



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FİLAMAN SARIM CTP BORULARDA ÇAP
FARKININ MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet YILMAZ tarafından hazırlanan “Filaman Sarım CTP Borularda Çap Farkının Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması 24/11/2025 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. Ahmet CAN

Danışman

Prof. Dr. Lokman GEMİ

Üye

Doç. Dr. Şakir YAZMAN

İmza

.....

.....

.....

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

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Bu tez çalışması NEU BAP tarafından 24YL19008 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Ahmet YILMAZ

Tarih: 24.11.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİLAMAN SARIM CTP BORULARDA ÇAP FARKININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet YILMAZ

NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Lokman GEMİ

2025, 113 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Lokman GEMİ

Prof. Dr. Ahmet CAN

Doç. Dr. Şakir Yazman

Bu çalışma, basınçlı akışkanların taşınmasında, kimyasal madde ve endüstriyel sıvıların iletimi ile, petrol ve doğalgaz hatlarında kullanılan cam elyaf takviyeli plastik (CTP) kompozit boruların farklı çaplardaki mekanik davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve karşılaştırmıştır. CTP kompozit borular, düşük ağırlık, yüksek korozyon direnci ve kolay montaj gibi avantajları sayesinde geniş kullanım alanına sahiptir. Kullanım ömürleri boyunca CTP kompozit borular yüksek basınç ve çevresel yükler gibi iç ve dış etkiler nedeniyle hasara uğrayabilir. Bu yüklerin etkisiyle borularda; matris çatlağı, elyaf hasarı ve delaminasyon gibi farklı hasar tipleri oluşabilir. Bu tür hasarların neden olduğu mukavemet kaybı, boruların beklenen mukavemet değerlerini sağlayamamasına ve sistem hasarıyla birlikte önemli maddi kayıplara yol açabilir. Bu olumsuz durumları önlemek amacıyla, yapıların iç basınç ve radyal yükler altındaki davranışlarının, çap/et kalınlığı oranı (D/t) ve sarım açılarının etkileriyle birlikte incelenmesi gerekmektedir. Farklı çaplara ve aynı et kalınlığına sahip boruların patlama, deformasyon ve hasar davranışlarının belirlenmesi bu anlamda büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla; 54, 72 ve 96 mm çaplarında, aynı et kalınlığında (2,4 mm), filaman sarımlı ve $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip CTP boru numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelere yakma, iç basınç, halka çekme ve yanıl basma testleri uygulanmıştır. Yakma testleri ASTM-D2584-18 standartlarına göre yapılarak numunelerin elyaf hacim oranları belirlenmiştir. Statik iç basınç patlatma testleri ASTM D1599-14 standardına göre yapılarak, çap farkının patlama basınçlarına olan etkisi ortaya konulmuş ve maksimum gerilme ile mekanik dayanıma etkisi tespit edilmiştir. Halka çekme deneyleri ASTM D2290-16 standardına göre yapılarak, maksimum gerilme değerleri elde edilmiş ve patlatma testi ile karşılaştırılmıştır. Yanıl basma testi ASTM D2412-21 standardına göre yapılarak çap farkının etkisi incelenmiştir. Deneylerin sonrasında CTP borular, görüntüleme yöntemleri ve optik mikroskop ile incelenerek makro/mikro hasar analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, teğetsel gerilme ve Poisson oranı değerleriyle birlikte değerlendirilmiş, çap farkının mukavemete etkisi karşılaştırmalı olarak detaylı biçimde gösterilmiştir. Boru tasarımında çap/et kalınlığı oranının kritik bir parametre olduğu bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Cam, Elyaf, Filaman, Hasar, Halka, Basınç, Kompozit, Gerilme

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIAMETER DIFFERENCE ON MECHANICAL PROPERTIES OF FILAMENT WOUND GRP PIPES

Ahmet YILMAZ

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

Advisor: Prof. Dr. Lokman GEMİ

2025, 113 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Lokman GEMİ

Prof. Dr. Ahmet CAN

Assoc. Prof. Dr. Şakir Yazman

This study experimentally investigated and compared the mechanical behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) composite pipes with varying diameters, which are widely utilized in oil and natural gas pipelines and for the transport of pressurized fluids, chemical substances, and industrial liquids. GFRP composite pipes maintain a broad application scope due to superior advantages such as low weight, high corrosion resistance, and simplified installation. However, during their service life, these pipes are susceptible to damage (including matrix cracking, fiber damage, and delamination) caused by high internal pressure and external environmental loads, leading to a loss of strength and potential system failures. To address this, it is essential to examine the structural performance under internal pressure and radial loads, particularly the effects of the diameter-to-thickness ratio (D/t) and winding angles, making the determination of burst, deformation, and damage behaviors for pipes with different diameters but the same wall thickness critically important. For this purpose, GFRP pipe specimens with nominal diameters of 54, 72, and 96 mm, all having a 2,4 mm wall thickness and a $\pm 55^\circ$ filament winding angle, were produced and subjected to burst (ASTM-D2584-18), static internal pressure burst (ASTM D1599-14), ring tensile (ASTM D2290-16), and lateral compression (ASTM D2412-21) tests. The tests quantified the effect of diameter variation on burst pressures and maximum stress values, while post-experiment macro/micro damage analyses were conducted using optical microscopy and imaging techniques. The collected data, evaluated against hoop stress and Poisson's ratio values, demonstrated the effect of the diameter difference on ultimate strength, conclusively revealing that the diameter-to-thickness ratio is a critical parameter in GFRP pipe design.

Keywords: Glass, Fiber, Filament, Damage, Ring, Pressure, Composite, Stress

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının tasarım aşamasında, deneysel çalışma sürecinde ve sonuçların yorumlanması ile tez yazım aşamasında, desteklerini esirgemeyen Tez Danışmanım Prof. Dr. Lokman Gemi'ye,

Deneysel çalışmalarda özellikle deneylerin uygulanması esnasında ve deney sonuçlarının yorumlanmasında bilgi ve tecrübelerini paylaşan Doç. Dr. Şakir Yazman'a,

Halka çekme ve yanal basma deneylerinde ve hasar görüntüleme aşamalarında tecrübelerini paylaşan Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde Dr. Öğr. Üyesi Sezer Morkavuk'a,

Yakma testleri sürecinde tecrübelerini paylaşan Öğr. Gör. Dr. Durmuş Temiz'e,

Çalışmanın deneysel süreçlerinde her türlü desteği veren Öğr. Gör. Barış Bakırcıoğlu ve yüksek lisans öğrencisi Mücahit Kemal Kavaklı'ya

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için, 24YL19008'nolu proje ile maddi destek veren Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne,

Çalışmada kullanılan deney numunelerinin üretilmesi noktasında ve tez çalışmasının alt yapısının oluşturulmasında destek veren Yük. Mak. Müh. Dilek Soylu Gemi'ye

Özellikle, çalışmalarımın başlangıcından bitimine kadar hiçbir fedakârlıktan kaçmadan maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen eşime ve aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet YILMAZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. KURAMSAL TEMELLER	22
3.1. Kompozit Malzemeler	22
3.1.1 Kompozit malzemelerin dayanımlarını etkileyen faktörler	24
3.2. Polimer Matrisler	25
3.2.1 Termosetler (Isıl sertleşir matrisler)	26
3.2.2. Termoplastikler (Isıl yumuşar matrisler)	27
3.3. Takviye Fazları	29
3.3.1. Doğal elyaflar	30
3.3.2. Cam elyaflar.....	30
3.3.3. Karbon elyaflar	32
3.3.4. Bazalt elyaflar	34
3.3.5. Aramid elyaflar	35
3.3.6. Tabakalı kompozitler	36
3.4. Kompozit Üretim Yöntemleri.....	37
3.4.1. Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi.....	37
3.4.2. Ekstrüzyon ile kalıplama yöntemi	38
3.4.3. El yatırma yöntemi.....	39
3.4.4. Sprey püskürtme yöntemi	39
3.4.5. Filaman sarım yöntemi	40
3.4.6. Otoklav yöntemi	44
3.5. Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları	44
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	53
4.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi	53
4.2. Yakma Testi.....	54
4.3. Statik İç Basınç Deneyleri	55
4.3.1. Poisson oranının belirlenmesi	55
4.3.2. CTP boruların statik iç basınç patlatma testi	58
4.4. Halka Çekme Testi.....	61
4.5. Radyal Basma Testi	63

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	66
5.1. CTP Boruların Yakma Testi Sonuçları	66
5.2. CTP Boruların Statik İç Basınç Testlerinin Sonuçları.....	66
5.2.1. Poisson oranı test sonuçları.....	66
5.2.2. CTP boruların statik iç basınç patlatma test sonuçları.....	67
5.3. CTP Boruların Halka Çekme Test Sonuçları.....	79
5.4. CTP Boruların Yanal Basma Test Sonuçları	86
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	96
6.1. Sonuçlar	96
6.2. Öneriler	97
6. KAYNAKLAR	99



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	23
Şekil 3.2. Kompozit malzemenin kesit görünüşü.	26
Şekil 3.3. Termoplastik ve termoset kompozitlerin iç yapısı.	28
Şekil 3.4. Fiberizasyon yöntemiyle cam elyaf elyaf üretimi.	32
Şekil 3.5. PAN bazlı karbon elyaf üretiminin işlem basamakları.	34
Şekil 3.6. Enjeksiyon kalıplama üretim yöntemi.	38
Şekil 3.7. Ekstrüzyon kalıplama üretim yöntemi.	39
Şekil 3.8. El yatırma yöntemi.	39
Şekil 3.9. Sprey püskürtme yöntemi.	40
Şekil 3.10. Islak sarım metodu.	42
Şekil 3.11. Filaman sarım metotları a) Kutupsal sarım, b) Helisel sarım, c) Dairesel sarım.	42
Şekil 3.12. Otoklav üretim yöntemi.	44
Şekil 3.13. Kompozitlerde temel hasar mekanizmaları; a) Elyaf kırılması ve arayüz debondingi b) Matris çatlaması c) Arayüz kayması ve delaminasyon.	46
Şekil 3.14. Elyaf/matris arayüz hasarının hâkim matris çatlağı.	47
Şekil 3.15. Farklı arıza modlarındaki delaminasyonların şematik gösterimi.	48
Şekil 3.16. Konumlarına göre delaminasyon tipleri; a) dahili, b) yüzeye yakın, c) çoklu çatlama.	48
Şekil 3.17. Çatlak büyümesi ve elyaf köprülemesi; debondinge eşlik eden arayüz kayması.	49
Şekil 3.18. Elyaf çekilmesi mekanizması; tam anlamıyla gelişme gösteren çatlak mekanizması.	50
Şekil 3.19. Elyaf (kırılması) hasar mekanizması; tam anlamıyla gelişme gösteren çatlak mekanizmasının içinde görülen elyaf hasarı.	51
Şekil 3.20. Darbe yükü altında kompozitlerde hasar mekanizmaları; a) $[0]_{12}$ elyaf eksenindeki yüklemde elyaf kırılması b) $[90]_{12}$ elyaf eksenine dik yüklemde matris çatlağı.	52
Şekil 4.1. CTP kompozit boruların filaman sarım yöntemi ile üretimi.	53
Şekil 4.2. Strain-gage verilerini almak için kullanılan Testbox veri toplama cihazı.	56
Şekil 4.3. Hasarsız deney numunelerine yapıştırılan strain-gage'ler ve boruların patlatma test cihazına bağlanması.	57
Şekil 4.4. İç basınç sonucu ince cidarlı boruda oluşan gerilmeler.	58
Şekil 4.5. CTP kompozit boruların patlama testlerinde kullanılan aparatlar.	59
Şekil 4.6. CTP kompozit boruların patlama testinde kullanılan test düzeneği.	60
Şekil 4.7. Patlatma numunesinin optik mikroskopta incelenmesi.	61
Şekil 4.8. Halka çekme testi numuneleri; a) Halka çekme testinde kullanılan çekme aparatları b) Numunede açılan daraltılmış bölgeler c) Halka çekme testi için tasarlanan Ø72 deney numunesi.	63
Şekil 4.9. Halka çekme testinin uygulanışı; a) 100 kN kapasiteli SHIMADZU universal test cihazı, b) Test numuneleri, c) Montajı hazırlanmış test numunesi.	63
Şekil 4.10. İki düzlemsel çelik plaka arasına yerleştirilen basma numunesi.	64
Şekil 5.1. Farklı çaplardaki CTP borulara uygulanan yakma testi sonrasındaki görüntüler.	66
Şekil 5.2. Strain-gage deneyi; elde edilen microstrain-zaman grafiği ve numunelerde basınç artışıyla oluşan çap genişlemesinin şematik gösterimi.	67
Şekil 5.3. Farklı çaplardaki boruların iç basınç patlatma testi sonrası görüntüleri.	68

Şekil 5.4. CTP kompozit numunelerin patlatma testinde hasar gelişimi; çevresel gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve statik patlama testi sırasında görülen başlıca hasar modları.	70
Şekil 5.5. Ø54 CTP kompozit borularda patlatma testi sonrası makro hasar analizleri.	71
Şekil 5.6. Ø72 CTP kompozit borularda patlatma testi sonrası makro hasar analizleri.	72
Şekil 5.7. Ø96 CTP kompozit borularda patlatma testi sonrası makro hasar analizleri.	73
Şekil 5.8. CTP kompozit numunelerin statik patlama testi sonrası mikro hasar analizi.	74
Şekil 5.9. Ø54 CTP borunun patlatma testinde farklı gerilmelerdeki hasar gelişimi....	76
Şekil 5.10. Ø72 CTP borunun patlatma testinde farklı gerilmelerdeki hasar gelişimi...	77
Şekil 5.11. Ø96 CTP borunun patlatma testinde farklı gerilmelerdeki hasar gelişimi...	78
Şekil 5.12. Farklı çaplardaki numunelerin halka çekme deneyi sonuçları; a) Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, b) Halka çekme deney numuneleri, c) Gerilme, yüzde uzama ve statik tokluk grafikleri.	81
Şekil 5.13. Halka çekme testi sonrası farklı çaplardaki boruların karşılaştırılması.	83
Şekil 5.14. Optik mikroskopta tüm numuneler için çekilen mikro hasar görüntüleri. ...	84
Şekil 5.15. Yanal basma testi yapılan farklı çaplardaki deney numuneleri için grafikler; a) Kuvvet-deplasman grafiği, b) Yanal basma test numuneleri, c) Maximum kuvvet ve maximum kuvvette deplasman grafikleri.	87
Şekil 5.16. Yanal basma deneyi sonrası borularda oluşan hasarların iç ve dış görüntüleri.	90
Şekil 5.17. Ø54 CTP numunesi hasar gelişiminin kuvvet-deplasman eğrisi üzerinde gösterilmesi.	91
Şekil 5.18. Ø72 CTP numunesi hasar gelişiminin kuvvet-deplasman eğrisi üzerinde gösterilmesi.	92
Şekil 5.19. Ø96 CTP numunesi hasar gelişiminin kuvvet-deplasman eğrisi üzerinde gösterilmesi.	93
Şekil 5.20. CTP numunelerinin basma testi sonrası mikro hasar analizi.	95

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Epoksi döküm reçinesine ait karakteristik özellikler (23°C).....	27
Çizelge 3.2. E, S ve D camı elyaflarının özellikleri.	31
Çizelge 3.3. Bazalt, Karbon ve E-Cam elyafların mekanik özellikleri ve birim maliyetlerinin karşılaştırılmaları.	35
Çizelge 4.1. Kullanılan elyafın ve matrisin özellikleri.	54
Çizelge 5.1. Farklı çaplardaki serbest uçlu CTP boruların iç basınç deney sonuçları. ..	74
Çizelge 5.2. İşlenmiş verilerden elde edilen yüzde uzama, statik tokluk ve maksimum gerilme değerleri.	80



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

SİMGELER

Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum Oksit (Alümina)
L/D	Boy/Çap
T_g	Cam Geçiş Sıcaklığı
D/t	Çap/Et Kalınlığı
Br₂	Çevresel (Hoop) gerilme dayanımı
Θ	Elyafların Sarım Açısı
I₂	Eylemsizlik Momenti
E	Elastiklik Modülü
V_f	Fiber Hacimsel Oranı
GPa	Gigapascal
g/cm³	Gram/Santimetreküp
J	Joule
MPa	Megapascal
MN/m	Meganewton/Metre
MPa^{1/2}	Megapascal kök metre
m/s	Metre/Saniye
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
σ/ρ	Özgül Dayanım
ν	Poisson Oranı
T_m	Polimer Erime Sıcaklığı
SiC	Silisyum Dioksit
SiO₂	Silisyum Karbür
Ti	Titanyum
TiO₂	Titanyum Dioksit
ρ	Yoğunluk

KISALTMALAR

Al-MMK	Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society For Testing And Materials
AWWA	American Water Works Association
CAI	Hasar Sonrası Basma
CGG	Karbon, Cam, Cam
CCG	Karbon, Karbon, Cam
CNT	Karbon Nanotüp
CTP	Cam Takviyeli Polimer
CZM	Cohesive Zone Model
DGEBA	Bisfenol A Diglisidil Eteri
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
EMI	Elektromanyetik Girişim
ETP	Elyaf Takviyeli Polimer
FEA	Sonlu Eleman Analizi
FGM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
GCG	Cam, Karbon, Cam
ILSS	Tabakalar Arası Kayma Mukavemeti
KI	Gerilme Yoğunluk Faktörü
KIC	Görünür Kırılma Tokluğu
KTP	Karbon Takviyeli Polimer
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
PA	Poliamid
PAN	Poliakrilonitril
PE	Polietilen
PEI	Polietherimid
PEEK	Polieter Eter Keton
PLA	Polilaktik Asit
PMK	Polimer Matrisli Kompozitler
PP	Polipropilen
PPS	Polifenilen Sülfid
PVC	Polivinil Klorür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
SCC	Stress Corrosion Cracking
TGA	Termogravimetrik Analiz
UV	Ultraviole
XFEM	Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transferi

1. GİRİŞ

İnsanlar eski çağlardan beri artan ihtiyaçlarını karşılamak ve yeni şeyler üretmek için malzemelere ihtiyaç duymuştur. Eski Mısır'da insanlar barınma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla çamur ve samanı karıştırarak binalar inşa etmiş ve bu durum, yapay kompozit malzemelerin bilinen ilk örneği olarak literatüre geçmiştir. Geçtiğimiz yüzyılda teknolojik ve ekonomik gelişmeler sonucunda, geleneksel malzemelere alternatif olarak hafif ve yüksek mukavemetli malzeme arayışı kompozitlerin endüstriyel uygulamalarda geniş yer bulmasını sağlamıştır. Cam ve karbon elyaflar gibi yüksek performanslı takviye malzemelerinin geliştirilmesi, kimya endüstrisindeki ilerlemelerle eş zamanlı olarak sentetik matris reçinelerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Doğadan elde edilen reçinelerin yerine, 20. yy'ın ilk yarısında geliştirilen fenolik, vinil ve polyester gibi çok daha yüksek performans gösteren sentetik reçineler geliştirilmiştir. Üretim teknikleri ve hammaddeler üzerinde yapılan bu çalışmalar sonucunda, ilk fiberglass tekne 1940'lı yıllarda üretilmiş, bunu uçak pervanelerinin kompozit malzemelerden yapılması takip etmiştir. Günümüz endüstriyel uygulamalarında kompozit malzemelerin; havacılık, otomotiv ve biyomedikal endüstrileri başta olmak üzere çeşitli sektörlerde önemli ve vazgeçilmez bir unsur haline geldiği ve geleneksel malzemelere kıyasla üstün performans özellikleri sunduğu gözlemlenmektedir (Vinson ve Sierakowski, 2008).

Kompozit malzemeler, kendilerini oluşturan iki veya daha fazla farklı bileşenin (matris ve takviye) birleşmesiyle oluşan ve her bileşenin kendine has fiziksel/kimyasal özelliklerini taşıyan karmaşık malzemelerdir. Bu unsurların birleşimi sonucunda ortaya çıkan yeni malzeme, tek tek bileşen malzemelerinin özelliklerinden önemli ölçüde farklılaşmakla kalmaz, aynı zamanda daha üstün özellikler sergiler. Makro düzeyde üretilen kompozit malzemeler, yüksek özgül mukavemet, korozyon direnci ve düşük özgül ağırlık gibi üstün mekanik ve kimyasal özellikler sayesinde geleneksel malzemelere göre belirgin avantajlar sağlamaktadır. Sunduğu bu avantajlara ek olarak, kompozit malzemeler genellikle geleneksel malzemelere kıyasla daha düşük toplam maliyetli çözümler sunma eğiliminde olduğu için, çeşitli uygulamalarda sıkça tercih edilir. Bu tercih, malzemelerin optimize performans ile daha düşük kaynak harcamaları gerektirmesi sayesinde modern mühendislik ve imalat taleplerini karşılama yetenekleriyle açıklanabilir (Gemi vd., 2016; Rajak vd., 2021).

Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) borular, yüksek özgül mukavemet, hafiflik ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri sayesinde endüstriyel sıvı/gaz iletim hatlarında,

altyapı projelerinde ve çeşitli mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu boruların mekanik performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri de boru çapıdır. Çaptaki değişiklikler, darbe dayanımı, basınç altında deformasyon, mukavemet ve hasar türleri gibi temel mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Özellikle kurulum ve servis sırasında karşılaşılan düşük hızlı darbeler, boru duvarında gözle görülmeyen matris çatlağı, elyaf kırılması ve tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) gibi hasarlara neden olabilmektedir. Bu tür hasarlar, borunun servis ömrü boyunca beklenen dayanım değerlerini karşılayamamasına ve yapısal güvenlik risklerinin artmasına neden olabilmektedir (Gemi vd., 2021).

Boru çapı farkının CTP boruların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi hem deneysel hem de sayısal çalışmalarla incelenmiştir. Farklı çaplara sahip borular üzerinde yapılan düşük hızlı darbe testlerinde, çap arttıkça darbe etkisinin azaldığı ve hasarın daha çok tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) şeklinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Küçük çaplı borularda ise matris çatlağı, elyaf kırılması ve delaminasyon gibi birden fazla hasar türü bir arada görülebilmektedir. Bu durum, çap artışının darbe sonrası hasarın yayılım şeklini ve borunun nihai dayanımını değiştirdiğini göstermektedir (Gemi vd., 2021). Ayrıca, çap/et kalınlığı oranı (D/t) ve elyaf sarım açısı gibi geometrik ve yapısal parametreler de borunun basınç ve bükülmeye karşı dayanımını belirleyen önemli faktörlerdir. Sayısal modellemeler ve deneysel veriler, özellikle $(\pm 55^\circ)_3$ gibi belirli sarım açılarında ve uygun et kalınlığıyla, çap/et kalınlığı oranının basınç dayanımı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır (Sebeay ve Ahmed, 2023).

Kompozit borular, yüksek iç basınç yüklemesi altında görev yapacak şekilde tasarlandıkları için elyaf yönü, sarım düzeni ve malzeme seçimi gibi unsurların optimizasyonu büyük önem taşımakla birlikte; çap ve et kalınlığı etkisi tasarım ve hesaplamada temel olarak ele alınması gereken bir unsurdur. Aksi takdirde matris çatlağı, delaminasyon ve elyaf kırılması gibi hasarlar kaçınılmaz hale gelir. Bu hasarlar, mikro çatlakların birleşerek boru et kalınlığı boyunca ilerlemesiyle meydana gelir ve başlangıçta küçük olsalar bile özellikle yüksek iç basınç ve sıcaklık koşulları altında büyüyerek sızıntıya neden olmaktadır. Yüksek iç basınca maruz kalan çok katmanlı kompozitlerde, farklı yönelimli elyaf katmanları arasında delaminasyon sık gözlemlenir. Bu delaminasyonlar, açılma (Mode I) ve kayma (Mode II) kırılma modlarında ilerleyebilir ve nihai yük taşıma kapasitesini azaltır. Ayrıca, yorulma döngüleri sırasında öncelikle elyaf katmanları arasında matris mikroçatlakları oluşur; bunlar daha sonra delaminasyon ve elyaf kırılmasına dönüşerek yapıda ilerleyici deformasyona yol açar. Bu hasarlar

genellikle yapının tamamında gevrek kırılma kaynaklı ani bir yıkım yerine, kontrollü bir sızıntı şeklinde kendini gösterir. Bu erken uyarı davranışı, ani patlamayı önleyerek fail-safe (güvenli hasar) prensibini desteklediği için arzu edilen bir durumdur. CTP boruların çalışma mekanizmalarının düzgün olması ve bahsedilen olumlu özellikleri sağlaması, uygun bir yapısal tasarım ile birlikte mümkün olabilmekle birlikte, D/t etkisinin yapının işlevini koruması için gösterdiği etki gözardı edilemez.

Boru yüzeyinden içeriye olabilecek sıvı penetrasyonu, katmanlar arası kırılma ve kalınlık boyunca elyaflara paralel olacak şekilde çatlak ilerlemesi ve dolayısı ile kompozitin uzun periyotta dayanımını etkileyebilmektedir. Polimer kompozit borularda en sık gözlemlenen mikro yapı kusurları; katmanlar arası ve katman içi boşluklar (porozite), uniform olmayan elyaf dağılımı ve fiberlerin nominal sarım açısından (θ) sapması olarak tanımlanabilir. Kompozit borularda hasar oluşumu ve nihai performans, bahsi geçen mikro yapı kusurlarından önemli derecede etkilenmektedir. İlave olarak, elyaf-matris ara yüzeyi ve katmanlar arası bölge (lamineler arası bölge), hasar oluşumu ve kırılma başlangıcı mekanizmalarında oldukça belirleyici etkilere sahiptir (Mallick, 2007). CTP kompozit boruların bu hasar modları, üretim parametreleri ve kalitesi ile azaltılabileceği gibi temelde uygun yapı büyüklüğünün, yani ϕ ve D/t oranının doğru bir şekilde uygulanması mukavemetli bir tasarım elde edilmesini sağlar. Bu tezin inceleme konusu, farklı ϕ larda ve D/t oranlarındaki CTP boruların statik iç basınç patlatma, halka çekme ve yanal basma altındaki mekanik davranışlarını incelemektir. Bu incelemeler; rijitlik, nihai mukavemet, enerji sönmeme ve hasar modları açısından deneysel olarak ortaya koyulup, ϕ /et kalınlığı etkisi analiz edilerek ve performans iyileştirmelerine yönelik öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Cam elyaf takviyeli kompozit borular, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Literatürde bu tür boruların yorulma davranışı, düşük hızlı darbe altında enerji sönümleme kapasiteleri, eksenel ve yanal basma yükleri altındaki taşıma kapasiteleri üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Yorulma testleri genellikle boruların uzun vadeli performansını değerlendirirken, darbe testleri özellikle boruların dış etkenlere karşı dayanıklılığını ortaya koymaktadır. Eksenel ve radyal basma testleri, boruların saha koşullarında karşılaşılabileceği karmaşık yüklemeler altında davranışlarını belirlemede önemlidir. Bunun yanı sıra, elyaf hacim oranının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen yakma testleri de literatürde sıklıkla raporlanmış olup, mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Gemi (2014), filaman sarım yöntemiyle imal edilen hibrit kompozit borulara, ANSI/AWWA C950 standardı uyarınca iç basınç altında düşük hızlı darbe testleri uygulamış ve darbe hasarına maruz kalan boruların yorulma davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, farklı iç basınç seviyelerinde darbe hasarı oluşturulan boruların yorulma ömrü eğrileri elde edilmiş ve iç basınç kaynaklı ön gerilmenin darbe sonrası yorulma ömrüne etkisi değerlendirilmiştir.

Gemi vd. (2016), filaman sarım yöntemiyle $(\pm 55^\circ)_4$ sarım açılı fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FGM) tasarımında üretilen hibrit borulara düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Cam ve karbon elyaf kullanılarak üretilen FGM borulara, 4, 16 ve 32 bar iç basınç seviyelerinde 5, 10, 15 ve 20 J darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, FGM boruların düşük hızlı darbe davranışını ve darbe sonrası hasarını incelemiştir. Darbe hasarına maruz kalan boruların kalan mukavemetini belirlemek amacıyla, ASTM D 1599-99 standardına göre statik iç basınç patlama testleri yapılmıştır.

Gemi vd. (2018), filaman sarım yöntemiyle üretilen $\pm 45^\circ/\pm 55^\circ/\pm 75^\circ$ sarım açılı hibrit kompozit borulara, farklı iç basınç seviyelerinde 20 J enerjili düşük hızlı darbe testleri uygulamışlardır. Bu çalışma, iç basınç kaynaklı ön gerilmenin düşük hızlı darbe davranışına etkisini incelemektedir. Ön gerilme seviyesinin artmasıyla birlikte borularda oluşan çökme ve hasar miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Darbe hasarına maruz kalan borular, sabit bir gerilme altında yorulma testlerine tabi tutulmuştur. 24 MPa ön gerilme

değerinin üzerinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde, hibrit kompozit borunun hasarsızmış gibi davrandığı belirlenmiştir.

Gemi (2018), tarafından yapılan çalışmada, cam ve karbon elyafları kullanılarak üretilen hibrit borulara 32 bar iç basınç altında ön gerilme uygulanmış ve 5, 10, 15 ve 20 J darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Araştırma, ($\pm 55^\circ$)₃ sarım konfigürasyonunda üretilen CGG, GCG ve GGC istifleme dizilişlerine sahip kompozit borularda istifleme sırasının düşük hızlı darbe cevabına etkisini incelemiştir. Elde edilen bulgular, GCG istifleme sırasına sahip kompozit borunun, darbe cevabı ve hasar gelişimini yönetme açısından en iyi performansı sergilediğini göstermiştir.

Gemi vd. (2021), tarafından yürütülen çalışmada, filaman sarım tekniği ile üretilen farklı çaplardaki (Ø54, Ø72 ve Ø96 mm) CTP boruların düşük hızlı darbe davranışı ve bu darbelerin neden olduğu hasarlar deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma, darbe hızının artmasının temas kuvvetini ve süresini artırdığını göstermiştir. Darbe davranışları açısından, küçük çaplı boruların enerjiyi daha küçük bir hacimde absorbe etmesi nedeniyle daha ciddi ve çoklu hasar türlerine maruz kaldığı belirlenmiştir. Boru çapının artması ise darbe etkisini azaltmakta ve hasar türünün büyük ölçüde tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) şeklinde lokalize olmasına neden olmaktadır. CTP boruların, çap büyüdükçe darbe altında daha elastik ve esnek davranış sergilemesi, darbe enerjisinin yapısal hasara dönüşümünü azalttığı sonucunu desteklemektedir.

Gemi vd. (2021), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 54, 72 ve 96 mm çaplarında üretilen CTP borular, 1,5, 2, 2,5 ve 3 m/s gibi çeşitli hızlarda düşük hızlı darbelerle maruz bırakılmıştır. Ardından, oluşan hasarın basma dayanımına etkisini incelemek üzere Hasar Sonrası Basma CAI testleri uygulanmıştır. Aynı et kalınlığına sahip, farklı çaptaki CTP kompozit borular üzerinde yapılan bu deneysel çalışmada, düşük hızlı darbe sonrası makro ve mikro hasar analizleri optik mikroskop ve SEM ile detaylı olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma, darbe hızındaki artışın hasarın şiddetini ve dolayısıyla boruların basma dayanımındaki düşüşü artırdığını ortaya koymuştur. Öte yandan, boru çapındaki artışın darbe sonrası hasarın etkisini azalttığı ve bu durumun, hasarın büyük çaplı borularda daha lokalize olmasına bağlanabileceği belirtilmiştir. En belirleyici hasar türü olan delaminasyonun, CAI testleri sırasında lokal burkulmalarla birlikte yapının dayanımını düşürdüğü tespit edilmiştir. Sonuçlar, düşük hızlı darbelerin dahi CTP borularda ciddi yapısal bozulmalara yol açabileceğini göstermiştir. Çap büyüdükçe hasar lokalize olmakta ve borunun genel dayanımı daha iyi korunmaktadır. Büyük çaplı borularda hasar, esas olarak delaminasyon şeklinde gözlenirken; küçük çaplı

borularda daha karmaşık (çoklu) hasar türleri ortaya çıkmıştır. CAI testlerinin kompozit boruların dayanıklılığının değerlendirilmesinde kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır.

Kara (2012), doktora çalışmasında filaman sarım yöntemiyle üretilmiş, $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısına sahip E-cam/epoksi kompozit borular üzerinde 32 bar işletme basıncı altında 5, 10 ve 15 J enerji seviyelerinde darbe testleri gerçekleştirmiştir. Bulgular, ön gerilmeli CTP borularda uygulanan tüm düşük hızlı darbe testlerinde elyaf kopmasının meydana gelmediğini göstermiştir. Ayrıca, darbe alan ve almayan boruların iç basınca bağlı çap değişimlerinin birbirine eşdeğer olduğu belirlenmiştir.

Sathishkumar vd. (2018), kompozit malzemelerin mekanik, termal, tribolojik ve çevresel dayanım özelliklerini inceleyerek bu özelliklerin üretim yöntemi, elyaf oranı ve çevresel koşullar gibi parametrelerden nasıl etkilendiğini ortaya koymuştur. Çalışmada E-camı, C-camı ve S-camı türleri karşılaştırılmış; E-camının ekonomikliği ve yüksek çekme dayanımı nedeniyle en yaygın kullanılan cam elyaf türü olduğu vurgulanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, elyaf oranı CTP kompozitlerin performansını doğrudan etkileyen temel tasarım parametrelerinden biridir. Elyaf oranının artması, darbe dayanımının ve aşınma direncinin iyileşmesini sağlamaktadır. Ancak, elyaf oranının belirli bir sınırın üzerine çıkması durumunda, üretilebilirlik ve kırılma tokluğu açısından olumsuz etkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışma, optimum elyaf oranının belirlenmesi, uygun üretim yöntemlerinin seçimi ve uygulama koşullarına göre kompozit tasarımının optimize edilmesi konularında kapsamlı bir perspektif sunmaktadır.

Al-Shahrani (2013), CTP kompozit boruların farklı et kalınlıklarında düşük hızlı darbe yükleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Çalışmada, 4.5 mm ve 6 mm kalınlığa sahip numuneler ANSYS/LS-DYNA yazılımında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve 12, 35, 80 ve 110 Joule'lük darbe enerjileri altında gösterdikleri tepkiler analiz edilmiştir. Bulgular, darbe enerjisinin artmasıyla birlikte hasar türü ve şiddetinde belirgin değişimler meydana geldiğini ortaya koymuştur. Düşük enerji seviyelerinde (12 J ve 35 J) matris çatlaması ve sınırlı delaminasyon gibi hafif hasarlar gözlemlenirken, yüksek enerji seviyelerinde (80 J ve 110 J) elyaf kırılması ve tam katman ayrılması gibi ciddi yapısal hasarlar tespit edilmiştir. Et kalınlığının artmasının darbe dayanımını önemli ölçüde yükselttiği belirlenmiştir. Özellikle 6 mm kalınlıktaki borular, enerjiyi daha geniş bir alana yayarak absorbe etmiş ve yüksek enerjili çarpmalarda dahi tam delinmeye karşı direnç göstermiştir. Buna karşın, 4.5 mm kalınlıktaki ince borular daha kırılğan davranış sergilemiş ve 80 J üzerindeki enerjilerde delinmeye maruz kalmıştır. Darbe sonrası

deformasyon analizleri, kalın numunelerin belirli enerji düzeylerine kadar elastik toparlanma gösterebildiğini; ince numunelerde ise kalıcı deformasyonların oluştuğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, CTP boruların darbe altındaki mekanik davranışlarının hem darbe enerjisine hem de et kalınlığına doğrudan bağlı olduğu, bu ilişkinin özellikle petrol, doğalgaz ve kimyasal madde taşımacılığı gibi endüstriyel uygulamalarda güvenli tasarım açısından kritik önem taşıdığı vurgulanmıştır.

Sebaey (2019), petrol ve gaz sektöründe kullanılan hafif, korozyona dayanıklı ve optimize edilebilir kompozit boru tasarımlarına yönelik önemli bulgular sunmuştur. Çalışma, kompozit borularda filaman sarım açısının hem iç basınç dayanımı hem de darbe dayanıklılığı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Farklı sarım açılarına sahip, aynı boyutlardaki borulara uygulanan iç basınç testleri sonucunda, mukavemet ve sertlik özelliklerinin sarım açısına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre, en yüksek basınç dayanımı ve sertlik değerleri $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip CTP kompozit borularda elde edilmiştir. Ayrıca, düşük hızlı darbe testlerinde karışık açılı ($\pm 63/\pm 45/\pm 55$) sarıma sahip boruların darbe dayanımında üstün performans gösterdiği saptanmıştır. Çalışma, sarım açısının farklı çalışma koşullarına uygun boru tasarımlarında önemli bir esneklik sağladığını vurgulamaktadır.

Tarfaoui vd. (2007), cam/epoksi kompozit tüp yapıların darbe altındaki dinamik davranışını ve bu davranışın ölçek ve boyut etkilerine bağlı değişimini incelemiştir. Çalışmada, kalın cidarlı tüplerin özellikle denizaltı gibi zorlu ortam koşullarında kazara darbelere maruz kalabileceği, ancak bu etkilerin tasarım aşamasında çoğu zaman yeterince dikkate alınmadığı vurgulanmıştır. Araştırmacılar, darbe kaynaklı hasar türlerini hem statik hem de dinamik yükleme koşulları altında gözlemleyerek karşılaştırmıştır. Cam/epoksi malzemeden üretilmiş, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip farklı boyutlardaki silindirik numuneler kullanarak boyut analizleri gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, imalat parametrelerinin numunelerin fiziksel özellikleri ve hasar gelişimi üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermiştir. Ayrıca, ölçeklendirme kuralları ile yapılan modelleme sonuçlarının deneysel bulgularla güçlü bir uyum sergilediği belirlenmiştir.

Cheng vd. (2024), CTP kaburgalı (ribbed) boruların düşük hızlı darbelere karşı davranışını D/t oranı açısından incelemiş ve bu oranın yapısal performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. D/t oranı azaldıkça, yani boru çapı büyüyüp et kalınlığı azaldıkça, yerel burkulma ve deformasyon riskinin arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek D/t oranına sahip boruların darbe anında enerjiyi geniş bir alana

yaymakta yetersiz kaldığı, bunun sonucunda matris çatlaması, elyaf kırılması ve delaminasyon gibi hasar türlerinin daha erken ve yoğun biçimde geliştiği belirlenmiştir. Buna karşılık, düşük D/t oranına sahip, yani kalın cidarlı boruların darbe enerjisini daha etkin biçimde absorbe ederek yapısal bütünlüğünü daha uzun süre koruduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, CTP acil durum borularında darbe dayanımının artırılması için uygun D/t oranının seçimi kritik bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Zhou (1996), farklı kalınlıklardaki CTP laminatların (4, 6 ve 8 mm) düşük hızlı darbelere (5–30 J) maruz kalması sonucu oluşan hasar türlerinin (delaminasyon, matris çatlağı ve elyaf kırılması) artık sıkıştırma dayanımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışma, darbe sonrası meydana gelen delaminasyonun basınç dayanımını %30'a kadar azaltabildiğini ve bu etkinin özellikle ince cidarlı (yüksek D/t oranına sahip) numunelerde daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, kalın laminatların (düşük D/t oranı) darbe hasarına karşı daha dirençli olmasına rağmen, hasar oluştuğunda sıkıştırma dayanımındaki düşüşün daha belirgin olduğu saptanmıştır. Sonuç olarak, ince laminatlar daha düşük darbe enerjilerinde bile hasara karşı daha duyarlı olmakla birlikte, bu hasarın sıkıştırma dayanımına etkisi görece daha sınırlı kalmaktadır.

Perillo vd. (2015), 300 mm çapında ve 6 mm kalınlığında ($D/t \approx 50$) karbon elyaf takviyeli epoksi (KTP) basınçlı kaplar üzerinde düşük hızlı (2–50 J) darbe testleri gerçekleştirmiştir. Deneyler, ASTM D7136 standardına uygun olarak ağırlık düşürme yöntemiyle yapılmış; matris çatlaması, delaminasyon ve elyaf kırılması gibi hasar türleri Abaqus/Explicit yazılımı kullanılarak sayısal olarak modellenmiştir. Modelin, intralaminar (matris çatlaması ve elyaf hasarı) ile interlaminar (katmanlar arası ayrılma/delaminasyon) hasar mekanizmalarına dayandığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, farklı darbe konumları ve enerji seviyeleri için elde edilen yük-zaman eğrilerinin sayısal model aracılığıyla yüksek doğrulukla tahmin edilebildiğini göstermiştir. Darbe enerjisi arttıkça hasar alanı büyümüş ve patlama dayanımı %15–25 oranında azalmıştır. Daha ince cidarlı kaplarda (yüksek D/t oranı) darbe hasarı daha lokalize gerçekleşmiş, ancak gerilme yığılmaları nedeniyle patlama dayanımı kaybı daha belirgin hale gelmiştir. Sayısal model, deneysel bulgularla uyumlu olarak, 50 J darbe enerjisinde kalınlık boyunca çatlak ilerlemesi ve delaminasyon oluşumunu öngörmüştür. Kalınlık azaldıkça (yüksek D/t), darbe enerjisinin absorpsiyon kapasitesi düşmekte ve hasar daha kritik hale gelmektedir.

Kompozit boruların mekanik özelliklerini belirlemek için literatürde en yaygın kullanılan test yöntemleri arasında statik iç basınç altında patlatma testleri, halka çekme

testleri ve radyal basma testleri yer almaktadır. Statik iç basınç altında patlatma testleri, boruların kullanım ömrü boyunca maruz kalabileceği kritik koşulları simüle ederken; halka çekme testleri, özellikle çevresel (hoop) mukavemetin belirlenmesinde standart bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte radyal basma testleri, boruların dış yükler altındaki taşıma kapasitelerini ortaya koymakta ve gömülü boru hatlarının saha koşullarındaki davranışlarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Literatürde bu test yöntemleri için ASTM standartları detaylı bir şekilde tanımlanmış olup, araştırmacılar boruların mukavemet ve deformasyon özelliklerini bu standartlara uygun biçimde raporlamaktadır. Bu çerçevede, çalışmamızda üç farklı çapta üretilen kompozit borular üzerinde uygulanan testler, çap farklılığının mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Kompozit boruların mekanik davranışlarını doğru bir şekilde modellemek için, Poisson oranı ve gerinim değerlerinin hassas bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde strain-gage tabanlı ölçüm teknikleri, bu parametrelerin belirlenmesinde en güvenilir yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmalarda, eksenel ve radyal yönlerde yerleştirilen strain-gage'ler aracılığıyla elde edilen verilerden Poisson oranı hesaplanmış, bu sayede malzemenin anizotrop davranışı daha doğru şekilde tanımlanabilmektedir. Özellikle filaman sarım yöntemiyle üretilmiş borular üzerinde yapılan araştırmalarda, elyaf açısının ($\pm 55^\circ$ gibi) Poisson oranı ve gerinim dağılımları üzerinde doğrudan etkili olduğu belirtilmektedir. Bu bulgular, çalışmamızda yapılan statik iç basınç patlatma testlerindeki strain-gage ölçümlerinden elde edilen sonuçların literatürle uyumlu ve geçerli olduğunu göstermektedir.

Gemi (2004), çalışmasında çeşitli sarım açılarındaki CTP borular üzerinde statik iç basınç patlatma ve yorulma testleri uygulayarak sonuçlarını analiz etmiştir. Bu bağlamda, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ şeklindeki üç farklı açıda sarım yapılarak üretilen numunelerde, sarım açılarının patlama dayanımı ve yorulma ömrü üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Imes vd. (2018), çalışmalarında iki farklı CTP boru ve bağlantı grubunu incelemiştir. Vinil ester reçinesi ve E-cam elyafından filaman sarım yöntemiyle üretilen borulara halka çekme (Split Disc) ve statik iç basınç patlatma testleri uygulanmıştır. Elde edilen deneysel veriler, klasik laminasyon teorisine dayalı analitik modellerle karşılaştırılmış; böylece boruların iç basınca karşı ne zaman ve nasıl hasar alacağını öngörebilen güvenilir modeller geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma, elyaf oranının mekanik performans üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuş; yüksek elyaf

oranın özellikle iç basınç dayanımında kritik rol oynadığı belirlenmiştir. Elyaf oranının artmasıyla birlikte boruların elastik modülü ve mukavemet değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Hacimce %47,8 elyaf içeren örneklerde yüksek mukavemet değerleri elde edilmiş, boyuna ve çevresel yöndeki rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Elyaf oranının mekanik özelliklere katkısı, klasik laminasyon teorisi ile doğrulanmıştır.

Arıkan (2010), $(\pm 55^\circ)_3$ sarım açısına sahip E-cam/epoksi CTP boruların eğik (açılı) yüzey çatlağı durumundaki hasar davranışını deneysel olarak incelemiştir. Açık uçlu borular üzerinde yapılan deneylerde, antisimetrik altı katmandan oluşan numuneler yedi farklı çatlak açısında (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) test edilmiştir. Sonuçlar, boruların patlama dayanımının çatlak yönüne güçlü şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. En düşük dayanım, çatlak çevresel doğrultuya paralel olduğunda (90°), en yüksek dayanım ise 0° ve 15° çatlak açılarında elde edilmiştir. Hasar süreci genellikle matris çatlamasıyla başlamakta, ardından elyaf-matris ara yüzey ayrılması ve elyaf kırılmasıyla devam etmekte ve çatlak bölgesinden ani sızıntı ile sonuçlanmaktadır. Çatlak açısı arttıkça, özellikle çevresel yöne yaklaştığında, borunun yapısal bütünlüğü belirgin şekilde azalmaktadır. Ayrıca, sarım açısındaki artışın yorulma ömrünü ve çatlak dayanımını artırarak çatlak boyunu azalttığı belirlenmiştir. Bu çalışma, kompozit boru tasarımında çatlak yönelimlerinin dikkate alınmasının gerekliliğini açıkça ortaya koymuştur.

Bai vd. (1997), $\pm 55^\circ$ filaman sarımlı cam/epoksi kompozit tüplerin mikromekanik düzeyde hasar başlama (damage initiation) mekanizmalarını incelemiştir. Çalışmada, iç basınç altındaki kompozit borularda hasarın nasıl ve nerede başladığı araştırılmış, farklı mikromekanik hasar türlerinin (ara yüzey hasarı, gözenek içi mikroçatlama) oluşum sırası ve etkileşimleri modellenmiştir. Geliştirilen mikromekanik model, kritik gerilme oranlarını tanımlayarak belirli koşullarda hangi hasar mekanizmasının baskın olacağını öngörebilmektedir. Sonuçlar, elyaf bölgelerinde mikroçatlakların elyaf-matris ara yüzeyinin ayrılmasını takiben geliştiğini, elyaf bulunmayan bölgelerde ise çekme yönüne dik şekilde oluştuğunu göstermiştir.

Prabhakar vd. (2019), ETP boruların patlama basıncı altındaki performansını farklı sarım açıları, malzeme türleri ve katman yapılarına göre karşılaştırmıştır. İnce cidarlı boruların eksenel yükler altındaki burkulma eğilimlerini boy/çap oranı ve rijitlik parametreleriyle ilişkilendirmiştir. Çalışmada, patlama analizi ile matris çatlaması ve kırılma mekanizmaları açısından ideal sarım açısının $\pm 55^\circ$ olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ETP yapılar, metalik muadillerine kıyasla daha yüksek korozyon direnci gösterdiğinden, denizcilik, kimya ve petrol-doğalgaz gibi sektörlerde tercih edilmektedir.

Önder vd. (2009), kapalı uç koşullarında gerçekleştirdikleri deneysel patlama testleriyle gerçek kullanım senaryolarını simüle etmişlerdir. E-glass/epoksi malzemesinden üretilen kompozit borular üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, ANSYS 10.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sonlu eleman analizi (FEA) sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve iki yöntem arasında yüksek uyum gözlenmiştir. Çalışma ayrıca sıcaklık ve sarım açısı gibi çevresel ve geometrik parametrelerin patlama davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneylerde, 45°, 55°, 60°, 75° ve 88° sarım açlarına sahip, simetrik ve asimetrik olarak sarılmış borular kullanılmıştır. Sonuçlar, sarım açısının patlama dayanımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu, özellikle $\pm 55^\circ$ gibi orta açılı konfigürasyonların eksenel ve çevresel gerilmeleri dengeleyerek daha yüksek basınç dayanımı sağladığını göstermiştir. Kompozit basınç kaplarının optimum dayanımı için fiber sarım açısının doğru seçiminin kritik olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, bu tür kapların yüksek basınçlı uygulamalarda kullanılmadan önce patlama testlerinden geçirilmesi gerektiği ve sayısal modelleme yöntemlerinin tasarım optimizasyonuna önemli katkı sağladığı belirtilmiştir. Gerilme dağılımları ve kırılma bölgeleri, sonlu elemanlar analizleriyle incelenmiş ve elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışma, özellikle basınçlı kap tasarımı, boru hattı mühendisliği, havacılık ve savunma alanlarında kullanılan CTP yapıların patlama sınırı analizinin kritik önem taşıdığını ortaya koymuştur.

Wang vd. (1997), iç basınç ve eksenel yükleme altındaki CTP boruların uzun vadeli sızıntı hasarlarını incelemiş ve ASTM D2992-91 standardına göre uygulanan gerilmeleri hesaplamıştır. Uzun süreli yükleme koşullarında, laminat yapı içerisinde mikroçatlaklar ve katmanlar arası ayrılmalar (delaminasyon) oluşarak sızıntıya neden olmaktadır. Deneysel sonuçlar, sızıntı sürecinin genellikle yüzeyin ıslanmasıyla başladığını ve bunun zamanla artan hasar düzeyine işaret ettiğini göstermiştir. Çalışma, hasarın içten dışa doğru ilerlediğini ve bu sürecin öngörülmesinin kompozit boruların servis ömrü açısından kritik önem taşıdığını ortaya koymuştur.

Bakaiyan vd. (2009), çok katmanlı filaman sarımlı kompozit boruların iç basınç ve termomekanik yükleme altındaki davranışlarını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı sarım açlarına ($\pm 55^\circ$, $\pm 65^\circ$, $\pm 75^\circ$) ve katman sayılarına sahip borular iç basınç ve termal yüklere maruz bırakılmış, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, sıcaklık değişimlerinin özellikle borunun iç katmanlarında belirgin termal gerilmeler oluşturduğunu göstermiştir. Bu termal etkiler mekanik basınçla birleştğinde toplam gerilme dağılımı genişlemekte ve hasar oluşma riski artmaktadır.

Katman sayısının artması genel dayanımı yükseltirken, termal gerilmelerin iç katmanlarda yoğunlaşması malzeme bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, fiber sarım açısının da önemli bir parametre olduğu belirlenmiş; açının artması eksenel dayanımı artırırken çevresel dayanımı azaltmaktadır. Bu çalışma, klasik iç basınç testlerinden farklı olarak kompozit yapıların termomekanik koşullar altındaki davranışlarını ortaya koymuştur.

Zheng vd. (2015), kompozit basınçlı tankların iç patlama yükleri (blast loading) altında maruz kaldıkları delaminasyon hasarlarını incelemiştir. Çalışma, patlama kaynaklı dinamik basıncın kompozit basınçlı kaplarda oluşturduğu delaminasyon davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak ortaya koymuştur. Alüminyum astarlı E-cam/epoksi tanklar üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, farklı büyüklüklerdeki patlayıcı yüklerin çeşitli delaminasyon türlerine yol açtığı belirlenmiştir. İç patlama, kısa süreli ancak yüksek enerjili bir yükleme türü olduğundan, yüklemelerin tanımlanmasında dinamik yükleme teorisi kullanılmıştır. Sayısal analizler sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve patlama enerjisinin yapısal davranış üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Katmanlar arası etkileşimi modellemek için Cohesive Zone Model (CZM) yaklaşımı uygulanmıştır. Sonuçlar, iç patlama sırasında oluşan şok dalgalarının özellikle iç yüzeylerde ani basınç artışına neden olduğunu, bunun da yüksek gerilme gradyanları oluşturarak yapının merkezine doğru ilerleyen delaminasyon çatlaklarını tetiklediğini göstermiştir. Fiber yönüne dik doğrultuda ve katman sınırlarında yoğunlaşan gerilmelerin, katmanlar arası ayrılmayı hızlandığı; ayrıca yapının yeterli bağ dayanımına sahip olmaması durumunda kısa sürede çok sayıda küçük delaminasyon bölgesi meydana geldiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, katmanlar arası bağ dayanımı (interlaminar strength) patlama yükleri altındaki performans açısından kritik bir parametre olarak belirlenmiştir.

Martins vd. (2012), filaman sarımlı cam/epoksi kompozit tüplerin hem yapısal (tam kırılma) hem de fonksiyonel (işlev kaybı) hasar sınırlarını inceleyerek, bu iki kritik basınç değeri arasındaki farkı deneysel ve teorik olarak ortaya koymuştur. E-cam/epoksi malzemeden üretilen $(\pm 45^\circ)_4$, $(\pm 55^\circ)_4$, $(\pm 60^\circ)_4$ ve $(\pm 75^\circ)_4$ sarım açılı ve farklı kalınlıklardaki kompozit tüpler, iç basınç testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, fiber yönelimi ve katmanlama düzeninin basınca karşı dayanımı önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. $\pm 75^\circ$ sarım açısına sahip numunelerde, patlama öncesinde yüzeyde terleme ve sızıntı hasarının meydana geldiği, ardından akışkan jetinin oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca, PVC kaplama uygulanmış numunelerde yapılan deneyler,

kaplamanın genel yapısal dayanım üzerinde sınırlı etkisinin bulunduğunu; ancak delaminasyon ilerlemesini yavaşlatarak hasarın yayılımını kısmen kontrol altına aldığını ortaya koymuştur.

Roy ve Tsai (1988), kalın cidarlı kompozit silindirlerin tasarımına yönelik kapsamlı bir teorik analiz gerçekleştirmiştir. Araştırmacılar, konvansiyonel ince cidarlı silindir teorilerinin kalın kompozit yapılarda yetersiz kaldığını belirterek, kalınlık boyunca gerilme dağılımını dikkate alan geliştirilmiş bir model önermiştir. İç ve dış basınç ile aksel yüküne maruz kalan açık uçlu silindirler ve basınçlı kaplar için geliştirilen bu analiz, genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirme durumundaki silindirleri kapsamaktadır. Hem ince hem de kalın silindirlerde, deneysel sonuçların indirgenmiş modellerle hesaplanan patlama basınçlarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, kalın silindirlerde tabaka sıralamasının önemli bir tasarım parametresi olduğunu ve iç basınca maruz kalan yapılarda radyal gerilmelerin ihmal edilemeyecek düzeyde etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, farklı sarım açıları ve katman dizilimlerinin gerilme dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiş; özellikle ± 0 yönlü simetrik sarımların gerilme birikimini azaltmada daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, belirli koşullarda çevresel (hoop) yönlü fiber ağırlıklı sarımların aksel dayanımı sınırlayabileceği, bu nedenle yükleme türüne göre optimize edilmiş laminat tasarımının gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Hull vd. (1978), cam elyaf takviyeli polyester kompozit malzemeden üretilmiş filaman sarımlı boruların mekanik davranışını incelemişlerdir. Çalışma, bu tür boruların basınç altında maruz kaldığı hasar mekanizmalarını ve kırılma nedenlerini deneysel olarak ortaya koymuştur. Araştırmacılar, farklı sarım açıları ve yükleme koşullarının boru dayanımı üzerindeki etkilerini analiz ederek tipik kırılma türlerini sınıflandırmıştır. Bu kapsamda $\pm 55^\circ$ ve $\pm 65^\circ$ sarım açılarına sahip kompozit borular, kapalı ve açık uçlu hidrostatik basınç testleri altında değerlendirilmiştir. Sonuçlar, $\pm 55^\circ$ sarım açısında daha dengeli bir yük dağılımı ancak düşük basınç dayanımı; $\pm 65^\circ$ sarım açısında ise daha yüksek aksel dayanım ve ani hasar ilerlemesi olduğunu göstermiştir. Açık uçlu testlerde reçine hasarı baskınken, kapalı uçlu testlerde geniş ölçekli elyaf kırılmasıyla sonuçlanan patlama tipi bir hasar gözlenmiştir. Kapalı uçlu deneylerde reçine davranışının doğrusal olmayan bir gerilme tepkisi oluşturduğu ve yüksek basınçlarda fiber-reçine ayrılmasına benzer bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Farklı hasar türlerine karşılık gelen gerilme seviyeleri ölçülmüş ve sonuçların literatürdeki mevcut teorik yaklaşımlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, kompozit boruların iç basınca karşı dayanımının fiber oryantasyonu ile fiber-reçine etkileşimine bağlı olduğunu ve kırılma

davranışının yalnızca fiber mukavemetiyle açıklanamayacak karmaşık bir hasar ilerlemesi süreci içerdiğini ortaya koymaktadır.

Richard ve Perreux (2000), tabakalı kompozit boruların iç basınca karşı dayanımını güvenilirlik temelli yaklaşımlar kullanarak optimize etmeye yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmalarında $\pm\theta$ açılarla sarılmış elyaf takviyeli yapıların analizini yaparak farklı sarım açılarına bağlı performans değişimlerini değerlendirmişlerdir. Sekiz farklı güvenilirlik yaklaşımını temel alan hasar dayanımı optimizasyon modeli, olası hasar türlerinin öngörülmesini ve malzeme performansının daha güvenilir biçimde belirlenmesini sağlamıştır. Araştırma, yapısal kompozit tasarımında güvenilirlik esaslı optimizasyonun önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, iç basınç altındaki filaman sarımlı CTP borular üzerinde yapılan incelemelerde, sızıntı hasarının boru yüzeyinde oluşan nemlenme ile başladığı tespit edilmiştir.

Jones ve Hull (1979), filaman sarımlı kompozit borularda iç basınca bağlı hasar mekanizmalarını mikroskobik düzeyde incelemiştir. Gözlemler, borular patlama basıncına yaklaştığında elyaf yönüne paralel gelişen radyal çatlakların, katmanlar arasındaki elyaf kesişimlerinde sızıntı yolları oluşturduğunu göstermiştir. Bu çatlakların boru boyunca ilerleyerek dış yüzeyde sıvı sızıntısına yol açtığı belirlenmiştir. Çalışma, söz konusu mekanizmanın özellikle sarım açısının artmasıyla daha belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur.

Tarakçıoğlu (1992), doktora çalışmasında yüzey çatlaklı ve çatlaksız cam/epoksi CTP borular üzerinde sarım açısının etkilerini kapsamlı biçimde incelemiştir. Deneysel sonuçlar, belirli sarım açıları için boruların dayanımında anlamlı farklılıklar oluştuğunu ortaya koymuştur. Yüzey çatlağı bulunan numunelerde hasar davranışının daha erken aşamada ve belirgin şekilde geliştiği gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, sarım parametrelerinin boru yapısal bütünlüğü üzerindeki kritik önemini ortaya koymaktadır.

Salavatian ve Smith (2012), farklı sarım açılarında üretilen KTP kompozit silindirlerin iç basınç altındaki davranışlarını incelemiş ve matris-reçine yoğun kapalı uçlu borularda meydana gelen hasar modlarını belirlemiştir. Deneysel çalışmada $\pm 40^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 60^\circ$ sarım açılarına sahip numuneler kullanılmıştır. Fiberlerin aksel veya çevresel yerine eğik açılarla sarılması, yük taşıma mekanizmasını değiştirerek özellikle matris-reçine bölgelerinde yoğun kayma gerilmeleri oluşturmuş ve çatlak başlangıcını kolaylaştırmıştır. Kayma hasarı, $\pm 50^\circ$ ve altındaki elyaf açılarında baskınken; enine hasar modu $\pm 55^\circ$ ve üzerindeki açılarda gözlenmiştir. Hasar ilerledikçe enine ve kayma yönlerindeki elastik modüllerde azalma meydana gelmiş ve bu değişim

deneysel olarak elde edilen fonksiyonlarla modellenmiştir. Sonuç olarak, $\pm 50^\circ$ 'nin altındaki sarım açılarında delaminasyon, $\pm 55^\circ$ ve üzerindeki açılarda ise elyaf yüklenmesinin artmasıyla elyaf kırılması hasar modu baskın hale gelmiştir.

Meijer vd. (2008), kapalı uçlu $(\pm 60)_3$ filaman sarımlı CTP borularda eksenel ve teğetsel gerilme oranları altında dayanımı patlatma testleriyle sistematik olarak inceleyerek bir başarısızlık zarfı (failure envelope) oluşturmuştur. Bu zarf, eksenel ve çevresel (hoop) gerilmelerin kombinasyonlarına karşı kırılma sınırlarını tanımlar. Gözlemler, eksenel gerilmede helisel çatlakların; teğetsel gerilmede patlatma hasarının ve teğetsel gerilme arttıkça akışkan jeti biçiminde hasarların oluştuğunu göstermiştir. $(\pm 60)_3$ sarım, eksenel-çevresel yüklerin eş zamanlı taşınmasında etkin olmakla birlikte, belirli yükleme modlarında matris çatlaması ve fiber kayması gibi karmaşık hasar mekanizmalarını tetikleyebilmektedir. Hasar genellikle mikroskobik ölçekte matris çatlağıyla başlayıp fiber/matris arayüzünde zayıflama eşliğinde ilerleyen kırılmalara evrilmektedir.

Tarakçıoğlu vd. (2001), $(\pm 45)_3$, $(\pm 55)_3$ ve $(\pm 75)_3$ filaman sarımlı CTP borularda farklı oranlarda yüzey çatlakları oluşturarak statik iç basınç (patlatma) testleri gerçekleştirmiş; çatlaklı ve çatlaksız numuneleri karşılaştırmıştır. Çeşitli basınç seviyelerinde hasar evrimi izlenmiş ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Bulgular, elyaf yönüne dik yerleşen yüzey çatlaklarının genel dayanımı belirgin biçimde düşürdüğünü; hasarın matris çatlaklarıyla başlayıp elyaf/matris arayüzünden ilerlediğini ve delaminasyonla birleşerek ani kırılmaya yol açtığını göstermiştir. Elyaf yönelimi çatlak yayılımını etkilemiş; $\pm 55^\circ$ simetrik sarımlar ilerlemeyi kısmen yavaşlatmıştır. $\pm 45^\circ$ sarımlı borularda çatlaklı numunelerin davranışı çatlaksızlara yakın seyrederken, $\pm 55^\circ$ 'de çatlak uçlarında belirgin delaminasyon gözlenmiştir. Ayrıca $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açılarında çatlak oranı arttıkça çevresel (teğetsel) dayanımda artış rapor edilmiştir. Çalışma, malzeme seçiminin tek başına yeterli olmadığını; çatlak toleransı ile sarım konfigürasyonunun birlikte optimize edilmesi ve yüzey hasarlarının tasarım sürecine entegre edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Yao vd. (1989), yüksek iç basınç altında çalışan kalın cidarlı CTP/çelik birleşik boruların optimum tasarımını ele almış; toplam cidar kalınlığı, CTP dış katman kalınlığı ve cam elyaf sarım açısını tasarım değişkenleri olarak içeren bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Amaç fonksiyonu, birim uzunluk başına malzeme maliyetini en aza indirirken; çelikte gerilme sınırının aşılmasında ve CTP'de deformasyonun limitler içinde kalması kısıtları uygulanmıştır. Sonuçlar, iç basınç dayanımının D/t oranının 18-26

aralığında en yüksek olduğunu göstermiştir. D/t arttıkça (ince cidar), tabakalar arası gerilme dağılımı farklılaşmakta, deformasyon artmakta ve özellikle CTP katmanda elastik sınırın aşılma riski yükselmektedir; bu nedenle düşük D/t daha güvenli tasarımlar sunar. Yeterli kalınlıkta CTP dış katman ve uygun sarım açısı iç basınca karşı taşıma kapasitesini artırırken, cidarın kalınlaştırılması mukavemeti yükseltmekle birlikte maliyeti de artırır; bu bağlamda optimal kalınlık, mukavemet–maliyet dengesiyle belirlenmiştir.

Han ve Chang (2015), Tip III hidrojen basınçlı tankların yüksekte düşmeye benzer beklenmedik darbeler altındaki hasarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Metal iç astarlı ve karbon/epoksi filaman sarımlı tank üzerinde düşük hızlı darbe (488 J) ve patlatma deneyleri uygulanmış; yapısal dayanım, katman-bazlı sonlu elemanlar modeliyle her katmandaki gerilme dağılımı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Deneysel koşullarda otofrettaj (autofrettage) basıncı 107 MPa, servis basıncı 70 MPa'dır. Hasar değerlendirmesi Hashin ölçütleriyle yapılmış; bazı katmanlarda delaminasyon ve matris hasarı gözlenmiştir. Genel sonuç, darbe sonrası tankın servis koşullarında güvenli kaldığı yönündedir.

Martens vd. (2000), $\pm 66^\circ$ ve 0° yönlü cam elyaf katmanlarından oluşan çok yönlü filaman sarımlı borularda iki eksenli monotonik yükleme altında yapısal bütünlük, rijitlik ve sızıntı davranışını incelemiştir. Testler boyunca aksiyel ve çevresel rijitlik ile Poisson oranı izlenmiş; çevresel–eksenel gerilme durumlarında sızıntı başlangıcıyla eşzamanlı rijitlik düşüşleri, iç yapısal bozulmanın göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, sızıntı başlangıcındaki matris hasarlarının ilerleyen süreçte makro çatlaklara dönüştüğünü göstermiştir. Poisson oranındaki değişim, yük oranından bağımsız güvenilir bir hasar belirteci olarak önerilmiştir.

Imes vd. (2024), filaman sarım ve pultrüzyonla üretilmiş 150 ve 250 mm çaplı kompozit boruların performansını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Hidrostatik iç basınç testleri, çap artışının dayanımı sınırlayan başlıca etken olduğunu göstermiş; özellikle büyük çaplarda ek/bağlantı bölgeleri yapısal bütünlük açısından kritik zayıf noktalar olarak belirlenmiştir.

Betts vd. (2021), 76 ve 203 mm iç çapa sahip toplam 15 adet CTP borunun dört noktalı eğilme altındaki davranışını incelemiştir. Et kalınlığı 1,7-6,7 mm aralığında ($D/t = 20-75$) değişen borular, üreticiden 350, 700 ve 1050 kPa nominal iç basınç sınıflarında temin edilmiş; her grupta üçer numune test edilerek yük–sehim verileri kaydedilmiştir. Kalın cidarlı (düşük D/t) borular daha yüksek yük kapasitesi göstermiş; 76 mm çaplı

borularda D/t düşürüldüğünde kapasite %132'ye, 203 mm çaplı borularda ise %205'e kadar artmıştır. Model tabanlı parametrik analiz, D/t arttıkça yük kapasitesi ile post-peak dayanımın azaldığını; L/D oranının kapasite ve rijitliği etkilediğini ancak post-peak davranış üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular doğrultusunda geliştirilen moment kapasitesi bağıntısı, tasarımda pratik bir kullanım önermektedir.

Sebeay ve Ahmed (2023), CTP kompozit boruların hidrostatik iç basınç altındaki davranışını sayısal olarak incelemiştir. Sarım açıları $\pm 40^\circ$ ve $\pm 70^\circ$, kalınlıkları 3.78–5.1 mm olan, 110–660 mm uzunluk aralıklarındaki borulara sabit iç basınç uygulanarak gerilme dağılımları, hasar evrimi ve dayanım kapasiteleri analiz edilmiştir. Dayanım, sarım açısı $\pm 55^\circ$ 'ye kadar artmış, bu açıda elyafların çevresel ve eksenel yükleri birlikte taşıması sayesinde en yüksek iç basınç kapasitesi elde edilmiştir; daha büyük açılarda elyaf hizalanmasının bozulmasıyla kapasite azalmıştır. Çap/kalınlık oranı (D/t) arttıkça patlama basıncı düşmüş; aynı kalınlıkta çap büyüdükçe dayanımın azalması ve hasar riskinin artması gözlenmiştir. Sonuçlar, basınca dayanımda sarım açısı ve cidar kalınlığının belirleyici olduğunu ve uygun D/t seçiminin kritik önem taşıdığını göstermektedir.

Demirci vd. (2017), split-disk (yarıklı disk) yöntemiyle SiO_2 nanoparçacıklarıyla güçlendirilmiş bazalt/epoksi filaman sarımlı kompozit halkaların Mode I kırılma tokluğunu incelemiştir. $(\pm 55)_6$ sarım açısına sahip halka numuneleri dolgunsuz ve ağırlıkça %4 SiO_2 dolgulu olarak üretilmiş; Mode I kırılma tokluğu, halka çekme dayanımı ve gerinim değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. %4 SiO_2 ilavesi, Mode I kırılma tokluğunu %43–50 oranında artırmış; bu artış, çatlak ucunda enerji emiliminin yükselmesi ve mikro ölçekte çatallanma (crack branching) mekanizmalarıyla açıklanmıştır. Bulgular, nanoparçacık katkısı ile sarım yapısının çatlak ilerlemesi üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir.

Chekalkin vd. (2003), kimyasal ve selüloz hatları gibi endüstriyel ortamlarda uzun süre kullanılan CTP borularda dayanım süresini incelemiştir. 215 mm çap ve 6 mm cidarlı boruların 70°C ve 0.6 MPa koşullarında 5 yıllık servis sonrası mikroyapı ve mekanik özellikleri değerlendirilmiş; katmanlar arası ayrışma, mikroçatlaklar, delaminasyon ve arayüz bağında bozulma gözlenmiştir. Servis sonrası mekanik testler rijitlik ve mukavemette belirgin düşüş ortaya koymuştur. 8 m uzunluk ve 215 mm çaptaki borular, Timoshenko kabuk teorisi ve sıcaklığa duyarlı çift modüllü elastik modelle simüle edilmiş; simülasyonlar deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Liu vd. (2024), farklı çaplardaki (10, 12, 25 mm) CTP donatı çubuklarının çekme davranışını deneysel olarak incelemiştir. Çekme testlerinden gerilme-gerinim eğrileri, maksimum çekme dayanımı, elastik modül ve kopma uzaması elde edilmiş; boyut etkisi Weibull dağılımı ve en zayıf halka (weakest link) teorisiyle istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, çap arttıkça çekme dayanımının azaldığını, elastik modülün arttığını ve kopma uzamasının düştüğünü (daha kırılğan davranış) göstermiştir. Standart testler için numune uzunluğunun çapın 30–40 katı olması önerilmiş ve teorik modellerin dayanım tahmininde uygulanabilir olduğu doğrulanmıştır. Özellikle büyük çaplarda düşük kopma uzaması nedeniyle tasarım ve üretimde dikkat gerekmektedir.

Li vd. (2016), CTP dış tüp, çelik iç tüp ve beton çekirdekten oluşan kolonlarının eksenel basınç altındaki mekanik davranışını ve boyut etkisini deneysel ve sonlu elemanlar analizleriyle incelemiştir. Örnek boyutu arttıkça taşıma kapasitesi artmış; buna karşın maksimum gerilme belirgin biçimde azalmış ve gerilme-gerinim eğrileri daha yatık, uzun bir karakter kazanmıştır. Bu durum, artan boyutla birlikte deformasyon direncinin ve sünekliğin zayıfladığını göstermektedir. CTP boru duvar kalınlığının artırılması deformasyon direncini kısmen yükseltse de örnek boyutu büyüdükçe bu olumlu etkinin azaldığı gözlenmiştir. Farklı çaplardaki hibrit kolonlarda küçük çaplı elemanlar daha yüksek deformasyon dayanımı sergilemiş; beton dayanımı arttıkça çap (boyut) etkisi zayıflamıştır.

Li vd. (2017), CTP iç tüp–beton çekirdek–çelik dış kılıftan oluşan kompozit kolonların eksenel basınç altındaki mekanik performansını boyut etkisi bağlamında incelemiştir. Yüksek dayanım/düşük ağırlık avantajları nedeniyle bu hibrit sistemler alternatif taşıyıcılar olarak değerlendirilmiştir. Farklı çap ve boy/çap oranlarına sahip numuneler üzerinde yapılan deneyler, içteki CTP tüpün betonun dağılmasını geciktirerek kırılma sünekliğini artırdığını; ancak etkinin çap büyüdükçe görece azaldığını göstermiştir. Sayısal modelleme sonuçları deneysel bulguları desteklemiştir. Bulgular, sistemin mühendislik uygulamalarına uygun olduğunu, ancak büyük boyutlarda performans marjlarının azaldığını ve güvenlik katsayılarının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Li vd. (2020), alüminyum, CTP ve KTP dairesel tüplerde D/t oranının 10,78–48,02 aralığında ezilme davranışını deneysel olarak nicellemiş; kuvvet-yer değiştirme eğrileri, deformasyon geçmişleri ve ezilme kuvvetini değerlendirmiştir. Bulgular, D/t arttıkça maksimum yük, enerji emilimi ve özgül enerji emiliminin azaldığını göstermiştir. Düşük D/t (kalın cidar) tüpler daha yüksek çarpışma/ezilme dayanımı ve daha kontrollü hasar

modları sergilerken, yüksek D/t (ince cidar) tüplerde ani çatlak başlatma, delaminasyon ve cidar kıvrılması gibi düzensiz hasarlar gözlenmiştir. CTP tüpler KTP'ye göre marjinal üstünlük gösterirken, sünek davranışı nedeniyle alüminyum tüpler kompozitlere kıyasla belirgin biçimde daha iyi performans sunmuş; bu üstünlük D/t arttıkça artmıştır. Kalın cidarlı yapılarda hasarın yayılı ve yavaş ilerlemesi, enerjinin daha etkin soğurulmasına; ince cidarlılarda ise yetersiz sönümleme nedeniyle erken kırılmaya yol açmıştır.

Srikan vd. (2023), çap ve cidar kalınlığı değişen silindirik CTP borular üreterek, epoksi matrise %5, %10 ve %15 cam pul (glass flakes) ilavesinin aksel basma davranışı ve kırılma yükü üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Düşük katkı oranlarında gevrek kırılma baskınken, katkı arttıkça matriste çatlak ilerlemesi zorlaşmış ve daha sünek kırılma gözlenmiştir. Yanal basma testlerinde, %5–%15 cam pul katkılı borularda cidar kalınlığı arttıkça yanal yük taşıma kapasitesi belirgin şekilde artmıştır. Bulgular, cam pul katkısının hasar evrimi ve kırılma modunu etkilediğini; kalınlığın ise yanal taşıma kapasitesinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Yazdani vd. (2009), ince cidarlı CTP silindirik kabukların aksel yük altındaki burkulma davranışını deneysel olarak incelemiştir. Özel tasarım bir filaman sarma makinesiyle takviyesiz ve lozenge, üçgen ve altıgen ızgara takviyeli numuneler üretilmiş; ASTM D6641'e uygun olarak 1,3 mm/dk hızda aksel sıkıştırma testleri uygulanmıştır. Bulgular, özellikle çok ince cidarlı (yüksek D/t) durumlarda, takviyesiz kabukların özgül burkulma yükü (yük/kütle) açısından ızgara takviyelilere kıyasla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Abdellah vd. (2021), iç basınç altındaki CTP borularda çatlakların gerilme yoğunluk faktörü (KI) ve çevresel gerilme (hoop stress) üzerindeki etkisini XFEM ile incelemiştir. 520.7 mm çap, 13 mm kalınlık ($D/t \approx 40$) için çatlağı olmayan silindirlerde çevresel gerilme 300.4 MPa, çatlaklılarda ise 30,2–48,5 MPa olarak hesaplanmıştır. Artan a/t oranı 0.2-0.8 aralığına ulaşınca KI ve J-integrali yükselmiş; bu durum, D/t oranı yüksek (ince cidarlı) silindirlerde çatlakların daha kritik olduğunu göstermiştir. Eğrisel yüzey, gerilme dağılımını değiştirerek görünür kırılma tokluğunu $KIC \approx 25,25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ düzeyine çıkarmıştır. KIC malzemenin çatlak ilerlemesine gösterdiği direnci ifade eder, yüksek KIC değeri yüksek kırılma direncine sahip olduğunu gösterir. Model, farklı D/t oranlarına genellenebilir olmakla birlikte; çap, cidar kalınlığı ve uzunluk dayanımı doğrudan etkiler ve D/t arttıkça dayanımın azalabileceği belirtilmiştir.

Deniz vd. (2012), $(\pm 55)_3$ filaman sarımlı cam/epoksi boruların yanal darbe sonrası artık basma dayanımını (residual compressive strength) deneysel olarak incelemiştir.

Çapları 50, 75, 100 ve 150 mm olan, cidar kalınlığı $\approx 1,75$ mm sabit numunelere 15, 20 ve 25 J darbe uygulanmış, ardından eksenel basma testleri yapılmıştır. D/t oranı düşük (küçük çap) borular daha rijit olduğundan darbe enerjisini elastik olarak soğuramaz; bu nedenle hasar ve kırılma tüp boyunca daha belirgin ilerler. D/t oranı yüksek (büyük çap) borular ise enerjiyi elastik deformasyonla daha etkin dağıtarak hasarı sınırlar ve daha yüksek artık basma dayanımı sergiler; çap arttıkça absorbe edilen enerji azalır. Bununla birlikte, çok büyük çapta ($D=150$ mm, $D/t \approx 86$) burkulma baskın hale gelir ve basma dayanımı hasardan ziyade geometrik kararlılıkla sınırlanır.

Deniz vd. (2012), CTP boruların deniz suyuna uzun süre maruziyet sonrası düşük hızlı darbe altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Filaman sarımlı (± 55)₃, yaklaşık 1,75 mm kalınlıklı borular 50, 75, 100 ve 150 mm çaplarda üretilmiş; %3.5 tuzlulukta yapay deniz suyunda 3, 6, 9 ve 12 ay bekletildikten sonra 15, 20 ve 25 J enerji seviyelerinde darbe testlerine tabi tutulmuştur. Değerlendirilen ölçütler maksimum darbe kuvveti, çökme (defleksiyon) ve absorbe edilen enerjidir. Bulgular, nem emilimi ve iyonik bozulmanın elyaf-matris bağına zayıflatarak hasarı artırdığını; 6. aydan itibaren absorbe edilen enerji ve hasar alanının belirgin biçimde yükseldiğini göstermiştir. D/t oranı arttıkça borular daha esnek davranmış; büyük çaplı (150 mm) borular daha az hasar alırken, küçük çaplı (50 mm) borular kırılma, çatlama ve delaminasyona daha yatkın bulunmuştur. Üç aylık maruziyette bazı numunelerde gözlenen kısmi dayanım artışı, üretim kaynaklı artık gerilmelerin kısmen giderilmesine bağlanmıştır; ancak 6 ay ve sonrasında dayanım belirgin biçimde azalmıştır. Sonuç olarak, deniz suyuna uzun süre maruziyet CTP boruların yapısal dayanımını ve darbe direncini düşürmektedir.

Deniz vd. (2023), E-glass/epoksi CTP kompozit boruların deniz ortamına maruziyet sonrası mekanik davranışını düşük hızlı enine darbe ve eksenel basma testleriyle incelemiştir. Çapları 50, 75, 100 ve 150 mm olan numuneler 3, 6, 9 ve 12 ay yapay deniz suyuna daldırılmış; ardından 15, 20 ve 25 J enerji seviyelerinde darbe, akabinde basma testlerine tabi tutulmuştur. Deniz suyu emilimi kütle artışına yol açmış, 9. aydan sonra dengeye ulaşmış ve özellikle küçük çaplı borularda belirginleşen mikroyapısal bozulma ile elyaf-matris arayüzünde zayıflamaya neden olmuştur. Darbe hasarı, enerji arttıkça matris çatlaklarından elyaf kırılması ve delaminasyona evrilmiş; çatlaklar elyaf doğrultusunda ilerlemiştir. Basma testlerinde hem darbesiz hem darbe görmüş numunelerde maruziyet süresi uzadıkça dayanım azalmış; bu azalma düşük çaplarda daha belirgin olmuş, büyük çaplı borularda yerel burkulma gözlenmiştir. Bulgular, deniz suyuna uzun süre maruziyetin darbe ve basma dayanımını önemli ölçüde

düşürdüğünü ve elyaf-matris bağının zayıflamasıyla işlevsel dayanıklılığı ciddi biçimde azalttığını göstermektedir.

Al-Mahfooz ve Mahdi (2020), düşük maliyetli ve yapısal olarak zayıf PVC boruların dıştan cam elyaf takviyeli polimer CTP ile sarılarak eğilme performansının iyileştirilmesini deneysel olarak incelemiştir. CTP sarımı, özellikle D/t oranı yüksek borularda, taşıma kapasitesi ve yapısal bütünlüğü belirgin biçimde artırmış; yalnızca yük taşıma kapasitesini değil, eğilme rijitliğini de yükseltmiştir. PVC boruların ilk kırılma yükü 64 N iken, sarımla 1140 N'ye ulaşmış ve eğilme taşıma kapasitesinde yaklaşık 18 kata varan artış sağlanmıştır. Boru çapı arttıkça eğilme kapasitesi artmış; elyafların $\pm 45^\circ$ veya $\pm 55^\circ$ açılarla sarımı, yük aktarımını iyileştirerek hasar yayılımını geciktirmiş ve uygun elyaf yönelimi çatlak ilerlemesini sınırlamıştır.

Pavlovski vd. (2007), cam, karbon ve bazalt elyaf takviyeli epoksi matrisli, filaman sarımlı borulardan üretilen halkalara SCC yöntemiyle halka çekme testi uygulamıştır. Bazalt/epoksi halkalar, cam/epoksi halkalara kıyasla daha yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü sergilemiştir. Karbon/epoksi halkalar üstün mekanik özellikler göstermesine karşın, yüksek maliyetleri nedeniyle uygulamalarda diğer kompozitlerin tercih edilebileceği belirtilmiştir. Bulgular, bazalt elyafli kompozitlerin doğal gaz depolama ve taşıma tanklarında kullanılabilirliğini desteklemektedir.

Samancı vd. (2012), başlangıç çatlağı bulunan, üç katmanlı ve $\pm 45^\circ$ sarım açılarına sahip filaman sarımlı boruların tekrarlanan yükler altındaki performansını incelemiştir. Tekrarlanan yükleme, karmaşık gerilme dağılımları oluşturarak yorulma davranışını etkilemiştir. Çalışmada deneysel testler ile sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılan sayısal analizler birlikte yürütülmüş; çatlak ucundaki gerilme yoğunlukları hesaplanıp deney bulgularıyla karşılaştırılmıştır. %50 yükleme oranında patlama hasarı gözlenmiş, daha düşük oranlarda su jeti oluşmuştur. Yüzey çatlakları yorulma ömrünü belirgin biçimde kısaltmış; çatlak boyu arttıkça dayanım oranı hızla azalmıştır. $\pm 45^\circ$ fiber yönelimi, çatlak yayılım yönünü etkileyerek özellikle fiber-matris kesişim bölgelerinde mikroçatlak birikimine yol açmıştır.

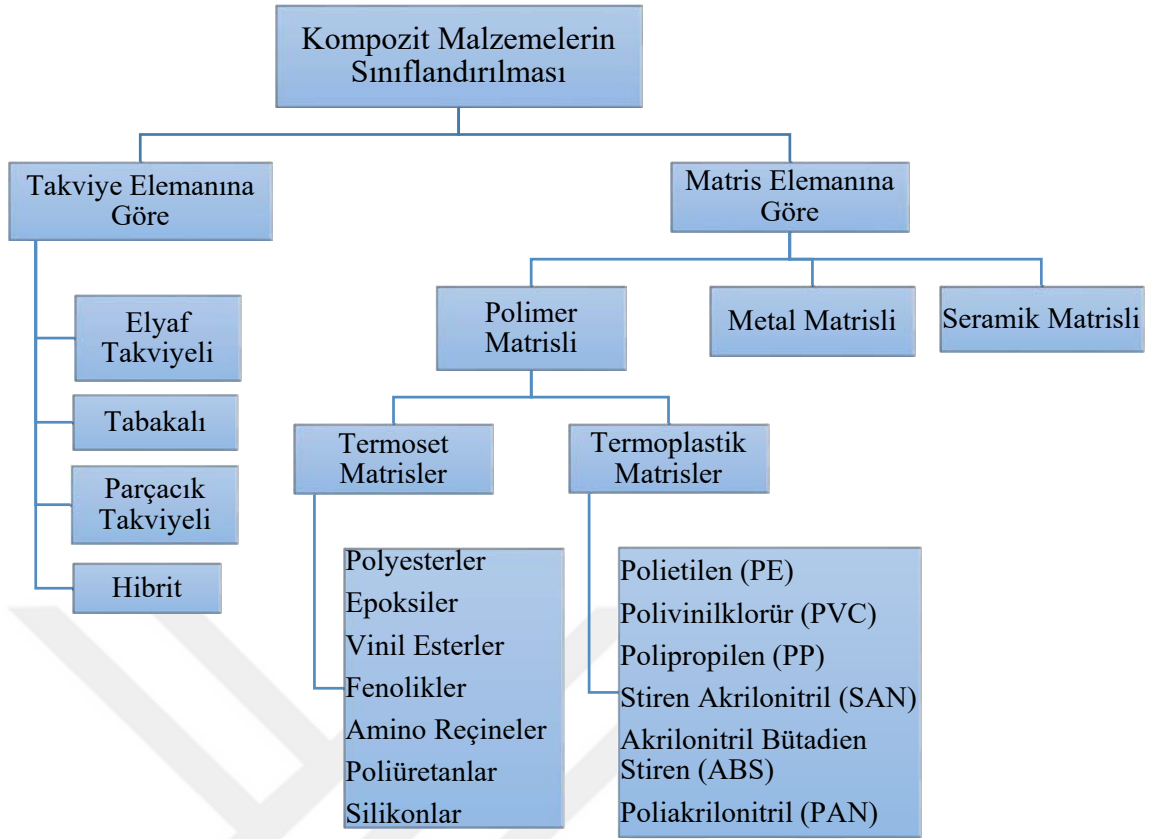
3. KURAMSAL TEMELLER

Kompozitler, en az iki farklı malzemenin makro boyutta ve belli bir proses eşliğinde bir araya getirilerek üretilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Bu yapıyı oluşturan malzemeler birbirleri içerisinde çözünmez ve kimyasal reaksiyon gerçekleştirmezler.

3.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, esasen bir matris ile bu matrisi güçlendiren takviye fazlarından meydana gelir. Bu malzemelerin performans özellikleri; matris ve takviye fazlarının oransal dağılımı, matrisin yapısal dağılım biçimi, morfolojik karakteristiği, kristallenme seviyesi, kristallografik yönelmesi ile fazlar arası ara yüzeyin yapısına bağlı olarak değiştirilebilir. Bu değişkenlerin uygun şekilde kontrol edilmesiyle, kompozit malzemeler farklı işlevsel ve mekanik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanabilir. Matris malzeme, takviye fazını bir arada tutup dağılmasını engeller, yükü takviye fazına dağıtır ve takviyelerin yüzeyini mekanik bozulmalardan korur. Matris malzemesinden istenen, düşük viskoziteli yapıda iken kolay bir şekilde uygulanabilmesi ve sonrasında kürlenme işlemiyle beraber elyafları sağlam bir şekilde bir arada tutabildiği katı forma rahatlıkla geçebilmesidir (Türkmen ve Köksal, 2013). Takviye fazı ise matrisin dayanımını arttıran ve kompozit yapının mukavemetli bir yapı olmasını sağlayan bileşendir. Matris, takviye fazı olan elyafa göre daha esnek ve zayıftır, bununla beraber elyaflarla birleştikleri zaman daha yüksek rijitlik özelliği olan ve daha mukavemetli bir malzeme oluşur. Kompozit malzeme gücünü temelde takviye fazından alır, bu durumun kompozit malzemelerle çalışırken önemle üzerinde durulması gerekir. Kompozit malzemeler, takviye ve matris elemanlarına göre sınıflandırılrsa da genel olarak matris elemanları olan polimer, seramik ve metal matrisli olmak üzere üç ana grupta tanımlanmaktadırlar (Gemi, 2014; Mallick, 2007). Kompozit malzemelerin takviye ve matris elemanına göre sınıflandırılması, Şekil 3.1’de verilmiştir.

Polimer matrisli kompozitler, polimer esaslı matris içinde dağılmış elyaf, partikül veya dolgularla güçlendirilmiş çok yönlü mühendislik malzemeleridir. Düşük yoğunluklarına karşın yüksek dayanım/rijitlik, iyi yorulma ve korozyon direnci ile ses-titreşim sönümleme ve özelleştirilebilir elektriksel-ısısal özellikler sunarlar. Nihai performans matris türü, takviye niteliği ve iç mimariye bağlıdır (Huang vd., 2021).



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Yılmaz, 2018).

Düşük maliyet, kolay üretilebilirlik ve yüksek korozyon direnci nedeniyle en yaygın tercih edilen kompozit sınıfıdır (Lee ve Mykkanen, 1987). PMK'lar olarak termoset ve termoplastik matrisler olarak sınıflandırılrsa da endüstride en yaygın olanlar termoset sistemlerdir (Morkavuk, 2016). Bununla birlikte, matrisin düşük Tg'si, termal kararsızlık/oksidasyona duyarlılık ve düşük ısıl iletkenlik, yüksek sıcaklık performansını MMK/SMK'lere kıyasla sınırlar; bu koşullarda metal veya seramik matrisli kompozitler tercih edilir (Shahabaz vd., 2021). Özellikle cam elyaf takviyeli sistemlerde nem emilimi, mekanik özelliklerde bozulmaya yol açabilir (Hussnain vd., 2023).

Seramik matrisli kompozitler (SMK), saf seramiklerin kırılganlığını elyaf/partikül takviyesiyle azaltarak yüksek eğilme dayanımı (≈ 322 MPa) ve artırılmış kırılma tokluğu sağlayan sistemlerdir (Sheikh-Ahmad, 2009). Yüksek sıcaklık dayanımı, termal şok ile oksidasyon/ablasyon direnci sayesinde yanma odaları ve egzoz nozülleri gibi aşırı koşullarda tercih edilir. Yüksek spesifik modül ve yüksek sıcaklık özellikleriyle metallere kıyasla üstün performans gösterebilirler (Binner vd., 2019; Chawla, 2012). Bununla birlikte, matrisin gevrek doğası mekanik güvenliği sınırladığından, kullanımı çoğunlukla yüksek ısı uygulamalarıyla sınırlıdır (Binner vd., 2019; Chawla, 2012).

Metal matrisli kompozitler (MMK), takviye fazı sayesinde yüksek çekme/eğilme/darbe dayanımı sunar ve polimer matrislere kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korur. Seramik takviyeler (SiC, Al₂O₃) aşınma ve korozyon direncini artırırken, takviye fazı termal genleşmeyi azaltarak boyutsal kararlılık sağlar (Zhou vd., 2020; Şenel vd., 2018). Yüksek ısı iletkenlikleri fren sistemleri ve pistonlar gibi ısı yükü parçalarda avantajdır; MMK'ler çoğunlukla Al ve Ti alaşımlarına dayanır, Al-MMK'ler yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren uygulamalarda tercih edilir (Kocaman ve Ateş, 2013; Erçetin vd., 2022; Sheikh-Ahmad, 2009). Buna karşın, yüksek işlem sıcaklıkları ve zorlu işlenebilirlik gibi durumlar maliyetleri artırır; büyük ölçekli üretimde MMK'ler genellikle pahalıdır (Morkavuk, 2016; Şenel vd., 2018).

3.1.1 Kompozit malzemelerin dayanımlarını etkileyen faktörler

Kompozit malzemelerin dayanımını etkileyen faktörler malzemenin iç yapısı ile birlikte üretim ve kullanım koşullarına bağlı olarak çeşitlilik gösterir. En önemli etkenler; matris ve takviye özellikleri, arayüzey kalitesi, katman dizilimi ve üretim parametreleridir.

Malzeme Bileşimi ve Arayüzey;

Matrisin kayma dayanımı, plastik davranışı ve takviye elyaflarının elastik modülü kompozitin genel dayanımını belirler. Özellikle matrisin kayma dayanımı, kompozit dayanımında büyük rol oynar (Pimenta vd., 2024).

Arayüz (interfaz) kalitesi, elyaf-matris yük transferini belirleyerek kompozitin kayma mukavemeti, yorulma dayanıklılığı ve elastisite modülünü doğrudan etkiler. Elyaf kaplama ve matris modifikasyonu (ör. alaşımlama) ile arayüz bağının güçlendirilmesi genel dayanımı artırır; ancak aşırı güçlü bağ, elyaf çekilmesi yerine gevrek kırılmayı teşvik ederek kırılma tokluğu ve hasar toleransını azaltabilir (Pimenta vd., 2024). Buna karşılık zayıf arayüz, basma ve eğilme dayanımlarını düşürürerek darbe sonrası delaminasyonu artırır (Mallick, 1997).

Yapısal ve Geometrik Faktörler;

Elyafların yönü ve katmanların yerleşim sırası, kompozitin eksenel, enine ve kayma dayanımlarını doğrudan etkiler. Katman sayısı ve kalınlığı arttıkça dayanım genellikle yükselir. Kompozit kalınlığı ve alt katman sayısı arttıkça, dayanımda boyut etkisi gözlenir. Daha kalın ve çok katmanlı kompozitler genellikle daha yüksek dayanım gösterir (M. Gurvich vd., 1995).

Üretim Koşulları;

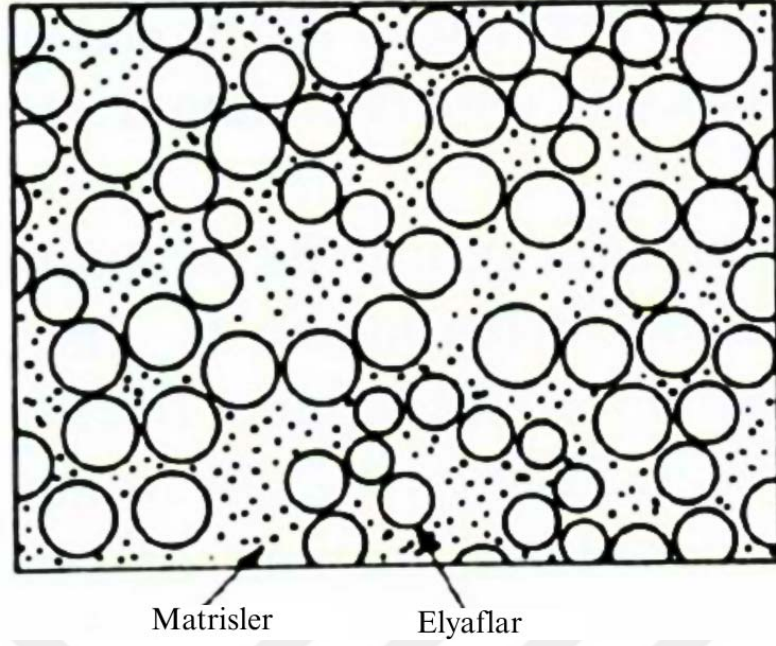
Elyaf hizasızlığı, boşluklar, delaminasyon gibi üretim hataları dayanımı azaltır. Takviye fazının matris içinde homojen dağılması da önemlidir. Takviye partiküllerinin şekli, boyutu ve matris içindeki dağılımı, çekme ve akma dayanımını etkiler (Liang ve Li, 1998).

3.2. Polimer Matrisler

Polimer matrisli kompozitler, polimer bir matris içinde dağılmış elyaf, partikül veya ağ yapılı takviyelerle güçlendirilmiş ileri malzemelerdir. Kompozit yapılarda en yaygın matrisler, özellikle sürekli elyaflarla kullanılan epoksi ve doymamış polyesterdir; matrisler genel olarak termoset (epoksi, polyester) veya termoplastik (PE, PP vb.) sınıflarından seçilir (Chawla, 2019). Takviye olarak cam, karbon, aramid gibi sentetik elyaflar ile doğal elyaflar kullanılabilir.

Polimer matrisli kompozitler, yüksek özgül mukavemet/rijitlik, iyi yorulma ve korozyon direnci, tasarım esnekliği ve kolay şekillendirilebilirlik sunar; doğal elyaflarla birleştirildiğinde çevre dostu ve biyobozunur seçenekler elde edilebilir. Çok işlevli tasarımlarla sensör, enerji depolama ve kendini onarma gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır; otomotiv, havacılık, inşaat, elektronik ve enerji sektörlerinde yaygındır (Chung, 2019; Sheridan vd., 2000). Polimer matrisler metaller/seramiklere göre çok daha hafif olup iyi kimyasal/korozyon direnci ve elektriksel yalıtkanlık sağlar; kolay üretim-işleme, takviye/dolgu ile özelleştirilebilirlik ve büyük ölçekli üretimde maliyet avantajı sunar (Markandan ve Lai, 2023).

Polimer matrisli kompozitlerde zaman-bağımlı dayanım kaybı görülebilir; yük taşıma kapasitesi hizmet ömrü boyunca azalır. Çekme dayanımı kısa sürede başlangıç değerinin yaklaşık 2/3'üne, yaklaşık 50 yılda ise 1/2'sine düşebilir; bu durum ani kırılma riskini artırır (Kalaycıoğlu ve Dirikolu, 2009). Şekil 3.2' de kompozit malzemenin kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 3.2. Kompozit malzemenin kesit görünüşü (Tuttle, 2003).

Polimerik matrisli kompozitlerin başlıca sınırlılıkları, yüksek sıcaklıklara karşı zayıf direnç ve organik matrisin bozunarak ısı, duman ve toksik gazlar açığa çıkarmasıdır (Tran vd., 2018). Düşük elektriksel iletkenlikleri nedeniyle metal matrislere kıyasla elektromanyetik girişim (EMI) koruması zayıftır (Liang vd., 2021). Ayrıca su/nem emilimi; şişme, plastikleşme, hidroliz ve elyaf–matris arayüzünde zayıflamaya yol açarak mekanik özellikleri düşürür; UV ışınımı, termal çevrimler ve kimyasallar çatlak oluşumu ile sistem arızalarını tetikleyebilir (Barreira-Pinto vd., 2023). Doğal elyaf takviyeli sistemlerde ise aşırı nem emilimi, düşük kimyasal ve yangın direnci, mekanik özelliklerde dağınıklık ve arayüz uyumsuzluğu ek sorunlar olarak öne çıkar (Mohammed vd., 2022).

3.2.1 Termosetler (Isıl sertleşir matrisler)

Termoset matrisler, kütleme sırasında kimyasal olarak üç boyutlu, çapraz bağlı bir ağ oluşturan polimerlerdir; reçine–sertleştirici sistemiyle başlar, reaksiyon tamamlandığında erimez ve yeniden şekillendirilemez (Feldman, 1990). Çapraz bağ yoğunluğu; mekanik, termal ve kimyasal özellikleri belirler. Yüksek yoğunluk kırılgenliği artırsa da yüksek sıcaklık/kimyasal dayanım, boyutsal kararlılık ve iyi mekanik davranış sunar. Epoksiler, fırınlama sonrası düşük hacimsel daralma ve ısı/su etkilerine karşı görece yüksek dirençleriyle öne çıkar. Elyaf/reçine oranının artırılması ve boşlukların giderilmesi performansı yükseltir; yaygın termosetler epoksi, polyester, vinil

ester ve fenoliktir (Arıcasoy, 2006; Gemi, 2014; Sheikh-Ahmad, 2009). Temel dezavantaj geri dönüştürülemezliktir; pratikte çoğunlukla takviyenin geri kazanımı hedeflenir, ancak biyobazlı ve geri dönüştürülebilir termosetlere yönelik çalışmalar sürmektedir (Dattilo vd., 2022).

Epoksi reçineler, termosetler arasında yaygın olarak kullanılan sistemlerdir; çoğunlukla DGEBA bazlı olup kürlleme ile çapraz bağlı ağ oluşturarak yüksek çekme, eğilme ve darbe dayanımı sağlar. Kimyasal direnç ve boyutsal kararlılıkları yüksektir (Rohde vd., 2016). Polar grupları sayesinde çeşitli yüzeylere yüksek aderans gösterir ve polyester ile vinil esterlere kıyasla genellikle daha yüksek kırılma tokluğu ve dayanım sunar (Mallick, 1997). Kürlleme sonrası hacim daralması düşüktür; epoksilerde %5'ten az iken polyester/vinil esterde yaklaşık %12'ye kadar çıkabilir. Bu durum artık gerilmeleri ve şekil bozukluklarını azaltır. Bu özellikler, servis koşullarında uzun ömür, yapısal kararlılık ve avantajlı maliyet-performans dengesi sağlar. Çizelge 3.1'de epoksi döküm reçinesinin temel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Epoksi döküm reçinesine ait karakteristik özellikler (Mallick, 2007).

Yoğunluk (g/cm ³)	1,2-1,3
Çekme mukavemeti (MPa)	55-130
Elastik modülüs (GPa)	2,75-4,10
Poisson oranı	0,2-0,33
Termal genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ m/m, her °C)	50-80
Kür çekmesi (%)	1-5

Polyester reçineler, epoksiye göre daha ekonomik olduğundan büyük ölçekli uygulamalarda tercih edilir; ancak daha kırılğan olup darbe dayanımı ve toklukları düşüktür, bu da zamanla çatlama/kırılma eğilimini artırır. Elyafı ve bazı yüzeylerle aderansları epoksiye kıyasla zayıftır (Oliveira vd., 2019; Perrot vd., 2021). Ayrıca kürlleme sırasında oluşan hacimsel büzülme, artık gerilmelere ve şekil bozukluklarına yol açabilir (Perrot vd., 2022).

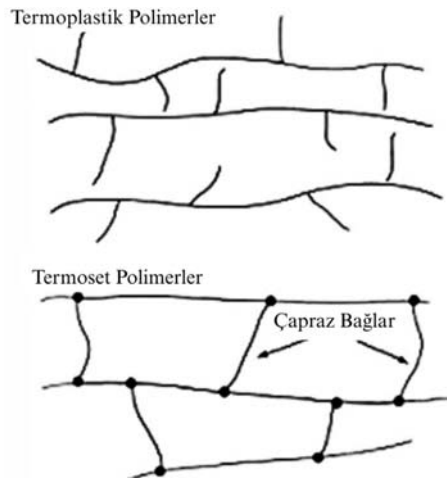
3.2.2. Termoplastikler (Isıl yumuşar matrisler)

Termoplastikler ısıtıldığında yumuşayan/ergiyen, soğutulduğunda yeniden katılaştıran ve bu döngüyü tekrarlayabilen polimerlerdir. Metaller ve seramiklere kıyasla daha düşük elastik modül ve viskoelastik davranış ile birlikte kolay şekillendirilebilirlik sağlar. Ancak sıcaklık arttıkça, özellikle T_g/T_m'ye yaklaştıldığında rijitlik ve dayanım azalır; ayrıca oksidatif/UV ortamları ve bazı kimyasallar altında termal/kimyasal

bozunma görülebilir. Termoplastik kompozitler, düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım/rijitlik ve iyi işlenebilirlikleriyle öne çıkar. Yüksek darbe dayanımı ve toklukları sayesinde darbe yüklerine karşı daha dirençlidir; pot-life sınırlaması olmadığından uzun süre depolanabilir ve sıcaklık ile neme karşı görece olarak daha dayanıklıdır. Otomatik ve yüksek hızlı seri üretime uygunlukları, maliyet ve verimlilikte belirgin avantaj sağlar (Mallick, 2007).

Uzun elyaf takviyeli termoplastik kompozitler (LFT), yüksek özgül modül ve mukavemet, üstün darbe ve korozyon direnci, kolay işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik sunar; bu nedenle otomotiv, havacılık ve enerji sektörlerinde kullandımı yaygındır (Ning vd., 2019; Vaidya vd., 2008). Karbon elyaf takviyeli termoplastikler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşınma direnci, rijitlik ve elektriksel iletkenlik açısından öne çıkar; termoplastik matrisler kısa çevrim süreleri ve proses esnekliği sağlar. Tipik matrisler PP, PE, PA ve PEEK; yaygın takviyeler ise cam, karbon ve aramid elyafıdır (Boria vd., 2017).

Termoplastikler, kovalent çapraz bağ içermeyen uzun zincirlerin zayıf zincirler arası etkileşimlerle (van der Waals vb.) tutulduğu polimerlerdir; bu yüzden termosetlere göre daha düşük Tg'ye sahiptir, ısınınca akışkan hale gelir ve yeniden şekillendirilebilir/geri dönüştürülebilir. Ancak tekrarlı geri dönüşüm zincir kesilmesi/oksidasyon yoluyla mekanik özellikleri zayıflatabilir; buna karşılık aromatik halkalı yüksek performanslı termoplastikler (ör. PEEK, PEI, PPS) yüksek sıcaklıklarda iyi boyutsal kararlılık sunar (Chawla, 2019; Mallick, 2007; Sheikh-Ahmad, 2009; Yılmaz, 2015). Şekil 3.3'te termoplastik ve termoset polimerlerin bağ yapılarındaki farklar görülmektedir.



Şekil 3.3. Termoplastik ve termoset kompozitlerin iç yapısı (Askeland vd., 2014; Mallick, 2007).

Yüksek performanslı termoplastiklerin işlenmesi için gerekli yüksek sıcaklıklar nedeniyle, artan enerji ve özel üretim ekipman gereksinimi vardır. Termosetlere kıyasla daha zor impregnasyon sonucu kalınlık yönünde genellikle düşük katmanlar arası (interlaminar) mekanik özellikler gibi dezavantajlar sunar. Ayrıca, yüksek sıcaklıkta işleme sırasında şekil bozulmaları (warping), elyaf dağılımında homojensizlik ve bazı sistemlerde yüksek sıcaklıklarda interlaminar kayma dayanımının (ILSS) düşük seyretmesi tasarım ve üretimde kısıtlayıcı olabilir (Gabrion vd., 2022).

3.3. Takviye Fazları

Kompozitlerde takviye fazı, matris içinde dağıtılmış elyaf, partikül veya ağ yapısındaki ikinci faz olup yük taşıma kapasitesini artırarak dayanım, rijitlik, tokluk ve darbe direncini iyileştirir. Yaygın takviyeler; cam, karbon ve aramid elyaflar ile seramik (SiC , Al_2O_3), metal (ör. Al) ve polimer esaslı partiküllerdir. Nihai mekanik ve fiziksel özellikler; takviyenin türü, hacim oranı, boyut/şekil (boy/en oranı), dağılım homojenliği ve matris–takviye arayüz aderansı tarafından belirlenir (Magrini vd., 2023).

Takviye fazı, kompozitlerde yük taşıyan ana bileşen olup dayanım/ağırlık oranını belirgin biçimde artırır. Seramik takviyeler (ör. SiC) yüksek aşınma ve ısı dayanımı sağlarken, karbon veya cam elyaflarının polimer matrislerde kullanımı çekme ve eğilme dayanımını anlamlı ölçüde yükseltir. Vakum infüzyonla üretilen %10 SiC takviyeli karbon kompozitlerde en yüksek mekanik dayanımın elde edildiği ve SiC 'nin homojen dağılımının mukavemet ile darbe direncini artırdığı rapor edilmiştir (Kaner, 2024). Takviyenin mimarisi (sürekli/kısa elyaf, düzenli/düzensiz ağ) ile matris-arayüz etkileşimi, enerji soğurma, darbe dayanımı ve kırılma davranışını belirler. Homojen dağılım ve güçlü arayüz, çatlak ilerlemesini sınırlandırıp tokluk sağlayarak dayanıklılığı artırır (Magrini vd., 2023; Huang vd., 2015).

Elyaf çapı küçüldükçe özgül yüzey alanı artar; bu da ıslanabilirliği ve matris–elyaf arayüz bağıntıyı güçlendirerek çekme dayanımı ve elastik modülü yükseltir, ancak çok ince elyaflarda reçine emdirme süresini uzatabilir. Çap büyüdükçe üretim kolaylaşsa da yüzey alanının azalması arayüz etkileşimini zayıflatır ve darbe dayanımı ile yorulma ömrünü düşürebilir. Buna karşılık bor elyaf gibi büyük çaplı/rijit elyaflar yüksek sertlik ve basma dayanımı sağlar (Alharbi vd., 2023). Elyaf esnekliği Young modülü ve çap ile ilişkilidir; çap azaldıkça, yüksek modüllü elyaflarda dahi esneklik artar. Ayrıca düşük yoğunluklu

elyafların tercih edilmesi, σ/ρ oranını artırarak kompozitin spesifik mukavemetini yükseltir (Yılmaz, 2015).

Kompozit malzemelerin içindeki takviye oranlarının matris ve takviye birleşimini optimum bir seviyede ayarlanmazsa, kompozitten beklenen performansı almak mümkün değildir (Morkavuk, 2016). Elyaf-matris arasındaki bağın kuvveti, kompozitin genel dayanımını belirlerken, elyafların uzunluğu, yönelimi ve yüzey işlemleri, mekanik özellikleri doğrudan etkiler. Doğal elyaflarda yüzey işlemleri (ör. alkali, asetilasyon) ile nem etkisi azaltılır ve matrisle elyaf uyumu artırılır (Bledzki ve Gassan 1999).

3.3.1. Doğal elyaflar

Selüloz bazlı elyaflar, pamuk, ipek, keten, kenevir, jüt gibi malzemelerden üretilir. Yapılarında selüloz bulundurulur, nem tutmaları, zamanla bozulmaları ve yanıcılıkları en büyük olumsuzluk özellikleridir (Yılmaz, 2015). Hafiflik, biyobozunurluk, düşük maliyet, yenilenebilirlik, çevre dostu, iyi darbe direnci gibi avantajları vardır (Bledzki ve Gassan 1999).

3.3.2. Cam elyaflar

Cam elyaf takviyeli kompozitler, yüksek mukavemet, esneklik, sertlik ve dayanıklılık gibi üstün mekanik özelliklerin yanında uygun maliyete sahiptir. Bu özellikleri, cam elyafların günümüze kadar, en fazla kullanılan elyaf malzemesi olmasını sağlamıştır. Otomotiv, inşaat ve havacılık gibi birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılırlar. Cam elyafın en önemli avantajları arasında uygun maliyetli olması, hafifliği ve yüksek performans sağlaması yer alır. Ayrıca, cam elyaf takviyesiyle kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe dayanımları önemli ölçüde artar; bu da onları geleneksel malzemelere göre daha avantajlı kılar (Rajak vd., 2021). Nispeten düşük sertlikleri, düşük yorulma dayanımları ve neme fazla duyarlı olması gibi olumsuz özellikleri yüksek performans istenen yerlerde kullanılmalarının önüne geçmektedir.

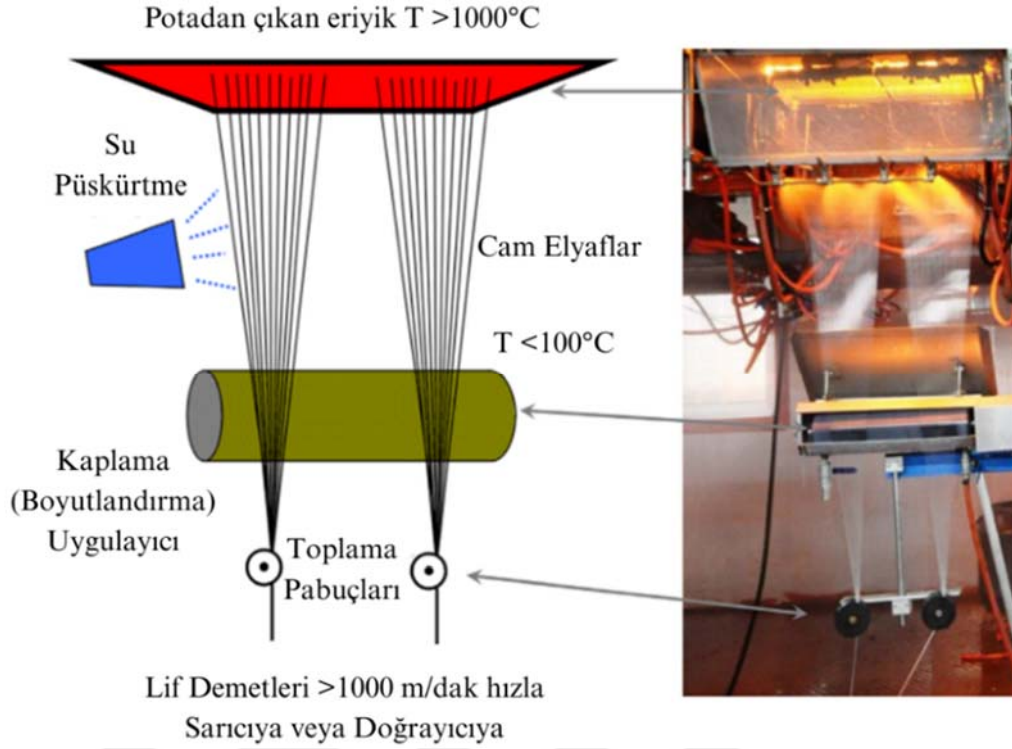
Kimyasal bileşimlerine göre cam elyaflar; A, E, S, D ve C camı gibi çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. A camı düşük performanslı alkali cam, C camı kimyasal korozyona dayanıklı cam elyaf ve E camı ise yüksek elektriksel yalıtkanlık sağlar. E camı en çok kullanılan, iyi mekanik dayanımlı ve yalıtkan bir camdır. S camı ise yüksek mukavemet ve iyi yorulma direnci olan cam elyaftır. D camının düşük dielektrik sabiti,

onu yüksek frekanslı ve elektronik uygulamalar için ideal bir yalıtkan yapar. Çizelge 3.2’de en çok kullanılan cam elyaflara ait özellikler gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. E, S ve D camı elyaflarının özellikleri (Cam Elyaf San. A.Ş. 1984).

Özellikler	E camı	S camı	D camı
Özgül ağırlık ρ (gr/cm ³)	2,6	2,5	2,16
Özgül ağırlık E (gr/cm ³)	72	87	51,7
Çekme mukavemeti σ (GPa)	3,45	4,54	2,41
Çekme uzaması (%)	4	2,9	-
Özgül modül E/ ρ (MN/m)	27,7	34,8	23,9
Özgül dayanım σ/ρ (MN/m/kg)	1,37	1,81	1,16
Boyuna termal genleşme katsayısı α ($\mu\text{m}/\text{C}^\circ \times 10^{-5}$)	5	5,6	3,06

Cam elyaf üretim prosesi, cam hammaddelerinin yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle başlar ve bu eriyikten ince elyafların çekilmesiyle devam eder. İlk aşamada, silika (SiO₂), alümina (Al₂O₃), kalsiyum oksit (CaO), bor oksit (B₂O₃) gibi hammaddeler belirli oranlarda karıştırılır. Bu hammadde karışımı, camın istenen kimyasal ve fiziksel özelliklerini sağlamak için dikkatle formüle edilir. Hazırlanan karışım 1500–1700°C gibi yüksek sıcaklıklarda eritilerek homojen bir cam eriyiği elde edilir. Bu eritme işlemi, gaz ya da elektrikle ısıtılan özel fırınlarda gerçekleştirilir ve camın saflığını, viskozitesini ve elyaf çekilebilirliğini etkiler. Elde edilen eriyik cam, platin alaşımlı çok ince delikli bir plaka (bushing) üzerinden geçirilir ve bu deliklerden çıkan eriyik cam, hızla çekilerek mikron çapında cam elyaflar elde edilir. Bu işlem, "fiberization" olarak adlandırılır ve elyafların çapı genellikle 5-25 mikrometre arasında değişir. Elyaf çapı, cam elyafların mekanik dayanımı üzerinde doğrudan etkilidir. Elyaf çekildikten sonra yüzeylerine özel kimyasal kaplamalar uygulanır; bu kaplama, elyafların birbirine yapışmasını önler ve matrisle uyumunu artırır. Ardından cam elyaflar, istenen formda (roving, mat, kumaş gibi) toplanır ve makaralara sarılır. Son olarak, elyaflar kurutulur, kalite kontrolünden geçirilir ve paketlenerek kullanıma hazır hale getirilir. Ayrıca, atık cam elyaflar da yıkanıp, kırılıp tekrar eritilerek ve elyaf çekimiyle yeniden cam elyaf üretiminde kullanılabilir; bu yöntem hem maliyeti düşürür hem de çevre dostudur (U.S. EPA, 1995; Thomason, 2019; Gardiner, 2009). Şekil 3.4’te fiberizasyon yöntemiyle cam elyaf elyaf üretimi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.4. Fiberizasyon yöntemiyle cam elyaf elyaf üretimi (Thomason, 2019).

3.3.3. Karbon elyaflar

Karbon elyaf takviyeleri, çok yüksek çekme/eğilme dayanımı ve elastik modülüyle geleneksel malzemelere kıyasla üstün özgül dayanım ve rijitlik sunar; bu sayede havacılık, otomotiv, inşaat ve enerji gibi alanlarda hafif ve dayanıklı yapıların geliştirilmesini sağlar. KTP'ler yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşınma ve yorulma direnci, düşük termal genleşme, yüksek elektriksel iletkenlik ile korozyon ve kimyasal direnç sayesinde uzun ömürlü, sürdürülebilir çözümler üretir (Vijayan vd., 2023). Düşük yoğunluk–yüksek dayanım kombinasyonu, karbon elyafların cam elyaftan sonra en yaygın kompozit takviye olarak benimsenmesine katkı sağlamıştır (Sheikh-Ahmad, 2009).

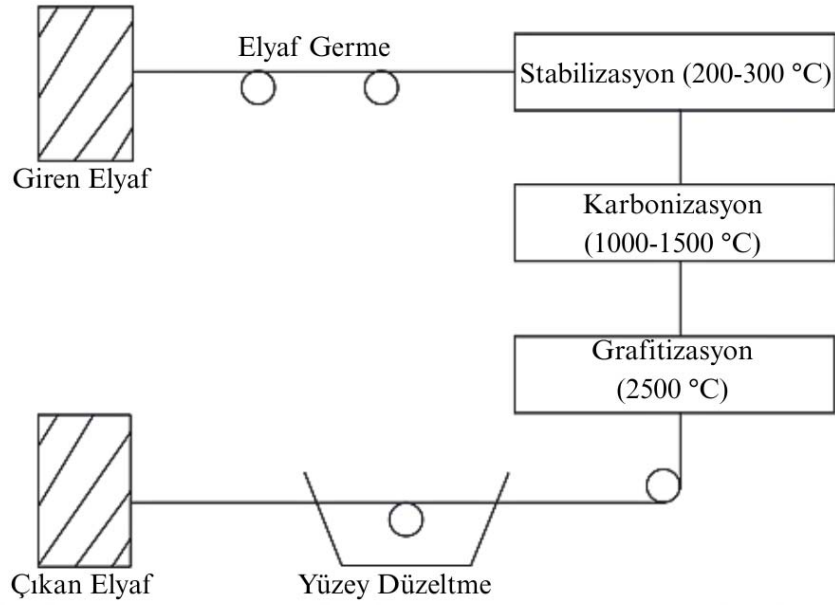
Karbon elyaflar, farklı matrisler ve üretim teknikleriyle geniş bir şekil ve özellik aralığında üretilebildikleri için yüksek tasarım esnekliği sunar. Yüzey modifikasyonları, nano-karbon (CNT, grafen, nanoelyaf) kaplamaları ve hibritleştirme, elyaf–matris arayüzü yapışmasını güçlendirerek mekanik dayanım ve malzeme ömrünü artırır. Böylece uzun ömür ve düşük bakım gereksinimiyle sürdürülebilirliğe katkı sağlar (Arai vd., 2019).

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin başlıca dezavantajları; üretim ve işleme maliyetleri yüksek olması ve kırılabilirlik nedeniyle sınırlı plastik deformasyon kabiliyeti sonucu düşük tokluk-darbe dayanımlarıdır. Yüksek elektriksel iletkenlikten kaynaklı uygulama kısıtlamaları vardır. Ayrıca üretim ve tamir süreçleri karmaşık olup, arayüz bağının zayıflığı ve yetersiz katmanlar arası mekanik özellikler genel performansı olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle maliyet, işlenebilirlik, elektriksel özellikler ve darbe gereksinimleri tasarımda dikkatle değerlendirilmelidir (Vijayan vd., 2023; Yao vd., 2017).

Son yıllarda yüzey modifikasyonları, nano-takviyeler ve hibritleştirme ile karbon elyaf takviyeli kompozitlerin zayıf yönlerinin azaltılması ve performanslarının artırılması yönünde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle hibrit ve hiyerarşik yapılar, geleneksel sistemlerdeki kırılabilirlik ve ara yüz zayıflıklarını kısmen telafi ederek daha dengeli mekanik özellikler sağlayabilmektedir; ancak bu yaklaşımlar ilave maliyet ve üretim karmaşıklığı doğurur. Dolayısıyla, karbon elyaf takviyeli kompozitler yüksek performans gerektiren uygulamalarda vazgeçilmez olmakla birlikte, maliyet, işlenebilirlik ve kırılabilirlik gibi dezavantajlar tasarım ve üretimde dikkate alınmalıdır (Vijayan vd., 2023).

Karbon takviyeli polimer (KTP) kompozitlerde kullanılan karbon elyaflar PAN, zift ve selüloz kökenli olabilir; endüstride en yaygın olanı PAN bazlı elyafıdır. Karbon elyaflar, grafitik tabakalardaki güçlü kovalent bağlar nedeniyle yüksek çekme dayanımı ve elastik modül sunar; tabakaların elyaf eksenine paralel oryantasyonu bu özellikleri maksimize eder. Tasarım malzemesi olarak kullanımın artmasıyla, çok yüksek dayanımlı elyaf sınıflarına odaklanılmıştır (Gemi, 2014). PAN bazlı karbon elyafların mikro yapısı, elyaf eksenine paralel dizilmiş düzensiz grafit tabakalarından oluşur ve bu oryantasyon çekme mukavemetini belirler. Süreç iyileştirmeleri ve mikro yapı kontrolü sayesinde ticari elyaflarda çekme mukavemeti 7-8 GPa düzeyine ulaşmıştır (Jang vd., 2022).

PAN bazlı karbon elyaf üretimi üç aşamadan oluşur: elyaf eğirme (PAN'ın çözelti eğirme ile ipliklere dönüştürülmesi), termal stabilizasyon (oksijenli atmosferde siklizasyon/oksidasyon) ve karbonizasyon (inert atmosferde 1000°C'nin üzerinde). Stabilizasyon koşulları ve karbonizasyon sıcaklığı, kristal yapı, kristalit boyutu ve oryantasyonu belirler; sıcaklık arttıkça kristallilik, mekanik dayanım/elastik modül ve termal direnç yükselir (Kaw, 2006). Şekil 3.5'te PAN bazlı karbon elyaf üretim işlemi görülmektedir.



Şekil 3.5. PAN bazlı karbon elyaf üretiminin işlem basamakları (Kaw, 2006).

3.3.4. Bazalt elyaflar

Bazalt elyaf takviyeler, volkanik bazaltın eritilmesiyle üretilen, doğal ve çevre dostu bir seçenektir. Cam elyafa benzer ya da daha iyi mekanik özellikler sunar, karbon elyafa kıyasla daha düşük mukavemet-modüle karşın daha sünek ve toktur. Düşük maliyetleri, düşük çevresel ayak izleri ve geri dönüştürülebilirlikleri ile sürdürülebilir bir malzemedir. Ekonomik uygulamalarda kullanılmak için uygundur; yüksek darbe dayanımı ve elverişli özgül mukavemetleri kullanımını destekler (Monaldo vd., 2019; Demirci, 2017). Çizelge 3.3'te bazalt, karbon ve E-cam elyafların mekanik özellikleri verilmiştir.

Bazalt elyaf takviyeli kompozitler, kimyasal kararlılıkları ile neme ve korozyona dirençlerinin yanı sıra aşınma ve yorulma dayanımları sayesinde çatlak ilerlemesini yavaşlatır ve hizmet ömrünü uzatır (Özkan ve Çoban, 2021). Su emme oranlarının bitkisel elyaflara kıyasla çok daha düşük olması, deniz ortamı, dış cephe ve donma-çözülme döngülerinde uzun ömür ve güvenilirlik sağlar (Sun vd., 2018; Özkan ve Çoban, 2021). Mekanik açıdan, bazalt elyaflar E-cam elyafa kıyasla daha yüksek dayanım ve modül sunar; örneğin, bazalt elyaf takviyeli kompozitler E-cam takviyelilere göre yaklaşık %45 daha yüksek çekme dayanımı ve %11 daha yüksek ara tabaka kayma dayanımı (ILSS) gösterebilir (Lapena ve Marinucci, 2017).

Bazalt elyaflar, yüksek sıcaklık dayanımları sayesinde kompozit ve yalıtım uygulamalarında öne çıkar. Bu direnç, elyafın mineralojik yapısı ile içinde yer aldığı

kompozit mimarisinden kaynaklanır. Çalışmalar, 30–900°C aralığında mekanik ve fiziksel özelliklerin büyük ölçüde korunabildiğini; TGA ve DMA sonuçlarına göre cam geçiş sıcaklığının (T_g) yüksek olduğu ve yaklaşık 900°C'ye dek yapısal bütünlüğün sürdürülebildiğini göstermektedir. Bu nedenle bazalt elyaflar, cam elyaflara kıyasla daha yüksek ısı dayanımı sunar ve yangın koruma uygulamalarında daha güvenli bir alternatiftir (Karvanis vd., 2020).

Çizelge 3.3. Bazalt, Karbon ve E-Cam elyafların mekanik özellikleri ve birim maliyetlerinin karşılaştırılmaları (Pavlovski vd., 2007).

Takviye Malzemeleri	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Uzama Miktarı (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Maliyet (\$/kg)
Karbon Elyaf	4800	230	1,48	1,75	25
Bazalt Elyaf	3200	109	2,31	2,6-2,7	5
E-cam Elyaf	2600	74	2,05	2,5-2,6	2

Çizelge 3.3'te, bazalt elyafların, karbon ve E- cam elyafları ile mekanik özellikler ve maliyet anlamında karşılaştırılması verilmiştir. Bazalt elyafların birim maliyeti, karbon elyaftan belirgin derecede düşük; E-cam elyafına ise yakın ya da kısmen daha yüksektir. Kompozit maliyetinin ana belirleyicisi olan karbon elyafın yüksek fiyatı, özellikle otomotiv ve havacılıkta kullanımını sınırlandırırken bazalt elyafı ekonomik bir alternatif haline getirir. E-cam genellikle en ucuz seçenek olsa da bazalt ile arasındaki fiyat farkı daralmaktadır; bazalt elyaflar düşük üretim maliyeti, hammadde bolluğu ve geri dönüşüm açısından elverişli özellikleriyle ek avantaj sunar (Kessler vd., 2016).

3.3.5. Aramid elyaflar

Aramid elyaflar, yüksek özgül dayanım ve modül, düşük yoğunluk ve üstün termal/alev kararlılığı nedeniyle polimer matrisli kompozitlerde yaygın kullanılan yüksek performanslı takviyelerdir. Bu özellikleriyle endüstriyel, askeri, havacılık ve sivil alanlarda koruyucu giysi ve kompozit parçalarda tercih edilir (Ertekin, 2017). En bilinen türü Kevlar, yüksek çekme dayanımı, darbe enerjisi soğurma kapasitesi ile yırtılma ve aşınma direnci sayesinde balistik koruma, otomotiv, havacılık ve spor ekipmanlarında hafif ve dayanıklı çözümler sunar (Dobb ve Robson, 1990).

Aramid elyaflar, kimyasal maddelere, yırtılma ve aşınmaya karşı yüksek dirençleriyle endüstriyel ortamlarda avantaj sağlar. UV'ye duyarlı olmakla birlikte, Al_2O_3 – TiO_2 ince kaplamaları veya polidopamin ile antimikrobiyal ajanlara dayalı yüzey modifikasyonları UV dayanımını belirgin artırarak %99'un üzerinde antibakteriyel/

antifungal etki kazandırır. Aramid nanoelyaflar ise yüksek özgül yüzey alanı ve uzunluk/çap oranı sayesinde polimer matrisleri etkin biçimde güçlendirir; tokluğu ve ısı dayanımı önemli ölçüde artırır (Chen vd., 2021). Aramid elyafların çeşitli dezavantajları da vardır: İşlenmesi ve şekillendirilmesi diğer elyaflara kıyasla zordur ve özel ekipman gerektirebilir. Ayrıca, diğer yüksek performanslı organik elyaflarda olduğu gibi basma davranışları zayıftır; basma mukavemeti, çekme mukavemetinin yaklaşık 1/8'i düzeyindedir (Chawla, 2019).

3.3.6. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler, iki veya daha fazla farklı malzeme katmanının üst üste yerleştirilmesiyle üretilir. Her katman, istenen özelliklere göre seçilir ve katman sayısı, kalınlık oranı ile dizilim şekli performansı doğrudan etkiler. Polimer matrisli tabakalı kompozitlerde, farklı polimerler veya takviye edici elyaf (cam, karbon, aramid gibi) katmanlar halinde birleştirilebilir. Katman sayısının ve kalınlık oranlarının optimize edilmesiyle darbe dayanımı, esneklik, mukavemet veya sönümlleme gibi özellikler artırılabilir. Tabakalı kompozitlerin mekanik performansı, katman sayısı, türü ve düzenlenişine bağlı olarak değişir. Örneğin, cam elyaf takviyeli kompozitlerde katman sayısı arttıkça darbe dayanımı ve eğilme mukavemeti yükselir. Farklı yoğunlukta ve kalınlıkta elyafların kullanılması performansı daha da artırabilir. Karbon fiber ve PLA gibi malzemelerin ardışık katmanlar halinde birleştirilmesiyle maliyet avantajı ve yüksek mekanik dayanım elde edilebilir (Yavuz ve Şenol, 2024).

Tabakalı kompozitlerin tasarımı, üretimi, standartlaştırılması ve denetimi diğer kompozit türlerine kıyasla daha pratiktir. Özel gereksinimleri karşılamak için birden fazla tabaka kullanılabilir ve bu yapılar sandviç malzemeler olarak adlandırılır. Tabakalama yöntemiyle dayanıklılık, sertlik, aşınma direnci ve termal yalıtım özellikleri geliştirilebilir. Bu kompozitler genellikle iki veya daha fazla tabakadan oluşur ve tabakalar farklı ya da aynı malzemelerden üretilir. Temel prensip, birbirinin özelliklerini destekleyen bir bileşim oluşturmaktır. Hafif ve esnek tabakalı polimer kompozitler, çok katmanlı yapıları sayesinde X-ışını ve elektromanyetik dalgaları etkin biçimde sönümleyebilir. Katmanlar arası arayüzler, dalga soğurma ve yansıtma mekanizmalarını güçlendirir (Li vd., 2020). Böylece, tabakalı kompozitler özelleştirilebilir yapılarıyla endüstriyel uygulamalarda yüksek performans sunar.

3.4. Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemenin üretim yöntemi, mekanik dayanım, su emme, homojenlik ve tasarım esnekliği gibi temel özellikleri belirler. Gelişmiş tekniklerle daha yüksek performanslı ve özelleştirilebilir kompozitler elde edilebilir.

Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) gibi yöntemler, el yatırması ve vakum torbalama gibi geleneksel tekniklere kıyasla %7-35 daha yüksek çekme mukavemeti ve sertlik sağlar. VARTM ile üretilen numuneler daha homojen ve az boşluklu olur, bu da mekanik performansı artırır (Kumlu vd., 2024).

Katmanlı üretim ve otomatik fiber yerleştirme gibi yeni nesil yöntemler, karmaşık geometriler ve özelleştirilebilir özellikler sunar. Bu tekniklerle elyaf yönelimi ve dağılımı daha iyi kontrol edilebilir, performansı artırır (Soydan vd., 2024).

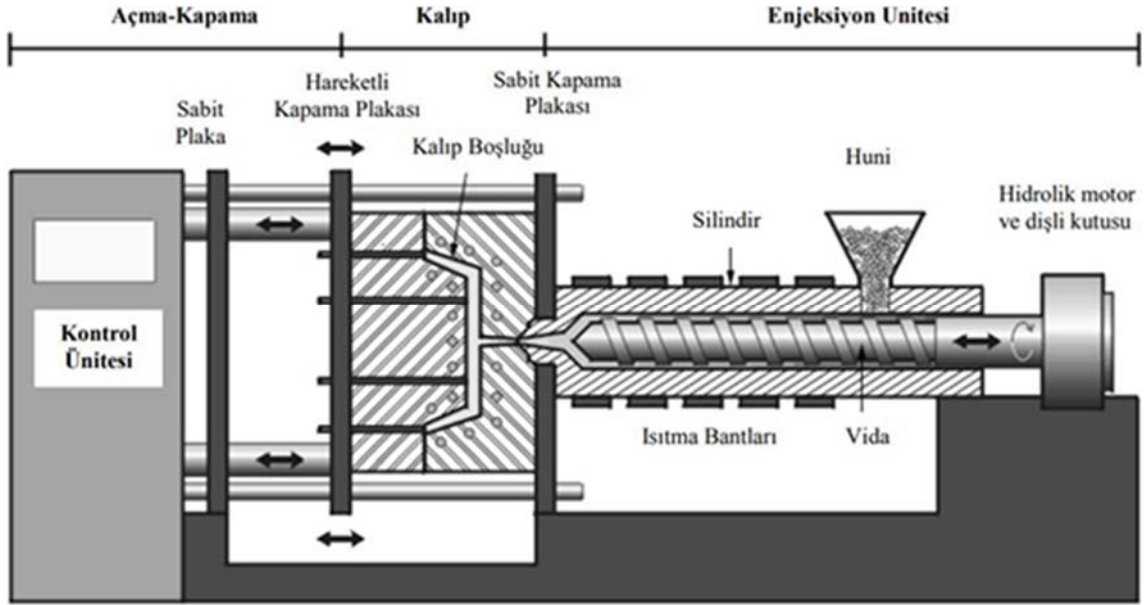
Üretim kalitesi, mekanik dayanım, ömür, güvenlik ve fonksiyonellik üzerinde doğrudan etki yapar. Yüksek standartlar ve etkin kalite kontrol süreçleri, hataları en aza indirerek güvenilirliği artırır. Boşluklar, gözeneklilik, yanlış elyaf hizalanması, kırışıklıklar ve reçine dengesizlikleri, çekme, eğilme ve darbe dayanımını düşürür (Fu ve Yao, 2022). Bilgisayarlı tomografi, sensörler ve yüzey ölçümleri gibi yöntemler, hataların erken tespitini sağlar ve ömrü uzatır (Fleischer vd., 2018). Böylece, üretim yöntemleri ve kalite kontrolü kompozitlerin performansını optimize eder.

3.4.1. Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik matrisli kompozitlerin endüstriyel ölçekte hızlı ve yüksek hassasiyetle üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu süreçte, matris polimer ve takviye malzemesi (örneğin, elyaf, toz veya dokuma kumaş) belirli oranlarda karıştırılır, ısıtılarak eriyik hale getirilir ve yüksek basınç altında kalıp içerisine enjekte edilir. Malzeme kalıp içinde soğuyup katılaştıktan sonra ürün çıkarılır. Süreç, plastikleştirme, enjeksiyon, soğutma ve çıkarma aşamalarından oluşur; bu aşamalar ürünün şekil hassasiyeti, yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerini etkiler (Pacheco vd., 2023; Wang vd., 2021). Şekil 3.6'da enjeksiyon kalıplama üretim yöntemi görülmektedir.

Yöntem, kısa çevrim süresi, yüksek verimlilik ve karmaşık geometrili parçaların üretimi gibi avantajlar sunar. Dokuma kumaş takviyeli termoplastik kompozitler, prepreg hazırlamaya gerek kalmadan doğrudan üretilebilir, böylece süre ve maliyet azalırken mekanik özellikler optimize edilir. Enjeksiyon parametrelerinin (sıcaklık, basınç, hız ve

bekletme süresi) doğru seçilmesi, çekme ve soyulma dayanımını artırır (Wang vd., 2021). Böylece, enjeksiyon kalıplama endüstriyel uygulamalarda yüksek kaliteli kompozitlerin verimli üretimini sağlar.

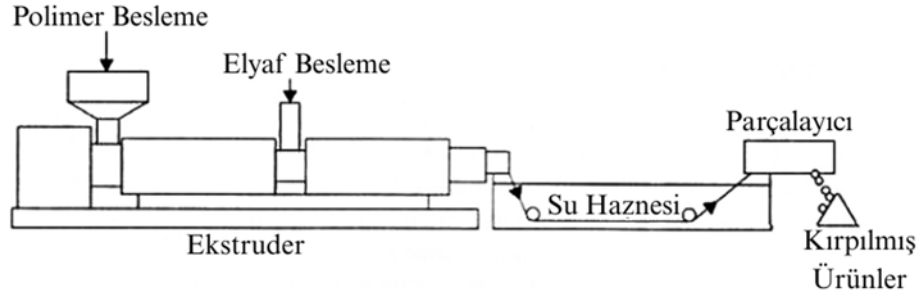


Şekil 3.6. Enjeksiyon kalıplama üretim yöntemi (Gandhi vd., 2020).

3.4.2. Ekstrüzyon ile kalıplama yöntemi

Ekstrüzyon kalıplama, kompozit malzemelerin sürekli şekillendirilmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu süreçte, polimer matris ve takviye edici malzemeler (örneğin, elyaflar veya metal teller) ısıtılmış bir ekstrüderden geçirilerek kalıptan istenen profil elde edilir. Yöntem, özellikle elyaf takviyeli polimer kompozitlerin ve çok malzemeli yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılır (Pacheco vd., 2023).

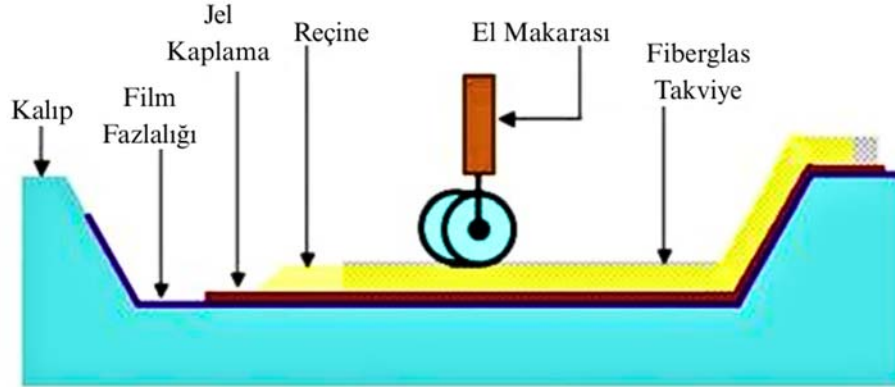
Süreçte, malzemeler karıştırılır, eritilir ve elyaflar akış yönüne paralel hizalanarak çekme ve eğilme dayanımı artırılır. Çıkışta soğutulan malzeme katılaştırılır ve kesilir; takviye türüne bağlı olarak mekanik ve termal özellikler optimize edilebilir. Ekstrüzyon, yüksek üretim hacmi, düşük maliyet ve çevre dostu avantajlar sunar; vakum destekli tekniklerle boşluklar azaltılarak performans iyileştirilir. Böylece, yöntem endüstriyel uygulamalarda yüksek performanslı kompozitlerin ekonomik üretimini sağlar (Pacheco vd., 2023). Ekstrüzyon kalıplama prosesi Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Ekstrüzyon kalıplama üretim yöntemi (Chung 2010).

3.4.3. El yatırma yöntemi

El yatırma (hand lay-up) yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en basit ve yaygın tekniklerden biridir. Bu yöntemde takviye elyafları (cam, karbon veya doğal elyaflar) kalıp yüzeyine elle yerleştirilir, ardından reçine (genellikle polyester veya epoksi) uygulanarak katmanlar oluşturulur. Hava kabarcıkları giderildikten sonra kompozit, oda sıcaklığında veya kontrollü koşullarda kurlenir. Düşük maliyetli ve esnek bir yöntem olan el yatırma, küçük ölçekli üretim ve prototiplemede tercih edilmektedir. Ancak ürün kalitesi operatör deneyimine bağlı olup, gözeneklilik ve homojenlik sorunları nedeniyle mekanik özellikler diğer yöntemlere göre daha düşüktür (Abdurohman vd., 2018). Şekil 3.8’de el yatırma yöntemi şematik olarak görülmektedir.



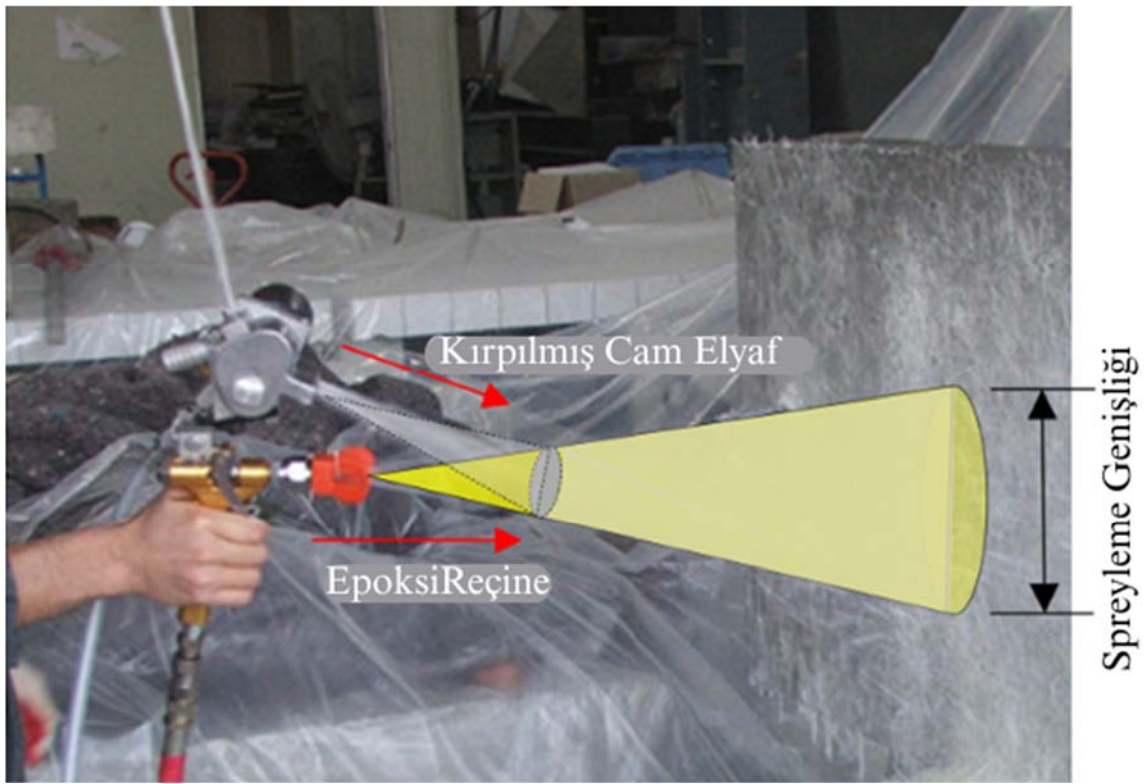
Şekil 3.8. El yatırma yöntemi (Abdurohman vd., 2018).

3.4.4. Sprey püskürtme yöntemi

Sprey püskürtme (spray lay-up) yöntemi, fiber takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde kullanılan hızlı ve pratik bir tekniktir. Bu yöntemde kısa kesilmiş takviye elyafları (genellikle cam elyafı) ile reçine, özel bir sprej tabancası aracılığıyla kalıp yüzeyine birlikte püskürtülür. Oluşan karışım istenen kalınlığa ulaşana kadar uygulanır,

ardından yüzey düzeltilerek hava kabarcıkları giderilir. Kompozit malzeme sonrasında oda sıcaklığında veya kontrollü koşullarda kürlenmeye bırakılır (Ha vd., 2015).

Sprey püskürtme yöntemi, otomasyonla kolay entegrasyonu sayesinde büyük ve karmaşık parçaların üretiminde avantaj sağlamaktadır. Püskürtme parametrelerinin kalibrasyonu, katman kalınlığı ve elyaf oranının kontrolünü kolaylaştırarak ürün kalitesinde tutarlılık sunar. Hızlı ve düşük maliyetli olması nedeniyle denizcilik, otomotiv ve inşaat sektörlerinde tercih edilmektedir. Ancak elyaf dağılımındaki rastgelelik ve kalınlık düzensizlikleri kalite sorunlarına yol açabilmektedir (Ha vd., 2015). Şekil 3.9’da spray püskürtme yönteminin uygulandığı görülmektedir.



Şekil 3.9. Sprey püskürtme yöntemi (Ha, 2015).

3.4.5. Filaman sarım yöntemi

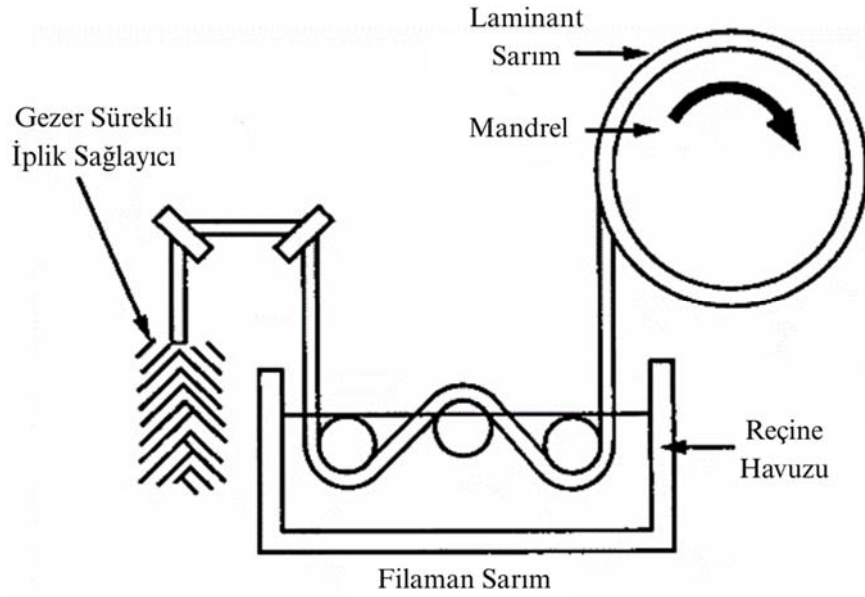
Kompozit malzemelerde elyaf sarım (filament winding) tekniği, yüksek mukavemetli elyafların (genellikle cam, karbon veya aramid) reçineyle emprenye edilerek dönen bir mandrel üzerine belirli açılarla ve desenlerle sarılması şeklinde uygulanır. Bu yöntem, özellikle basınca dayanıklı boru, tank ve silindirik yapıların üretiminde yaygın olarak kullanılır. Elyaf, reçine banyosundan geçirilerek veya doğrudan reçineyle kaplanarak mandrel üzerine sarılır; sarım açısı, katman sayısı ve

desen, ürünün mekanik özelliklerini ve performansını doğrudan etkiler. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra, kompozit yapı kürlenir ve mandrel çıkarılarak içi boş ve boru veya tank şeklinde silindirik parça elde edilir (Munro, 1988).

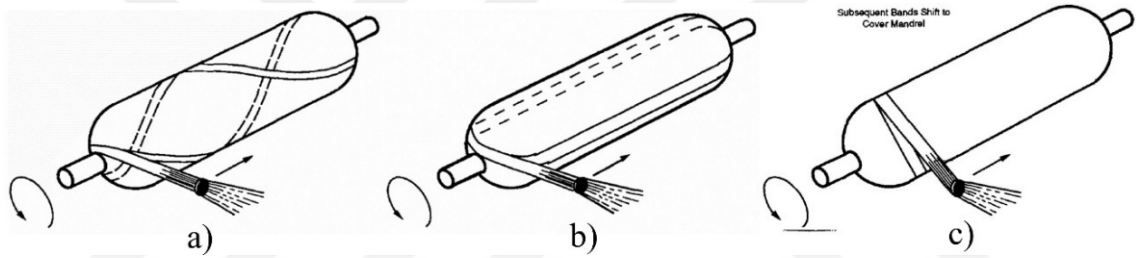
Uygulamaya bağlı olarak döner kalıp ahşap, alüminyum veya çelik gibi malzemelerden imal edilir. Örneğin açık uçlu silindir imal etmek için çelik mandrel kullanılırken kapalı uçlu silindir üretmek için ise düşük erime noktalı alaşım mandreller kullanılır. Özel tasarlanmış sarım makineleriyle kafa ve mandrel dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım açıları mandrel boyuna doğru küçük açılardan (25°) mandrel eksenine dik açığa (90°) kadar değişebilmektedir. Elyafların farklı açılarda kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir (Arıcasoy, 2006; Gemi, 2004; Kaw, 2006).

Filaman sarım metoduyla üretim ıslak ve kuru (pregreg) olmak üzere iki yöntemle yapılır. Islak sarımda elyaf malzeme reçine malzemesinin içerisinden geçirilerek sarım yapılırken, kuru sarımda ise reçine önceden elyafa emdirilir. Islak sarım metodu Şekil 3.10'da görülmektedir. Islak sarım ucuzdur ve kompozitin özelliklerini kontrol etmemize izin verirken kuru sarımın avantajı ise daha temiz bir üretim olmasıdır; ancak pahalı olduğu için yaygın olarak kullanılmaz. Sarım işlemi dairesel, kutupsal ve helisel olmak üzere üç şekilde yapılabilir. Kutupsal sarım yönteminde mandrel sabit kalırken; besleme kafası mandrel eksenine etrafında, belirlenmiş bir açıda hareket eder. Helisel sarımda mandrel döner ve elyaf kafası ileri geri hareket eder. Çevresel sarım yöntemi ise yaklaşık 90° yüksek açılı sarım şekliyle diğer yöntemlere göre daha basittir. Şekil 3.11'de sırasıyla kutupsal, helisel ve dairesel sarım şeklinde filaman sarım metotları görülmektedir.

Yöntemde kullanılan başlıca reçineler epoksi, polyester ve vinil ester gibi termoset reçinelerdir. Polyester epoksiye göre daha ucuz olmasına rağmen, ağırlığın kritik olduğu ve yüksek mukavemet istenen uygulamalarda epoksi tercih edilmektedir. Epoksi, daha iyi mekanik, yorulma dayanımı, ısı dayanımı, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı gibi özellikler sunar. Epoksi matris en çok E camı elyaf ile beraber kullanılmaktadır (Gemi, 2004). Pratikte, %50–%60 aralığı yaygın olarak elde edilebilen elyaf oranlarıdır.



Şekil 3.10. Islak sarım metodu (Shen, 1995).



Şekil 3.11. Filaman sarım metotları a) Kutupsal sarım, b) Helisel sarım, c) Dairesel sarım (Shen, 1995).

Filaman sarım metodunun avantajları genel olarak şöyle sıralanır;

Otomasyon ve verimlilik; filaman sarım, kompozit üretim yöntemleri içinde yüksek derecede otomasyon ve tekrarlanabilirlik sunan bir yöntemdir. Bu durum üretim hızını ve ürün kalitesini artırır (Orman vd., 2024).

Hafiflik ve yüksek dayanım; özellikle basınçlı kaplar ve borular gibi uygulamalarda, metal alternatiflere göre %75'e varan ağırlık tasarrufu ve yüksek basınç dayanımı sağlar (Azeem vd., 2022).

Düşük enerji ve maliyet; düşük enerji tüketimi ve otomasyon sayesinde üretim maliyetleri ve karbon ayak izi azalır (Orman vd., 2024).

Tasarım esnekliği; farklı sarım açıları ve çok açılı katmanlar ile çeşitli yükleme koşullarına karşı optimize edilebilir, bu da mekanik performansı artırır (İpekçi ve Ekici, 2023).

Malzeme tasarrufu; malzeme israfı azdır ve fiber yerleşimi hassas şekilde kontrol edilebilir (İpekçi ve Ekici, 2023).

Yöntemin çeşitli dezavantajları da bulunmakta ve şu şekildedir;

Geometri kısıtlamaları; karmaşık şekilli parçaların üretimi zordur, genellikle silindirik veya basit aksenal simetrik yapılar için uygundur (İpekçi ve Ekici, 2023).

Kalıp kullanımı ve maliyet: kalıp gereksinimi maliyeti artırır ve üretim esnekliğini sınırlar (İpekçi ve Ekici, 2023).

Katman açısı sınırlamaları; katmanlar arasında tam 90° açı yapmak zordur, bu da bazı tasarımlarda mekanik performansı kısıtlayabilir (İpekçi ve Ekici, 2023).

Helisel sarım zorunluluğu; sarımda genellikle helisel yollar izlenir, bu da bazı uygulamalarda istenen fiber yerleşimini engelleyebilir (İpekçi ve Ekici, 2024; Vargas vd., 2014).

Yüzey ve katman hataları; yüzeyde kayma, boşluk oluşumu ve katman stabilitesi gibi üretim hatalarına karşı hassastır (Vargas vd., 2014).

Elyaf sarım tekniği, otomasyon ve robotik sistemlerle kolayca entegre edilebildiği için hem basit hem de karmaşık geometrilere sahip kompozit yapıların üretiminde tercih edilmektedir. Özellikle çoklu elyaf sarım (multi-filament winding) ve çok aşamalı sarım (multi-stage filament winding) gibi gelişmiş teknikler sayesinde hem üretim verimliliği hem de mekanik performans artırılabilir. Çoklu elyaf sarımda, birden fazla elyaf aynı anda sarılarak malzeme kullanımı optimize edilir ve daha homojen bir yapı elde edilir. Çok aşamalı sarımda ise, geçici ve kalıcı mandrel parçaları birleştirilerek karmaşık ve çift eğrilikli geometriler üretilebilir. Bu yöntemle, geleneksel sarıma uygun olmayan içbükey bölgeler de üretilebilmektedir (Zhao vd., 2023; Früh ve Knippers, 2021).

Elyaf sarımda, sarım açısı ve katmanlama düzeni; ürünün çekme, eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerini optimize etmek için dikkatle tasarlanır. Farklı sarım desenleri, özellikle silindirik ve kubbe şekilli parçalarda, gerilme dağılımını ve yapısal bütünlüğü etkiler. Son yıllarda geliştirilen matematiksel modeller ve simülasyonlar, optimum elyaf yerleşimi ve sarım parametrelerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu sayede, üretim öncesi performans tahmini ve hata minimizasyonu sağlanabilmektedir (Guo vd., 2022).

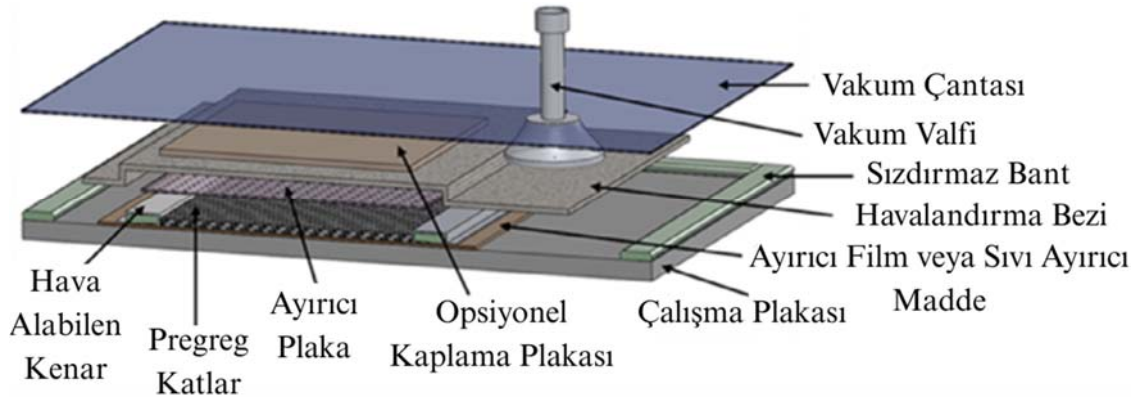
Otomatik ve robotik sarım sistemleriyle, karmaşık 3D şekillerde yüksek hassasiyetli ve homojen elyaf yerleşimi sağlanabilmektedir. Sarım açısı, katman kalınlığı ve elyaf yoğunluğu otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, çekme-sarım

(pultrusion-winding) gibi yeni yöntemlerle, kalıpsız ve daha düzgün yüzeyli kompozitler üretilmektedir (Frketic vd., 2017).

3.4.6. Otoklav yöntemi

Otoklav üretim yöntemi, özellikle havacılık ve uzay sanayilerinde yüksek performans ve kalite gerektiren kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde önceden reçine ile emdirilmiş (prepreg) katmanlar kalıp üzerine yerleştirilmekte, vakum torbası ile sarılarak otoklava alınmaktadır. Belirlenen sıcaklık ve basınç koşullarında gerçekleştirilen işlem sonucunda reçine polimerize olmakta, elyaflar arasındaki boşluklar dolmakta ve kompozit malzeme istenen mekanik özellikleri kazanmaktadır (Antonucci vd., 2002). Şekil 3.12’de otoklav üretim yöntemi görülmektedir.

Otoklav yöntemiyle üretilen kompozitler, düşük gözeneklilik, yüksek yüzey kalitesi ve üstün mekanik özellikler sunmaktadır. Bu nedenle havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilmektedir. Ancak uzun çevrim süresi, yüksek enerji tüketimi ve ekipman maliyetleri yöntemin başlıca dezavantajlarıdır. Termoplastik kompozitlerin üretiminde kullanılan bu yöntem, termoset sistemlere göre daha yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmektedir (Morkavuk, 2016).



Şekil 3.12. Otoklav üretim yöntemi (Centea vd., 2022).

3.5. Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları

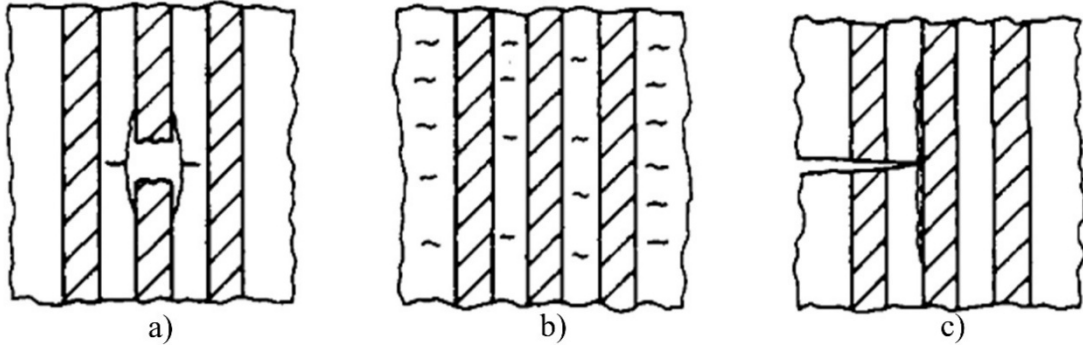
Kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları, bu malzemelerin dış yükler, darbe, tekrarlı zorlamalar veya çevresel etkiler altında maruz kaldığı ve yapısal bütünlüklerini etkileyen özgün hasar türlerini ve süreçlerini ifade eder. Bu mekanizmalar, kompozitin farklı bileşenlerinde (elyaf, matris, arayüzey ve tabakalar arası bölgeler) meydana gelen

ve malzemenin taşıma kapasitesini, dayanıklılığını ve ömrünü belirleyen fiziksel değişimlerdir.

Hasar mekanizmaları arasında matris çatlaması, elyaf kırılması, tabakalar arası ayrılma (delaminasyon), elyaf-matris arayüzeyinden ayrılma (debonding) ve elyaf çekilmesi gibi süreçler yer alır. Matris çatlaması, kompozitin polimer matrisinde meydana gelen mikro veya makro çatlaklardır ve genellikle ilk hasar türüdür. Matris çatlaması ve delaminasyon hemen görünmez ve yavaş ilerlerken, elyaf kırılması yüksek yükler altında gerçekleşerek daha ani ve belirgin hasarlara yol açar. Delaminasyon, kompozit tabakalar arasında yapışmanın bozulmasıyla tabakaların birbirinden ayrılmasıdır; bu, özellikle darbe veya tekrarlı yükler altında sıkça görülür ve kompozitin genel dayanımını ciddi şekilde azaltabilir. (Hull ve Shi, 1993). Elyaf-matris arayüzeyinden ayrılma (debonding), elyaf ile matris arasındaki bağın zayıflaması veya kopması sonucu oluşur ve yük transferini olumsuz etkiler. Elyaf çekilmesi ise, elyafların matristen ayrılarak dışarı çekilmesidir ve genellikle elyaf-matris bağının zayıf olduğu durumlarda gözlenir (Karimi vd., 2015).

Kompozit malzemeler, metallere göre daha düşük dayanımlı olarak görülmekle birlikte geleneksel metallere göre daha sık hasarlanmaktadır. Kompozit malzemeler hasar mekanizmalarını önceden gösterse ve sık hasara uğrasa bile, metallerdeki önlenemez ani ve yıkıcı hasar gelişimi, geleneksel metalleri bu konuda kompozitlere göre dezavantajlı yapar. Kompozitlerdeki hasar bölgeleri metallere göre daha hızlı tespit edilebilir ve tahribatsız muayene yöntemleri ile kolayca belirlenip önlem alınabilir (Gemi, 2014).

Hasar mekanizmalarının türü ve yayılımı, uygulanan yükün tipi, malzemenin kalınlığı, tabaka dizilimi ve çevresel koşullara göre değişiklik gösterebilir. Hasar mekanizmalarının doğru şekilde tespit edilmesi ve modellenmesi, kompozit yapıların güvenli ve dayanıklı şekilde tasarlanabilmesi için kritik öneme sahiptir (Talreja 1989; Hull ve Shi, 1993). Şekil 3.13'te elyaf doğrultusunda oluşan temel hasar mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 3.13. Kompozitlerde temel hasar mekanizmaları; a) Elyaf kırılması ve arayüz debondingi b) Matris çatlaması c) Arayüz kayması ve delaminasyon (Caminero vd., 2016).

Hasar mekanizmaları aşağıdaki sırada oluşur;

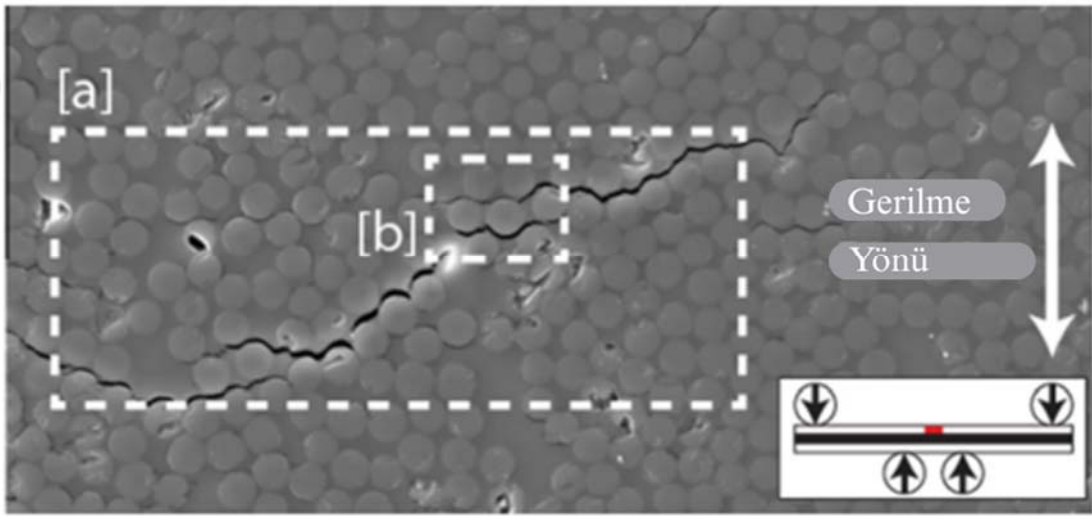
Matris Çatlağı;

Genellikle dış yükleme (çekme, eğilme, darbe) veya termal gerilmeler sonucu tetiklenir. Çatlaklar, matrisin zayıf bölgelerinde veya elyaf-matris arayüzeyinde gelişir. Bu çatlaklar, yükün elyaflara daha yüksek miktarda aktarılmasına, hasarın yayılarak çatlağın ara yüzeye ulaşmasına neden olur. Çatlaklar, matris boyunca elyaflar arasında ilerler ve elyaf-matris ara yüzeyine ulaştığında yön değiştirebilir veya dallanabilir. Çatlakların ilerleme yolu, laminatın tabaka dizilimine ve elyaf yerleşimine bağlı olarak değişir. Yük arttıkça, matris içinde birden fazla çatlak oluşur ve bu çatlaklar elyaflar arasında paralel veya rastgele dağılabilir. Çatlak yoğunluğu arttıkça, kompozitin mekanik özelliklerinde belirgin azalma gözlenir (Katerelos vd., 2008) Bu durum tabakalar arasında delaminasyonun başlangıcını tetikler. Çatlakların oluşumu ve yayılımı, tabaka dizilimi, elyaf yönü, ara yüzey özellikleri ve uygulanan yükün türü gibi faktörlere bağlıdır. Matris çatlağı kompozit malzemelerin ömrünü ve güvenliğini sınırlayan, hasar ilerleyişinde kritik bir rol oynayan temel bir hasar mekanizmasıdır (Caminero vd., 2016).

Elyaf-Matris Arayüzey Ayrılması (Debonding);

Kompozit malzemelerde arayüzey ayrılması (debonding), matris ile takviye (elyaf, partikül veya dolgu) arasındaki bağın zayıflaması veya kopması sonucu ortaya çıkan temel bir hasar mekanizmasıdır. Kompozitlerin mekanik performansı, büyük ölçüde bu ara yüzeyin kalitesine ve dayanımına bağlıdır. Kompozitler mekanik yüklere (çekme, eğilme, darbe gibi) maruz kaldığında, elyaf ve matris arasındaki ara yüzeyde gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler, özellikle elyaf yönüne dik uygulanan yüklerde belirgindir. Elyaf-matris ara yüzeyinde, özellikle mekanik kilitlenmenin zayıf olduğu yerlerde veya ara yüzeydeki kusurlarda gerilme yoğunlaşması meydana gelerek, elyaf ile

matris arasındaki bağın zayıflamasına yol açar. Bu bölgelerdeki yüksek gerilme yapışma kuvvetini aşarsa çatlak oluşmasına neden olur, bu çatlaklar arttıkça elyaf-matris bağları koparak debonding başlar. Bu mikroskopik seviyedeki ayrılma, ilerideki hasarların temelini oluşturur. Debonding ilerledikçe, çatlaklar büyür ve kompozit içinde daha büyük hasar mekanizmalarını (delaminasyon) tetikleyebilir (Mortell vd., 2016). Elyaf matris arayüz hasarı Şekil 3.14'te görülmektedir. Kompozitlerde ara yüzey ayrılması, malzemenin ömrünü ve güvenliğini sınırlayan, yük transferini ve mekanik performansı doğrudan etkileyen kritik bir hasar mekanizmasıdır. Ara yüzeyin kalitesinin artırılması, kompozitlerin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlar (Huang vd., 2021).



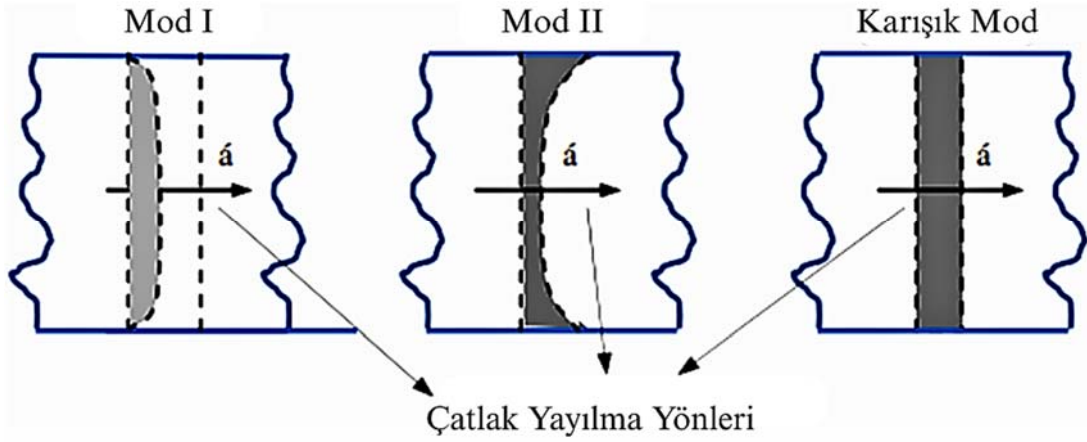
Şekil 3.14. Elyaf/matris arayüz hasarının hâkim matris çatlağı (Mortell vd., 2016).

Delaminasyon (Katmanlar Arası Ayrılma);

Delaminasyon, kompozit malzemelerde katmanlar arasındaki bağın kopmasıyla oluşan bir hasar türüdür. Bu hasar, genellikle üretim hataları, uygulama sırasında maruz kalınan yükler, serbest kenarlar, bağlantı noktaları ve darbe gibi çeşitli nedenlerle ortaya çıkabilir. Delaminasyon, kompozitlerin taşıma kapasitesini ve yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde azaltır (Garg, 1988).

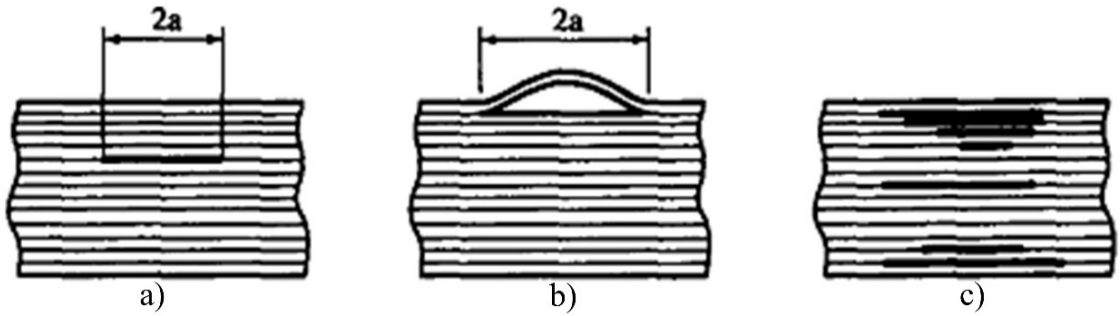
Matris çatlakları ve elyaf kırılmaları, ara yüzeylere yayılarak, katmanlar arasında delaminasyonun başlamasına neden olur. Delaminasyon, kompozit malzemenin makroskopik olarak zayıflayarak rijitliğinde ciddi azalmaya ve nihai kırılmaya yol açar (Mortell vd., 2016). Delaminasyonun ilerlemesi, Mode I (açılma), Mode II (kayma) ve karma modlarda gerçekleşebilir ve her modda hasar yüzeyinde farklı izler bırakır

(Mohammadi vd., 2024). Hasar modlarının şematik olarak gösterimi Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15. Farklı arıza modlarındaki delaminasyonların şematik gösterimi (Yayla, 2016).

Delaminasyon kompozit malzemelerin dayanımını ve rijitliğini azaltır, yerel veya genel burkulma yüklerini düşürerek yapının ömrünü kısaltır. Özellikle delaminasyonun konumu ve alanı, hasarın şiddetini belirlemede kritik rol oynar; merkezdeki delaminasyonlar daha düşük artık dayanım ile ilişkilidir. Delaminasyonun ilerlemesi genellikle, şişme, delaminasyonun yayılması ve nihai kırılma olarak üç aşamada gerçekleşir (Yu vd., 2024). Konumlarına göre delaminasyon tipleri Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



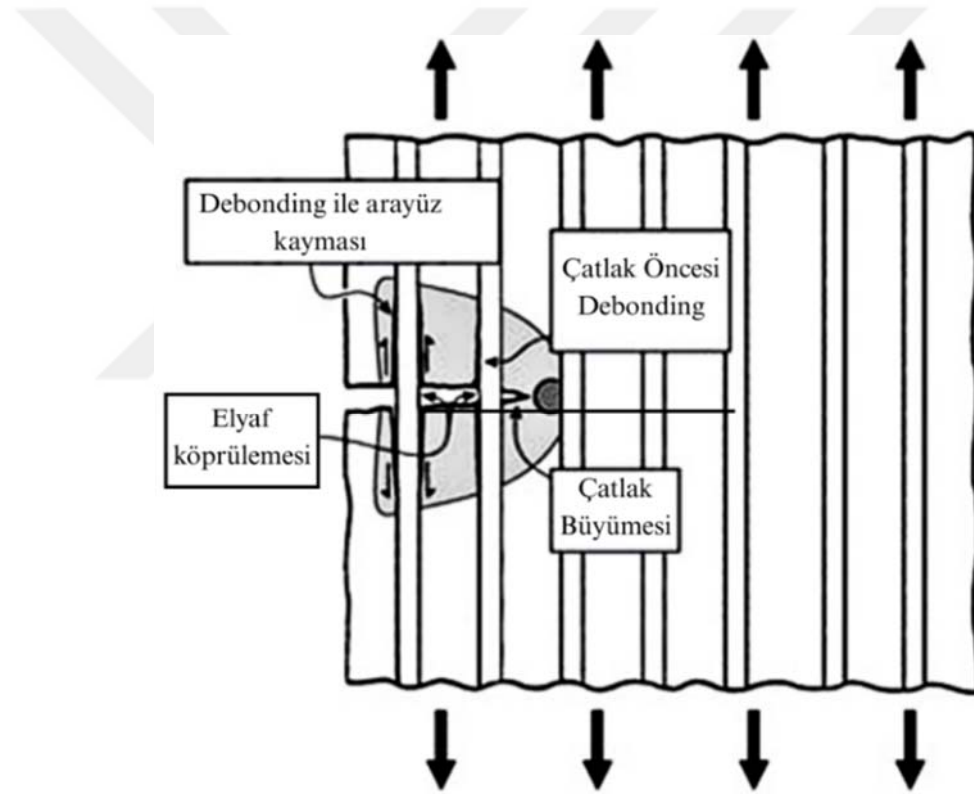
Şekil 3.16. Konumlarına göre delaminasyon tipleri; a) Dahili, b) Yüzeye yakın, c) Çoklu çatlama (Bolotin, 1996).

Delaminasyonlar; katman diziliminin optimize edilmesi, daha dayanıklı reçine sistemlerinin kullanılması ve dikişleme gibi yöntemlerle azaltılabilir (Garg, 1988). Hasarın yönü ve ilerleme hızının belirlenmesi için, kırık yüzey incelemeleri (fraktografi), deneysel ve sayısal modellemeler kullanılır (Turón vd., 2006).

Elyaf Köprülemesi;

Elyaf köprülemesi (fiber bridging), kompozit malzemelerde çatlak veya delaminasyon oluştuğunda, bazı elyafların kopmadan hasar yüzeylerini birbirine bağlamaya devam etmesiyle ortaya çıkan bir mekanizmadır. Bu olay, kompozitlerin kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırır ve çatlak ilerlemesini yavaşlatır, böylece malzemenin dayanıklılığını artırır (Khan, 2019).

Elyaf köprülemesi, çatlak uçlarında yük taşımaya devam ederek çatlak ilerlemesini engeller ve malzemenin kırılma tokluğunu birkaç kat artırabilir. Bu mekanizma, özellikle karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerde, delaminasyonun büyümesini yavaşlatır ve malzemenin yorulma ömrünü uzatır. (Riccio vd. 2020). Şekil 3.17’de elyaf köprülemesi şematik olarak görülmektedir.

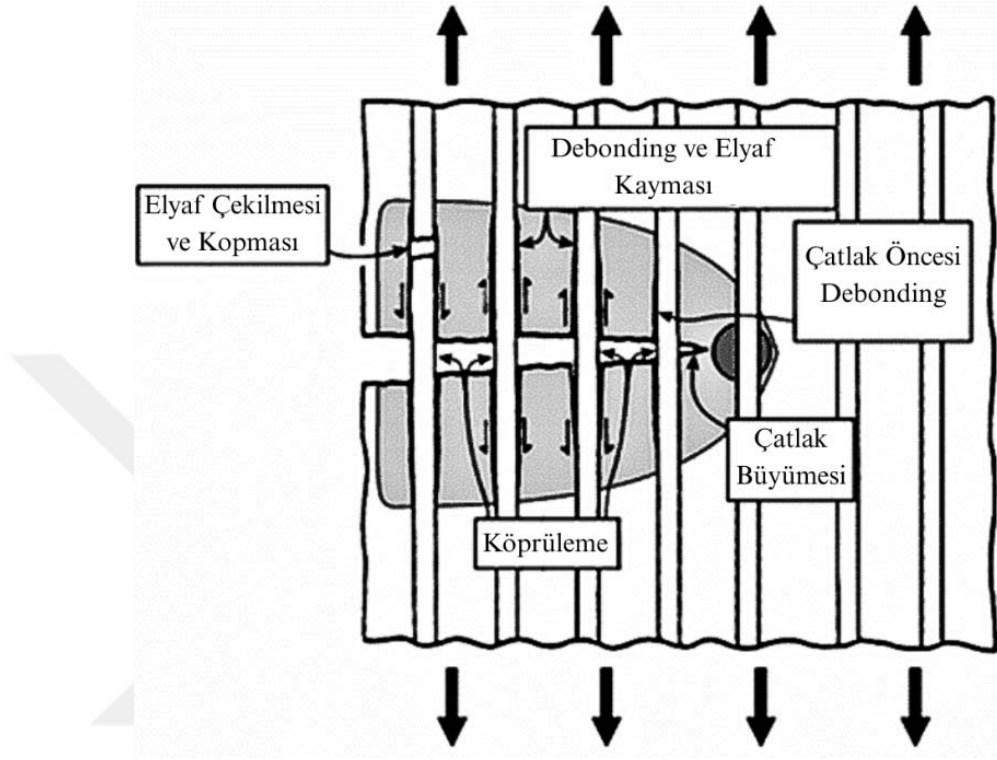


Şekil 3.17. Çatlak büyümesi ve elyaf köprülemesi; debondinge eşlik eden arayüz kayması (Dassios, 2007).

Elyaf Çekilmesi (Fiber Pullout);

Elyaf çekilmesi, kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesi sırasında elyafların matristen ayrılarak çekilmesiyle oluşan önemli bir hasar mekanizmasıdır. Elyaf-matris arayüzünde önce bağ kopması (debonding) başlar; bunu takiben elyaf matris içinden kayarak veya sürtünerek çekilir. Elyaf çekmesi, matrisin elyafları tutma kapasitesinin bir

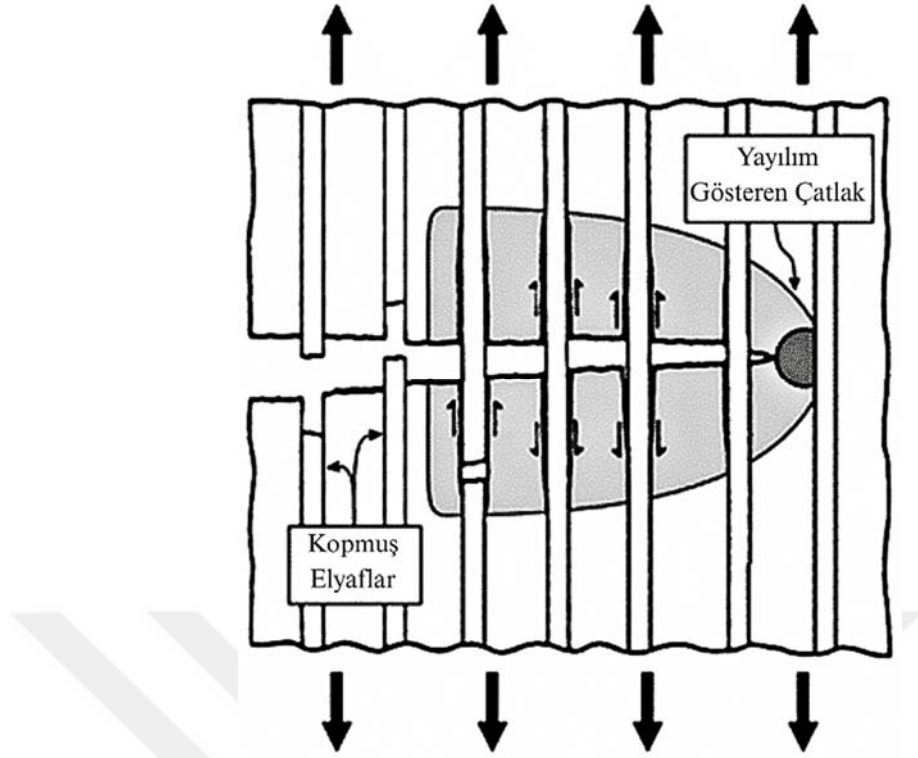
göstergesi olarak değerlendirilir, kompozit malzemelerin kırılma davranışında önemli bir rol oynar ve özellikle matrisin elyafı yeterince tutamaması durumunda gözlemlenir. Bu süreç, kompozitin enerji sönümleme kapasitesini ve tokluğunu artırır (Dassios, 2007). Şekil 3.18’de elyaf çekilmesi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.18. Elyaf çekilmesi mekanizması; tam anlamıyla gelişme gösteren çatlak mekanizması (Dassios, 2007).

Elyaf Kırılması (Elyaf Hasarı);

Yük arttıkça, elyaflarda kırılmalar meydana gelir. Elyaf kırılması, genellikle hasarın ilerlemesinde kritik bir aşamadır; zira elyafların yük taşıma kapasitesi aşıldığında oluşur ve ani dayanım kaybına yol açar (Caminero vd., 2016). Şekil 3.19’da elyaf hasarı şematik olarak görülmektedir.

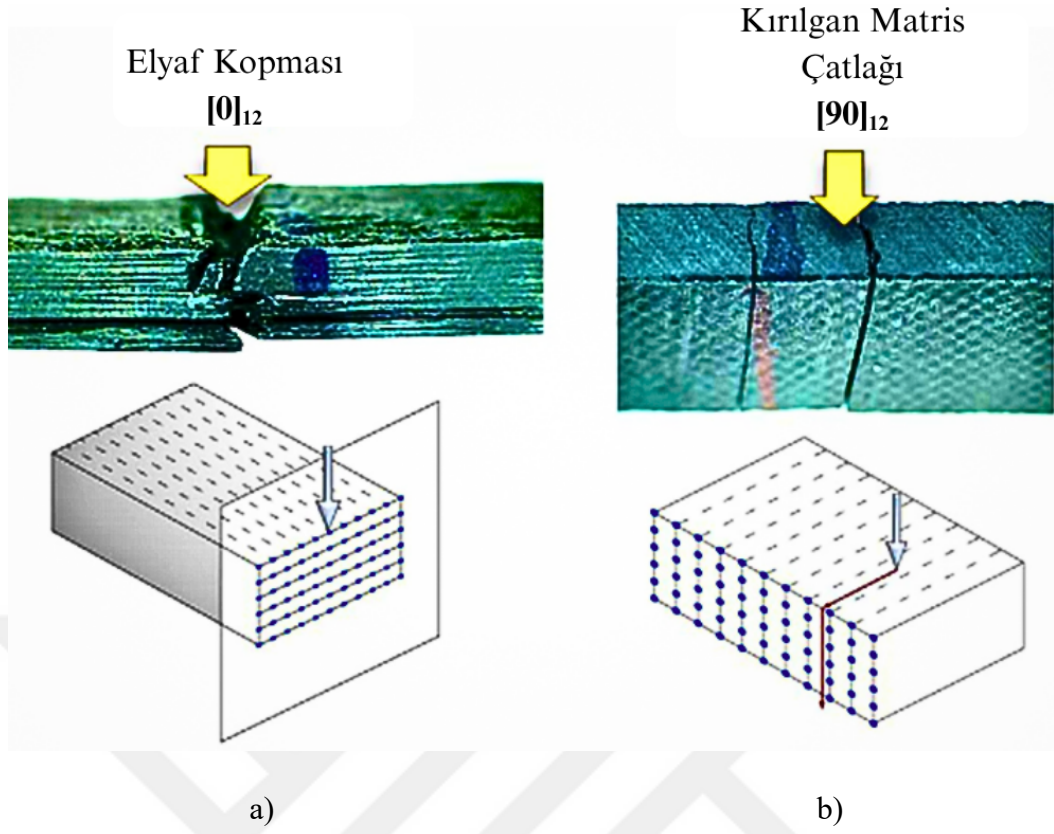


Şekil 3.19. Elyaf (kırılması) hasar mekanizması; tam anlamıyla gelişme gösteren çatlak mekanizmasının içinde görülen elyaf hasarı (Dassios, 2007).

Makroskobik Kırılma;

Kompozit malzemelerde makroskobik kırılma, malzemenin genel yapısında gözle görülebilen, büyük ölçekli çatlakların veya kırılmaların olduğu nihai bir hasar türüdür. Tüm bu hasar mekanizmalarının birleşimi, sonunda malzemenin tamamen kırılmasıyla sonuçlanır (Mortell vd., 2016).

Kırılma sırasında, malzemenin elastik enerjisi yeni oluşan çatlak yüzeylerine aktarılır ve bu süreç, makroskobik ölçekte enerji soğurumu ve çatlak ilerlemesiyle karakterizedir. Kırılma tokluğu, elastik modül ve kırılma yüzey enerjisi gibi makroskobik özellikler, malzemenin genel kırılma davranışını belirler (Bouché ve Akono, 2015). Darbe yüklemesi altında tek yönlü lamine kompozitlerin hasar mekanizmaları karşılaştırılması Şekil 3.20’de görülmektedir.



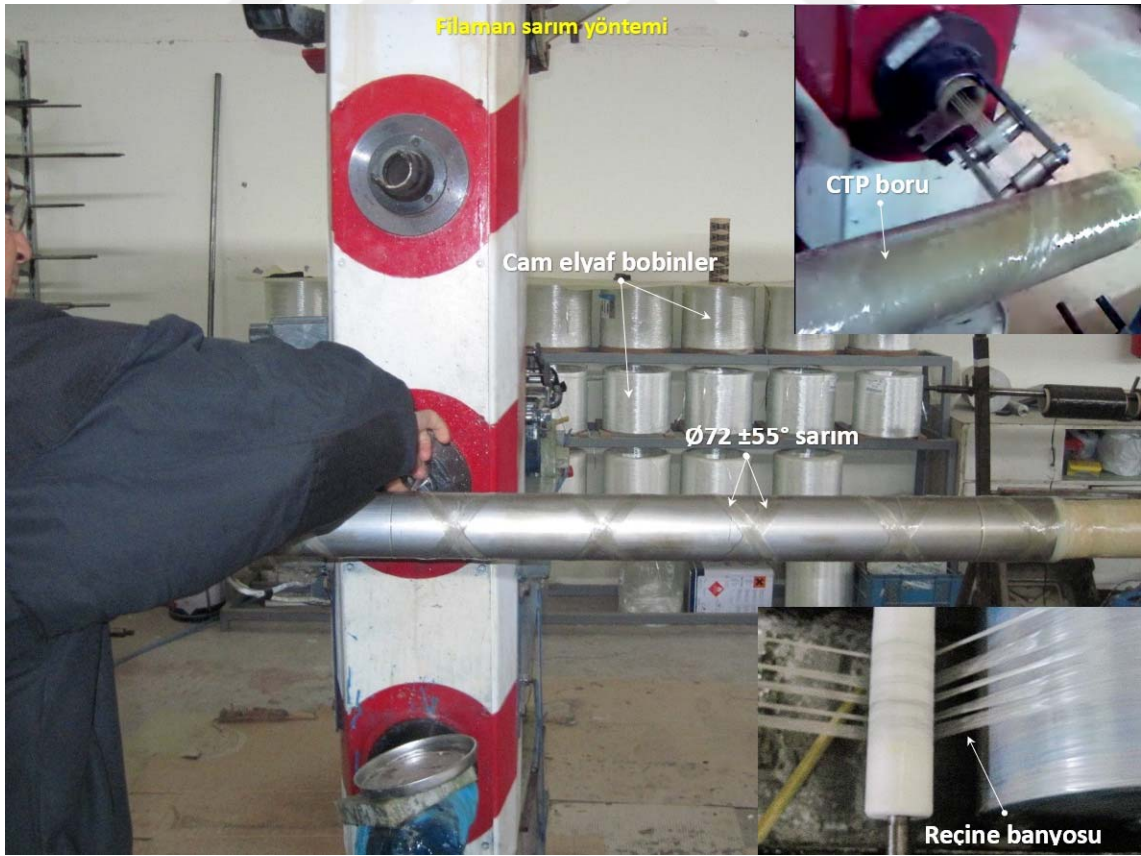
Şekil 3.20. Darbe yükü altında kompozitlerde hasar mekanizmaları; a) [0]₁₂ elyaf eksenindeki yüklemde elyaf kırılması b) [90]₁₂ elyaf eksenine dik yüklemde matris çatlağı (Caminero vd., 2016).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma için 54, 72 ve 96 iç çaplara sahip (± 55)₃ konfigürasyonunda CTP kompozit borular üretilmiştir. Üretilen CTP kompozit borular üzerinde boruların mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile 4 farklı deney yapılmıştır. Patlatma, halka çekme, yanal basma ve yakma testleri için ASTM standartlarına uygun numuneler hazırlanmıştır. Patlatma deneyleri iç çapa uygun malafa ve özel ekipmanlar kullanılarak yapılmıştır.

4.1. CTP Kompozit Boruların Üretimi

Cam elyaf/epoksi matrisli CTP boruların üretiminde, takviye malzemesi olarak Cam Elyaf San. A.Ş. tarafından üretilen 1200 teks (17 μm çaplı) E camı kullanılmıştır. Matris bileşeni olarak Momentive firmasına ait Bisphenol A temelli Epikote 828 epoksi reçinesi tercih edilmiş ve reçinenin sertleşmesi için ise Epikure 875 (modifiye karboksilik asit anhidrit esaslı bir kürlleme ajanı) kullanılmıştır. Üretim süreci, Şekil 4.1’de gösterilen filaman sarım tekniği kapsamında yaş sarım yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. CTP kompozit boruların filaman sarım yöntemi ile üretimi.

Cam elyafı, bobinlerden çekilip silindirlerden geçirilerek belirli bir gerginlikte reçine banyosuna yönlendirilmiştir. Elyafların reçine ile daha iyi emprenye edilmesi (ıslanabilmesi) ve reçinenin vikozeitesinin düşürülerek akışkan hale getirilmesi amacıyla, sarım işleminden önce mandrel (malafa), 150 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Reçine banyosundaki karışım sıcaklığı ise 60 °C’de sabit tutulmuştur. Ayrıca, mandrel yüzeylerine QZ-13 isimli kalıp ayırıcı uygulanarak yapışmayı önlemek hedeflenmiştir.

Üretimi tamamlanan CTP borular, malafalarıyla birlikte döner tip bir kurlama fırınına yerleştirilmiştir. Kurlama (sertleştirme) işlemi, ilk olarak 135 °C’de 2 saat, ardından 150 °C’de 2 saat olmak üzere iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malafaların çapları sırasıyla 54, 72 ve 96 mm’dir. Sarım işlemi sonucunda, 1 metre uzunluğunda ve 2,4 mm et kalınlığına sahip altı katmanlı borular üretilmiştir. Deneysel analizlerde kullanılmak üzere bu borular 155 mm uzunluğunda parçalara ayrılmıştır. Hem CTP boruların üretimi hem de fırınla kurlama süreçleri, İzmir’de faaliyet gösteren İzoreel Kompozit Malzemeler Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.’nin altyapısından faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretimde kullanılan cam elyafların ve epoksi matrisin özelliklerine ise Çizelge 4.1’de yer verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan elyafın ve matrisin özellikleri.

Malzeme	E (GPa)	$\sigma_{çek}$ (MPa)	Br ₂	I ₂
Elyaf: E-camı	73	2400	2,6	1,5-2
Matris: Epoksi Reçine	3,4	50-60	1,2	4-6

4.2. Yakma Testi

CTP borularda elyaf hacim oranının artması, genel olarak çekme, basma ve çevresel gerilme dayanımında artışa neden olurken; reçine fazı çatlağına, darbe dayanımına ve ara yüzey yapışmasına ait özellikleri doğrudan etkiler. Yakma testi, özellikle filaman sarım veya el yatırma yöntemi ile üretilen CTP borularda üretimden kaynaklanan reçine zenginliği, elyaf yoğunluğu değişimleri ve imalat hatalarının belirlenmesinde oldukça yararlıdır.

Çalışmada kullanılacak olan numunelerin elyaf hacim oranlarının belirlenmesi için $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip olan 3 farklı çapta (54, 72 ve 96 mm) CTP borulardan üç adet yakma deney numunesi kesilip, yakma testi için belirtilen standarta göre yakma testi yapılmıştır (ASTM-D2584-18, 2018). Numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile tartılmış ve her bir numunenin hacimleri tespit edilmiştir. Numuneler kalsinasyon fırınında, yüksek sıcaklık dayanımına sahip porselen krozelerin içine yerleştirilerek, ASTM D2584

standardına göre 565 ± 15 °C sıcaklığa kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 2 saat süreyle bekletilmiştir. Bu işlem sırasında termoset reçine fazı tamamen yanarak uzaklaştırılmış, geriye yalnızca cam elyafları kalmıştır. İşlem sonrası kalan elyaflar hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Önceden tartılan numunelerin kütlelerinden kalan elyafların kütlelerinin çıkarılması ile reçine kütlesi elde edilmiştir. Elyaf hacim oranı V_f 'yi elde etmek için Bağıntı 4.1'de verilen formül kullanılmaktadır. Bu bağıntıda; W_f ve W_c sırasıyla elyaf ile kompozitin kütlesini, ρ_f ve ρ_c ise elyaf ile kompozitin yoğunluğu olarak ifade edilir.

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_c/\rho_c} \quad (4.1.)$$

4.3. Statik İç Basınç Deneyleri

Statik iç basınç deneyleri, poisson oranının belirlenmesi ve statik iç basınç patlatma testinden oluşur.

4.3.1. Poisson oranının belirlenmesi

CTP kompozit borularda statik iç basınç testinde Poisson oranının (ν) 0,5'in üzerinde çıkması, aslında malzeme fiziği açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Teorik olarak izotropik malzemelerde Poisson oranı maksimum 0,5 değerini alabilir. Bu sınırın aşılması hacimsel genişlemenin negatif olacağı (malzemenin sıkıştırılmazlıktan daha öte davrandığı) anlamına gelir. Dolayısıyla ölçülen değerler doğrudan malzemenin gerçek fiziksel Poisson oranını yansıtmayabilir, fakat test koşulları, malzeme yapısı veya ölçüm yöntemiyle ilgili bazı etkilere kaynaklanır. Bu durumun olası nedenleri aşağıda sıralanmıştır;

Anizotropi ve Laminasyon Etkisi;

CTP borular genellikle çok katmanlı, anizotropik kompozit malzemelerdir. Elyafların sarım açısı (örneğin $\pm 55^\circ$, $\pm 45^\circ$, 90°) nedeniyle, klasik izotropik malzeme ilişkileri geçerli değildir; eğer elyaf yönü çevresel (hoop) yönde baskınsa, eksenel yönde ölçülen deformasyonlar beklenenden fazla olabilir. Böyle bir durumda, “etkin Poisson oranı” 0.5'in üzerinde görünür, ama bu makroskopik bir etkileşim sonucudur, gerçek fiziksel anlamda oluşan bir durum değildir (Daniel ve Ishai 2006).

Matris ve Elyaf Arasındaki Kayma (Shear) Etkisi;

Kompozitlerde matris ve elyaf arasında yük aktarımı tamamen doğrusal değildir. İç basınç altında, elyaflar çevresel yönde daha fazla yük taşıırken; matris eksenel yönde elastik olarak genişler. Bu iki bileşenin etkileşimi, ölçüm noktasında hacim koruma koşulunun sanki ihlal ediliyormuş gibi görünmesine yol açar (Tsai ve Hahn 1980).

Numunenin Geometrik Etkileri (Kalın Duvarlı Silindir Davranışı);

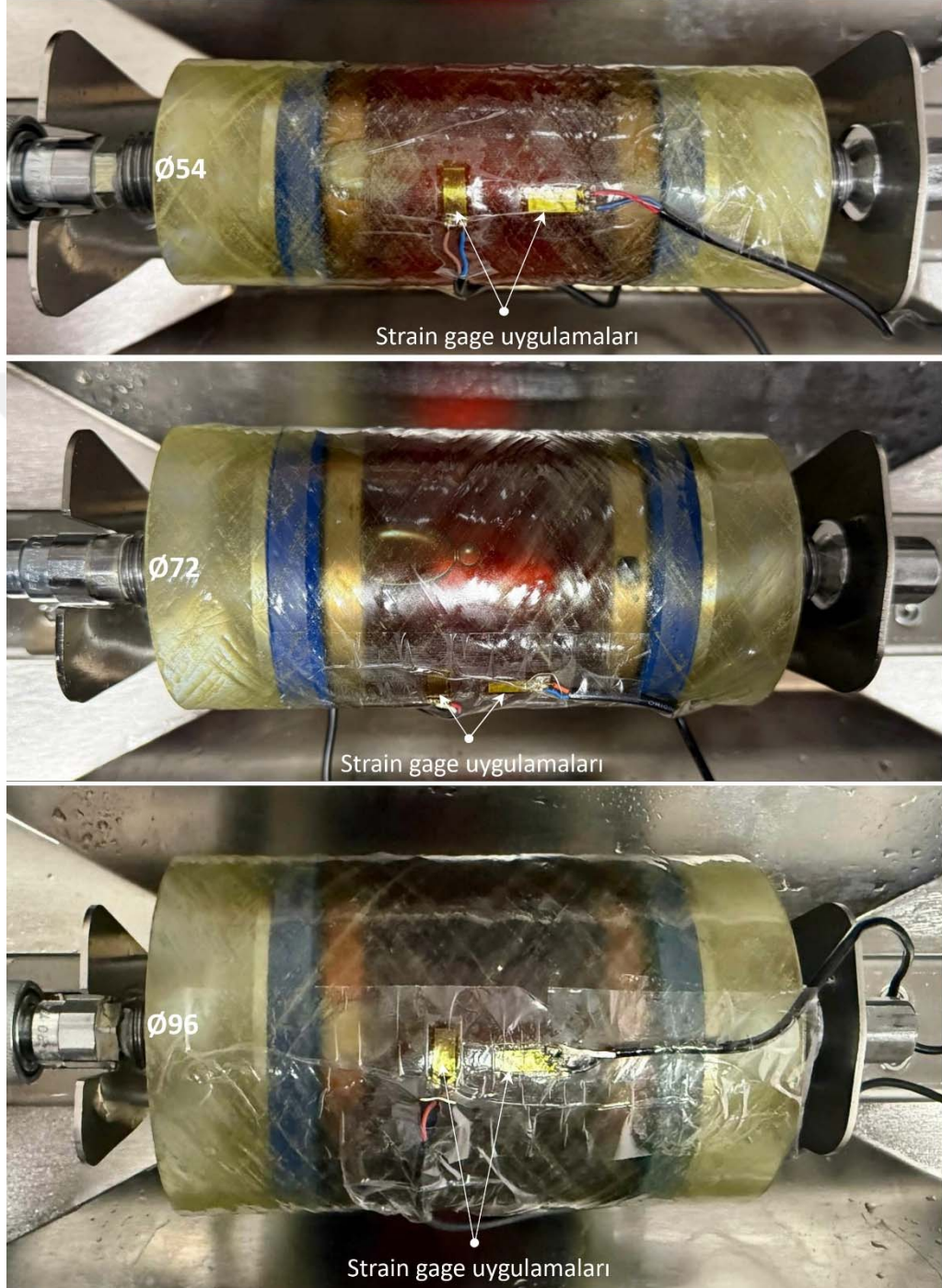
Poisson oranı genellikle ince cidarlı varsayım altında hesaplanırken, CTP boruların çoğunlukla kalın cidarlı olması nedeniyle çevresel ve radyal gerilmeler homojen dağılmaz. Bu durum ölçülen deformasyon oranlarında sapmaya yol açar (Lekhnitskii, 1968). CTP borularda ölçülen Poisson oranının 0.5'in üzerinde çıkması, malzemenin anizotropik yapısı, ölçüm yöntemindeki sistematik hatalar veya kalın duvar etkisi nedeniyle olur. Fiziksel olarak "hacimsel genleşme" anlamına gelmez; bu, etkin bir mekanik davranış göstergesidir.

Bu çalışmada veriler kaydedilerek microstrain-zaman grafiği elde edilmiştir. Bu yaklaşım, literatürdeki çalışmalarla uyumludur. CTP borularla ilgili çalışmalarda, poisson oranını tespit etmek için benzer bir hidrolik sistem ve veri toplama yazılımı kullanılmıştır (Shen ve ark, 2019). Çalışmada veriler, Şekil 4.2'de verilen Testbox veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Testbox cihazı 8 kanallı veri toplama sistemine sahiptir.



Şekil 4.2. Strain-gage verilerini almak için kullanılan Testbox veri toplama cihazı.

Genel olarak strain-gage'lerin aksenal ve teğetsel doğrultuda yapıştırılma konumları ve kompozit boruların malafa montajı sonrasında patlatma düzeneğine yerleştirilmiş görünüşleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Hasarsız deney numunelerine yapıştırılan strain-gage'ler ve boruların patlatma test cihazına bağlanması.

4.3.2. CTP boruların statik iç basınç patlatma testi

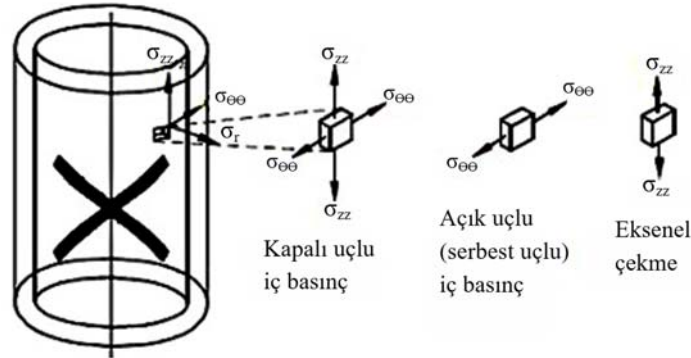
Statik iç basınç testi, boru numunesine içeriden yavaşça artan bir sıvı (genellikle su veya hidrolik yağ) basıncı uygulanarak, ANSI-AWWA C950 standardına göre belirli bir hızda nihai dayanım sınırına ulaşana kadar testin sürdüğü deneysel bir yöntemdir. Basınç, hidrolik pompa aracılığıyla numune iç hacmine aktarılır ve numunenin nihai patlama basıncı (burst pressure), elastik/plastik deformasyon sınırları, sızıntı veya kırılma mekanizmaları gözlemlenir.

Şekil 4.4.'te ince cidarlı bir borunun üzerindeki sonsuz küçük bir dV hacim elemanına etki eden kuvvetler ve aynı borunun eksenel çekme, kapalı uçlu iç basınç ve açık uçlu iç basınç yükü altında olması halinde gerilme durumu şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde açık uçlu sistemlerdeki teğetsel gerilmenin yönü görülmektedir. Bu gerilme de Denklem 4.3.'te verildiği gibi hesaplanır.

$$\sigma_{zz} = Pr / 2t \quad (4.2.)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = Pr / t \quad (4.3.)$$

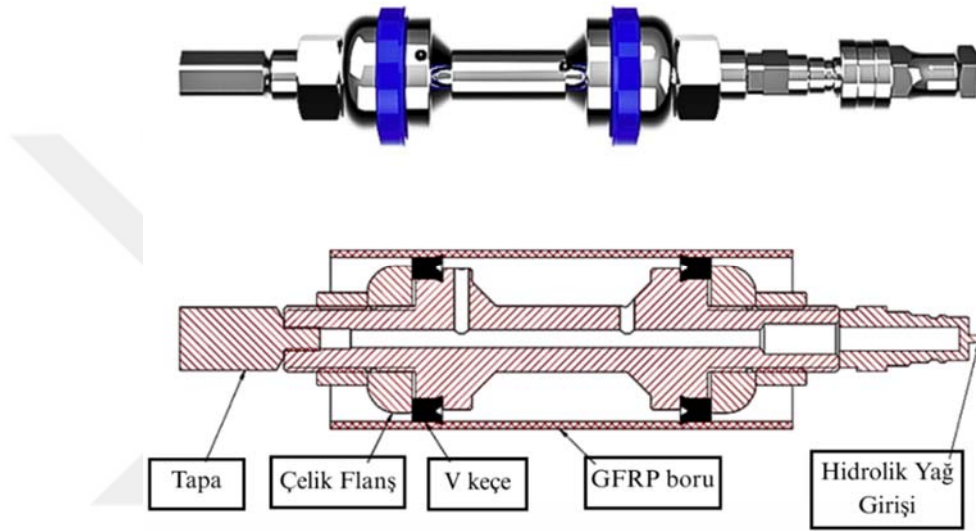
Burada σ_{zz} eksenel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ ise teğetsel gerilmeyi belirtirken t et kalınlığı, r boru yarıçapı ve p ise boruya uygulanan iç basınç olarak ifade edilir.



Şekil 4.4. İç basınç sonucu ince cidarlı boruda oluşan gerilmeler (Samancı 2004).

Filaman sarım yöntemiyle, üç farklı çapta üretilen CTP kompozit boru numunelerinin, patlatma testleri öncesinde aynı nominal et kalınlığına sahip olduklarından emin olmak için çap kontrolleri yapılmıştır. Numunelerin üretiminde elyaf hacim oranı (V_f), reçine türü ve sarım açısı sabitlenerek yalnızca boru çapının değişiminin mekanik performans üzerindeki etkisi izole bir şekilde incelenebilmiştir. Her numune, patlatma testinden önce görsel olarak çatlak, delaminasyon veya üretim hatası gibi

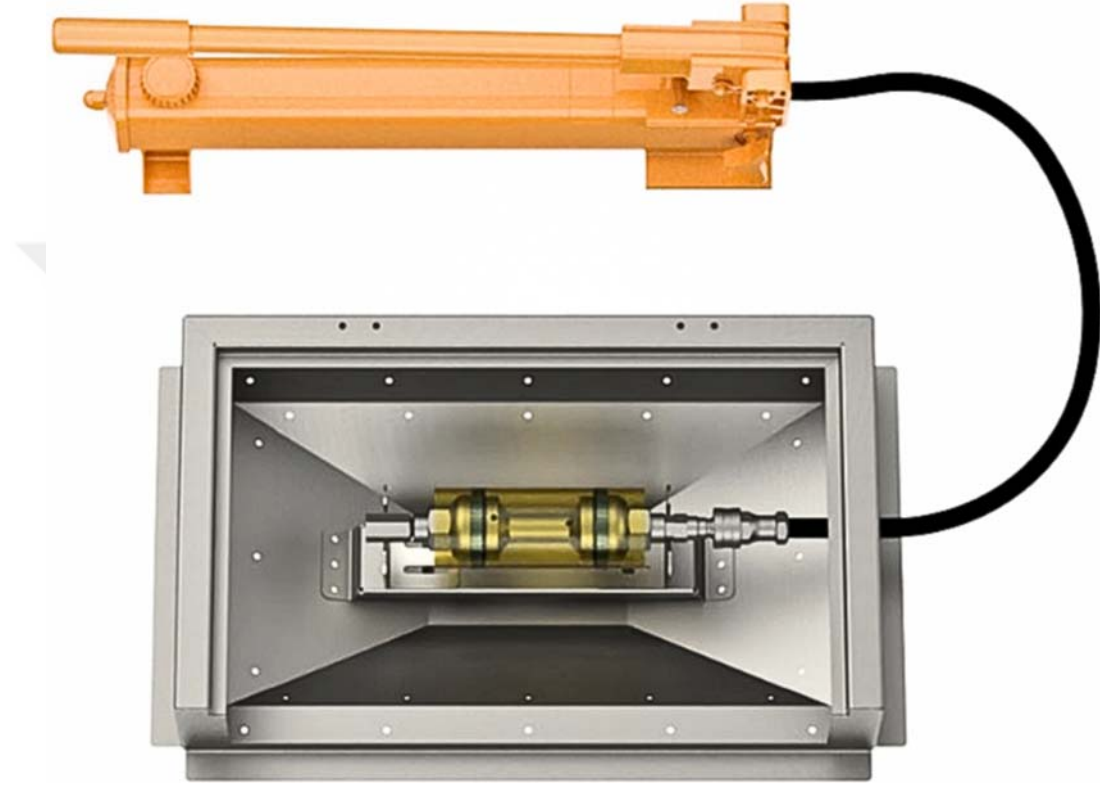
kusurlar açısından kontrol edilmiştir. Kusurlu numuneler deney dışında bırakılmış, homojen ve üretim standartlarına uygun örnekler testte kullanılmıştır. Her çaptaki numunelere özel üretilen deney aparatlarının numunelere montajları yapılmış ve uç kısımları özel contalarla sızdırmaz hale getirilerek, test düzeneğinde iç basınç uygulanabilir duruma getirilmiştir. Deneyde kullanılan test aparatları Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu hazırlık aşamaları ve deneyde uygulanan tüm prosedürler, ASTM D1599 standardında tanımlanan "Burst Pressure of Plastic Pipe" prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir (ASTM D1599-14, 2014).



Şekil 4.5. CTP kompozit boruların patlama testlerinde kullanılan aparatlar.

Hidrolik patlatma testleri için Şekil 4.6'da görülen, özel olarak tasarlanıp üretilen bir deney düzeneği kullanılmıştır. Düzenek, yüksek basınca dayanıklı çelik hazne, hidrolik pompa, manometre ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Hidrolik sistem, iç basıncın numuneye eşit ve sürekli olarak aktarılabilmesini sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Basınç uygulaması sırasında sıvı transferini sağlayan hortumlar ve bağlantı parçaları, 1000 bar'a kadar dayanıklılık göstermektedir. Sistem içerisindeki basınç değişimleri, manometre aracılığıyla algılanmakta ve bu veriler kayıt altına alınmaktadır. Tüm boru numunelerinin içi tamamen hidrolik yağ ile doldurularak, hidrolik pompa yardımıyla basınç uygulanmıştır. Uygulanan iç basınç, doğrusal (lineer) bir artış prensibiyle, yaklaşık bir dakika içerisinde nihai patlama seviyesine ulaşacak şekilde ayarlanmıştır. Bu süreçte basınç artışı sabit hızda ve manuel olarak kontrollü bir biçimde sağlanmıştır. Test sırasında uygulanan basınç manometre ile anlık olarak gözlemlenmiş ve yüksek çözünürlüklü kamera ile kaydedilmiştir. Deneydeki temel amaç, numunelerin

basınç altında elastik bölgede şekil değişimi, plastik bölgede oluşan hasar modları ve oluşan yoğun hasar mekanizmalarının etkisi ile aniden kırılmaya yol açan kritik iç basınç değerinin belirlenmesidir. Literatürde benzer bir yöntemle yapılan çalışmada, lineer basınç artış hızının, patlama basıncının doğru ölçülebilmesi açısından önemi belirtmiş ve deney süresince sabit basınç artışı sağlanmasının önemini vurgulamıştır (Spencer ve Hull, 1978).



Şekil 4.6. CTP kompozit boruların patlama testinde kullanılan test düzeneği.

Elde edilen basınca bağlı gerinim (strain) verileri gerçek zamanlı olarak kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Bu analizler ışığında, zamana karşı basınç değişimleri grafiksel olarak ifade edilmiştir. Bu grafiklerde gözlemlenen ani düşüş noktası, borunun patlama anını temsil etmektedir. Patlama anı sonrası kayıt alımı sonlandırılmış ve bu değer maksimum iç basınç olarak kaydedilmiştir. Elde edilen patlama basıncı verileri, deney tekrarlanabilirliği açısından her çap için en az üç tekrar ile doğrulanmıştır. Bu yaklaşım, ASTM ve ISO standartlarına uygun olarak veri güvenilirliğini artırmak adına tercih edilmiştir (ISO 1167-1:2006, 2006). Literatürde, deneysel tasarımlarında veri toplama sistemlerinin kullanımının ölçüm doğruluğu açısından büyük avantaj sağladığı raporlanmıştır (Gemi, 2014).

Tüm deneyler sonrasında hasarlı numunelerin, hasar bölgelerinden optik mikroskop (Keyence VHX900F) aracılığıyla yüksek çözünürlüklü fotoğraflar alınıp mikro görseller elde edilerek incelenmiştir. Optik mikroskop ve incelenen deney numunesi Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Patlatma numunesinin optik mikroskopta incelenmesi.

4.4. Halka Çekme Testi

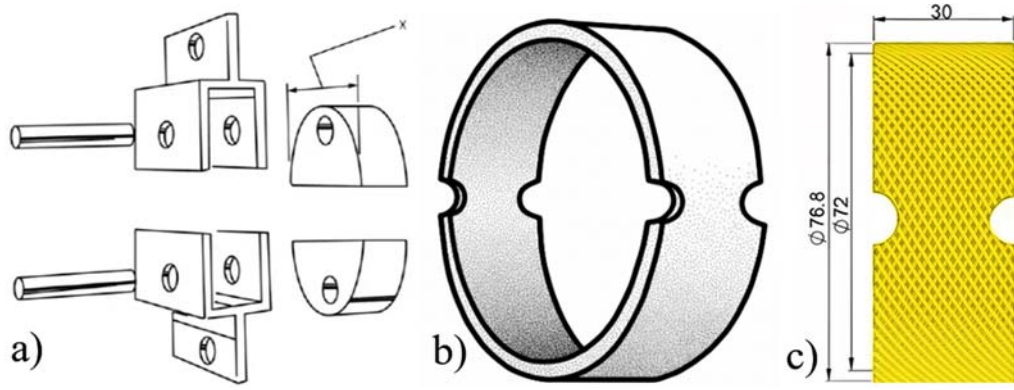
CTP kompozit borularla yapılan uygulamalarda, yapının çevresel (hoop) yöndeki mekanik dayanımı kritik bir parametre olduğundan, bu özelliği test eden yöntemlerin geliştirilmesi mühendislik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu ihtiyaca yönelik olarak, statik iç basınç deneyi gibi halka çekme deneyi de kompozit boruların dayanımlarının test edilmesi için geliştirilen etkili yöntemlerden biridir. Bu testte, boru eksenine dik şekilde kesilen halka şeklindeki numune, halka çekme aparatı ile içten dışa doğru çevresel (hoop) yönde çekilir ve kopma dayanımı değerlendirilir. Üretim yöntemine bakılmaksızın, CTP kompozit borular için uygulanan halka çekme testlerinde ASTM D2290 test standardı, bu testin uygulama prosedürünü ve aparat geometrisini tanımlayan en yaygın referanstır (ASTM D2290-16, 2016).

Halka şeklindeki numunelere doğrudan aksenal yük uygulandığında, bu yük sadece çekme değil aynı zamanda düzleşmeye bağlı olarak eğilme (bending)

gerilmelerine de neden olur. ASTM D2290 standartının önerdiği test aparatı ve numunede oluşturulan kritik kesit, bu istenmeyen eğilme etkisini en aza indirmek için tasarlanmıştır. Çekme aparatı deney numunelerini neredeyse tam olarak kavrayarak eksenel yükün malzemeye hoop yönünde etkimesine yardımcı olur. ASTM D2290 standardında verilen aparat Şekil 4.8a’da görülmektedir.

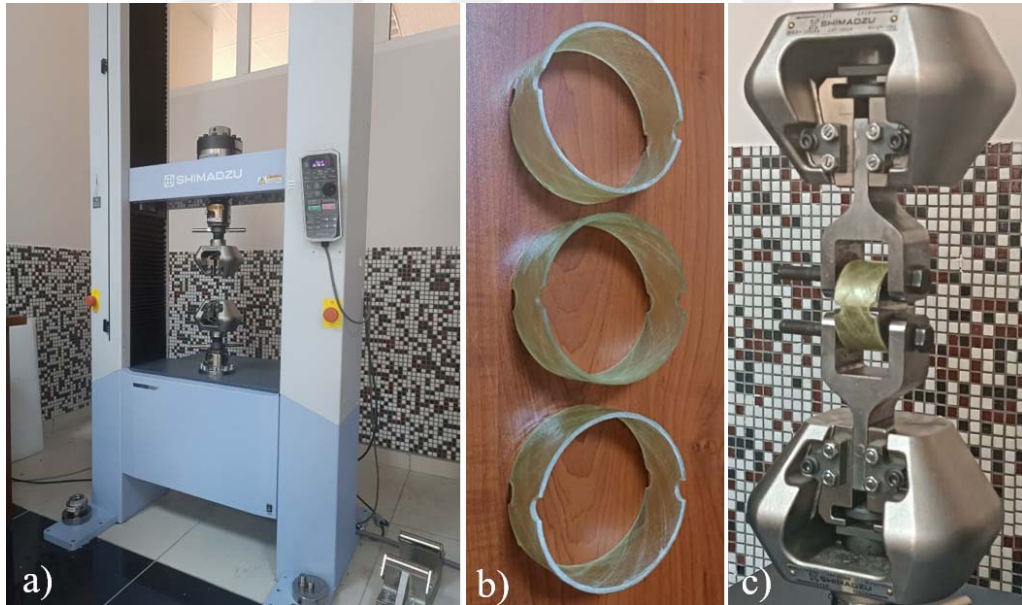
Deneyde kullanılacak aparatlar ve tutucular, standartta belirtilen geometriye ve numune ölçülerine uygun olarak üretilmiştir. Aparatların standartla uyumlu olması için yüksek mukavemet ve işlenebilme özelliğine sahip olan AISI 1045 çelik kullanılarak üretilmiştir. Numunelere zarar vermesini engellemek için yarım ay şeklindeki aparat parçalarının keskin köşeleri alınarak yuvarlatılmıştır. Bu çalışmada, statik basınç testinde kullanılan numuneler ile aynı çaplarda ve et kalınlıklarındaki malzemeler çekme testinde de kullanıldı. Numuneler standartta belirtilen deney prosedürleri ve malzeme boyları baz alınarak, belirlenen ölçülerde kesilip hazırlandı. Boru numunelerine açılan yarım daire şeklindeki yarı (çentik/daraltılmış bölge), testin güvenilirliği ve çevresel çekme dayanımının doğru ölçülebilmesi açısından kritik bir rol üstlenir. Bu kesit, genellikle test numunesinin halka biçiminde hazırlanmasından sonra açılır ve “Split-Disk method” çerçevesinde değerlendirilir. Halka şeklindeki numunede homojen çevresel gerilme elde edilmesi zordur. Bu nedenle, daraltılmış bölge numunenin belirli bir noktasına gerilme yoğunluğu (stress concentration) oluşturur. Bu amaçla açılan yarı, numunenin kontrollü bir şekilde aynı noktadan kırılmasını sağlar. ASTM D2290 standardı, bu kritik kesitin geometrisini ve konumunu tanımlar. Bu sayede farklı laboratuvarlarda yapılan testlerin karşılaştırılabilir olmasını sağlar. Daraltılmış bölgenin genişliği, derinliği, açıldığı yön, numunenin merkezine göre konumu, belirli toleranslar içinde olmalıdır. Bu standardizasyon, elde edilen verilerin bilimsel anlamda geçerliliğini artırır. Numunelere açılan kritik kesit ASTM D2290 standardında belirtildiği üzere Şekil 4.8b’de görülmektedir.

Prosedür A için test numunesi halkaları, her çap için standart ölçülerde elyaf takviyeli termoset reçineli borudan herhangi bir araç vasıtasıyla eşit kalınlıklarda kesilmelidir. Daraltılmış kesitler 180° aralıklar ile açılmalıdır (ASTM-D2290-16, 2016). Çalışmada kullanılan tüm numunelerin boyları sabit (30 mm) olarak hazırlanmıştır. İç çapları üç farklı ölçüde (Ø54, Ø72, Ø96 mm) iken, et kalınlıkları 2,4 mm şeklindedir. Numuneler, Şekil 4.8c’de halka çekme testi için hazırlanan Ø72 numune görülmektedir.



Şekil 4.8. Halka çekme testi numuneleri; a) Halka çekme testinde kullanılan çekme aparatları b) Numunede açılan daraltılmış bölgeler (ASTM D2290-16, 2016) c) Halka çekme testi için tasarlanan Ø72 deney numunesi.

Halka çekme testinin uygulanışı Şekil 4.9’da görülmektedir. Test için Şekil 4.9a’da görülen 100 kN kapasiteli SHIMADZU üniversal test cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.9b’de halka çekme testi için hazırlanmış numuneler verilmiştir. Şekil 4.9c’de aparatlara monte edilmiş ve çekme tezgâhına bağlanmış numune görülmektedir.

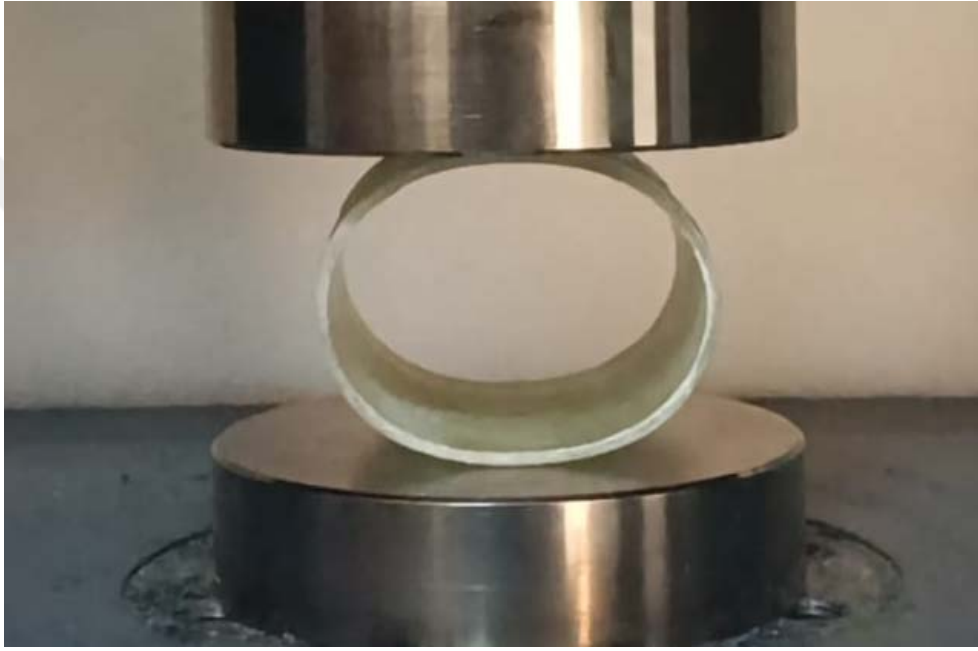


Şekil 4.9. Halka çekme testinin uygulanışı; a) 100 kN kapasiteli SHIMADZU üniversal test cihazı, b) Test numuneleri, c) Montajı hazırlanmış test numunesi.

4.5. Radyal Basma Testi

Kompozit malzemelere uygulanan radyal basma testleri (compressive ring loading), malzemenin radyal (çevresel) yükler altındaki davranışını belirlemek ve anlamak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Radyal basma testi, boruların gerçek

kullanım koşullarında karşılaşılabileceği çevresel sıkıştırma kuvvetlerine karşı dayanımını belirlemek; malzeme davranışını (doğrusal olmayan deformasyon, çatlak oluşumu ve kırılma modları) analiz etmek amacıyla, ASTM D2412 standardına göre uygulanır ve boru numunelerinin radyal yöndeki mekanik özelliklerini tanımlamak için kullanılır (ASTM D2412-21, 2021). Numuneler iki düzlemsel çelik plaka arasında olmak üzere düzenlenen bir deney mekanizması içerisine, Şekil 4.10’da görüldüğü gibi yerleştirilir (Li ve ark, 2020). Basma deneyleri için 100 kN kapasiteli SHIMADZU üniversal test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.10. İki düzlemsel çelik plaka arasına yerleştirilen basma numunesi.

Tüm numunelerin boyları çaplarıyla aynı olacak şekilde sabitlenmiş, iç çapları ise üç farklı grupta ($\varnothing 54$, $\varnothing 72$, $\varnothing 96$ mm) sınıflandırılmıştır. Et kalınlığı tüm gruplarda 2,4 mm olarak sabitlenmiş böylece çap/kalınlık oranının radyal yükleme altındaki etkisi bu sabitlik üzerinden izole bir şekilde değerlendirilmiştir. Numunelerin kesim boyutları ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, patlatma testinde olduğu gibi numune deneylerinin 3 farklı çapta gerçekleştirilmesi karar verilmiştir. Numuneler literatür bilgileri doğrultusunda çapları ve boyları aynı olacak şekilde hassas kesim işlemlerinden geçirilmiş; kenarları döner disk zımpara ile sulu şekilde zımparalanarak düzeltilmiştir. Numuneler, kesim işlemi sonrasında optik inceleme ve yüzey kontrolü ile değerlendirilerek herhangi bir ön hasar, mikro çatlak veya tabaka ayrılması

içermediğinden emin olunarak düzgün numuneler alınmıştır. Her bir çap grubu için 3 tekrar uygulanarak istatistiksel güvenilirlik sağlanmıştır.

Shimadzu AGS-X 100kN basma test cihazı ile testler gerçekleştirilmeden önce iç çap, et kalınlığı (t) ve genişlik değerleri cihaza tanımlanmıştır. Daha sonra çap büyüklüklerine göre belirlenen sıra dikkate alınarak basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler için, çaplarına göre nihai sıkıştırma sınırı belirlenerek (çapın %70'i oranında deformasyon öngörülerek) radyal yükleme değeri cihaza tanımlanmıştır. Basma işlemi esnasında, hareketli plakanın uyguladığı yüke karşılık gelen yer değiştirme (deformasyon) verileri sistem tarafından kaydedilmiştir.

Servo hız kontrollü üniversal deney cihazında gerçekleştirilen deneyde, radyal basma kuvveti 12,5 mm/dk sabit hızda (yer değiştirme hızı) üst plaka aracılığıyla uygulanmış ve numune nihai göçmeye (ultimate failure) ulaşana kadar test sürdürülmüştür (ASTM D2412-21, 2021). Numuneler, burulma veya eğilme etkisinden kaçınılacak şekilde sabitlenmiş ve eksen kaçıklığı (misalignment) oluşmaması için, yük plakasının orta noktasına dikkatlice hizalanmıştır. Deneyler sırasında hiçbir şekilde eksenel kayma ya da yük dağılımı dengesizliği gözlemlenmemiştir. Deney boyunca uygulanan kuvvet ve karşılık gelen yer değiştirme değerleri, cihazın dijital veri toplama sistemi üzerinden sürekli olarak izlenmiş ve kaydedilmiştir. Yükleme sırasında yük-deformasyon eğrileri gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Deney esnasında numunenin deformasyonu, lineer değişim gösterdiği ilk elastik bölgede dikkatle izlenmiş, sonrasında ani rijitlik kaybı, çatlak oluşumu veya delaminasyon gibi kritik hasar modları tespit edilmiştir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. CTP Boruların Yakma Testi Sonuçları

Bu çalışmada, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip ve altı tabakadan oluşan kompozit boruların elyaf hacim oranlarının belirlenmesi amacıyla ASTM D2584-18 standardına uygun olarak yakma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu deneysel yöntem, kompozit malzemelerdeki matris ve elyaf bileşenlerinin ayrıştırılmasına olanak tanıyarak, elyaf miktarının hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamaktadır.

Deneysel süreçte, belirlenen standartlara göre hazırlanan numuneler kontrollü bir ortamda yakılarak matris malzemesi uzaklaştırılmış ve geriye kalan elyaf miktarı üzerinden hacim oranları hesaplanmıştır. Şekil 5.1’de, yakma işlemi gerçekleştirilen deney numuneleri görsel olarak sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, CTP kompozit borular için elyaf hacim oranları (V_f) Ø54, Ø72 ve Ø96 mm ölçülerindeki numuneler için sırasıyla 0,53, 0,55 ve 0,54 olarak belirlenmiştir.



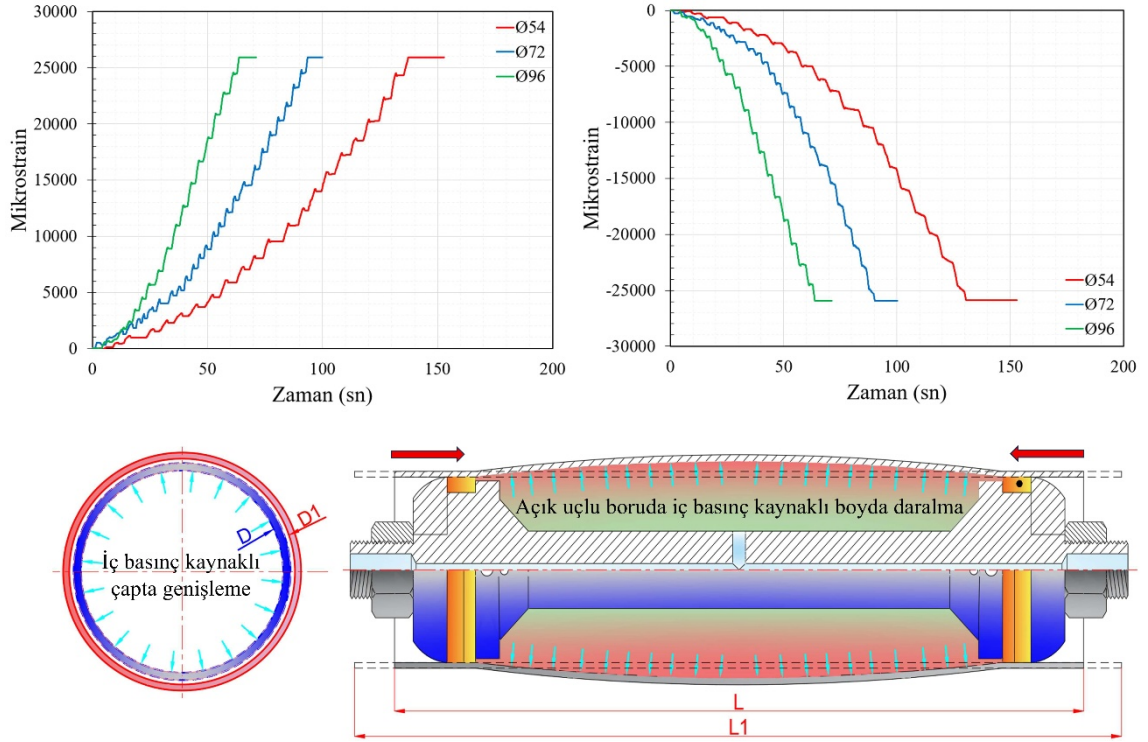
Şekil 5.1. Farklı çaplardaki CTP borulara uygulanan yakma testi sonrasındaki görüntüler.

5.2. CTP Boruların Statik İç Basınç Testlerinin Sonuçları

5.2.1. Poisson oranı test sonuçları

Poisson oranı, Strain-gage deneyleri sonucunda elde edilen veriler ışığında çizilen microstrain-zaman grafiği aşağıda Şekil 5.2’de verilmiştir. Aynı şekilde, Şekil 5.2’de iç basınç altındaki kompozit borunun eksenel ve çevresel (radyal) yöndeki şekil değişimleri şematik olarak gösterilmiştir. Deneysel çalışma sonrasında, Şekil 5.2’deki microstrain-zaman verileri kullanılarak her üç farklı çaptaki boruya ait Poisson oranları (ν) hesaplanmıştır. Elde edilen Poisson (ν) değerleri; 54, 72 ve 96 mm iç çaplı borularda sırasıyla 0,772, 0,834 ve 0,989 olarak bulunmuştur. Poisson ve patlatma deneylerinin

sonuçları birlikte incelendiğinde; düşük çaptaki ($\varnothing 54$) kompozit borularda iç basıncın etkisiyle çevresel (radyal) yönde çap artışı gerçekleşirken, eksenel yöndeki kısılmanın (daralmanın) daha az olduğu gözlenmiştir. Boru çapının artışı ile radyal yöndeki çap artışı ve eksenel yöndeki kısılmaların birbirine yaklaştığı tespit edilmiştir. Özellikle en büyük çaplı ($\varnothing 96$) kompozit boruda eksenel ve çevresel gerinim değerlerinin birbirine yakın seyretmesinden dolayı Poisson oranı 0,989 olarak tespit edilmiştir.



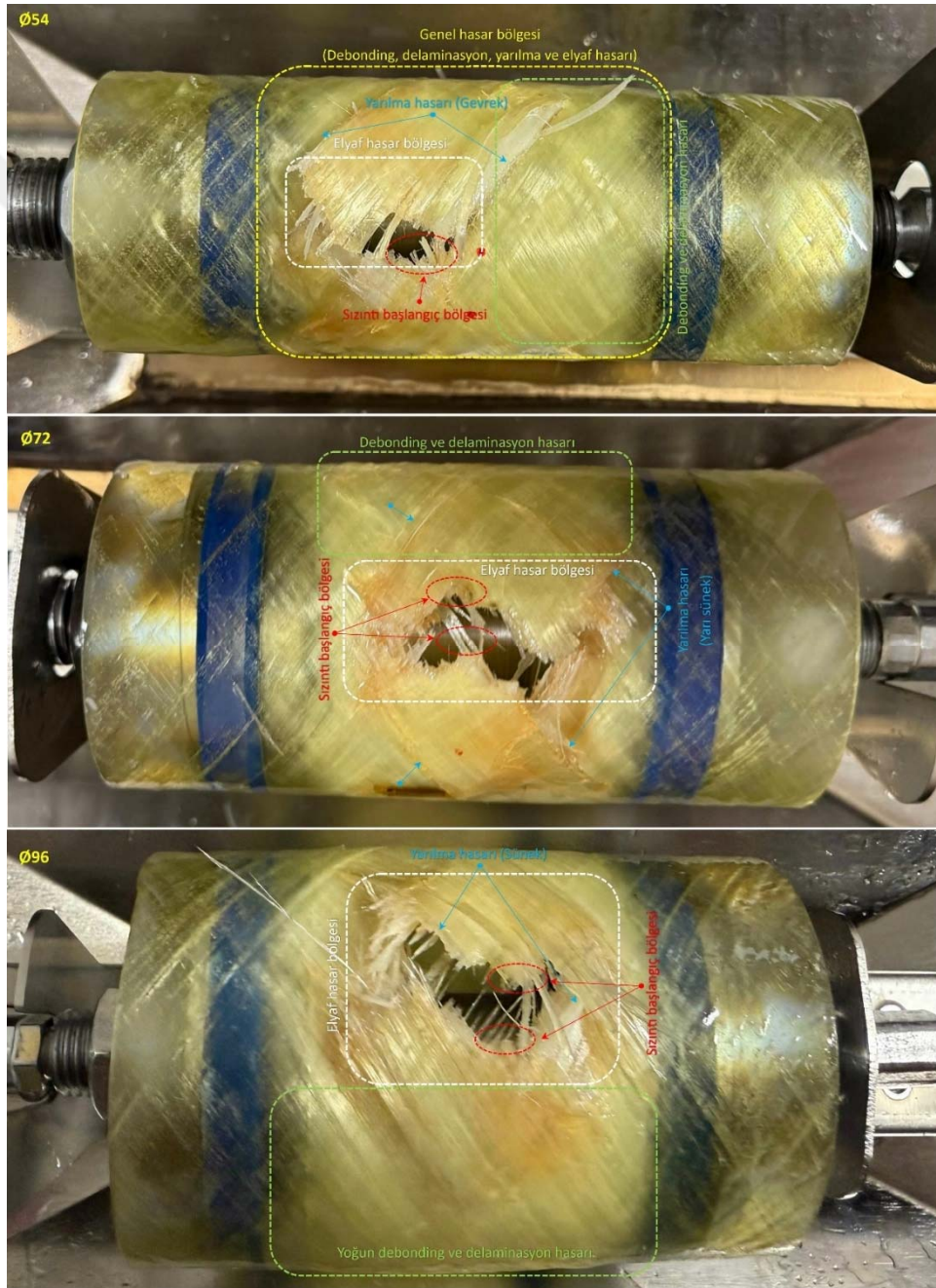
Şekil 5.2. Strain-gage deneyi; elde edilen microstrain-zaman grafiği ve numunelerde basınç artışıyla oluşan çap genişlemesinin şematik gösterimi.

5.2.2. CTP boruların statik iç basınç patlatma test sonuçları

Bu çalışmada farklı iç çaplara sahip ($\varnothing 54$, $\varnothing 72$ ve $\varnothing 96$ mm) ve 2,4 mm et kalınlığında cam takviyeli plastik (CTP) borular üzerinde statik iç basınç altında patlatma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, boruların iç basınca karşı gösterdiği mekanik davranışlar, beyazlaşma hasarı (whitening), matris bütünlüğü ve nihai patlama süreçleri gözlemlenerek değerlendirilmiştir. Deney bulguları, beyazlaşma, kayma gerilmeleri, delaminasyon süreçleri ve nihai kopma (rupture) davranışları gibi hasar modları üzerinden literatürdeki mevcut bilgilerle karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Üç farklı CTP kompozit borunun statik iç basınç patlama testi esnasında, iç basınç etkisiyle $\pm 55^\circ$ sarım yönünde teğetsel yön değiştirme eğilimi gözlenmiştir. Bu

yönlenmeler sonucunda, elyaf demetlerinin kesişim noktalarda kayma ve basma gerilmeleri meydana gelmiştir. Numunelerde çevresel genişleme oluşarak çaplarında artış ve boylarında kısalma oluşmuştur. Bu durum, kompozit yapılarda yük altında gözlenen klasik Poisson etkisi ile açıklanabilir (Daniel ve Ishai, 2006). Elyaf demetlerinin kesişim noktalarında oluşan kayma ve basma gerilmeleri, artan iç basınca paralel olarak yoğunluk kazanmış; bu da yerel deformasyon bölgelerinde mikro düzeyde hasar birikimine yol açmıştır. Açık uçlu deney numunelerinde patlama sonrası görüntüler, basınç artışıyla oluşan çap genişlemesi ve boy kısalması Şekil 5.3'te görülmektedir.

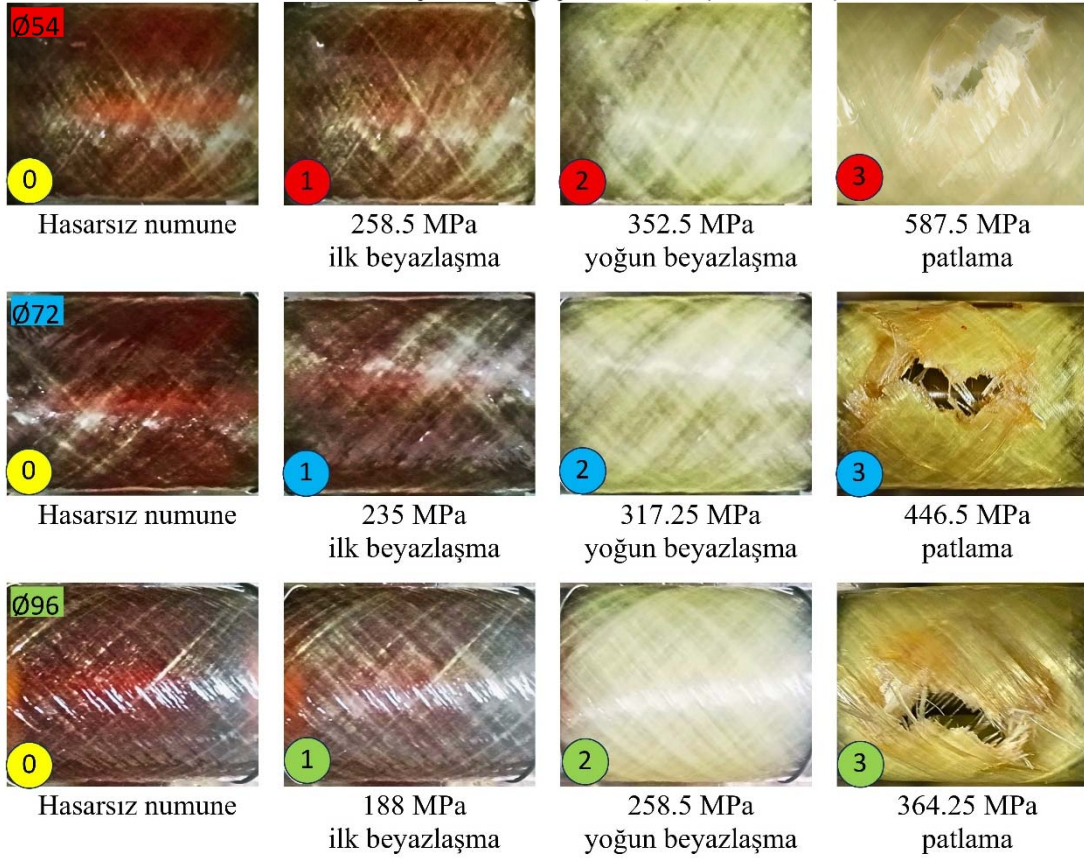
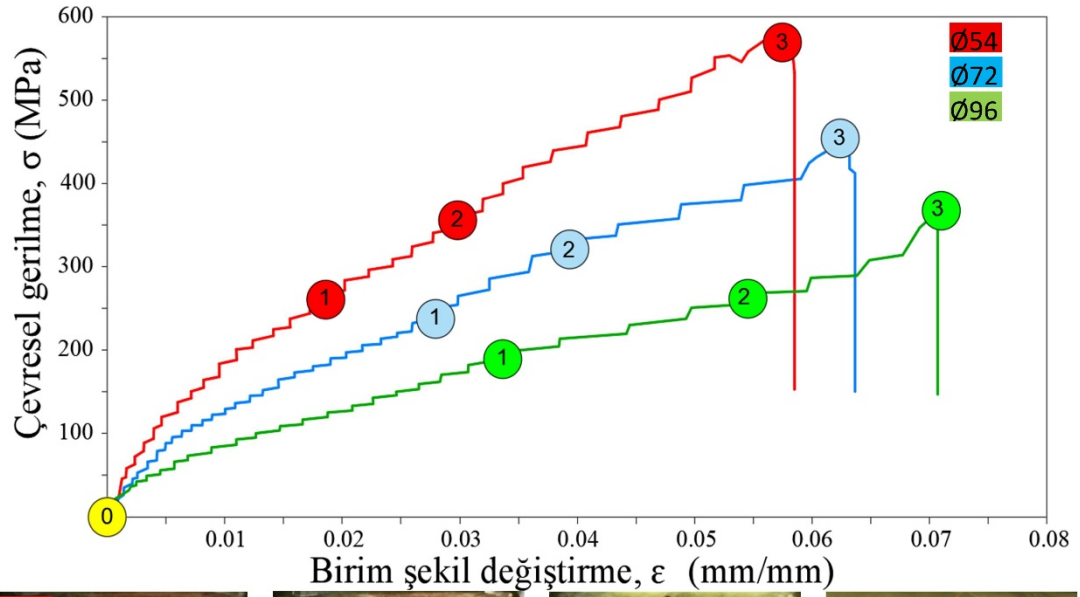


Şekil 5.3. Farklı çaplardaki boruların iç basınç patlatma testi sonrası görüntüleri.

Bu durum Şekil 5.4'teki gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinden de anlaşıldığı üzere Ø54, Ø72 ve Ø96 mm borularda patlama mukavemetlerinin sırasıyla 587,5, 446,5 ve 364,25 MPa şeklinde oluşan sonuçlarla desteklenmektedir.

CTP kompozit boruların statik iç basınç patlama testi esnasında numunelerde meydana gelen hasar gelişimi tespit edilmiş ve gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ayrıntılı olarak Şekil 5.4'te verilmiştir. Grafikte beraber CTP numunelerinin statik iç basınç patlama testinden elde edilen başlıca hasar modları belirlenmiş ve gerilme-birim şekil değiştirme grafiği üzerinde işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 5.4'te verilen grafik ve hasar gelişimi ayrıntılı olarak incelendiğinde; ilk beyazlaşma (debonding), yoğun beyazlaşma (debonding ve delaminasyon) ve nihai patlama hasar gerilme değerlerinde çap atışıyla beraber düşüş meydana geldiği görülmüştür.

Statik iç basınç testinde iç basıncın etkisiyle boru çapında çevresel genişleme ve boru boyunda eksenel kısalma meydana gelmiş; bu durum $\pm 55^\circ$ açı ile sarılan elyaf demetlerinin teğetsel doğrultuya yaklaşmasına neden olmuştur. Bunun sonucunda da elyafa dik olan çekme gerilmeleri ile elyafa paralel olan kayma gerilmelerini oluşturmuştur. Bu gerilmeler neticesinde matris malzemede mikro çatlaklar oluşmaya başlamış; bu da ilk hasar belirtisi olarak görülen elyaf-matris ayrılmasına (debonding) yol açmıştır. Bu hasar aşaması ince beyaz çizgilerin oluşmaya başlaması ile fark edilmiştir. Basıncın artırılmasıyla birlikte bu beyaz çizgilerin yoğunluğu artmış; beyazlaşmanın ardından tekil elyaf kopmaları gerçekleşirken, çıkan akustik emisyon (sesler) sayesinde nihai patlama gerilmesine yaklaşıldığı anlaşılmıştır. Patlama anına yaklaştıkça elyaf kopmalarının seslerinin sayısında da artışlar meydana gelmiştir. Teğetsel (çevresel) gerilme değerleri maksimum seviyelere ulaştığında, yoğun beyazlaşmanın ve çatlak oluşumunun yoğunlaştığı bölgeden şiddetli bir patlama ile nihai hasar gerçekleşmiştir. Bazı CTP numunelerinde az miktarda terleme görülse de su jetine rastlanmamıştır.



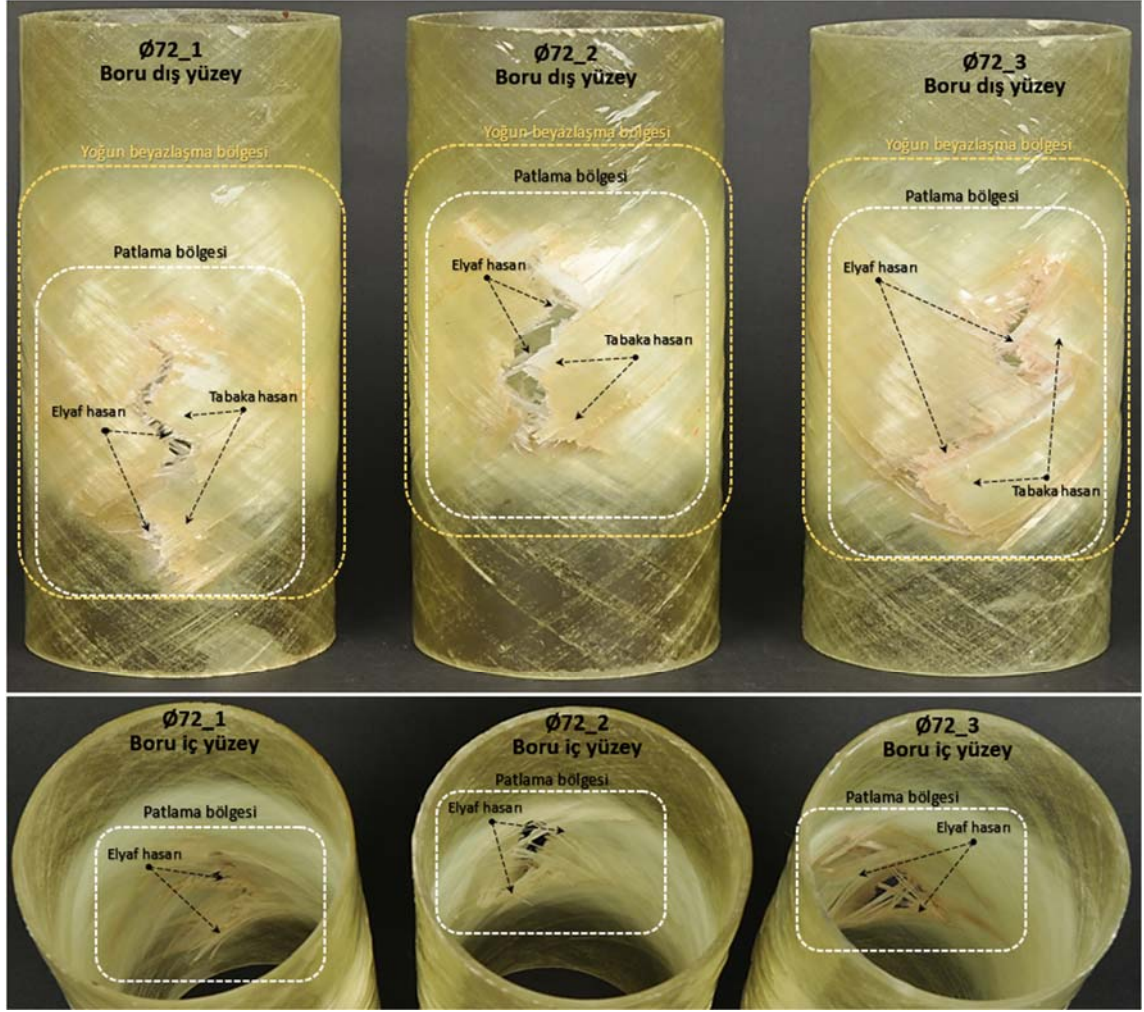
Şekil 5.4. CTP kompozit numunelerin patlatma testinde hasar gelişimi; çevresel gerilme-birim şekil değiştirme grafiği ve statik patlama testi sırasında görülen başlıca hasar modları.

Ayrıca Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilen kompozit borular üzerinde makro hasar bölgelerinin analizleri yapılmıştır. Her üç boruda da hasar mekanizmaları basınçlı yağın nüfuz ettiği sızdırmazlık keçelerinin arasında kalan bölgede gerçekleşmiştir. Borularda debonding, delaminasyon, yarılma ve elyaf kırılması gibi

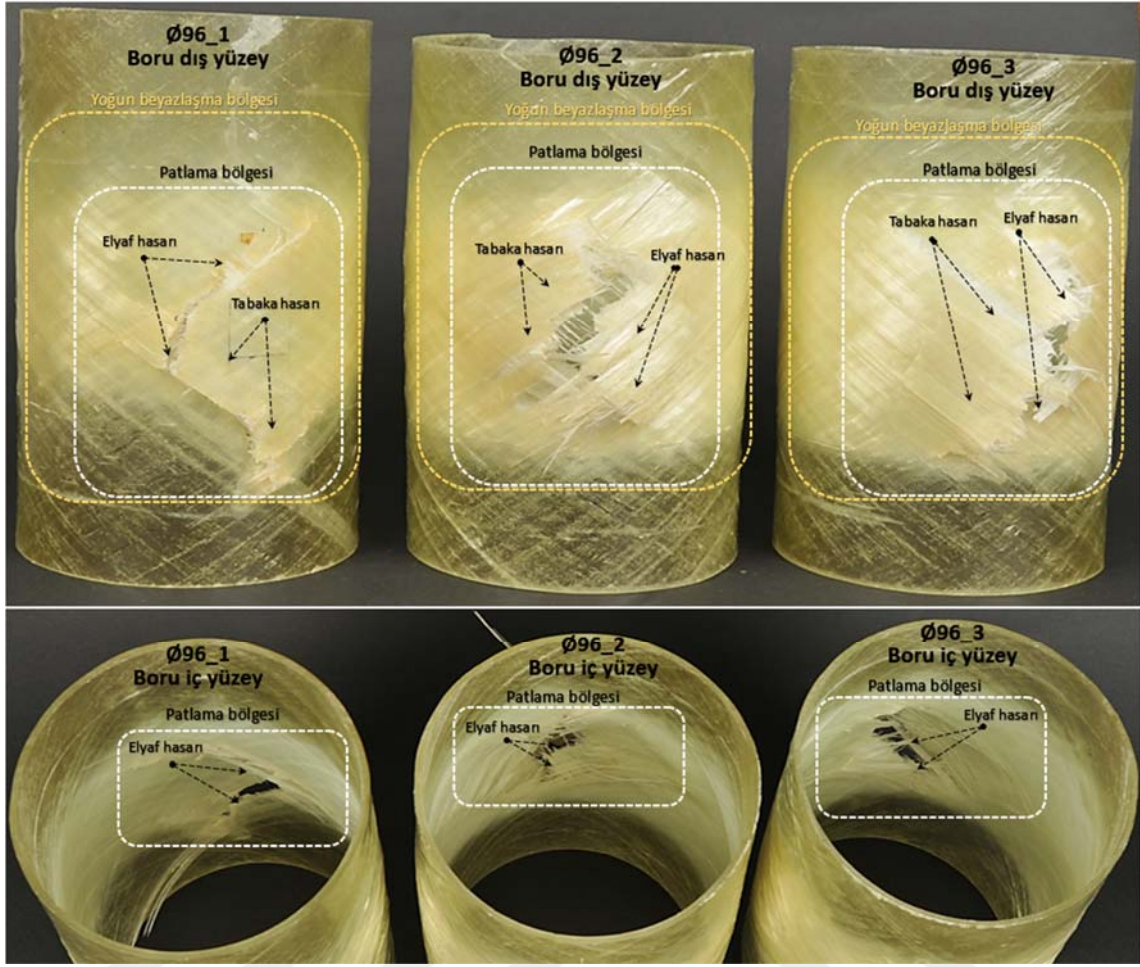
hasar modları gözlenmiştir; çap artışıyla beraber söz konusu hasar modlarının yoğunluğunda farklar gözlemlenmiştir. Küçük çaplı boruda ($\varnothing 54$) şekil değişiminin az olmasından dolayı sonuç hasarı gevrek kırılma şeklinde oluşurken, çap artışıyla beraber sünek kırılma şeklindeki hasar gelişimine döndüğü gözlenmiştir. Her üç boruda da yoğun beyazlaşma bölgelerinde $\pm$ elyaf kesişim noktalarında sızıntı başlangıcı ile patlama gerçekleşmiş; çap artışına paralel olarak oluşan patlama şiddetinin azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5. Ø54 CTP kompozit borularda patlatma testi sonrası makro hasar analizleri.



Şekil 5.6. Ø72 CTP kompozit borularda patlatma testi sonrası makro hasar analizleri.

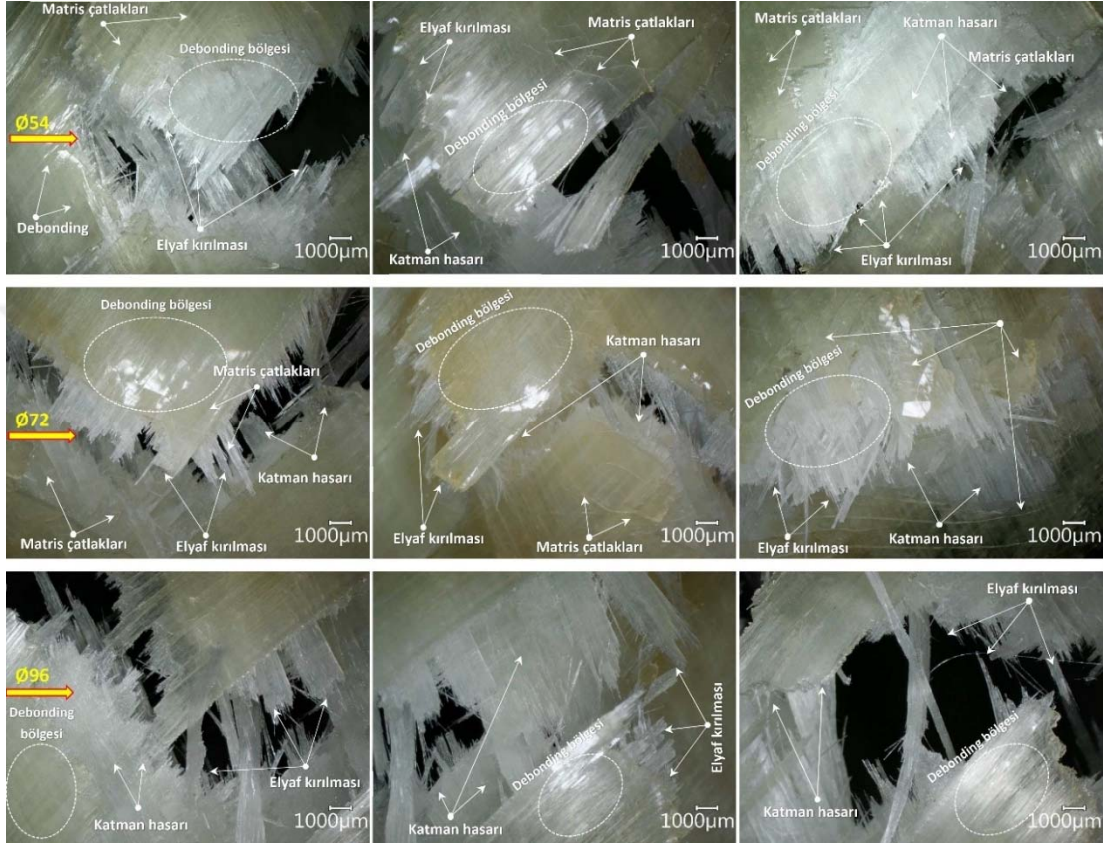


Şekil 5.7. Ø96 CTP kompozit borularda patlatma testi sonrası makro hasar analizleri.

Her üç çapta da patlatma deneyi sonrası patlama bölgelerinde micro hasar analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 5.8’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 5.8. incelendiğinde nihai patlama noktalarının yoğun beyazlaşma (debonding) bölgelerinde meydana geldiği görülmüştür. Patlama bölgeleri incelendiğinde çap artışıyla beraber delaminasyon hasar modlarında da artış olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, oluşan elyaf kırılmaları ve elyaf çekilmelerinin çap artışıyla azaldığı belirlenmiştir. Çap artışına bağlı olarak artan şekil değiştirme (gerinim) miktarıyla birlikte, patlama hasar bölgesinin alansal yayılımının da arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 5.1’de, ASTM D 1599 standardına göre yapılan serbest uçlu farklı çaplardaki CTP borulara ait statik iç basınç deney sonuçları ve malzeme sabitleri sunulmuştur. Nihai hasar basıncına ait teğetsel hasar gerilmesi ise Denklem 4.3 yardımıyla hesaplanmıştır. CTP borularda “lineersizliğin başladığı teğetsel gerilme”, malzemenin mekanik olarak elastik doğrusal (lineer) davranıştan sapmaya başladığı noktadaki çevresel (hoop) gerilme değerini ifade eder. Bu gerilme değeri, malzemenin

elastik davranışının son bulduğu, mekanik davranışın doğrusal olmaktan çıktığı (Hooke Kanunu'nun geçerliliğini yitirdiği) ve ilk beyazlaşmanın gözlemlendiği gerilme seviyesidir. Bu kavram, kompozit malzeme mekaniğinde elasto-lineer olmayan geçiş bölgesi olarak değerlendirilir ve özellikle basınç, çekme ve patlatma testleri gibi deneysel çalışmalarda çok önemlidir.



Şekil 5.8. CTP kompozit numunelerin statik patlama testi sonrası mikro hasar analizi.

Çizelge 5.1. Farklı çaplardaki serbest uçlu CTP boruların iç basınç deney sonuçları.

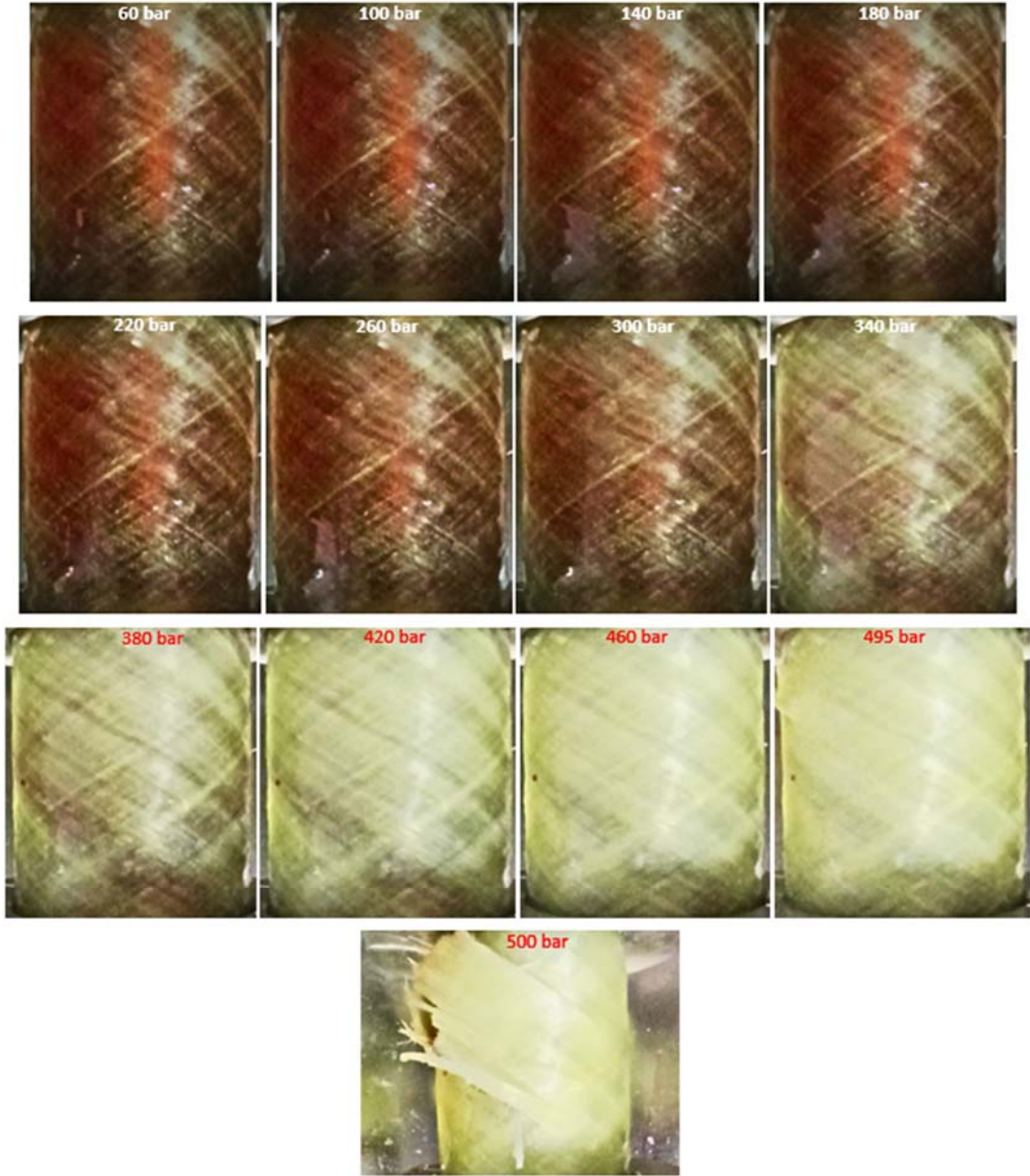
CTP Boru Çapları	Ø54	Ø72	Ø96
Teğetsel Hasar Gerilmesi (MPa)	587,5	446,5	364,25
Yoğun Beyazlaşma Teğetsel Gerilmesi (MPa)	352,5	317,25	258,5
Lineersizliğin Başladığı Teğetsel Gerilme (MPa)	258,5	235	188
Poisson Oranı	0,772	0,834	0,989

En küçük numune olan Ø54 mm borunun statik iç basınç deneyi esnasında, iç basınç pompa vasıtasıyla artırıldıkça gerilme değerleri yükselmiş ve 258,5 MPa civarında (≈ 220 Bar) bu gerilmelerin etkisiyle numunede elyaf doğrultusunda ince çizgiler halinde ilk beyazlaşmalar (debonding) meydana gelmiştir. Bu beyaz çizgiler, cam elyaf ile reçine matrisi arasındaki bağın zayıfladığını ve ara yüzey ayrılımlarının başladığını işaret etmektedir. İlk beyazlaşmanın ardından numunelerde geri döndürülemez (irreversible)

hasarlar oluşmuştur. Bu tür beyazlaşma, literatürde mikroskobik delaminasyonların öncüsü olarak tanımlanmaktadır (Bunsell vd., 2008). Elyaf-matris etkileşim bölgelerindeki bağ zayıflamaları, ilerleyen basınçla birlikte daha geniş alanlara yayılmış ve makroskobik düzeyde delaminasyonlarla beraber yoğun beyazlaşma oluşmaya başlamıştır. Deney sürecinin devamında beyazlaşma hızlı bir şekilde devam etmiş, 300 bar basınç seviyesinde numune çevresel olarak tamamen beyazlaşmış, elyafların büyük çoğunluğu matristen ayrılmış ve malzeme bütünlüğü ciddi oranda zedelenmiştir. Tam beyazlaşmanın meydana geldiği 352,5 MPa civarındaki gerilme değerinde (≈ 300 Bar) gerilme değerinde numunenin çapında oluşan artış net bir şekilde gözlemlenebilmiştir.

Delaminasyon ve ara yüzey ayrılmaları ilerledikçe, özellikle matris reçinesinin daha zayıf olduğu bölgelerde tabakalar arasında çatlaklar meydana gelmiş ve bu durum deney sırasında akustik emisyon (çatlama sesleri) olarak kaydedilmiştir. Bu gözlem, matris yoğunluğunun hasar mekanizmaları üzerindeki belirleyici etkisine işaret etmektedir. Reçine dağılımının homojen olmaması, lokal zayıf bölgelerin oluşmasına ve bu bölgelerde hasarın odaklanmasına neden olmuştur. Nihai patlama öncesi 581,63 MPa civarındaki gerilme değerine (≈ 495 Bar) ulaşıldığında, elyaf-matris ayrılmasının tamamlandığı ve elyaf kopmalarının başladığı gözlemlenmiştir. Son durumda, 587,5 MPa (≈ 500 bar) nihai patlama gerilme değerine ulaşılmasıyla, numunede ani bir patlama meydana gelerek, büyük bir gürültüyle yarıma (burst) gerçekleşmiştir. Borudaki yarıma, elyaf kesişim noktalarında yoğunlaşan hasar bölgelerinde oluşan sızıntı başlangıç noktasından itibaren, $\pm 55^\circ$ sarım açıları doğrultusunda ilerleyen elyaf kırılmalarıyla birlikte oluşmuştur.

Gözlemler, serbest uçlu CTP borularda iç basınca karşı en büyük gerilmenin çevresel (teğetsel) yönde oluştuğunu ve bu durumun hasarın eksenel yönde başlamasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Patlama, başlangıçta eksenel yönde ilerlemiş, ardından elyaf sarım açısına ($\pm 55^\circ$) paralel bir şekilde yayılmış ve borunun yapısal bütünlüğünü tamamen yitirmesine yol açmıştır. Bu durum, iç basınca maruz kalan silindirik kompozit yapılarda eksenel yönde çatlak ilerlemesinin yaygın olduğunu ortaya koyan çalışmalarla örtüşmektedir (Kara vd., 2014). Numunelerin statik iç basınç patlama deneyi esnasında terleme ve su jeti oluşmamıştır. Statik iç basınç patlama testi sonucunda Ø54 boruda oluşan hasar gelişimi Şekil 5.9'da görülmektedir. Hasar bölgesi incelendiğinde, malzemede oluşan nihai gerilmelere bağlı elyaf-matris ayrılmasının (debonding) malzemenin son dayanım noktasını oluşturduğu ve bunun sonucunda şiddetli bir patlama meydana geldiği açıkça anlaşılmaktadır.

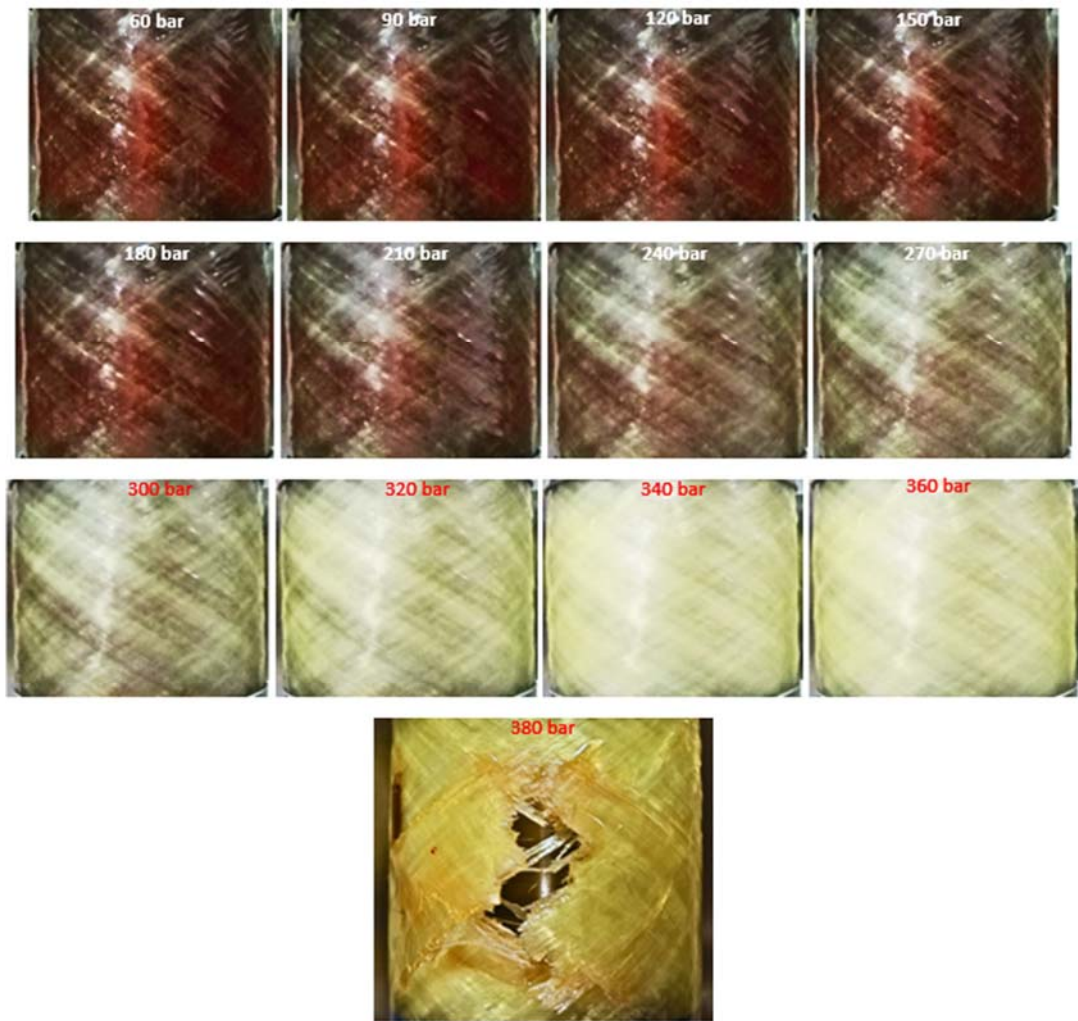


Şekil 5.9. Ø54 CTP borunun patlatma testinde farklı gerilmelerdeki hasar gelişimi.

Orta çaplı numuneye (Ø72) uygulanan statik iç basınç patlatma deneyi esnasında, iç basınç artırılmış ve gerilme değerleri 235 MPa civarında (≈ 200 Bar) bu gerilmelerin etkisiyle numunede ilk beyazlaşmalar (debonding) meydana gelmiştir. İlerleyen basınçla birlikte, makroskobik düzeyde yoğunlaşan delaminasyonlara paralel olarak yoğun beyazlaşma oluşmaya başlamış; 317,25 MPa civarındaki gerilme değerinde (≈ 270 Bar) numune çevresel olarak tamamen beyazlaşmıştır. Elyaf lar matr isten ayrı larak malzeme bütünlüğü bozulmuş ve 352,5 MPa gerilme değerinde (≈ 300 Bar) numunenin çap artışı hızlanmıştır. Matris reçinesinin zayıf olduğu bölgelerde tabakalar arasında çatlaklar oluşmuş ve deney sırasında akustik emisyon (çatlama sesleri) duyulmuştur. 434,75 MPa

civarındaki gerilme değerine (≈ 370 Bar) ulaşıldığında çap artışı ve boyda daralma (eksenel kısalma) net bir şekilde gözlemlenmiştir. Numunede elyaf-matris ayrılmalarının ve elyaf kopmalarının hızlanmasıyla, $\pm 55^\circ$ sarım açılarının kesişim noktalarında ilk sızıntı oluşmuş; sonuçta 446,5 MPa (≈ 380 Bar) nihai patlama gerilmesi değerinde gürültülü bir patlama meydana gelerek yarılmıştır.

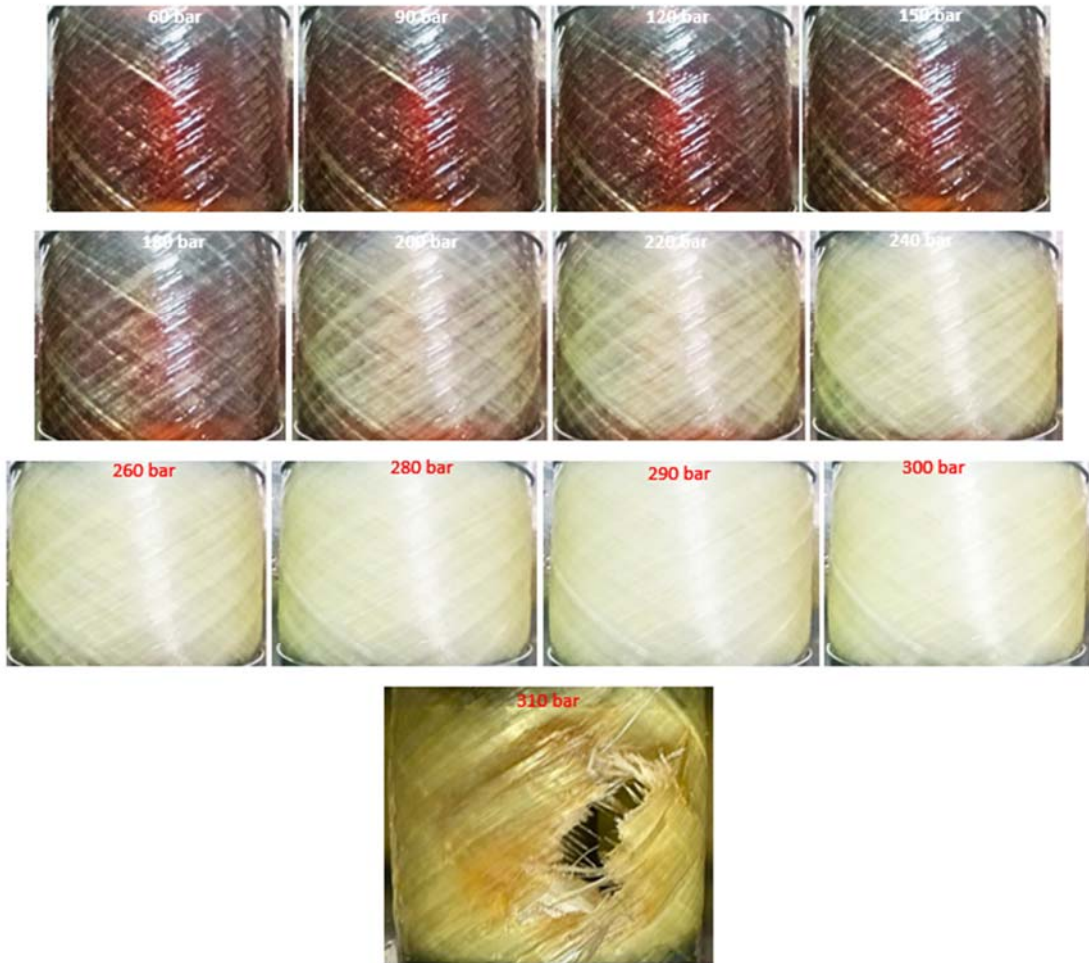
Patlamanın yönü, eksenel yönden başlayıp, elyaf sarım açılarına paralel bir şekilde ilerlemiş ve borunun yapısal bütünlüğü tamamen bozulmuştur. Numunelerin statik iç basınç patlama deneyi esnasında terleme ve su jeti oluşmamıştır. Statik iç basınç patlama testi sonucunda Ø72 boruda oluşan hasar gelişimi Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Ø72 CTP borunun patlatma testinde farklı gerilmelerdeki hasar gelişimi.

En büyük çaplı (Ø96) numuneye uygulanan statik iç basınç deneyi esnasında, iç basınç artırılmış ve gerilme değerleri 211,5 MPa civarında (≈ 180 Bar) debonding meydana gelerek beyazlaşma başlamıştır. Basınç artışına paralel olarak beyazlaşma artarak, 258,5 MPa gerilme seviyesinde (≈ 220 Bar) numune çevresel olarak tamamen

beyazlaşmıştır. Elyaf- matris ayrılması yoğunlaşmış ve 305,5 MPa gerilme seviyesinde (≈ 260 Bar) numunenin çap artışı hızlanmıştır. Çap artışına bağlı olarak numune totalinde oluşan şekil değişiminin (gerinim) etkisi ile tabakalar arasında delaminasyon gerçekleşmiştir. Bu bölgelerde, 352,5 MPa gerilme değerinde (≈ 300 Bar) tabaka içi radyal çatlaklar ve tabakalar arasında çatlamlar (delaminasyon ilerlemesi) oluşmuştur. Bu basınca ulaşıldığında çap artışı (çevresel genişleme) ve boyda daralma (eksenel kısalma) net bir şekilde gözlemlenmiş ve az miktarda terleme tespit edilmiştir. Numunede elyaf-matris ayrılmaları ve elyaf kopmalarının hızlanmasıyla, $\pm 55^\circ$ sarım açıları doğrultularında damlacık şeklinde ilk sızıntı oluşmuş; 364,25 MPa gerilme seviyesinde (≈ 310 Bar) nihai patlama şiddetli bir şekilde gerçekleşerek elyaf doğrultularında yarıлма şeklinde sonuç hasarı meydana gelmiştir. Patlama yönü, diğer çaplarda olduğu gibi eksenel yönden başlayıp, elyaf sarım açlarına paralel bir şekilde ilerlemiş ve borunun yapısal bütünlüğü tamamen bozulmuştur. Statik iç basınç patlama testi sonucunda Ø96 boruda oluşan hasar gelişimi Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11. Ø96 CTP borunun patlatma testinde farklı gerilmelerdeki hasar gelişimi.

Deneyde incelenen üç farklı çaptaki CTP borunun hasar gelişiminin benzer olduğu, ancak çap arttıkça nihai patlama basıncında belirgin bir düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, teorik olarak çevresel (teğetsel) gerilmenin çapla birlikte artmasından kaynaklanmaktadır. İnce cidarlı silindirik basınç kabı teorisine göre, teğetsel gerilme formülü $\sigma_{\theta\theta} = Pr / t$ ile ifade edilir. Bu formülde, çap (ve dolayısıyla yarıçap) arttıkça aynı cidar kalınlığı altında daha büyük gerilmeler oluşur. Numunelerde büyük çaplı borulara geçildiğinde, daha düşük gerilme ve basınç seviyelerinde patlama meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tüm numunelerde elyafların ($\pm 55^\circ$) sarım açısının yapıya belirli bir eksenel ve çevresel rijitlik kazandırdığını görülmektedir. Ancak bu sarım açısı, yüksek iç basınç etkisi altında oluşan kayma gerilmelerine karşı daha hassas davranarak elyaf-matris etkileşim bölgelerinde hasar başlangıcında negatif rol üstlenmiştir. Literatürde de bu sarım açısına sahip kompozit yapılarda benzer delaminasyon ve kopma davranışlarının gözlemlendiği bildirilmiştir (Kara vd., 2021).

Elde edilen bulgular, CTP boruların yüksek iç basınçlara karşı yüksek dayanım sergilediği, ancak belirli bir yükleme sınırından sonra mikroskobik hasar modlarının hızla makroskobik yıkıma dönüştüğünü ortaya koymuştur. Bu çalışma, boru çapı, et kalınlığı, elyaf sarım açısı ve matris homojenliği gibi parametrelerin, CTP yapıların iç basınca karşı mekanik performansı üzerindeki kritik etkilerini açıkça göstermektedir.

5.3. CTP Boruların Halka Çekme Test Sonuçları

Bu çalışmada, patlatma test sonuçlarıyla karşılaştırma yapmak amacıyla Ø54, Ø72 ve Ø96 mm boru numunelerine çevresel (radyal) yönde halka çekme testi uygulanmıştır. Aynı üretim parametreleriyle (sabit et kalınlığı, elyaf tipi, reçine hacim oranı ve sarım açısı) imal edilen CTP boruların mekanik davranışları incelenmiştir. Deneylerin ardından elde edilen veriler ve çekilen hasar görüntüleri incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Üç tekrarlı olarak gerçekleştirilen deneylerde tüm hasarların daraltılmış bölgelerde (kritik kesit) oluşması sağlanmıştır. Böylece, boru çapının çevresel çekme dayanımı, hasar oluşumu ve deformasyon karakteristikleri üzerindeki etkisi izole bir şekilde doğrudan gözlenebilir hâle gelmiştir.

Test sırasında numuneler, halka çekme aparatına eş merkezli şekilde yerleştirilmiş ve yükleme esnasında aparatla düzgün bir şekilde (senkronize) hareket etmesi sağlanmıştır. Uygulanan çevresel çekme kuvveti, elyaf konfigürasyon yönü boyunca düzgün bir şekilde yayılmış ve numunenin elastik, plastik ve nihai kırılma davranışları

net bir şekilde gözlenmiştir. Halka çekme testi; 2 mm/dk sabit çekme hızında ve standart laboratuvar oda sıcaklığı ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) koşullarında ve 100 kN kapasiteli Shimadzu üniversal çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Çekme işlemi sırasında tüm veriler kaydedilmiş ve deney sonrası her üç adet numuneye ait elde edilen verilere göre gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.12’de halka çekme testi uygulanan farklı çaplardaki numunelere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, maksimum gerilme, yüzde uzama ve statik tokluk verileri sunulmuştur.

Numunelerde oluşan gerilme değerinin hesaplanması için aşağıda verilen denklem 5.1.’deki formül kullanılmıştır:

$$\sigma_{\theta} = P_b / 2A_m \quad (5.1.)$$

$$A_m = dxb \quad (5.2.)$$

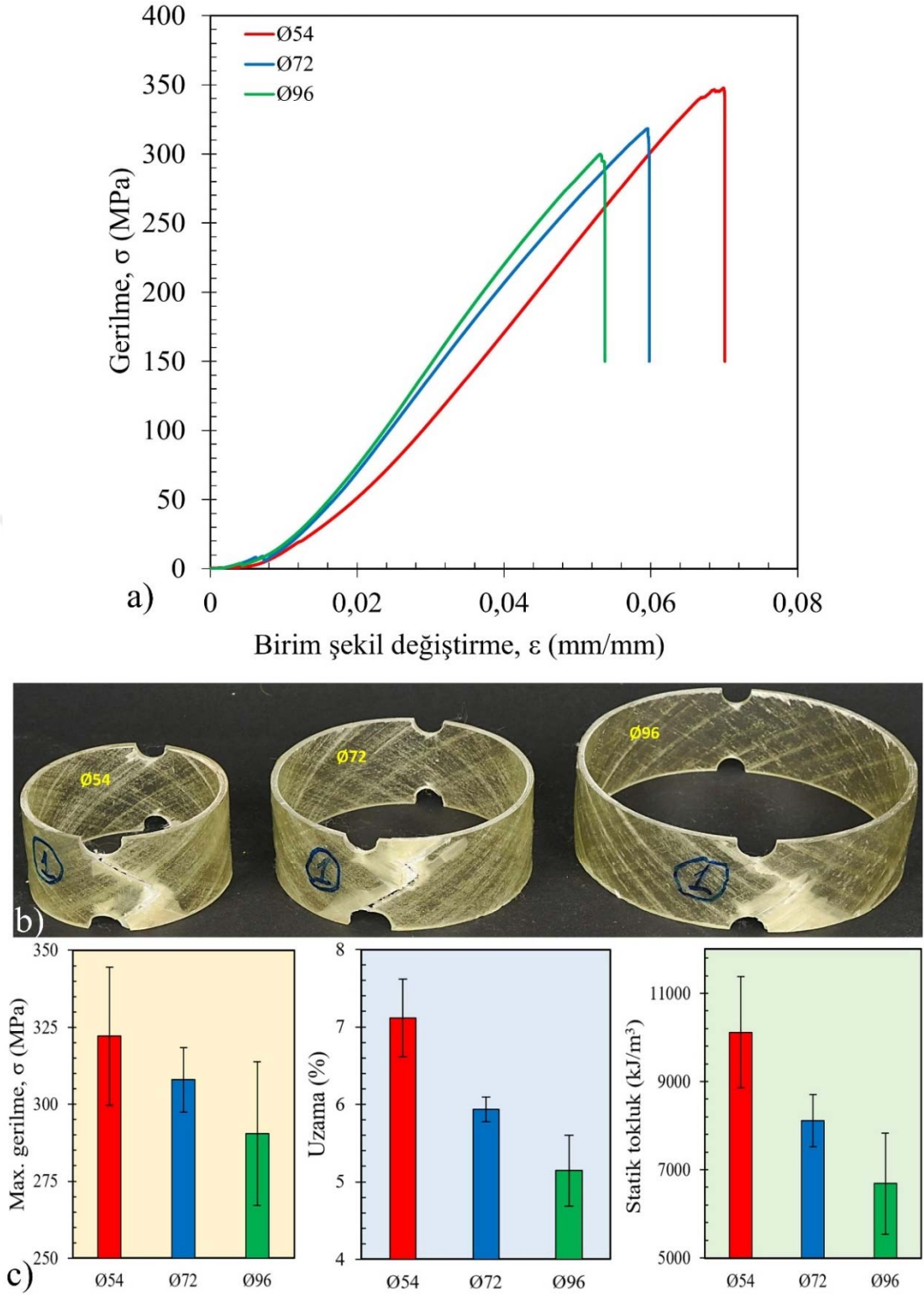
İşlenmiş grafiklerden elde edilen bu veriler (yüzde uzama, statik tokluk ve maksimum gerilme) tablo halinde Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. İşlenmiş verilerden elde edilen yüzde uzama, statik tokluk ve maksimum gerilme değerleri.

CTP Boru Çapları	Ø54	Ø72	Ø96
Yüzde uzama (%)	7,05	5,95	5,1
Statik tokluk (kJ/m ³)	10200	8100	6600
Maksimum gerilme (MPa)	350	320	300

Numunenin çekme mukavemet değeri σ_a (MPa) ile, maksimum veya kırılma yükü P_b (N) ile ifade edilir. Minimum kesit alanı A_m (mm²) şeklinde belirtilirken, d ve b sırasıyla daraltılmış alandaki et kalınlığını (mm) ve genişliği (mm) gösterir.

Elde edilen veriler, maksimum gerilme değerlerinin çap büyüdükçe azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. En yüksek çevresel çekme dayanımı Ø54 iç çaplı numunelerde (≈ 350 MPa), en düşük ortalama mukavemet ise Ø96 iç çaplı numunelerde (≈ 300 MPa) ölçülmüştür. Bu durum, çap artışına bağlı olarak halka çekme testinde indirgenmiş kesit üzerindeki eğilme (moment) etkisinin artmasına ve elyaf yönlenme geometrisinin gerilme dağılımını olumsuz etkilemesine bağlanabilir. Bu gözlem halka çekme testine ilişkin Denklem 4.3’te verilen temel gerilme denklemi ile de desteklenmektedir. Benzer eğilim, literatürde başka bir çalışmada da gözlenmiş olup, halka çekme testinde görülen görünür çevresel (hoop) çekme dayanımlarının, iç basınç altında yapılan patlatma testlerine göre %15–30 oranında daha düşük çıktığı rapor edilmiştir (Gemi vd., 2014).



Şekil 5.12. Farklı çaplardaki numunelerin halka çekme deneyi sonuçları; a) Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, b) Halka çekme deney numuneleri, c) Gerilme, yüzde uzama ve statik tokluk grafikleri.

Denklem 4.3 incelendiğinde, $\sigma_{\theta\theta}$ çevresel çekme gerilmesi, P uygulanan iç basınç, t boru et kalınlığı ve r boru iç yarıçapıdır. Bu formüle göre, basınç (P) sabit tutulduğunda, yarıçap (r) büyüdükçe çevresel gerilme ($\sigma_{\theta\theta}$) artmaktadır. Başka bir deyişle, çapın artmasıyla boru daha az rijit hale gelmekte ve indirgenmiş kesitte oluşan eğilme (moment) etkisinin artmasıyla birlikte, malzeme görünürde daha düşük mukavemet göstermektedir. Bu durum, küçük çaplı numunelerde moment etkisinin daha az olması sayesinde malzemenin gerçek mukavemet potansiyelinin daha yüksek ölçülmesine neden olmaktadır. Çap küçüldükçe aynı yük altında daha yüksek gerilme meydana gelmekte ve bu da malzemenin mukavemet potansiyelini daha yüksek gösterebilmektedir (Gemi vd., 2014).

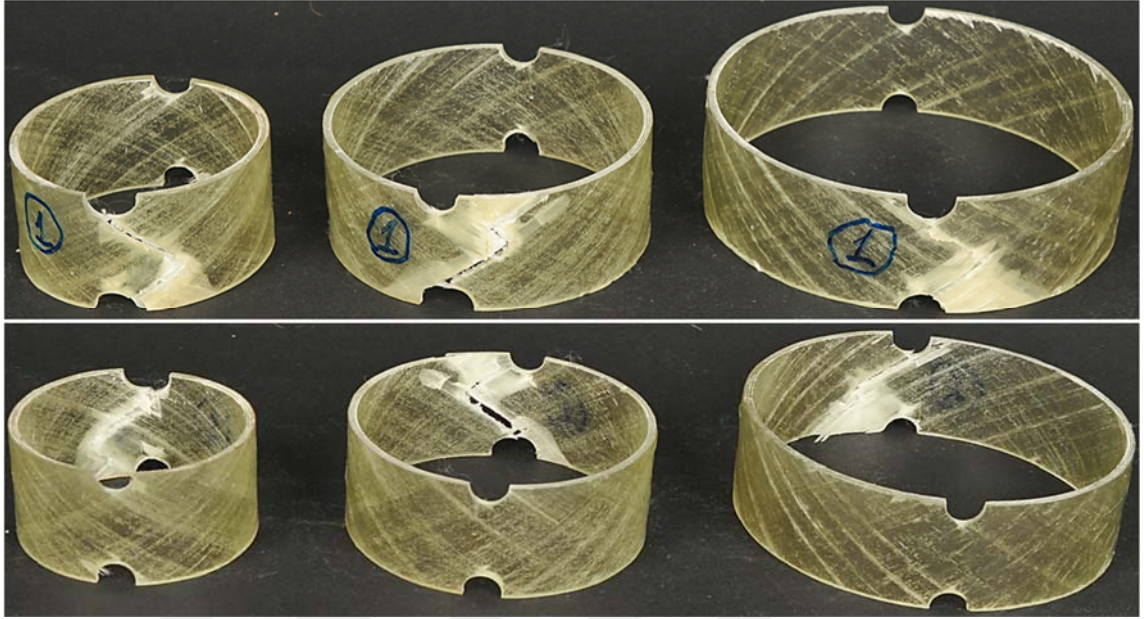
Şekil değiştirme (gerinim), değerleri açısından, çap küçüldükçe numunelerin daha gevrek (düşük şekil değiştirme kapasiteli), çap büyüdükçe ise daha sünek davranış sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, elyaf-matris arayüzey gerilmelerinin ve daraltılmış kesit geometrisinin deformasyon kapasitesine etkisini göstermektedir.

Deney sırasında elde edilen en yüksek çevresel çekme dayanımı Ø54 çaplı numunede gerçekleşmiştir. Bu durum, çapın büyümesiyle çevresel çekme mukavemetinde belirgin bir azalma olduğunu açıkça göstermektedir. Bu farklılığın yalnızca geometriyle ilgili olmadığı; aynı zamanda daha büyük çaplı borularda elyaf yayılımının artması, yük aktarımının daha dağınık gerçekleşmesi ve bu nedenle lokal gerilme birikimlerinin daha zayıf olması gibi mikro mekanik etkilerle de ilişkilendirilmesi söz konusudur.

Çapın artmasına bağlı olarak, yalnızca çevresel çekme dayanımı değil, aynı zamanda birim şekil değiştirme (gerinim) ve tokluk değerlerinde de düşüşler gözlenmiştir. Küçük çaplı numunelerde elyafların çekme yönünde daha etkin hizalanması ve yük altında daha kararlı davranması, deformasyon kapasitesini ve enerji soğurma (absorpsiyon) kabiliyetini artırmıştır. Buna karşın, büyük çaplı numunelerde çekme kuvveti geniş bir alana yayıldığı için, elyaf demetlerinin eş zamanlı yük taşıma potansiyeli düşmüş, bu durum daha erken elyaf-matris ayrılmalarına ve gevrek (ani) kırılmalara yol açmıştır. Bu sonuçlar, kompozit malzemelerdeki fiber-matris etkileşiminin geometrik parametrelerle doğrudan ilişkili olduğu görüşünü desteklemektedir (Bunsell ve Renard, 2005).

Halka çekme deneyleri sonrası, hasarlı numunelerin kırılma bölgelerinden optik mikroskop (Keyence VHX900F) kullanılarak yüksek çözünürlüklü mikro görüntüler alınıp bu görseller üzerinden analizler yapılmıştır. Çap değişikliğinin hasar gelişimine

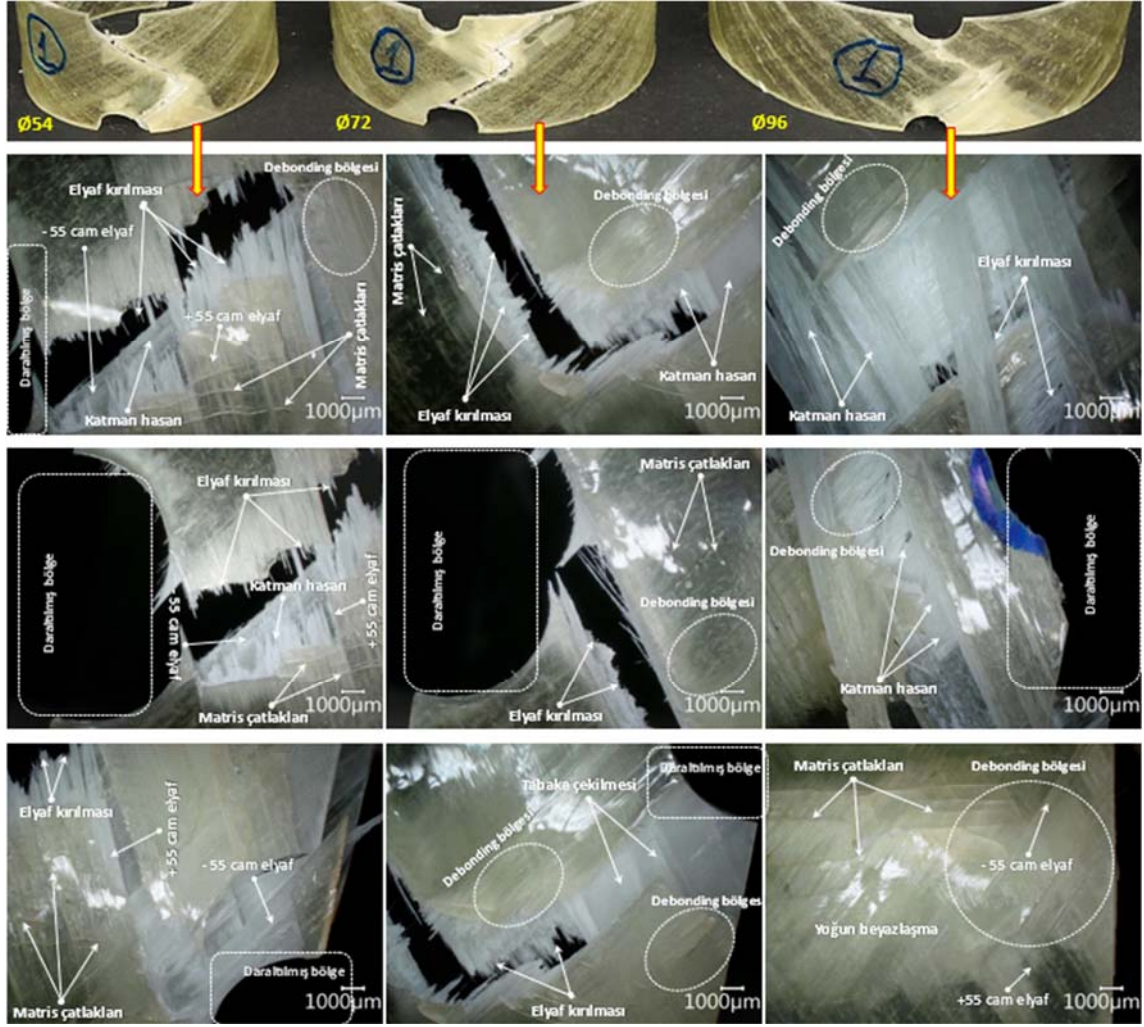
etkileri gözlemlenmiş ve oluşan hasarlar ve hasar modları da incelenerek yorumlanmıştır. Şekil 5.13'te makro görsellerden birer numune karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.13. Halka çekme testi sonrası farklı çaplardaki boruların karşılaştırılması.

Ayrıca, tüm çaplar için üç tekrarlı olarak halka çekme testi gerçekleştirilen deney numunelerinin, deney sonrasında hasarlı durumları üzerinde detaylı analizler yapılmıştır. Optik mikroskop ile çekilen mikro hasar görüntüleri ve gözlemlenen hasar mekanizmaları Şekil 5.14'te sunulmaktadır.

Elyafların çevresel yönde (± 55 açı konfigürasyonu) hizalanmış olması nedeniyle, numunelerde kırılma genellikle ani, gevrek karakterli ve elyaf yönelimine paralel olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, özellikle küçük çaplı numunelerde daha yüksek çevresel (hoop) gerilme değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır. Geniş çaplı numunelerde ise şekil değiştirme (deformasyon) kapasitesi artarken, nihai taşıma kapasitesinde düşüş gözlemlenmiştir. Numunelerde kopma genellikle daraltılmış bölgede başlamış ve elyaf yönü boyunca ilerleyerek sonlanmıştır. Tüm numunelerde elyaf-matris ara yüzey ayrılması (debonding) gözlemlenmiştir. Bu durum, çap/kalınlık oranı arttıkça yapının çevresel rijitliğinin azaldığını ve çekme gerilmesinin daha düzensiz dağıldığını göstermektedir.



Şekil 5.14. Optik mikroskopta tüm numuneler için çekilen mikro hasar görüntüleri.

İç basınç testinde borunun tamamı içten basınçlandırılır ve çevresel gerilme ($\sigma_{\theta\theta}$) tüm boru cidarına düzgün şekilde dağılır. Bu nedenle, iç basınçla elde edilen çevresel gerilme (hoop stress) değerleri halka çekme testine göre genellikle daha yüksek çıkar. Bu farklılığın temel nedeni, basınç testinde kullanılan kompozit boruya etki eden gerilme alanında elyaf sürekliliğinin sağlanması (endless fiber), halka çekme testinde ise test numunesinin kesilmesi nedeniyle elyaf sürekliliğinin bozulmuş olmasıdır. Yapılan iç basınç testlerine kıyasla, halka çekme testinde çevresel gerilme verileri daha düşük çıkmıştır. Bu durumun meydana gelmesinin sebebi kenar etkisi (edge effect) olarak ifade edilen mekanik davranıştır (Tarakçıoğlu 1992). Kenar etkisi, test numunesinin üst ve alt yüzey sınırlarında meydana gelen gerilme düzensizlikleri nedeniyle, bu bölgelerdeki elyaf-matris etkileşiminin ideal mekanik davranıştan sapması şeklinde açıklanır. Halka çekme testi numunelerinin boyları iç basınç testi numunelerine göre kısa olduğu için, halka çekme numunelerinde kenar kısımların elyaf uçları çekme etkisi altında ayrılarak

mukavemet kaybına ve gerilme sınırlarında düşüşe yol açar. Numunenin sınır bölgelerinde, halka çekme aparatının uyguladığı yükleme sonucunda; gerilme dağılımı homojenliğini kaybederek, çekme kuvvetinin numune kesitinde düzgün iletilmemesine ve elyaf-matris etkileşiminde mikro burkulma, lokal elyaf kopması ve debonding gibi hatalar meydana gelir. Bu durum, esasen numunenin “serbest kenar” bölgelerinde yük aktarımının teorik düzeyde (örneğin basınç testinde olduğu gibi) gerçekleşmemesine yol açar.

Halka çekme deneyi, kompozit boruların çevresel (teğetsel) yöndeki çekme mukavemetini belirlemede oldukça hızlı bir yöntemdir. Bu deney ile birlikte, iç basınca benzer şekilde, borunun çevresel gerilmelere maruz kalması durumundaki davranışı başarılı bir şekilde simüle edilmiştir. Tüm çap gruplarında hasar, indirgenmiş kesit uçlarında başlamış; başlangıçta matris çatlakları ve crazing-beyazlama şeklinde gözlenmiştir. Ardından elyaf yönünde ($\pm 55^\circ$ tabakada) debonding ve delaminasyon hasarları meydana gelmiştir. Yük arttıkça daraltılmış kesitte elyaf kopmaları, elyaf demetlerinde çekilme (pull-out) oluşmuştur. Nihai kırılma, $\pm 55^\circ$ sarım açıları doğrultularında tabaka kırılması ve elyaf demetlerinin kopması ile sonuçlanmış; hasarın çoğunlukla elyaf yönelimiyle paralel (uyumlu) olarak geliştiği gözlenmiştir. Bu hasar modları, CTP borular için literatürde bildirilen kırılma senaryoları ile uyum göstermiştir. Özellikle daraltılmış bölgedeki kesitlerde hasar yoğunlaşması, halka çekme testinin karakteristik bir özelliği olarak rapor edilmiştir. (Buarque ve d’Almeida, 2007; Gemi vd., 2018).

Mikroskobik gözlemlerle de desteklenen bu durumlarda, küçük çaplı borularda elyafların kopması daha yüksek birim şekil değiştirme (gerinim) ile gerçekleşmiş; elyaf-matris arayüzey ayrılması (debonding) daha sınırlı kalmış ve elyafların deformasyon kapasitesi daha yüksek ölçülmüştür. Öte yandan büyük çaplı numunelerde elyaf-matris ayrışması erken evrede başlamış; elyafların birbirinden bağımsız davranma eğilimi yükselerek, yük aktarımı sırasında elyafların yük aktarım verimi (load transfer efficiency) düşmüştür. Bu gözlem, kompozit yapıların yalnızca malzeme seçimiyle değil, geometrik optimizasyon ile de mekanik olarak güçlendirilebileceği sonucunu desteklemektedir.

Tüm numunelerde sabit sarım açısı ($\pm 55^\circ$) ve et kalınlığı nedeniyle, hasar ilerleme yolları temelde benzerlik göstermiştir. Hasar, elyaf yönlenmesine paralel gelişmiş ve çatlaklar elyaf doğrultusu boyunca yayılım göstermiştir. Debonding, matris çatlakları, delaminasyon ve elyaf kopmaları en yaygın gözlenen hasar modları olmuştur. Ancak bu hasarların başlangıç noktası ve gerinimi, ilerleme kinetiği ve yüzeydeki dağılımı boru

çapı ile birlikte anlamlı şekilde değişmiştir. Özellikle büyük çaplı numunelerde, çatlakların daha hızlı ilerlediği ve daha yaygın/dağınık bir hasar geometrisi sergilediği gözlemlenmiştir.

Bu sonuçlar yapısal tasarım açısından kritik öneme sahiptir. Uygulamada kullanılan CTP boruların, iç basınca ve dış yüklere karşı güvenli ve uzun ömürlü olması hedeflenerek tasarlanması gerekmektedir. Deney sonuçları, çap büyüdükçe çevresel çekme mukavemetinde ciddi kayıplar yaşandığını ve enerji soğurma (emme) kabiliyetinin azaldığını ortaya koymuştur. Bu nedenle, büyük çaplı borular için ek güçlendirme veya sarım yönüyle uyumlu hibrid takviye yöntemleri değerlendirilebilir (Gemi, 2018).

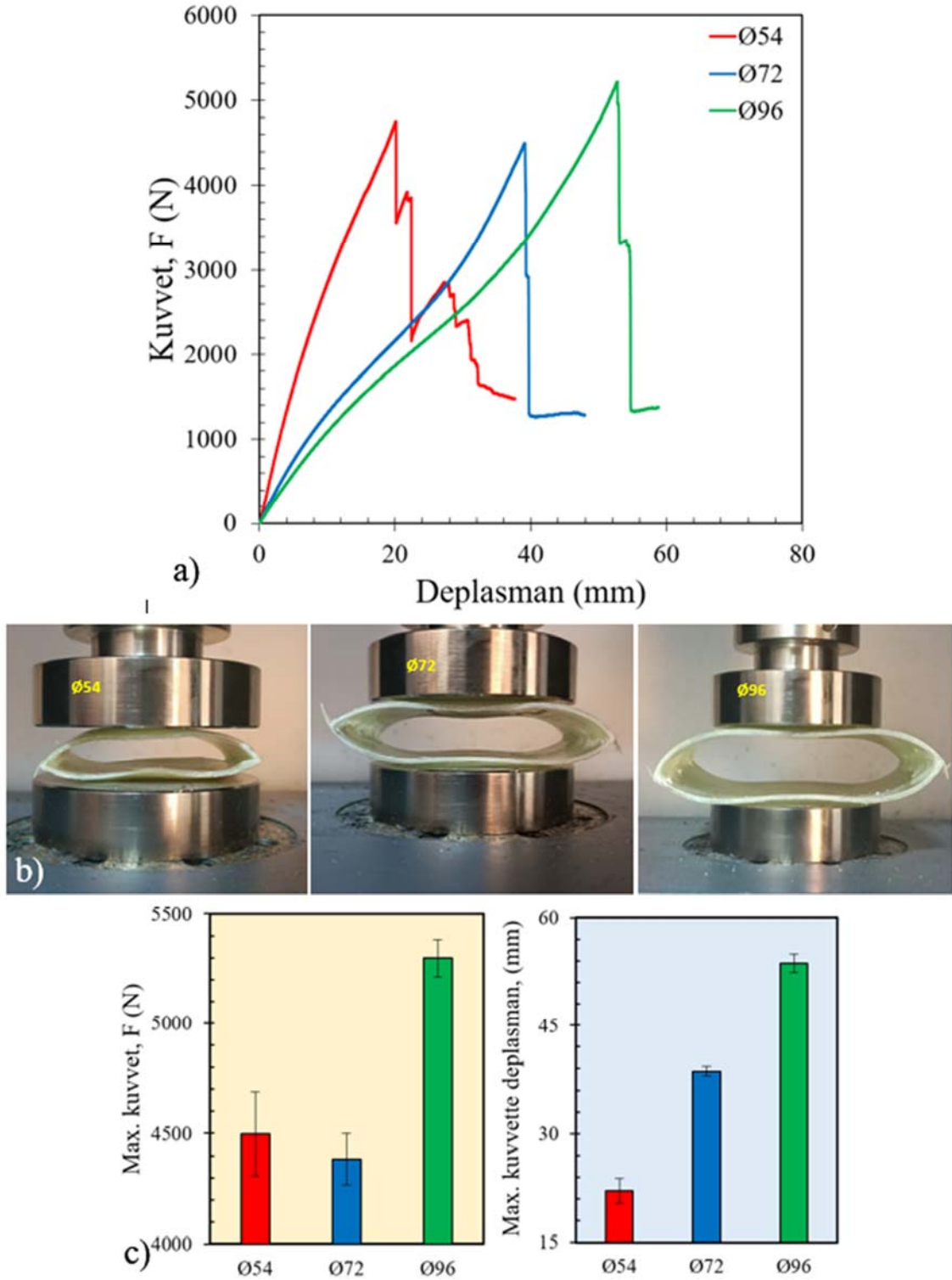
Sonuç olarak, bu deneysel çalışma, boru çapı büyüklüğünün CTP boruların çevresel çekme mukavemeti ve genel mekanik davranışı üzerinde kritik ve belirleyici bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Sabit malzeme özellikleri, sarım açısı ve üretim yöntemine sahip numunelerde dahi, çap farkının tek başına mukavemet, gerinim (şekil değiştirme) ve tokluk gibi temel mekanik parametrelerde önemli farklılıklar yarattığı kanıtlanmıştır. Bu nedenle, boru sistemlerinin tasarımında çap, yalnızca bir akış/taşıma kesit alanı olarak değil, aynı zamanda mukavemet ve deformasyon belirleyicisi olarak da değerlendirilmelidir.

5.4. CTP Boruların Yanal Basma Test Sonuçları

Farklı çaplardaki numunelere uygulanan yanal basma test sonuçları grafiksel hale getirilmiş ve Şekil 5.15'te toplu olarak sunulmuştur. Şekil 5.15, üç farklı çaptaki numune için kuvvet-deplasman eğrisini ve maksimum kuvvet ile bu kuvvetteki maksimum deplasman değerlerini göstermektedir. Yanal basma testleri sonucunda, Ø54, Ø72 ve Ø96 mm ölçülerindeki CTP boruların yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve deformasyon davranışlarında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir.

Deneylerin ilk aşamasında numuneler elastik bölgede düşük oranda sıkışmış, bu evrede yük-deformasyon eğrisi doğrusal (lineer) karakter göstermiştir. Yük arttıkça çapta daralma gözlemlenmiş, ilerleyen safhalarda deformasyon doğrusallıktan sapmaya başlamış ve ilk mikroskobik çatlakların yükleme plakalarına 90° çevresel yönde başladığı tespit edilmiştir. Bu kırılma modları, literatürdeki benzer çalışmalarda ortaya koyulduğu gibi özellikle cam elyaf yönüne dik yönde gelişen matris çatlakları ve fiber-matris ara yüz ayrılmaları şeklinde karakterize olmuştur (Rafiee ve Mazhari, 2016). Numune tamamen

çöktüğünde, radyal yönde fiber kırılması, katman ayrılması ve yüzey katmanlarında delaminasyon hasarları şeklinde hasar modları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.15. Yanal basma testi yapılan farklı çaplardaki deney numuneleri için grafikler; a) Kuvvet-deplasman grafiği, b) Yanal basma test numuneleri, c) Maximum kuvvet ve maximum kuvvette deplasman grafikleri.

Çapı artan numunelerde, mutlak yük taşıma kapasitesinin arttığı, ancak birim çevresel deformasyon başına düşen gerilme mukavemetinin azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, çap artışına bağlı olarak numunenin çevresel rijitliğinin göreceli olarak düşmesine bağlanmaktadır (Vasanthanathan ve Chellamuthu, 2025).

Elde edilen yük-deplasman eğrileri, farklı çaplara sahip CTP borular arasında belirgin bir mekanik performans farkı olduğunu göstermiştir. Küçük çaplı numuneler daha rijit bir davranış sergilerken, büyük çaplı numunelerde deformasyon kapasitesinin arttığı ancak nihai çökme noktasının daha erken gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, çap artışına bağlı olarak çevresel eğilme momentlerinin yükselmesi ve yapısal stabilitenin azalmasıyla açıklanabilir. Ayrıca rijitlik değerleri, çap ile ters orantılı olarak değişim göstermiş; küçük çaplı borular, eğrinin elastik bölgesinde daha dik bir eğime sahip olmuştur. Bu durum, tasarım mühendisliğinde çap/kalınlık oranının sadece patlama dayanımı değil, aynı zamanda çevresel yük taşıma kapasitesi açısından da kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

Deneyler sırasında elde edilen maksimum yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 4500 N, 4400 N ve 5400 N olarak ölçülmüş, karşılık gelen deplasmanlar ise sırasıyla 20 mm, 40 mm ve 52 mm olmuştur. Bu veriler, çap küçüldükçe rijitliğin belirgin şekilde arttığını, ancak deformasyon kapasitesinin azaldığını ortaya koymaktadır. Nitekim Ø54 mm numuneler $k_{54}=225$ N/mm rijitlik değeri ile en yüksek yapısal sertliği göstermiştir. Rijitlik formülü Denklem 5.3'te verilmiştir; k_d rijitlik, P_{max} maksimum kuvvet, δ_{max} maksimum deplasmanı göstermektedir. Rijitlik değeri formüle göre hesaplandığında Ø54, Ø72 ve Ø96 mm numuneler için sırasıyla 225 N/mm, 110 N/mm ve 103.85 N/mm olarak bulunmuştur. Bu durum, küçük çaplı borularda geometrik stabilitenin daha yüksek olması, kesit momentinin daha yüksek direnç sağlaması ve yükün daha kısa bir mesafede aktarılmasıyla açıklanabilir. Ancak yüksek rijitlik, ani kırılma riskini de beraberinde getirmiş, bu numunelerde elastik bölgeden plastik deformasyona geçiş süresi oldukça kısa gözlenmiştir.

$$k_d = P_{max} / \delta_{max} \quad (5.3.)$$

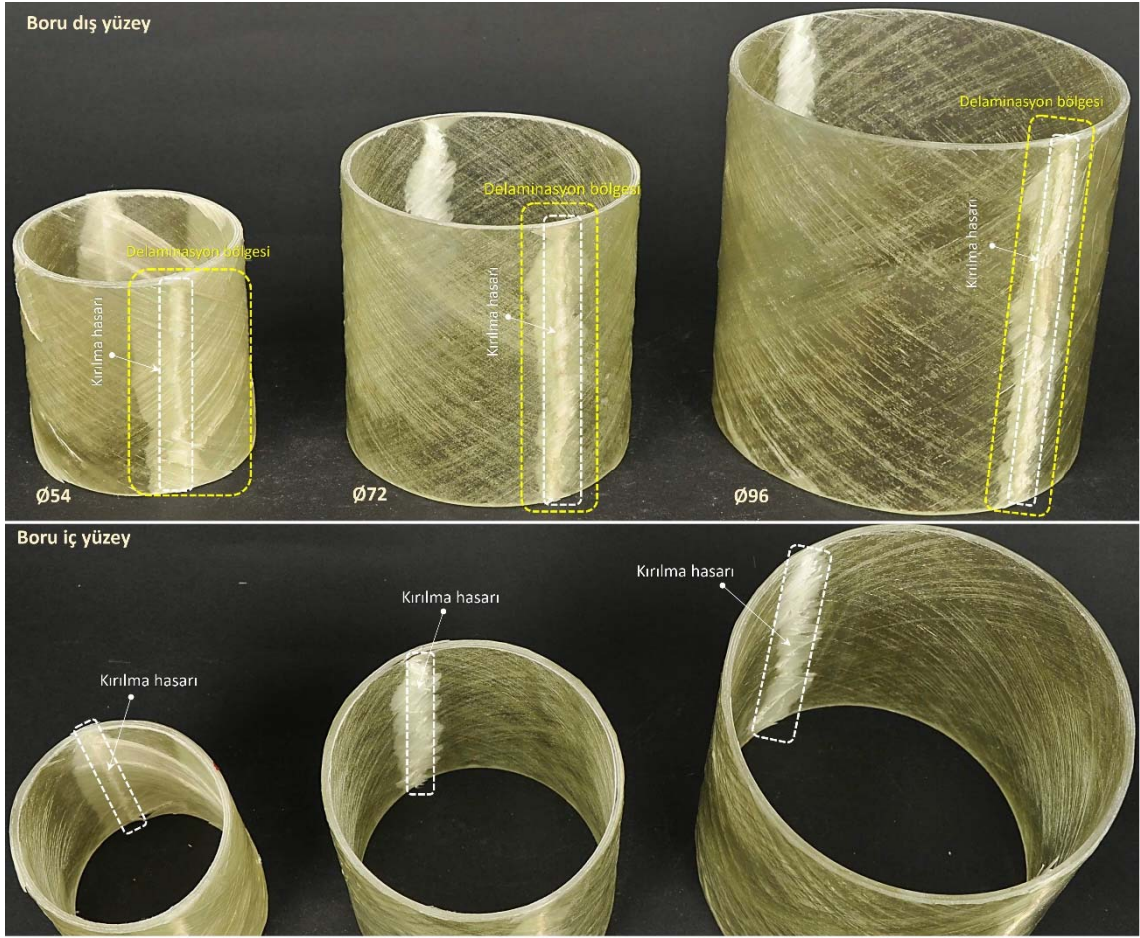
Ø72 mm numuneler, maksimum yük taşıma kapasitesi açısından Ø54 mm numunelerden daha düşük bir değer göstermesine rağmen (4400 N), deformasyon kapasitesinde belirgin bir artış sergilemiştir. 40 mm deplasman değeri, bu numunelerin daha geniş elastik ve plastik şekil değiştirme aralığına sahip olduğu, dolayısıyla gevrek

(ani) kırılmaya karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Bu sonuç literatürdeki aynı et kalınlığındaki CTP borularda gözlemlenen, çap arttıkça rijitliğin azalması ancak deformasyon kapasitesinin artması yönündeki bulgular ile uyumludur. Orta çaplı numunelerde yük taşıma kapasitesi sınırlı olsa da geniş deformasyon aralığı enerji sönümleme açısından önemli bir avantaj sunmaktadır (Farshad M., 2011).

En yüksek nihai yük taşıma kapasitesi Ø96 mm numunelerde (5400) elde edilmiştir. Bu durum yükün kesit boyunca daha dengeli dağılması, elyaf-matris arayüzey alanının artması ve elyafların yük aktarımında daha etkin olmasıyla açıklanabilir. Bununla birlikte, rijitlik değeri 103,8 N/mm ile en düşük seviyede kalmıştır. Büyük çaplı CTP borularda, kesit atalet momenti (I) çap ile artsa da sabit et kalınlığı durumunda eğilme rijitliği (EI) göreceli olarak düşer. Bu, borunun daha esnek hale gelmesine neden olur. Bu durum, büyük çaplı numunelerde yük altındaki kesit rijitliğinin azalmasına rağmen, elyaf sayısının ve arayüzey temas alanının artmasıyla nihai taşıma kapasitesinin korunabildiğini göstermektedir. Literatürde filaman sarımlı kompozit borularda, büyük çaplarda bile yük taşıma kapasitesi artarken yapısal rijitliğin azalabildiği belirtilmiştir (Rafiee R., 2016). Filaman sarımlı borular, elyafların sürekli ve yönlendirilmiş yapısı sayesinde, büyük çaplarda bile yüksek taşıma kapasitesi sağlar. Ancak, bu borular daha düşük rijitlik sergiler, bu da tasarımda dikkate alınmalıdır.

Deney sonrası her numune görsel olarak incelenmiş ve hasar modları sınıflandırılmıştır. Deneysel çalışma sonrası hasarlı numunelerin karşılaştırmalı makro görüntüleri Şekil 5.16'da toplu olarak sunulmuştur. Küçük çaplı borularda elyaf yönüne paralel gelişen çatlaklar ve simetrik ezilme gözlemlenirken, daha geniş çaplı numunelerde lokal deformasyon bölgeleri (buckle zones) ve ani çökme mekanizmaları belirginleşmiştir. Bu gözlemler, literatürdeki çalışmada aktarılan CTP örneklerinin davranışıyla uyum göstermektedir (Liu vd., 2012). CTP malzemenin kırılma karakteri tipik olarak katı gevrek nitelikte olup, özellikle yüksek çap/kalınlık oranlarında yük taşıma kapasitesini aniden yitirdiği ve enerjiyi düşük verimlilikte sönümlediği anlaşılmıştır. Numunelerde iç tabakalarda ayrılmalar (delaminasyon) izlenmiş ve beyazlaşma görülmüştür; bu durum, sarım doğrultusu ve reçine oranının dengeli olduğunu göstermektedir. Yanal basma testinde iç tabakalar arası ayrılmaların (delaminasyon) belirgin olmadığı, buna karşın beyazlaşmanın (debonding/crazing) gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu durum, sarım doğrultusunun ve reçine oranının yapısal dengeyi sağladığını düşündürmektedir.

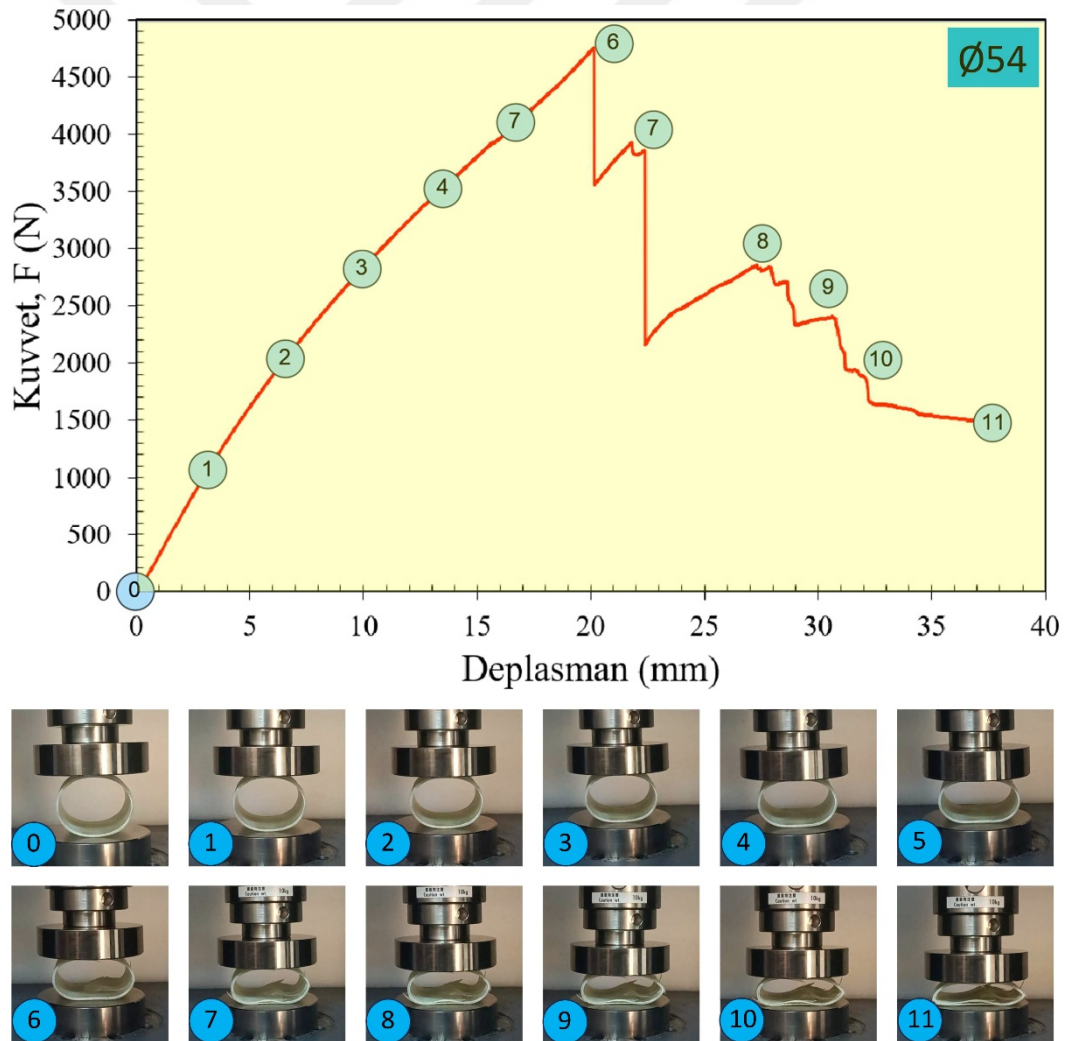
Basma yüklemesi altında, katmanlar arası kayma gerilmeleri (delaminasyona neden olan gerilmeler) statik iç basınç patlatma testinde olduğu kadar baskın değildir. Yapısal çökme, çekme gerilmesinin olduğu dış tabakalarda lokal burkulma veya basma gerilmesinin olduğu yüklemeye altında ezilme şeklinde gerçekleşmiştir. Delaminasyonun ana hasar modu olmaması, borunun yükü ezilme veya burkulma yoluyla taşıdığını, yani basma rijitliğinin katmanları ayırmaya yetecek düzeyde kayma gerilimi oluşturmadığını göstermiştir.



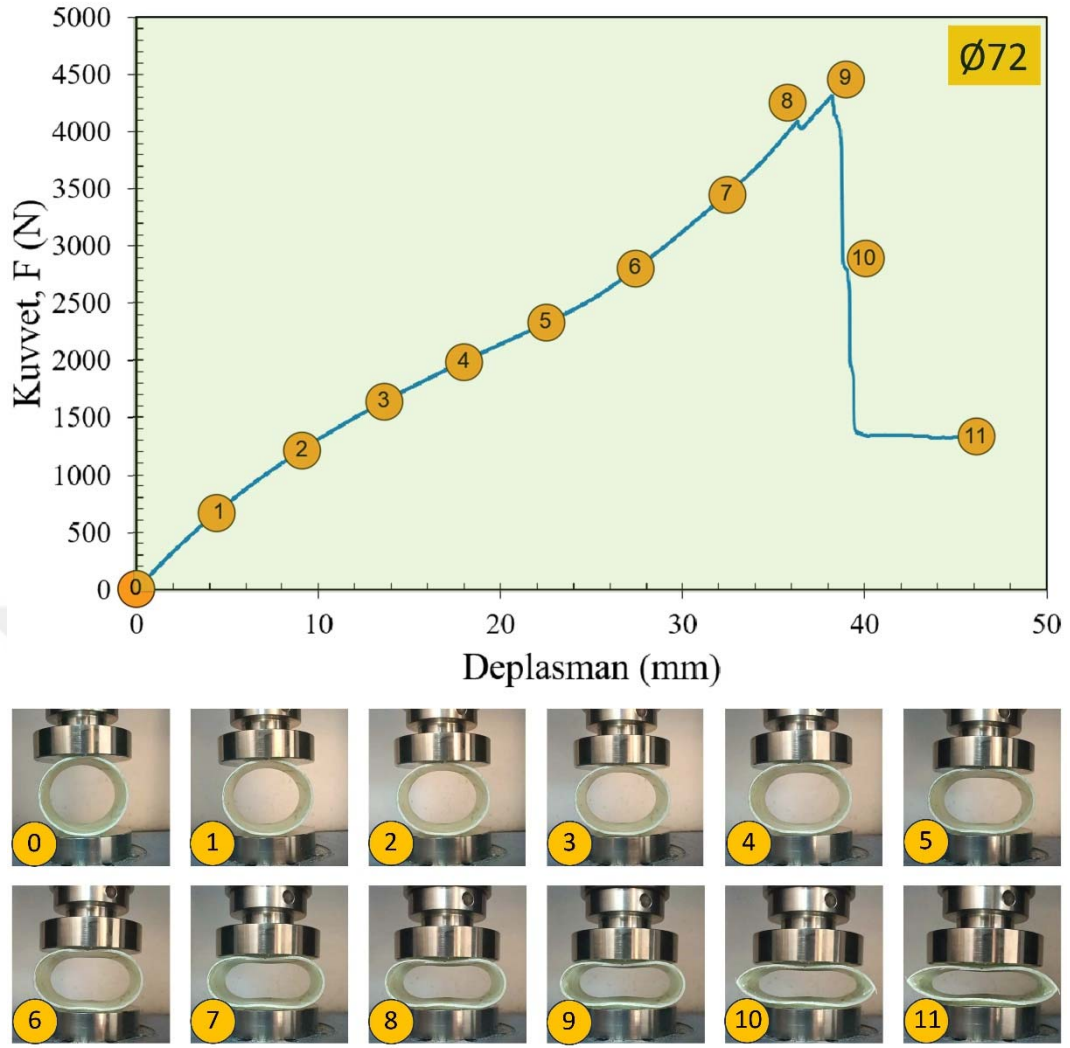
Şekil 5.16. Yanal basma deneyi sonrası borularda oluşan hasarların iç ve dış görüntüleri.

Yük artışına bağlı makro hasar gelişimi, her bir yanal basma numunesi için Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da grafik ve görseller halinde verilmiştir. Bu veriler, karşılaştırmalı analiz için yorumlanmıştır. Makro hasar incelemeleri, Ø54 mm numunelerde yüklemeye bölgesinde elyafların aksenal yönde kırılması ve matris çatlaklarının hızla yayılımı sonucu gevrek kırılma modunun baskın olduğunu göstermiştir. Bu numunelerde hasar ani ve lokal (yerel) olarak yoğunlaşmıştır. Ø72 mm numunelerde yüklemeye hattı boyunca belirgin ovalleşme ve elyaf demetlerinde lokal

burkulmalar gözlenmiştir. Ø96 mm numunelerde, yük altında daha geniş temas yüzeyinin oluşmasıyla birlikte deformasyon gövde boyunca yayılarak hasar daha kademeli ilerlemiş; elyaf sıyrılması ve delaminasyon en baskın hasar modları olarak tespit edilmiştir. İnce duvarlı cam/epoksi filaman sarımlı borularda quasi-statik yanal yükler altında, matris çatlaması baskın ilk hasar modu olarak tanımlanmış, bunu delaminasyon ve elyaf kırılması izlemiştir. Bu gözlemler, boru çapı/et kalınlığı (D/t) oranının hasar modları üzerindeki kritik etkisini gösteren literatür bulgularıyla uyumludur (Ghahremani vd., 2023). D/t oranı yükseldikçe (daha büyük çaplı veya ince duvarlı) borularda elyaf burkulması ve gevrek kırılma kaynaklı hasar görülürken, düzlem içi kayma kaynaklı delaminasyonlar baskın hale gelir; bu, Ø72 mm gibi orta çaplı numunelerde burkulma, Ø96 mm gibi daha büyük çaplı numunede ortaya çıkan delaminasyon hasar mekaniği ile örtüşmektedir.



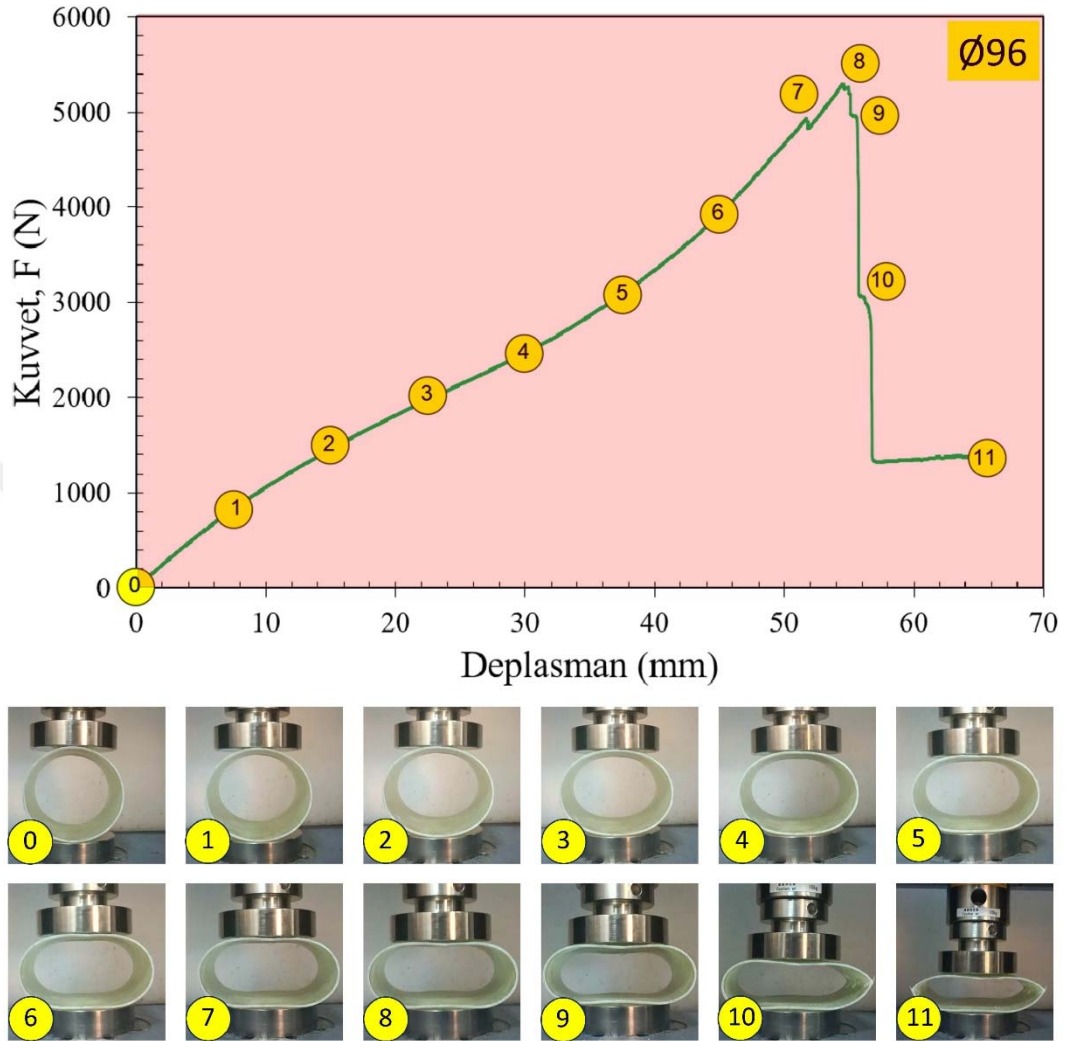
Şekil 5.17. Ø54 CTP numunesi hasar gelişiminin kuvvet-deplasman eğrisi üzerinde gösterilmesi.



Şekil 5.18. Ø72 CTP numunesi hasar gelişiminin kuvvet-deplasman eğrisi üzerinde gösterilmesi.

Kuvvet–deplasman eğrileri incelendiğinde, Ø54 numunelerde eğrinin eğimi yüksek (yüksek rijitlik) olup kısa elastik bölge ve ani (gevrek) kırılma gerçekleşmiştir. Ø72 numunelerde eğimin düşük olmasına rağmen, deformasyon kapasitesinin ise yüksektir; bu durumun enerji sönmleme kapasitesi bakımından avantaj sağladığı belirlenmiştir. Ø96 numunelerde ise en yüksek nihai yük kapasitesi elde edilmiş, ancak rijitlik en düşük seviyede kalmıştır. Enerji sönmleme kapasitesi (tokluk), kuvvet–deplasman eğrisi altında kalan alan ile değerlendirildiğinde, Ø72 ve Ø96 mm numunelerin daha yüksek enerji absorbe etme potansiyeli olduğu görülmüştür. Özellikle Ø96 numunelerde delaminasyonun kademeli ilerlemesi, ani (gevrek) kırılmanın önüne geçerek darbe direnci açısından önemli katkı sağlamıştır. D/t oranı arttıkça borunun eğilme/burkulma eğilimi artar; dolayısıyla yük altında gerçekleşen davranış düzgün,

çoklu yerel ezilme (iyi enerji sönümleme) yerine ani, global stabilite kaybı (daha az enerji soğurma) gösterebilir.



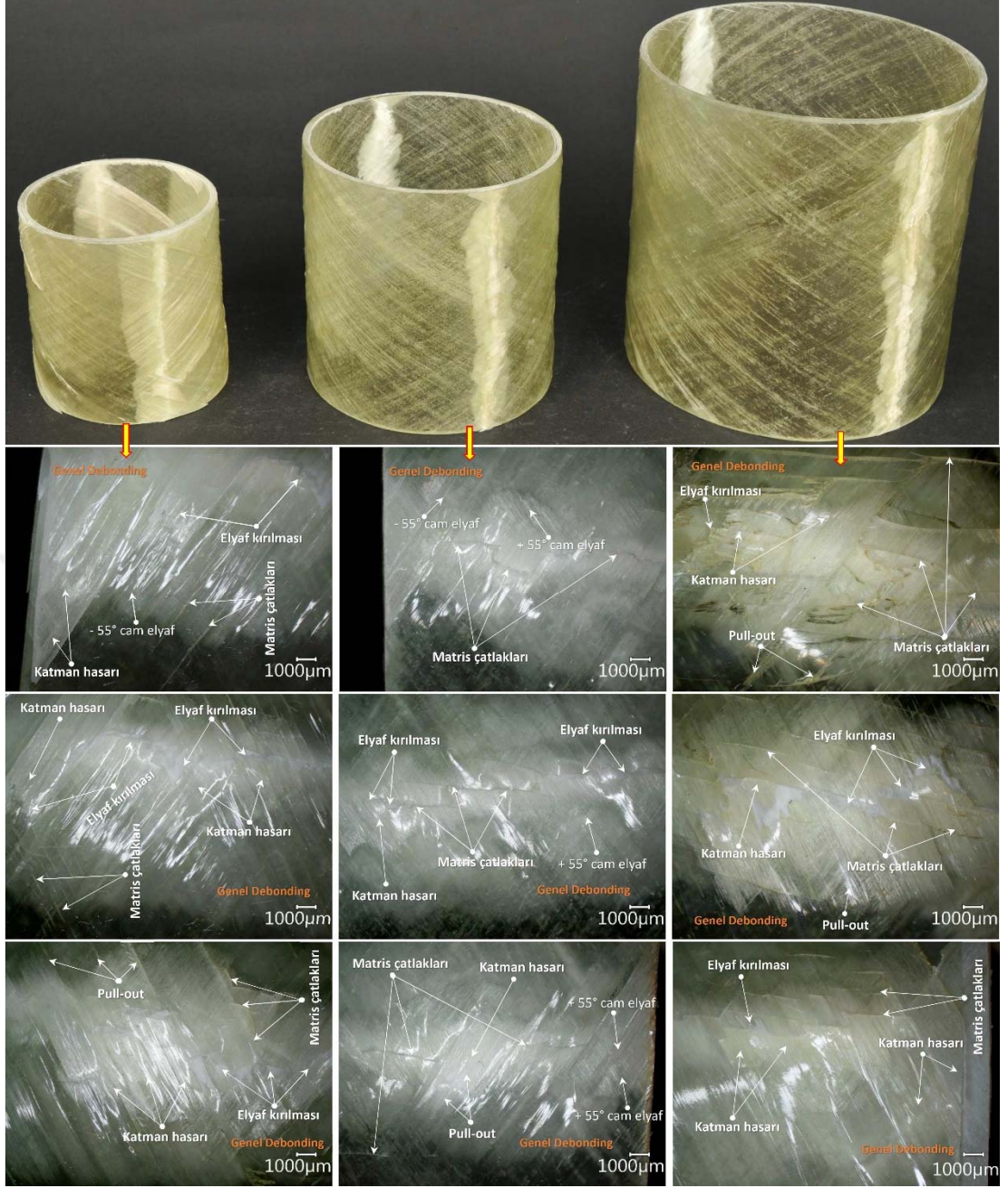
Şekil 5.19. Ø96 CTP numunesi hasar gelişiminin kuvvet-deplasman eğrisi üzerinde gösterilmesi.

Aynı et kalınlığına sahip CTP borularda çapın büyümesi, yanıl basma testlerinde enerji sönümleme kapasitesini doğrudan etkileyen bir parametredir. Çap arttıkça borunun rijitliği genellikle azalmakta, buna bağlı olarak yük-deplasman eğrisinin şekli değişmektedir. Daha büyük çaplı borular, daha fazla elastik deformasyon yapabildiği ve gövde stabilitesinin düşük olması nedeniyle daha geniş deplasman aralıklarında enerji absorbe edebilmektedir (Alimirzaei vd., 2023). Ancak bu, her zaman yük taşıma kapasitesinin artacağı anlamına gelmez; bazı durumlarda çap büyüdükçe tepe yükü düşse bile genişleyen deformasyon alanı sayesinde toplam sönümlenen enerji artabilir. Bu durum Ø72 borunun, Ø54 mm borudan daha düşük tepe yükünde deformasyona uğraması durumunu açıklamaktadır; fakat kuvvet deplasman eğrisinin altında kalan alanın Ø72

boruda daha büyük olması, Ø72 borunun enerji sönümleme kapasitesinin Ø54 borudan daha büyük olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, küçük çaplı borular yüksek rijitlik gerektiren ve sınırlı deformasyonun toleransı beklenen uygulamalar için uygundur. Orta çaplı borular yüksek deformasyon toleransı ve enerji sönümleme kabiliyeti sayesinde darbe ve titreşim sönümleme uygulamalarında avantaj sunar. Büyük çaplı borular ise yüksek nihai yük kapasitesinin ve darbe dayanımının kritik olduğu sistemlerde tercih edilmelidir. Bu sonuçlar, mühendislik tasarımlarında yalnızca mukavemetin değil, aynı zamanda rijitlik–deformasyon dengesi ve enerji sönümleme kapasitesi gibi parametrelerin de bütünleşik olarak değerlendirilip dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Yük–deplasman eğrisi altındaki alanın temsil ettiği enerji sönümleme kapasitesinin (tokluk) çap büyüdükçe özellikle elasto-plastik bölgede arttığı; ancak kırılma modunun gevrek (ani) kırılmaya kaydığı durumlarda bu artışın sınırlı kaldığı görülmektedir. Elyaf yönlenmesi, matris özellikleri ve sarım açısı gibi üretim parametreleri de çap etkisini değiştirebilmektedir.

Şekil 5.20’ de sunulan mikro hasar analizleri, makroskobik gözlemleri destekler niteliktedir. Ø54 mm numunelerde yoğun matris çatlakları ve kırılmış elyaf uçları, yüksek rijitlik ve sınırlı deformasyon kapasitesi ile uyumluluk göstermiştir. Ø72 mm numunelerde elyaf-matris ara yüzeyinde ayrılmalar (debonding) ve kısmi elyaf sıyrılmaları özellikle basma yönüne dik bölgelerde yaygın olarak görülmüştür. Ø96 mm numunelerde ise elyafların yük aktarımı sırasında kademeli olarak ayrıldığı, delaminasyonun daha geniş alanlara yayıldığı belirlenmiştir. Çap etkisiyle hasar yoğunluğu ve dağılımı değişmektedir; küçük çaplılarda yerel yoğunlaşma (Ø54 mm numunede yoğun matris çatlakları), büyüklerde yayılım (Ø96 mm numunede geniş delaminasyon) görülmüştür. Bu durum literatürdeki çalışmalar ile uyum göstermektedir. (Zhou vd., 2006).



Şekil 5.20. CTP numunelerinin basma testi sonrası mikro hasar analizi.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, filaman sarım yöntemiyle üretilmiş cam elyaf takviyeli plastik (CTP) borularda çap farkının mekanik özelliklere etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. 54, 72 ve 96 mm iç çapa sahip numuneler üzerinde yapılan yakma, statik iç basınç patlatma, halka çekme ve yanıl basma deneyleri sonucunda birtakım bulgular elde edilmiştir. Elde edilen bulgularla beraber CTP kompozit boruların performans değerleri ile ilgili önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Yakma testleri sonucunda elyaf oranlarının üretim standardına uygun olduğu belirlenmiştir. Elyaf hacim oranları numuneler arasında benzerlik göstermiştir; bu durum, elde edilen farklı dayanım değerlerinin yalnızca çap farkından kaynaklandığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, CTP kompozit borular için elyaf hacim oranları (V_f) Ø54, Ø72 ve Ø96 mm ölçülerindeki numuneler için sırasıyla 0,53, 0,55 ve 0,54 olarak belirlenmiştir.

Statik iç basınç deneyleri, farklı çaplara sahip numunelere uygulanan hidrostatik iç basınç testlerinde, her boru için ilk beyazlaşma (mikro çatlak başlangıcı), yoğun beyazlaşma (delaminasyonun ilerlemesi) ve patlama (nihai hasar) anları belirlenmiştir. Statik iç basınç deneyleri sonucunda elde edilen farklı basınç değerleri çap farkının ortaya koyduğu mekanik performans hakkında bizlere önemli bilgiler vermektedir;

- Ø54 mm boruda ilk beyazlaşma 220 bar, yoğun beyazlaşma 300 bar, patlama 500 bar'da gerçekleşmiştir.
- Ø72 mm boruda ilk beyazlaşma 200 bar, yoğun beyazlaşma 280 bar, patlama 380 bar'da meydana gelmiştir.
- Ø96 mm boruda ilk beyazlaşma 180 bar, yoğun beyazlaşma 220 bar ve patlama 310 bar basınçta oluşmuştur. Çap büyüdükçe, patlama basıncı azalmış, dolayısıyla iç basınç dayanımı düşmüştür.

Bu durum, D/t oranının artmasıyla yapının rijitliğinin azaldığını ve çevresel gerilmenin daha erken hasar oluşturduğunu göstermektedir. Boru çapı arttıkça patlama basıncı düşmektedir. Bu azalma, özellikle çap/et kalınlığı oranının (D/t) artmasıyla boru cidarındaki çevresel gerilmelerin artmasından ve rijitliğin azalmasından

kaynaklanmaktadır. Bu bulgular, literatürde yapılan CTP borular üzerindeki iç basınç çalışmalarıyla tam bir uyum içindedir.

Beyazlaşma bölgeleri, elyaf yöneliminin $\pm 55^\circ$ olduğu tabakalarda belirginleşmiş; bu da hasarın elyaf/matris ara yüzeyinden başlayarak elyaf kırılmasıyla ilerlediğini göstermektedir. Patlama anında meydana gelen yüksek enerjili elyaf ayrılımları, kompozit yapının gevrek kırılma davranışını ortaya koymaktadır.

Elde edilen bu değerler, teğetsel gerilme kapasitesinin çapla birlikte azaldığını, ancak büyük çaplı borularda patlama öncesi deformasyon kapasitesinin arttığını göstermektedir. Çapın artması, elastik bölgenin kısılmasına neden olmuş; lineer olmayan davranışın erken başlaması, malzemenin yük altında plastik deformasyona eğilimini artırmıştır. Bu durum, literatürde yapılan kompozit silindir analizlerinde tanımlanan davranış modeliyle örtüşmektedir (Zhou, 1996; Ding ve Zhu, 2024).

Üç farklı çapta yapılan halka çekme deneylerinde, gerilme–gerinim eğrilerinde hem elastik hem plastik bölgeler açık biçimde görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Ø54, Ø72 ve Ø96 mm için sırasıyla 350 MPa, 320 MPa ve 300 MPa olarak tespit edilmiştir.

Gözlemler sonucunda hasar oluşumu; iç yüzeyde mikro çatlak ve beyazlaşma başlangıcı, elyaf/matris ara yüzeyinde delaminasyonun ilerlemesi, elyafların yönelimine dik doğrultuda kırılma ve elyaf ayrılması, ani patlama ile hasarın tamamlanması şeklinde gerçekleşmiştir.

6.2. Öneriler

Çap/et kalınlığı oranı (D/t) mekanik performans açısından kritik parametredir. 20–26 aralığında seçilmesi hem dayanımı hem rijitliği artırır. Küçük çaplı borular (Ø54–Ø72) yüksek basınçlı sistemlerde kullanılmalı; Ø96 ve üzeri borular daha düşük basınçlı hatlarda tercih edilmelidir.

Servis süresince gözlemlenen beyazlaşma bölgeleri, yapının hasar öncülü olarak değerlendirilip optik muayene yöntemiyle periyodik olarak izlenmelidir.

Hasar tespiti ve ömür tahmini için deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar analizleri (FEM) ile desteklenmeli; Hashin, Tsai-Wu gibi hasar modelleriyle doğrulama yapılmalıdır.

Elyaf tipi, reçine oranı ve sarım açısının etkisini inceleyen parametrik çalışmalar, bu tezin devamı niteliğinde önerilmektedir.

Saha koşullarında (UV, sıcaklık, nem) yapılan uzun süreli testlerle çevresel yaşlanmanın etkisi belirlenmelidir.

Farklı sarım açılarında ($\pm 45^\circ$, $\pm 65^\circ$) üretilen numunelerle karşılaştırmalı testler yapılması, kompozit borular için optimum sarım konfigürasyonunu belirleyecektir.

Dijital görüntü korelasyonu (DIC) gibi optik yöntemlerle gerinim dağılımı haritaları çıkarılarak, hasar başlangıç noktaları daha doğru tespit edilebilir.



6. KAYNAKLAR

- Abdellah, M. Y., Alfattani, R., Alnaser, I. A., ve Abdel-Jaber, G. T. (2021). Stress distribution and fracture toughness of underground reinforced plastic pipe composite. *Polymers*, 13(13), 2194. <https://doi.org/10.3390/polym13132194>.
- Abdurehman, K., Satrio, T., Muzayadah, N. L., ve Teten. (2018, November). A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1130, p. 012018). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012018>.
- Alimirzaei, S., Najafabadi, M. A., Nikbakht, A., ve Pahlavan, L. (2023). Investigation of energy absorption capacity of 3D filament wound composite tubes. <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2163437>
- Alharbi, N., Daraei, A., Lee, H., ve Guthold, M. (2023). The effect of molecular weight and fiber diameter on the mechanical properties of single, electrospun PCL nanofibers. *Materials Today Communications*, 35, 105773. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105773>.
- Almansour, F. A., Dhakal, H. N., ve Zhang, Z. Y. (2017). Effect of water absorption on Mode I interlaminar fracture toughness of flax/basalt reinforced vinyl ester hybrid composites. *Composite structures*, 168, 813-825. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.02.081>.
- Al-Shahrani, R. F. (2013). *Finite element modeling of glass fiber reinforced plastic pipes under impact loading* [Yüksek Lisans Tezi, King Fahd University of Petroleum and Minerals]. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/finite-element-modeling-glass-fiber-reinforced/docview/1872279235/se-2>
- ANSI/AWWA C950-07, 2006, "AWWA Standard for Fiberglass Pressure Pipe" *American Water Works Association*, 6666 W. Quincy Ave., Denver, USA.
- Al-Mahfooz, M. J., ve Mahdi, E. (2020). Bending behavior of glass fiber reinforced composite overwrapping pvc plastic pipes. *Composite Structures*, 251, 112656. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112656>.
- Antonucci, V., Giordano, M., Imparato, S. I., ve Nicolais, L. (2002). Autoclave manufacturing of thick composites. *Polymer composites*, 23(5), 902-910. <https://doi.org/10.1002/PC.10487>.
- Askeland, D., Fulay, P. P., ve Wright, W. J. (2014). Atom and ion movements in materials. In *The Science and Engineering of Materials* (pp. 141-179). Cengage Learning.
- Arai, Y., Inoue, R., Goto, K., ve Kogo, Y. (2019). Carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites: A review. *Ceramics International*, 45(12), 14481-14489. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2019.05.065>.
- Arcasoy, O. (2006). Kompozit sektör raporu. *İstanbul Ticaret Odası*, 4-22.

- Arikan, H. (2010). Failure analysis of (± 55) 3 filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure. *Composite Structures*, 92(1), 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.07.027>
- ASTM D1599-14. (2014). *Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings*. ASTM International. <https://www.astm.org/d1599-14.html>
- ASTM D2290-16. (2016). *Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method*. ASTM International. <https://www.astm.org/d2290-16.html>
- ASTM D2412-21. (2021). *Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading*. ASTM International. <https://www.astm.org/d2412-21.html>
- ASTM D2584-18. (2018). *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*. ASTM International. <https://www.astm.org/d2584-18.html>
- Azeem, M., Ya, H. H., Alam, M. A., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., ve Mustapha, M. (2022). Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review. *Journal of Energy Storage*, 49, 103468. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>
- Bai, J., Hu, G., ve Bompard, P. (1997). Mechanical behaviour of ± 55 filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes: II. Micromechanical model of damage initiation and the competition between different mechanisms. *Composites science and technology*, 57(2), 155-164. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(96\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00125-X)
- Bakaiyan, H., Hosseini, H., ve Ameri, E. (2009). Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations. *Composite Structures*, 88(4), 532-541. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.05.017>
- Barreira-Pinto, R., Carneiro, R., Miranda, M., ve Guedes, R. M. (2023). Polymer-matrix composites: characterising the impact of environmental factors on their lifetime. *Materials*, 16(11), 3913. <https://doi.org/10.3390/ma16113913>
- Betts, D., Sadeghian, P., ve Fam, A. (2021). Experimental and analytical investigations of the flexural behavior of hollow ± 55 filament wound GFRP tubes. *Thin-Walled Structures*, 159, 107246. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2020.107246>
- Binner, J., Porter, M., Baker, B., Zou, J., Venkatachalam, V., Rubio Diaz, V., D'Angio', A., Ramanujam, P., Zhang, T., ve Tammana S R C Murthy. (2020). Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review. *International Materials Reviews*, 65(7), 389–444. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1652006>
- Bledzki, A. K., ve Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*, 24(2), 221-274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)

- Boria, S., Scattina, A., ve Belingardi, G. (2017). Impact behavior of a fully thermoplastic composite. *Composite Structures*, 167, 63-75. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.01.083>.
- Bouché, G. A., ve Akono, A. T. (2015). Micromechanics-based estimates on the macroscopic fracture toughness of micro-particulate composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 148, 243-257. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2015.09.037>.
- Buarque, E. N., ve d'Almeida, J. R. M. (2007). The effect of cylindrical defects on the tensile strength of glass fiber/vinyl-ester matrix reinforced composite pipes. *Composite Structures*, 79(2), 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.01.011>
- Caminero, M. A., Rodríguez, G. P., ve Muñoz, V. (2016). Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates. *Composite Structures*, 136, 345-357. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.10.019>.
- Centea, T., Grunenfelder, L. K., ve Nutt, S. R. (2015). A review of out-of-autoclave prepregs—Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 70, 132-154. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.029>
- Chawla, K. K. (2012). Ceramic matrix composites. In *Composite Materials: Science and Engineering* (pp. 249-292). New York, NY: Springer New York.
- Chekalkin, A. A., Babushkin, A. V., Kotov, A. G., ve Shackleina, S. E. (2003). Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines. *Mechanics of Composite Materials*, 39(3), 273-282. <https://doi.org/10.1023/A:1024526412299>
- Chen, F., Zhai, L., Yang, H., Zhao, S., Wang, Z., Gao, C., Lin, J., ve Xu, W. (2021). Unparalleled armour for aramid fiber with excellent UV resistance in extreme environment. *Advanced Science*, 8(12), 2004171. <https://doi.org/10.1002/advs.202004171>
- Cheng, M., Ding, D., Ma, Y., ve Zhu, S. (2024). Damage Characterization of GFRP Hollow Ribbed Emergency Pipes Subjected to Low-Velocity Impact by Experimental and Numerical Analysis. *Polymers*, 16(22), 3116. <https://doi.org/10.3390/polym16223116>
- Chung, D. D. (2010). *Composite materials: science and applications*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-831-5>
- Chung, D. D. L. (2019). A review of multifunctional polymer-matrix structural composites. *Composites Part B: Engineering*, 160, 644-660. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.12.117>.
- Dassios, K. G. (2007). A review of the pull-out mechanism in the fracture of brittle-matrix fibre-reinforced composites. *Advanced composites letters*, 16(1), 096369350701600102. <https://doi.org/10.1177/096369350701600102>.

- Dattilo, S., Cicala, G., Riccobene, P. M., Puglisi, C., ve Saitta, L. (2022). Full recycling and re-use of bio-based epoxy thermosets: chemical and thermomechanical characterization of the recycled matrices. *Polymers*, 14(22), 4828. <https://doi.org/10.3390/polym14224828>.
- Demirci, M. T., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., Akdemir, A., ve Demirci, I. (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, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.045>
- Deniz, M. E., ve Karakuzu, R. (2012). Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1130-1138. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.006>
- Deniz, M. E., Karakuzu, R., Sari, M., ve Icten, B. M. (2012). On the residual compressive strength of the glass–epoxy tubes subjected to transverse impact loading. *Journal of composite materials*, 46(6), 737-745. <https://doi.org/10.1177/0021998311410483>
- Deniz, M. E., Karakuzu, R., ve Icten, B. M. (2013). Transverse impact and axial compression behaviors of glass/epoxy pipes subjected to seawater and impact loading. *International Journal of Damage Mechanics*, 22(7), 1071-1085. <https://doi.org/10.1177/1056789513475687>
- Dobb, M. G., ve Robson, R. M. (1990). Structural characteristics of aramid fibre variants. *Journal of Materials Science*, 25(1), 459-464. <https://doi.org/10.1007/BF00714056>.
- Erçetin, A., Özgün, Ö., ve Aslantaş, K. (2022). Toz metal Al₂O₃ takviyeli Mg₅Sn matrisli kompozitler: Üretim ve karakterizasyon. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1003-1012. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.947051>
- Ertekin, M. (2017). Aramid fibers. In *Fiber technology for fiber-reinforced composites* (pp. 153-167). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00007-2>.
- Farshad, M. (2011). *Plastic pipe systems: Failure investigation and diagnosis*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-42211-1>
- Feldman, D. (1990). Some considerations on thermosetting polymers as matrices for composites. *Progress in polymer science*, 15(4), 603-628. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(90\)90007-N](https://doi.org/10.1016/0079-6700(90)90007-N).
- Fleischer, J., Teti, R., Lanza, G., Mativenga, P., Möhring, H. C., ve Caggiano, A. (2018). Composite materials parts manufacturing. *CIRP Annals*, 67(2), 603-626. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2018.05.005>.

- Frketic, J., Dickens, T., ve Ramakrishnan, S. (2017). Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. *Additive Manufacturing*, 14, 69-86. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2017.01.003>.
- Früh, N., ve Knippers, J. (2021). Multi-stage filament winding: Integrative design and fabrication method for fibre-reinforced composite components of complex geometries. *Composite Structures*, 268, 113969. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.113969>.
- Fu, Y., ve Yao, X. (2022). A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites. *Composites Part C: Open Access*, 8, 100276. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100276>.
- Gabirion, X., Placet, V., Trivaudey, F., ve Boubakar, L. (2016). About the thermomechanical behaviour of a carbon fibre reinforced high-temperature thermoplastic composite. *Composites Part B: Engineering*, 95, 386-394. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.03.068>.
- Gandhi, U., Goris, S., Osswald, T. A., ve Song, Y. Y. (2020). *Discontinuous fiber-reinforced composites: fundamentals and applications*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. <https://doi.org/10.3139/9781569906958.001>
- Gardiner, G. (2009). The making of glass fiber. *Composites Technology*, 15(2). <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>
- Garg, A. C. (1988). Delamination—a damage mode in composite structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 29(5), 557-584. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(88\)90181-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(88)90181-6).
- Gemi, D. S., Şahin, Ö. S., ve Gemi, L. (2021). Experimental investigation of the effect of diameter upon low velocity impact response of glass fiber reinforced composite pipes. *Composite Structures*, 275, 114428. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114428>.
- Gemi, D. S., Şahin, Ö. S., ve Gemi, L. (2022). Experimental investigation of axial compression behavior after low velocity impact of glass fiber reinforced filament wound pipes with different diameter. *Composite Structures*, 280, 114929. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114929>.
- Gemi, L. (2014). *Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı*. [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- 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, L. (2018). Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 153, 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.056>
- Gemi, L., Kayrıçı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S., ve Şahin, Ö. S. (2018). Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes. *Composites Part B: Engineering*, 149, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.006>
- Ghahremani, P., Najafabadi, M. A., Alimirzaei, S., ve Fotouhi, M. (2023). Acoustic emission-based analysis of damage mechanisms in filament wound fiber reinforced composite tubes. *Sensors*, 23(15), 6994. <https://doi.org/10.3390/s23156994>
- Guo, Y., Pérez, M. G., Serhat, G., ve Knippers, J. (2022, April). A design methodology for fiber layup optimization of filament wound structural components. In *Structures* (Vol. 38, pp. 1125-1136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.048>.
- Gurvich, M. R., ve Pipes, R. B. (1995). Strength size effect of laminated composites. *Composites science and technology*, 55(1), 93-105. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(95\)00092-5](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00092-5).
- Ha, S. K., Jang, J. G., Park, S. H., ve Lee, H. K. (2015). Advanced spray multiple layup process for quality control of sprayed FRP composites used to retrofit concrete structures. *Journal of construction engineering and management*, 141(1), 04014060. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000905](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000905).
- Han, M. G., ve Chang, S. H. (2015). Failure analysis of a Type III hydrogen pressure vessel under impact loading induced by free fall. *Composite Structures*, 127, 288-297. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.027>
- Huang, L. J., Geng, L., & Peng, H. X. (2015). Microstructurally inhomogeneous composites: is a homogeneous reinforcement distribution optimal? *Progress in Materials Science*, 71, 93–168. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2015.01.002>
- Huang, S., Fu, Q., Yan, L., ve Kasal, B. (2021). Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials—A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1441-1484. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.05.076>.
- Hull, D., Legg, M. J., ve Spencer, B. (1978). Failure of glass/polyester filament wound pipe. *Composites*, 9(1), 17-24. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(78\)90513-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(78)90513-X)
- Hull, D., ve Shi, Y. B. (1993). Damage mechanism characterization in composite damage tolerance investigations. *Composite Structures*, 23(2), 99-120. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(93\)90015-I](https://doi.org/10.1016/0263-8223(93)90015-I).

- Hussnain, S. M., Shah, S. Z. H., Megat-Yusoff, P. S. M., ve Hussain, M. Z. (2023). Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements. *Polymer Degradation and Stability*, 215, 110452. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110452>.
- Imes, B. W. (2018). *Glass-Polymer Composite Pipes and Joints: Manufacturing, Testing, and Characterization* [Doktora Tezi, West Virginia University].
- Imes, B., Skidmore, M., ve GangaRao, H. (2024). Mechanical Characterisation Of Fibre-Reinforced Glass Polymer Composite Pipes. *NED University Journal of Research*, 21(1). <https://doi.org/10.35453/nedjr-stmech-2024-sc0001>
- International Organization for Standardization. (2006). *Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids—Determination of the resistance to internal pressure—Part 1: General method* (ISO Standard No. 1167-1:2006). <https://www.iso.org/standard/36989.html>
- İpekçi, A., ve Ekici, B. (2024). An innovative composite elbow manufacturing method with 6-axis robotic additive manufacturing for fabrication of complex composite structures. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 37(1), 402-425. <https://doi.org/10.1177/08927057221109153>.
- Jang, D., Lee, M. E., Choi, J., Cho, S. Y., ve Lee, S. (2022). Strategies for the production of PAN-Based carbon fibers with high tensile strength. *Carbon*, 186, 644-677. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.10.061>.
- Jones, M. L. C., & Hull, D. (1979). Microscopy of failure mechanisms in filament-wound pipe. *Journal of Materials Science*, 14(1), 165–174.
- Kalaycıoğlu, B., ve Dirikolu, M. H. (2009). Dikişsiz Metal Astarlı ve Kompozit Sargılı Yüksek Basınç Tankı Tasarımı. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1(2), 53-60.
- Kaner, S. (2024). Polimer Matrisli Karbon Kompozit Malzemelerin SiC Takviye Oranlarının Mekanik ve Metalurjik Özelliklere Etkileri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(2), 605-614. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1407288>
- Kara, M., Uyaner, M., Avci, A., ve Akdemir, A. (2014). Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength. *Composites Part B: Engineering*, 60, 507-514. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.003>
- Kara, M. (2012). *Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı*, [Doktora Tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karimi, N. Z., Minak, G., ve Kianfar, P. (2015). Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission. *Composite Structures*, 131, 107-114. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.04.025>.

- Karvanis, K., Rusnáková, S., Krejčí, O., ve Žaludek, M. (2020). Preparation, thermal analysis, and mechanical properties of basalt fiber/epoxy composites. *Polymers*, 12(8), 1785. <https://doi.org/10.3390/polym12081785>.
- Katerelos, D. T., Kashtalyan, M., Soutis, C., ve Galiotis, C. (2008). Matrix cracking in polymeric composites laminates: Modelling and experiments. *Composites Science and Technology*, 68(12), 2310-2317. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2007.09.013>.
- Kaw, A.K. (2005). *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420058291>
- Kessler, E., Gadow, R., ve Straub, J. (2016). Basalt, glass and carbon fibers and their fiber reinforced polymer composites under thermal and mechanical load. *AIMS Mater. Sci*, 3(4), 1561-1576. <https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2016.4.1561>.
- Khan, R. (2019). Fiber bridging in composite laminates: A literature review. *Composite Structures*, 229, 111418. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111418>.
- Kocaman, R., ve Ateş, S. (2023). Al6061 matrisli SiC Al2O3 ve kömür cürufu tozu takviyeli hibrit kompozitlerin sertlik ve aşınma davranışlarının incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(2), 598-609. <https://doi.org/10.29137/umagd.1287314>
- Kumlu, U., Karacor, B., ve Ozcanli, M. (2025). Effects of different production methods and hybridization on mechanical characteristics of basalt, flax, and jute fiber-reinforced composites. *Materials Testing*, 67(1), 111-124. <https://doi.org/10.1515/mt-2024-0232>.
- Lapena, M. H., ve Marinucci, G. (2017). Mechanical characterization of basalt and glass fiber epoxy composite tube. *Materials Research*, 21, e20170324. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0324>.
- Lee, J. A., ve Mykkanen, D. L. (1987). Metal and polymer matrix composites. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA24962958>
- Li, S., Guo, X., Li, Q., Ruan, D., ve Sun, G. (2020). On lateral compression of circular aluminum, CFRP and GFRP tubes. *Composite Structures*, 232, 111534. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111534>
- Li, W., Wang, T., ve Na, Y. (2016). Study on Size Effect of GFRP Tube Concrete Steel Tube Composite Column under Axial Compression. *Change*, 4(2135), 66-62. <https://doi.org/10.21276/SJET.2016.4.7.6>
- Li, W., Wang, T., ve Na, Y. (2017, August). Research on the Influence of Size Effect for the mechanical Performance of GFRP tube concrete steel tube composite column under axial compression. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 81, No. 1, p. 012125). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012125>

- Li, Z., Zhou, W., Zhang, X., Gao, Y., ve Guo, S. (2021). High-efficiency, flexibility and lead-free X-ray shielding multilayered polymer composites: Layered structure design and shielding mechanism. *Scientific reports*, 11(1), 4384. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83031-4>.
- Liang, C., Gu, Z., Zhang, Y., Ma, Z., Qiu, H., ve Gu, J. (2021). Structural design strategies of polymer matrix composites for electromagnetic interference shielding: a review. *Nano-micro letters*, 13(1), 181. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00707-2>.
- Liang, J. Z., ve Li, R. K. Y. (1998). Prediction of tensile yield strength of rigid inorganic particulate filled thermoplastic composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3), 127-130. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00051-X) [Get rights and content](#)
- Liu, H., Ka, T. A., Su, N., Zhu, Y., Guan, S., Long, J., ve Tafsirojjaman, T. (2024). Experimental study of dimensional effects on tensile strength of GFRP bars. *Buildings*, 14(5), 1205. <https://doi.org/10.3390/buildings14051205>.
- Magrini, T., Fox, C., Wihardja, A., Kolli, A., ve Daraio, C. (2024). Control of Mechanical and Fracture Properties in Two-Phase Materials Reinforced by Continuous, Irregular Networks. *Advanced Materials*, 36(6), 2305198. <https://doi.org/10.1002/adma.202305198>.
- Mallick, P. K. (Ed.). (1997). *Composites engineering handbook*. CRC Press.
- Mallick, P.K. (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition (3rd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005981>
- Markandan, K., ve Lai, C. Q. (2023). Fabrication, properties and applications of polymer composites additively manufactured with filler alignment control: A review. *Composites Part B: Engineering*, 256, 110661. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110661>.
- Martens, M., ve Ellyin, F. (2000). Biaxial monotonic behavior of a multidirectional glass fiber epoxy pipe. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(9), 1001-1014. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00041-5)
- Martins, L. A., Bastian, F. L., ve Netto, T. A. (2012). Structural and functional failure pressure of filament wound composite tubes. *Materials and Design (1980-2015)*, 36, 779-787. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.029>
- Meijer, G., ve Ellyin, F. (2008). A failure envelope for $\pm 60^\circ$ filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(3), 555-564. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.11.002>
- Mohammadi, R., Assaad, M., Imran, A., ve Fotouhi, M. (2024). Fractographic analysis of damage mechanisms dominated by delamination in composite laminates: A comprehensive review. *Polymer Testing*, 134, 108441. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108441>.

- Mohammed, M., Rahman, R., Mohammed, A. M., Adam, T., Betar, B. O., Osman, A. F., ve Dahham, O. S. (2022). Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: Recent advancement. *Polymer Testing*, 115, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107707>.
- Monaldo, E., Nerilli, F., ve Vairo, G. (2019). Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. *Composite Structures*, 214, 246-263. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.02.002>.
- Morkavuk, S. (2016). *Karbon fiber takviyeli plastiklerin kuru ve kriyojenik işleme koşullarında frezelenmesi* [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Mortell, D. J., Tanner, D. A., ve McCarthy, C. T. (2016). An experimental investigation into multi-scale damage progression in laminated composites in bending. *Composite structures*, 149, 33-40. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.03.054>.
- Munro, M. (1988). Review of manufacturing of fiber composite components by filament winding. *Polymer Composites*, 9(5), 352-359. <https://doi.org/10.1002/PC.750090508>.
- Ning, H., Lu, N., Hassen, A. A., Chawla, K., Selim, M., ve Pillay, S. (2020). A review of Long fibre thermoplastic (LFT) composites. *International Materials Reviews*, 65(3), 164-188. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1585004>.
- Oliveira, M. S., Pereira, A. C., da Costa Garcia Filho, F., da Cruz Demosthenes, L. C., Nunes, L. F., de Oliveira Braga, F., de Souza Luz, F., ve Monteiro, S. N. (2019). Comparison of interfacial adhesion between polyester and epoxy matrix composites reinforced with Fique natural fiber. In *Green materials engineering: An EPD symposium in honor of Sergio Monteiro* (pp. 69–76). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5_8
- Orman, S., Dogu, M., ve Ozbek, B. (2024). Optimization of the Filament Winding Process for Glass Fiber-Reinforced PPS and PP Composites Using Box–Behnken Design. *Polymers*, 16(24), 3488. <https://doi.org/10.3390/polym16243488>.
- Onder, A., Sayman, O., Dogan, T., ve Tarakcioglu, N. (2009). Burst failure load of composite pressure vessels. *Composite structures*, 89(1), 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.06.021>
- Özkan, Ş., ve Çoban, Ö. (2021). The hybrid effects of basalt and PVA fiber on properties of a cementitious composite: Physical properties and non-destructive tests. *Construction and Building Materials*, 312, 125292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125292>.
- Pacheco, A., Evangelista-Osorio, A., Muchaypiña-Flores, K. G., Marzano-Barreda, L. A., Paredes-Concepción, P., Palacin-Baldeón, H., Sarmiento-Sullca, A., Olivera-Montenegro, L., Reyes-Bocanegra, J. F., ve Saccatoma-Alcalá, A. (2023). Polymeric materials obtained by extrusion and injection molding from lignocellulosic agroindustrial biomass. *Polymers*, 15(20), 4046. <https://doi.org/10.3390/polym15204046>

- Pavlovski, D., Mislavsky, B., ve Antonov, A. (2007). CNG cylinder manufacturers test basalt fibre. *Reinforced plastics*, 51(4), 36-39. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(07\)70152-2](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(07)70152-2)
- Perillo, G., Grytten, F., Sørbo, S., ve Delhay, V. (2015). Numerical/experimental impact events on filament wound composite pressure vessel. *Composites Part B: Engineering*, 69, 406-417. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.030>
- Perrot, A., Hyršl, J., Bandžuch, J., Waňousová, S., Hájek, J., Jenčík, J., ve Herink, T. (2021). Use of dicyclopentadiene and methyl dicyclopentadiene for the synthesis of unsaturated polyester resins. *Polymers*, 13(18), 3135. <https://doi.org/10.3390/polym13183135>.
- Perrot, A., Hyršl, J., Bandžuch, J., Waňousová, S., Hájek, J., Jenčík, J., ve Herink, T. (2023). A comparative study of a modified unsaturated polyester resin with dicyclopentadiene and methyl dicyclopentadiene blends. *Polymer*, 267, 125639. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125639>.
- Pimenta, S., Patni, M., Bikos, D., ve Trask, R. (2024). The role of constitutive properties on the longitudinal compressive strength of composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 185, 108264. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108264>.
- Prabhakar, M. M., Rajini, N., Ayrilmis, N., Mayandi, K., Siengchin, S., Senthilkumar, K., Prabu, P., Al-Khalid, M., Ramesh, M., ve Ismail, S. O. (2019). An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability. *Composite Structures*, 230, 111419. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111419>
- Rafiee, R. (2016). On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review. *Composite Structures*, 143, 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.037>
- Rafiee, R., ve Mazhari, B. (2016). Simulation of the long-term hydrostatic tests on glass fiber reinforced plastic pipes. *Composite Structures*, 136, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.058>
- Rajak, D. K., Wagh, P. H., ve Linul, E. (2021). Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*, 13(21), 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>.
- Riccio, A., Russo, A., Sellitto, A., Toscano, C., Alfano, D., ve Zarrelli, M. (2020). Experimental and numerical assessment of fibre bridging toughening effects on the compressive behaviour of delaminated composite plates. *Polymers*, 12(3), 554. <https://doi.org/10.3390/polym12030554>.
- Richard, F., ve Perreux, D. (2000). A reliability method for optimization of $[+\phi, -\phi]_n$ fiber reinforced composite pipes. *Reliability Engineering ve System Safety*, 68(1), 53-59. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00002-8)

- Rohde, B. J., Le, K. M., Krishnamoorti, R., ve Robertson, M. L. (2016). Thermoset blends of an epoxy resin and polydicyclopentadiene. *Macromolecules*, 49(23), 8960-8970. <https://doi.org/10.1021/ACS.MACROMOL.6B01649>.
- Roy, A. K., ve Tsai, S. W. (1988). Design of thick composite cylinders. <https://doi.org/10.1115/1.3265597>
- Salavatian, M., ve Smith, L. V. (2012). Matrix damage in composite pressure vessels with a bias fiber orientation. *Journal of composite materials*, 46(22), 2793-2802. <https://doi.org/10.1177/0021998311432775>
- Samancı, A. (2004). *Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP boruların iç basınç altında yorulma davranışı* [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Samancı, A., Tarakçıoğlu, N., ve Akdemir, A. (2012). Fatigue failure analysis of surface-cracked ($\pm 45^\circ$) 3 filament-wound GRP pipes under internal pressure. *Journal of Composite Materials*, 46(9), 1041-1050. <https://doi.org/10.1177/002199831141494>
- Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., ve Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites—a review. *Journal of reinforced plastics and composites*, 33(13), 1258-1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530790>.
- Sebaey, T. A. (2019). Design of oil and gas composite pipes for energy production. *Energy Procedia*, 162, 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.016>
- Sebaey, T. A., ve Ahmed, A. (2023). Numerical investigation into GFRP composite pipes under hydrostatic internal pressure. *Polymers*, 15(5), 1110. <https://doi.org/10.3390/polym15051110>
- Shahabaz, S. M., Sharma, S., Shetty, N., Shetty, S. D., ve MC, G. (2021). Influence of temperature on mechanical properties and machining of fibre reinforced polymer composites: a review. *Engineered Science*, 16(8), 26-46. <https://doi.org/10.30919/es8d553>.
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). *Machining of polymer composites* (Vol. 387355391). New York: Springer.
- Shen, F. C. (1995). A filament-wound structure technology overview. *Materials Chemistry and Physics*, 42(2), 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.036>
- Sheridan, M. H., Shea, L. D., Peters, M. C., ve Mooney, D. J. (2000). Bioabsorbable polymer scaffolds for tissue engineering capable of sustained growth factor delivery. *Journal of controlled release*, 64(1-3), 91-102. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(99\)00138-8](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(99)00138-8).
- Soydan, Z., Şahin, F. İ., ve Acaralı, N. (2024). Advancements in polymeric matrix composite production: A review on methods and approaches. *Turkish Journal of Engineering*, 8(4), 677-686. <https://doi.org/10.31127/tuje.1468998>

- Spencer, B., ve Hull, D. (1978). Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe. *Composites*, 9(4), 263-271.
- Srikar, G., Javeed, S., Nagaraju, M., ve Kumar, K. S. (2023). Experimental Investigations on Cylindrical GFRP Composite Pipes under Compression Loading. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, 44, 1258-1265. <https://doi.org/10.52783/tjpt.v44.i4.1007>
- Sun, G., Tong, S., Chen, D., Gong, Z., ve Li, Q. (2018). Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 636-651. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2018.08.007>.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M., ve Koç, E. (2018). Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(693), 33-46.
- Talreja, R. (1989). Damage development in composites: mechanisms and modelling. *The Journal of strain analysis for engineering design*, 24(4), 215-222. <https://doi.org/10.1243/03093247V244215>.
- Tarakcioglu, N., Akdemir, A., ve Avcı, A. J. C. P. B. E. (2001). Strength of filament wound GRP pipes with surface crack. *Composites Part B: Engineering*, 32(2), 131-138. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(00)00037-8)
- Tarakçıoğlu, N. (1992). *Yüzey çatlaklı ve çatlaksız filaman sarma cam-epoksi borularda sarım açısının malzeme özelliklerine etkisi* [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Tarfaoui, M., Gning, P. B., Davies, P., ve Collombet, F. (2007). Scale and size effects on dynamic response and damage of glass/epoxy tubular structures. *Journal of composite materials*, 41(5), 547-558. <https://doi.org/10.1177/0021998306065287>
- Thomason, J. L. (2019). Glass fibre sizing: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 127, 105619. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619>
- Tran, P., Nguyen, Q., ve Lau, K. (2018). Fire performance of polymer-based composites for maritime infrastructure. *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.06.037>.
- Türkmen, İ., & Köksal, N. S. (2013). Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (CTP) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi. *Celal Bayar University Journal Of Science*, 8(2), 17–30.
- Turon, A., Camanho, P. P., Costa, J., ve Dávila, C. G. (2006). A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading. *Mechanics of materials*, 38(11), 1072-1089. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2005.10.003>.
- Tuttle, M. E. (2003). *Structural analysis of polymeric composite materials*. Crc Press.

- U.S. Environmental Protection Agency. (1995). AP-42, CH 11.13: *Glass Fiber Manufacturing*. <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s13.pdf>
- Vaidya, U. K., ve Chawla, K. K. (2008). Processing of fibre reinforced thermoplastic composites. *International Materials Reviews*, 53(4), 185-218. <https://doi.org/10.1179/174328008X325223>.
- Rojas, E. V., Chapelle, D., Perreux, D., Delobelle, B., ve Thiebaud, F. (2014). Unified approach of filament winding applied to complex shape mandrels. *Composite structures*, 116, 805-813. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.06.009>.
- Vasanthanathan, A., Chellamuthu, K., ve Ramesh, M. (2025). Insight into the Experimental Exploration of GFRP Composite Pipes with and without Zinc Borate. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 16(3), 04025031. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619>
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Devarajan, P., Stefańska, A., Wodzyński, Ł., ve Koda, E. (2023). Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites in civil engineering application—a comprehensive review. *Buildings*, 13(6), 1509. <https://doi.org/10.3390/buildings13061509>.
- Vinson, J. R., ve Sierakowski, R. L. (2008). *Introduction To Composite Materials* (pp. 1–38). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-48414-5_1
- Bolotin, V. V. (1996). Delaminations in composite structures: its origin, buckling, growth and stability. *Composites Part B: Engineering*, 27(2), 129-145. [https://doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00035-6](https://doi.org/10.1016/1359-8368(95)00035-6).
- Wang, J., Mao, Q., Jiang, N., ve Chen, J. (2021). Effects of injection molding parameters on properties of insert-injection molded polypropylene single-polymer composites. *Polymers*, 14(1), 23. <https://doi.org/10.3390/polym14010023>.
- Wang, S. S., Srinivasan, S., ve Cole, B. (1997). Long term leakage failure and life prediction fiber composite laminate tubing under combined internal pressure and axial loading. In *Theory and Experiments 2. nd International Conference on Comp. Materials for Offshore Operations CMOO* (Vol. 2).
- Yao, A. (1989). Optimum Design of Circular Cylindrical Pipes Combined with GFRP/Steel. In *Composite Structures 5* (pp. 637-645). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1125-3_37
- Yavuz, İ., Şi, E., ve Şenol, B. (2024). Investigation of mechanical behavior of glass fiber reinforced extruded polystyrene core material composites. *RSC advances*, 14(19), 13311-13320. <https://doi.org/10.1039/d4ra01740d>.
- Yayla, P. (2016). Fracture Surface morphology of delamination failure of polymer fiber composites under different failure modes. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(2), 264-270. <https://doi.org/10.1007/s11668-016-0077-2>

- Yazdani, M., Rahimi, H., Afaghi Khatibi, A., ve Hamzeh, S. (2009). An experimental investigation into the buckling of GFRP stiffened shells under axial loading. *Scientific Research and Essays*, 4(9), 914–920. <https://doi.org/10.5897/SRE.9000163>
- Yılmaz, T. (2015). 16 Bahar Yarıyılı, Kompozit malzemeler, Doç. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e ait tarihsiz Bahar Yarıyılı ders notları (75 sayfa). *Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, 1-67.
- Yu, M., Liu, H., Xiao, R., Liu, X., Xie, W., Ge, L., Wang, Z., ve Sun, J. (2024). Residual strength and failure mechanism of CF/PPS composites with delamination damage. *Polymer Composites*, 45(13), 12391–12404. <https://doi.org/10.1002/pc.28643>
- Zhao, X., Liang, J., Liu, J., Feng, J., Qin, Z., Gao, H., Mao, Y., Yang, B., Zhu, B., ve Jia, Z. (2023). A novel multi-filament winding technique for type III composite pressure vessel: From CFRP cross-undulation concept to structural performance validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(45), 17237–17250. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.258>
- Zheng, J., Hu, Y., Ma, L., ve Du, Y. (2015). Delamination failure of composite containment vessels subjected to internal blast loading. *Composite Structures*, 130, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.013>
- Zhou, C., Xia, Z., ve Yong, Q. (2006, January). Micro mechanical model of filament wound composite pipe with damage analysis. In *ASME Pressure Vessels and Piping Conference* (Vol. 47543, pp. 67-74). <https://doi.org/10.1115/PVP2006-ICPVT-11-93298>
- Zhou, G. (1996). Effect of impact damage on residual compressive strength of glass-fibre reinforced polyester (GFRP) laminates. *Composite structures*, 35(2), 171-181. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(96\)00031-1](https://doi.org/10.1016/0263-8223(96)00031-1)
- Zhou, M. Y., Ren, L. B., Fan, L. L., Zhang, Y. W. X., Lu, T. H., Quan, G. F., ve Gupta, M. (2020). Progress in research on hybrid metal matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 838, 155274. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155274>.