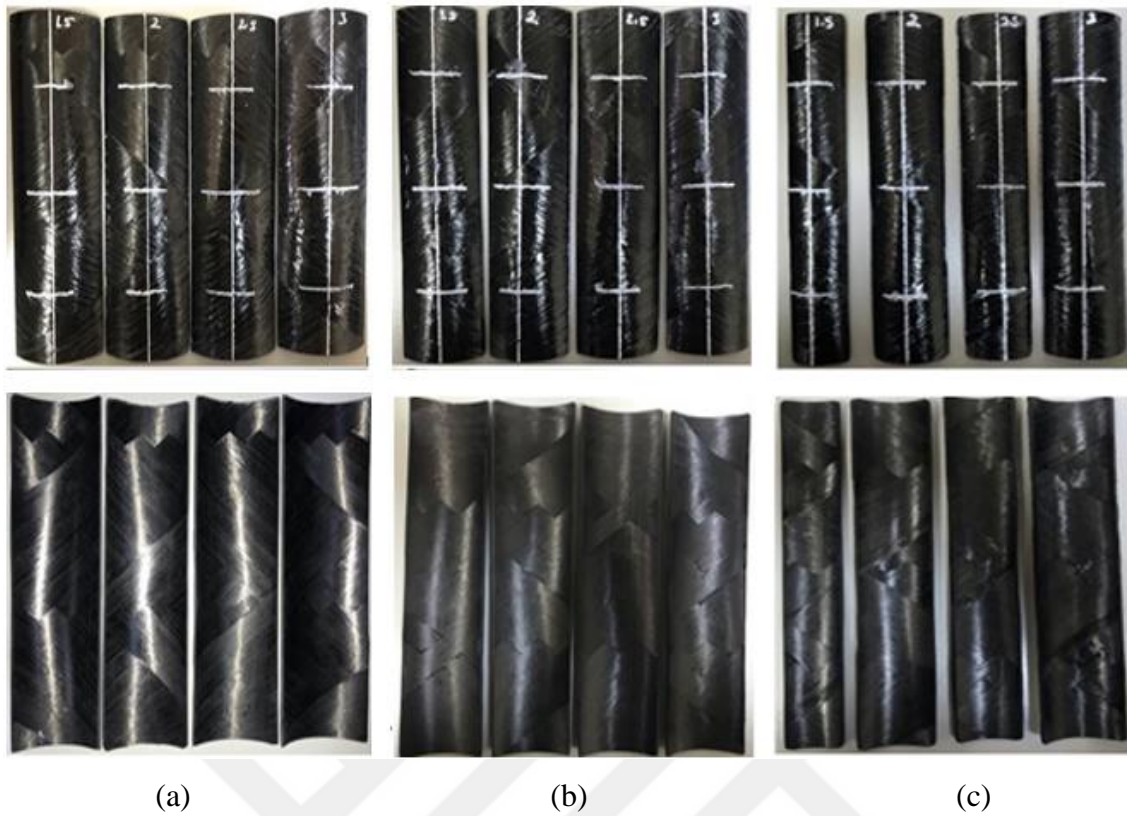
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Karbon Elyaf Takviyeli Boruların Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

Karbon elyaf takviyeli boruların düşük hızlı darbeye vereceği cevabın incelenmesi amacıyla Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan, düşük hızlı darbe deney cihazı kullanılmıştır.

Teorik olarak darbe enerji değerlerini elde edebilmek için vurucu kütesinin bırakılacağı yükseklik hesaplanmıştır. 24 mm çapında yarı küresel çelik vurucu; 0,115 m yükseklikten 1,5 m/s hız ve 6,3 J enerji seviyesi için, 0,204 m yükseklikten 2 m/s hız ve 11,2 J enerji seviyesi için, 0,319 m yükseklikten 2,5 m/s hız ve 17,5 J enerji seviyesi için, 0,459 m yükseklikten 3 m/s hız ve 25,2 J enerji seviyesi için düşürülmüştür. 60° açılı V yatağı üzerine deneye uygun bir şekilde yerleştirilen ve numunenin sekmemesi için sabitlenmesinden sonra numunelere yarı küresel çelik uçlu vurucu ile aynı ekseninde fakat farklı bölgelerden her bir hız için 3 adet darbe yükü uygulanmıştır. Darbe enerjisini doğru ölçebilmek ve oluşan hasar mekanizmalarının doğru tespit edilebilmesi için darbe yüklemesi yapıldıktan sonra geri seken vurucu kütleinin tekrar malzemeye vurmasını engellemek için pnömatik piston tutucular vasıtasıyla darbelerin tekrarlaması engellenmiştir. Kuvvet algılayıcı tarafından darbe yüklemeleri baştan sona kadar aldığı verileri Signal Express yazılımı ile F-t grafiği olarak kayıt altına alınmıştır. F-d ve V-s grafikleri bazı formülasyonlar uygulanarak elde edilmiştir.

Düşük hızlı darbe yüklemelerinin farklı çaplarda ki borularda oluşturabileceği hasarların incelenmesi ve bu hasarların kompozit borularda mukavemet kayıplarına ne gibi sebepler doğuracağına araştırılması için $(\pm 55^\circ)_3$ konfigürasyonuna sahip üç farklı çapta (Ø54, Ø72 ve Ø96) kompozit borular üretilmiştir. Düşük hızlı darbe yüklemesinin malzemelere etkisinin incelenmesi amacıyla, deneyde kullanılan farklı çaplardaki borular üzerine ASTM D 7136 standardına göre, 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarında 3'er adet darbe uygulanarak hasar oluşturulmuştur. Darbe hasarlı borular Şekil 5.1'de toplu olarak verilmiştir. Düşük hızlı darbe sırasında F-t, F-d ve E_a -t grafikleri çıkartılarak boruların düşük hızlı darbe cevapları 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. a) Ø96, b) Ø72, c) Ø54

Çizelge 5.1. Düşük hızlı darbe deneyi sonrası elde edilen veriler

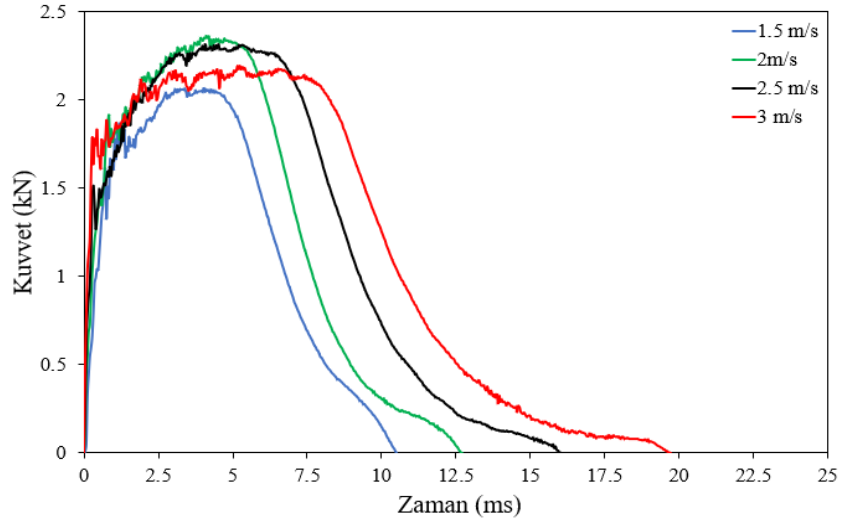
Boru İç Çapı [mm]	Toplam Enerji [J]	Darbe Hızı [m/s]	Tepe Kuvvet [kN]	Toplam Süre [ms]	Tepe Deplasman [mm]	Toplam İmpuls [Ns]	Absorbe Edilen Enerji [J]
Ø54	6.3	1.5	1.87 ± 0.18	12	4.56 ± 0.5	3030 ± 342	4.25 ± 0.04
	11.2	2	2.06 ± 0.31	15.1	7.11 ± 0.97	4475 ± 687	8.32 ± 0.3
	17.5	2.5	2.05 ± 0.28	16.2	8.15 ± 1	5874 ± 472	14.05 ± 0.2
	25.2	3	2.06 ± 0.2	21.6	14.22 ± 1.8	7465 ± 410	22.1 ± 0.9
Ø72	6.3	1.5	1.48 ± 0.04	15.1	5.71 ± 0.3	4061 ± 276	3.83 ± 0.3
	11.2	2	1.76 ± 0.08	17.9	8.69 ± 0.05	5383 ± 684	7.74 ± 0.4
	17.5	2.5	1.93 ± 0.14	20.1	11.9 ± 0.15	7266 ± 335	13.3 ± 0.9
	25.2	3	1.92 ± 0.18	24.3	16.3 ± 1.04	8896 ± 281	21.4 ± 0.8
Ø96	6.3	1.5	1.62 ± 0.13	13.9	5.47 ± 0.5	4009 ± 402	3.46 ± 0.1
	11.2	2	1.8 ± 0.18	16.1	8.14 ± 0.63	5659 ± 478	7.02 ± 0.3
	17.5	2.5	2.13 ± 0.08	18	11.15 ± 0.78	7148 ± 523	12.4 ± 0.2
	25.2	3	2.23 ± 0.12	22.6	16.53 ± 2.2	10019 ± 1425	18.8 ± 1

5.1.1. Kuvvet-zaman grafikleri

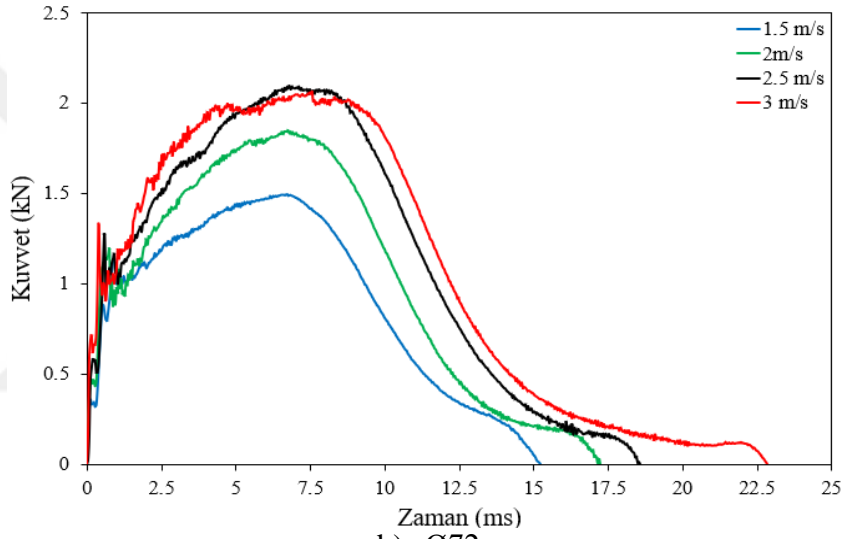
Kuvvet-zaman grafikleri, kompozit malzemelerin darbeye karşı verdiği cevapların analizinde önemli bir grafiklerdir. Yapılan deneyler neticesinde artan darbe yükü altında, zamana göre temas kuvvetinin değişimini gösteren eğriler elde edilmiş ve toplu bir grafikte verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde, kuvvetin etkisi temas anıyla birlikte artma kısmına, malzemenin absorbe edebildiği yükün boşaltılması ve sona ulaştığı tepe noktasına, geri sektiği, saplandığı veya delip geçtiği yükten boşalma kısmına sahiptir. Sonuç olarak, darbe enerjisi numune tarafından absorbe edilmiş, geri kalan enerji ise vurucu ucu geri fırlatmıştır.

Şekil 5.2 incelendiğinde, yükleme tepe noktasına ulaştığında stabil değil dalgalı bir görünümle karşılaşılmıştır. Bu durum, deney numunelerinde hasar mekanizmaları oluştuğunu gösterir niteliktedir. Darbe enerjisinin artışı, numune üzerinde oluşan yer değiştirme miktarını artırmış dolayısıyla hasar miktarı da artmıştır. Darbe enerjisi maksimum noktaya ulaşana kadar hasar mekanizmasının artı yönde hızla ilerlediği düşünülmektedir.

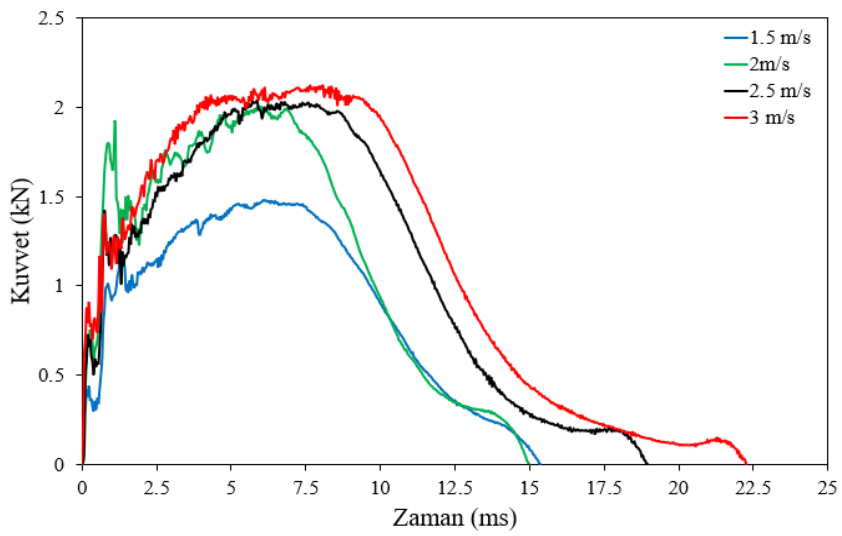
Her çap için kuvvet-zaman (F-t) grafikleri ayrı ayrı incelendiğinde, hızın artması temas kuvvetini de doğrudan artırmış, bu durum temas sürelerinde de artış şeklinde gözlemlenmiştir. Karşılaşılan durumun çap değişiminin doğrudan darbe davranışlarına etkisi olduğu şeklinde fakat doğrusal bir azalış olmadığı Şekil 5.3’de verilen grafikte yorumlanmıştır. Çap artışı, tepe kuvvet üzerinde doğrusal olmayan bir davranış sergilemiştir. Çap artışı temas noktasında yüzey alanını ve numune boruların esneme oranını artırdığı için kuvvet değerinde azalma olduğu yorumlanmıştır. Ancak temas sürelerinin artması yer değiştirme miktarını artırmıştır. Bunun sebebi olarak, çap artışının esneme oranını artırdığı dolayısıyla hasar mekanizmasının daha az gelişmiş olduğudur. Bu durum karbon elyaf takviyeli borularda çap artışının malzemenin davranışları üzerinde ki etkileri doğrusal olmadığı için malzeme seçimi yapılırken deneysel tespitler gerektirir olarak yorumlanmıştır.



a) Ø54



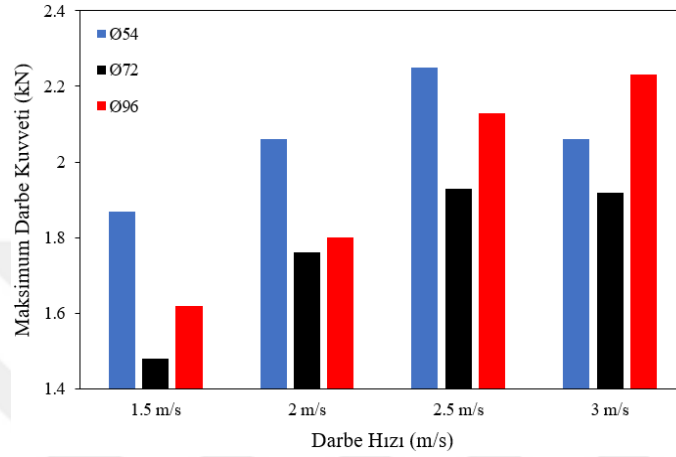
b) Ø72



c) Ø96

Şekil 5. 2. Artan darbe hızı altında, a) Ø54, b) Ø72, c) Ø96 borular için zamana göre temas kuvvetinin değişimini gösteren grafikler.

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.3 birlikte incelendiğinde; yer değiştirme vurucunun temas anıyla başlamış ve kuvvet tepe noktasına ulaşıncaya kadar sürmüştür. Darbe enerjisinin artması yer değiştirmeyi ve temas kuvvetini pozitif yönde etkilemiştir. Darbe kuvveti tepe noktasına ulaşıncaya kadar her üç numunede temas kuvvetlerinde artış gözlenirken, 3 m/s darbe hızında bu denge değişmiştir. 3 m/s darbe hızında Ø96 boru numunelerinde temas kuvveti artmaya devam ederken Ø54 ve Ø72 boru numunelerinde azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.

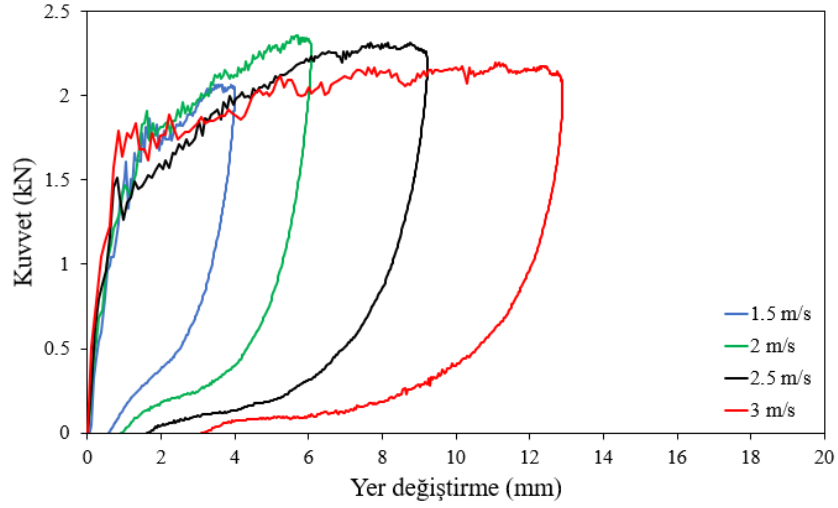


Şekil 5. 3. Her boru çapı için uygulanan darbe hızlarında maksimum darbe kuvvetini gösteren sütun grafikleri.

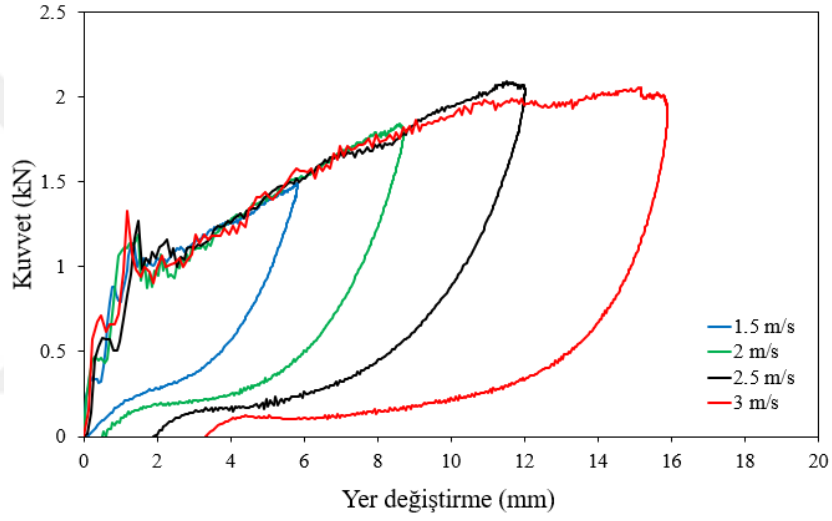
5.1.2. Kuvvet-yer değiştirme grafiği

Kuvvet-yer değiştirme grafikleri, düşük hızlı darbe cevaplarını incelemeye kullanılan önemli grafiklerden biridir. Farklı şartlarda yüklemelere maruz kalan karbon elyaf takviyeli kompozit borularda kuvvete bağlı yer değiştirme miktarlarını gösteren grafikler Şekil 5.4'de verilmiştir. Deney sırasında vurucu uç numune yüzeyine temas ettiği anda yer değiştirme başlamış ve kuvvet maksimum değere ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozit borularda çap büyümesinin belirli bir noktadan sonra yaylanmayı artıracığından ve temas kuvvet alanını artırmasından kaynaklı olarak yer değiştirme miktarını da artırdığı görülmüştür.

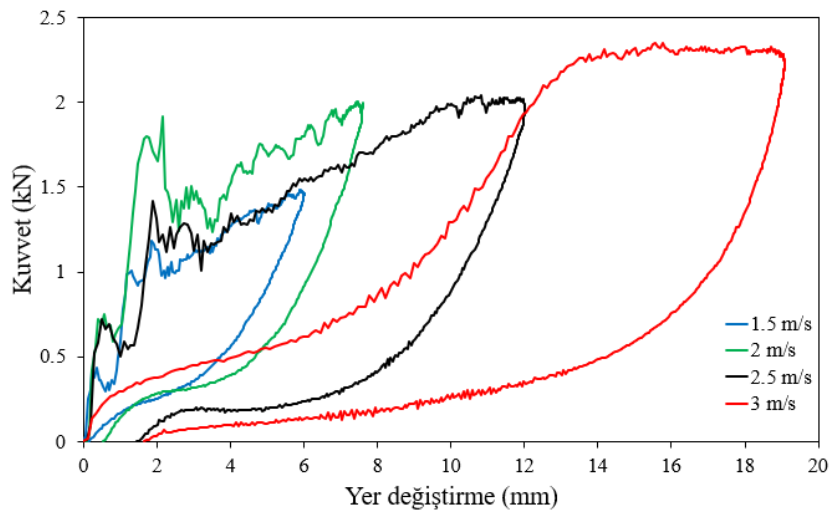
F-d eğrisinde, eğilme rijitliği malzemenin darbe yüküne karşı göstermiş olduğu mukavemet değeri olarak adlandırılabilir. Grafikte artma kısmındaki eğim olarak gösterilir. Eğilme rijitliğinde stabil olmayan kısımlar numune üzerinde oluşan hasar mekanizmalarını gösterir niteliktedir. Karbon elyaf takviyeli kompozit borularda çap artışı, eğilme rijitliğinde büyük bir etkiye sebep olmuştur. Bu durum, numune çaplarının artmasının malzeme davranışının esnek olmasına sebep olmuş ve eğilme rijitliğini düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir.



a) Ø54



b) Ø72

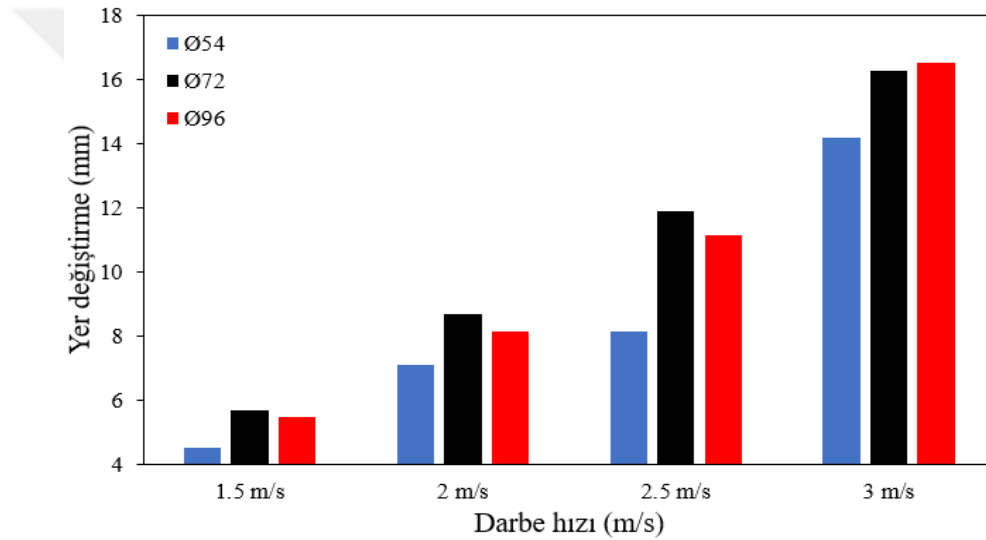


c) Ø96

Şekil 5. 4. Artan darbe hızı altında, a) Ø54, b) Ø72, c) Ø96 borular için temas kuvvetinin deplasman değişimini gösteren grafikler.

Şekil 5.5’de verilen grafikte karbon elyaf takviyeli kompozit borulara uygulanan düşük hızlı darbe sonucu maksimum çökme miktarları verilmiştir. Boru çaplarının hasar mekanizmasına ve yer değiştirmeye doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

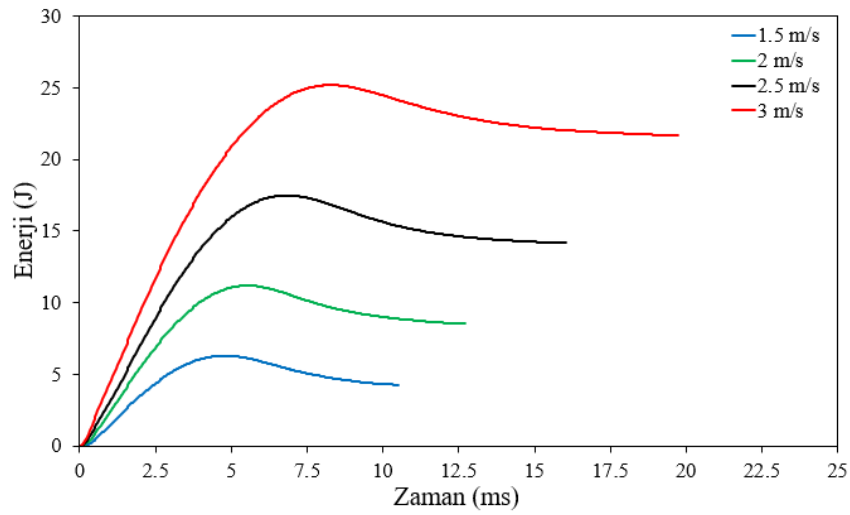
Karbon elyaf takviyeli kompozit numunelerde uygulanan her dört hızda da oluşan en büyük yer değiştirme miktarları verilmiştir. Boru çaplarıyla yer değiştirme miktarının arasında bir ilişki olduğu açık bir şekilde görülmektedir. 3 m/s hızda 54 mm çapında boruda tepe deplasman 14.22 mm değerinde oluşurken, 96 mm çapında boruda 16.53 mm tepe deplasman oluşmuştur. Karbon elyaf takviyeli kompozit borular, malzeme özellikleri dolayısıyla rijitliği yüksek olduğu için darbeye karşı gösterdiği davranışlar darbe hızına bağlı olsa da yüksek farklılıklar gözlemlenmemiştir.



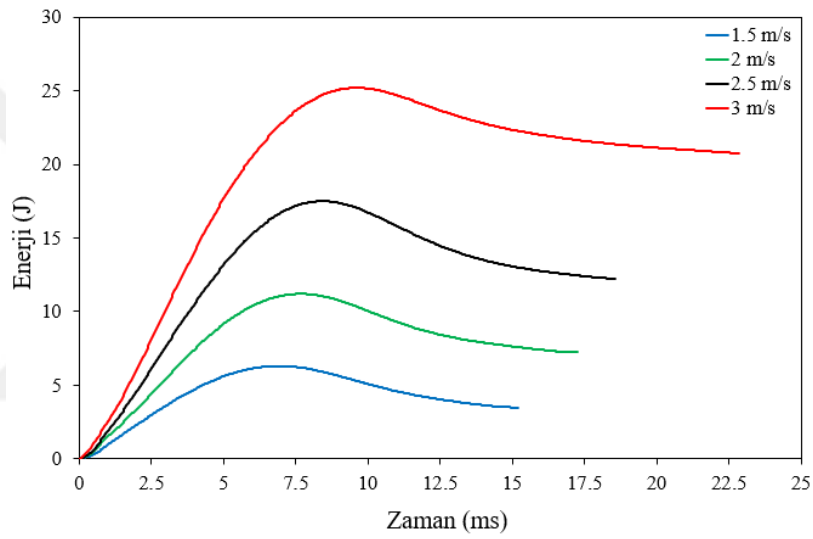
Şekil 5.5. Her boru çapı için uygulanan darbe hızlarında tepe deplasman değişimini gösteren sütun grafikleri.

5.1.3. Enerji – zaman grafiği

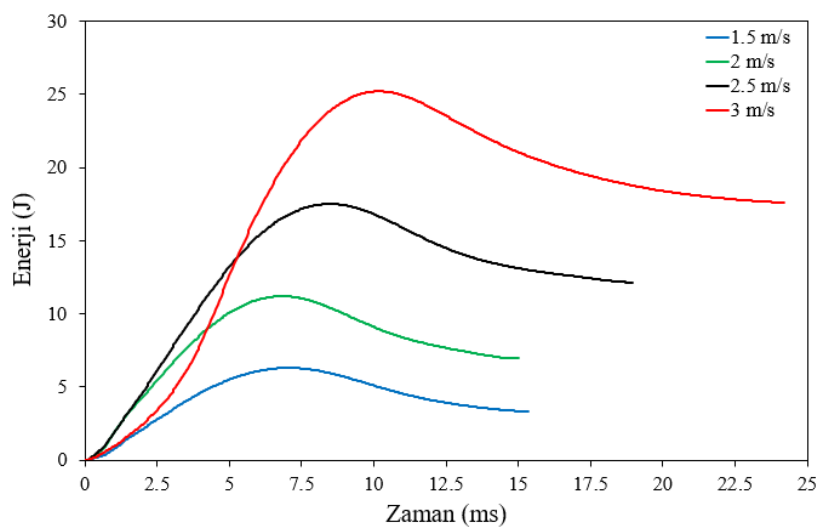
Absorbe edilen enerji miktarı, F-d eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır (Kara, 2012). Şekil 5.6’da verilen enerji-zaman grafiklerinde eğrilerin altında kalan alanlar hesaplanmış ve absorbe edilen enerji miktarları tespit edilmiştir. Çizelge 5.1’de 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda uygulanan darbe yüklemelerine ait veriler sunulmuştur. Her çapta numuneyi kendi aralarında absorbe edilen enerji seviyelerini karşılaştıracak olursak, darbe hızı artışının absorbe edilen enerji miktarına etkisi olduğu görülmektedir. Her üç boru için aynı darbe hızlarında genel bir karşılaşma yapıldığında, çap artışı ile beraber absorbe edilen enerji miktarlarında azalışların olduğu görülmektedir.



a) Ø54



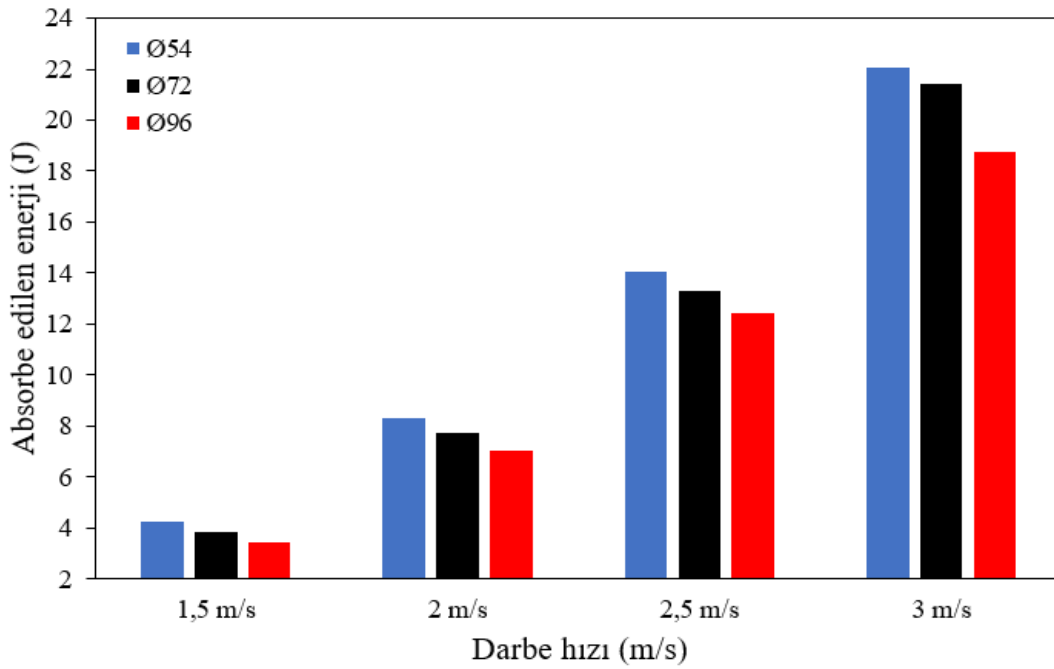
b) Ø72



c) Ø96

Şekil 5. 6. Artan darbe hızı altında, a) Ø54, b) Ø72, c) Ø96 borular için enerji-zaman değişimini gösteren grafikler.

Çizelge 5.1, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilen çizelge ve grafikler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, çap artışı sebebiyle oluşan absorbe edilen enerji miktarlarında ki azalmanın sebebi numune boruların çaplarının artmasıyla esneme oranının artması olarak değerlendirilmiştir. Tüm enerji seviyelerinde karşılaşılan bu durum, karbon elyaf takviyeli kompozit boruların çap artışının darbe cevaplarını etkilediğini gösterir niteliktedir. Karbon elyaf takviyeli kompozit borularda çapın düşmesi, vurucu uç ile numune arasındaki temas yüzey alanını azaltmasına rağmen darbe bölgesinde numune kesitinde yoğun hasarların olduğu darbe sonrası mikro hasar analizlerinden de anlaşılmıştır.



Şekil 5. 7. Her boru çapı için uygulanan darbe hızlarında absorbe edilen enerji değişimini gösteren sütun grafikleri

5.2. KET Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonrası Makro Hasar Analizi

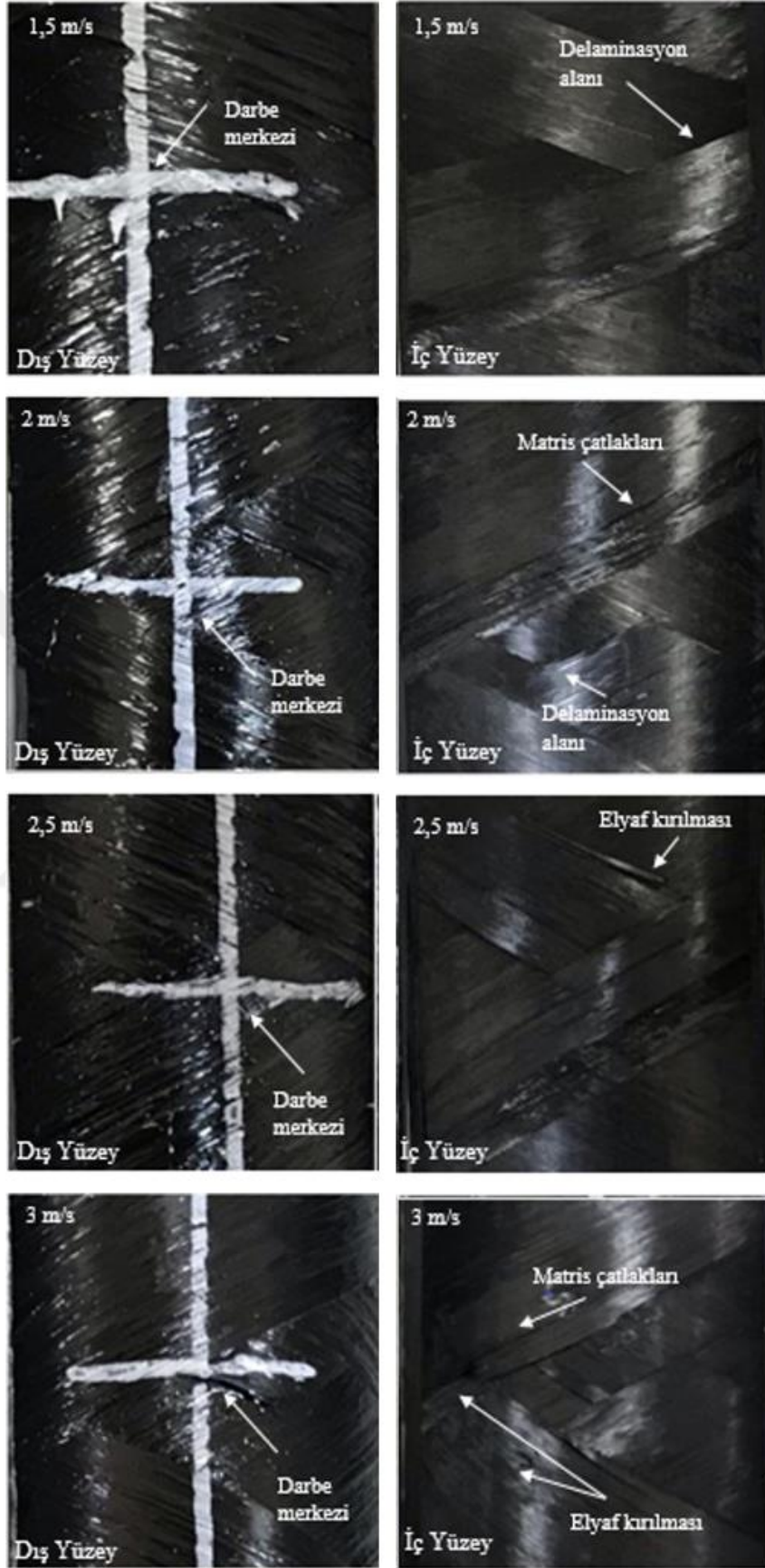
Karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunelerine 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda düşük hızlı darbeler uygulanmış, numune üzerlerinde oluşturulan hasar mekanizmaları tespit edilmiş ve yorumlanmıştır. Tüm bu süreçler, iç çapı Ø54, Ø72, Ø96 mm boru numuneleri için de yapılmış ve makro hasarlar incelenmiştir. Mikroskop ile darbe hasar bölgeleri fotoğraflanmış, ölçeklenmiş ve çap farklarının darbe hasarı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Delaminasyon hasar seviyeleri, hasar gelişimi ve oluşan matris (radyal) çatlakları gibi hasar modları irdelenmiştir. Dış cidarından darbeye maruz bırakılan karbon elyaf takviyeli kompozit boru numuneler elyaf yönlendirme açıları $\pm 55^\circ$ olarak tasarlanmış, tabakalar halinde sarılmıştır.

Üretilen bu tabakalar arasındaki delaminasyon bölgeleri sarım yönünde tabakaların ayrılması sonucu oluşmuştur.

Vurucu uç ve numune arasında ki temas noktalarında meydana gelen iç ve dış hasar bölgeleri fotoğraflanmış ve hasar tipleri belirtilmiştir. Ø54, Ø72 ve Ø96 mm çaplarındaki borular darbe alan bölgelerden hassas kesim yapıp optik mikroskop ile incelemeler yapılmış ve görüntüler kayıt altına alınmıştır. Ø54, Ø72 ve Ø96 mm çaplarındaki borulara ait 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda oluşan hasarlara ait görüntüler Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmiştir.

5.2.1. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda makro hasar analizi

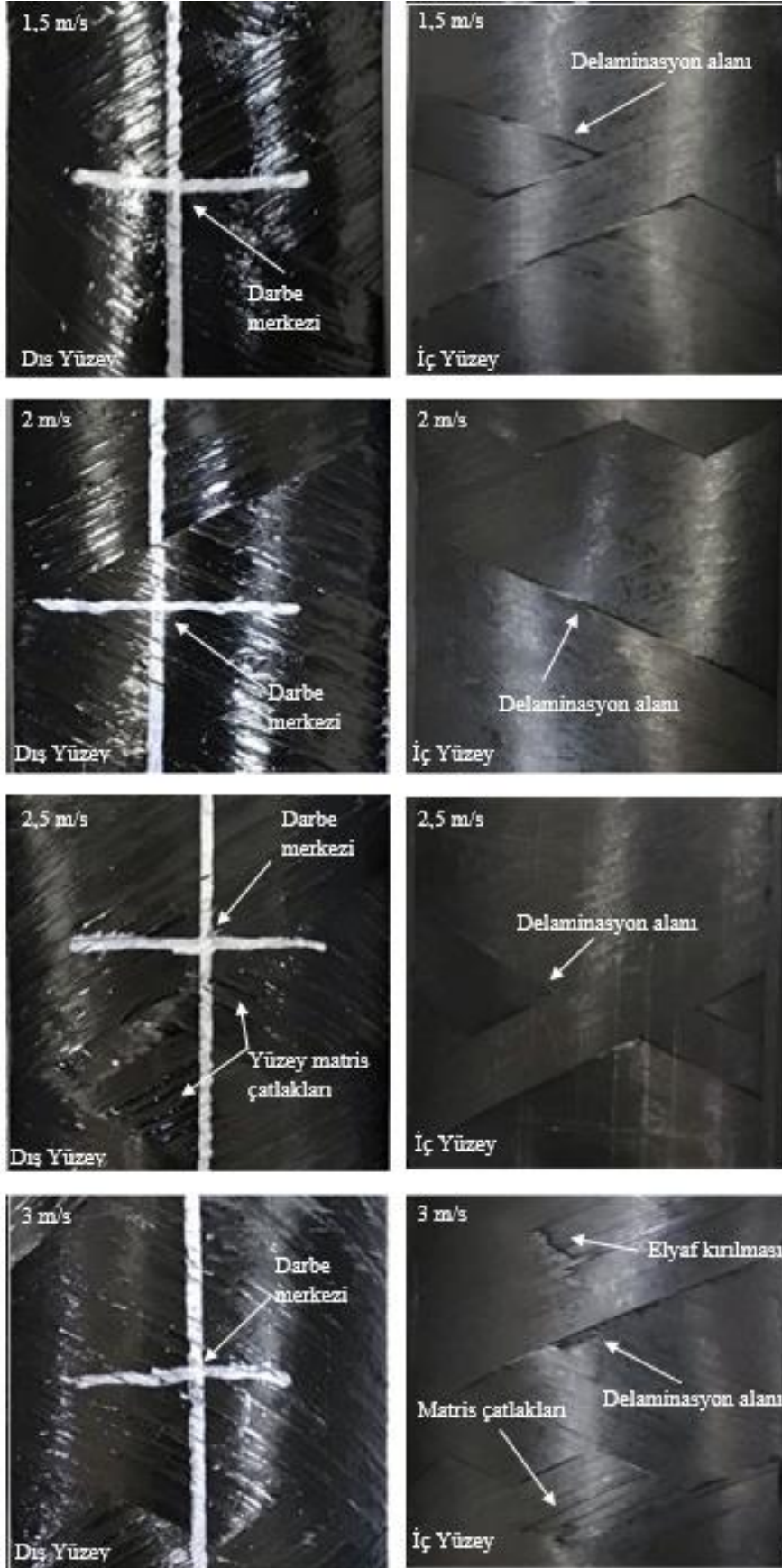
Ø54 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit boru numuneleri makro ölçekte incelendiği zaman hasarın yoğun olarak borunun iç bölgelerinde olduğu, hasar modlarının ağırlıklı olarak delaminasyon ve elyaf doğrultusunda matris çatlaklarının yarıma şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.8'de numunelere ait görsellere yer verilmiştir. Darbe hızının artmasıyla numunede oluşan delaminasyon hasarının alanı genişlemiş ve oluşan hasarların yoğunluğuda artmıştır. Delaminasyon hasarlarının oluşumunda ve ilerlemesinde $\pm 55^\circ$ elyaf sarım açıları belirlemiş ve hasar yönlendirmeleri açı doğrultusunda gerçekleşmiştir. Boru çapının küçük olması yüzey alanını daraltmış ve bunun sonucu olarak darbe yüzey alanı dar bir alana sahip olduğu için hasar daha yoğun olarak gerçekleşmiştir. Delaminasyon ve matris çatlakları daha sınırlı bir alanda toplanmıştır. Yoğun hasarın etkisi ile borunun iç yüzeyinde oluşan yarıma hasarları elyaf şeritlerinin (bundle) daha belirgin halde ayrıldığını göstermiştir.



Şekil 5. 8. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri.

5.2.2. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda makro hasar analizi

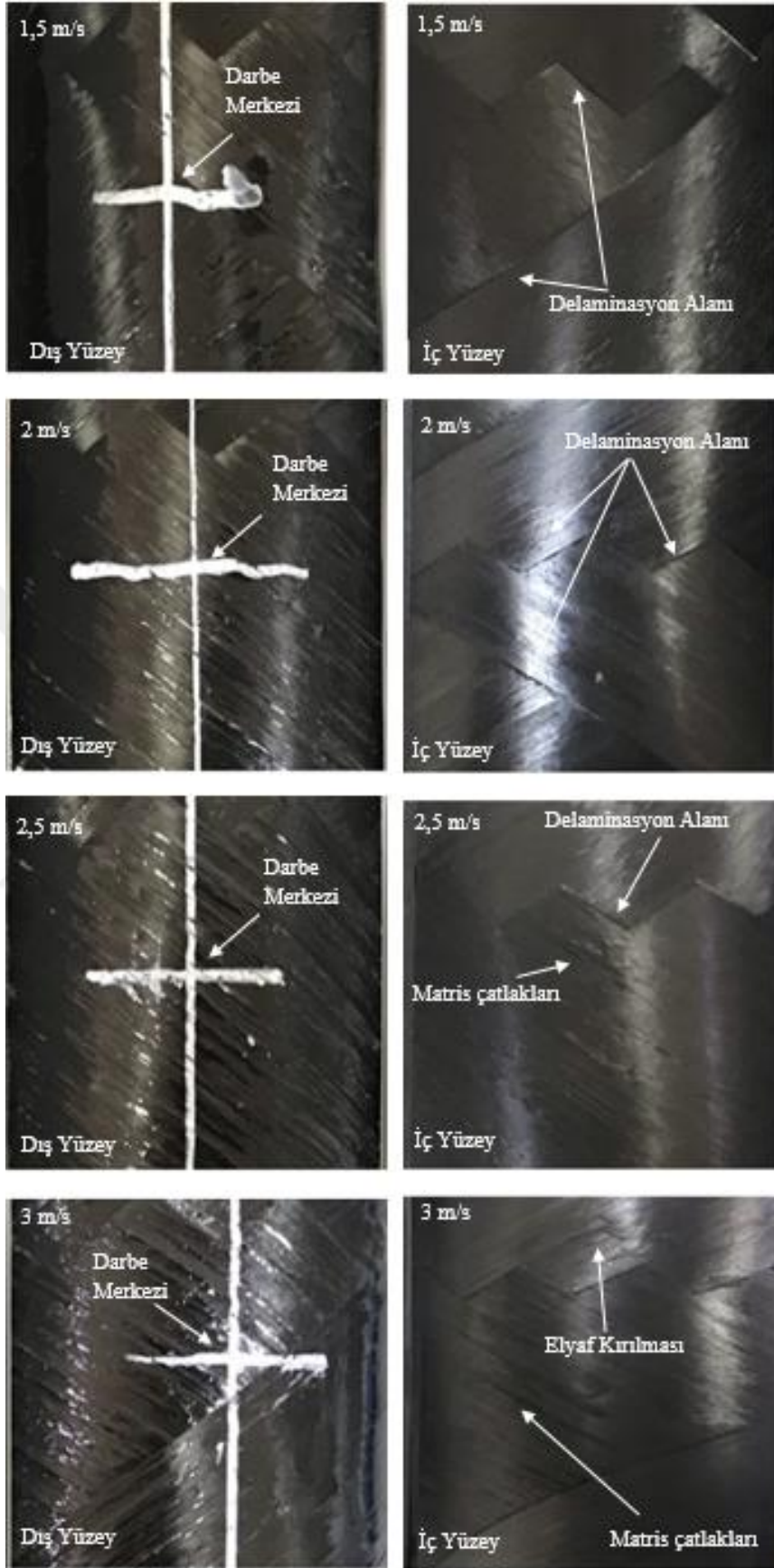
Ø72 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit boru numuneleri makro ölçekte incelendiği zaman numune çapının büyümesi ile birlikte Ø54 mm iç çapa sahip boruya göre kıyas yapıldığında hasar modlarının daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.9'da numunelere ait görsellere yer verilmiştir. Vurucu uç ile numune boru arasındaki yüzey alanı Ø54 mm iç çapa sahip numune ile kıyaslandığında arttığı için enerji dağılım bölgesi de artar ve enerjinin absorbe edilmesini kolaylaştırır. Sonuç olarak hasar mekanizması yayılmak için kendine daha büyük bir alan bulur ve hasarın yoğunluğu azalır. Delaminasyon hasarlarının elyaf sarım açıları ile aynı doğrultuda olduğu gözlemlenmiştir. Delaminasyon hasarlarının genişlemesiyle numune kesitinde oluşan yoğun hasarın azalması ile beraber transfer çatlaklarının oluşumu da gerçekleşmiştir. Uygulanan darbe hızı artışı ile hasar alanı ve yoğunluğunda da artışlar gerçekleşmiştir. Özellikle, darbe hızının artışı deplasman artışına sebep olmuş ve fiber bantları kenarlarında elyaf doğrultusunda yarıma hasarlarının oluşumuna neden olmuştur. Darbe hızının artışı ile elyaf demetlerinin \pm kesişim bölgelerinde elyaf kırılması ve elyaf demeti içinde matris çatlama ile bölgesel yarıma hasarları görülmüştür. Bu durum, Ø54 boru numunesinin iç kısmında oluşan yoğun delaminasyon hasarının Ø72 boru numunesinde önemli ölçüde azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 5. 9. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri.

5.2.3. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda makro hasar analizi

Ø96 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit boru numuneleri makro ölçekte incelendiği zaman numune çapının büyümesi ile birlikte Ø54 ve Ø72 mm iç çapa sahip boruya göre kıyas yapıldığında hasar modlarının daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.10'da numunelere ait görsellere yer verilmiştir. Hasar alanı genişlerken 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızların tamamında hasar yoğunluğu azalmıştır. Çap artışının yüzey alanı genişlemesini beraberinde getirdiğini, bu durumun enerji emilimini azalttığı ve sonuç olarak hasar yoğunluğunun azaldığını destekler niteliktedir. Durumun netliğe kavuşması için en yüksek enerji seviyesi olan 3 m/s hızla uygulanan darbe incelenebilir. 3 m/s hızda uygulanan darbe sonucunda üç farklı çapta numuneyi kıyasladığımızda hasar yoğunluğunun azaldığı görülür. Matris çatlakları her çap için $\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde meydana gelmiştir. Çap artışı 2.5 ve 3 m/s hızlarda uygulanan darbelerde kıyaslandığında hasar daha yoğun bir hal almıştır. Bu durum en yoğun darbe enerjisinde incelendiğinde çap artışıyla azaldığını kanıtlar niteliktedir. Oluşan hasar yoğunluğu her ne kadar azalsa da elyaf demetlerinin kesişim noktalarında belirgin yarıma hasarları gözlenmiş ve bu bölgelerde delaminasyon hasarlarının olduğu tespit edilmiştir. 3 m/s hızda gerçekleşen darbe hasarında delaminasyon hasar bölgesinde lokal elyaf kırılma hasarları da gözlenmiştir.



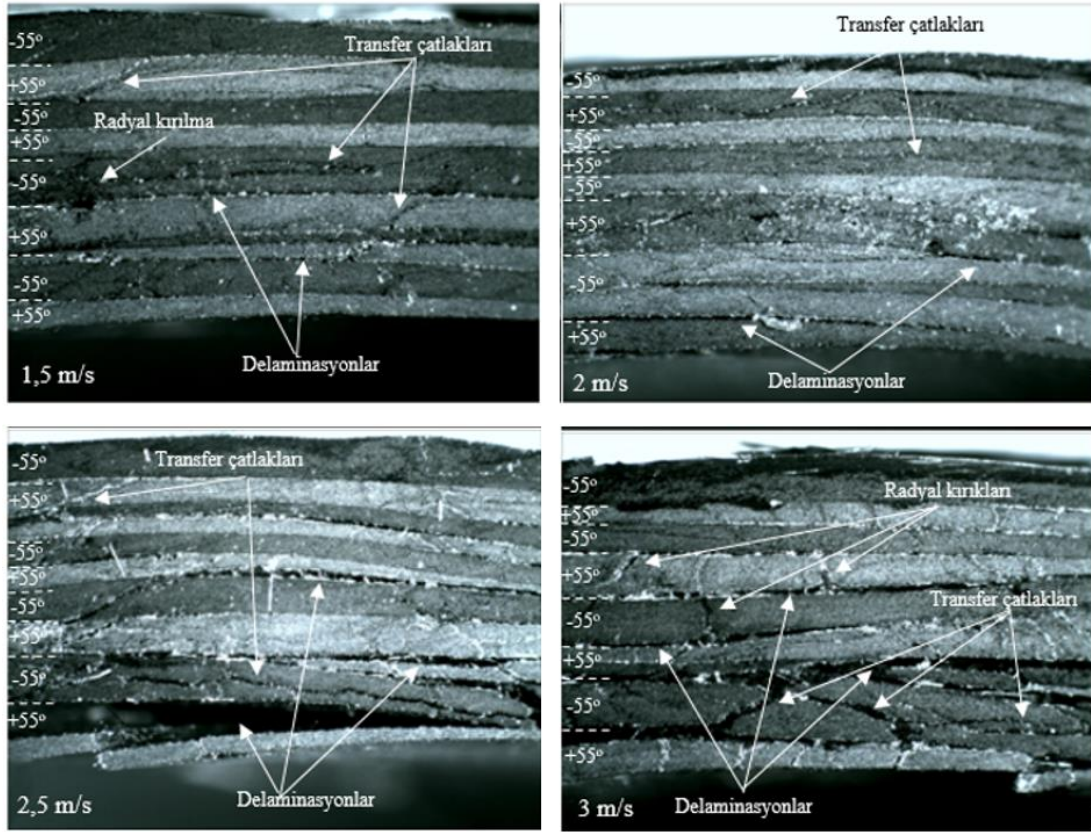
Şekil 5. 10. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların dış ve iç yüzey görüntüleri.

5.3. Karbon elyaf takviyeli Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Sonrası Mikro Hasar Analizi

Makro hasar analizleri yapıldığında düşük hızlı darbe deneyi sonrası gözle görülebilecek boyutta oluşan hasarlar incelenmiştir. Fakat hasar modlarını daha detaylı yorumlayabilmek için mikro hasar analizleri de yapılmalıdır. Mikro hasar analizleri sonucunda delaminasyon, radyal matris çatlakları, elyaf kırılmaları ve mikro matris çatlaklarının yorumu yapılabilir. Bu yorumları yapabilmek için Ø54, Ø72 ve Ø96 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit borulara 1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda darbe yüklemesi yapılmış, optik mikroskop ile darbe bölgelerinde hasar görselleri alınmış ve hasar analizleri yapılmıştır.

5.3.1. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda optik mikroskop hasar analizi

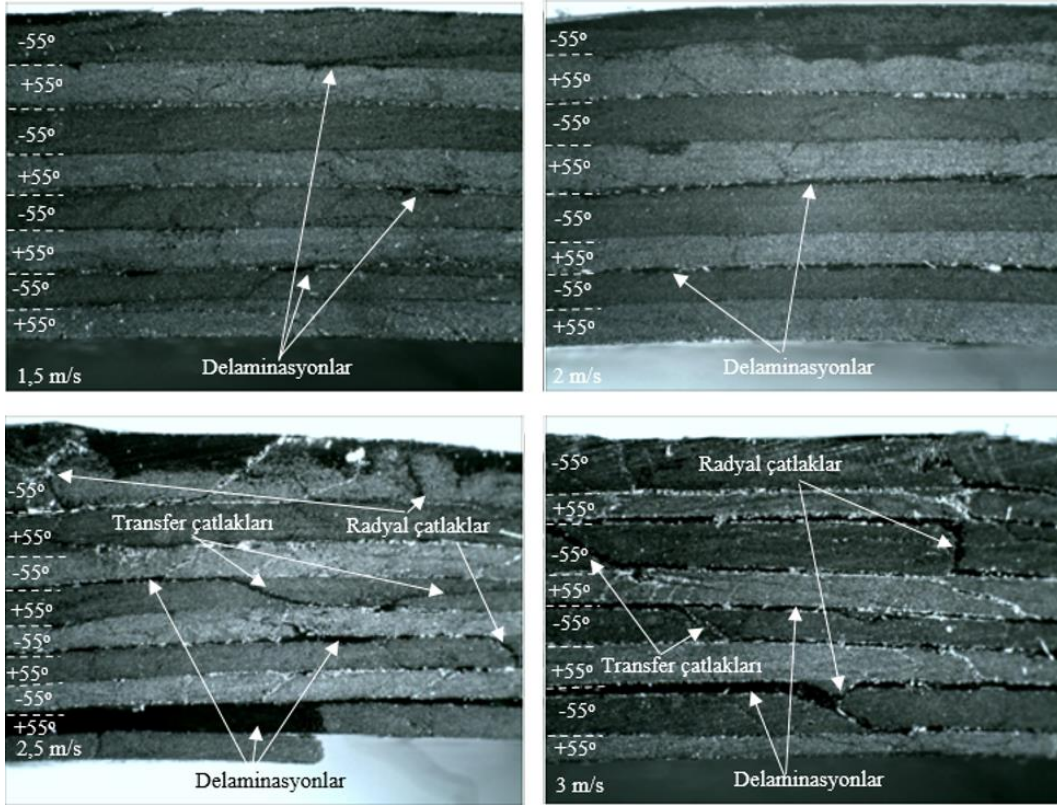
1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda Ø54 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunelerine uygulanmış darbe yüklemeleri sonucu oluşan hasarlar Şekil 5.11’de verilmiştir. Numune boruların optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde transfer çatlakları, radyal matris çatlakları ve delaminasyon hasarları belirgin bir şekilde açıkça görülmektedir. Numune boru çaplarının küçük olması hasarın sınırlı bir bölgede toplanmasına sebep olmuştur. Bu durum transfer çatlaklarından ziyade radyal çatlaklarının olumuna sebebiyet vermiştir. Bu durumun yanı sıra darbe hızındaki artış matris çatlağı ve delaminasyon hasarlarını ciddi oranda artırmıştır. Numunelerin kesilmesiyle oluşan kesitler incelendiğinde radyal matris çatlaklarının dıştan içe arttığı, iç yüzeye yaklaştıkça delaminasyon hasarlarının yoğunluk kazandığı görülmektedir. Uygulanan farklı hızlardaki darbe yüklemeleri hasar mekanizmalarını doğrudan etkilemiştir. Düşük hızlarda absorbe edilen enerji miktarı az olduğu için hasar yoğunlukları da daha azdır. Darbe hızlarının artışı ile delaminasyon hasar yoğunluğunun artışı ile en yüksek hızlarda tabakalarda kırılmalarında da artışlar gerçekleşmiştir. Özellikle 2.5 ve 3 m/s hızlarda numunenin iç kısımlarında yoğunlaşan hasarlar, tabaka içlerinde dağılmalara ve elyaf demetlerinde oluşan kırılmalar ile son tabakaların numunelerden ayrılmasına sebep olmuştur. Bu hızlarda boru numunesinin dış yüzeylerinde de reçinece zengin bölgelerde yüzey matris çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir.



Şekil 5. 11. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri.

5.3.2. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda optik mikroskop hasar analizi

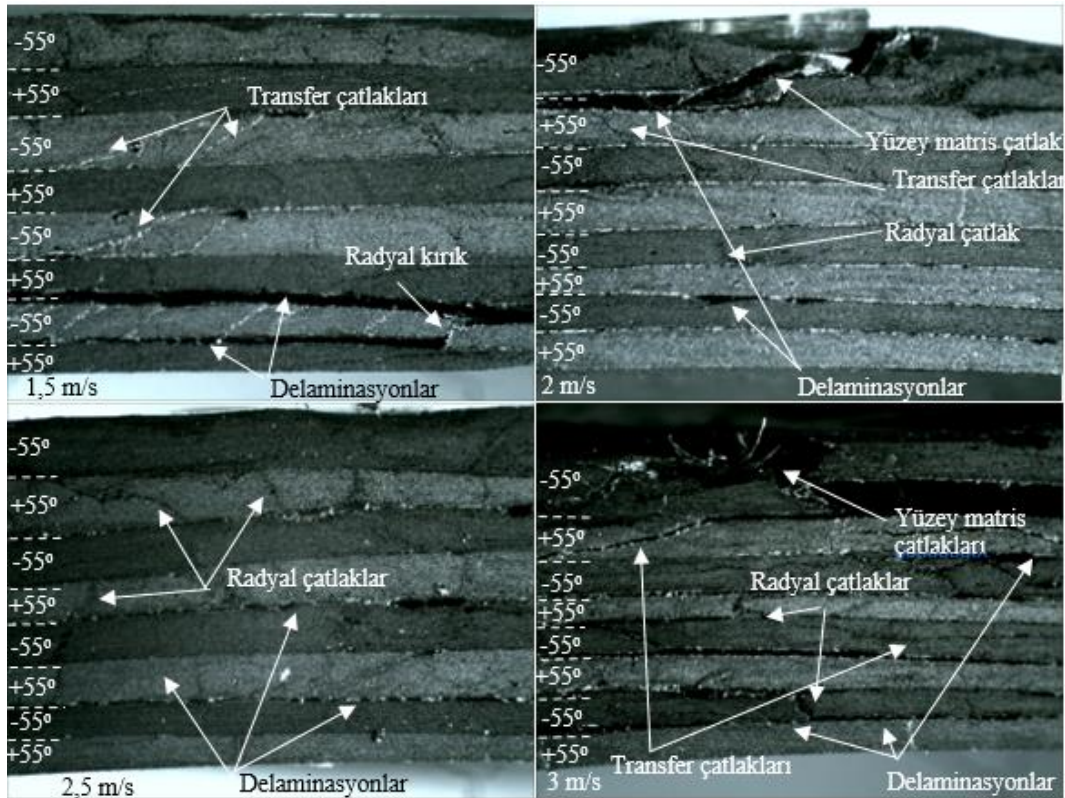
1.5, 2, 2.5, 3 m/s hızlarda Ø72 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunelerine uygulanmış darbe yüklemeleri sonucu oluşan hasarlar Şekil 5.12’de verilmiştir. Ø54 mm iç çapa sahip borulardan elde edilen görüntülerle kıyaslandığında Ø72 mm iç çapa sahip numunelerde kesit artışının enerji absorpsiyonuna etkisi açıkça görülmektedir. Enerji emiliminin azalması oluşan hasar mekanizmalarına doğrudan etki etmiştir. 1.5 ve 2 m/s hızlarda yüklenen darbedeler de oluşan hasarların Ø54 mm iç çapa sahip borularda oluşan hasarlardan daha az olması boru çapının enerji emilimi ile olan ilişkisini net bir şekilde gösterir. Karbon elyaf takviyeli kompozit borulardan deney sonrası elde edilen kesitlerden alınan veriler irdelendiğinde yoğun olarak hasarların delaminasyonlar ve matris çatlaklarından oluştuğu açıkça görülebilir. Darbe hızı ve hasar oluşumu arasındaki ilişki tespit edilebilir. Darbe yüklemesi dış yüzeyden uygulandığı için gerilme yönü dıştan içedir. Gerilme yönünün etkisi matris çatlaklarının yönüyle tespit edilmiştir. Reçinenin kalın uygulanması dış yüzey çatlaklarının oluşumuna sebebiyet vermiştir.



Şekil 5. 12. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri.

5.3.3. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda optik mikroskop hasar analizi

1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarda Ø96 mm iç çapa sahip karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunelerine uygulanmış darbe yüklemeleri sonucu oluşan hasarlar Şekil 5.13’de verilmiştir. Ø54 ve Ø72 mm iç çaplara sahip borulardan elde edilen görüntülerle kıyaslandığında Ø96 mm iç çapa sahip numunelerde kesit artışının enerji emilimine etkisi açıkça görülmektedir. Enerji emiliminin azalması oluşan hasar modlarının da azalmasına neden olmuştur. 1.5 ve 2 m/s hızlarda yüklenen darbedeler de oluşan hasarların Ø54 mm iç çapa sahip borularda oluşan hasarlardan çok daha az olması boru çapındaki artışın enerji emilimi ile olan ilişkisini net bir şekilde gösterir. Boru çapının artışı üretim esnasında reçine birikmesine yol açabilir. Darbe noktasından elde edilen kesitlerde inceleme yapıldığında reçine birikmesi yani reçinece zengin bölgelerde ciddi yüzey matris çatlama hasarlarına sebep olmuştur. Darbe yüklemesinin yönü diğer uygulamalarla aynı olduğu için hasar dış yüzeyden iç yüzeye doğru gerçekleşmiştir. Boru çapının büyümesi, diğer numunelerle birlikte incelendiğinde hasar mekanizmasını doğrudan etkilendiği açıkça görülmüştür. Özellikle 2.5 ve 3 m/s darbe hızlarında oluşan hasar mekanizmalarının yoğunluğu çap artışıyla birlikte azalmıştır.



Şekil 5. 13. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda dört farklı hız seviyesinde oluşan hasarların radyal kesit optik mikroskop hasar görüntüleri.

5.4. Karbon Elyaf Takviyeli Borularda Çekme Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi

Kompozit borular gerek iç sürtünme şartlarının stabil olması ve iç basınç dayanımlarının asbest ve beton borulara nazaran daha iyi olmasından kaynaklı günümüz şartlarında sıklıkla tercih edilir hale gelmişlerdir. Kompozit borular çalışma esnasında iç basınca maruz kalabilirler. Asbest ve beton borulara göre elastite modülü daha düşüktür. Bu sebeple, iç basınç şoklarına karşı gösterdiği mukavemet daha yüksektir. Mukavemet değerinin yüksek olması çalışma ömrünü artırır ve daha tercih edilir hale getirir.

Karbon elyaf takviyeli kompozit boruların çekme gerilim dayanımı ASTM D 2290 Prosedür A'ya göre halka çekme deneyi ile tespit edilmektedir. Standarda uygun yapılan deneyler, birçok plastik malzeme için disk veya halka formunda, sıcaklık, nem ve deney hızı gibi ön koşullar oluşturularak yapılan deneylerdir. Bu standart takviyelendirilmiş termoset reçine borulara üretim yönteminden bağımsız olarak uygulanabilmesini kapsar. Bu çalışmada 54, 72 ve 96 mm çaplarında karbon elyaf takviyeli kompozit borulara halka çekme deneyi yapılarak Gerilme dayanımları ile Birim şekil değiştirme (% uzama) değerleri bulunmuştur. Bu bölümde yapılan karşılaştırmalarda yorumlar Birim şekil değiştirme (% uzama) mm/mm cinsinden yapılmıştır.

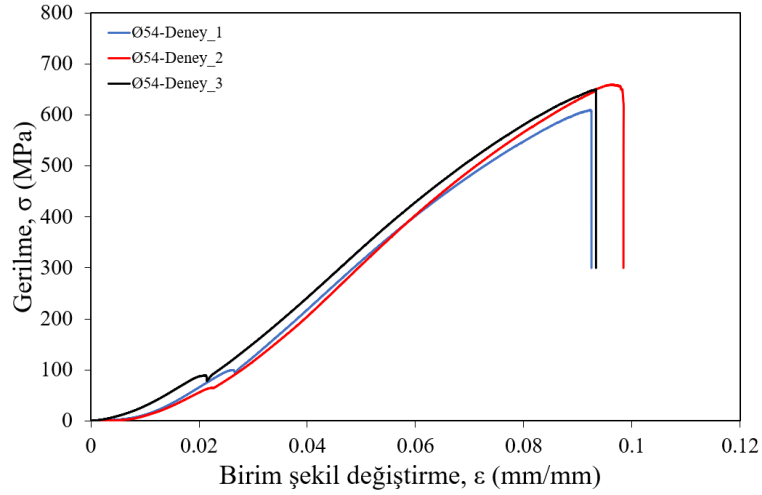
Karbon elyaf lifleri gevrek malzemeler olduğu için deney esnasında sünmeye mahal vermeden ani kopma şeklinde darbe hasarı oluşmuştur. Her bir deney numunesi daraltılmış bölgeden kopma hasarına uğramıştır. Tüm numuneler beklenin aksine bir davranış sergilemeden $\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde kopmuştur. Her üç çapta da oluşan hasarlar belli bir hasar gelişim periyodunda gerçekleşmiştir. Oluşan hasarlar sırası ile, daraltılmış bölgede deplasman artışı ile matris çatlakları ile başlamış akabinde elyaf doğrultularında yarıma hasarları oluşmuştur. Deplasman artışları devam ettikçe delaminasyon hasarları oluşmuş ve sonuç hasara ulaştığında $\pm 55^\circ$ sarım açısında tabakalarda çekilmelerin (pull-out) olduğu görülmüştür.



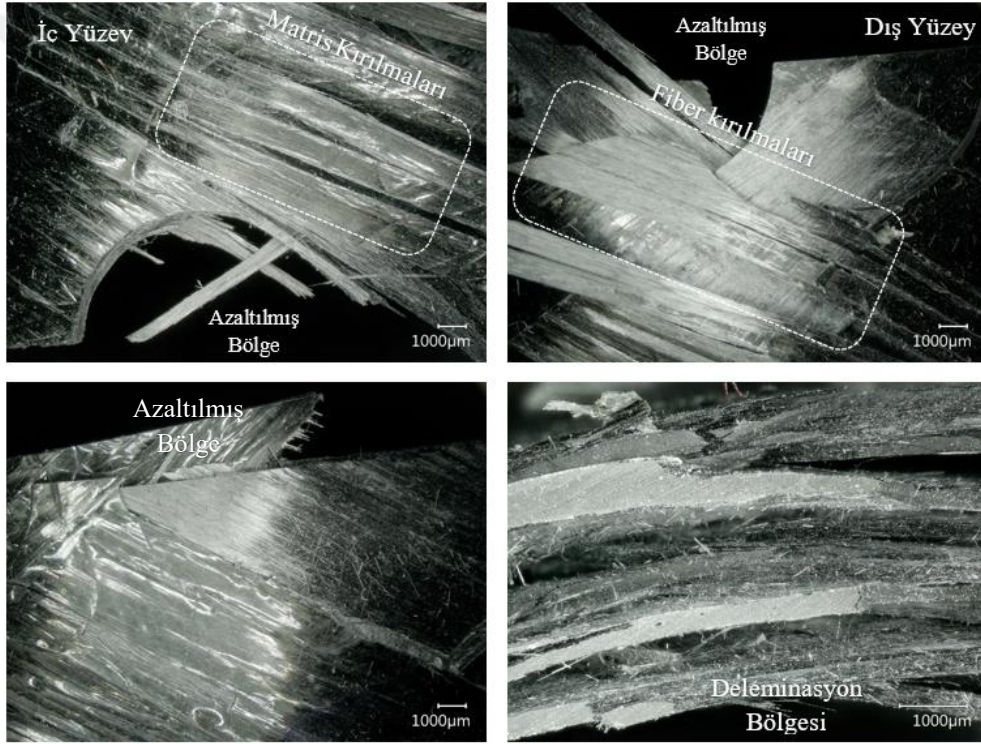
Şekil 5. 14. Halka çekme deney numunesi

5.4.1. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli borularda çekme deney sonuçları

Ø54 karbon elyaf takviyeli kompozit borular için 3 adet çekme deneyi uygulanmıştır. Halka çekme deneyleri sonrasında Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.15’de verilmiştir. Şekil 5.15 incelendiğinde, her üç numunede deplasman ve hasar gelişimi açısından büyük farklar olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin malzeme özelliği açısından stabil malzemeler olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ø54 karbon elyaf takviyeli kompozit boru numuneleri maksimum 9.47 % uzama şekil değiştirme sonucunda ani olarak sonuç hasarına ulaşmıştır. Karbon elyaf takviyeli kompozit boru numunesi yaklaşık olarak 9.47 % uzama yer değiştirme değeri ve 639.58 MPa gerilme değerinde maksimum değere ulaşması, numunede meydana gelen hasar mekanizmasının ilerlemeli hasar modunda olduğunu göstermektedir. Her üç numuneden elde edilen verilerin ortalamaları alınmış ve yorumlar bu ortalama değerlere göre yapılmıştır.



Şekil 5. 15. Ø54 mm karbon kompozit boruların halka çekme sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği



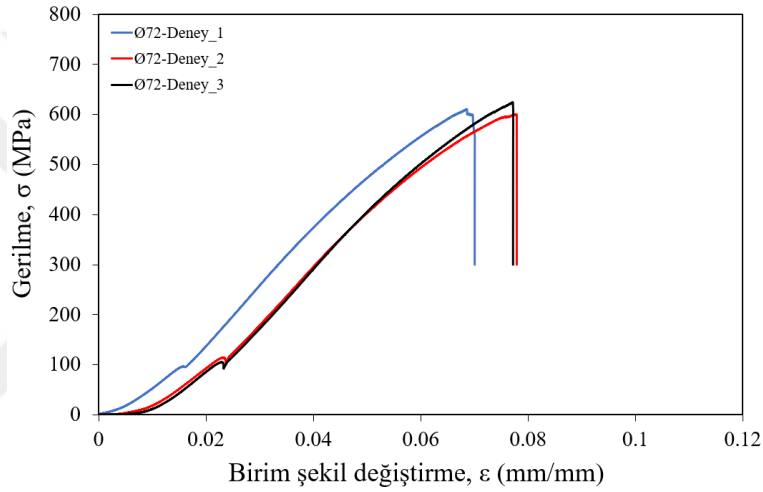
Şekil 5. 16. Ø54 mm karbon kompozit boruların halka çekme deneyi sonrası mikro hasar görüntüleri.

Şekil 5.16’da Ø54 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruların mikro hasar görüntülerine yer verilmiştir. Mikro hasar görüntüleri incelendiğinde, yarılmının ve diğer hasar modlarının $\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde olduğu tüm deney numunelerinde gözlemlenmiştir. Hasarın elyaf çatlama sesleri ile başladığı, deplasman artışı ile elyaflar da oluşan açısız değişimle beraber elyaf doğrultusunda matris çatlakların oluştuğu deney esnasında tespit edilmiştir. İlerleyen yük ve deplasman artışı ile beraber tabakalar arasında matris hasarının yoğunlaştığı, bu durumun yoğun delaminasyon hasarına sebep olduğu görülmüştür. Halka

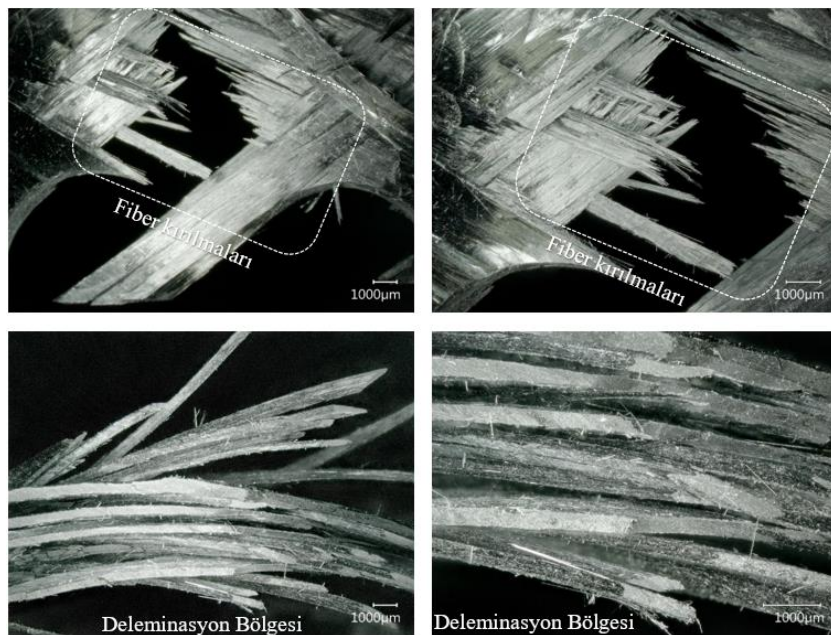
çekme deneyleri sonucunda, numuneler daraltılmış bölgeden kopmuş, delaminasyon hasarı ile beraber elyaf doğrultusunda yarıma hasarlarının da yoğun olduğu gözlemlenmiştir.

5.4.2. Ø72 mm karbon elyaf takviyeli borularda çekme deney sonuçları

Ø72 karbon elyaf takviyeli kompozit boruların çekme deneyleri sonrasında elde edilen veriler Şekil 5.17’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 5.15 ve Şekil 5.17’de verilen grafikler karşılaştırıldığında Ø72 mm iç çapa sahip boru numunesi Ø54 mm iç çapa sahip boruya yakın bir hasar gelişimi sergilemiştir. Fakat Ø54 mm borudan farklı olarak gerilme ve deplasman değerlerinde düşüşler gerçekleşmiştir. Bu numune hasara uğradığında ortalama olarak 611.46 MPa gerilme değerine ve 7.51 % uzama deplasman değerine ulaşabilmiştir.



Şekil 5. 17. Ø72 mm karbon kompozit boruların halka çekme sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği.



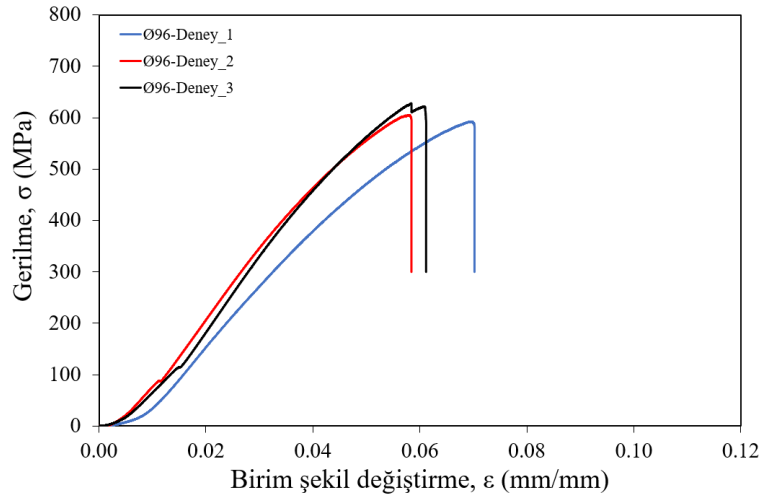
Şekil 5. 18. Ø72 mm karbon kompozit boruların halka çekme deneyi sonrası mikro hasar görüntüleri.

Şekil 5.18’de Ø72 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruların mikro hasar görüntülerine yer verilmiştir. Mikro hasar görüntüleri incelendiğinde, yarılmamanın $\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde olduğu tüm deney numunelerinde gözlemlenmiştir. Hasarın elyaf çatlama sesleri ile başladığı deney esnasında tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda, numunelerin daraltılmış bölgeden kopması eşit bir gerilme dayanımı olarak yorumlanabilir. Çekme deneyi sonuçlarında, delaminasyon ve elyaf kopması hasarı da gözlemlenen hasarlar arasındadır. Bu numunede oluşan sonuç hasarda yoğun delaminasyon sonrası tabakaların çekilmesi ile beraber hasarın başladığı daraltılmış bölgede elyaf kırılmaları da gözlemlenmiştir.

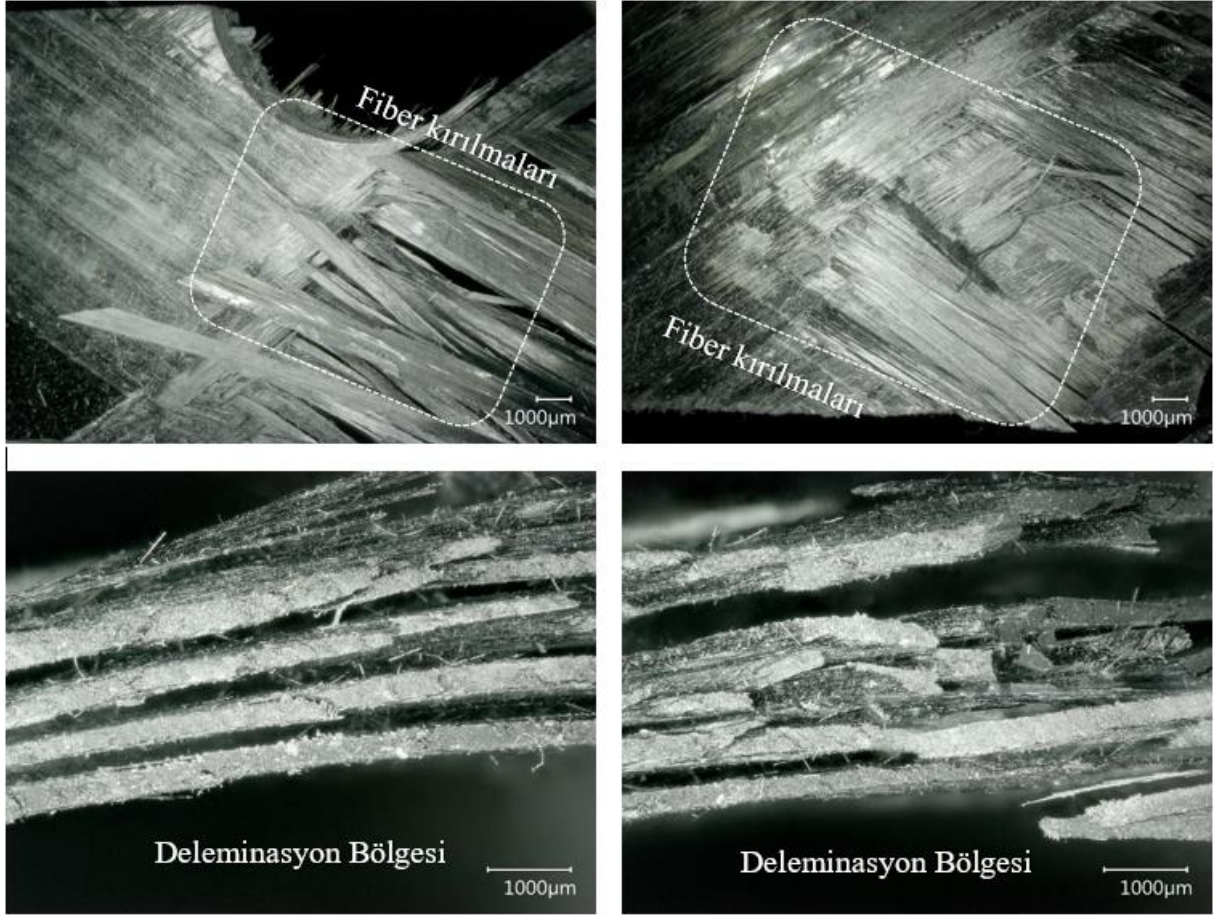
5.4.3. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli borularda çekme deney sonuçları

Bu numunede de halka çekme deneyleri sonrasında Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.19’da verilmiştir. Şekil 5.19 incelendiğinde, her üç numunede deplasman ve hasar gelişimi açısından büyük farklar olmadığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.15, Şekil 5.17 ve Şekil 5.19’da verilen grafikler karşılaştırıldığında Ø96 mm iç çapa sahip numune boru Ø54 ve Ø72 mm iç çapa sahip numune borulara yakın bir hasar mekanizması sergilemiştir. Fakat, Ø72 boru numunesinde de olduğu gibi gerilme ve deplasman değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Bu numune ortalama olarak 608.05 MPa gerilme değerine ve 6.32 % uzama değerine ulaşabilmiştir.



Şekil 5. 19. Ø96 mm karbon kompozit boruların halka çekme sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği.



Şekil 5. 20. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruların çekme deneyi sonrası mikro hasar görüntüleri.

Şekil 5.20’de Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruların mikro hasar görüntülerine yer verilmiştir. Mikro hasar görüntüleri incelendiğinde, Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit borularda da yarılmamanın $\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde olduğu tüm deney numunelerinde gözlemlenmiştir. Hasarın elyaf çatlama sesleri ile başladığı deney esnasında tespit edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda, numunelerin daraltılmış bölgeden kopması eşit bir gerilme dayanımı olarak yorumlanabilir. Çekme deneyi sonuçlarında, deleminasyon ve elyaf kopması hasarı da gözlemlenen hasarlar arasındadır.

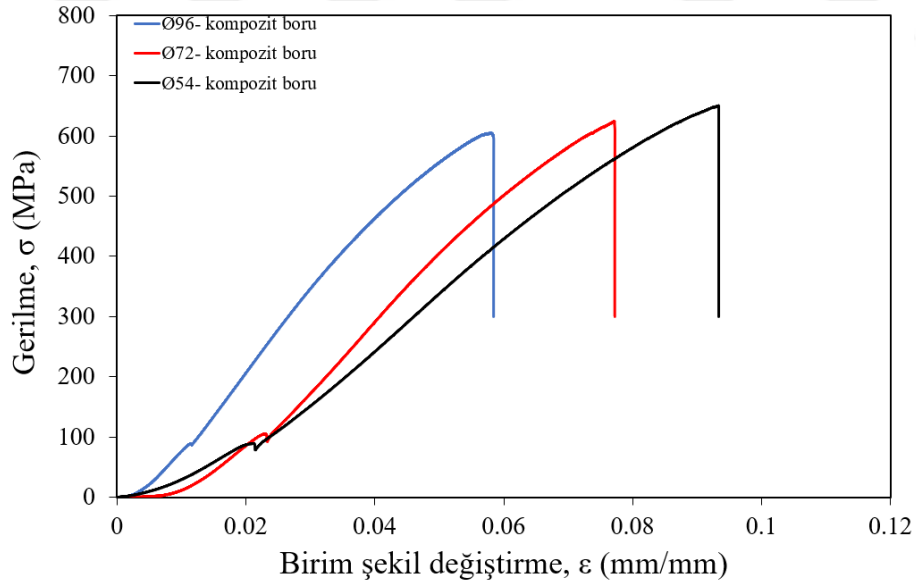
5.4.4. Karbon elyaf takviyeli borularda karşılaştırmalı çekme deney sonuçları

Bu bölümde her çapta kullanılan karbon elyaf takviyeli kompozit borular için 3’er adet çekme deneyi yapılmış ve karşılaştırma için en yüksek gerilmeye sahip numunelerin değeri kullanılmıştır. Karbon elyaf takviyeli kompozit borular için halka çekme deneyleri sonrasında elde edilen veriler Çizelge 5.2’de, Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 5.21’de verilmiştir.

Şekil 5.21’de görüldüğü üzere, çap artışının deplasman üzerinde etkisi büyüktür. Numune çapının gerilim dayanım değeri üzerinde etkisi büyük değilken şekil değiştirme üzerindeki etkisi büyüktür. Ø54 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruda 639.58 MPa olan gerilme değeri ve 9.47 % uzama olan yer değiştirme değeri, Ø72 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruda 611.46 MPa gerilme değeri ve 7.51 % uzama elde edilmiştir. Ø96 mm karbon elyaf takviyeli kompozit boruda ise 608.05 MPa gerilme değeri ve 6.32 % uzama olarak deney sonuçlarında karşımıza çıkmıştır. Deney sonuçlarını karşılaştırdığımızda, çap artışının iç basınç yüklemelerine karşı dayanımı azalttığı aynı zamanda % uzama deplasman değerlerini azalttığı şeklinde yorumlanabilir.

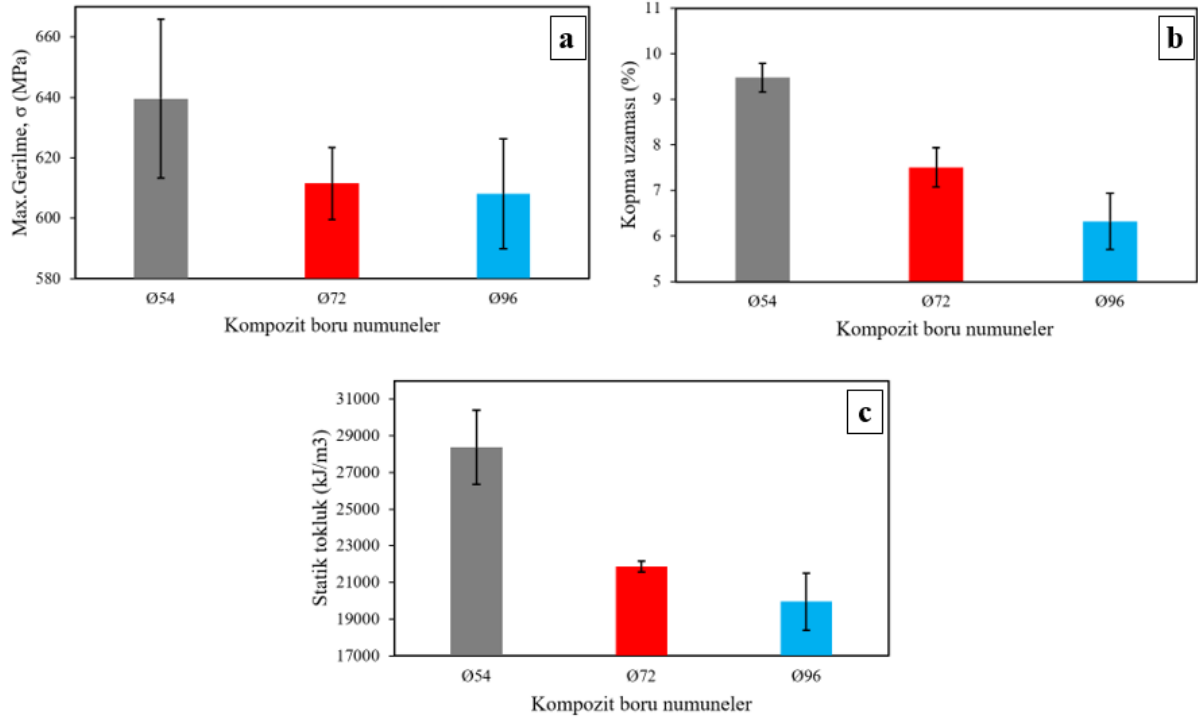
Çizelge 5.2. Çekme deneyi sonrası elde edilen veriler

Test numuneleri	Mekanik Özellikler		
	Maksimum gerilme (MPa)	Kopma uzaması (%)	Statik tokluk (kJ/m ³)
Ø54_Kompozit boru	639.58±26.28	9.47±0.32	28371±2014
Ø72_Kompozit boru	611.46±11.96	7.51±0.43	21860±287
Ø96_Kompozit boru	608.05±18.15	6.32±0.62	19960±1561



Şekil 5. 21. Karbon elyaf takviyeli kompozit boruların karşılaştırmalı basma sonrası Gerilme/Birim şekil değiştirme grafiği.

Şekil 5.22a'da maksimum gerilme değerleri, Şekil 5.22b'de % kopma uzaması, Şekil 5.22c'de statik tokluk değerleri deney numuneleri için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.22 ve Çizelge 5.2 de verilen değerler ayrı ayrı incelendiğinde çap artışının karbon elyaf boru numuneleri üzerinde grafik değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5. 22. Çekme deneyi sonrası elde edilen a) Max. gerilme, b) Kopma uzaması (%), c) Statik tokluk

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasının amacı, farklı çaplarda karbon elyaf takviyeli kompozit boruların farklı hızlarda uygulanan düşük hızlı darbelere vereceği cevapları ve çekme gerilimine dayanımını incelenmektedir.

6.1. Sonuçlar

Kuvvet-zaman grafikleri incelendiğinde, yüklemeler bir artış kısmına, tepe kuvvet noktasına ve yükten boşalma kısmına sahiptir. Tüm deneylerde bu sonucun elde edilmesi karbon elyaf takviyeli kompozit boruların stabil malzemeler olduğunu gösterir. Grafikler incelendiğinde, yükleme ve yükten boşalma arasındaki kısımda çap artışıyla birlikte dalgalanmaların arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumu, temas yüzey alanının azalması ve boru çapı artmasıyla yaylanmanın artması olarak yorumlanmıştır. Grafik verileri karşılaştırıldığında boru çapının artmasıyla yaylanma miktarı da artmıştır. Bunun sonucunda tepe kuvvet azalırken, temas süresi artmıştır.

Kuvvet-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde, temas sürelerinde büyük farklılıklar gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi karbon elyaflar rijit malzemeler olduğu için esnemeye çok müsaade eden malzemeler olmayışındır. Yaylanma miktarı fazla olmadığı için vurucu ucun temas sürelerinde dikkate alınacak bir farklılık olmamıştır. Yer değiştirme miktarlarını incelediğimizde çap artışıyla birlikte yer değiştirme miktarının arttığı gözlemlenebilir. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Büyük oranda farklılıklar olmasa da yaylanmanın etkisiyle yer değiştirme oranında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, darbe hızının artması absorbe edilen enerji miktarını artırmıştır. Boru çapının artmasıyla absorbe edilen enerji miktarı azalmıştır. Her darbe hızında boru çapı artışı dikkate alındığında absorbe edilen enerji miktarının azaldığı gözlemlenebilir. Bunun sebebini boru çapının artmasıyla temas yüzey alanının artması olarak yorumlanabilir. Temas yüzey alanının artmasından ziyade yaylanmanın etkisiyle absorbe edilen enerji davranışı aşağı yönde hareket etmiştir.

Düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen verilerin makro hasar analizlerinde mikroskop incelemesi ile hasar modları gözlemlenebilmektedir. Delaminasyon, radyal matris çatlakları, elyaf kırılmaları, tabakalar arası transfer çatlakları ve mikro matris çatlakları gibi hasarlar malzemelerin kesitlerinde gözlemlenebileceği için mikro hasar analizleri de yapılmıştır. İncelemelerin sonucunda hız artışı hasar mekanizmalarını artırmış, çap artışı elyaf

kırılmalarını azalttığı gibi oluşan hasarların delaminasyon hasarına yatkınlık gösterdiği şeklinde gözlemlenmiştir.

Çekme deney sonuçları incelendiğinde, yarılmamanın daraltılmış bölgelerde ve $\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde olması gerilmenin eşit taşındığı şeklinde yorumlanabilir. Gerilme/Birim şekil değiştirme grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, Ø72 boru numunesinin Ø54 numuneye göre yer değiştirme miktarı %12.21 artmış, çekme gerilmesi dayanım değeri %4.599 oranında azalmıştır. Ø96 boru numunesi Ø72 numune ile kıyaslandığında yer değiştirme miktarı %16.64 oranında artmış, çekme gerilmesi dayanım değeri %0.561 oranında azalmıştır. Deney verilerinden elde edilen sonuçlar mukayese edildiğinde çap artışı yer değiştirme miktarlarını artırmıştır. Çapın artması yer değiştirme değerlerini oransal olarak da artırmıştır. Çekme dayanım değerleri kıyaslandığında ise azalma gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarından elde ettiğimiz değerleri yorumlamak gerekirse çap artışı çekme gerilme dayanımını düşürürken yer değiştirme değerini artırmıştır. Tüm boru numuneleri incelendiğinde çap artışı ile yüzde uzama oranlarında azalma gözlemlenmiştir (Çizelge 5.2). Bu veriler çap artışının karbon elyaf takviyeli kompozit borularda iç basınç yüklemelerine karşı mukavemeti azalttığı şeklinde yorumlanabilir.

6.2. Öneriler

Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, karbon elyaf takviyeli kompozit boruların farklı hızlarda uygulanan darbelere verdiği cevaplar farklı bileşenlerden etkilenebilmektedir. Kompozit boruların darbe sonrasında; patlama, çekme, basma gibi cevaplarının incelenmesi literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

Darbe dayanımları farklı etmenlerden etkilenebildiği için farklı sıcaklıklar, korozyif ortamlar gibi deney şartlarındaki cevapları incelenip genişletilebilir.

7. KAYNAKLAR

- Aboudi J., Arnold S.M. ve Bednarczyk B.A., 2013, Micromechanics of Composite Materials, Micromechanics of Composite Materials.
<https://doi.org/10.1016/C2011-0-05224-9>.
- Akay M., 2015, An Introduction Download Free Books at An Introduction.
- Arikan H., 2010, Failure Analysis of ($\pm 55^\circ$)₃ Filament Wound Composite Pipes with an Inclined Surface Crack under Static Internal Pressure, Composite Structures.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.07.027>.
- Bai Y. ve Zhang X. Z., 2016, Progressive Failure Analysis of Open-Hole Composite Hoops under Radial Loading, Composites Part B: Engineering 97: 336–43.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.029>.
- Balasubramanian M., 2013, Composite Materials and Processing, 648 pages.
- Barbero E. J., 2010, Introduction to Composite Materials Design, 562 pages.
- Berbinau P., Soutis C., ve Guz I. A., 1999. Compressive Failure of 0° Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP) Laminates by Fibre Microbuckling, Composites Science and Technology 59 (9): 1451–55.
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00181-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00181-X).
- Bittmann E., 1999, Thermosets. Kunststoffe Plast Europe.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-703780-6.50010-9>.
- Campbell F. C., 2010, Structural Composite Materials.
www.asminternational.org.
- Cantwell W. J., 2007, Geometrical Effects in the Low Velocity Impact Response of GFRP, Composites Science and Technology.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.10.015>.
- Chand S., 2000, Carbon Fibers for Composites, Journal of Materials Science.
<https://doi.org/10.1023/A:1004780301489>.
- Chung D., 2010, Composite Materials Science and Applications, Journal of Chemical Information and Modeling.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Demirci M. T., Tarakçıoğlu N., Avcı A., Akdemir A. ve Demirci İ., 2017, Fracture Toughness (Mode I) Characterization of SiO₂ Nanoparticle Filled Basalt/Epoxy Filament Wound Composite Ring with Split-Disk Test Method, Composites Part B: Engineering 119: 114–24. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.045>.

- Dokur M. M., 2009, Karbon Fiber Esaslı Polimerik Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu 2 (5): 87, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
<http://hdl.handle.net/11527/8401>
- Franck A. J., 2004, Understanding Rheology of Thermosets, TA Instruments.
https://www.tainstruments.com/pdf/literature/AAN015_V1c_U_Thermoset.pdf
- Gemi L., Kara M. ve Avcı A., 2016, Low Velocity Impact Response Of Prestressed Functionally Graded Hybrid Pipes, Composites Part B: Engineering 106, 154-163.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.025>
- Gemi D.S., 2019, Filaman Sarım Ctp Borularda Darbe Sonrası Basma (CAI) Davranışının İncelenmesi, 81.
https://www.researchgate.net/publication/335015373_filaman_sarim_ctp_borularda_darbe_sonrası_basma_cai_davranışının_ıncelenmesi
- 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 (November): 217–32.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.056>
- Gemi L., Gemi D. S., Kayrıçı M., Uludağ M. ve Şahin Ö. S., 2018, Filaman Sarım E-Camı / Epoksi Kompozit Boruların Darbe Davranışı ve Hasar Analizi, no. March: 8–10.
https://www.researchgate.net/publication/324810791_Filaman_sarim_E-camiepoksi_kompozit_borularin_darbe_davranisi_ve_hasar_analizi
- Gemi L., Kara M. ve Avcı A., 2016, Low Velocity Impact Response of Prestressed Functionally Graded Hybrid Pipes, Composites Part B: Engineering.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.025>
- Gemi L., Kayrıçı M., Uludağ M., Gemi D.S., and Şahin Ö.S., 2018, Experimental and Statistical Analysis of Low Velocity Impact Response of Filament Wound Composite Pipes, Composites Part B: Engineering.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.006>
- Gemi L., Koklu U., Yazman Ş., Morkavuk S., 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, Composites Part B: Engineering 186, 107787
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107787>
- Gemi L., Koklu U., Yazman Ş., Morkavuk S., 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, Composite Structures 235, 111737
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111737>
- Gliszczynski A., Kubiak T., Rozylo P., Jakubczak P., and Bieniaś J.. 2019, The Response of Laminated Composite Plates and Profiles under Low-Velocity Impact Load, Composite Structures.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.005>

- Han G. M. ve Chang S. H., 2015, Failure Analysis of a Type III Hydrogen Pressure Vessel under Impact Loading Induced by Free Fall, Composite Structures. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.027>.
- Hawa A., Abdul Majid M. S., Afendi M., Marzuki H. F.A., Amin N. A. M., Mat F. ve Gibson A. G., 2016, Burst Strength and Impact Behaviour of Hydrothermally Aged Glass Fibre/Epoxy Composite Pipes, Materials and Design. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.082>.
- Hawa A., Abdul Majid M. S., Afendi M., Haslan M., Pranesh K., and Amin N. A. M., 2015, Burst Strength of Glass Fibre/Epoxy Composite Pipes Subjected to Impact Loading, Applied Mechanics and Materials. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.786.121>.
- Heimbs S., Heller S., Middendorf P., Hähnel F. ve Weiße J., 2009, Low Velocity Impact on CFRP Plates with Compressive Preload: Test and Modelling, International Journal of Impact Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.04.006>.
- Hull D., Legg M. J.ve Spencer B., 1978, Failure of Glass/Polyester Filament Wound Pipe, Composites. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(78\)90513-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(78)90513-X).
- Kara M. ve Uyaner M., 2017, Filaman Sarım İle Üretilen CTP Kompozit Borularda Tabaka Sayısının Teğetsel Gerilme Dayanımına Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 21 (2): 666. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.50178>.
- Kaw A., 2006, Mechanics of Composite Materials, <https://www.babil.com/kompozit-malzeme-mekanigi-kitabi-autar-k-kaw>.
- Kostopoulos, V., Baltopoulos A., Karapappas P., Vavouliotis A. ve Paipetis A., 2010, Impact and After-Impact Properties of Carbon Fibre Reinforced Composites Enhanced with Multi-Wall Carbon Nanotubes, Composites Science and Technology. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.11.023>.
- Maziz A., Tarfaoui M., Gemi L., Rechak S., Nachtane M., 2021, A progressive damage model for pressurized filament-wound hybrid composite pipe under low-velocity impact, Composite Structures, 114520 <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114520>
- Mili, F., and Necib B., 2001, Impact Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates under Low Velocities, Composite Structures. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00134-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00134-3).
- Çalışkan M.B., 2021, KNT VE SiO₂ Nanopartikül İle Modifiye Edilmiş Karbon-Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 95. <https://hdl.handle.net/20.500.12452/7700>

- Mallick P.K., 2007, Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420005981>
- Pusch J. ve Wohlmann B., 2018, Carbon Fibers, In Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.00002-5>.
- Roham R., 2016, On the Mechanical Performance of Glass-Fibre-Reinforced Thermosetting-Resin Pipes: A Review, Composite Structures 143: 151–64.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.037>.
- Richardson M. O. W. ve Wisheart M. J., 1996. Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.
[https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00074-7).
- Sayer M., Numan B., Sayman O. ve Topçu M., 2009, An Experimental Investigation on the Impact Behaviour of Glass/Epoxy and Hybrid Composite Plates, Advanced Composites Letters 18 (4): 096369350901800.
<https://doi.org/10.1177/096369350901800401>.
- Şenel M., Kırılı A. ve Kurşun A., 2009, Rebound Braking And Control System For Low Velocity Impact Test Machine, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13–15.
- Shao Y., Betti A., Carvelli V, Fujii T., Okubo K., Shibata O. ve Fujita Y., 2016, High Pressure Strength of Carbon Fibre Reinforced Vinylester and Epoxy Vessels, Composite Structures.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.053>.
- Sheikh A. ve Jamal Y., 2009, Machining of Polymer Composites, Machining of Polymer Composites.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-68619-6>.
- Shubhra, Quazi T. H., Alam A. K. M. M., and Quaiyyum M. A., 2013, Mechanical Properties of Polypropylene Composites: A Review, Journal of Thermoplastic Composite Materials.
<https://doi.org/10.1177/0892705711428659>.
- Sinha P. K., 2006, Composite Materials and Structures, Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur.
- Subaşı S., 2015, Effect of Resin and Glass Fiber Type on the Internal Pressure Resistance of Filament Wound Composite Pipes, Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, 1–10.
- Tarakçıoğlu N., Gemi L. ve Yapıcı A., 2005, Fatigue Failure Behavior of Glass/Epoxy ±55 Filament Wound Pipes under Internal Pressure, Composites Science and Technology.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.002>.

- Taşyürek M. ve Ekinçi Ş., 2021, Deniz İçi Nakil Hatlarında Polimer Esaslı CNT Takviyeli Kompozit Boruların Kullanılabilirliği, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 11: 609–21.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.767802>.
- Toma Ç., 2007, Sandviç Kompozit T Bağlantılarında Gerilme Analizi Bitirme Projesi.
- Turkmen I. ve Koksal S. N., 2013, Investigation of Mechanical Properties and Impact Strength Depending on the Number of Fibre Layers in Glass Fibre, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi.
- US Department of Energy, 2015, Composite Materials - Technology Assessment, Quarennial Technology Review 2015, 41.
- Uyaner M., Kara M. ve Şahin A., 2014, Fatigue Behavior of Filament Wound E-Glass/Epoxy Composite Tubes Damaged by Low Velocity Impact, Composites Part B: Engineering.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.039>.
- Özkılıç Y. O., Madenci E., Gemi L., 2020, Tensile and compressive behaviors of the pultruded GFRP lamina, Turkish Journal of Engineering 4 (4), 169-175
<https://doi.org/10.31127/tuje.631481>
- Zhang J., 2012, Different Surface Treatments of Carbon Fibers and Their Influence on the Interfacial Properties of Carbon Fiber, no. 2012ECAP0038.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01146459>.