



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**GRAFEN TAKVİYESİNİN DÜŞÜK HIZLI
DARBE HASARLI VE HASARSIZ BAZALT
ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BASINÇLI
KAPLARIN YORULMA DAVRANIŞLARINA
ETKİSİ**

Harun SEPET

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Harun SEPET tarafından hazırlanan “GRAFEN TAKVİYESİNİN DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARLI VE HASARSIZ BAZALT ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BASINÇLI KAPLARIN YORULMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ” adlı tez çalışması 19/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Danışman

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Üye

Prof. Dr. Behçet DAĞHAN

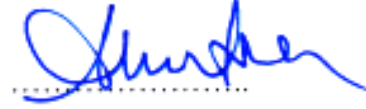
Üye

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü tarafından 17101005 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.



Harun SEPET

Tarih: 19-06-2019

ÖZET

DOKTORA TEZİ

GRAFEN TAKVİYESİNİN DÜŞÜK HIZLI DARBE HASARLI VE HASARSIZ BAZALT ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BASINÇLI KAPLARIN YORULMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

Harun SEPET

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2019, 169 Sayfa

Jüri

Danışmanın Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Behçet DAĞHAN

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

Bu çalışmada, ağırlıkça %0.25 grafen takviyeli ve takviyesiz $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda filaman sarma bazalt/epoksi kompozit basınçlı kapların yorulma davranışları, bazalt/epoksi kompozit borular üzerinden kapalı-uçlu koşullar altında modellenerek araştırılmıştır. Boruların yorulma testleri, kapalı-uçlu değişken iç basınç test koşulları altında ASTM D2992-18 standardına göre, 25 çevrim/dk (0.42 Hz) ve 0.05 gerilme oranında (R) gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri, borularda ilk hasar olan terleme şeklinde sızıntı hasarının ortaya çıktığı maksimum teğetsel gerilmenin ($\sigma_{t,max}$) %30, %35, %40, %50 ve %60 oranlarında yapılmıştır. Yorulma testleri sırasında ortaya çıkan hasarlar gözlemlenerek hasar türü ve oluşum sıraları tespit edilmiştir. Bu hasarlar; terleme (hafif ilk sızıntı), sızma (yüze yayılmış yoğun sızıntı) ve ani patlama (tabaka ayrılması ve elyaf kopması) olarak sıra ile ortaya çıkmıştır. Hasar türüne göre, hasarın oluştuğu çevrim sayıları ve yorulma yükleme oranları kullanılarak yorulma eğrileri çizilmiştir.

Filaman sarma kompozit basınçlı kaplar; uzay, havacılık, savunma ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Riskli ve kritik görevlerde hizmet veren kompozit basınçlı kaplar, servis koşulları altında düşük hızlı darbelere maruz kalabilirler. Darbe sonrası elyaf, matris ve/veya tabakalar arasında oluşan hasarlar, kompozit basınçlı kapların yorulma ömründe düşüşe neden olabilir. Düşük hızlı darbe hasarının yorulma ömrü üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 ve 25 J darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t,max}$ yükleme oranında yorulma ömründeki değişimler belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe sırasında boruların dinamik davranışları, oluşan darbe hasarları ve yorulma sonrası oluşan hasarlar incelenmiştir. Daha sonra, hasarlı boruları elde etmek için gerekli olan darbe enerji büyüklüğü, darbe sonrası kalan ömür çevrimleri dikkate alınarak 5 J seçilmiştir. Kapalı-uçlu iç basınç altında 5 J değerinde düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma ömürleri, hasarsız borular ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi filaman sarma boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç test koşulları altında yorulma davranışları tespit edilerek yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt elyaf, Düşük hızlı darbe, Filaman sarma, Grafen, Hasar davranışı, Kapalı-uçlu, Kompozit basınçlı kap, Nanokompozit, Yorulma ömrü

ABSTRACT

Ph.D THESIS

THE EFFECTS OF GRAPHENE REINFORCEMENT ON THE FATIGUE BEHAVIORS OF LOW VELOCITY IMPACTED AND NON-IMPACTED BASALT FIBER REINFORCED COMPOSITE PRESSURE VESSELS

Harun SEPET

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Philosophy in Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2019, 169 Pages

Jury

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Behçet DAĞHAN

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Asst. Prof. Gürol ÖNAL

In this study, the fatigue behavior of filament winding basalt/epoxy composite pressure vessels with 0.25% graphene nanoplatelets (GnPs) reinforced and non-reinforced $[\pm 55^\circ]_4$ configuration was investigated by modeling under close-ended conditions over basalt/epoxy composite pipes. The fatigue tests of the samples were performed at 25 cycles/min (0.42 Hz) and 0.05 stress ratio (R) under close-ended internal pressure experimental conditions according to ASTM D 2992-18. Fatigue tests were performed at loading rates of 30%, 35%, 40%, 50%, and 60% of the maximum tangential stress (σ_{t_max}) where leakage damage occurred in the form of sweating in the composite pressure vessels. The order and formation of the damage was determined by observing damages generated during fatigue tests. These damages resulted in sweating (slight initial leakage), leakage (intense leakage on the surface) and burst (layer separation and fiber fracture). The fatigue curves were drawn by using fatigue loading rates and failure cycles according to the type of the damage.

Filament winding composite pressure vessels are widely used in space, aerospace, defense and automotive industries. Composite pressure vessels serving risky and critical tasks can be subjected to low-velocity impacts under service conditions. Damages generated in the fiber, matrix, and/or between layers after impact can lead to a decrease in the fatigue life of composite pressure vessel. In order to investigate the effect of low velocity impact damage on fatigue life, the changes in fatigue life by using loading rate of $30\% \sigma_{t_max}$ were determined the basalt/epoxy and GnPs/basalt/epoxy composite pressure vessels damaged by 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 and 25 J impact energies under 50 bar internal pressure. The dynamic behavior of the composite pressure vessels during the low velocity, impact and fatigue damages were examined. Then, impact value of 5 J was selected considering remaining life cycles and formation of the damages in the samples after the impact. The fatigue life of basalt/epoxy and GnPs/basalt/epoxy composite pressure vessels with low velocity impact damage of 5 J under close-ended internal pressure were compared with their undamaged.

In conclusion, the fatigue behavior of low velocity impact damaged and undamaged basalt/epoxy and GnPs/basalt/epoxy filament wound composite pressure vessels under close-ended internal pressure conditions were determined and discussed.

Keywords: Basalt fiber, Close-ended, Composite pressure vessel, Damage behavior, Fatigue life, Filament wound, Graphene nanoplatelets (GnPs), Low velocity impact, Nanocomposite

ÖNSÖZ

Bu çalışmada fikirleri, önerileri, güveni, endüstriyel bilgi ve deneyimiyle bana daima destek ve rehber olan değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU 'na çok teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmalarım esnasında bana her zaman yardımcı olan Necmettin Erbakan Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Ahmet AVCI' ya ve Emekli Öğretim Üyesi Prof. Dr. Onur SAYMAN' a verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Düşük hızlı darbe test çalışmaları esnasında yardımlarından dolayı Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN' e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin deneysel çalışmaları esnasında ölçme ekipman desteğinden dolayı Doç. Dr. Şerafettin EKİNCİ ve Arş. Gör. Eyüb CANLI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Test ekipmanlarının kurulması esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Okan UYAR' a ve Arş. Gör. Fehmi SEVİLMİŞ' e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar için altyapı desteği sağlayan F E R - R O Hidrolik Pnömatik Makina San. ve Tic. Ltd. Şti. sahibi Sayın Hakkı AKDAŞ 'a vermiş olduğu destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için test malzemelerinin temin edilmesi ve incelenmesi gibi konularda 17101005 nolu proje ile maddi destek veren Selçuk Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Gösterdiği özveri ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşim Elif ZARARSIZ SEPET' e ve beni her zaman sabırla bekleyen oğlum Yusuf Kerem' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, beni sürekli destekleyen ve yanımda olan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Annem 'e, Babam 'a ve Kardeşlerime saygı ve şükranlarımı sunarım.

Harun SEPET
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	12
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
2.1. Serbest ve Kapalı-Uçlu Filaman Sarma Kompozit Boru Çalışmaları	16
2.2. Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Levha Çalışmaları.....	21
2.3. Grafen Takviyeli ve Takviyesiz Epoksi Levha, Epoksi/Elyaf Kompozit Çalışmaları	23
3. KOMPOZİT MALZEMELER	30
3.1. Giriş	30
3.2. Kompozit Malzemelerin Yapısı.....	30
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	31
3.4. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	31
3.4.1. Matris malzemeleri	32
3.4.1.1. Termoplastik matrisler	32
3.4.1.2. Termoset matrisler	32
3.4.2. Takviye malzemeleri.....	33
3.4.2.1. Cam elyaf	33
3.4.2.2. Bazalt elyaf	34
3.4.2.3. Aramid elyaf	36
3.4.2.4. Karbon elyaf	36
3.5. Tabakalı Kompozitler	36
3.6. Tabakalı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	37
3.6.1. Filaman sarma yöntemi.....	37
4. DÜŞÜK HIZLI DARBE	39
4.1. Giriş	39
4.2. Darbe Testleri	39
4.2.1. Düşük Hızlı Darbe Testi	39
4.2.2. Yüksek Hızlı Darbe Testi	41
4.3. Darbe Yüğü Altında Kompozitlerin Davranışı	42
4.4. Düşük Hızlı Darbe Testinde Oluşan Hasar Modları	43
4.4.1. Matris hasar modu	43
4.4.2. Delaminasyon hasar modu	44
4.4.3. Elyaf hasar modu	46
4.4.4. Penetrasyon hasar modu	46

5. YORULMA	47
5.1. Giriş	47
5.2. Yorulma Ömrü	48
5.3. Yorulma Testi	48
5.3.1. σ -N Eğrisi	51
5.3.2. ε -N Eğrisi	51
5.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma	52
6. MATERYAL VE METOT	54
6.1. Giriş	54
6.2. Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi	54
6.3. Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Karakterizasyonu	55
6.4. Morfolojik ve Kimyasal Karakterizasyon	56
6.5. Bazalt/Epoksi ve Grafen/Bazalt/Epoksi Boruların Üretimi	56
6.6. Yakma Testi	58
6.7. Boşluk Ölçüm Testi	58
6.8. Kapalı-Uçlu İç Basınç Test Aparatı	59
6.9. İç Basınç Testi ile Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda Elastik Özelliklerin Belirlenmesi	60
6.10. İç Basınç Altında Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Testleri	62
6.10.1. Düşük hızlı darbe test sonuç analizi	65
6.11. Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda İç Basınç Testleri	69
6.12. Kapalı-Uçlu Basınçlı Kaplarda Ağ (Netting) Analizi	70
6.13. Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda Değişken İç Basınç Altında Yorulma Testleri	72
6.14. Hasarlı Kompozit Boruların Hasar Bölgelerinin Görüntülenmesi	74
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	76
7.1. Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Test Sonuçları	76
7.2. Yakma Test Sonuçları	90
7.3. Boşluk Ölçüm Test Sonuçları	90
7.4. Kapalı-Uçlu İç Basınç Altında Elastik Özellikler	91
7.5. Kapalı-Uçlu İç Basınç Test Sonuçları	93
7.6. Yorulma Testlerinde Kullanılacak Olan Darbe Hasarlı Kompozit Borular İçin Darbe Enerji Büyüklüğünün Belirlenmesi	106
7.7. 5 J Darbe Etkisinde Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Test Sonuçları ...	109
7.7.1. Temas kuvveti-zaman grafikleri	109
7.7.2. Temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri	110
7.7.3. Kompozit boruların 5 J düşük hızlı darbe hasar incelemesi	113
7.8. Yorulma Testleri ve Sonuçları	116
7.8.1. Darbe hasarsız grafen takviyeli ve takviyesiz kompozit boruların yorulma test sonuçları	116
7.8.2. Düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları	132
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	149

8.1. Araştırma Sonuçları	149
8.1.1. Grafen takviyeli kompozit levhaların mekanik test sonuçları	149
8.1.2. Kapalı-uçlu i basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların mekanik test sonuçları ve karşılaştırılması	150
8.1.3. Kapalı-uçlu i basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç test sonuçları	151
8.1.4. Kapalı-uçlu i basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları ve hasar oluşumları.....	152
8.1.5. Kapalı-uçlu i basınç altında düşük hızlı darbe uygulanmış bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları ve hasar oluşumları.....	154
8.2 Öneriler	156
KAYNAKLAR	157
EKLER	164
ÖZGEçMİş	167

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D: Boru çapı

d: Deplasman, yer değiştirme

E_e: Yutulmuş enerji

E_a: Elastisite modülü, aksenal yönde rijitlik katsayısı

E_t: Elastisite modülü, teğetsel yönde rijitlik katsayısı

F: Kuvvet

f: Frekans

mV: milivolt

N: Çevrim sayısı

P: Basınç

p: İmpuls (itme)

R: Gerilme oranı

t_r: Boru cidar kalınlığı

t: Zaman

V: Hız

V_y: İzafi hız

V: volt

V_f: Elyafın hacimsel oranı,

W_c: Kompozitin ağırlığı

W_d: Çarpışmada parça üzerine yapılan iş

W_f: Elyafın ağırlığı

.....

α: Elyaf sarım açısı

δ : Yer değiştirme

δ_f : Kalıcı yer değiştirme

ν_y : Poisson oranı, Şekil değiştirme oranı

ρ_c : Kompozitin yoğunluğu

ρ_f : Elyafın yoğunluğu

σ_e : Eksenel gerilme

σ_t : Teğetsel gerilme

σ_n : Basınçlı kabın yzzeyine dik yznde etki eden gerilme

Kısaltmalar

CNC : Bilgisayar Sayımlı Yznetim

CNG : Sıkıştırılmış Doğalgaz

ETK : Elyaf Takviyeli Kompozit

KNT :Karbon Nanotüp

L : Litre

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu

TDK : Türk Dil Kurumu

Alt İndisler

e: Eksenel

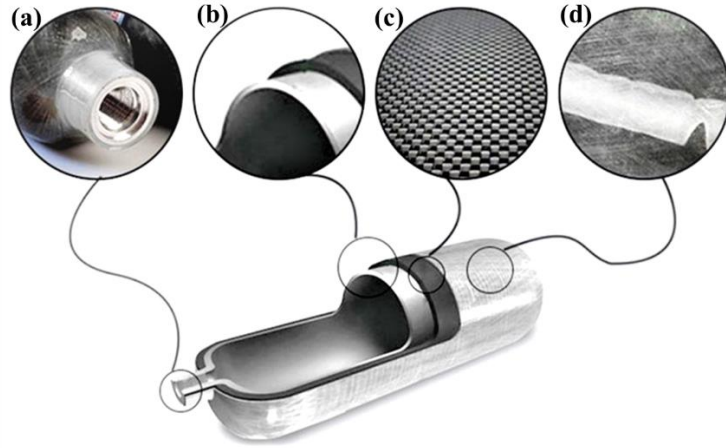
max: Maksimum

min: Minimum

t: Teğetsel

1. GİRİŞ

Basınçlı kaplar, en basit tanımı ile iç basınç altında gaz ya da sıvıyı muhafaza edebilen ve iki tarafı dairesel kesitli dışa bombeli ya da düz kesitli uçlarla kapatılmış silindir biçimli yapılar olarak tarif edilebilir. Bu tip yapılar, 21. yüzyılın havacılık, uzay, roket, otomotiv endüstrisinde tasarlanan mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Basınçlı kaplar genel olarak; çelik, alüminyum alaşımı, titanyum alaşımı, polimer ve kompozit malzemelerden imal edilebilir. Kompozit basınçlı kaplar basit yapılar gibi görünse de, diğer basınçlı kaplara kıyasla, tasarımı en zor olanlar arasındadır. Kompozit basınçlı kaplar, elyaf ve reçine ana bileşenleri ile filaman sarma teknolojisi kullanılarak üretilmektedir. Şekil 1.1’ de gösterilen CNG tankı, alüminyum bir iç astar üzerine filaman sarma yöntemi ile karbon elyaf sarılarak üretilmiştir. Ayrıca, karbon elyaf üzerine cam elyaf sarılarak korozif ortamlardan koruyucu bir tabaka oluşturulmuştur. Ağız kısmı ise, oldukça karmaşık bir tasarıma sahiptir.

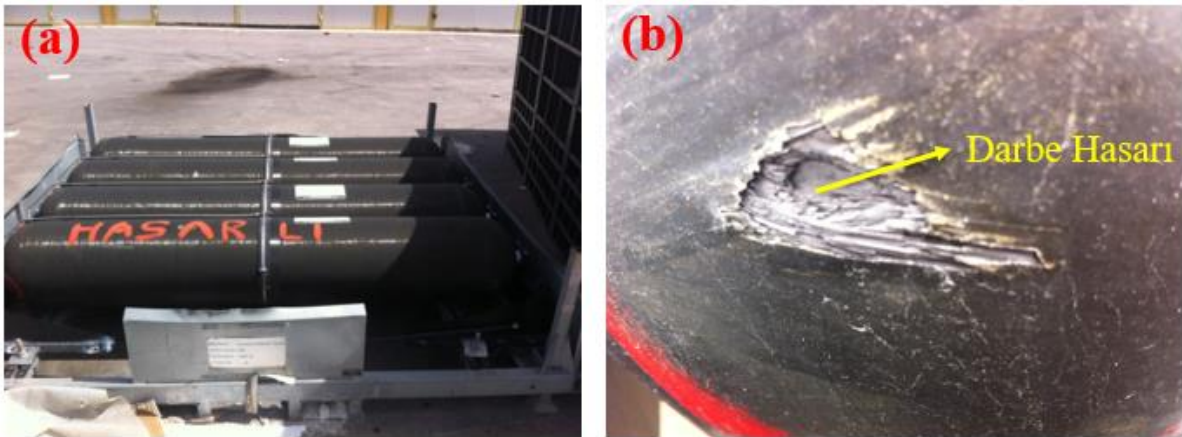


Şekil 1.1 Kompozit basınçlı kap; (a) ağız kısmı, (b) alüminyum iç astar, (c) karbon/epoksi tabaka, (d) cam/epoksi tabaka (Fenan, 2019)

Basınçlı kaplar, uzun yıllar yüksek mukavemetli metal tel ve bant ile sarılarak üretilmiştir. Yüksek dayanım sergileyen elyaflar, filaman sarma yönteminin gelişmesi sonucunda kompozit basınçlı kapların üretiminde kullanılmaya başlandı. Filaman sarma yönteminin geliştirilmesi, özgül dayanımı yüksek basınçlı kapların üretilmesine imkân verdi. Filaman sarma kompozit basınçlı kaplar; uzay, havacılık ve savunma sanayi gibi alanların dışında dalgıç tüpleri, oksijen tüpleri, sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) depolama tankları vb. sivil uygulamalar için de yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Son yıllarda, otobüs, kamyon ve otomobillerde yakıt olarak doğal gazın kullanılmasına izin veren CNG tankları üzerinde ilgi

artmaya başlamıştır. Filaman sarma kompozit borular ise yüksek özgül dayanım ve korozyon ortama dayanıklı hale getirilebilir olmaları nedeniyle basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal madde iletiminde tercih edilmektedir.

Kompozit basınçlı kapların avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Darbe hasarlarına karşı oldukça duyarlıdır. Zayıf darbe etkilerinin neden olduğu görünmez hasarlar, kompozit basınçlı kapların ömürlerini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Birçok depolama ve taşıma alanında kullanılan kompozit basınçlı kaplar servis ve bakım işlemleri sırasında yüksek ya da düşük hızlı darbe yüküne maruz kalabilirler. Çeşitli hızlarda darbe yüklerine maruz kalan kompozit basınçlı kapların mekanik özelliklerindeki değişimler doğru bir şekilde tespit edilmelidir. Şekil 1.2' de Konya Büyükşehir Belediyesi Tatlıcak tesislerinde bulunan doğalgazlı otobüslerde kullanılan CNG tankları gösterilmiştir. Şekil 1.2b' de gösterilen CNG tankının üzerinde görülen darbe hasarı işletme şartlarında meydana gelmiştir. Bu hasar, gözle görülebilir olmasından dolayı tespit edilerek "hasarlı" olarak ayrılmıştır. Kompozit basınçlı kap üzerinde gözle tespit edilemeyen bir darbe hasarı olsaydı; muhtemelen doğalgaz depolanmasına devam edilecekti ve CNG tankı bilinmeyen bir zamanda aniden patlayarak can ve mal kayıplarına neden olacaktı. Kompozit basınçlı kapların yorulma ömrüne etki eden çeşitli hızlardaki darbe yükü ya da çeşitli geometrideki çatlaklar kompozit kapların beklenenden daha önce hasara uğramasına neden olabilir. Bu nedenle, darbeye maruz kalmış kompozit basınçlı kapların yorulma davranışları bu tezin çalışma konuları arasına girmiştir.



Şekil 1.2 (a) Toplamda 1,000 L' lik CNG depolama ünitesi, (b) 250 L kapasiteli darbe hasarlı CNG tankı

Günümüzde kompozit basınçlı kapların üretiminde karbon ve cam elyaflar yaygın olarak kullanılırken bazalt ve aramid elyaflar henüz test aşamasındadır. Bazalt elyaf, yüksek çekme mukavemeti, yüksek termal dayanımı, yüksek darbe dayanımı ve geri dönüştürülebilirlik, yüksek yorulma dayanımı, yüksek kimyasal kararlılık, çevre dostu,

bulunabilirlik ve nispeten düşük maliyet gibi özelliklere sahiptir. Bu avantajlara sahip olması ve literatürde güncel araştırma konusu olmasından dolayı bu tez çalışmasında incelenecek kompozit basınçlı kapların üretimlerinde elyaf takviye malzemesi olarak tercih edilmiştir.

Filaman sarma kompozit basınçlı kaplar ve borular polimer matrisli kompozit malzemeler sınıfına girer. Polimer matris malzemeleri genel olarak termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır. Termosetler grubunda yaygın olarak polyester ve epoksi reçine kullanılır. Ancak, vinil ester, bisfenol ve fenolik reçinelerin kullanımı da gün geçtikçe artmaya başlamıştır. Epoksi reçineler, en yaygın kullanılan polimer matris malzemelerinden biridir. Çünkü, düşük maliyetli polyester 'e göre daha iyi mekanik, yorulma ve termal özellikler yanında takviye/matris arayüzeyinin daha kuvvetli oluşmasını sağlar Epoksi reçinelerin, havacılık, uzay, otomotiv ve savunma endüstrisinde kullanılan kompozit malzemelerin matris malzemesi olarak seçilmesini sağlayan özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilmelerinden dolayı üretim kolaylığı sunması
- Yüksek aşınma direncine sahip olması
- Çeşitli yüzeylere iyi yapışabilmesinden dolayı takviye/matris arayüzey özelliğinin yüksek olması
- Mükemmel kimyasal kararlılığa sahip olması
- Sertleşme esnasında çekme oranının diğer reçinelere göre daha az olması

Epoksi reçineler, filaman sarma yöntemi ile üretilen kompozit basınçlı kapların ve boruların matris malzemesidir. Nispeten mekanik özellikleri iyi olan epoksiler, kırılma doğalarından dolayı gevrek karakteristik sergiler. Bu nedenle, çekme, eğilme ve darbe yükleri karşısında kopma ya da kırılma esnasında düşük şekil değiştirme oranı gösterirler. Bu durum, epoksilerin uygulama alanlarını sınırladığı için birçok araştırmacı, epoksi reçinenin sahip olduğu sınırlı mekanik özellikleri nano boyutlu takviyeler ile geliştirmeye çalışmıştır. Bu amaç için yaygın olarak kullanılan karbon esaslı nano boyutlu takviyeler; fulleren, karbon nanotüp, karbon nano elyaf, nanokarbon ve grafen sayılabilir. 2004 yılında Andre Geim ve Kostya Novoselov, kütle halindeki grafitten tek atom kalınlığında iki boyutlu grafen kristalini elde ederek 2010 yılında Nobel fizik ödülünü kazandılar ve grafen' i bilim dünyasına tanıttılar. 2004 yılından itibaren grafen üzerindeki çalışmalar hızla günümüze kadar devam etmektedir. Bu çalışmalar neticesinde grafenin, polimer kompozit malzemelere mükemmel mekanik özellikler kazandırdığı rapor edilmiştir. Grafenler, matris malzemeleri ile oluşturduğu mükemmel yapışma (adezyon) özelliğinden dolayı polimer matris malzemelere yüksek darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı kazandırmaktadır. Epoksi matrisinin darbe ve yorulma özelliklerini geliştirdiği için çalışmamızda grafen takviyesi tercih edilmiştir.

Havacılık, uzay, savunma ve otomotiv gibi özel kullanım alanları olan kompozit malzemelerin, farklı şiddet ve doğrultularda meydana gelen darbe etkilerine karşı darbe dayanımlarının araştırılması gerekmektedir. Bu sebeple, darbe yüklerine maruz kalarak hasara uğrayan kompozit basınçlı kapların, değişken iç basınç altında yorulma testleri yapılarak darbe sonrası kalan performanslarının araştırılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, epoksi reçinenin çekme, eğilme ve darbe özelliklerini geliştiren ağırlıkça %' de grafen takviye oranını belirleyerek $[\pm 55^\circ]_4$ filaman sarım konfigürasyonuna sahip bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi kompozit basınçlı kapları kompozit borular üzerinden kapalı-uçlu koşullar altında modelleyerek, değişken iç basınç etkisinde yorulma davranışlarını araştırmaktır. Ayrıca, kapalı-uçlu iç basınç altında düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma ömürleri araştırıldı ve hasarsız boruların yorulma ömürleri ile de karşılaştırıldı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez çalışması ile ilgili literatür çalışmaları üç başlık altında toplanmıştır. İlk olarak, serbest ve kapalı-uçlu koşullar altında elyaf takviyeli filaman sarma kompozit boruların iç basınç altında patlama, değişken iç basınç altında yorulma ve düşük hızlı darbe ve kırılma çalışmaları incelenmiştir. İkinci olarak, elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit levhalar üzerinde kırılma, yorulma ve düşük hızlı darbe çalışmalarına yer verilmiştir. Son olarak, elyaf takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde grafen etkisini araştıran çalışmalar üzerinde durulmuştur.

2.1. Serbest ve Kapalı-Uçlu Filaman Sarma Kompozit Boru Çalışmaları

Perreux ve Joseph, çapı 60 mm ve sarım açısı $\pm 55^\circ$ olan filaman sarma cam elyaf takviyeli kompozit basınçlı kapların iki eksenli yüklemeye maruz bırakarak yorulma performansını deneysel olarak değerlendirdiler. Hasar ve yorulma ömrü üzerinde frekansın etkisini incelemiş ve sürünme/yorulma etkileşimi nedeniyle ömrün frekansla birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, frekansa göre çevrim başına hasar miktarının sürünme/yorulma etkileşiminden kaynaklandığını bulmuşlardır. Kullandıkları sürünme modelleme prosedürünün genelleştirilmesi ile frekans etkilerini hesaba katan bir termodinamik model geliştirmişlerdir. Mikro çatlak hasarına bağlı olarak bir skaler büyüklük yardımıyla hasarı tanımlamak için bir mikro mekanik model kullandılar. Eksenel modüldeki değişimi, skalar hasar değişkeni olarak seçtiler. Hasar kinetiğini ve yorulma/sürünme etkileşimini bir dizi iç değişken kullanarak yorumladılar. Geliştirilen model, zamana bağlı hasarı değerlendirmek için kullanışlı olduğunu ve bu nedenle uzun süreli sürünme testleri için kullanılabilir olduğunu rapor etmişlerdir (Perreux ve Joseph, 1997).

Krishnan ve ark. kısa dönem çevrimsel yükleme oluşturabilen ve farklı eksenel/teğetsel gerilme koşulları sağlayabilen otomatik bir test cihazı geliştirdiler. 100 mm çaplı cam elyaf takviyeli borular, filaman sarma yöntemi kullanılarak $[\pm 45^\circ]_4$, $[\pm 55^\circ]_4$ ve $[\pm 63^\circ]_4$ olarak üç farklı filaman sarma konfigürasyonunda üretildi. Borular, (2H: 1A), (1 H: 1A), (4H: 1A), (1 H: 0A) ve (0H: 1A) gibi beş farklı eksenel-teğetsel yükleme koşullarında fonksiyonel hata oluşuncaya kadar çevrimsel yüklemeye maruz bırakıldı. Uygulanan eksenel ve teğetsel gerilme oranlarına bağlı olarak, terleme (weepage) ve lokalize sızıntı (leakage) hasar oluşumları gözlemlendi. (0H: 1A) ve (1H: 1A) koşullarında eksenel gerilme altında matris çatlama hasarı

meydana geldi. Terleme hasarı, (2H: 1A) yük altında oluştu ve bu hasar tabakalar arası kayma gerilmesinden kaynaklandığı rapor edildi. Lokalize sızıntı hasarı ise, (1H: 0A) ve (4H: 1A) değerlerindeki teğetsel yüklemeler altında görüldü. İlk-kat-hasarına (first-ply-failure) dayalı olarak yukarıda bahsedilen boruların hasar zarfları çıkarıldı. (2H: 1A) yükleme koşulları için $[\pm 55^\circ]_4$, (1H:1A) yükleme koşulları için $[\pm 45^\circ]_4$ ve (4H: 1A) yükleme koşulları için $[\pm 63^\circ]_4$ konfigürasyonundaki filaman sarma boruların uygun olduğu önerildi (Krishnan ve ark., 2015).

Demirci, SiO₂ takviyesinin yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt/epoksi boruların yorulma davranışlarına etkisini; 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve 0.7 $\sigma_{\theta\theta\text{statik}}$ yorulma yükleme oranlarında serbest-uçlu koşullar altında deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, ağırlıkça %4 SiO₂ takviyeli ve takviyesiz, yüzey çatlaklı ve çatlaksız $[\pm 55^\circ]_6$ bazalt/epoksi boruların serbest-uçlu statik iç basınç deneyleri yapılmıştır. Bazalt/epoksi borulara %4 SiO₂ takviye edilmesi boruların hem yorulma ömürlerini hem de sonuç hasar oluşumlarını değiştirmiştir. SiO₂ takviyesi; çatlak ucu körelme, çatlak sapma ve dallanma, çatlak oluşumunu geciktirme mekanizmaları beraberinde matriste oluşan plastik deformasyonlar ve arayüzey dayanım artması sonucunda bazalt/epoksi boruların yorulma ömürlerini arttırmıştır (Demirci, 2015).

Kaynak ve Mat, filaman sarma cam elyaf/epoksi tüplerin tek eksenli yorulma davranışını incelemiştir. $[\pm 55^\circ]_3$ filaman sarma boruların yorulma ömrü çekme mukavemetinin %60, %70 ve %80 yorulma yükleme oranları için belirlendi. Sabit genlikli sinüzoidal yükleme ve 0.1 gerilme oranı (R) kullanarak her bir yorulma yükleme seviyesi için üç farklı frekans uygulanarak boruların yorulma ömür değişimleri araştırıldı (Kaynak ve Mat, 2001).

Tarakçıoğlu tarafından, 72.75 mm iç çapında, ortalama 2.5 mm et kalınlığında ve 300 mm uzunluğunda cam elyaf takviyeli borular, $[\pm 45^\circ]_4$, $[\pm 55^\circ]_4$ ve $[\pm 75^\circ]_4$ konfigürasyonunda filaman sarma yöntemi kullanılarak üretildi. $[\pm 45^\circ]_4$, $[\pm 55^\circ]_4$ ve $[\pm 75^\circ]_4$ borular üzerinde serbest-uçlu iç basınç testi uygulayarak sırasıyla; poisson oranlarını 0.78, 0.56, 0.32, elastisite modüllerini 15.4, 23.4 ve 39.3 MPa olduğunu rapor etti. Test sonuçlarına göre, sarım açısı büyüdükçe elastisite modülü artarken, şekil değiştirme oranı azaldı. Sonuç olarak, büyük sarım açılarında boruların daha rijit davrandığını tespit etti (Tarakçıoğlu, 1992).

Arıkan, a/t =0.50 çatlak derinlik oranına ve farklı U açılarında (15°; 30°; 45°; 60°; 75° ve 90°) yönlendirilmiş bir yüzey çatlağına sahip $[\pm 55^\circ]_3$ cam elyaf takviyeli boruların (CTP) serbest-uçlu koşullar altında iç basınç testlerini gerçekleştirdi. CTP boru hasarlarını analiz etti

ve çatlak davranışı ve patlama dayanımı arasındaki ilişki ortaya koydu. CTP borulardaki çatlak açısı arttıkça patlama basıncı arttığı ve çatlak açısının etkisinin azaldığı bulundu. Bunun sonucunda, 55° yönlendirilmiş yüzey çatlağına sahip CTP boruda patlama dayanımı en yüksek bulundu. Patlama basıncının yükselmesinin diğer nedeni, çatlak uzunluğunun azalması olarak rapor edildi. Ayrıca çatlak ilerlemesinin Mod II 'de ortaya çıktığını ve çatlak bölgesinin incelenmesi sonucunda çatlak büyümesinin delemantasyon ile başladığını vurguladı (Arikan, 2010).

Önder ve ark., kapalı-uçlu iç basınç altında filaman sarma kompozit boruların (basıncılı kap) patlama basıncını inceledi. Ayrıca, filaman sarma kompozit basınçlı kaplar üzerinde sıcaklık ve sarım açısının etkilerini araştırdılar. Optimum sarım açısını doğrulamak için sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel yaklaşımlar kullanıldı. Hidrotermal ve diğer mekanik özellikler E-cam/epoksi plakalar üzerinde ölçüldü. Bazı analitik ve deneysel çözümler, ticari bir yazılım olan ANSYS 10.0' un kullanıldığı sonlu eleman çözümleri ile karşılaştırıldı. Filaman sarım açıları ve oryantasyonları için analitik ve deneysel çözümler arasında yakın sonuçlar elde edildiği rapor edildi (Onder ve ark., 2009).

Alexis A. Krikanov, yüksek rijitliğe sahip kompozit basınçlı kaplar üzerinde bir çalışma yürüttü. Gerilme altında tabakalı kompozit basınçlı kapların tasarımında yeni bir yöntem önerdi. Verilen elyaf yönlerinde optimum katman kalınlıklarını bulmak için bir grafik analiz yöntemi suundu. Çevresel yönde sarılmış tabakanın ikinci bir helisel tabakayla değiştirilmesi, ekstra tabaka eklenmesi ve rijitliği daha yüksek bir kompozit malzeme kullanılması durumunda gerilme için yaygın olarak kullanılan yöntemlerin üzerine yeni birim şekil değiştirme yöntemi önerdi. Basıncılı kaplara en uygun tabaka konfigürasyonlarını elde etmek için sayısal ifadeleri ve grafikleri sundu (Krikanov, 2000).

Ellyin ve ark., ticari olarak imal edilmiş ($\pm 45^\circ$, 0° , $\pm 70^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 70^\circ$) değerlerinde sarılan çok yönlü kompozit boru için değişen yükleme hızları altında çift eksenel monotonik özellikleri deneysel olarak araştırdılar. Testler, iki yükleme hızında gerçekleştirildi. Artan hızdan dolayı sonuç hata gerilmelerinde yaklaşık %10 'luk bir artış bulundu. Test edilen tüm gerilme oranlarında hem teğetsel hem de eksenel doğrultular için bu artışlar belirgindi. Eksenel elastisite modülü, gerilme oranından biraz etkilenmiş gibi görünse de, teğetsel modülde belirgin bir etki gözlenmemiştir. Dolayısıyla, yükleme oranının çok yönlü kompozit borunun elastik özelliklerinin belirlenmesinde çok az etkili olduğu vurgulandı (Ellyin ve ark., 1997).

Tarakçıoğlu ve ark., yüzey çatlaklı $[\pm 45^\circ]_4$, $[\pm 55^\circ]_4$ ve $[\pm 75^\circ]_4$ filaman sarma cam/epoksi borular üzerinde serbest-uçlu iç basınç testleri gerçekleştirilerek sarım açısının boruların dayanımları üzerinde etkisini teorik ve deneysel olarak araştırdılar. Filaman sarma boru hasarlarının analitik tahminleri için Newman-Raju denklemleri kullanıldı. Çeşitli çentik-en-boy ve çentik derinlik oranları için çentik etkisinin deneysel sonuçları belirlendi. Yüzey çatlağının $[\pm 45^\circ]_4$, $[\pm 55^\circ]_4$ borulara kıyasla, $[\pm 75^\circ]_4$ borularda patlama dayanımı açısından daha etkili olduğu bulundu. Ayrıca, yüzey çatlağı bulunmayan borularda patlama basıncının sarım açısının $\pm 45^\circ$ 'den $\pm 75^\circ$ 'e yükselmesi ile arttığı bulundu (Tarakcioğlu ve ark., 2001).

Tarakçıoğlu ve ark. tarafından, değişken iç basınç altında cam/epoksi $[\pm 55^\circ]_3$ filaman sarma borularının çeşitli teğetsel yorulma davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Yorulma testi gerilme seviyelerinin büyüklüğü iç basınç altındaki dayanıma göre altı farklı seviyede alınmıştır. Bu maksimum gerilme seviyeleri (0.42 Hz 'de ve R = 0.05 gerilme oranı) sabit mukavemetin %30 (121.5 MPa), %35 (141.7 MPa), %40 (162 MPa), %50 (202.5 MPa), %60 (243 MPa) ve %70 (283.5 MPa)' dır. Üç farklı hasarın ortaya çıktığı (beyazlama, sızma ve patlama sonuç hasar) çevrim sayısı kaydedildi. Yorulma sonuçları SN-eğrileri vasıtasıyla sunuldu. Değerlendirilen gerilme ve frekanslar altında bir yorulma sınırının olduğuna dair bir kanıt bulunmadığı rapor edildi. Cam/epoksi filaman sarma boruların makro hasar aşamaları sırasıyla; beyazlama (elyaf / matris arayüzey ayrılması ve delaminasyon), sızma ve patlama sonuç hasarı olduğu bulundu (Tarakçıoğlu ve ark., 2005).

Tarakçıoğlu ve ark. tarafından, değişken iç basınç altında yarı eliptik yüzey çatlağına sahip $[\pm 55^\circ]_3$ filaman sarma CTP boruların yorulma testleri yapıldı. Ayrıca, yorulma testlerinde, yüzey çatlağının boyutları ve uygulanan teğetsel gerilme seviyelerinin yorulma davranışı üzerinde etkileri araştırılmıştır. Ek olarak, delaminasyon alanı ile yorulma çevrimi (A-N) arasındaki ilişki ortaya çıkarılmıştır. Delaminasyon yayılımının ilk aşamasında delaminasyon alanı hızla arttığı ve daha sonra yavaşladığı bulundu. Yorulma testi gerilme seviyelerinin büyüklüğü, iç basınç altındaki dayanıma dayanarak seçildi. Tekrarlı değişken gerilme, dakikada 25 çevrim hızında (0.42 Hz frekans) ve üç farklı yorulma yükleme seviyesinde uygulanmıştır. Yorulma yükleme oranları, boruların iç basınç altında maksimum teğetsel gerilmenin ($\sigma_{\theta\theta\text{sabit}}$) %30 (135 MPa), %40 (180 MPa) ve %50 (225 MPa)' si olarak alınmıştır. Yorulma sonuçları SN eğrileri vasıtasıyla sunuldu. Gerilme-ömür eğrilerinin, 0.25, 0.38 ve 0.50 çatlak derinliği (a/t) oranları için yaklaşık olarak paralellik gösterdiği bulundu. Çatlak derinlik oranına göre maksimum yorulma ömrü sırasıyla; 0.25, 0.38 ve 0.50 için

150.000, 60.000 ve 20.000 olarak bulunduğu rapor edildi. Yorulma testlerinde, hasar sadece yüzey çatlaklarının cam elyafını kestiği bölgede gerçekleştiği ve bu hatanın, çatlak uzunluğu (2c) veya sarım açısının sınırını aşmadığı durumlarda olduğu yorumlandı. Ayrıca, çatlak ilerlemesi Mod II etkisinde gerçekleştiği vurgulandı.

Samancı ve ark. tarafından, yarı eliptik yüzey çatlakına sahip $[\pm 75^\circ]_3$ filaman sarma CTP boruların yorulma testleri serbest-uçlu iç basınç altında gerçekleştirildi. Yorulma testleri, programlanabilir mantıksal kontrolör (PLC) kontrollü servo hidrolik test makinesi kullanılarak yapıldı. Çentik derinlik (a/t; 0.25-0.38-0.5) ve derinlik-uzunluk (a/c = 0.2) oranlarının, teğetsel maksimum gerilme değerinin %30, %40 ve %50 oranında yükleme yapılarak yorulma davranışı üzerindeki etkileri karşılıklı araştırılmıştır. Yorulma testi gerilme seviyelerinin büyüklüğü iç basınç altındaki dayanıma dayanarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca delaminasyon alanları ile yorulma çevrimi (A-N) arasındaki ilişki de sunuldu. Kompozit boru üzerinde görülen hasarlar, yüzeyin cam elyaf demetlerini kesen bölgede meydana geldiğini ve bu hasar, çatlak uzunluğunu (2c) ya da $\pm 75^\circ$ sarım açısının yönünü aşmadığı şeklinde yorumlandı. Çatlak ilerlemesinin, Mod II etkisinde delaminasyon olarak etkili olduğu ve a/t oranı arttıkça, yorulma ömrü önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur. Uygulanan yük arttıkça delaminasyon hasarının hızla yayıldığı ve belirli bir büyümeden sonra, delaminasyon yayılımının yavaşladığı ancak hasar elde edilinceye kadar herhangi bir artış göstermedi rapor edildi. Yüksek yükleme oranında ise, delaminasyon yayılım oranı hızlı bir şekilde azaldığı, düşük yükleme oranında delaminasyon oluşumunun çok daha fazla zaman aldığı ve a/t oranının artmasıyla delaminasyon hasarının oluşumu için çevrim sayıları önemli ölçüde azaldığı rapor edildi (Samancı ve ark., 2008).

Ellyin ve Martens, çeşitli teğetsel ve aksel yüklerle maruz kalan bir filaman sarma cam elyaf/epoksi borunun sızma hasar davranışını ve iki eksenli yorulma davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Kompozit bir borunun uzun vadeli dayanımını belirlemek için ASTM D2992 standardını kullandılar. Yorulma testlerini, 25 çevrim/dk hızında ve 0.05 gerilme oranında gerçekleştirdiler (Ellyin ve Martens, 2001).

Deniz ve ark., 100 mm iç çapa, yaklaşık 1.75 mm et kalınlığına ve $[\pm 55^\circ]_3$ istifleme dizisine sahip cam/epoksi boruların patlama basınçları üzerinde tuzlu su ve darbe etkisini deneysel olarak araştırdılar. Boruların bir kısmı, 3, 6 ve 9 aylık zaman periyotları boyunca oda sıcaklığında yapay deniz suyunda koşullandırıldı. İç basınç testleri kapalı-uçlu koşullarda bir test aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3, 6 ve 9 ay deniz suyuna maruz kalan borular

üzerinde iç basınç testleri gerçekleştirilerek patlama basınçları araştırıldı. İç basınç testlerinde sızma ve patlama sonuç hasarları görülmüştür. Darbe hasarsız numunelerde patlama sonuç hasarı boruların son kısımlarında görülürken darbe hasarlı numunelerde patlama hasarı darbe hasar bölgesinde gözlemlenmiştir (Deniz ve ark., 2013a).

Deniz ve ark., dört farklı periyotta deniz suyuna maruz bırakılan $[\pm 55^\circ]_3$ konfigürasyona sahip cam/epoksi borular üzerinde darbe etkisi araştırmışlardır. Farklı çevresel koşullara göre farklı darbe enerji seviyeleri için darbe testleri gerçekleştirildi. Darbe yüküne maruz kalan numunelerde kesme gerilmeleri ve enine normal gerilmeler nedeniyle eğilme gerilmeleri ve delaminasyon nedeniyle matris çatlaması meydana geldiğini rapor ettiler. Darbe hasarlı ve hasarsız boruların yorulma çevrim sayıları, deniz suyuna daldırılmış ve daldırılmamış koşullarda ve farklı darbe enerji seviyelerinde karşılaştırıldı. Yorulma çevrim sayıları terleme, sızma ve patlama sonuç hasarı olarak adlandırılan üç tür hasara göre kaydedilmiştir. Daha sonra, darbe hasarlı ve hasarsız boruların yorulma ömrü üzerinde çevre şartları ve darbe enerjilerinin etkileri belirlenmiştir (Deniz ve ark., 2013b).

Olabi ve ark., dinamik yüklere maruz kalan çelik borular üzerinde çalıştılar. Dinamik testler, 3 m/s ve 5 m/s hızlarında ve sabit kütle kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe etkisine gösterdikleri davranış ve enerji absorbe etme kapasiteleri LS-DYNA programı kullanılarak analiz edilmiştir (Olabi ve ark., 2008).

Günaydın ve ark., kompozit tamir yamaları ve yama tabakalarının sayısının yüzey çentikli kompozit boruların yorulma davranışları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada borular, iki ila yedi katmanlı cam/epoksi kompozit yamalar kullanılarak tamir edildi ve hasar durumları incelendi. S-N eğrileri kullanılarak yorulma ömür değişimleri tespit edildi. Yorulma testleri, tamir edilen boruların yorulma ömrünün yama katmanlarının sayısını artışı ile arttığını göstermiştir. Diğer yamalara göre yedi katmanlı kompozit yama, yorulma hasarının önlenmesinde ve yüzey çentikli boruların yorulma ömrünün arttırılmasında en etkili yama olmuştur (Günaydın ve ark., 2013).

2.2. Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozit Levha Çalışmaları

Ataş ve ark., çeşitli kalınlıklarda dokunmuş E-cam/epoksi plakalar üzerinde tekrarlanan darbe etkisini deneysel olarak çalıştılar. Tek darbe altında oluşan toplam hasar alanları, tekrarlı

darbe etkisi ile karşılaştırıldığında artmıştır. Delaminasyon alanlarının ve elyaf kopma hasarlarının, darbe sayısı arttıkça arttığını gözlemlemişlerdir (Atas ve ark., 2013).

Chen ve ark., ağırlıkça %0.5 ve %1.5 çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz bazalt/epoksi kompozit plakalar üzerinde çekme testleri gerçekleştirerek, takviye oranlarının etkisini karşılaştırdılar. Çekme testleri sonucunda en iyi mekanik özellikleri, ağırlıkça %0.5 karbon nanotüp takviye oranı verdiğini bildirdiler (Chen ve ark., 2009).

Uyaner ve Kara, E-cam/epoksi plakaların üzerinde darbe hasarının oluşum nedenlerini araştırmak için darbe hızı, istif sayısı, vurucu kütlesi, numune geometrisi ve darbe enerjisi parametrelerini kullanarak özel olarak geliştirilmiş bir ağırlık düşürme test makinesi ile düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirdiler. Darbeden sonra, test numunelerinin hasarlı bölgelerin fotoğraflarını, güçlü bir ışık kaynağı yardımıyla elde ettiler. Numunelerin hasar gören bölgeleri incelendiğinde, darbe enerjisinin artmasıyla hasar gören bölgelerin genişlediği açıkça görüldü. Sert metalik darbe vurucunun numuneye nüfuz etmesi, matrisin lokal olarak ezilmesine neden olduğu belirtildi. Eğilme rijitliği ve diğer değişikliklerin zig-zag şeklindeki salınımları, numunede oluşan hasarları (matris çatlaması ve delaminasyon) gösterdiği söylendi. Darbe enerjisindeki artış, numunede oluşan hasar miktarında karşılık gelen bir artışa neden oldu. Buna dayanarak, grafikler üzerinde görülen salınım şiddeti, darbe enerjisi arttıkça yükseldiğini vurguladılar (Uyaner ve Kara, 2007).

Kim ve ark., fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp takviyeli bazalt/epoksi plakalar üzerinde üç nokta eğilme ve Mod-I kırılma testleri gerçekleştirdiler. Silan ile fonksiyonelleştirilmiş %1 karbon nanotüp takviyeli ve asit ile fonksiyonelleştirilmiş bazalt/epoksi plakaların eğilme dayanımlarındaki artışın sırasıyla, %14 ve %10 olduğunu belirtmişlerdir. Silan ile yapılan fonksiyonelleştirme işlemi tabakalar arası Mod-I kırılma tokluğunu, asit ile yapılan test numunesine göre yaklaşık %40 oranında daha fazla olduğunu belirttiler. Silan ile yapılan fonksiyonelleştirme işleminde bazalt elyaf ile epoksi matris arasında daha iyi arayüzey oluşturarak adezyon ve dispersiyon derecelerinin arttığını rapor ettiler (Kim ve ark., 2012).

Newman ve Raju (Raju ve Newman Jr, 1977; Newman Jr ve Raju, 1979; Newman ve Raju, 1981) günümüzde yaygın olarak kullanılan çekme (σ_x) ve eğilme (M_x) altında yarı eliptik çatlakların, parametrik açısı (Φ), çatlak derinliği (a/t), çatlak uzunluğu (c), plaka kalınlığı (t) ve plaka genişliğinin (B) bir fonksiyonu olarak geometrik faktör değerini (F) belirlemek için

yaklaşık çözümler sundular. Yarı eliptik çatlakların geometrik faktör hesaplamalarında sonlu elemanlar yöntemi, $0.2 \leq a/c \leq 1.0$, $c/B < 0.5$ ve $a/t \leq 1.0$ oranları kullanılarak gerçekleştirildi. Bu oranların kullanılması ile “ $K_I = (S_t + H_{Sb}) (\pi(a/Q))^{1/2} (F(a/t, a/c, b/c, \Phi))$ ” denkleminde elde edilen gerilme şiddet faktörü değeri ile gerilme veya eğilme yüklerine maruz kalan sonlu elastik plakalarda yarı-eliptik yüzey çatlaklarının üç boyutlu, sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme şiddet faktör değeri arasında maksimum $\pm\% 5$ ’ lik bir fark olduğu tespit edildi. Ampirik denklem, herhangi bir parametrik açı için, çatlak derinliğinin (a) çatlak uzunluğuna (c) 0 ila 1.0 arasında değişen oranlarda ve çatlak uzunluğunun (c) levha genişliğine (B) olan oranının 0.5% ’ in altında olduğu durumlarda geçerli olduğu rapor edildi. Bu çalışmalara ek olarak Newman, $\%5$ ’ lik bir doğrulukla gerilme yükü altında daha yüksek c/B oranları ($c/ B \leq 0.8$) için geliştirilmiş bir formülasyon ortaya çıkardı (Newman ve ark., 2000).

Bashar ve ark., $\%1$, $\%2$ ve $\%3$ nanokil ve akrilik kopolimer takviyesi ile bazalt elyaf takviyeli polimer matrisli filaman sarma kompozit tabakalar üzerinde Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğu üzerinde çalıştılar. Akrilik kopolimer, nanokil takviyesine göre tabakalar arası kırılma tokluğunda önemli artış sağladı. Elyaf/matris oranının düşmesi ile tabakalar arası kırılma tokluğunda artma eğiliminin olduğunu belirttiler. Ek olarak, takviye oranının artması numunelerin elyaf/matris oranını düşürmesi ve sonuç olarak tabakalar arası kırılma tokluğunda artışın diğer nedeni olabileceğini savundular (Bashar ve ark., 2013).

2.3. Grafen Takviyeli ve Takviyesiz Epoksi Levha, Epoksi/Elyaf Kompozit Çalışmaları

Rafiee ve ark., ağırlıkça $\%0.1$ oranında grafen, tek cidarlı karbon nanotüp ve çok cidarlı karbon nanotüp takviyeli epoksi matrisli nanokompozitlerin elastisite modülü, maksimum çekme dayanımı, kırılma tokluğu, kırılma enerjisi ve nanokompozitlerin yorulma çatlak ilerlemesine karşı gösterdikleri direnci karşılaştırdılar. Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin elastisite modülü, saf epoksi’ ye göre $\%31$, tek cidarlı karbon nanotüp’ e göre $\%3$ artış gösterdi. Saf epoksinin çekme dayanımını grafen $\%40$ arttırırken çok duvarlı karbon nanotüp için $\%14$ ’ lük bir iyileşme bulundu. Saf epoksinin Mod-I kırılma tokluğu üzerinde çok duvarlı karbon nanotüp $\%20$ iyileşme ile sağlarken grafen nano takviyesi $\%53$ değerinde bir iyileşme sağladı. Ayrıca, yorulma direnci sonuçlarının da önemli ölçüde farklı eğilimler gösterdiği vurgulandı.

Karbon nanotüp/epoksi kompozitlerin yorulmaya gösterdikleri direnç, gerilme şiddet faktörü genliği arttıkça çarpıcı şekilde azalırken, grafen nano takviyeli nanokompozitler için

ters bir etki görüldü. Grafen, mekanik özelliklerin geliştirilmesi açısından karbon nanotüplere göre üstünlüğü, pürüzlü yüzeylerinden kaynaklanan yüksek spesifik yüzey alanı, gelişmiş nano takviye/matris yapışması ve/veya iki boyutlu (düzlemsel) morfolojisi olabileceği vurgulandı (Rafiee ve ark., 2009).

Rafiee ve ark. tarafından, grafen takviyesinin epoksi polimerlerinde çatlak yayılmasının geciktirmesi veya çatlak ucu körlenmesinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır. Grafen, karbon nanotüp ve nanokil gibi katkı maddelerinin düşük takviye oranlarında kırılma tokluğu ve yorulma çatlak yayılma direnci üzerinde artışlar bulunmuştur. Bu artışlar, nano takviyelerin yüksek en-boy oranına sahip iki boyutlu düzlemsel morfolojisi ile ilişkili olan çatlak sapma mekanizması ile ilgilidir. Bu konu üzerine çalışmalarına devam eden Rafiee ve ark., grafen nano takviyeleri fonksiyoneleştirerek grafen oksit nano takviyesi elde ettiler. Grafen oksit' in, KNT ve nanokil takviyelerine göre önemli ölçüde daha düşük nano takviye yükleme oranlarında epoksi matrisin kırılma tokluğunu, kırılma enerjisini, sertlik, dayanım ve yorulma direncini arttırmada oldukça etkili olduğu rapor edildi. Bu sonucun güçlü takviye/matris yapışmasına bağlanabileceği yorumunu yaptılar. Bununla birlikte, epoksi matrislerde yüksek grafen takviye oranlarının dispersiyon derecesini artıracak tekniklerin geliştirilmesi gerektiğini bildirmişlerdir (Rafiee ve ark., 2010).

Tang ve ark., grafen/epoksi nanokompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde grafen oksit nano takviyesinin dağılım seviyesinin etkisini araştırdılar. Grafen oksit, termal indirgeme yoluyla indirgenmiş grafen oksite (RGO) dönüştürüldü. Bilyalı değirmen kullanarak RGO tabakalarının farklı dispersiyonları hazırlandı. Bu yüksek oranda dağılmış ve disperse olmuş RGO sahip numuneler diğerlerinininkine kıyasla; yüksek çekme dayanımı, yüksek çekme ve eğilme elastisite modülü ve yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip olduğu bulundu. Özellikle, ağırlıkça %0.2 RGO ilavesi epoksinin camsı geçiş sıcaklığını 11 °C arttırdığı bulundu. Ayrıca, ağırlıkça %0.2 RGO takviyesinin epoksi matrise kötü ve iyi dağılım durumlarında kırılma tokluk değerinin (K_{IC}) sırası ile %24 ve %52 arttırdığını belirttiler. Her iki durumda da K_{IC} 'deki gelişme, RGO nano takviyesinin sahip olduğu nano boyutlu tabakaların partikül/matris arayüzeyinde meydana gelen delaminasyon ve/veya mikro çatlakların köprülenmesinden kaynaklı olduğunu belirttiler (Tang ve ark., 2013).

Chandrasekaran ve ark., üç farklı karbon nano takviyesinin, epoksi matrisin kırılma tokluğunu ve epoksi matrisinin hasar mekanizması üzerinde etkilerini araştırdılar. Karbon nano

takviyeler, üç silindirli bir değirmen kullanılarak epoksi matrise dağıtıldı. Termal olarak indirgenmiş grafen oksit; grafit nano-trombosit; ve KNT bu test için nano takviye olarak kullanıldı. Kırılma tokluğu, tek kenarlı çentikli üç nokta eğilme testleri kullanılarak nano takviyesinin ağırlık yüzdesinin bir fonksiyonu olarak ölçüldü. Diğer yandan, ağırlıkça %0.5 grafen oksit, grafit nano-trombosit ve KNT takviyeli epoksi matrisli nanokompozitlerin kırılma tokluğundaki artışlar sırasıyla; %40, %25 ve %8 olarak bulundu. Kırılma yüzeyindeki incelemeler, epoksi matrisinin kırılma tokluğunun grafen oksit nano takviyesinin çatlak batması ve çatlağın iki kola ayrılması (crack pinning ve bifurcation) yaparak arttırdığını ortaya çıkardı. Ayrıca, grafen oksit nano takviyesinin üzerinden başlayan çatlak yüzey ayrımı, kırılma tokluğunda artışa katkıda bulunmuştur. Gözlemlere dayanarak, grafen/epoksi nanokompozitlerinde çatlak ilerlemesinin grafen takviyesi ile etkileşimini açıklayan bir şema önerdiler (Chandrasekaran ve ark., 2014).

Yavari ve ark., grafen nano katkıların farklı yükleme oranlarının epoksi matris ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitler üzerinde yorulma davranışlarını araştırdılar. Ağırlıkça %0.2 grafen takviyesinin eğilme yorulma ömrünü 1200 kat arttırdığı rapor edildi. Tek eksenli çekme yorulma koşulları altında grafen takviyesi, yorulma ömründe 3 ila 5 kat artışa neden olduğunu söylediler. Grafen takviyesi, yorulma ömrünü (eğilme etkisinde), karbon nanotüpler' e kıyasla 2 kat daha fazla arttırmıştır. Bunun nedenleri, grafen, elyaf ve epoksi matris ara yüzeyini gelişmesine ve elyafların gerilme altında eğilmesinin önlediğine bağlanabileceğini söylediler (Yavari ve ark., 2010).

Wajid ve ark., iki basit üretim yöntemi (dondurarak kurutma-karıştırma ve çözelti işlemi) kullanarak grafen/epoksi nanokompozit ürettiler. Bu yöntem ile hacimce %0.46 grafen yüklemesinde mükemmel dispersiyon sonucu ile takviye/matris arayüzeyinde yüksek yük aktarma verimliliği elde ettiklerini vurguladılar. Bu durumun, saf epoksinin çekme dayanımı ve modülünde sırasıyla, %38 ve %37 oranında artış getirdiğini rapor ettiler.

Her iki yöntem ile üretilen nanokompozitler, grafen ilavesi nedeniyle üstün termal kararlılık ve gelişmiş mekanik ve elektriksel özellikler sergilediğini söylediler. Mikroskopi ve XRD sonuçları, epoksi içindeki grafenin mükemmel dispersiyon kalitesini doğrulamıştır. Her iki yöntem de umut verici sonuçlar vermesine rağmen, çözelti işlemi yönteminin daha iyi dispersiyon kalitesi verdiğini ancak yüksek grafen konsantrasyonlarında çözücünün olumsuz etkileri olduğu söylenmiştir (Wajid ve ark., 2013).

Shen ve ark., grafen takviyesini, epoksi ve elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullandılar. Grafen/epoksi nanokompozitin, çekme dayanımı ve eğilme özellikleri gibi mekanik özelliklerini incelediler. Ağırlıkça % 0.25 ilave edilmiş grafen/epoksi ve karbon/epoksi nanokompozit plakaların yorulma ömrü takviyesizlere göre arttığı rapor edildi. Sonuç olarak, saf epoksi ve karbon/epoksi kompozit levhaların çekme dayanımı, eğilme ve yorulma ömürleri üzerinde önemli bir gelişme sağlandığı vurgulandı (Shen ve ark., 2013).

Shokrieh ve ark., iki farklı morfolojilere sahip grafen nano takviyelerin (grafen nanoplatelet (GnP) ve nanosheet (GnS)) saf epoksinin kırılma tokluğu ve çekme özellikleri üzerindeki etkilerini incelediler. Grafen sentezi için değişken manyetik alana dayalı yeni bir teknik geliştirdiler. Sentezlenen GnP' lerin boyut ve kimyasal yapısını karakterize etmek için transmisyon elektron mikroskopisi ve Raman spektroskopisi kullanıldı. GnP ve GnS ile takviye edilmiş epoksi matrisinin kritik gerilme şiddeti faktörü ve çekme özelliklerini ölçtüler. Nano takviye oranına göre epoksi matris içerisinde dağılım durumlarını incelediler. GnS' ler ile GnP' ler karşılaştırıldığında GnP' lerin hem kırılma tokluğu hem de nanokompozitlerin çekme dayanımı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu buldular. Kırılma tokluğunun, ağırlıkça %0.5 GnP kullanılarak %39, ağırlıkça %0.5 GnS için %16 oranında arttığını belirttiler (Shokrieh ve ark., 2014b).

Shokrieh ve ark., sentezlenmiş grafen takviyesinin (GnS) ve karbon nano elyafların eklenmesi ile epoksi reçinenin eğilme yorulma davranışı üzerindeki etkilerini araştırdılar. GnS, 'leri değişen bir manyetik alana dayanarak sentezlediler. Ağırlıkça %0.5 grafen takviyeli karbon nano elyaf/epoksi hibrit nanokompozitlerin eğilme yorulma ömürlerini araştırdılar. Epoksi reçineye ağırlıkça %0.25 grafen veya ağırlıkça %0.25 karbon nano elyaf eklenerek elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, hibrit nano takviyesi ile epoksi reçinenin yorulma ömründe önemli bir artış olduğunu buldular. Ağırlıkça %0.5 hibrit takviye kullanıldığı zaman %43 oranında çekme dayanımında artış olduğunu söylediler. Hibrit nano takviyelerin saf epoksi 'ye eklenmesi sonucunda epoksinin eğilme yorulma ömründe 37.3 kat iyileşme olduğunu belirlediler. Bununla birlikte, sadece epoksi içerisinde grafen ve karbon nano elyafların ayrı ayrı ilavesi ile sırasıyla, 27.4 ve 24 kat yorulma ömründe (eğilme etkisindeki) artış olduğunu buldular (Shokrieh ve ark., 2014a).

Domun ve ark., düşük nano takviye içeriğinde plazma işlemi ile fonksiyonelleştirilmiş grafen nano takviyeler (f-GnP) kullanılarak epoksi nanokompozitlerin kırılma özellikleri üzerinde çalıştılar. Nano takviyelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmek için düşük nano takviye yüklemesinde f-GNP/epoksi üzerinde çeşitli mekanik testler gerçekleştirdiler. Nanokompozitlerin çekme ve termal özelliklerinden ödün vermeksizin kırılma tokluğunda önemli bir artış elde ettiler. Ağırlıkça %0.25 f-GNP ilavesi ile, saf epoksi reçinesinin kırılma tokluğunda %50 'nin üzerinde bir artış olduğunu buldular. Ağırlıkça %1 f-GNP yüklemesi ile, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve termal genleşme katsayısının sırasıyla %3 ve %2 oranında düşük sayılabilecek bir artış gösterdiğini ifade ettiler (Domun ve ark., 2017).

Alexopoulos ve ark., farklı tür ve konsantrasyonlarda grafen takviyesinin (GnP) epoksi reçinenin birim şekil değiştirme oranını ve kırılma tokluğu üzerinde etkisini incelediler. Küçük (2 nm) ve büyük (15 nm) tabaka kalınlığına sahip grafen takviye türlerinden çeşitli takviye oranları kullanarak grafen/epoksi nanokompozitler ürettirtiler

Çekme ve kırılma tokluğu testlerine göre, kırılma mekanizmasının grafen takviye oranına ve kullanılan grafen türüne göre değiştiğini gösterdiler. Düşük grafen nano takviye oranları için (ağırlıkça < % 0.25), 2 nm' lik tabaka kalınlığına sahip grafen takviyesinin epoksi içerisinde iyi dağılmasından dolayı çekme dayanımında yaklaşık %15, kırılma tokluğunda ise yaklaşık %12 oranında artış olduğunu belirttiler. Tabaka kalınlığı büyük olan grafen nano takviye türü, akma dayanımında düşük bir artış meydana getirirken, kırılma tokluğunu ise azalttığını buldular. Daha yüksek (> ağırlıkça %1 ağırlıkça) grafen takviye oranlarında, kırılma mekanizmasının değiştiğini ve bunun grafen/matrisin arasındaki arayüzey özelliklerine bağlı olduğunu söylediler. Birim şekil değiştirme oranında yaklaşık %30 'luk bir artışın nedeninin, 2 nm 'lik tabaka kalınlığına sahip grafen nano takviyesinin epoksi matris içerisinde iyi dağılması ve grafen takviyesinin eğilmesi ile temel bir yüklem aktarımı gerçekleştirmesine atfedilebileceğini ifade ettiler. Yüksek (> ağırlıkça %5) grafen takviyesi oranlarında incelenen tüm mekanik özelliklerde bir azalma fark ettiler ve bu durumun, grafen takviyesinin aglomerasyonundan kaynaklı olduğunu belirttiler (Alexopoulos ve ark., 2017).

Bulut, bazalt/epoksi kompozit plakaların mekanik özellikleri (çekme, eğilme ve darbe dayanımı) üzerindeki grafen takviyesinin etkisini araştırdı. Ağırlıkça %0.1, %0.2 ve %0.3 grafen/bazalt/epoksi kompozit plakaların mekanik özelliklerini birbirleri ile karşılaştırdı. Sonuç olarak, ağırlıkça grafen takviyesi bazalt/epoksi plakaların şekil değiştirme oranını arttırırken elastisite modülünü düşürdüğünü belirtti. Ağırlıkça %0.1 grafen takviyesi, elyaf ve epoksi

etkileşimleri arasındaki arayüzeyde yüksek bağlanma kuvvetine bağlı olarak bazalt/epoksi plakaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde arttırdığını rapor etti (Bulut, 2017).

Grafen takviyeli epoksi levhaların ve elyaf takviyeli epoksi plakaların; çekme, eğilme, darbe, kırılma ve yorulma özellikleri üzerinde yukarıda bahsedilen literatür çalışmaları Çizelge 2.1, Çizelge 2.2, Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4' te özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 Epoksi matrisin maksimum çekme dayanım (σ_c , MPa) ve elastisite modülü (E, GPa) üzerinde grafen takviyesinin geliştirme etkisi

Referans	Saf Epoksi	Grafen/Epoksi	Grafen Takviye Oranı,	Geliştirme etkisi
			Ağırlıkça, %	%
(Rafiee ve ark., 2009)	55 (σ_c)	78 (σ_c)	0.1	41.81
σ_c , MPa (Tang ve ark., 2013)	38 (σ_c)	53 (σ_c)	0.20	39.47
(Wajid ve ark., 2013)	43 (σ_c)	55 (σ_c)	0.46	41.81
(Shen ve ark., 2013)	105.89 (σ_c)	115.46 (σ_c)	0.25	9
(Shen ve ark., 2013)	54.89 (σ_c)	66 (σ_c)	0.25	20
(Shokrieh ve ark., 2014b)	60 (σ_c)	74 (σ_c)	0.25	23.3
(Domun ve ark., 2017)	71 (σ_c)	74 (σ_c)	0.75	4.22
(Alexopoulos ve ark., 2017)	50 (σ_c)	63 (σ_c)	0.25	26
(Rafiee ve ark., 2009)	2.80 (E)	3.70 (E)	0.1	32.1
(Tang ve ark., 2013)	2.92 (E)	3.07 (E)	0.20	5.7
(Rafiee ve ark., 2010)	2.76 (E)	4.20 (E)	0.125	52.17
(Wajid ve ark., 2013)	1.3 (E)	1.5 (E)	0.46	15.38
(Shokrieh ve ark., 2014b)	2.5 (E)	2.76 (E)	0.5	10.40
(Domun ve ark., 2017)	2.49 (E)	2.63 (E)	0.25	5.6
(Alexopoulos ve ark., 2017)	5 (E)	2.2 (E)	0.25	44

Çizelge 2.2 Epoksi matrisin eğilme dayanımı (σ_e , MPa) ve eğilme elastisite modülü (E_e , GPa) üzerinde grafen takviyesinin geliştirme etkisi

Referans	Saf Epoksi	Grafen/Epoksi	Grafen Takviye Oranı,	Geliştirme etkisi
	σ_e , MPa	σ_e , MPa	Ağırlıkça, %	%
(Shokrieh ve ark., 2014a)	110 (σ_e)	118 (σ_e)	0.25	7.3
(Shen ve ark., 2013)	2.22 (E_e)	2.49 (E_e)	0.25	12
(Shokrieh ve ark., 2014a)	3 (E_e)	3.40 (E_e)	0.25	13.3

Çizelge 2.3 Epoksi matrisin kırılma tokluğu (K_{IC}) üzerinde grafen takviyesinin geliştirme etkisi

Referans	Saf Epoksi	Grafen/Epoksi	Grafen Nano Katkı Oranı,	Geliştirme etkisi
	K_{IC} , MPa.m ^{1/2}	K_{IC} , MPa.m ^{1/2}	Ağırlıkça, %	%
(Rafiee ve ark., 2009)	1.05	1.65	0.125	57.14
(Rafiee ve ark., 2010)	1.03	1.70	0.125	5.04
(Tang ve ark., 2013)	0.50	0.60	0.20	27.9
(Tang ve ark., 2013)	0.55	0.90	1	63.63
(Shokrieh ve ark., 2014b)	0.95	1.50	0.5	57.9
(Domun ve ark., 2017)	0.68	0.83	0.25	22.1
(Alexopoulos ve ark., 2017)	1.25	1.35	0.25	8

Çizelge 2.4 Epoksi matrisin yorulma özellikleri üzerinde grafen takviyesinin geliştirme etkisi

Yorulma Çalışması	Referans	Saf Epoksi	Grafen/Epoksi	Grafen Takviye Oranı,	Geliştirme etkisi
Çatlak İlerleme Hızı da/dN (mm/çevrim) $\Delta K=0.5$ MPa	(Rafiee ve ark., 2010)	2.49×10^{-3}	1.0165×10^{-4}	%0.125	25 Kat
Çatlak İlerleme Hızı da/dN (mm/çevrim) $\Delta K=0.5$ MPa	(Rafiee ve ark., 2009)	2.5×10^{-3}	5.87×10^{-5}	%0.1	%14.67
Çekme Yorulması, Çevrim, $\sigma_c = 350$ MPa	(Yavari ve ark., 2010)	30×10^5 (Cam elyaf /epoksi)	50×10^5 (Grafen/Cam elyaf /Epoksi)	%0.20	%66,6
Çekme Yorulması, Çevrim, $\sigma_{max} / \sigma_c = \%85$	(Shen ve ark., 2013)	96574 (Karbon elyaf /Epoksi)	334635 (Grafen/Karbon elyaf/Epoksi)	%0.25	3.5 kat
Eğilme Yorulması, Çevrim, $\sigma_e = 350$ MPa	(Yavari ve ark., 2010)	4×10^6 (Cam elyaf/epoksi)	60×10^6 (Cam elyaf/epoksi)	%0.20	15 kat
Eğilme Yorulması, Çevrim, $\sigma_{max} / \sigma_e = \%85$	(Shokrieh ve ark., 2014a)	2×10^3	48×10^3	%0.25	24 kat

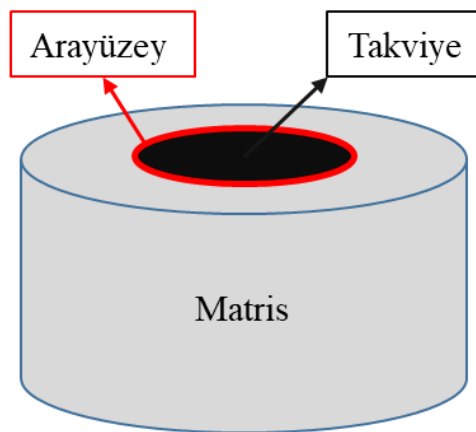
3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Giriş

Farklı özellikte iki ya da daha çok mikro ya da makro bileşenin karışımı ve birleşmesiyle arayüzey boyunca bir araya gelen ve kendisini oluşturan bileşenlerden daha üstün özellikler sergileyerek tasarımda istenen özellikleri barındıran bir malzemeye “kompozit malzeme” denir. “Composite” kelimesi Fransızca bir kelimedir ve TDK’ de karşılığı sıfat olarak “Karma” demektir. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere kıyasla üstün yapısal ve fonksiyonel özelliklere sahiptir. Kompozitin özellikleri; bileşenlerin özelliklerine, takviye bileşenin oranına, takviye geometrisine ve boyutuna bağlı olarak değişir. Geleneksel malzemelere göre kompozit malzemeler, daha yüksek özgül dayanımları sayesinde başta uzay, havacılık, savunma ve otomotiv sanayi olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır.

3.2. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Kompozit malzemeler, Şekil 3.1’ de şematik olarak gösterilen bir matris, takviye ve arayüzeyden oluşur. Matris, kompozit malzemeye uygulanan bir kuvveti arayüzey vasıtasıyla takviye bileşenine iletir ve dağıtır. Gelişmiş yapısal özellikler, takviye ve matris arasındaki arayüzey bağı ile sağlanan yük paylaşım mekanizmasından kaynaklanır. Kompozit malzemelerde yükü takviye fazı taşır. Bu nedenle, takviye fazının görevini yerine getirebilmesi için takviye ve matris arasındaki arayüzey bağının mekanik özellikleri büyük öneme sahiptir. Kompozit malzemenin rijitliği, takviye/matris arasındaki arayüzeyin dayanımına bağlıdır (Qu, 1993).

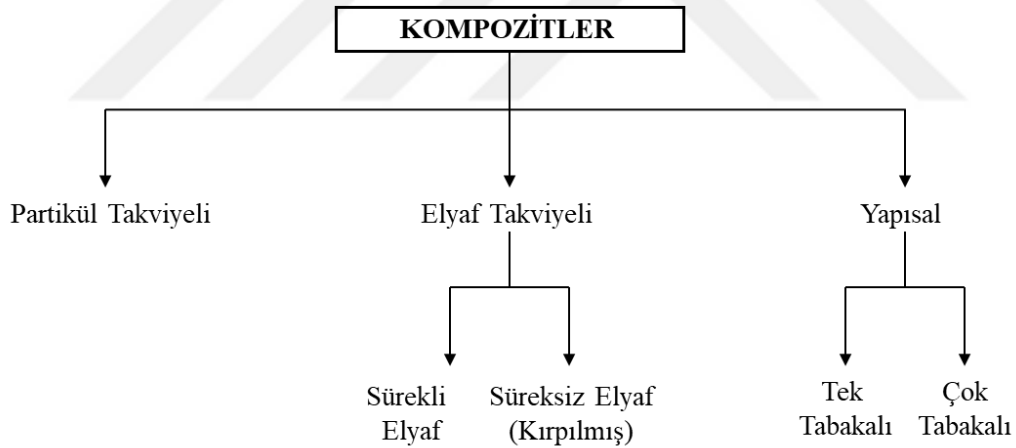


Şekil 3.1 Kompozit yapısının şematik gösterimi

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler için basit bir sınıflandırma şeması Şekil 3.2’ de verilmiştir. Kompozit malzemeler arasında en çok kullanılan elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde bileşenler, moleküler boyutta birbirinden farklıdır ve mekanik özellikler açısından birbirinden ayrılırlar. Elyaf takviyeli kompozitlerde en çok kullanılan takviye malzemesi cam elyafıdır. Bu grup kompozit malzemelerde reçineler termoset veya termoplastik olabilir. Matris malzemesi olarak en çok kullanılan polimer reçineler ise, epoksi ve polyesterdir. Takviye elyafları; sürekli, dokuma kumaş, kısa kesilmiş elyaf gibi çeşitli formlarda bulunabilirler.

Takviye malzemesinin geometrisi, elyaf takviyeli kompozitlere farklı yapısal ve fonksiyonel özellikler kazandırır. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde elyafların yönlenmesi ve yoğunluğu, kompozitin mekanik özellikleri açısından önemlidir. Ancak, kompozitin mekanik özellikleri aynı zamanda matrise uygulanan yükün ne kadarını elyafa iletebildiğine (yük paylaşımı) de bağlıdır (Vasiliev ve Morozov, 2001).



Şekil 3.2 Çeşitli kompozit türleri için basit bir sınıflandırma şeması

3.4. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matris olarak polimer reçine ve takviye olarak elyaf bileşenleri kullanılır. Bu kompozitler, oda sıcaklığında üstün özellikler gösterir. Ayrıca, kolay üretimi ve düşük maliyetinden dolayı en çok uygulama alanı olan kompozit malzeme sınıfıdır. Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan matris ve takviye malzemeleri bu bölümde tanıtarak; bu sınıfa ait kompozit malzemeler üzerinde durulacaktır.

3.4.1. Matris malzemeleri

Kompozit bir malzemede elyafları bir arada tutmak, yükü elyafa iletmek ve elyafları çevresel etkilerden korumak amacıyla matris malzemesi kullanılır. Matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken, daha sonra elyafları uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçer. Bir kompozit malzemede elyafa dik doğrultudaki özellikler, matrisin mekanik özelliklerine ve elyaf ile matris arasındaki bağlanma kuvvetine bağlıdır. Matris dayanımının elyafa göre oldukça düşük olması kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan matrisler termoplastik ve termoset olarak ikiye ayrılır. Metal, karbon, ve seramik gibi diğer matrisler farklı kompozit malzeme sınıflarına alınabilir ve özel uygulamalar için kullanılabilir (Şahin, 2004; Gemi, 2014; Gladwell, 2014).

3.4.1.1. Termoplastik matrisler

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan termoplastik matrisler ısıtma-soğutma çevrimi ile şekillendirilebilir. Bu termal çevrim işleminde termoplastik matrislerin sadece fiziksel özellikleri değişir fakat kimyasal özelliklerinde bir değişiklik olmaz. Termoplastikler, amorf veya yarı kristal moleküler yapıda olabilirler. Amorf yapıdaki termoplastiklerde polimer zincirleri rastgele düzenlenmiş iken, kristalin bölgelerde zincirler sıkı paketlenmiş düzenli bir yapıdadır. Matris malzemesi olarak kullanılan polipropilen, polietilen, naylon, polietermid, polieterketon gibi termoplastikler; uzay, havacılık, savunma, otomotiv, inşaat, ambalaj vb. daha birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Sepet, 2014).

3.4.1.2. Termoset matrisler

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan matris malzemesi termoset reçinelerdir ve oda sıcaklığında sıvı halde bulunurlar. Bu malzemeler sadece bir kez ısıtılarak şekil verildikten sonra tekrar ısı yoluyla şekillendiremezler. Bunun nedeni, termoset matrisi oluşturan moleküllerin birbirlerine çapraz bağlanması sonucunda ısı altında kalan moleküller birbirlerinin üzerinden kayamazlar. Termoset matrisler, elyaf takviyeli kompozit yapımında daha fazla kullanılırlar; sertleştirici ilavesi ile önce jel haline gelir ve sonra da katılaşırlar. Termoset reçineler izotropiktirler. Elyaf takviyeli kompozit yapımında

genellikle düşük viskozitede olmaları tercih edilir. Epoksiler, termoset reçineler arasında polimer matrisli kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan polimerlerdir (Itoh ve ark., 2002).

Epoksiler açık renkli viskoz sıvı halindedirler ve polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler (Rouchan, 1987). Epoksi reçineleri sertleştirmek için kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan kompozit malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Epoksiler, yüksek kopma mukavemetine, yüksek matris/elyaf arayüzey dayanımına, yüksek aşınma direncine, yüksek kimyasal dirence, düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptir (Schwartz, 1984). Uzay ve havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek dayanım istenen yerlerde epoksi reçine tercih edilir. Polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri ise; daha iyi mekanik özelliğe sahip olması, yorulma dayanımının yüksek olması, takviye malzemesine iyi yapışması ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir (Tarakçıoğlu, 1992).

3.4.2. Takviye malzemeleri

Kompozit malzemelerin üretiminde elyaflar, partiküller ve whisker gibi farklı formlarda birçok takviye malzemesi kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye malzemeleri ise elyaflardır. Elyafların uzunluğu çaplarına göre çok büyüktür ve matris malzemenin bünyesinde bulunan kompozit malzemelerin en önemli mukavemet elemanlarıdır. Elyaflar, kompozit malzemeye dayanım ve rijitlik kazandırır.

Takviye elemanı, kompozit malzemeye gelen zorlamalara karşı matristen iletilen yükleri paylaşarak karşı koyar. Matris ile takviye arasında bulunan arayüzey, genellikle kırılma özelliği göstermesine rağmen matrise gelen yükü hasara ve kırılmaya uğramadan takviye elemanına iletir. Takviye/matris arayüzeyi, malzemenin elastisite modülünü etkileyen en önemli bölgedir. Bu yüzden kompozit malzemelerin mekanik özellikleri arayüzey özelliklerine bağlıdır (Qu, 1993).

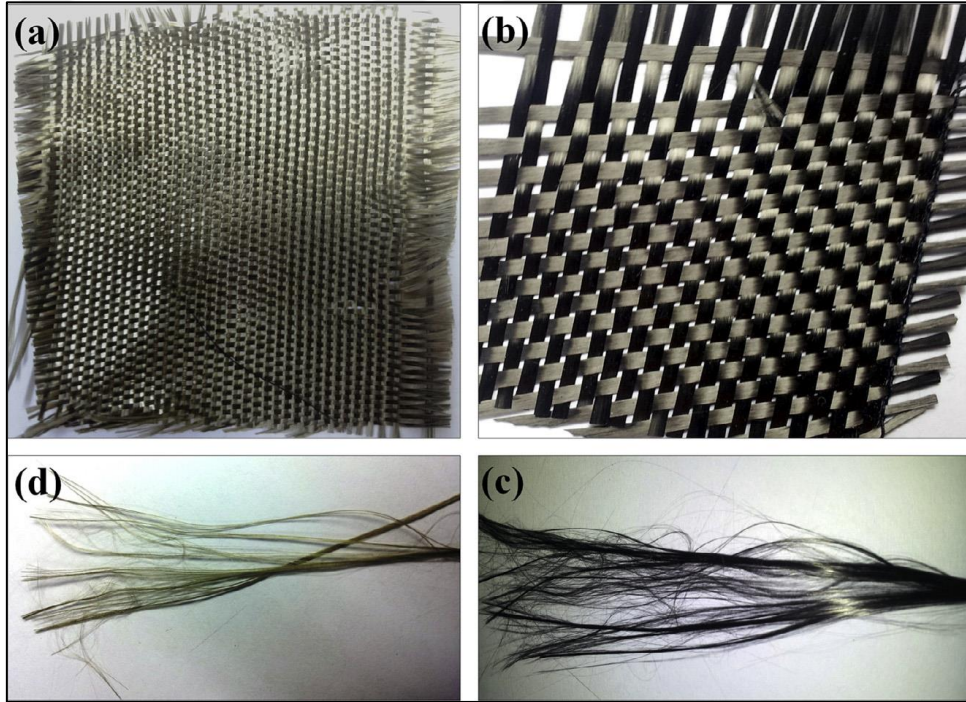
3.4.2.1. Cam elyaf

Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler için en yaygın kullanılan takviye elemanı cam elyaftır. Cam elyaflar; E-cam, S-cam ve C-cam olarak üç sınıfa ayrılır. E-cam, diğer cam elyaf türlerine göre yüksek mukavemete ve sertliğe, düşük maliyete, iyi elektriksel özelliklere sahiptir. E-cam, çoğunlukla filaman sarma üretiminde kullanılır. S-cam, E-cam 'a göre daha yüksek elastisite modülüne sahiptir. Bu nedenle, havacılık, savunma endüstrilerinde

ve basınçlı kap uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. C-cam, S-cam ve E-cam göre yüksek korozyon direncine sahiptir. Bu nedenle C-cam, boru ya da basınçlı kap gibi kompozit yapıların korozyon etkilerinden korumak için dış tabakada bir koruyucu tabaka olarak kullanılır (Deniz, 2011).

3.4.2.2. Bazalt elyaf

Bazalt elyaf Amerikalı bilim adamları tarafından 1923' te keşfedilmiştir. İkinci dünya savaşı sırasında bazalt elyaf askeri araştırmalar için geliştirilerek Amerika, Avrupa ve Sovyetler birliği tarafından savunma ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Şekil 3.1' de bazalt elyaf ve karbon dokuma kumaşlar gösterilmektedir.



Şekil 3.2 (a) Dokuma bazalt elyaf kumaş, (b) karbon elyaf kumaş, (c) karbon elyaflar, (d) bazalt elyaflar (Dhand ve ark., 2015)

Son yıllarda, bazalt elyafın mekanik özelliklerinin geliştirilmesinden dolayı kompozit endüstrisinin ilgisini çekmiştir. Bu elyaflar, altyapı ve sivil uygulamalar için özgül dayanımı yüksek kompozit malzeme üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bazalt minerali eser miktarda alümina, magnezyum, kalsiyum, sodyum, potasyum, silisyum dioksit ve demir oksitlerinden meydana gelir. Kimyasal içeriği coğrafi konumdaki dağılıma göre değişebilir. Bazalt elyaf üretimi ilk olarak bazalt kayaların toz haline getirilmesi ile başlar

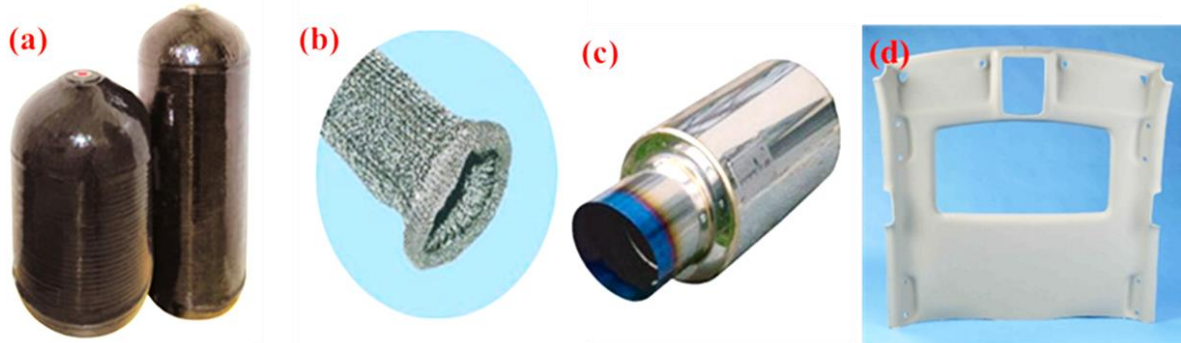
ve sonrasında 1500-1700 °C arasında camsı bir sıvı haline dönüştürülür. Daha sonra bir ekstrüder yardımıyla lifler halinde üretilerek bir araya getirilir ve elyaf demetleri olarak sarılır (Dhand ve ark., 2015).

Bazalt elyaf; çelikten daha hafif, E-cam elyaf türünden daha iyi mekanik özelliklere sahip ve karbon elyaftan daha ekonomiktir. Bu avantajların yanında mükemmel geri dönüştürülebilirlik ve geniş çalışma sıcaklıklarına sahip olmasından dolayı kompozit basınçlı kapların üretiminde elyaf takviyesi olarak araştırılmaya başlanmıştır. Şekil 3.1 'de bazalttan çeşitli üretim yöntemleriyle elde edilmiş ürünler sunulmuştur.

Diğer elyaf türlerine göre, Çizelge 3.1' de bahsedilen özellikler açısından bu çalışmada bazalt elyaf kullanılmıştır. Bazalt, cam, aramid ve karbon elyafların özellikleri Çizelge 3.1.' de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1 Bazalt, cam, aramid ve karbon elyaf özelliklerinin karşılaştırılması

Özellikler	E-Cam	S2-Cam	Bazalt	Aramid	Karbon
Çekme Dayanımı, GPa	3.1-3.8	4.0-4.6	3.0-4.8	2.9-3.4	3.5-4.4
Elastisite Modülü, GPa	72.5-75.5	83-86	93-110	70-179	230-800
Kırılmadaki % uzama	4,7	5.3	3-6	2.4-3.6	0.5-1.5
Spesifik ağırlık	2.5-2.62	2.46	2.65-2.8	1.44	1.75-1.95
Max. Uygulama Sıcaklığı, °C	380	500	650	250	400
Maliyet, USD/kg	1.1	1.5	2.5	-	30
Korozyon ortamları	3 saat kaynadıktan sonra kaybettiği % ağırlık				
H₂O	0.7	0.05	0.2	-	-
2N NaOH	6	5	5	-	-
2N HCl	38.9	15.7	2.2	-	-



Şekil 3.1 Genel olarak bazalt elyaf kullanım yerleri; (a) CNG kompozit basınçlı kaplar, (b) egzoz vb. sistemler için ısı yalıtımı, (c) araçlar için susturucu ürünleri, (d) araç içi tavan döşemesi (Vek, 2019)

3.4.2.3. Aramid elyaf

Aramid elyafın sahip olduğu mukavemet, kırılma direnci ve düşük yoğunluğu sayesinde gelişmiş kompozit malzemeler üretiminde kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri sadece elyaf ve matrisin mekanik özelliklerine değil, aynı zamanda elyafın yüzey yapısına ve arayüzeyde matristen elyafa yük aktarım mekanizmalarına bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Aramid elyafın pürüzsüz yüzeyi, yüksek kristalleşme oranı ve zayıf eksenel doğrultudaki dayanımları nedeniyle kompozitlerde kullanılan reçineler ile zayıf arayüzey bağı oluşturmaktadır. Aramid elyafın bu özellikleri, elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak kullanımını sınırlamaktadır (Liu ve ark., 2008).

3.4.2.4. Karbon elyaf

Karbon elyaf, karbonlaşmış akrilik elyaf, katran ve naylondan meydana gelir. İl zamanlar karbon elyaf iletkenlik özelliği ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Daha sonra, bu elyaflar epoksi matrisler ile birleştirildiğinde mükemmel mekanik özellikler sergilediği bulunmuştur. Karbon elyafların sahip olduğu yüksek özgül elastisite modülü ve dayanımdan dolayı elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır (Edie, 1998).

Karbon elyaflarının kimyasal yapısının kontrolü önemlidir. Çünkü sahip olduğu iletkenlik ve mekanik özellikler kimyasal yapısına bağlıdır. Karbon elyaf üretimi için gerekli olan kimyasal reaksiyonlar (çapraz bağlama ve karbonizasyon) maliyetli ve zordur. Karbon elyafın üretilmesi için inert bir atmosfer ve 1200 °C ile 3000 °C arasındaki sıcaklıklar gereklidir. Karbon elyafların yapısındaki grafit tabakaları ve karbon atomları arasındaki güçlü kimyasal bağ, onlara yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımı kazandırır. Karbon elyafının üretimi oldukça maliyetli olduğu için uzay, havacılık, savunma ve otomotiv endüstrisinin önemli uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Edie, 1998).

3.5. Tabakalı Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlerin farklı elyaf yönlenmeleri ile kompozit levha yapıları elde edilir. Daha sonra, en az iki aynı tür levhaların tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu yapılar tabakalı kompozit malzeme denir. Farklı elyaf oryantasyonlarına sahip tabakaların bir araya gelmesi ile çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilir. Tabakalı kompozitler, ısı ve neme karşı dirençlidir. Metal malzemelere göre tabakalı kompozitlerin özgül dayanımlarının yüksek

olmasından dolayı kompozit malzemeler arasında yaygın olarak tercih edilir. Birçok tabakalı kompozitler, düşük maliyet özelliğinin yanında özgül dayanım, aşınma direnci ve mükemmel ısıl genleşme özelliklerine sahiptir. Tabakalı kompozitlerin üretiminde elyaf takviyeli kompozitlerin ticari kullanımları oldukça geniştir. Elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerin üretiminde kullanılan matrisler termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır. Bu kompozitlerin sürekli elyaflar ile takviye edilmiş epoksi matrisli olanları en önemlileridir. Tabakalı kompozitlerde kullanılan takviye malzemelerinin en yaygın olanları cam, karbon ve aramid elyafıdır. Bu elyafların yanında bazalt elyaf, tabakalı kompozitlerin üretimi için ticarileşme aşamasındadır. Elyaf takviyeli epoksi matrisli tabakalı kompozitler, korozyon direncinin yüksek olmasından dolayı denizcilik uygulamalarında, özgül elastisite modülü ve dayanımı sebebiyle otomotiv ve spor endüstrinde yaygın kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca, yanmazlık özelliği istenen otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ek olarak, cam, karbon ve bazalt elyaf kullanımı ile darbe, yorulma veya aşınma dayanımı yüksek tabakalı kompozit malzemeler üretilmektedir. Uzay, havacılık ve savunma sanayinin özel uygulama alanlarına hitap eden bu malzemeler, esnek üretim avantajından dolayı kompozit malzemeler arasından tercih edilmeye başlanmıştır (Tsai, 2018).

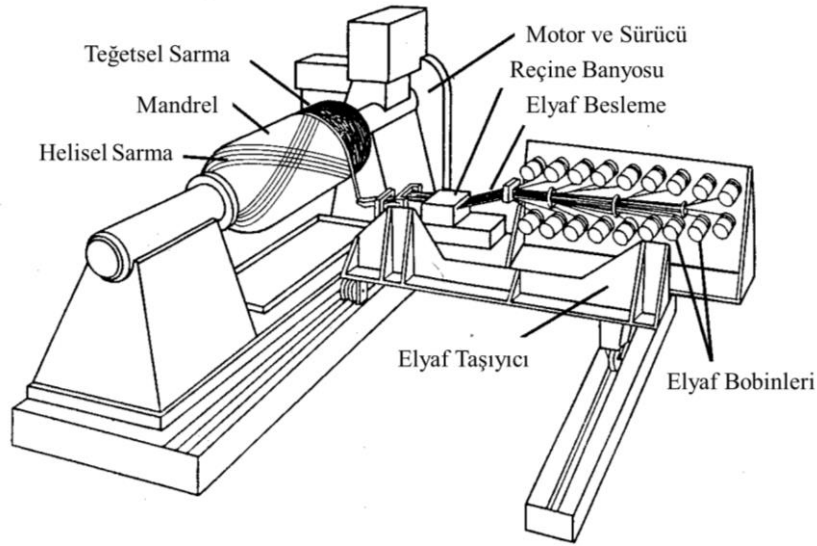
3.6. Tabakalı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin üretim yöntemi, kompozit bileşenlerinin türüne, ürün geometrisine, ürün boyutlarına ve istenen mühendislik uygulaması yerine göre seçilir. Üretimde kullanılacak matris türü, üretim yönteminin seçiminde önemli bir etkidir. Elyaf takviyeli polimer matrisli tabakalı kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan yöntemler, filaman sarma, el yatırma, pres kalıplama, pultrüzyon ve otaklav olarak sayılabilir (Sinha, 2006). Bu çalışmada kullanılan sürekli bazalt elyaf takviyeli tabakalı borular filaman sarma yöntemi ile üretilmiştir.

3.6.1. Filaman sarma yöntemi

Filaman sarma yöntemi, bir bilgisayar ya da kontrol ünitesi kullanılarak sürekli elyaf bantlarının bir reçine ve sertleştirici banyosunda ıslatılmasından sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarma işlemidir. Dönen bir malafa üzerine ıslatılmış elyaf bantlarının istenilen kalınlığa sarılarak üretim sonlanır ve daha sonra sertleştirme işlemine geçilir. Sertleştirme işlemi, kompozit yapıyı kendi eksenini etrafında döndürebilen bir mekanizmaya

sahip olan bir fırında gerçekleştirilir. Döndürme işlemi, ıslatılmış elyaf bantları üzerindeki matrisin kompozit yapının herhangi bir yerine toplanmasını ve damlamasını önler. Bu işlem ile homojen sertleşme ve elyaf takviye oranının korunması sağlanır. Sertleştirme işleminden sonra kompozit yapı döner kalıptan sıyrılarak ayrılır. Sürekli elyaf bantlarının farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip elyaf takviyeli polimer matrisli tabakalı kompozit ürünler elde edilebilir. Bu yöntem ile üretilen tabakalı kompozitler, yapısal uygulamalar için en yüksek özgül dayanımı sağlayabilir. Bunun için, elyaf doğrultusunun asal gerilmeler doğrultusunda olması ve aynı zamanda bu gerilmelerin büyüklüğü ile orantılı olan bir takviye oranının kullanılması gerekmektedir. İki serbestlik derecesine sahip bir filaman sarma makinesinin şematik çizimi Şekil 3.3’ te gösterilmektedir. Üretim ortamının sıcaklığı ve neminin kontrol altında tutulması tavsiye edilmektedir (Mazumdar, 2001; Strong, 2008).



Şekil 3.3 Filaman sarma makinesi (Strong, 2008)

Filaman sarma yöntemi, silindirik yapılar üretmek için en etkili yöntemlerden biridir. Borular, tanklar, gaz tüpleri, silindir kabuklar, roketler ve füzeler bu yöntemle üretilir. Ayrıca, bu yöntem ile 700 bar basınca kadar dayanıklı kompozit basınçlı kaplar üretilmektedir. Bu üretim yönteminin avantajları; yüksek elyaf takviye oranlarının (%60-75) elde edilmesi, ucuz hammadde kullanımı ile düşük maliyette yüksek performanslı ürün üretimi, otomasyondan dolayı daha az insan gücü gerektirmesi ve büyük parçaların üretilmesi olarak sayılabilir. Yöntemin dezavantajları ise; gelişmiş makine ve teçhizattan dolayı nispeten yüksek yatırım, üretilmesi planlanan parçaların şekil sınırlaması (girinti-çıkıntı olmaması), nitelikli iş gücü gerektirmesi ve bazı uygulamalarda istenen 0-15° arasındaki sarım açılarında üretimin yapılma zorluğu olarak sıralanabilir (Cauchois, 2009).

4. DÜŞÜK HIZLI DARBE

4.1. Giriş

Genel olarak, iki cisim arasında gerçekleşen etkili bir biçimde çarpma ya da vuruş eylemine darbe denir (Richardson ve Wisheart, 1996).

İngiliz mühendis Edwin Gilbert Izod (1876–1946), çeşitli metallerin darbe altında kırılma dayanımını belirlemek için bir test ortaya koymuştur. Daha sonra test, Amerikalı S.B. Russell ve Fransız Georges Charpy tarafından geliştirilmiştir. Bu test metotlarının hazırlanması ve uygulanması oldukça kolaydı. Bu nedenle, sonuçlar hızlı ve ucuz bir şekilde elde edildiği için birçok sektör bu test metotlarını uzun yıllar kullandı. Son yirmi yıl içerisinde ölçüm teknolojisindeki ilerlemeler, veri alma olanaklarının artması (kuvvet ve enerji verileri) ve bilgisayarların gelişmesi; darbe test sonuçlarının daha ölçülebilir hale gelmesine izin verdi. (Meyers Marc ve Kumar, 1998).

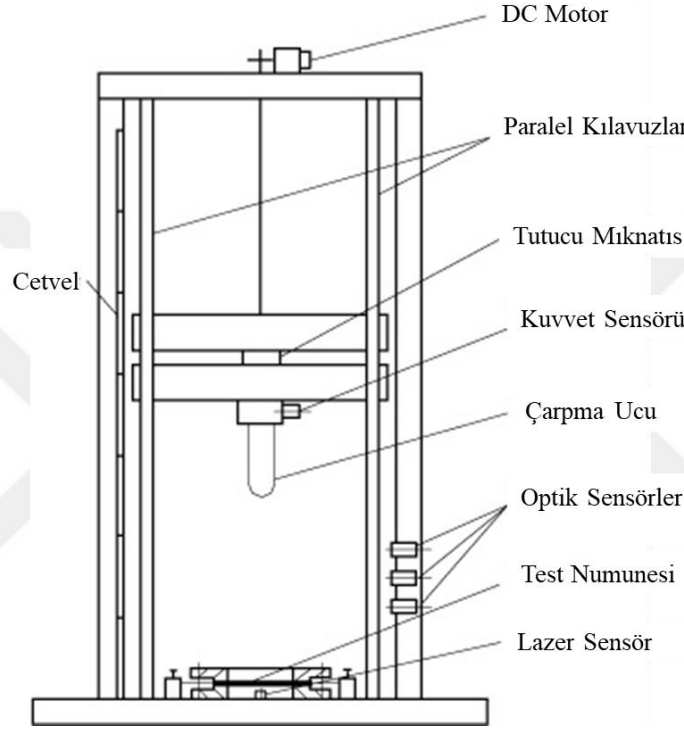
4.2. Darbe Testleri

Dünyada birçok ülkedeki kurum, kuruluş ve araştırmacılar arasında kompozit malzemelerin darbe davranışını belirlemek için standart bir test metodu bulunmamaktadır. Tek bir test metodunun olmaması nedeniyle farklı çalışmalar karşılaştırılamamaktadır. Kompozit malzemelerin darbe davranışlarının belirlenmesi amacıyla günümüzde bazı test yöntemi ve cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar, sarkaç testleri (Izod, Charpy), ankastre edilmiş kiriş darbe testi, ağırlık düşürme testleri (düşük hızlı darbe testi), yüksek hızlı darbe testleri olarak sıralanabilir (Kara, 2012). Cantwell ve Morton, darbe olayını analiz etmede kullanılan Ağırlık Düşürme, Charpy ve Izod test tekniklerini düşük hızlı darbe testi olarak sınıflandırmışlardır (Cantwell ve Morton, 1991).

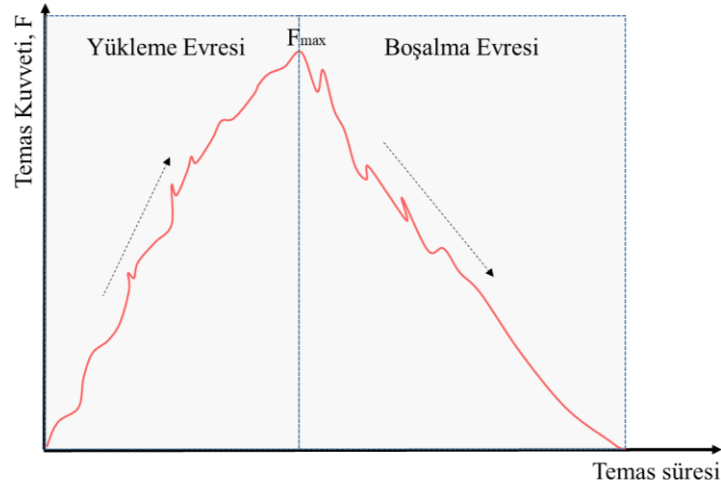
4.2.1. Düşük Hızlı Darbe Testi

Kompozit yapıların darbe etkisini karakterize etmek için ağırlık düşürme testlerinden düşük hızlı darbe test cihazları kullanılabilir. Bu test cihazları; yer değiştirme, hız ve kuvvet sensörlerine sahiptir. Böylelikle, darbe esnasında yük, yer değiştirme ve ivme geçmişi kaydedilerek kuvvet - zaman ve kuvvet – yer değiştirme grafikleri çizilebilir. Grafiklerden okunan maksimum kuvvet ve absorbe edilen enerji gibi veriler malzemede meydana gelen hasar

olayları ile ilişkilendirilebilir. Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı Şekil 4.1’de verilmiştir. Böyle bir cihazı meydana getiren donanımlara ek olarak darbe olayını görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerası ilave edilebilir. Darbe testi ile elde edilen tipik bir kuvvet-zaman eğrisi Şekil 4.2’ de şematik olarak gösterilmiştir. Kuvvet-zaman eğrisi, uygun bir şekilde iki bölgeye ayrılabilir. İlk bölge başlangıç evresidir. İkinci bölge ise, hasar ilerleme evresini temsil eder (Naik, 2005).



Şekil 4.1 Tipik bir ağırlık düşürme test düzeni (Meyers Marc ve Kumar, 1998)



Şekil 4.2 Ağırlık düşürme darbe testinden elde edilen tipik yük-zaman eğrisi

Vurucu ve numunenin türü-ağırlığı ve desteklenme yöntemi gibi parametreler kompozit malzemelerin darbeye verdikleri cevabı etkiler. Bu nedenle kompozit malzemelerin darbeye gösterdikleri cevabı yorumlamak için söz konusu darbe parametreleri göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Richardson ve Wisheart, 1996; Ceyhun ve Turan, 2003).

Sjoblom ve ark., düşük hızlı darbe etkisini, yarı-statik gerçekleşen bir olay olarak tanımlar. Darbe süresi, hedefin mekanik özelliklerine, vurucunun kütesine ve rijitliğine bağlı olarak 1 ile 10 ms arasında değişebileceğini ifade ederler. Düşük hızlı darbe testinde temas süresi, test numunesinin dinamik yapısal tepkisine bağlı olduğu için oldukça önemlidir. Eğer test numunesi temas süresi boyunca darbeye cevap verebilecek kadar yeterli zaman bulur ise, daha fazla darbe enerjisi elastik olarak absorbe edilebilir (Sjoblom ve ark., 1988).

Abrate, tabakalı kompozitler üzerindeki darbe etkisinin, 100 ms 'den daha düşük temas sürelerinde meydana geldiğini belirtmiştir (Abrate, 1991).

Düşük ve yüksek hızlı darbe etkisine maruz kalan ince plakalarda meydana gelen darbe hasarları benzerdir. Bu nedenle, ince plakalarda darbe olayı test kolaylığı bakımından düşük hızlı olarak ele alınabilir. Vurucu kütesinin altındaki hasar bölgesinde meydana gelen basma şekil değişimi Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanabilir. Epoksi bazlı kompozitlerde düşük hızlı darbe sonrası oluşan %0.5-1 arasındaki basma birim şekil değişim oranları için Denklem 4.1 kullanılabilir (Robinson ve Davies, 1992; Richardson ve Wisheart, 1996).

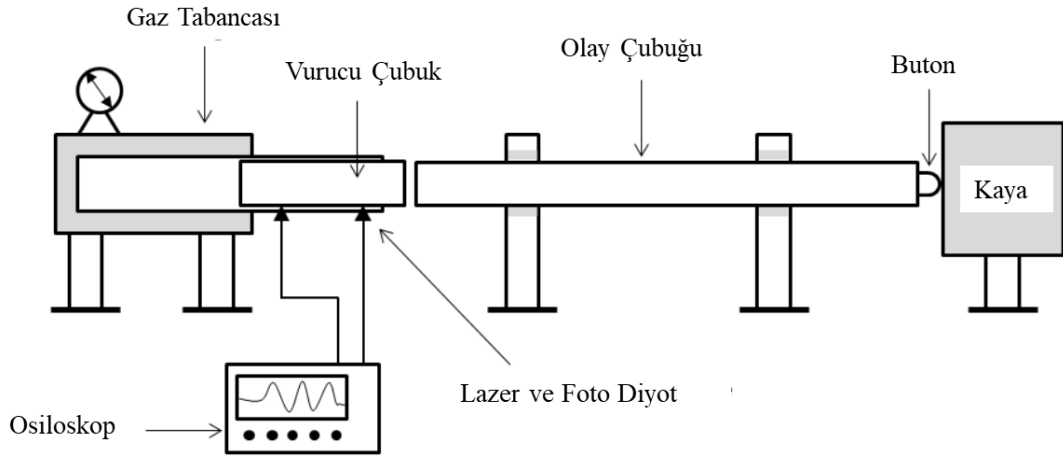
$$\epsilon_c = \frac{\text{Darbe Hızı}}{\text{Malzemedeki Ses Hızı}} \quad (4.1)$$

4.2.2. Yüksek Hızlı Darbe Testi

Yüksek hızlı darbe test metodları, basınçlı hava ve Split-Hopkinson darbe testi olmak üzere iki çeşittir. Her iki test metodunda düşük ağırlıklı bir cismin yüksek hızda numuneye çarpması ile test gerçekleştirilir. Basınçlı hava darbe testi, darbe esnasında yüksek şekil değişimi sergileyen malzemeler için uygun değildir. Split-Hopkinson darbe testi, malzemelerde meydana gelen yüksek şekil değiştirmeye karşı darbe etkisini araştırmak ve malzemelerin dinamik davranışlarını incelemede kullanılır (Abrate, 2005).

Malzemelerin maruz kaldığı gerçek darbe hızlarına uygun bir test metodu seçmek çok önemlidir. Darbe etkisi, düşük, yüksek ve hiper (aşırı) hız olarak kategorize edilir ancak kategoriler arasında net bir geçiş yoktur. Balistik testler için Şekil 4.2' de gösterilen Split-Hopkinson darbe testi kullanılır. Kısaca bu testin açıklanması gerekir ise, basınçlı hava ile itilen

bir mermi silah namlusundan geçerek bir hız algılayıcı cihazına (osiloskop, lazer ve foto diyottan oluşan) girer. Burada merminin hızı ölçülür. Daha sonra mermi, test numunesine çarpar ve test sonlanır (Richardson ve Wisheart, 1996).



Şekil 4.2 Tipik bir Split-Hopkinson balistik test sistemi (Kwon ve ark., 2013)

4.3. Darbe Yüğü Altında Kompozitlerin Davranışı

Elyaf takviyeli tabakalı kompozitler, elyaf ve matris olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Elyaf ve matrisin özellikleri, kompozit yapının darbe esnasında temas rijitliğini etkileyerek hasarın başlamasını ve yayılmasını önemli ölçüde etkiler. Kompozit bileşenlerinin özelliklerine ek olarak, literatürde birçok parametre göz önüne alınmıştır. Kompozit plakanın kalınlığı, boyutu, istifleme sırası, çarpma tertibatının kütlesi ve şekli, kompozitin elastik özellikleri, başlangıç hızı, sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar kompozit malzemelerin hasar karakteristiğini etkileyen faktörlerdir (Cantwell ve Morton, 1991; Abrate, 1994; 2005).

Naik, düşük hızlı darbe esnasında vurucu ile numune arasında meydana gelen ve kompozit yapıyı deformasyona uğratan gerilme dalgalarını dikkate almaz. Bu nedenle kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testlerini yarı-statik gerçekleşen bir olay olarak kabul eder (Naik, 2005).

DeneySEL çalışmalar esnasında darbe etkisinde kalan bir kompozitin üzerinde ciddi hasar oluşmayabilir. Ancak, kompozitin yapısında matris çatlaması, delaminasyon ve/veya elyaf kopması şeklinde iç hasara neden olabilir. Bu hasarlar, kompozitin mukavemeti ve rijitliğini önemli derecede azaltabilir (Abrate, 2005).

Düşük hız darbe etkisi, delaminasyon ve matris çatlaması ile karakterize edilir. Yüksek hızlı darbe testinde ise, vurucunun yüzeye batması ve/veya delmesi ile meydana gelen elyaf kopması ile karakterize edilmektedir (Joshi ve Sun, 1987; Liu ve Malvern, 1987).

4.4. Düşük Hızlı Darbe Testinde Oluşan Hasar Modları

Darbeye maruz kalan elyaf takviyeli tabakalı kompozitler dört ana modda hasara uğrar. Bunlar:

1) Matris Hasar Modu: Matriste meydana gelen çekme, basma ve/veya kayma gerilmeleri sonucunda elyafa paralel olarak meydana gelen matris çatlakları ile oluşur.

2) Delaminasyon Hasar Modu: Kompoziti oluşturan tabakalar arasında meydana gelen çekme, basma ve kayma gerilmeleri sonucunda tabakaların ya da elyaf/matris arayüzeyinin birbirinden ayrılması ile oluşur.

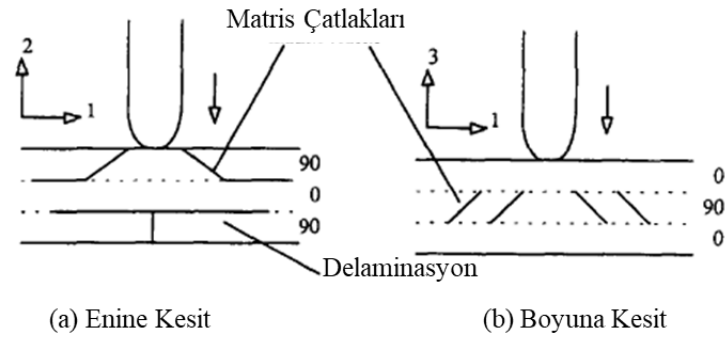
3) Elyaf Hasar Modu: Elyafın çekme, basma ve eğilme gerilmelerine maruz kalması sonucunda elyaf kopması ile oluşur.

4) Penetrasyon Hasar Modu: Vurucunun numune yüzeyine batması ve/veya tamamen delmesi sonucunda oluşur.

Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe sonrasında yapılarında meydana gelen hasar modları mikro ya da makro olarak incelenebilir. Bu sayede kompozit yapının kalan dayanımı hakkında yorum yapılabilir (Richardson ve Wisheart, 1996).

4.4.1. Matris hasar modu

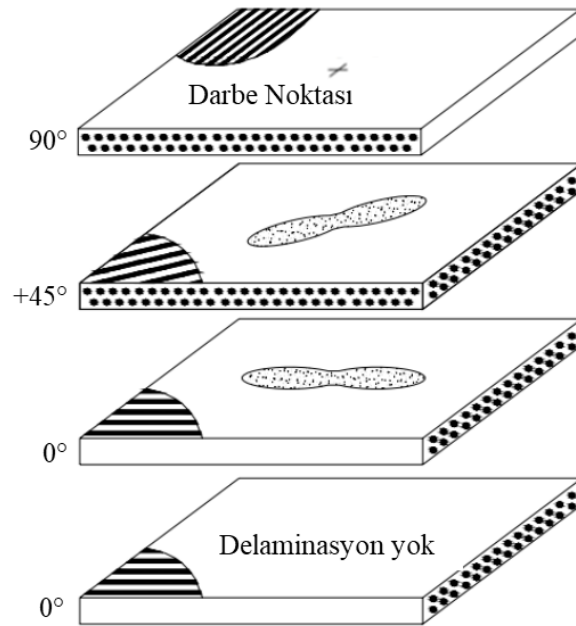
Düşük hızlı darbe sonrasında meydana gelen matris çatlakları, elyaf/matris ayrılması (debonding) ve delaminasyon hasarlarına neden olabilir. Matris hasarları, 1 ila 5 J arasındaki düşük darbe enerji seviyelerinde zor gözlemlenir. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozitlerde matris çatlakları, genellikle elyaf doğrultusunda oluşur. Tabakalı kompozitlerde üst tabakalardaki matris çatlakları, vurucunun numune yüzeyi ile temas ettiği bölgede gözlemlenir (Şekil 4.3a). 5 J' den daha büyük darbe enerjilerinde orta tabakalarda kayma gerilmelerinden kaynaklı kesme (enine/çapraz) çatlakları oluşabilir (Şekil 4.3b) (Abrate, 2011). Bu çatlaklar yaklaşık 45° yönlenmiş şekilde meydana gelir. Kompozit yapıda meydana gelen kayma gerilmeleri, temas kuvveti ve temas alanı ile doğrudan ilgilidir. Şekil 4.3a' da alt tabakada görülen dikey matris çatlağı, eğilme gerilmesi etkisinde oluşur (Choi ve ark., 1991b; Jih ve Sun, 1993).



Şekil 4.3 Darbeye maruz kalmış [0/90/0] kompozit bir plakada oluşan hasarlar (Richardson ve Wisheart, 1996)

4.4.2. Delaminasyon hasar modu

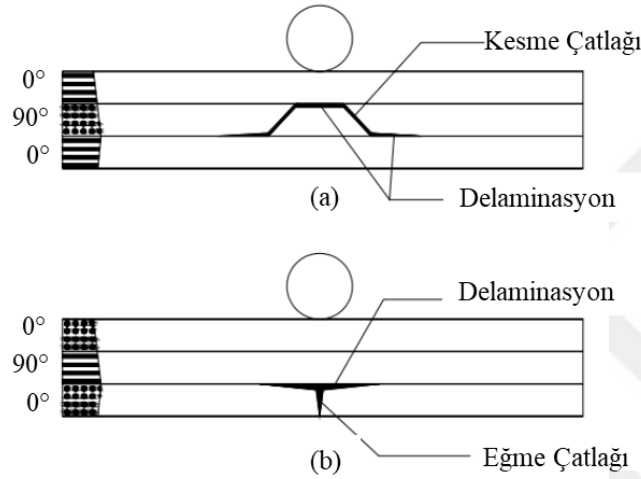
Delaminasyon, tabakalı kompozitleri oluşturan levhaların arasındaki ayrılma hasarıdır. Darbe enerjisi kritik değere ulaştığı zaman delaminasyon meydana gelebilir. Birçok deneysel çalışma, delaminasyonun farklı elyaf yönelimlerine sahip levhalar arasındaki arayüzeyde oluştuğunu bulmuştur. Eğer iki bitişik levha aynı elyaf yönelimine sahipse, aralarında oluşan arayüzeyde delaminasyon hasarı oluşmaz. Şekil 4.4’ te görüldüğü gibi, tabakalı kompozitin orta kısmına gelen bir darbe sonucunda oluşan delaminasyon hasarı, genellikle alt kattaki farklı elyaf doğrultusuna sahip levhalarda oluşabilir.



Şekil 4.4 Tabakalı kompozit yapılarında delaminasyon hasarları (Abrate, 2005)

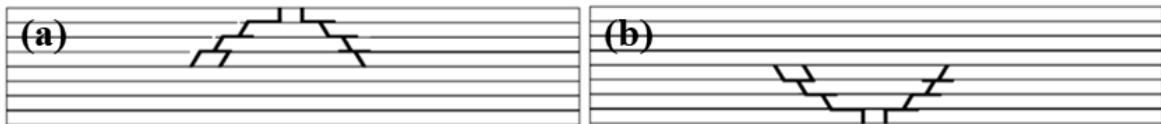
Darbe sonrasında delaminasyon hasarı, kritik bir matris çatlğından başlar ve iki levha arasında oluşan arayüzeyde alt tabakanın enine doğrultusunda elyaf yönünün etkisiyle daha geniş bir şekilde büyüyebilir. Bu hasara örnek olarak tabakalı kompozitlerde delaminasyon hasarının yerfistığı şeklinde büyüdüğü Şekil 4.4' te şematik olarak gösterilmiştir.

Elyaf yönelimlerine bağlı olarak tabakalı kompozitlerde oluşan delaminasyon hasarı Şekil 4.5' te gösterilmiştir. Genel olarak, iki levha arasındaki arayüzeyde delaminasyonu başlatan iki tip matris çatlğı gözlemlenir. Bun çatlklar, eğilme ve kesme çatlkları olarak adlandırılır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Delaminasyon hasarları; (a) kesme çatlkları ile başlatılan, (b) eğilme çatlkları ile başlatılan (Abrate, 2005)

Düzlem gerilme halinde kompozit tabakanın maksimum çekme dayanımı aşıldığında eğilme çatlkları oluşmaya başlar. Kesme çatlkları ise, kayma gerilmelerinin oluşumunda kritik bir rol oynar. Matris çatlkları, tabaka kalınlığına bağlı olarak ya üst levhada ya da alt levhada gözlenir. Darbe sonrası kalın tabakalı kompozitlerde matris çatlğı ilk katmanda oluşmaz. Ancak vurucunun etkisi ile oluşan yüksek temas kuvvetinden kaynaklı alt katmanlarda matris çatlğı oluşabilir (Şekil 4.6a). İnce tabakalı kompozitlerde, eğilme gerilmelerinden kaynaklanan matris çatlkları tabakalı kompozitin alt katmanında oluşur (Şekil 4.6.b) (Abrate, 2005).



Şekil 4.6 Matris çatlğı hasar desenleri; (a) çam ağacı, (b) ters çam ağacı (Abrate, 2005)

4.4.3. Elyaf hasar modu

Elyaf hasarları, matris çatlakları ve delaminasyon hasarlarından sonra ortaya çıkar ve yüksek enerjili darbe etkisi ile oluşur. Elyaf kırılması kesme kuvveti etkisinde ortaya çıkar. Darbe sonrasında tabaklar arasında meydana gelen arayüzey eğilmesinden kaynaklı elyaf hasarı için gerekli olan darbe enerjisi, Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanabilir (Dorey, 1987).

$$\text{Enerji} = \frac{\sigma^2 \cdot w \cdot t \cdot L}{18 \cdot E_f} \quad (4.1)$$

Burada, σ eğilme dayanımı, E_f elyafın elastisite modülü, w genişlik, L destekler arası mesafe ve t numune kalınlığıdır.

4.4.4. Penetrasyon hasar modu

Penetrasyon hasar modu, elyaf hasarının kritik bir seviyeye ulaştığı zaman vurucunun kompozite tamamen nüfuz etmesiyle meydana gelir. Kompozit yapıda penetrasyon etkisi ile oluşan hasarlara yönelik araştırmalar, genellikle balistik çalışma konuları içinde incelenmektedir. Kompozitin kalınlığı arttıkça penetrasyon hasarının oluşması için darbe enerji seviyesi de artar. Penetrasyon hasarının oluşumunda matris malzemesinin etkisi çok azdır. Bu nedenle penetrasyon hasarları araştırılırken elyaf türleri üzerinde durulur. Çeşitli cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin penetrasyon yükünün belirlenmesinde cam elyaf türü önemli bir rol oynamaktadır. Dorey, cam elyaf türleri için penetrasyon hasarlarının araştırılması sırasında darbe sonrasında absorbe edilen enerjiyi elde etmek için basitleştirilmiş analitik bir penetrasyon modeli önermiştir (Dorey, 1987).

$$\text{Enerji} = \pi \cdot \gamma \cdot d \cdot t \quad (4.2)$$

Burada, γ kırılma enerjisi, d vurucunun uç kısmının çapı ve t tabaka kalınlığıdır.

Malzemeler, çekme test makinası yardımıyla kademeli olarak arttırılan gerilmeler altında test edilir ve belirli bir sınırdaki gerilme değerine geldiği anda hasara uğrar. Malzemenin hasara uğradığı bu değere statik dayanım denir. Ancak aynı malzeme geçmişte çevrimsel olarak gerilmelere uğramışsa, statik dayanım değerinden daha düşük bir değerde hasara uğrar. Bunun nedeni ise malzemenin yorulmasıdır. Yorulma hasarı, değişken gerilmelere veya uzamalara maruz kalan bir yapıda bölgesel olarak ilerleyen kalıcı mikro ve/veya makro yapısal şekil değiştirmenin olduğu bir işlem olarak ta tanımlanabilir. Bu yapısal değişiklikler, yeterli sayıda gerilme veya şekil değiştirme çevriminden sonra çatlakların gelişmesi ile ortaya çıkar ve çatlak boyutunun artması ile sonuç hasarı olan kırılma olayı gerçekleşebilir. Birçok araştırma, malzemelere uygulanan yorulma yüklemeye gerilmesinin elastik bölgede olmasına rağmen çevrimsel plastik deformasyondan kaynaklandığını ortaya koymuştur (Erkal, 2007).

5.2. Yorulma Ömrü

Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM), yorulma ömrünü “ N_f ” olarak tanımlamaktadır. Yorulma ömrü; değişken gerilme, numune geometrisi ve test koşullarına bağlı olarak belirli bir hasarın ortaya çıkmasından önce malzemenin dayanabileceği değişken gerilme çevrim sayısı olarak tanımlanır. Çelik ve titanyum gibi malzemeler için belirli bir gerilme genliğinde hasarın oluşmadığı teorik bir değer vardır. Bu değere yorulma, mukavemet ya da dayanıklılık sınırı denir. Bir malzemenin yorulma ömrünü belirlemek için üç yöntem kullanılır. Bu yöntemler; gerilme–zaman, şekil değiştirme–zaman ve doğrusal elastik kırılma mekaniği yöntemleridir (Bathias, 1999; Stephens ve ark., 2000).

5.3. Yorulma Testi

Yorulma testi, malzemelerin değişken gerilmeler altında davranışını belirlemek için uygun çekme test ya da üniversal yorulma test cihazları ile gerçekleştirilir. Bir numuneye belirlenen bir ortalama gerilme değerinde bir değişken gerilme uygulanır ve hasarın ortaya çıktığı çevrim sayısı kaydedilir. Genel olarak, test aynı numuneler üzerinde ve çeşitli yorulma yüklemeye oranlarında tekrarlanır. Yorulma testinde numuneye uygulanan gerilmeler; çekme, basma, burulma veya eğilme şeklinde olabilir. Ortalama ve çevrimsel gerilmenin genliğine bağlı olarak numunedeki net gerilme, yüklemeye çevrimi boyunca bir yönde olabilir veya yön değiştirebilir. Yorulma testlerinden elde edilen veriler ile bir numunede meydana gelen çevrimsel gerilme genliğine karşı hasara neden olan çevrim sayısını veren bir grafik çizilir

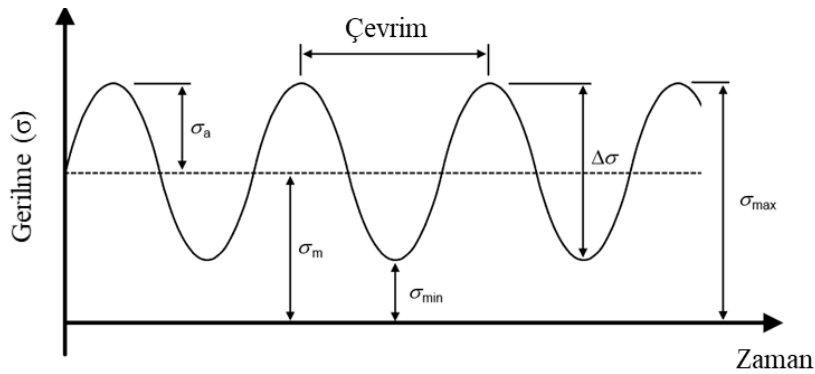
(Stephens ve ark., 2000). Yorulma testi genellikle “Yorulma Testi El Kitabı (Swanson, 1974)”, “Yorulma Testi ve Verilerin İstatiksel Analizi; ASTM STP91” ve Plastiklerin Yorulma Testi; ASTM D671 kaynaklarında geniş kapsamda ele alınmıştır.

Yorulma testi genellikle, Şekil 5.2’ de gösterilen sinüzoidal gerilme–zaman eğrileri kullanılarak yapılır. Maksimum ve minimum gerilme üzerinden diğer gerilme parametreleri; gerilme aralığı ($\Delta\sigma$), gerilme genliği (σ_a), ortalama gerilme (σ_m) ve gerilme oranı (R) kolayca belirlenebilir. Yorulma olayında gerilmenin basma veya çekme yönünde etki göstermesine karşın üç tür çevrim bölgesi vardır. Negatif bölge olarak adlandırılan bölgede kuvvetin en büyük ve en küçük gerilme değerleri negatif değerdedir. Alternatif gerilme bölgesinde gerilme değeri çekme ile basma arasında değişiklik gösterir. Pozitif tekrar bölgesi olarak adlandırılan bölgede kuvvetin en büyük ve en küçük gerilme değerleri pozitif değerdedir. Şekil 5.2’ de gösterilen Denklem 5.1, 5.2 ve 5.3’ te verilmiştir.

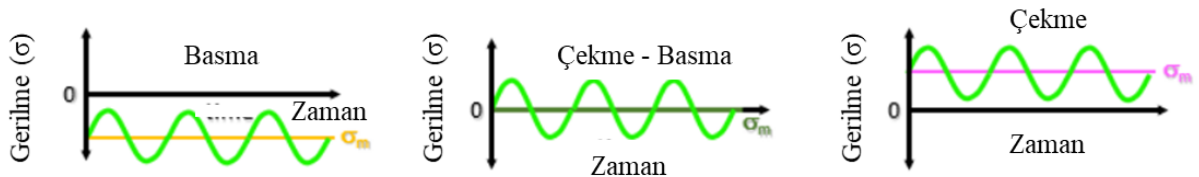
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (5.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5.2)$$

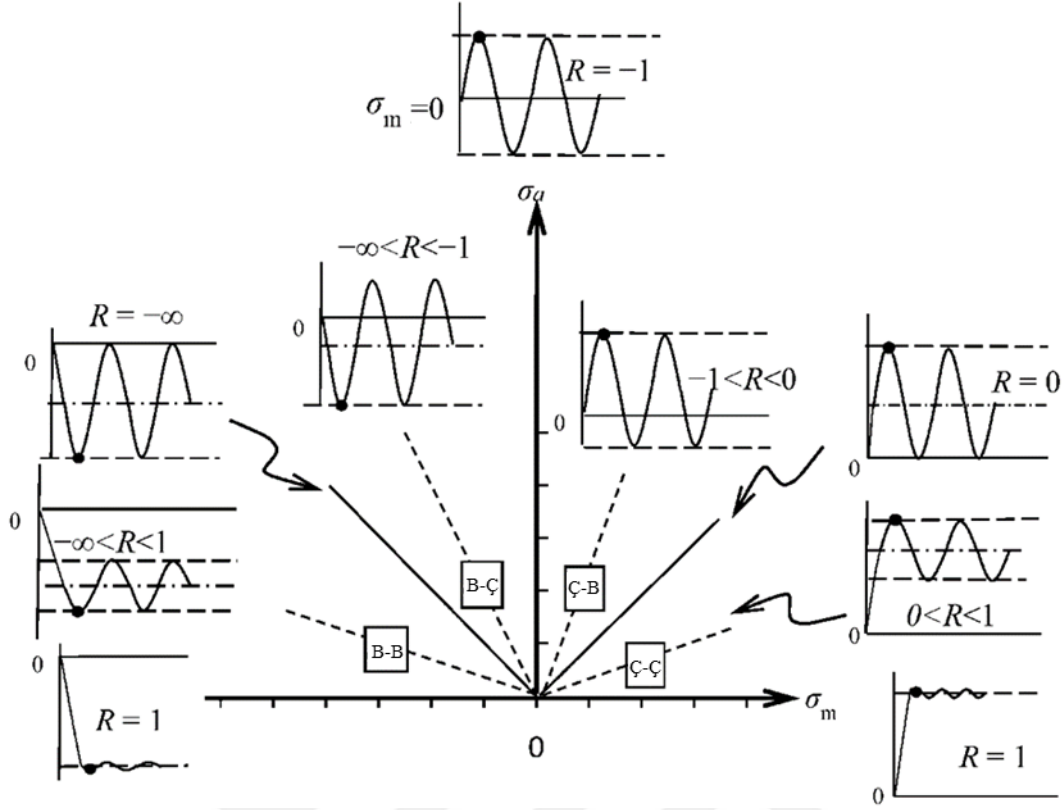
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (5.3)$$



Şekil 5.2 Yorulma tahmini için yaygın kullanılan parametreler



Şekil 5.3 Yorulma testinde uygulanan gerilme–zaman eğrileri (Anonim, 2019)



Şekil 5.4 Ortalama gerilmeye (σ_m) göre gerilme oran (R) diyagramı. $R = 1$ statik yükleme, $R = 0$ çekme yükünü boşaltma, $0 < R < 1$ çekme-çekme (Ç-Ç), $R = -1$ çekme-basma (Ç-B) ($\sigma_m = 0$), $-1 < R < 0$ çekme-basma (Ç-B), $\infty < R < -1$ basma-çekme (B-Ç), $-\infty < R < -1$ basma-basma (B-B), $R = -\infty$ basma yükünü boşaltma (Burhan ve Kim, 2018)

Gerilme-çevrim sayısı (SN ya da σN) eğrileri belirli bir “Gerilme Oranı (R)” için geliştirilmiştir. R değeri, gerilmenin alt değerinin, çevrimsel gerilme-zaman geçmişinde gerilmenin üst değerine bölünmesiyle elde edilir. σN -eğrisi, yorulma test koşullarını belirlemek için uygun bir yoldur. Örneğin, havacılık endüstrisinde kullanılan malzemeler üzerinde yorulma testleri, net bir çekme gerilmesi sağlayabilen 0.1 değerindeki gerilme oranında gerçekleştirilir. Ortalama gerilme genliği 0 alınır ise, eşit büyüklükte çekme ve basma yükleme koşulları oluşarak R değeri -1'e eşit olur. Sabit yükleme için R , 1' e eşittir. Ortalama gerilme genliğinin değeri gerilme genliğine eşit olduğu bir durumda ise, R değeri 0' a eşit olur. Ortalama gerilme ile yorulma gerilme oranı arasındaki ilişkiler Şekil 5.4' te özetlenmiştir.

Şekil 5.4' te görüldüğü gibi, ortalama gerilmeye göre yorulma dayanımı değişir. Çelik ve titanyum gibi metaller yorulma ömrünün sonsuz olduğu sürekli mukavemet sınırına sahiptir fakat kompozit, alüminyum ve alaşımları gibi malzemeler sürekli mukavemet sınırına sahip değildir. Bundan dolayı, bu tür malzemelerde yorulma ömrünün belirlenmemesi oldukça önemlidir.

5.3.1. σ -N Eğrisi

Yüksek çevrimli yorulma testlerinde malzemelerin yorulma davranışı genellikle bir Wöhler eğrisi olarak da bilinen σ -N eğrisi ile karakterize edilir. Bu eğri, çevrimsel gerilmenin büyüklüğü (σ), hasar çevriminin logaritmik ölçeğine (N) karşı çizilir. Yorulma çevrimi, bir gerilme değerinde hasar çevrimini sayan bir test cihazı tarafından uygulanabilir. σ -N eğrisinin eğimi; gerilme oranı, yükleme frekansı, sıcaklık, korozyon, artık gerilmeler ve çentiklerin varlığı gibi birçok faktörden etkilenebilir. Gerilme oranı etkisinin incelenmesi için sabit yorulma ömrü şeması kullanılmalıdır. Goodman-Line yöntemi, ortalama gerilmenin sürekli mukavemet değerinin üzerindeki etkisini tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. σ -N eğrisi denklem 5.4' te verilen matematiksel modelle ifade edilir:

$$\sigma = \sigma_{tu} (m \log(N) + b) \quad (5.4)$$

Burada, σ maksimum yorulma gerilmesi, σ_{tu} statik mukavemet, N, hasara neden olan çevrim sayısı, m ve b sabitlerdir. m sayısı σ -N eğrisinin eğimini, b sayısı ise σ -N eğrisinin gerilme ekseninde kestiği değer olarak ifade edilir (Burhan ve Kim, 2018). İki farklı malzemenin yorulma dayanımları karşılaştırıldığı zaman σ -N eğrilerinden elde edilen m ve b değerlerinden faydalanılır. Bir malzemenin diğer malzemeye göre m değeri düşük, b değeri ise yüksek olduğu zaman o malzemenin yorulma dayanımı diğer malzemeye göre daha yüksek olduğu anlamına gelir.

5.3.2. ϵ -N Eğrisi

ϵ N-eğrisi, gerilme ve birim şekil değiştirme arasındaki orantı nedeniyle birim şekil değiştirme genliği (ϵ) ve çevrim sayısı (N) olarak ifade edilir. Yüksek çevrimli yorulmada, toplam birim şekil değiştirme elastik şekil değişimine eşitlenerek bir yaklaşım yapılır. Bu yaklaşım Denklem 5.4' te verilmiştir (Courtney, 2005).

$$\frac{\Delta \epsilon_{elastik}}{2} = \frac{\sigma_f}{E (2N_f)^{-b}} \quad (5.4)$$

Burada, $\Delta \epsilon_{elastik}$ her çevrimdeki elastik şekil değişimi, σ_f deneysel verilerle elde edilen çekme mukavemeti, E elastisite modülü, N_f hasar çevrim sayısı, b log-log eğrisinin eğimidir.

5.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma

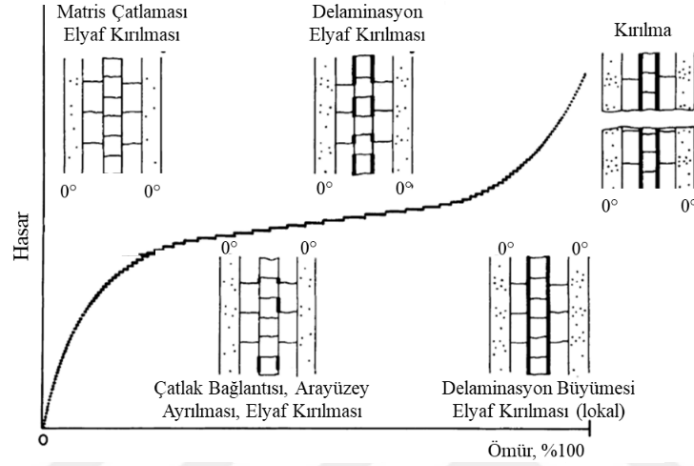
Kompozit malzemelerde yorulma olayı, fiziksel hasarlar ile açıklanır. Bu hasarlar genellikle mikro ya da makro çatlaklardan kaynaklanan yapı bozulması ya da dayanım azalması ile meydana gelebilir. Bu durumda yorulma süreci, ölçülebilir hasarın fiziksel durumu göz önüne alınarak incelenir.

Tekrarlı çevrimsel gerilme altında kompozit malzemelerin yorulma hasarı; mekanik analiz yöntemleri, hasar kriterleri ve ömür tahmini gibi birçok konu içerisinde ele alınabilir. Bir metal tekrarlı değişken gerilmeye maruz kaldığı zaman genellikle plastik deformasyon kaynaklı mekanizmaların etkisi ile yapısında yorulma çatlakları oluşur ve ilerler. Yapıda oluşan çatlak gelişimi sonucunda sonuç hasarı olan kırılma olayı ortaya çıkar. Elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerde metallerdeki gibi plastik deformasyon yoktur. Ancak, kompozit malzemelerde yorulma hasarı diğer hasar mekanizmaları ile oraya çıkmaktadır. Bu mekanizmalar, kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine, geometrisine, konfigürasyonlarına ve yükleme türüne bağlı olarak farklı şekillerde olabilir. Tekrarlı değişken eğilme ve burulma gerilmesi altında bir kompozit plakada görülen makroskobik hasar, kompoziti oluşturan tabakalarda yük taşıma görevi üslenen elyafların kırılması sonucu ortaya çıkar. Tabakalı kompozitlerde yorulma hasarı elyaf kopması olarak görülse de temelinde matris çatlama ve elyaf/matris arayüzey ayrılması vardır (Talreja, 2003).

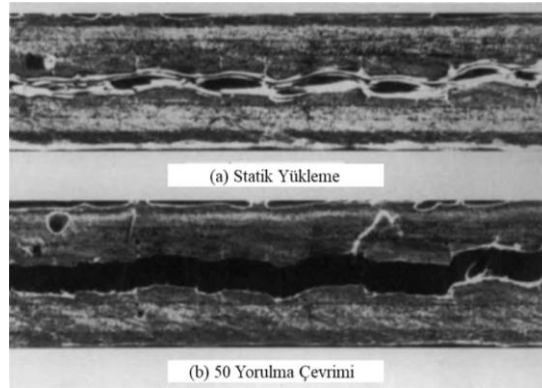
Kompozit bir plakanın yorulma ömrü boyunca geçirdiği hasar mekanizmaları Şekil 5.5’ te özetlenmiştir. Şekil 5.5’ te gösterilen kompozit plakanın hem çekme ve hem de basma gerilmeleri altında olduğu ve plakanın ilk katmanın 0° yönünde diğer katmanların çeşitli doğrultularda olduğu kabul edilmiştir. Şekil 5.5’ te gösterilen delaminasyon hasarları, tabakalar arası kararlı çatlak büyümesi ile oluşur. Delaminasyon bölgelerini içeren bir karbon/epoksi plakanın kesiti Şekil 5.6’ da gösterilmektedir. Burada görülen hasar, delaminasyon hasarı ve enine matris çatlaklarının oluşumu ile meydana gelmiştir (Reifsnider, 2012).

Bir kompozitin yorulma ömrünü belirleyen hasar, çatlak oluşumu ve ilerlemesi olarak iki aşamada meydana gelir. Yorulma gerilmesi yüksek olur ise, matristeki çatlak hızlı bir şekilde ortaya çıkar ve yorulma olayı ikinci aşama olan çatlak ilerlemesine girer. Matris çatlakları ve mikro boşluklar, gerilmenin yoğun olduğu yerlerde çatlak başlatıcı rol üstlenebilir. Kayma gerilmesi etkisi ile meydana gelen çatlaklar, kırılma yüzeyini arttırdıklarından dolayı yorulma ömrü üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Kesme çatlakları, matris ve elyafın poisson oranlarındaki farklılıklarından dolayı yorulma boyunca oluşabilir. Eğer elyafın şekil değişimi matrisin şekil değişiminden küçük olur ise, elyaflar çatlak ilerleme doğrultusunda kırılmaya

maruz kalabilir. Eğer matrisin şekil değişim değeri elyafın şekil değişim değerinden küçük olur ise, matris daha önce hasara uğrayabilir. Elyaf yönelmesi çatlak ilerlemesi üzerinde büyük etkiye sahiptir. Çatlak, elyafa paralel doğrultuda ilerlerken çok az bir engelle karşılaşır. Bu durumda şekil değiştirme enerji boşalma hızı (G) düşük olacağından dolayı çatlak elyafa paralel ilerlerler. Dolayısıyla, çapraz katlı tabakalı kompozitlerde elyafların 0° ve 90° yönlenmiş olduğu tabakalar, hem sabit hem de değişken yüklemelerde ilk hasara uğrayan bölgelerdir.



Şekil 5.5 Bir kompozit plakanın yorulma ömrü boyunca hasar geçişinin şematik gösterimi (Reifsnider, 2012)



Şekil 5.6 (a) Statik yüklenme, (b) 50 yorulma çevrimi sonunda $[0/\pm 45/90]_s$ karbon/epoksi plakasının kesitinde oluşan delaminasyon hasarı (Reifsnider, 2012)

Bir kompozit malzemenin yorulma ömrünü çatlak başlama ve çatlak ilerleme mekanizmaları belirler. Yorulma gerilmesinin genliği arttıkça çatlak daha kısa sürelerde oluşur ve yorulma ömrü azalır. Kayma gerilmesi etkisinde meydana gelen matris çatlağı ilerlerken çatlağın önünde oluşan elyaf hasarı çatlağı durdurabilir. Sonuç olarak, çatlak ilerlerken karşılaştığı hasar mekanizmaları malzemenin yorulma ömrünü etkiler (Eldeniz, 1992; Günaydın, 2003; Gemi, 2014).

6. MATERYAL VE METOT

6.1. Giriş

Bu çalışmada ilk olarak, filaman sarma yöntemi ile üretilen grafen/bazalt/epoksi boruların üretiminde kullanılan ağırlıkça grafen oranı, epoksi ve grafen/epoksi levhalar üzerinde gerçekleştirilen çekme, eğilme ve darbe testleri sonucunda tespit edilmiştir.

Testler sonucunda bulunan grafen takviye oranı tespitinden sonra grafen takviyeli ve takviyesiz $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi filaman sarma boruların üretimi yapılmıştır. Daha sonra üretilen bu borular üzerinde iki aşamalı çalışma programı planlanmıştır.

Birinci aşamada, boruların kapalı-uçlu iç basınç altında patlatma ve değişken iç basınç altında yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada, borular kapalı-uçlu iç basınç altında düşük hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Daha sonra, bu borular üzerinde değişken iç basınç altında yorulma testleri gerçekleştirilmiştir.

Kapalı-uçlu iç basınç koşullar altında düşük hızlı darbe, iç basınç ve yorulma testleri sonucunda borularda meydana gelen hasar ve hasar mekanizmaları, görüntüleme analiz yöntemleri ile saptanmıştır.

6.2. Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi

Bu çalışmada, matris olarak bisfenol-A epoksi reçine türü olan EPIKOTE™ 828 LVEL ve sertleştirici olarak EPIKURE™ 866 anhidrit sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi matrisi takviye etmek için yüzey alanı 800 g/m^2 , tabaka kalınlığı 3-7 nm, tabaka genişliği ortalama 1.5μ ve %99.9 saflıkta olan grafen takviyesi NANOGRAFI firmasından satın alınmıştır.

Ultrasonik karıştırıcı kullanarak epoksi matris içerisine ağırlıkça 0.0, %0.125, %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.0 oranlarında grafen takviyesi, 30 dk boyunca bir cam beher içerisinde karıştırılmıştır. Grafen/epoksi karışımlarının gaz giderme işlemlerinden sonra ağırlıkça 100:80 oranında sertleştirici ilave edilerek manyetik karıştırıcıda 5 dk karıştırılmıştır. Daha sonra çekme, eğilme ve darbe test numunelerini üretmek için çelik kalıplara dökülerek, üretici firmanın tavsiyesi üzerine $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de 3 saat kürleme, $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de 3 saat süreyle post-kür işlemleri etüv fırınında gerçekleştirilmiştir. Kürleme sonunda sertleşen numuneler oda sıcaklığında bırakılarak yavaş soğutuldu ve sonrasında kalıplardan çıkarılarak etiketlenmiştir.

6.3. Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Karakterizasyonu

Ağırlıkça 0.0, %0.125, %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.0 oranında grafen takviyeli epoksi nanokompozit numunelerin mekanik özelliklerini araştırmak için çekme, eğilme ve V-çentikli Charpy darbe test yöntemleri kullanılmıştır. Testlerde kullanılan mekanik test cihazlarının görselleri Şekil 6.1’ de verilmiştir.



Şekil 6.1 Mekanik test cihazları; (a) çekme, (b) eğilme (c) universal V-çentik açma (d) V-çentikli Charpy darbe

Çekme test numuneleri, ASTM D638 belirtilen tip-2 çekme numunesi boyut ve geometrisine sahip olacak şekilde kalıplanmıştır. Çekme testleri ASTM D638 standardına göre, 50 kN ‘lik universal çekme test cihazında 5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Test sonrası her bir numune için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir. Eğilme testleri ASTM D790 standardına göre, 1.2 mm/dk’ lık basma hızında universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eğilme test numunelerinin genişliği 12.7 mm, uzunluğu 127 mm ve kalınlığı 3.2 mm boyutlarına sahip levha şeklinde kalıplanmıştır.

Her takviye oranı üzerinden en az 3 numune test edilerek çekme ve eğilme test verilerinin aritmetik ortalaması verilmiştir.

V-çentikli Charpy darbe testleri, Zwick model 6967 tip darbe test cihazında 2 J' lük bir çekiç kullanılarak 22 °C±1 °C sıcaklığa ve %50 ±10% nem oranlarına sahip ortamda ISO 179-1c standardına göre en az 5 tekrar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe test numunelerinin V-çentikleri Blacks marka CNB-8 tip universal çentik açma cihazı kullanılarak açılmıştır.

6.4. Morfolojik ve Kimyasal Karakterizasyon

Epoksi reçine, grafen/epoksi nanokompozitlerin, bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların hasar yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM SUPRA 40, 5 kV, Zeiss, Almanya) ile gözlemlenmiştir. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM; Jeol JEM-2100, HR) grafen takviyesinin yapısını ve epoksi matristeki dağılımını karakterize etmek için kullanılmıştır. Grafen takviyesi ve epoksi matris arasındaki etkileşimi ortaya çıkarmak için Bruker marka spektroskopi cihazında FTIR analizleri yapılmıştır.

6.5. Bazalt/Epoksi ve Grafen/Bazalt/Epoksi Boruların Üretimi

Bu çalışmada kullanılan $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi borular, İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Ltd. Şti. (Kemalpaşa/İzmir, Türkiye) tarafından filaman sarma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Boruların üretiminde, ortalama 13 µm çapında Kamenny Vek mono filament 400 teks bazalt elyaf kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak, bisfenol-A epoksi reçine türü olan EPIKOTE™ 828 LEVEL ve sertleştirici olarak EPIKURE™ 866 anhidrit sertleştirici kullanılmıştır. Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri Çizelge 6.1' de verilmiştir.

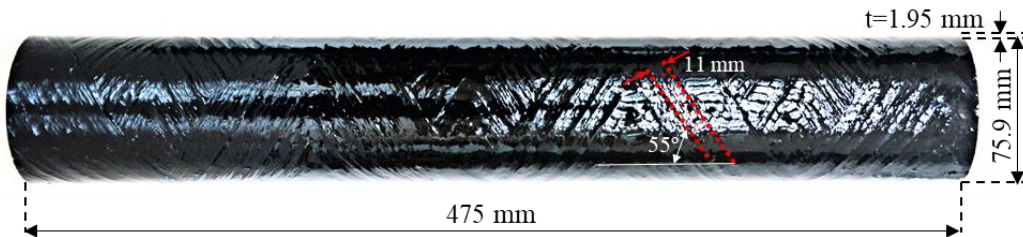
Filaman sarma yönteminde elyaflar, 80 °C' lik grafen takviyeli ve takviyesiz reçine banyosundan geçirilip; çapı 72 mm, uzunluğu 1 m olan mandreller üzerine sarılmıştır. Grafen takviyeli ve takviyesiz reçine ile emdirilen elyaflar, mandreller üzerine boru ekseni ile arasında 55° olacak şekilde helisel olarak sarılmıştır. Helisel sarma işlemi, borunun toplam tabaka sayısı 4 olacak şekilde devam etmiştir. Grafen/bazalt/epoksi boruların üretim aşamasındaki görseller Şekil 6.2' de sunulmuştur. Sarma işlemi bittikten sonra borular önce 120 °C' de 3 saat süreyle (kürleme işlemi), sonra da 140 °C' de 3 saat süreyle (post-kürleme işlemi) dönel bir fırında kürlenmiştir. Kür işleminden sonra her bir test numunesinin uzunluğu 475 mm olacak şekilde kesilmiştir. Filaman sarma yöntemi ile üretilen bazalt/epoksi boru Şekil 6.3 'te verilmiştir.

Çizelge 6.1 Bazalt/epoksi boruların üretiminde kullanılan epoksi reçine ve elyafın özellikleri

	Elastisite Modülü	Maksimum Çekme Dayanımı	Maksimum Birim Şekil Değiştirme ϵ , mm/mm	Yoğunluk
Malzeme Türü	E, GPa	σ , MPa		ρ , g/cm ³
Bazalt Elyaf	90-95	2900-3200	-	2.48
Epoksi Reçine	3.2	70-75	4-5	1.25



Şekil 6.2 Grafen takviyeli bazalt/epoksi filaman sarım boruların üretimi; (a) grafenin ultrasonik karıştırma işlemi, (b) sarım başlangıcı, (c) ilk tabaka sarım anı, (d) sarım sonu (e) grafen/epoksi reçine banyosunda ıslatılan bazalt elyaf demetleri, (f) bazalt elyaf bobinleri



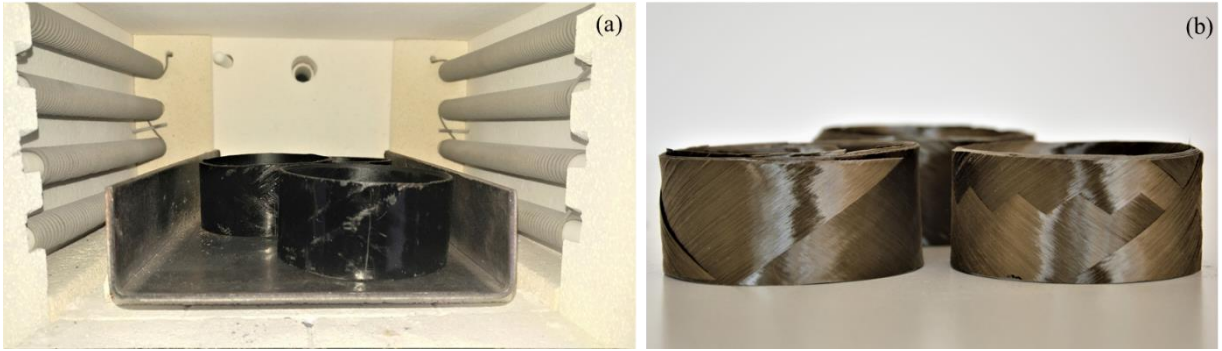
Şekil 6.3 Filaman sarma yöntemi ile üretilen $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi boru

6.6. Yakma Testi

Bazalt/epoksi borunun yakma testleri ASTM D2584 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yakma test numuneleri, boru üzerinden 40 mm boyunda üç adet kesilerek elde edilmiştir. Halka şeklinde boru numunelerinin hacmi, kompozit ağırlığı ve kompozitin gerçek yoğunluğundan hesaplanmıştır. Kompozit malzemenin gerçek yoğunluğu, ASTM D792-metod A' da belirtilen kuru/yaş ağırlık yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 6.4a' da görüldüğü gibi, yakma numuneleri 600 °C' de bir fırın içinde yakılmıştır. Epoksi reçine tamamen gaz haline geçinceye kadar bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Şekil 6.4b' de görüldüğü gibi, yakma işlemi sonrası geriye kalan bazalt elyaf hassas terazide tartılarak elyaf ve epoksi reçinenin ağırlıkları bulunmuştur. ASTM D2584 standardına göre, boruların elyaf hacim oranı Denklem 6.1 kullanılarak belirlenmiştir.

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad 6.1$$

Burada, V_f ; elyaf hacim oranı, W_f ; elyaf ağırlığı, W_c ; kompozit numune ağırlığı ve ρ_f ; elyaf yoğunluğu, ρ_c ; kompozit numune yoğunluğudur.



Şekil 6.4 Yakma testi; (a) fırın içindeki bazalt/epoksi halka numuneleri, (b) 600 °C' de yakma testi sonucunda kalan bazalt elyaf halkaları

6.7. Boşluk Ölçüm Testi

Grafen takviyeli ve takviyesiz bazalt/epoksi kompozit numunelerin boşluk ölçüm testleri ASTM D2734 (Test Metot C) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu test, kompozit yapısındaki boşlukların yüzde oranını belirler. Takviye edilmiş polimer ve kompozitlerin üretimleri sırasında yapılarında gaz boşlukları oluşabilir. Yüzde boşluk oranı önemlidir. Çünkü yüksek boşluk içeriği kompozitlerin dayanımlarını önemli ölçüde azaltabilir. Üretim esnasında

farklı zamanlarda üretilen kompozitlerin boşluk içeriğinin izlenmesi, kompozitlerin üretim sürecinin tutarlılığının bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir.

Kompozit, epoksi reçine ve bazalt takviye malzemesinin teorik yoğunlukları boşluk içeriğinin ölçümü için gereklidir. Bu yoğunluklardan epoksi reçine ve bazalt elyafın yoğunlukları, ilgili üreticinin paylaştığı verilerden alınmıştır. Yakma testinden elde edilen epoksi reçine ve bazalt elyaf takviyesinin ağırlıkları kullanılarak ağırlıkça yüzdeleri bulunmuştur ve kompozitlerin teorik yoğunluğu Denklem 6.2' e göre hesaplanmıştır.

$$T_d = 100 / (R / D + r / d) \quad (6.2)$$

Burada, T_d ; teorik kompozit yoğunluğu, R ; ağırlıkça reçine yüzdesi, r ; ağırlıkça takviye yüzdesi, D ; reçine yoğunluğu, d ; takviye yoğunluğudur.

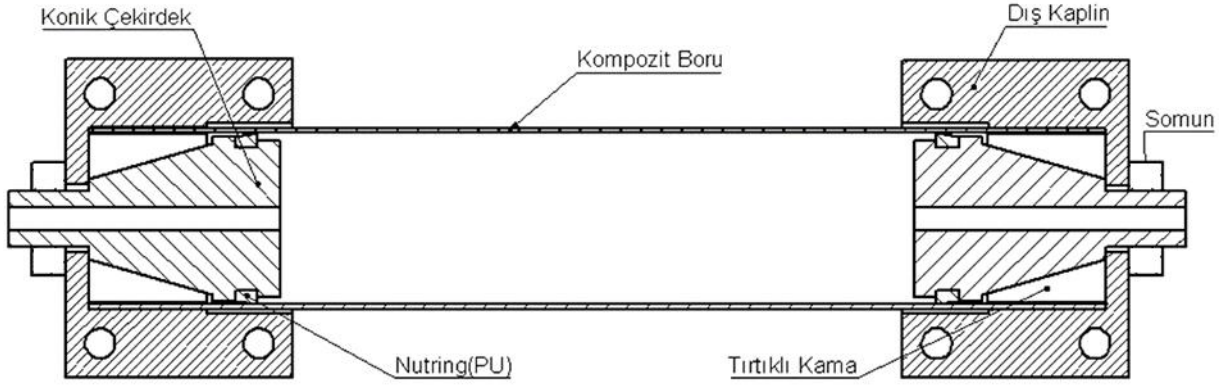
Kompozitin teorik yoğunluğu bulunduğundan sonra boşluk hesabı Denklem 6.3' ü kullanılarak hesaplanır. Burada, kompozitin gerçek (ölçülen) yoğunluğu bilinmesi gerekir. Kompozit malzemenin gerçek yoğunluğu, kuru/yaş ağırlık yöntemi ile ASTM D792 Metod A'ya göre belirlenmiştir. Daha sonra, Denklem 6.2 kullanılarak boruların boşluk içeriği hesaplanmıştır.

$$V = (T_d - M_d) / T_d \quad (6.3)$$

Burada, V ; boşluk içeriği (hacim, %), M_d ; gerçek kompozit yoğunluğudur.

6.8. Kapalı-Uçlu İç Basınç Test Aparatı

Kompozit basınçlı kaplar, metal ya da polimer bir iç astar üzerine ya da iç astar olmaksızın tamamen kompozit kabuk olarak filaman sarma yöntemi ile üretilmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ile basınçlı kapların üretimi zor ve pahalıdır. Ayrıca, iç basınç altında patlatma testleri için yüksek basınç gereklidir ve yorulma testleri ise, oldukça zaman alan işlemlerdir. Bu çalışmada, kompozit basınçlı kapların patlama ve yorulma davranışlarını belirleyebilmek için işlevsel bir test aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu test aparatı, hızlı bir şekilde sökülüp takılabilir ve tekrar tekrar kullanılabilir bir şekilde tasarlanmıştır. Kompozit boru ile test aparatının montaj kesit görünümü Şekil 6.5' te verilmiştir.



Şekil 6.5 Kompozit boru ile kapalı-uçlu iç basınç test aparatının montaj kesit görünümü

6.9. İç Basınç Testi ile Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda Elastik Özelliklerin Belirlenmesi

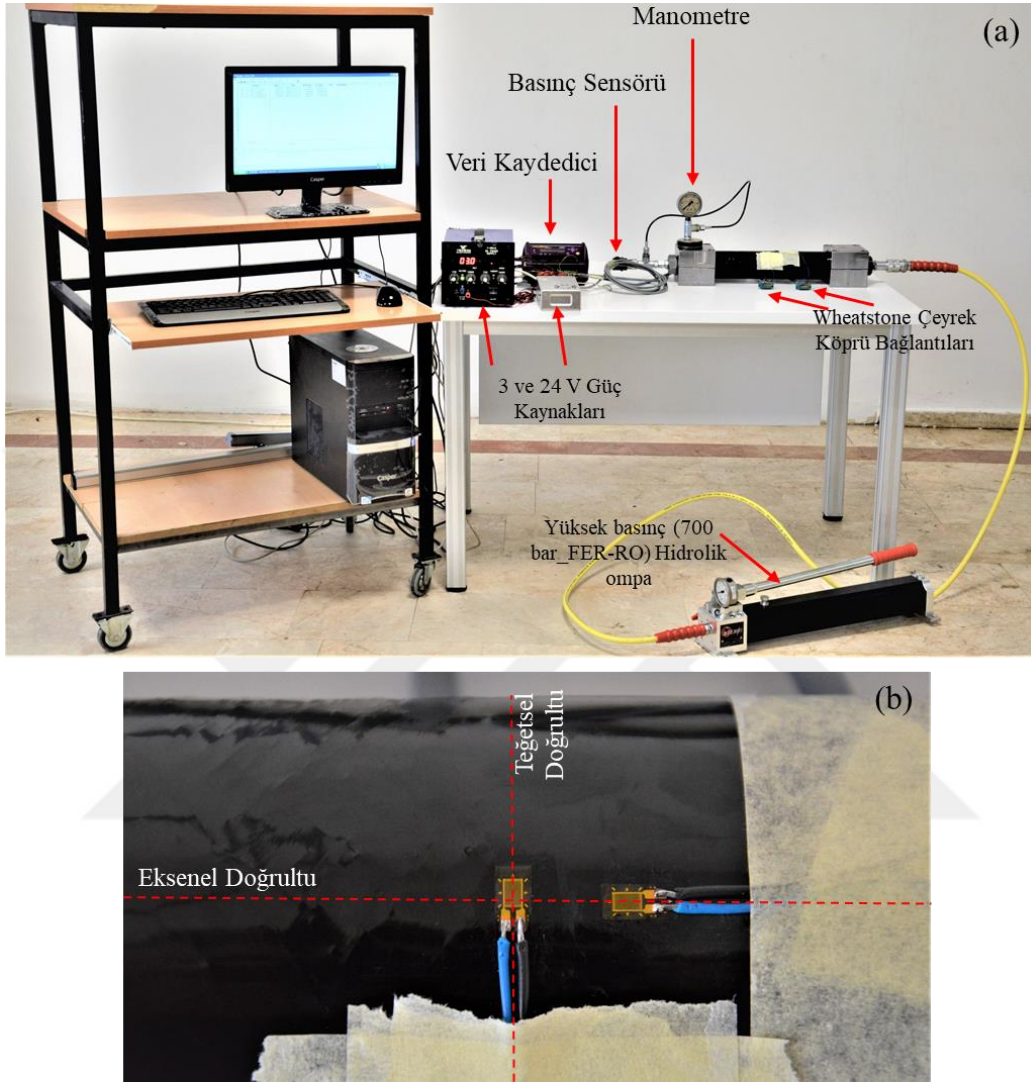
Boruların teğetsel ve aksel doğrultudaki elastik özellikleri Şekil 6.6a' da gösterilen test düzeneği ile belirlenmiştir. Test esnasında elde edilen sayısal veriler, dataTaker marka DT80 modeli veri kaydedici ile alınmıştır. Elastik özelliklerin belirlenmesi için Measurements Group INC. şirketinin kompozit malzemelere uygun CEA-13-125UN-350 tür ve ölçüm faktörü $2.135 \pm \%0.5$ olan strain gauge' ler kullanılmıştır. Strain gauge' ler yapıştırılmadan önce boruların yüzeyi önce zımparalandı ve sonrasında aseton ile temizlenmiştir. Daha sonra, boruların teğetsel ve aksel doğrultularına (Şekil 6.6b), Tokyo Sokki Kenkyujo Co.,Ltd. şirketine ait Ethyl 2-Cyanoacrylate bileşenli CN model yapıştırıcı kullanılarak strain gauge' ler yapıştırılmıştır. Boruların elastik özellikleri yükle-boşalt yöntemi ile tespit edilmiştir. Bu yöntemde borulara, 0 bardan başlayarak, 5 bar basınç artışı ile kademeli olarak yükle-boşalt işlemi yapılmıştır. Bu işlem, boruların başlangıç hasarı olan terleme şeklinde sızıntı hasarına kadar devam ettirildi ve sonrasında test sonlandırılmıştır.

Boruların iç basınç altında teğetsel ve aksel doğrultudaki şekil değiştirme (strain) değerleri, veri kaydedicinin teknik verilerinde bulunan Denklem 6.4 ve 6.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$B_{out} = \frac{V_{out}}{V_{ex}} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad 6.4$$

$$\varepsilon = \frac{4}{G.N} B_{out} \text{ } \mu\text{strain} \quad 6.5$$

Burada, V_{out} çeyrek köprü çıkış gerilimi (mV), V_{ex} çeyrek köprü giriş gerilimi (V), G strain gauge ölçüm faktörü, N wheatstone köprüsündeki strain gauge sayısıdır.

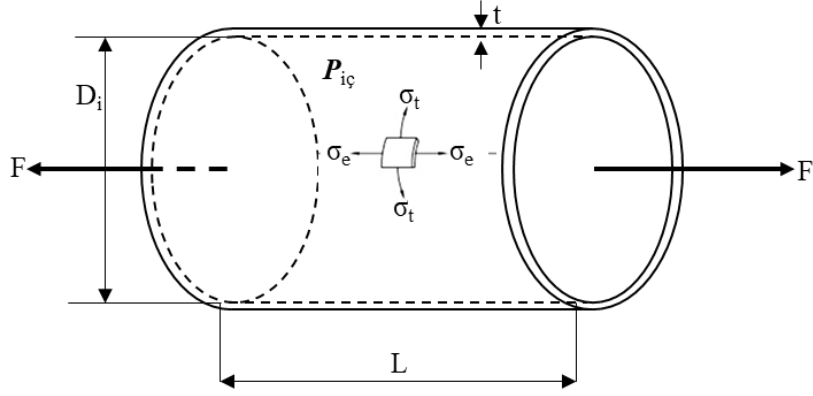


Şekil 6.6 Kapalı-uçlu koşullar altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların elastik özelliklerinin belirlenmesi; (a) kapalı-uçlu iç basınç test düzeneği (b) teğetsel ve eksenel doğrultuda strain gauge yapılandırılmış boru

İç basınç testinde borularda oluşan teğetsel ve eksenel gerilme Şekil 6.7' de şematik olarak gösterilmektedir. ASTM D599 standardına ve ince cidarlı kaplar ($D/t > 20$) teorisine göre teğetsel ve eksenel gerilme Denklem 6.6' da verilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot t} \quad \sigma_e = \frac{P \cdot D_i}{4 \cdot t} \quad (6.6)$$

Burada, σ_t iç basınç altında teğetsel gerilme, σ_e iç basınç altında eksenel gerilme, D_i iç çap, P iç basınç ve t cidar kalınlığıdır.



Şekil 6.7 Kapalı-uçlu iç basınç altında boruda oluşan teğetsel ve aksenal gerilmeler

Borularda oluşan gerilme ve birim şekil değiştirme oranları kullanılarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler yardımıyla boruların malzeme sabitleri denklem 6.7, 6.8 ve 6.9'a göre hesaplanmıştır. Boruların poisson oranı, lineer bölgedeki birim şekil değiştirme oranları kullanılarak bulunmuştur.

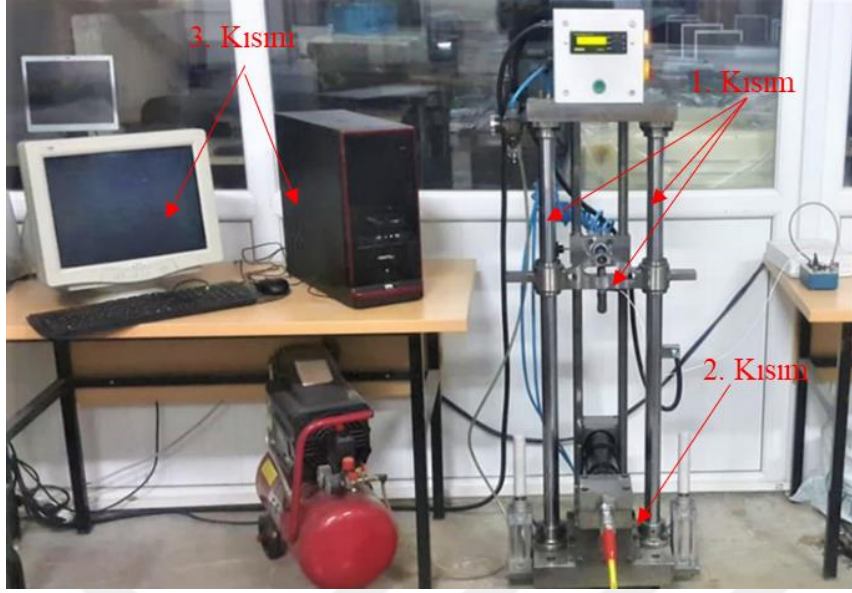
$$E_t = -\frac{\sigma_t}{\varepsilon_t}, E_e = -\frac{\sigma_e}{\varepsilon_e}, \nu_{te} = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_e} \quad (6.7, 6.8, 6.9)$$

Burada, E_t borunun teğetsel elastisite modülü, E_e borunun aksenal elastisite modülü, σ_t iç basınç altında teğetsel gerilme, σ_e iç basınç altında aksenal gerilme, ε_t iç basınç altında teğetsel birim şekil değiştirme oranı, ε_e iç basınç altında aksenal birim şekil değiştirme oranı ifade etmektedir.

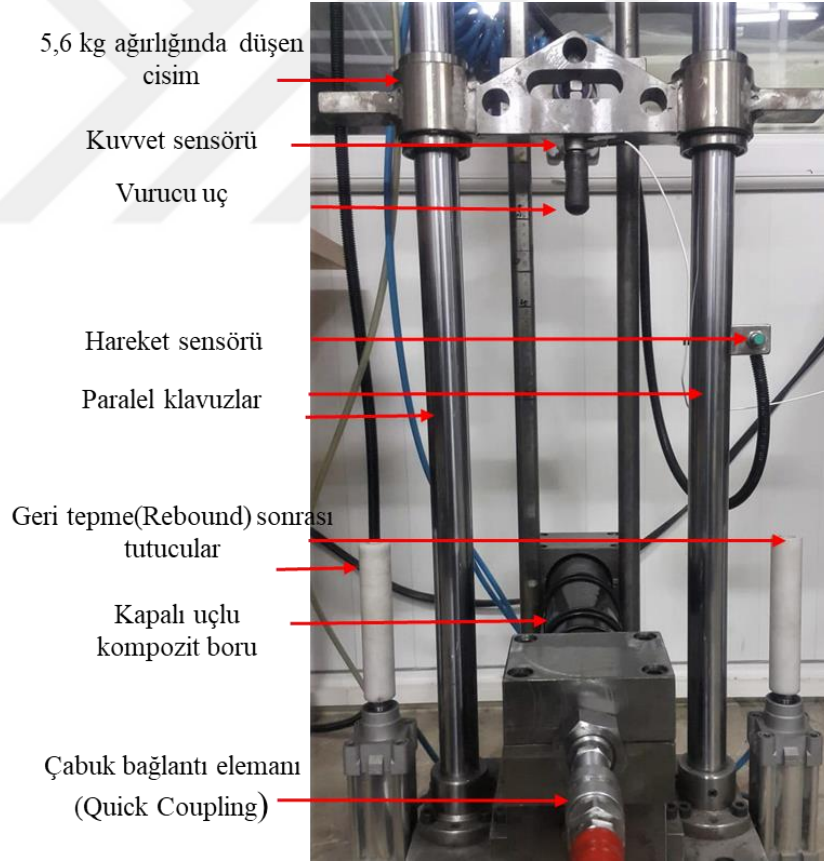
6.10. İç Basınç Altında Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Testleri

Boruların darbe cevapları, maksimum 55 J darbe etkisi oluşturabilen düşük hızlı darbe cihazı kullanılarak araştırılmıştır (Şekil 6.7). Çalışmada kullanılan düşük hızlı darbe test cihazı 3 kısımdan oluşmaktadır.

Birinci kısım, birbirlerine yüksek derecede paralel duran krom kaplı iki adet mil ve bu miller üzerinde hareket eden vurucu kütesinin ve kuvvet algılayıcının bağlı olduğu yatak sistemidir. İkinci kısım, darbe esnasında boruların yataklanması için kullanılan V-yatağı ünitesidir. Üçüncü kısım ise, yazılım ve donanımların olduğu kontrol ünitesidir. Vurucunun ağırlığı, bağlı olduğu yatak ve bağlama elemanlarıyla birlikte 5,6 kg' dır. Vurucu; 24 mm çapında, yarı küresel uçlu bir geometriye sahip çeliktir. Darbe testlerinde kullanılan kuvvet sen-



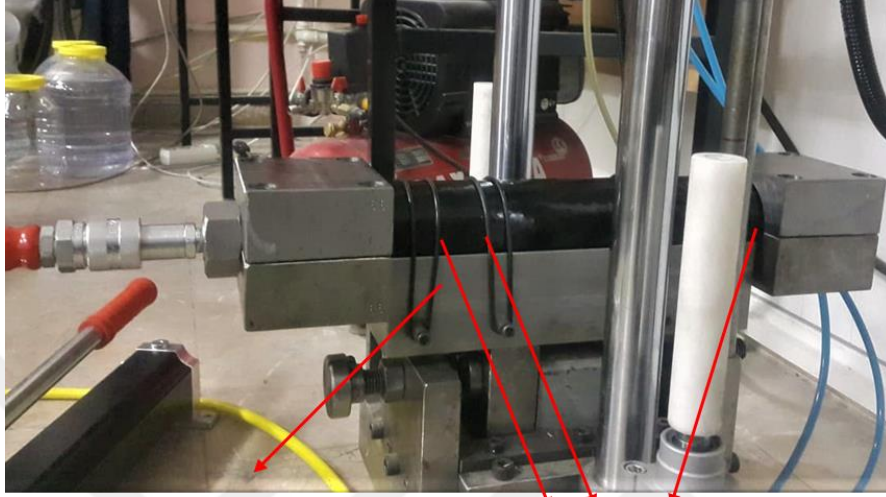
Şekil 6.7 Düşük hızlı darbe test cihazı



Şekil 6.8 İç basınç altında düşük hızlı darbe test cihazı ve bölümleri

sörü 22.6 kN değerine kadar ölçüm yapabilen PCB Quartz ICP (M202B04)' dir. Kuvvet sensörü ile ölçülen sayısal veriler, gürültü önleyici teflon kablo sayesinde sinyaller elektronik kontrol

ünitesine ileilmektedir. Düşük hızlı darbe cihazı ile farklı darbe enerji büyüklüklerinde ya da farklı darbe hız değerlerinde testler gerçekleştirilebilir. Cihazın üzerindeki kuvvet ve konum sensörleri ile darbe anında oluşan temas kuvveti ve geçen zaman, bilgisayar ortamına aktarılarak kuvvet-zaman grafikleri çizilebilir.



V-Yatak

Numune sabitleme elemanları

Şekil 6.9 Boruların desteklenmesi için kullanılan V- yatak ve sabitleme elemanları

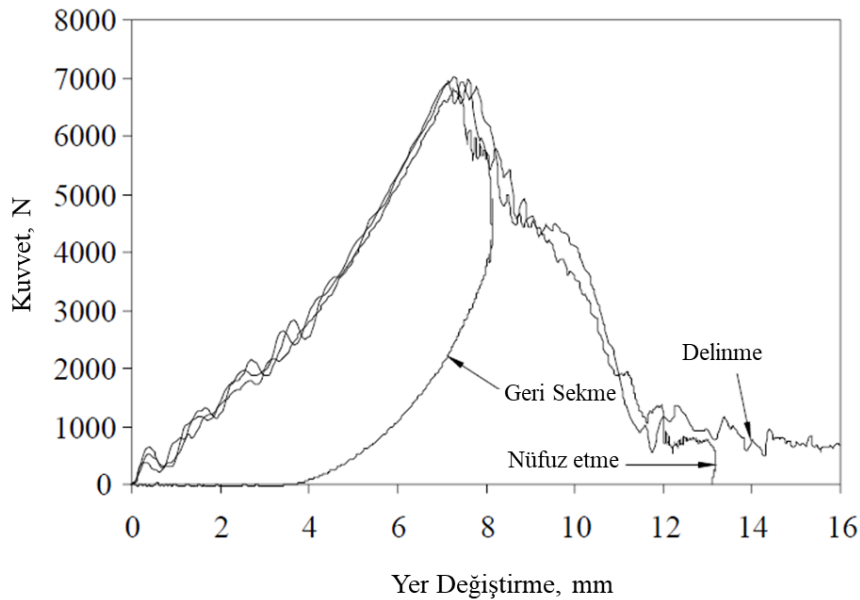


Şekil 6.10 Teğetsel ve aksenal ön gerilme oluşturmak için kapalı-uçlu borulara iç basınç uygulaması

Boruların darbe testleri, test cihazın üzerine monte edilen V-yatağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.9). Boruların kapalı-uçlu koşulları sağlamasına imkan veren “İç Basınç Test Aparatı” Başlık 6.8’ de anlatılmıştı. İç basınç test aparatı ve hidrolik el pompası kullanılarak, 50 bar iç basınca karşılık gelen teğetsel ve eksenel ön gerilmeler oluşturulmuştur (Şekil 6.10). Uygulanan sabit iç basıncın değeri 50 bar’ a sabitlenerek, darbe esnasında iç basınç değeri manometreden takip edilmiştir. Hidrolik el pompası basınç düşümüne izin vermemektedir.

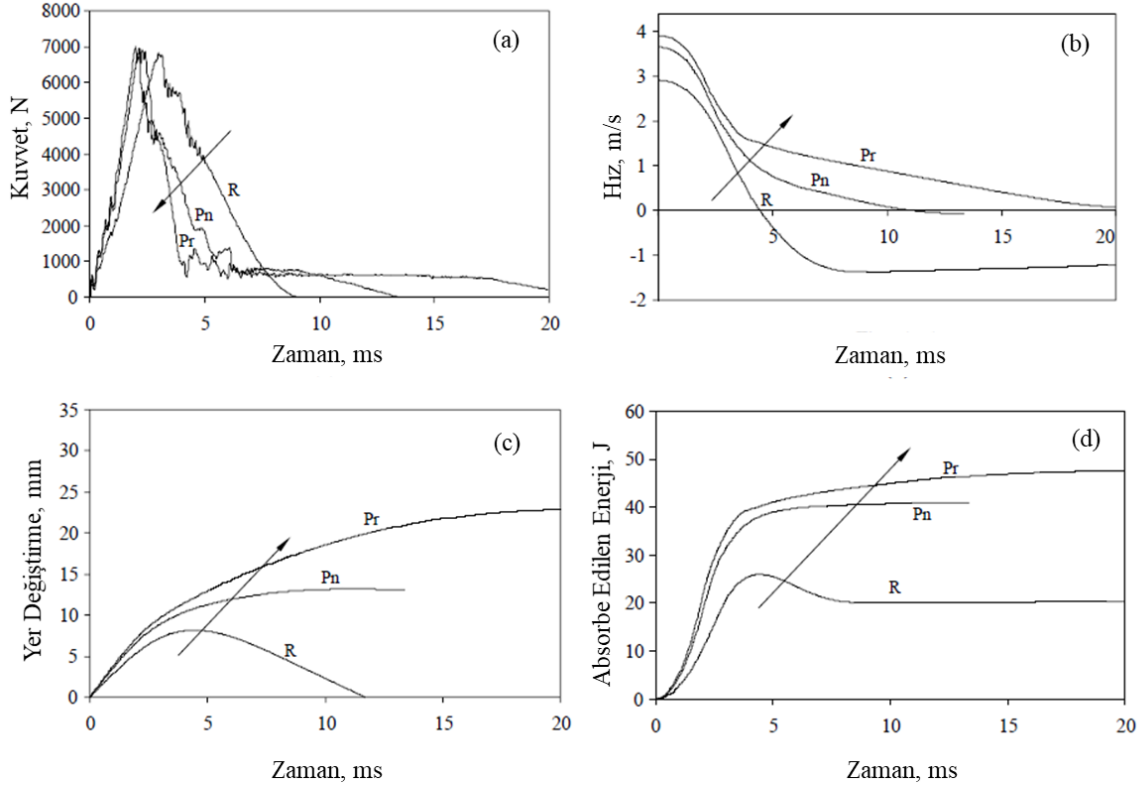
6.10.1. Düşük hızlı darbe test sonuç analizi

Kompozitlerin darbe davranışını anlamak için, test numunesi üzerinde delinme hasarı gerçekleşene kadar darbe enerjisi kademeli olarak arttırılarak darbe testleri tekrarlanır. Düşük hızlı darbe test cihazından, yük-zaman, hız-zaman, yer değiştirme-zaman ve absorbe edilen enerji-zaman geçmişleri elde edilir. Geri sekme (rebound), nüfuz etme (penetration), ve delinme (perforation) test sonuçlarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 6.11’ de verilmiştir. Maksimum kuvvetten aşağı doğru inildikçe grafiğin orijine doğru yönelmesi, çarpma sonrasında vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesini gösterir. Darbe kuvvetinin sıfır değeri aldıktan sonra vurucunun durması, kompozit numuneye nüfuz ettiğini ifade eder. Darbe esnasında vurucu ve test numunesi arasındaki sürtünme nedeniyle darbe kuvveti, son olarak sabit bir değere ulaşır.



Şekil 6.11 Darbe yüklemesine maruz kalan kompozit plakaların tipik kuvvet- yer değiştirme eğrileri (İçten, 2006)

Numuneler tarafından vurucuya uygulanan tepki kuvveti olarak tanımlanan maksimum temas kuvveti, artan darbe enerjisi ile yükselir. Şekil 6.12' de gösterilen oklar ve doğrultuları darbe enerjilerini temsil eder. Penetrasyon ve delinme hasarları, birbirlerine yakın maksimum temas kuvvet değerlerine sahiptir.



Şekil 6.12 (a) kuvvet-zaman, (b) hız-zaman, (c) yer değiştirme-zaman, (d) absorbe edilen enerji-zaman eğrileri (R: Geri Sekme, Pn: Nüfuz Etme, Pr: Delinme, okların yönü ve doğrultuları artan darbe enerjisini temsil eder) (İçten, 2006)

Şekil 6.12a' da gösterildiği gibi, vurucu ve numune arasındaki temas süresi olarak belirlenen süre, artan darbe enerjisi ile azalır. Geri sekme durumunda, kuvvet sıfıra ulaşır ve eğri, dağa benzer bir şekle sahiptir. Nüfuz etme ve özellikle delinme durumu için kuvvet, eğrinin inen bölümünden hemen sonra sıfıra ulaşamaz ve neredeyse sabit kalır. Bu davranışın ana nedeni, vurucu ile numune arasındaki sürtünmeden kaynaklıdır.

Şekil 6.12b; geri sekme, nüfuz etme ve delinme olarak adlandırdığımız üç ana hasar için hız geçmişi hakkında bilgi verir. İlk temastan sonra hız değerleri düşer. Geri sekme durumunda vurucunun yukarı yönde hareketini gösteren hız değeri, negatiftir. Numunenin maksimum yer değiştirme değerine kadar vurucu hızı pozitifdir. Maksimum yer değiştirme sonrasında test numunesi, vurucuyu yukarı yönde iter. Eğer penetrasyon durumu gerçekleşir ise, vurucu hızı negatif bir değer alabilir. Bu durum, az miktarda geri sekme olduğunu gösterir. Delinme

durumunda hız sıfır değerine ulaşamaz. Belirli bir değerden sonra delinme hareketi, sürtünme nedeniyle doğrusal olarak azalır. Hız-zaman eğrisinin lineer kısmının başlangıç noktası, delinme hasarının başlangıcı olarak alınabilir.

Yer değiştirme-zaman eğrileri Şekil 6.12c' de gösterilmiştir. Geri sekme eğrisinde yer değiştirme miktarı, maksimum değerden sonra azalır ve numunenin başlangıç konumuna ulaştığını gösteren sıfır değerine ulaşır. Çünkü vurucunun hızı bu noktada sıfıra ulaşır. Ancak, delinme durumunda hız sıfır değerine ulaşamaz.

Zamana karşı absorbe edilen enerji değerleri Şekil 6.12d' de verilmiştir. Geri sekme delinme ve nüfuz etme hasar durumları için absorbe edilen enerji değerleri sırasıyla artar. Geri sekme durumu için, absorbe edilen enerji zamanla azalır ve sabit bir değere ulaşır. Bu azalmanın nedeni, numune tarafından vurucunun itilmesi için absorbe edilen enerjinin bir kısmının harcamasından dolayıdır. Delinmiş numune, tüm darbe enerjisini absorbe eder. Zaman arttıkça, absorbe edilen enerji delinme hasar durumunda artar. Hesaplanan absorbe edilen enerji, delme işleminden sonra numune ve vurucu arasındaki sürtünme enerjisini de içerir. Delinme durumunda absorbe edilen enerjiyi bulmak için sürtünmeye harcanan enerjinin toplam absorbe edilen enerjiden çıkarılması gerekir (İçten, 2006).

Darbe testlerinde elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerin altında kalan alan absorbe edilen enerjiyi verir. Darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji arasındaki ilişki enerji profili diyagramı ile gösterilir. Saplanma veya delinme gibi hasarların darbe enerjisi ve absorbe edilen enerjinin karşılaştırılması yapılabilir. Enerji diyagramından elde edilen grafikler kullanılarak elyaf konfigürasyonu, plaka kalınlığı, kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve hasarlı numune şekilleri birbirleri ile karşılaştırılarak kompozit numuneler yeniden tasarlanabilir (Liu ve ark., 2000).

Kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesinde darbe enerjisi (E_i) ve absorbe edilen enerji (E_a) değerleri kullanılır. Darbe enerjisi (E_i), darbe olayı esnasında vurucunun sahip olduğu enerjinin numuneye aktarılması olarak tanımlanabilir. Darbe enerjisi vurucunun istenilen yüksekliğe çıkarılmasıyla elde edilir. Potansiyel enerji denklemi üzerinden darbe enerjisi, Denklem 6.10 kullanılarak hesaplanabilir.

$$E_i = mgh + mgd_{max} \quad (6.10)$$

Burada, m vurucu kütlesi, h vurucunun numuneden yüksekliği ve d_{max} darbeden sonra numunenin maksimum yer değiştirmesidir. Darbe olayı esnasında vurucunun sahip olduğu bu darbe enerjisi, vurucunun serbest bırakılarak düşürülmesiyle kinetik enerjiye dönüşür ve bu denklem, aşağıda verilen Denklem 6.11' deki gibi ifade edilebilir.

$$mgh + mgd_{max} = \frac{1}{2}mV^2 \quad (6.11)$$

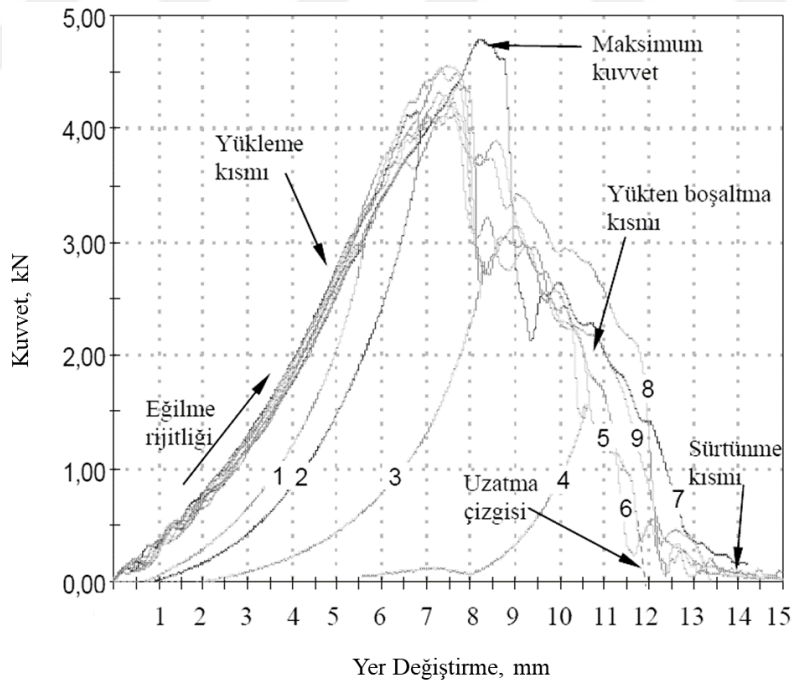
Burada, V vurucunun sahip olduğu hızdır. Vurucu ile numunenin temasından önce numunedeki yer değıştirme sıfır olduğu için ($d_{max} = 0$) Denklem 6.12' deki gibi ifade edilebilir.

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2 \quad (6.12)$$

Denklem 6.12 'e göre, vurucu ile numunenin temasından hemen önceki hızı Denklem 6.13 'deki gibi ifade edebiliriz.

$$V = \sqrt{2gh} \quad (6.13)$$

Denklem 6.13'de ifade edilen bu hız ifadesi, vurucunun numuneye çarpma anındaki sahip olmuş olduğu teorik hızdır.



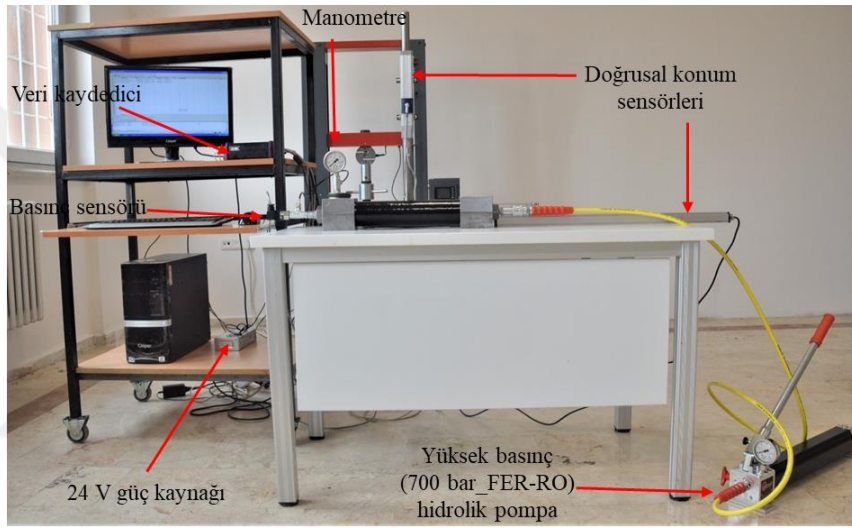
Şekil 6.13 Artan darbe enerjisi altında oluşan kuvvet-yer değıştirme eğrileri (Sayer, 2009)

Artan darbe enerjisi altında oluşan kuvvet-yer değıştirme eğrileri Şekil 6.13' te gösterilmiştir. Vurucu numuneye saplanmadığı ya da numuneyi delmediği darbe testlerinde elde edilen kuvvet- yer değıştirme eğrisinin altında kalan alan absorbe edilen enerji verir.

Vurucunun numuneyi delmesi durumunda vurucu ve numune arasındaki sürtünmeden dolayı meydana gelen yer değiştirme değeri, yatayda çok az devam ederek sifıra yaklaşır. Numune tarafından absorbe edilen gerçek enerji değeri, sürtünme için harcanan enerjinin çıkarılması ile bulunur.

6.11. Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda İç Basınç Testleri

Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç testleri, ASTM D1599 standardına göre Şekil 6.14' te gösterilen test düzeneği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.14 Kapalı-uçlu iç basınç test düzeneği

İç basınç testlerinde borularda hidrolik el pompası kullanılarak, düşük sıkıştırılabilirlik özelliğine sahip akışkan olan hidrolik yağ ile iç basınç oluşturulmuştur. ASTM D1599' a göre, test numuneleri üzerinde yapılan iç basınç testleri sonucunda oluşacak patlatma sonuç hasarı 60-70 saniye arasında gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu nedenle, sonuç hasarın bu zaman aralığında meydana gelmesi için süre ve zaman tutularak dikkat ve özen gösterilmiştir. Daha sonra, borular üzerinde basınç artışının orantılı bir şekilde ve sonuç hasarının 60-70 saniye aralığında oluşması için test esnasında basınç artışı manometreden süre tutularak takip edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, oluşan iç basınç DT80 marka veri kaydedici kullanılarak basınç sensörü yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Kapalı-uçlu iç basınç altında boruların hem çapında hem de boyun da eş zamanlı şekil değişimi olmaktadır. Bu şekil değişimleri, Novotechnik marka iki adet lineer konum sensörleri kullanılarak ölçülmüştür. Borunun çapındaki değişimler, borunun orta kısmından ve

yüzeyinden tespit edilmiştir. Boruların çapında ve boyunda meydana gelen şekil değişimleri DT80 marka veri toplayıcısına aktarılarak teğetsel gerilme-çaptaki değişim ve teğetsel gerilme-boydaki uzama grafikleri çizilmiştir.

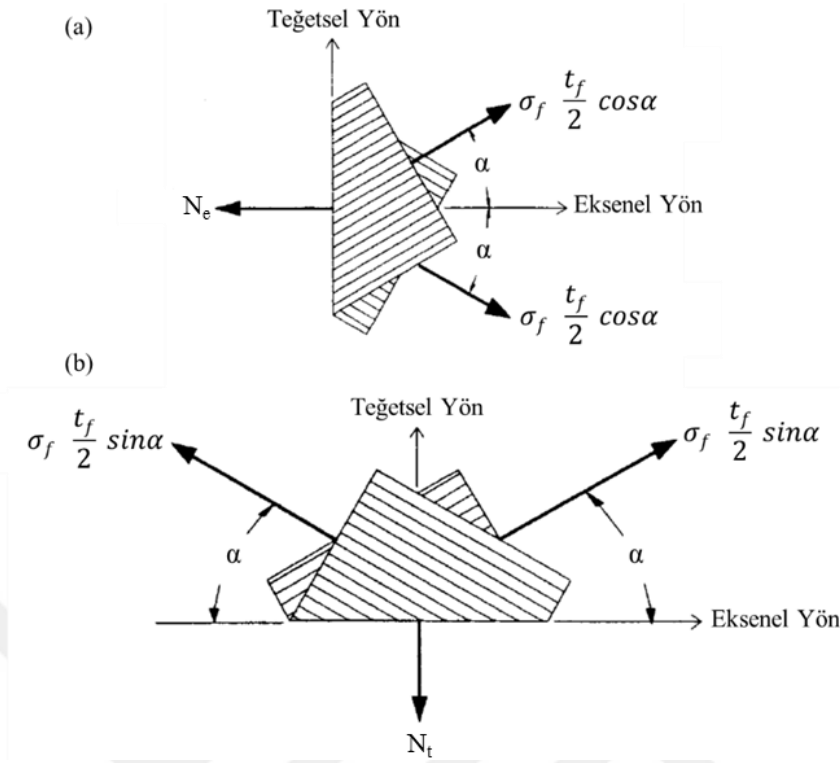
İç basınç testi, yüksek çözünürlüklü bir kamera ile patlama sonuç hasarı çıkana kadar kayıt altına alınmıştır. Kamera yardımıyla test numunelerinde basınç artışıyla duyulan hasar sesleri kayıt edilmiştir. Basınca göre çaptaki değişim ve boydaki uzama grafikleri ve kamera kayıtları eş zamanlı yorumlanarak; hasar başlangıcı, gelişimi ve sonuç hasarın ortaya çıktığı teğetsel ve eksenel gerilme değerleri tespit edilmiştir.

6.12. Kapalı-Uçlu Basınçlı Kaplarda Ağ (Netting) Analizi

Denklem 6.6' da verildiği gibi, kapalı-uçlu basınçlı bir kabın silindirik bölümünde teğetsel gerilme eksenel gerilmenin iki katıdır. İzotropik bir malzemeden üretilen bir basınçlı kabın eksenel doğrultudaki malzeme özelliklerinin tamamı etkin olarak kullanılamaz. Basınçlı kapların en iyi teğetsel ve eksenel dayanım değerlerini optimize etmek gereklidir. Bu problem, filaman sarma yöntemi ile üretilen kompozit basınçlı kaplar üzerinde çalışılabilir. Bir kompozit basınçlı kap, eksenel doğrultuda daha yüksek gerilime dayanacak şekilde teğetsel yönde yeterli elyaf sarımı yapılarak kompozit basınçlı kaplar güçlendirilebilir. Ağ analiz yöntemi, filaman sarma kompozit basınçlı kapların tasarlanmasında kullanılan basit bir analitik tekniktir. Ağ analizi; kompozit basınçlı kapların tabaka sayısı, iç basınç, malzeme özellikleri ve işlem parametreleri ile ortaya çıkan gerilmeler arasındaki ilişkiyi, aşağıdaki kabulleri varsayarak kurar (Fukunaga ve Uemura, 1983):

1. Tüm yükler elyaflar tarafından karşılanır
2. Matris malzemesinden herhangi bir dayanım katkısı ve elyaflar arasındaki etkileşimleri ihmal eder
3. Yük altında elyaflar homojen olarak gerilir
4. Matris malzemesinin tek işlevi, elyafların geometrik konumunu korumaktır

Elyaf çökme gerilmesi altında iken, kompoziti oluşturan tabakalarda kayma gerilmeleri meydana gelir. Elyafın taşıyabileceği maksimum çekme gerilmelerine kıyasla oluşan kayma gerilmeleri düşük olduğu sürece ağ analizinde önemli bir hataya neden olmaz. Ayrıca, ağ analizi yönteminde kompozit basınçlı kaplarda bulunan metal ya da polimer iç astardan gelen yük paylaşım katkısının olmadığı varsayılmaktadır. Bu analiz; eğilme, kayma veya burkulma dayanım değerleri için eksenel ve teğetsel yönde optimum dayanım değer optimizasyonu için kullanılamaz (Mil-Hdbk, 1998).



Şekil 6.15 Kompozit basınçlı kaplarda iç basınç altında meydana gelen eksenel ve teğetsel yönde kuvvet dengesi (a) $\pm\alpha$ tek katmanlı helisel tabaka eksenel doğrultu, (b) $\pm\alpha$ tek katmanlı helisel tabaka teğetsel doğrultu (Mil-Hdbk, 1998)

Ağ analizinin temelinde, basınç altında bulunan bir kompozit basınçlı kaptaki eksenel ve teğetsel yönde (birim uzunluk başına düşen) kuvvet dengesi bulunmaktadır. Kompozit basınçlı kabın iç basıncı P , iç yarıçapı R , helisel filaman sarım açısı $\pm\alpha$, elyaf maksimum çekme gerilmesi σ_f ve kompozit sarım kalınlığı t_f 'dir. N_e birim uzunluktaki eksenel kuvvet ve N_t ise birim uzunluktaki teğetsel kuvvettir. Kompozit tabakanın sarım açısı elyafın eksenel yöndeki yüklenme durumu Şekil 6.15a' da gösterilirken, helisel filaman sarma elyafın teğetsel yöndeki yüklenme durumu ise Şekil 6.15b' de gösterilmiştir.

Eksenel doğrultudaki kuvvetler Denklem 6.14' te verilmiştir.

$$\Sigma F_{N_e} = 0; \quad N_e = \frac{PR}{2} = \sigma_f t_f \cos^2 \alpha \quad (6.14)$$

İç basınç altında oluşan eksenel gerilmeyi taşıyabilmesi için gerekli olan helisel elyaf kalınlığı Denklem 6.15' te verilmiştir.

$$t_f = \frac{PR}{2\sigma_f \cos^2 \alpha} \quad (6.15)$$

Teğetsel doğrultudaki kuvvetler Denklem 6.16 verilmiştir:

$$\Sigma F_{N_t} = 0; \quad N_t = PR = \sigma_f t_f \sin^2 \alpha \quad (6.16)$$

İç basınç altında oluşan teğetsel gerilmeyi taşıyabilmesi için gerekli olan helisel elyaf kalınlığı Denklem 6.17' de verilmiştir:

$$t_f = \frac{PR}{\sigma_f \sin^2 \alpha} \quad (6.17)$$

Burada, hem eksenel hem de teğetsel yükü karşılayabilecek helisel elyaf kalınlıkları birbirlerine eşit olduğuna göre Denklem 6.18 ve 6.19:

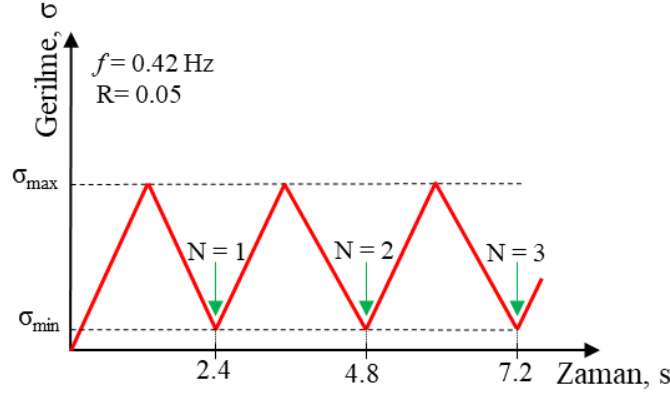
$$t_f = \frac{PR}{\sigma_f \sin^2 \alpha} = \frac{PR}{2\sigma_f \cos^2 \alpha} \quad (6.18)$$

$$\frac{\sin^2 \alpha}{\cos^2 \alpha} = \tan^2 \alpha = 2 \quad (6.19)$$

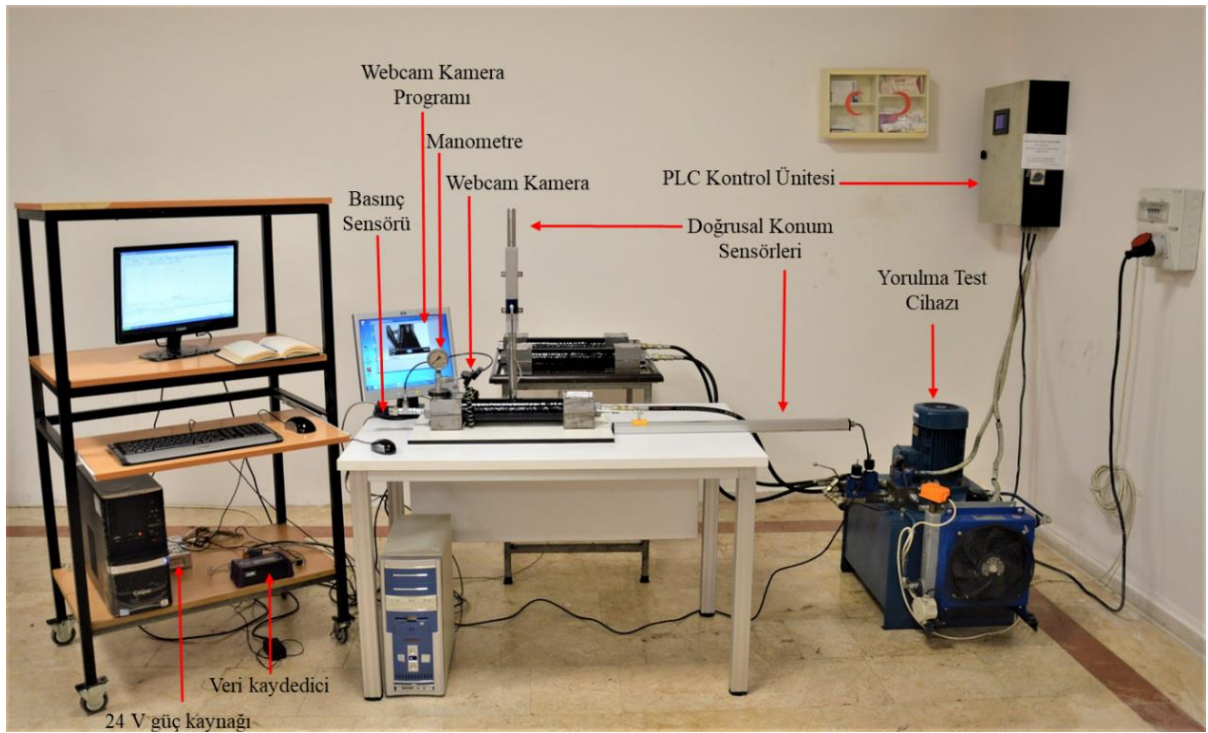
Burada, trigonometrik dönüşüm çözüldüğünde α açısı $\pm 54.73561032^\circ$ bulunur. Buradaki açı kompozit basınçlı kabın üretilmesi için helisel tabakanın sahip olması gereken sarım açısıdır. Bu açı pratikte 55° alınır. Ağ analizinden elde edilen bu açı, kompozit basınçlı kapların en iyi teğetsel ve eksenel dayanım değer optimizasyonunu verir. Başka bir deyişle, izotropik metal kompozit basınçlı kaplarda oluşan teğetsel ve eksenel gerilme değerlerini karşılayabilen açı değeri, optimum sarım açısı olarak isimlendirilebilir. 55° ' lik helisel sarım açısı sadece kapalı-uçlu yani tüp şeklindeki silindirik kaplar için geçerlidir. Bu nedenle, tez çalışması için kompozit borular $\pm 55^\circ$ elyaf sarım açısı kullanılarak üretilmiştir.

6.13. Kapalı-Uçlu Kompozit Borularda Değişken İç Basınç Altında Yorulma Testleri

Grafen takviyeli ve takviyesiz, düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız $[\pm 55^\circ]_4$ bazalt/epoksi boruların yorulma ömürleri ASTM D2992 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre değişken iç basınç etkisi altında yorulma testleri, 25 çevrim/dk (0.42 Hz) ve $R=0.05$ ($\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) gerilme oranında gerçekleştirilmiştir. Yorulma testinde uygulanan çevrimsel gerilme-zaman eğrisi Şekil 6.16' da verilmiştir.



Şekil 6.16 Değişken iç basınç altında gerçekleştirilen yorulma testi için çevrimsel gerilme–zaman eğrisi



Şekil 6.17 Kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test düzeneği

Grafen takviyeli ve takviyesiz boruların iç basınç testlerinde elde edilen terleme başlangıç hasarının ortaya çıktığı maksimum teğetsel gerilmenin %60, %50, %40, %35 ve %30' oranındaki yorulma yükleme değerlerinde değişken tekrarlı iç basınç uygulanarak kapalı-uçlu koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için yorulma testleri 3 tekrar yapılarak aritmetik ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanmıştır. Boruların terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının meydana geldiği çevrim sayıları yorulma ömrü olarak alınmıştır. Boruların kapalı-uçlu yorulma test düzeneği Şekil 6.17' de verilmiştir.

Yorulma test düzeneği, 250 bar basınç verebilen, 8 l/dk debi kapasiteli dişli pompasına ve 60 l tank hacmine sahip bir hidrolik güç ünitesinden oluşmaktadır. Pompa çıkışında alt ve

üst basınçları mekanik olarak ayarlayabileceğimiz basınç emniyet valfleri vardır. PLC kontrollü selenoid kumandalı bir yön kontrol valfi konulmuştur. Valf çıkışına sistemdeki yağ basıncını algılayan SIEMENS marka bir basınç sensörüne sahiptir. Ayrıca sinüzoidal gerilme değişimini ayrı ayrı ayarlanabilmesi için gidiş ve dönüş hatlarına birer kısma valfi konulmuştur. Yorulma test düzeneği, aynı anda üç adet numuneyi test edebilmektedir. İç basınç test aparatı, çabuk bağlantılı elemanları ve 400 bar 'a dayanıklı esnek hidrolik hortumlar ile yorulma test düzeneğine bağlanmıştır. Hidrolik akışkan olarak 32 numara hidrolik yağı kullanılmıştır. Yorulma testleri uzun zaman aldığı için yağ sıcaklığını sabit tutmak amacıyla soğutma ünitesine sahiptir. PLC kontrol ünitesi; analog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrana sahiptir.

Yorulma test düzeneğinin çalışma prensibi özetlenir ise; test numunesi hattındaki basınç, ayarlanan üst basınç değerine ulaştığı anda basınç sensöründen aldığı sinyal ile PLC kontrol ünitesi, selenoid valfi kumanda ederek basınçlı yağın tanka tekrar dönmesini sağlar. Daha sonra, girilen frekans değerini sağlayacak bir süre sonunda, valfi tekrar eski konumuna alır. Bu çevrim sistem hattına bağlanan numunelerde hasara uğrayana kadar devam eder. PLC üzerinde bulunan dijital ekran, hattaki yağ basıncını çevrim sayısı olarak sürekli kaydeder. PLC ünitesinin basınç kalibrasyonu, devreye takılı basınç sensörü yardımıyla gerçekleştirilir.

6.14. Hasarlı Kompozit Boruların Hasar Bölgelerinin Görüntülenmesi

Kapalı-uçlu iç basınç altında borular üzerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testi, iç basınç testi ve değişken iç basınç altında yorulma testleri sonucunda oluşan hasarların mikro ve makro incelemeleri taramalı elektron ve stereo mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı darbe, iç basınç ve yorulma testleri sonucunda borularda oluşan hasarlı bölgeler, Şekil 6.18a'da görülen METKON marka kesme cihazı ile kompozitlere uygun kesme diski kullanılarak alınmıştır.

Borulardan alınan hasarlı bölgelerin daha iyi incelenebilmesi için hasar kesit yüzeyleri üzerinde Şekil 6.18b'de görülen METKON marka zımparalama cihazında 1000 mesh SiC zımpara kâğıdı kullanarak zımparalama işlemi yapılmıştır. Daha sonra hasar yüzeyleri, 1µ' luk elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan hasar yüzeyleri saf su ile yıkandıktan sonra alkol ile temizlenmiştir. Daha sonra, hasar bölgesi fön makinası yardımıyla kurutulmuştur.

Boruların üzerinden alınan numuneler eğri bir yüzeye sahip olduğu için çatlak ve delaminasyon gibi hasarlar net görüntülenmeyebilir. Bu nedenle, boru eksenine dik kesitte olu-



Şekil 6.18 Borularda oluşan hasarların incelenmesi için kullanılan; (a) kesme cihazı ve kesme diski, (b) zımparalama ve parlatma cihazı c) vision marka SX80 stereo mikroskop ve yazılım

şan hasar bölgeleri, iki plaka arasında ilave bir hasar oluşturmadan gerdirilerek mikroskop altında incelenmiştir. Boruların eksenine dik doğrultudaki kesitlerde oluşan mikro hasarlar Şekil 6.18c 'de görülen Visioneng marka SX80 model stereo mikroskop ve Pixel-fox yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Darbe etkisi ile oluşan delaminasyon hasarları oldukça geniş bir yüzeye yayıldığından dolayı hasar görüntüleri; darbe merkezinin solunu, merkezini ve sağını temsil edilecek şekilde sırasıyla çekilerek delaminasyon hasarının tamamı görüntülenmiştir. Düşük hızlı darbe, patlatma ve yorulma testi sonucunda borularda oluşan hasarlar ile ilgili sonuçlar Bölüm 7' de verilmiştir.

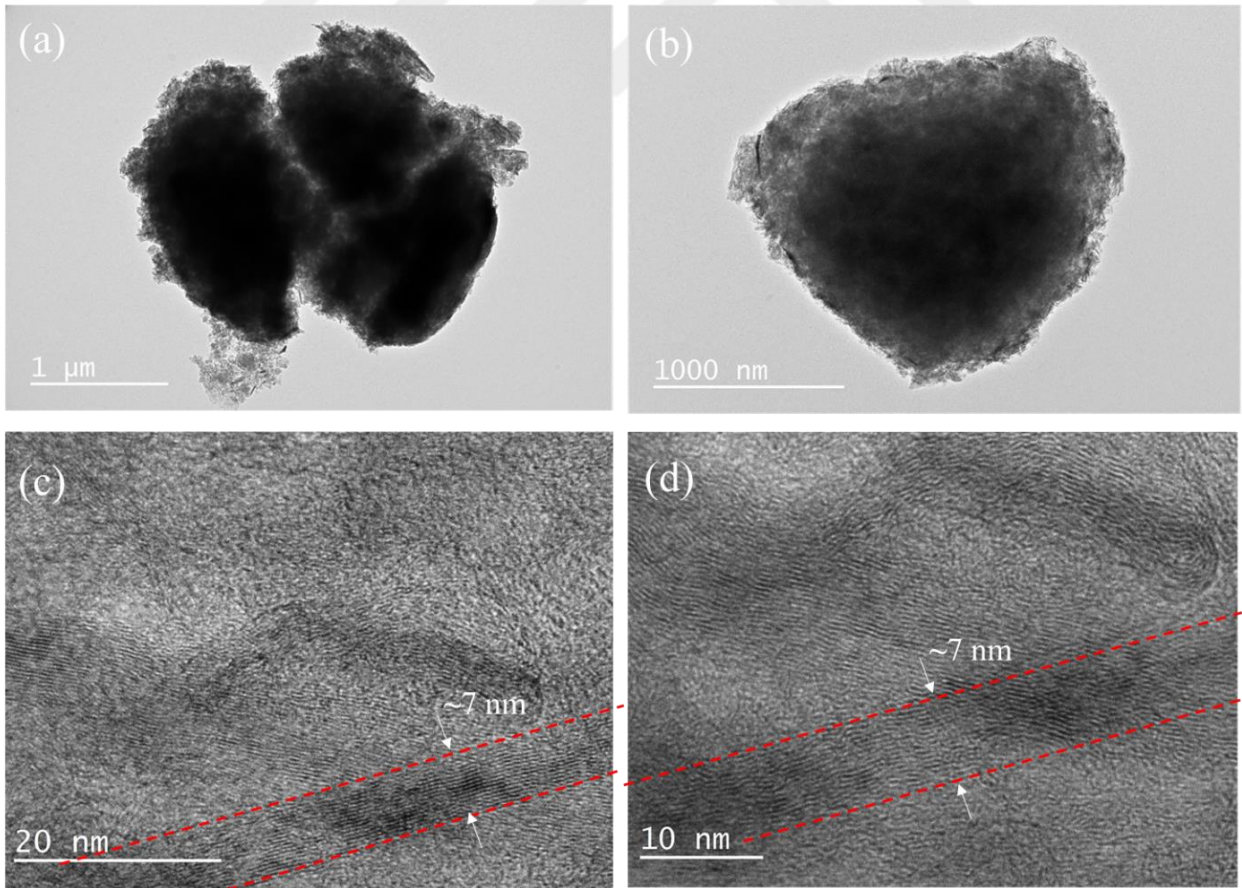
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının birinci aşamasında grafen takviyesinin saf epoksinin mekanik özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla; saf epoksi ve grafen/epoksi nanokompozitlerin mekanik testleri yapılarak sonuçları açıklanmıştır.

İkinci aşamada ise, kapalı-uçlu koşullar altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların düşük hızlı darbe, iç basınç altında patlama ve değişken iç basınç altında yorulma davranışları ve buna bağlı mekanik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

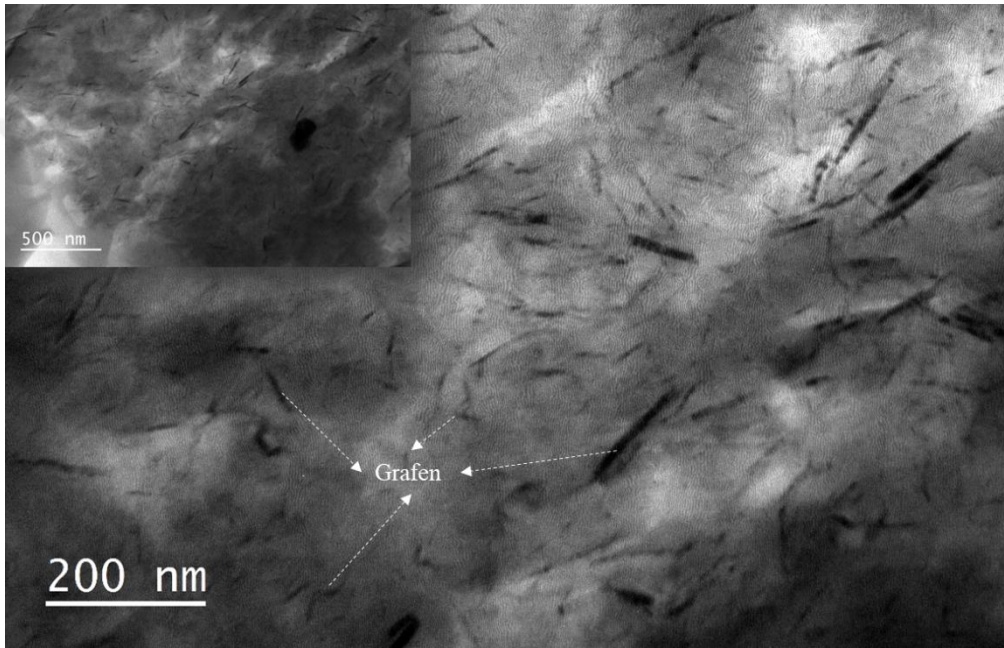
7.1. Grafen/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Test Sonuçları

Sert ve kırılkan olan saf epoksi, kırılmaya neden olan çatlaklara karşı direnç gösteremediğinden dolayı mühendislik uygulamalarında kullanımları kısıtlıdır. Saf epoksinin sahip olduğu sert ve kırılkan yapı nedeniyle epoksi içerisinde çatlak oluşumu ve yayılması büyük bir endişe kaynağıdır. Ancak, saf epoksi özellikle nano takviyeler ile modifiye edildiğin-



Şekil 7.1 Grafenin TEM görüntüleri; (a ve b) çeşitli boyutlarda grafenler, (c ve d) grafen tabakaları

de çatlak oluşumunu ve gelişimini önleyecek yeteneği kazanabilir. Bu nedenle çalışmada kullanılan saf epoksi, grafen takviyesi ile modifiye edilerek epoksinin mekanik özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Grafen takviye oranının epoksi reçinenin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için yapılan literatür çalışmaları da göz önüne alınarak ağırlıkça %0.0, %0.125, %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.0 grafen, epoksi matrise takviye edilmiştir. Grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matris üzerinde çekme, eğilme ve V-çentikli Charpy darbe testleri yapılmıştır. Daha sonra, grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisinin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

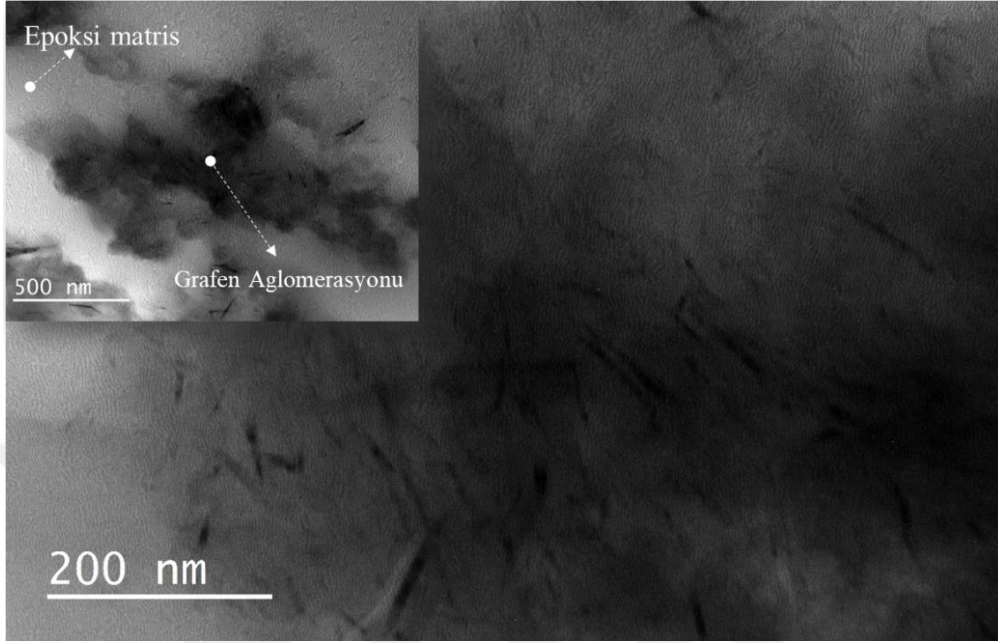


Şekil 7.2 Ağırlıkça %0.25 grafen takviyeli epoksi matriste grafen dağılımının TEM görüntüsü

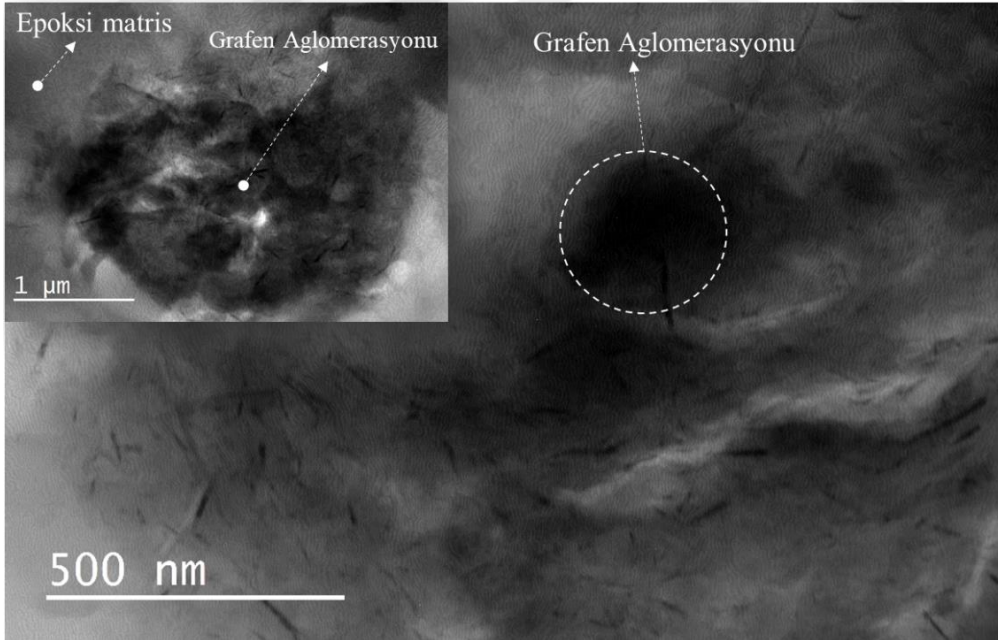
Şekil 7.1' de çeşitli boyutlarda grafen ve tabakalarının TEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.1a ve 7.1b' de görüldüğü gibi grafen yüzeyinin, referansta da (Rafiee ve ark., 2009) belirtildiği gibi, düz ve pürüzlü olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.1c ve 7.1d' de grafen tabakalarının kalınlığı yaklaşık 7 nm olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça %0.125, %0.5 ve %1 grafen takviyeli epoksi matris içerisinde grafen dağılımı hakkında fikir veren TEM görüntüleri Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4 sırasıyla verilmiştir.

Grafenin, ağırlıkça %0.5 takviye oranına kadar epoksi matris içerisinde homojen olarak dağıldığı literatür çalışmalarından bilinmektedir. Şekil 7.2, 7.3 ve 7.4' te verilen TEM görüntüleri bu bilgiyi doğrular niteliktedir. Şekil 7.3' te görüldüğü gibi grafen aglomerasyonunun kısmi olarak başladığı söylenebilir. Şekil 7.4' te ağırlıkça %1 grafen

takviyeli epoksi matriste mikron boyutta grafen aglomerasyonu tespit edildiğinden dolayı grafen dağılımının iyi olmadığı söylenebilir.

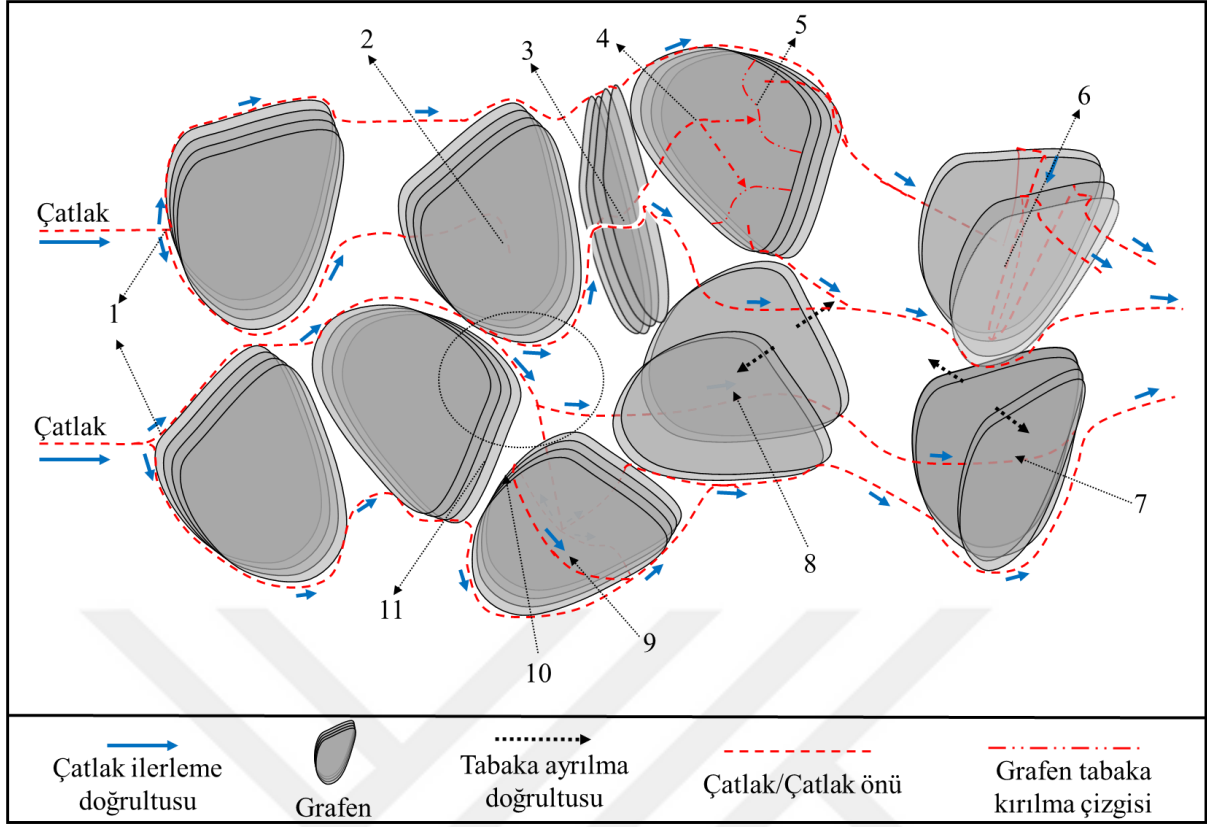


Şekil 7.3 Ağırlıkça %0.5 grafen takviyeli epoksi matriste grafen dağılımının TEM görüntüsü



Şekil 7.4 Ağırlıkça %1 grafen takviyeli epoksi matriste grafen dağılımının TEM görüntüsü

Grafen takviyeli epoksi matriste meydana gelen bir çatlakın grafen ile karşılaşmasında gerçekleşen etkileşimler Şekil 7.5' te şematik olarak sunulmuştur. Şekil 7.5-1' de; çatlak, grafenin kenarına saplanır ve çatlak ilerlemesi grafenin nanometre seviyesindeki tabaka kalınlı-



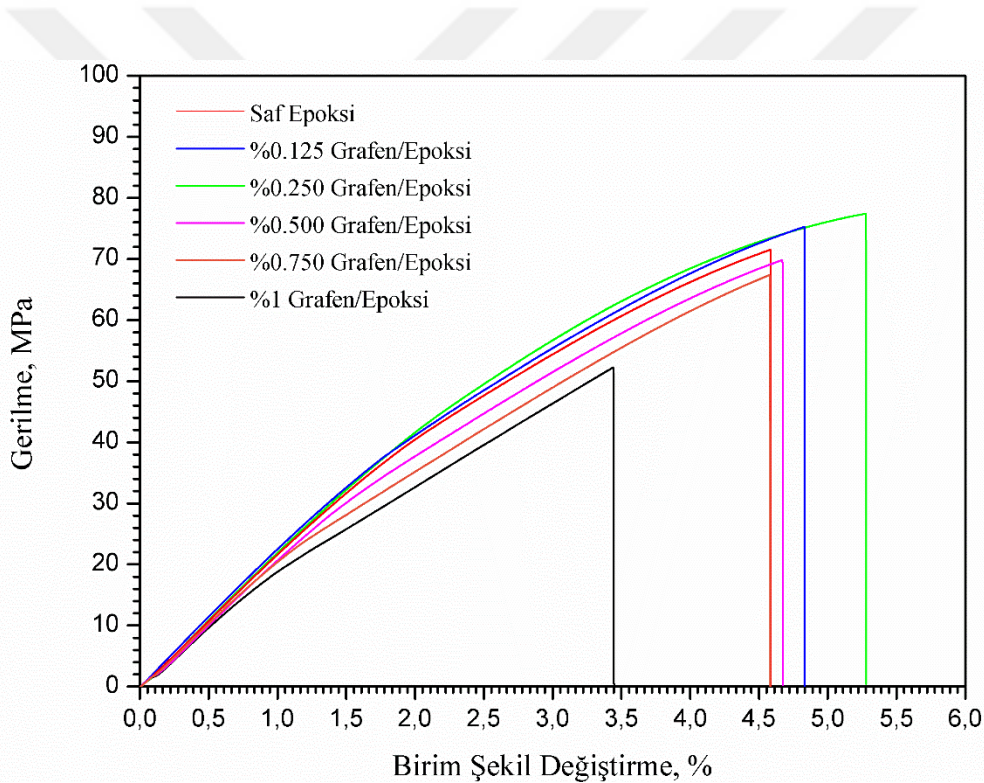
Şekil 7.5 Epoksi matriste grafen/çatlak etkileşiminin şematik gösterimi; (1) çatlak saplanması ve çatallaşma, (2) çatlak ucu körleme, (3) grafen kırılması, (4) çatlak sapması, (5) grafen tabaka kırılması, (6) çatlağın grafen tabakalarının arasına nüfuz etmesi (penetrasyon), (7) grafen tabakalarının ayrılması, (8) çatlağın grafen tabakalarının arasından geçmesi, (9) grafenin genişliği boyunca çatlak ilerlemesi, (10) grafenin kalınlığı boyunca çatlak ilerlemesi, (11) çatlak dallanması

ği boyunca iki kola ayrılarak devam edebilir. Şekil 7.5-2' de; enerjisi azalan bir çatlak grafen tarafından durdurulabilir. Şekil 7.5-3' te; yüksek enerjiye sahip bir çatlak grafen ile karşılaşırsa grafen tabakalarının tamamını kırarak ilerlemesine devam edebilir. Şekil 7.5-4' te; grafen ile karşılaşan bir çatlak grafen yüzeyinden sapması sonucu ilerlemesine devam edebilir. Şekil 7.5-5' te; grafen yüzeyinden ilerleyen bir çatlak grafen tabakasının kısmi kırılması sonucu farklı yollardan ilerlemesine devam edebilir. Şekil 7.5-6; çatlak ilerleme yönüne dik olarak yönlenmiş grafen yüzeyine çatlak saplanır, grafen yüzeyi boyunca ilerler ve grafen tabakalarının arasına girebilir (çatlağın grafen tabakalarının arasına penetrasyonu). Daha sonra çatlak tekrardan tabakalar arasından çıkarak kırılma yüzeyinde bir çukur (dimpled) oluşturabilir. Şekil 7.5-7' de; çatlak grafen tabakalarının arasına girer ve tabakaları birbirinden ayırabilir. Şekil 7.5-8' de; çatlak, grafen tabakalarının arasından geçerek grafen tabakalarını tamamen ayırabilir (exfoliation) ve ilerlemesine devam eder. Şekil 7.5-9; çatlak, grafenin nano boyuttaki kalınlık doğrultusu boyunca ilerleyebilir. Şekil 7.5-10; çatlak, grafenin mikro boyuttaki en/boy doğrultularında ilerleyebilir. Şekil 7.5-9 ve 7.5-10' un meydana gelmesi ile kırılma yüzeyinde

farklı yükseklikte çatlak düzlemleri oluşabilir. Şekil 7.5-11; eğer ana bir çatlak, çatlak ilerleme doğrultusuna göre farklı konumlarda bulunan grafenler ile karşılaşır ise çatlak alt çatlaklara ayrılarak çatlak dallanması meydana gelebilir (Rafiee ve ark., 2010; Chandrasekaran ve ark., 2014; Wang ve ark., 2016; Li ve ark., 2018).

Saf epoksi ve grafen/epoksi numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme, eğilme ve darbe testleri sonuçları sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

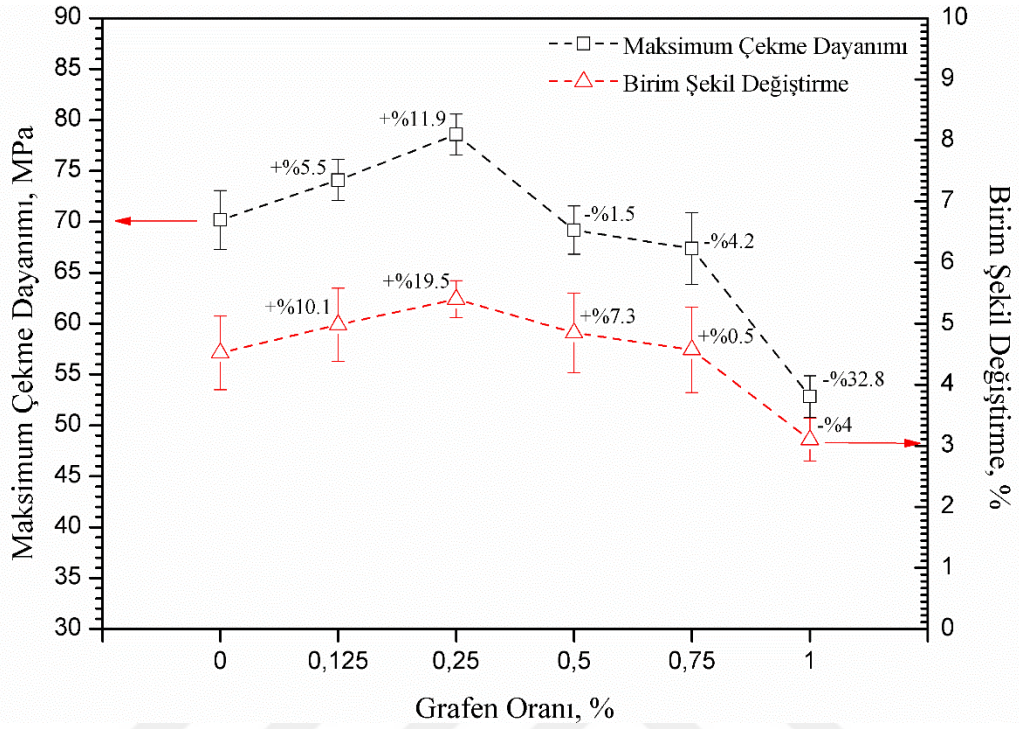
Saf epoksi ve grafen/epoksi nanokompozit numunelerin çekme, üç nokta eğilme ve V-çentikli Charpy darbe test sonuçları Şekil 7.6, 7.10 ve 7.13' de sırasıyla verilmiştir. Grafen takviye oranlarına göre maksimum çekme gerilmesi, birim şekil değiştirme ve elastisite modülündeki değişimler Şekil 7.7 ve 7.8' de sırasıyla gösterilmiştir. Grafen takviye oranlarına göre eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülündeki değişimler Şekil 7.11' de verilmiştir.



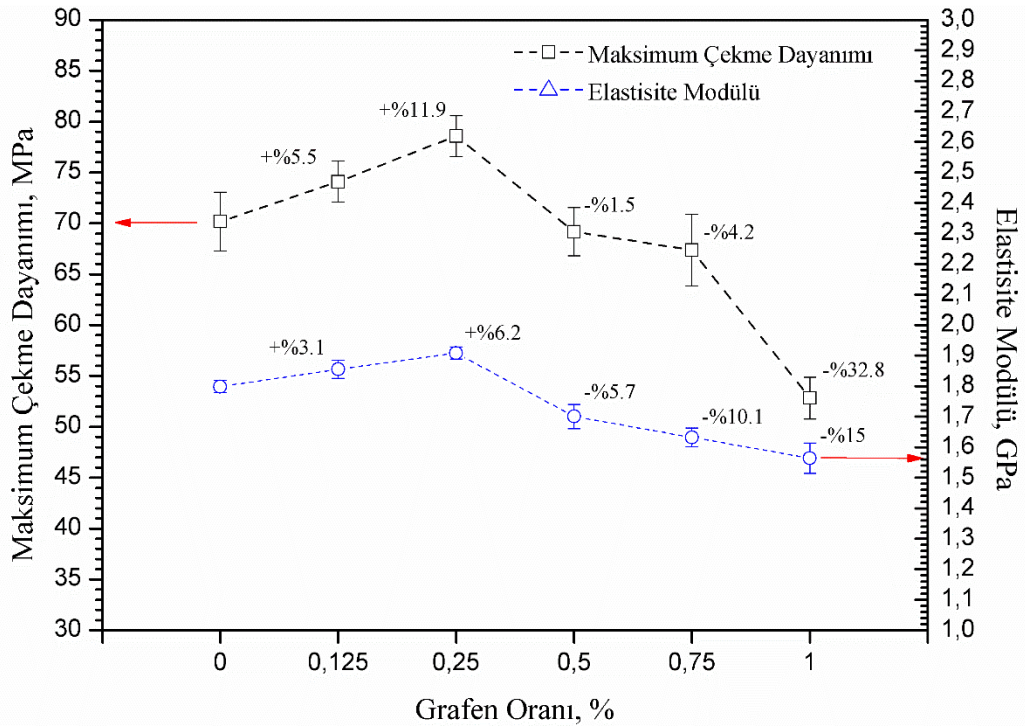
Şekil 7.6 Grafen/epoksi nanokompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri

Çekme ve eğilme elastisite modülleri, artan grafen takviye oranı ile artar. Chatterjee ve ark., grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme elastisite modül değerlerinin ağırlıkça %1 takviye oranına kadar düzenli olarak arttığını rapor ettiler (Chatterjee ve ark., 2012a; Chatterjee ve ark., 2012b). Yapılan eğilme testleri sonucunda bu çalışma ile paralel sonuçlar bulundu. Ağırlıkça % grafen oranı arttıkça, grafen/epoksi nanokompozitinin eğilme elastisite modülü de düzenli olarak arttı. Şekil 7.9' da grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisin

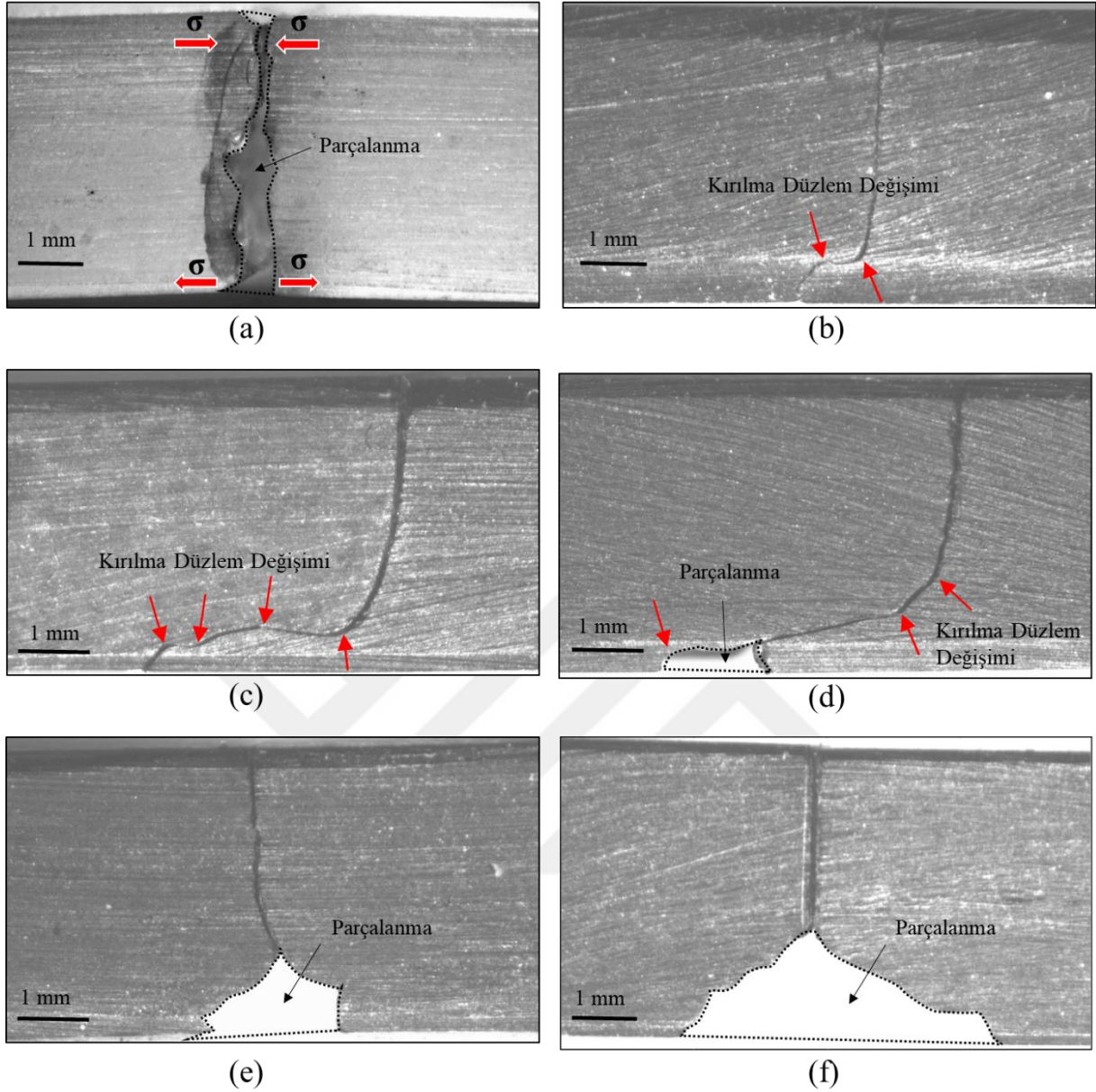
eğilme numunesinin kalınlığı boyunca kırılma deseni verilmiştir. Eğilme yükü altında saf epoksi de meydana gelen gevrek kırılma karakteristiği Şekil 7.9a’ da verilmiştir. Şekil 7.9b, Şe-



Şekil 7.7 Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin takviye oranlarına göre maksimum çekme dayanım, birim şekil değiştirme değişimi ve % değişim oranları



Şekil 7.8 Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin takviye oranlarına göre maksimum çekme dayanım, elastisite modülü değişimi ve % değişim oranları

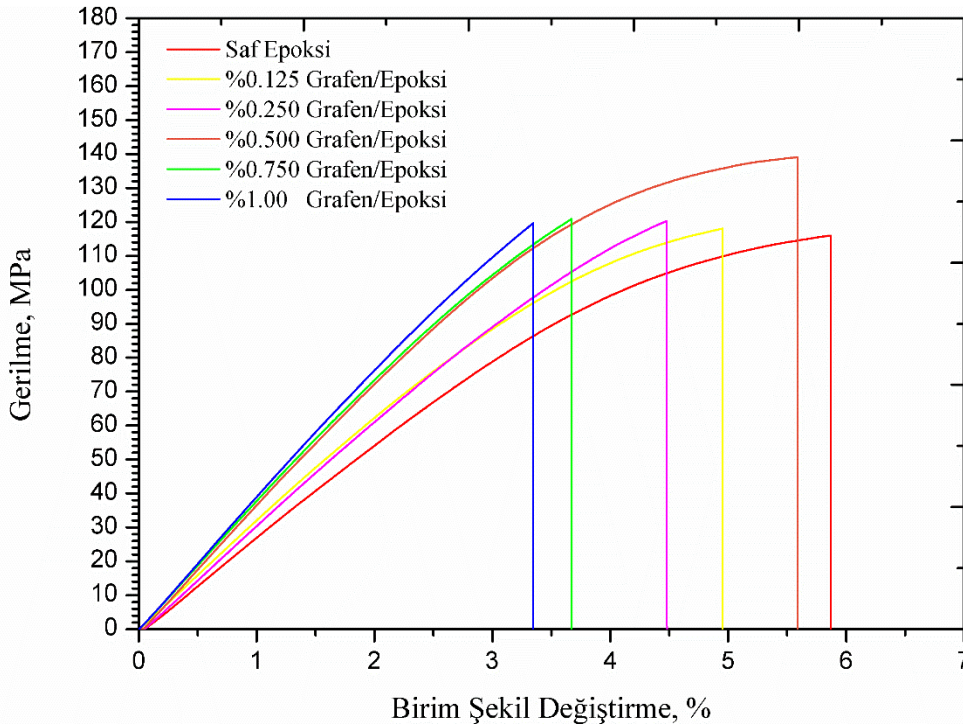


Şekil 7.9 Grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisin eğilme numunesinin kalınlığı boyunca kırılma düzlem değişiminin oluşturduğu desenin Stereo mikroskop görüntüleri; (a) saf epoksi, (b) %0.125 grafen/epoksi, (c) %0.25 grafen/epoksi, (d) %0.5 grafen/epoksi, (e) %0.75 grafen/epoksi, (f) %1 grafen/epoksi

Şekil 7.9c ve Şekil 7.9d’ de görüldüğü gibi, grafen/çatlak etkileşim mekanizmalarından biri veya birkaçı kırılma düzleminin değişimine neden olmuş olabilir. Ağırlıkça %0.125’ den %0.5’ e kadar olan takviye oranlarında kırılma düzlem değişim noktalarının gittikçe arttığı görülmüştür. Bunun neticesinde, eğilme dayanımında sürekli bir artış yaşanmıştır. Grafen/epoksi nanokompozitinin eğilme dayanımının ağırlıkça %0.5 grafen takviye oranına kadar artmasının nedeni, kırılmış numunenin kalınlık boyunca kesitinde tespit edilen kırılma düzlem değişimleri olarak yorumlanmıştır. Şekil 7.9e ve 7.9f’ de görüldüğü gibi matris içerisinde grafen aglomerasyonu neticesinde eğilme dayanımı azalmıştır. Grafen takviye oranının ağırlıkça %0.5

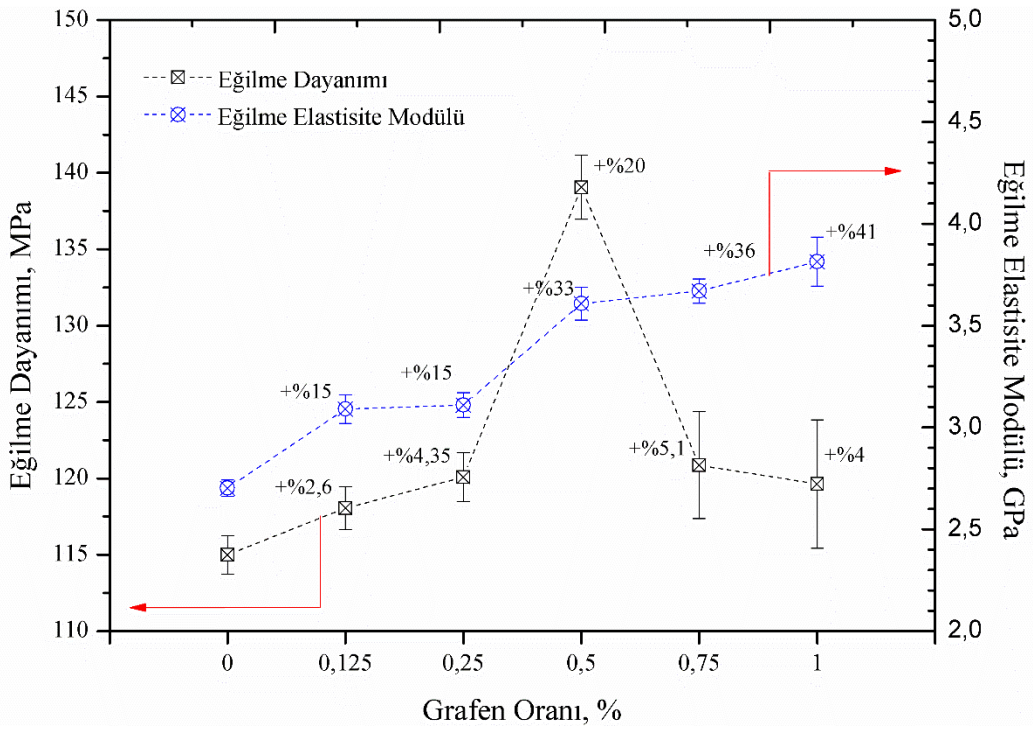
üzerine çıkması sonucunda oluşan grafen aglomerasyonun malzemeye gevrek kırılma etkisi oluşturduğu yorumlanmıştır.

Çekme elastisite modülündeki artış ise, ağırlıkça %0.25 grafen takviye oranına kadar etkisini göstermiştir. Ağırlıkça %0.25 grafen içeriğinin daha da artması ile epoksi matrisin çekme elastisite modülünde azalma tespit edilmiştir. Burada, grafen takviyesinin mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu test sonuçlarından açıkça görülmektedir. Nano takviye elemanlarının önemli özelliklerinden biri ise, arayüzey etkileşimlerini büyük ölçüde artıran yüksek yüzey alanıdır. Kullanılan grafen 800 g/m^2 yüzey alanına sahiptir ve günümüzde ticari olarak üretilen en yüksek yüzey alanına sahip grafen türüdür. Ek olarak, Şekil 7.12b' de görüldüğü üzere ağırlıkça %0.25 grafen/epoksi matrisinde çekme kırılma yüzeyinin pürüzlülüğü, ağırlıkça %0.5 ve %1 grafen/epoksi nanokompozit numunelerin çekme kırılma yüzeylerine göre daha ince olması, grafenin epoksi matriste homojen olarak dağıldığını ve kuvvetli arayüzey yapışması olduğunu ifade eder. Bu yorum grafenin epoksi matris içerisinde dağılımını gösteren TEM görüntüleri ile doğrulanabilir. Ek olarak, grafenin epoksi matriste homojen dağılması, Şekil 7.7' de %0.25 grafen/epoksi nanokompozit numunenin çekme dayanımındaki %10.9' luk artışın nedeni olarak gösterilebilir. Singh ve ark., nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen dağılmasının, epoksi reçinenin mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir (Singh ve ark., 2015).



Şekil 7.10 Üç nokta eğilme testi sonucunda elde edilen grafen/epoksi nanokompozitlerin gerilme-birim şekil değişirme grafikleri

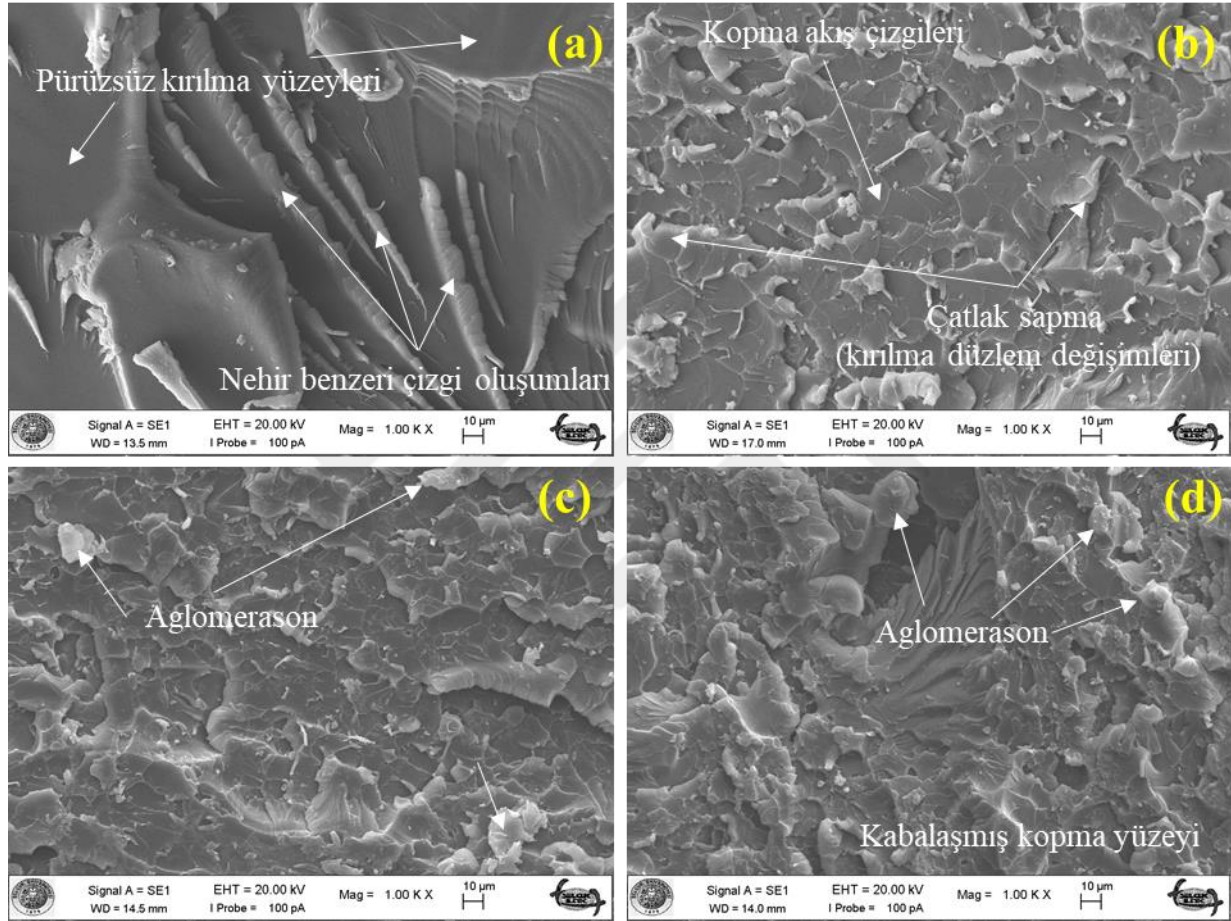
Şekil 7.6' da görüldüğü gibi saf epoksinin birim şekil değiştirme oranını ağırlıkça %0.25 grafen takviye oranına kadar artmış ancak bu orandan sonra azalmıştır. Epoksi matriste bulunan düşük grafen içeriğine (ağırlıkça %0.125 ve %0.25 grafen) göre, yüksek grafen içeriğinde (ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1 grafen) epoksi matris daha kırılğan hale gelmiştir. Yang ve ark., bunun muhtemel nedenlerini, yüksek grafen içeriğine sahip epoksi matriste aglomera olmuş grafenlerin mikrometre boyutunda dolgu maddesi gibi davranmaları ve epoksi zincirlerinin aglomera olmuş grafenin yüzeyine temasını sınırlayan grafen ve epoksi matris arasındaki oluşan mikro boşluklardan kaynaklanabileceğini ifade etmişlerdir (Yang ve ark., 2011).



Şekil 7.11 Grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin takviye oranlarına göre eğilme dayanım, eğilme elastisite modülü değişimi ve % değişim oranları

Grafen takviye oranının epoksi matrisin çekme ve eğilme dayanımları üzerinde etkisi farklıdır. Epoksi matrisin çekme dayanımı ağırlıkça %0.25 grafen takviye oranının artması ile düşerken eğilme dayanımı ağırlıkça %0.5 grafen takviye oranından sonra düşmektedir. Ağırlıkça %0.5 grafen takviyesi, saf epoksi' nin çekme mukavemetini %1.5 azaltırken eğilme dayanımını %20 artırdığı bulunmuştur. Çekme ve eğilme dayanımlarındaki bu fark, ağırlıkça %0.5 grafen takviyesinin epoksi matriste oluşturduğu aglomerasyondan kaynaklanmaktadır. Eğilme testi esnasında numunenin kesiti basma ve çekme yükleri etkisi altındadır. Basma yükü etkisi ile aglomera olmuş grafenler ile matris arasında arayüzey ayrılmasının engellendiği yorumlanabilir. Basma etkisi aglomerasyonun kötü etkisini sınırlandırarak eğilme dayanımında

daha büyük bir artış sağlamıştır. Bu oranlardan sonraki grafen takviyesinin, nanokompozitlerin mukavemetini sürekli olarak azalttığı ortaya çıkmıştır. Bu olayların nedenleri; grafen ve epoksi matrisi arasındaki zayıf arayüzey yapışması ve aglomerasyon kaynaklı grafen/matris arayüzeyinde meydana gelen çatlaklardır. Grafen/matris arayüzeyi, grafen ve matris arasındaki yük aktarımının büyüklüğünü kontrol eder. Yüksek grafen içeriğinde ortaya çıkan zayıf arayüzey, grafenin sahip olduğu çekme mukavemetine ulaşması için yeterli değildir.



Şekil 7.12 Grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisin çekme kopma yüzeyinin SEM görüntüleri; (a) saf epoksi, (b) %0.25 grafen/epoksi, (c) %0.5 grafen/epoksi, (d) %1 grafen/epoksi

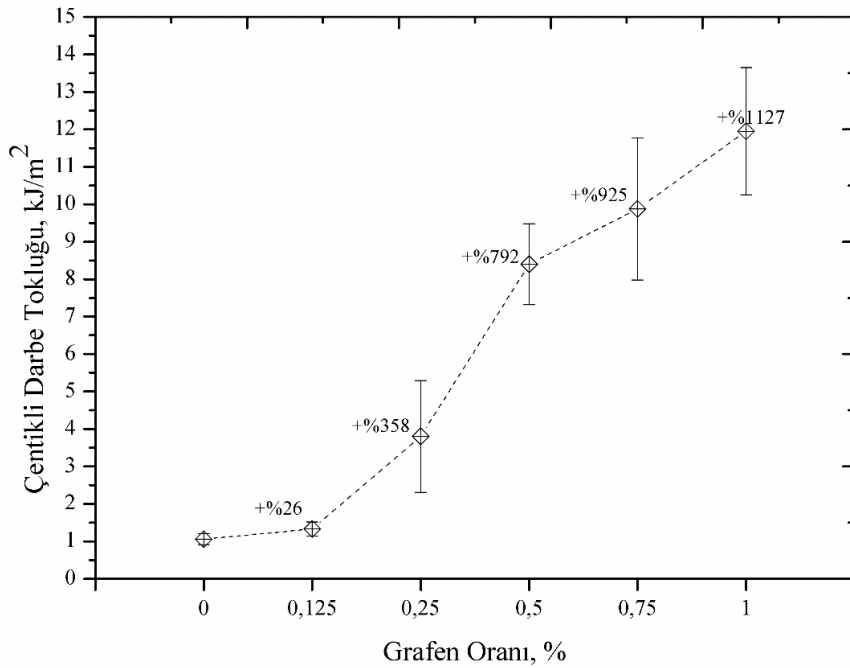
Saf epoksinin çekme kopma yüzeyinde nehir benzeri çizgi oluşumları ve pürüzsüz kırılma alanları ile oluşan tipik bir gevrek kırılma yüzeyi Şekil 7.12a’ da görülmektedir. Şekil 7.12a ve 7.12b karşılaştırıldığı zaman Şekil 7.12b’ de kırılma yüzeylerinde görülen grafen morfolojisine benzer ayrılma düzlemlerinin olduğu görülmektedir. Bu bulgu, grafen tabakalarının epoksi matristen koparak ayrıldığı bir göstergesidir. Şekil 7.12b’ de görülen yönlendirilmiş tipik kopma akış çizgileri, saf epoksinin kırılma yüzeyinde görülmemektedir. Bu kopma akış desenleri, grafen/epoksi için tokluk artırma mekanizmalarından biridir ve çatlak ilerleme doğrultusundaki grafen tabakalarının ayrılma yüzeylerini göstermektedir. Şekil 7.12b,

7.12c ve 7.12d' verilen kırılma yüzeylerinden anlaşıldığı gibi ağırlıkça %0.25' ten %1' e doğru grafen takviye oranının artması ile grafen/matris arasındaki etkileşimin azaldığı, homojen olmayan kaba yüzeyden anlaşılmaktadır.

Şekil 7.12c (ağırlıkça %0.5) ve 7.12d (ağırlıkça %1.0)' de daha yüksek grafen içeriğine sahip epoksi matrisin çekme kırılma yüzeyi gösterilmiştir. Daha yüksek grafen takviye oranlarında aglomere olmuş grafen kümeleri epoksi matris içerisinde kusur olarak kabul edilebilirler ve gerilme konsantrasyon noktası oluşturarak görev yaparlar. Bu nedenle, daha yüksek grafen içeriğine sahip epoksi matrisin daha düşük çekme dayanımına sahip olacağı açıktır.

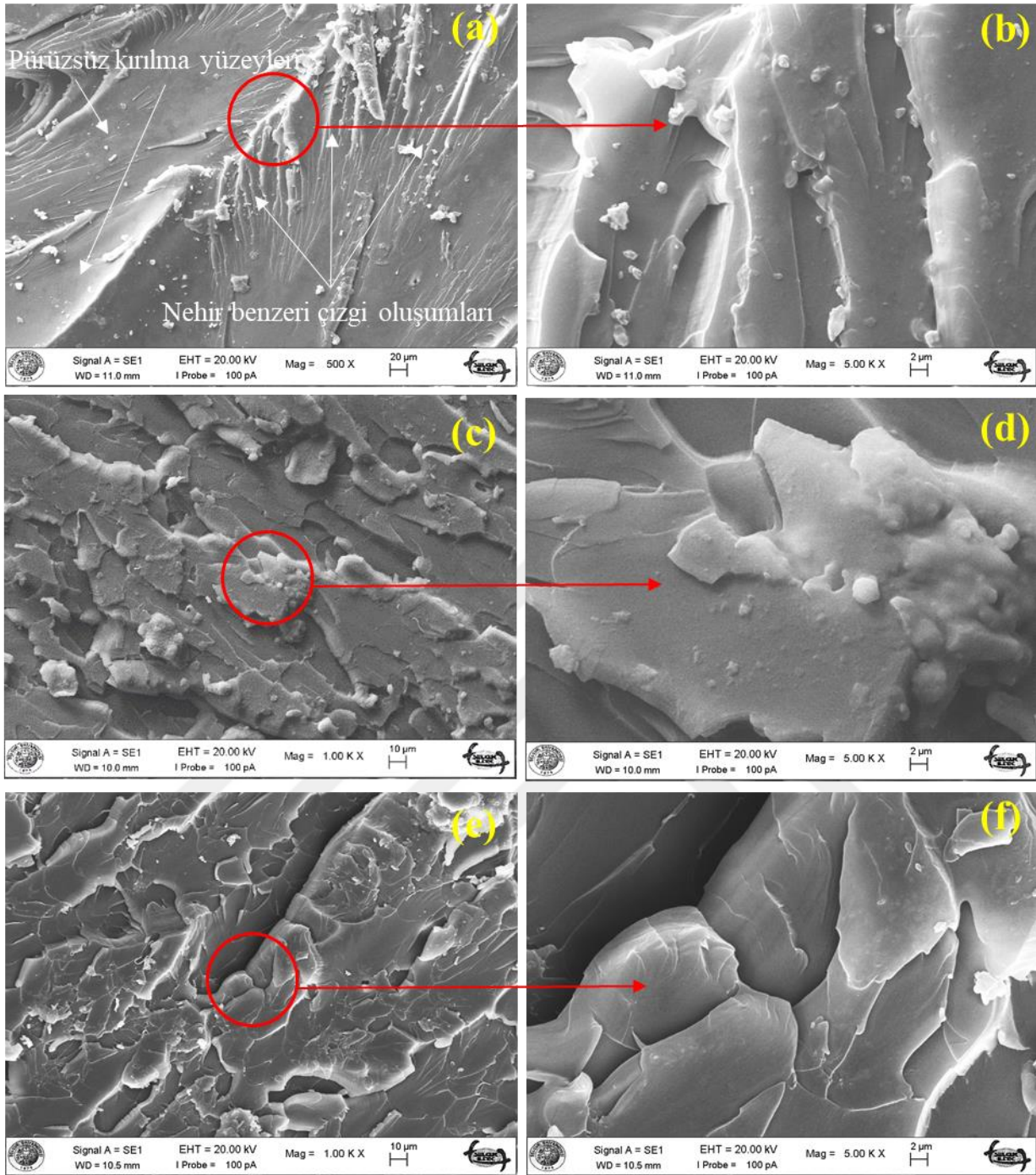
Ağırlıkça %0.5, %0.75 ve %1 grafen/epoksi numunelerde absorbe edilen enerji yani tokluk değerindeki azalma, grafen çevresindeki gerilme konsantrasyonundan kaynaklanabilir. Yüksek grafen takviye oranlarında grafen aglomerasyonu, katastrofik kırılmaya neden olacak matriste bir çatlak başlangıç noktasına yol açabilir (Dassios ve ark., 2012; King ve ark., 2013).

V-çentige sahip bir malzemenin çatlak ilerlemesine gösterdiği direnç olarak bilinen çentikli darbe tokluğu, malzemenin kırılmaya karşı sergilemiş olduğu davranışının basit ama güvenilir bir göstergesi olduğu için mühendislik malzemelerinin en önemli mekanik özelliklerinden birisidir.



Şekil 7.13 Grafen/epoksi nanokompozitlerin takviye oranlarına göre V-çentikli Charpy darbe test sonuçları

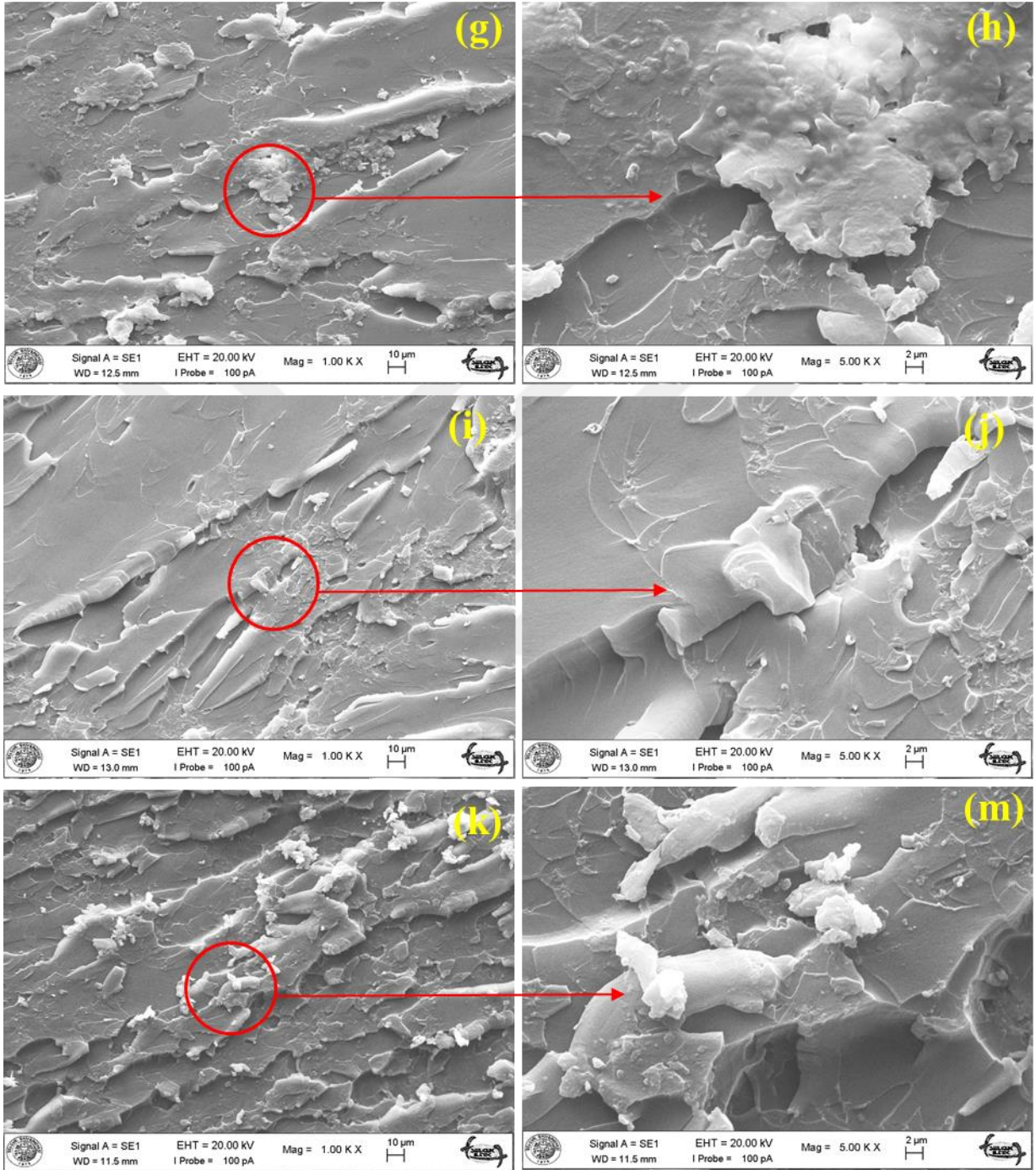
Şekil 7.13, grafen/epoksi nanokompozitlerin takviye oranlarına göre çentikli darbe tokluğundaki değişimi göstermektedir. Grafen takviye oranı arttıkça çentikli darbe tokluğunun



Şekil 7.14 Grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisin darbe kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri; (a ve b) saf epoksi, (c ve d) %0.125 grafen/epoksi, (e ve f) %0.25 grafen/epoksi

arttığı bulunmuştur. Bunun sebebi, kırılma düzleminde bulunan grafenlerin daha fazla enerjiyi absorbe ederek kırılma yüzeyleri oluşturmasıdır. Sing ve ark., çentik darbe tokluğundaki bu artışı kırılma için daha fazla zaman ve enerji gerekmesi şeklinde yorumlamıştır (Singh ve ark., 2013). Ayrıca, tüm takviye oranlarında grafenin sahip olduğu yüksek yüzey alanı sayesinde ortaya çıkan çatlak sapma ve/veya grafen kırılma mekanizmaları çentikli darbe tokluk artışının nedenleri olabilir (Chatterjee ve ark., 2012a; Chatterjee ve ark., 2012b). Epoksi matris içerisine

ağırlıkça %1 grafen eklenmesi ile saf epoksinin çentikli darbe tokluğu %1127 oranında artış göstererek en yüksek değere ulaşmıştır. Bu sonuç, Singh ve arkadaşlarının yorumunu desteklemektedir.

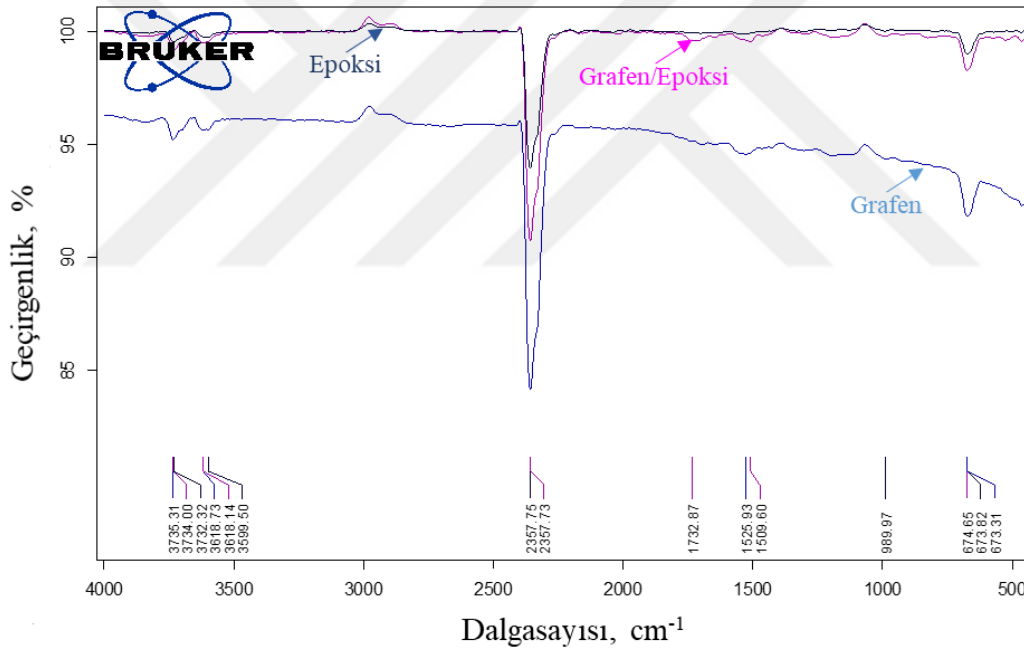


Şekil 7.15 Grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matrisin darbe kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri; (g ve h) %0.5 grafen/epoksi, (i ve j) %0.75 grafen/epoksi, (k ve m) %1 grafen/epoksi

Şekil 7.14 ve 7.15' de grafen/epoksi nanokompozitlerinin çentikli darbe kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Saf epoksi matriste gevrek kırılmann

oluşturduğunu gösteren nehir işaretleri Şekil 7.14a ve 7.14b’ de gösterilmiştir. Saf epoksi matrisinin gevrek kırılma yüzeyi düşük darbe dayanımının bir sonucudur. Saf epoksinin kırılma yüzeyinde çatlak sapma ve/veya dallanma mekanizmaları yoktur. Bu nedenle, çatlak bir kez ilerlemeye başladığı zaman herhangi bir çatlak saptırma mekanizması olmaksızın yayılarak, düz ve pürüzsüz kırılma yüzeyi ortaya çıkar (Atif ve ark., 2017).

Grafen/epoksi nanokompozit numunelere ait Şekil 7.14c, 7.14d, e, 7.14f ve 7.15’ te gösterilen kırılma yüzeyleri, saf epoksininkinden farklı olarak çatlakların farklı düzlemlerde yayıldığını ve numunenin tüm kırılma yüzeyinde oluştuğunu göstermektedir. Singh ve ark., grafenin parabolik ve doğrusal olmayan kırılma desenleri oluşturacak şekilde epoksi matriste bulunan çatlakları saptırdığını rapor etmişlerdir (Singh ve ark., 2015). Yukarıda anlatıldığı üzere, takviyesiz epoksi matriste ilerlemeye başlayan çatlaklar, çatlak doğrultusu boyunca çatlak saptırma olmaksızın hızla yayılır ve sonuç hasarına neden olurlar.



Şekil 7.16 Grafen, saf epoksi ve %0.25 grafen/epoksi nanokompozitinin FTIR sonuçları

Grafenin sahip olduğu yüksek özgül alanı ve yüzey enerjisi nedeniyle grafenler birbirlerine çekilerek kolayca aglomere olabilir. Grafen aglomerasyonu, Şekil 7.3 ve 7.4’ te verilen TEM görüntülerinden tespit edilmiştir. Epoksi matriste aglomere olan grafenlerin oluşturduğu mikro çatlaklar, ani darbe karşısında ilerlemeye zaman bulamayacağı için kırılma düzlemindeki her bir grafen yüzeyinden farklı kırılma düzlemi oluşturarak (Şekil 7.14 ve 7.15) ilerler ve çatlak ilerleme yolunu artırırlar. Singh ve ark., bu olay gerçekleşirken saf epoksi’ ye

göre daha fazla enerji harcadığını ve çentikli darbe tokluk değerinin hem düşük hem de yüksek grafen takviye oranlarında sürekli arttığını söylemişlerdir (Singh ve ark., 2015).

Grafen, epoksi ve grafen/epoksi nanokompozit numunelere ait FTIR sonuçları Şekil 7.16' da gösterilmiştir. Grafen ile epoksi matris arasında yeni bir bağ oluşumu tespit edilmediği için arayüzey etkileşiminin sadece fiziksel olduğu belirlenmiştir. FTIR grafiğinde görülen 2357 cm^{-1} pik değeri C-C bağına karşılık gelmektedir. Bu değere karşılık gelen ışık geçirgenlik değeri, epoksi reçine ile kıyaslandığı zaman ağırlıkça %0.25 grafen takviyeli epoksida ışık geçirgenliği azalmıştır. Bu durum C-C bağ yoğunluğunun arttığını kanıtlar niteliktedir. Grafenin, epoksi reçinenin kürlenme esnasında C-C bağ yoğunluğunu arttırdığı yorumu yapılabilir.

Saf epoksi ve grafen/epoksi nanokompozitlerin mekanik test sonuçlarına göre, bazalt/epoksi borulara ilave edilmesi gereken grafen ağırlıkça %0.25 olarak belirlenmiştir. Bölüm 6.12' de netting analizi ile belirlenen sarım açısı ve yukarıda belirlenen takviye oranı kullanılarak filaman sarma yöntemiyle $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların üretilmesine karar verilmiştir.

7.2. Yakma Test Sonuçları

Çizelge 7.1 'de sunulan verilere göre Denklem 6.1 kullanılarak bazalt/epoksi boruların elyaf hacim oranı (V_f) 0.5878 ± 0.0044 olarak hesaplanmıştır. Elyaf takviye oranı, bir kompozitin genel mekanik özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Endruweit ve ark., daha yüksek bir elyaf hacim oranının kompozite daha iyi mekanik özellikler kazandırabileceğini vurgulamıştır (Endruweit ve ark., 2013).

Çizelge 7.1 Bazalt/epoksi kompozitin elyaf hacim oranını (V_f) hesaplamak için kullanılan veriler

Kompozitin ağırlığı W_c , g	Kompozitteki reçine ağırlığı W_r , g	Kompozitteki elyaf ağırlığı W_f , g	Kompozitin gerçek yoğunluğu, ρ_c , g/cm^3	Takviye yoğunluğu, ρ_f , g/cm^3
30.04 ± 0.82	7.62 ± 0.2	22.6229 ± 0.3409	1.9683 ± 0.0096	2.475

7.3. Boşluk Ölçüm Test Sonuçları

Çizelge 7.2 'de sunulan verilere göre Denklem 6.2 kullanılarak bazalt/epoksi kompozitin teorik yoğunluğu (T_d) $1.9747 \pm 0.0052 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Kompozitin gerçek yoğunluğu (M_d) ise $1.9683 \pm 0.0096 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. T_d ve M_d değerleri

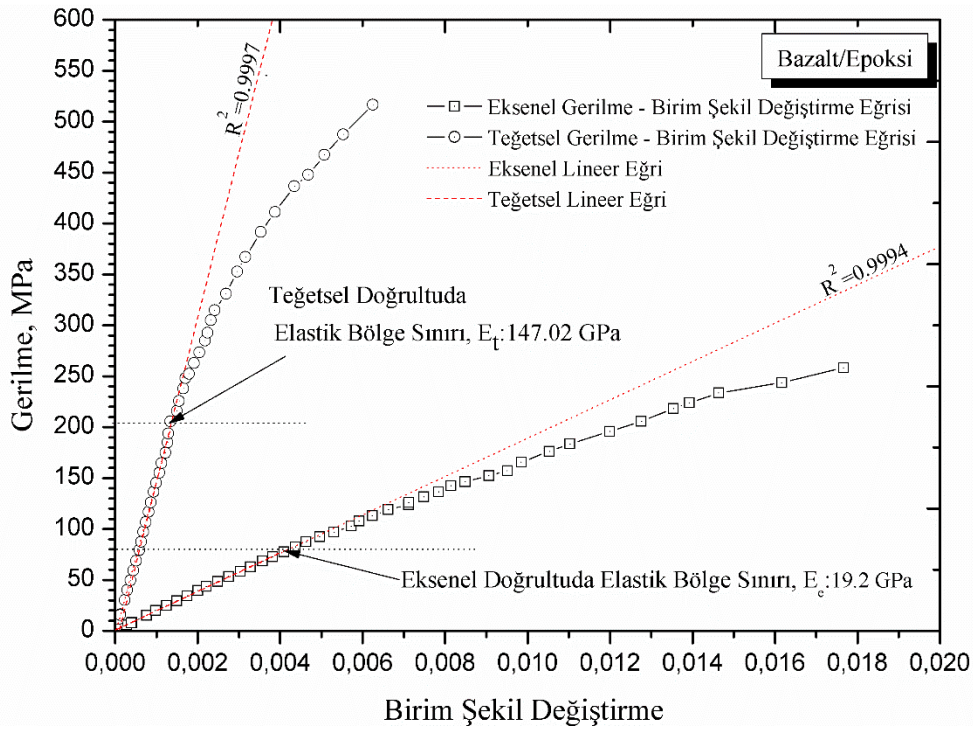
Denklem 6.3' te yerine yazılarak kompozit boruların boşluk içeriği hacimce 0.4638 ± 0.2034 olarak hesaplanmıştır. Boşluk içeriğinin kompozit plakaların mekanik özellikleri üzerine etkisi hakkında fazla veri bulunmamaktadır. Bir kompozit malzemede kabul edilebilir boşluk içeriğinin yüzdesi için objektif bir kıstas yoktur. Strong, genel olarak bir kompozit malzemenin maksimum boşluk içeriğinin hacimce %0.5' ten büyük olmaması gerektiğini söylemiştir (Strong, 2008).

Çizelge 7.2 Kompozitin teorik yoğunluğu (T_d) için kullanılan veriler

Kompozitteki reçinenin ağırlıkça yüzdesi, R (%)	Kompozitteki takviyenin ağırlıkça yüzdesi, r (%)	Reçine yoğunluğu, D (g/cm^3)	Takviye yoğunluğu, d (g/cm^3)
25.8598 ± 0.3409	25.8598 ± 0.3409	1.25	2.475

7.4. Kapalı-Uçlu İç Basınç Altında Elastik Özellikler

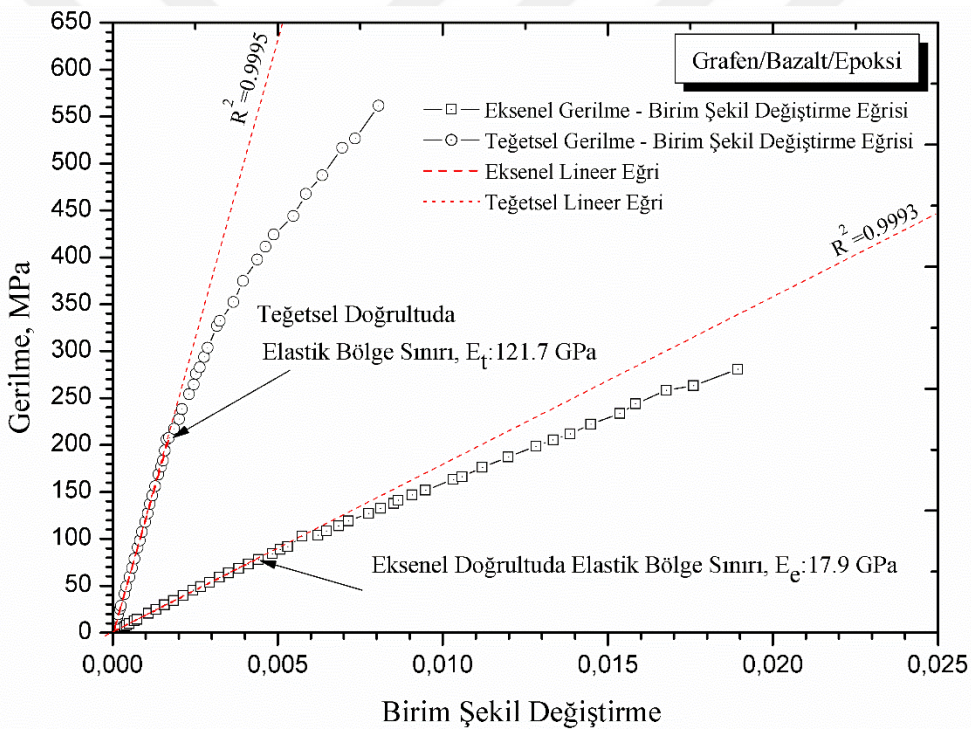
Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 7.17 ve 7.18 verilmiştir. Ek olarak, 7.19' da grafen takviyeli ve takviyesiz bazalt/epoksi borula-



Şekil 7.17 $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu iç basınç altında gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

rın gerilme-şekil değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca, bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların gerilme-şekil değiştirme test sonuçları Çizelge 7.3’ te özetlenmiştir.

Kapalı-uçlu iç basınç testleri, numunelerde terleme şeklinde sızıntı hasarı görüldüğü zaman sonlandırıldı ve bu hasara göre grafen takviyeli ve takviyesiz borular birbirleri ile kıyaslandı. Kompozit numunelerin teğetsel ve aksel elastisite modülleri, elastik bölgede gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerine lineer eğri uydurularak korelasyon katsayıları (R^2 : bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin yönünü ve büyüklüğünü belirten katsayı) belirlendi ve karşılaştırıldı. Bazalt/epoksi boruların teğetsel ve aksel doğrultudaki elastisite modülleri sırasıyla 147.02 ve 19.2 GPa olarak tespit edilirken grafen/bazalt/epoksi boruların teğetsel ve aksel doğrultudaki elastisite modülleri sırasıyla 121.7 ve 17.9 GPa olarak bulunmuştur.



Şekil 7.18 $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda grafen/bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu iç basınç altında gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

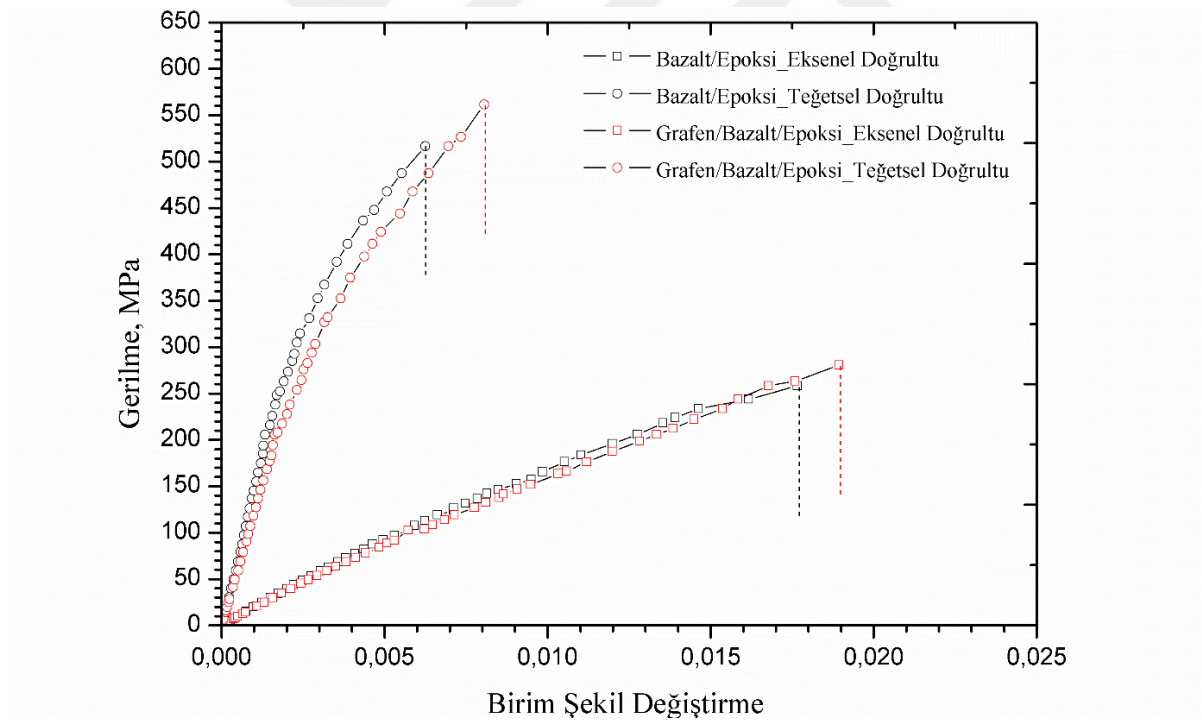
Grafen takviyesi, bazalt/epoksi borularının şekil değiştirme oranını artırarak teğetsel ve aksel elastisite modüllerini azaltmıştır. Ağırılıkça %0.25 grafen takviyesi, epoksi matrisinin birim şekil değiştirme değerini %19.5 oranında arttırdığı Bölüm 7.1’ de belirtilmiştir (Şekil 7.7). Grafen, epoksi matrisinin şekil değiştirme kabiliyetini arttırdığı için matrise yumuşatma etkisi kazandırmıştır. Bu sonuç, bazalt/epoksi plakaların mekanik özellikleri üzerinde grafen etkisini rapor eden Bulut’ un çalışması ile birebir uyum göstermiştir (Bulut, 2017). Ağırılıkça

%0.25 grafen takviyesi, bazalt/epoksi borularının tokluk (gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin altında kalan alan) değerini teğetsel ve aksel doğrultuda sırasıyla %36 ve %10.1 oranında arttırmıştır. Tokluk değerlerindeki bu artışlar, ilk hasar olarak tespit edilen terleme hasarının oluşumu sırasında absorbe edilen enerjinin artması şeklinde yorumlanmıştır.

Son olarak, elastik özellikler açısından bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların poisson oranları sırası ile 0.38820 ve 0.32692 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 7.3 Kapalı-uçlu $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç altında gerilme-birim şekil değiştirme test sonuçları

Numuneler	Teğetsel Doğrultu			Eksenel Doğrultu			Poisson Oranı ν
	Max. Çekme Dayanımı σ_t , MPa	Max. Birim Şekil Değiştirme ϵ	Elastisite Modülü E_t , GPa	Max. Çekme Dayanımı σ_t , MPa	Max. Birim Şekil Değiştirme ϵ	Elastisite Modülü E_t , GPa	
Bazalt/epoksi	516.75	0.00625	147.02	258.3	0.01766	19.2	0.38820
Grafen/bazalt/epoksi	561.6	0.00806	121.7	280.8	0.01894	17.9	0.32692



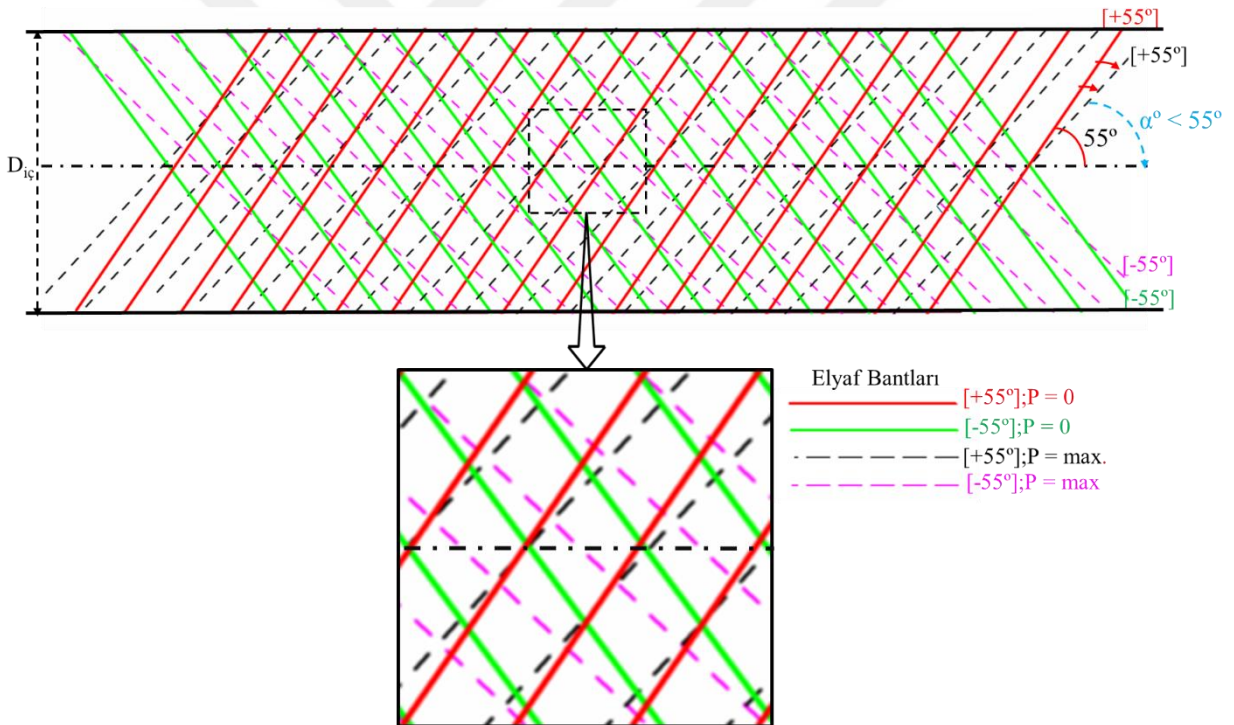
Şekil 7.19 Kapalı-uçlu $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç altında gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

7.5. Kapalı-Uçlu İç Basınç Test Sonuçları

Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç testleri ASTM D1599 standardına göre gerçekleştirilmiştir. İç basınç testleri esnasında başlangıç olarak “Terleme”

sonrasında ‘‘Sızma’’ ve son olarak ‘‘Patlama sonuç’’ hasarları yüksek znrlkl kamera yardımıyla tespit edilmiştir. Terleme hasarının ilk belirtisi, elyaf bantları üzerinden ve/veya arasından toplu iğne ucu büyüklüğünde sızıntı oluşumudur. Terleme hasarından sonra ortaya çıkan sızma hasarı ise, aynı yerlerden damlacık şeklinde sızıntı oluşumu ile kendini göstermektedir. Terleme ve sızma hasarları, elyafa dik çekme ve paralel kayma gerilmeleri etkisi altında oluşmaktadır.

İ basınç testlerinde basınç ve lineer konum sensörleri kullanılarak, i basına göre borunun çapındaki değişim ve boyundaki uzama ölçülmüştür. 11 mm genişliğinde ve $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip bazalt elyaf bantlarının i basınç etkisiyle teğetsel ve eksenel yönde zorlandıkları doğrultular şekil 7.20’ de şematik olarak verilmiştir. Teğetsel ve eksenel gerilmeler altında kalan elyaf bantları, $\pm 55^\circ$ lik elyaf sarım açısını azaltma yönünde zorlanmaktadır.

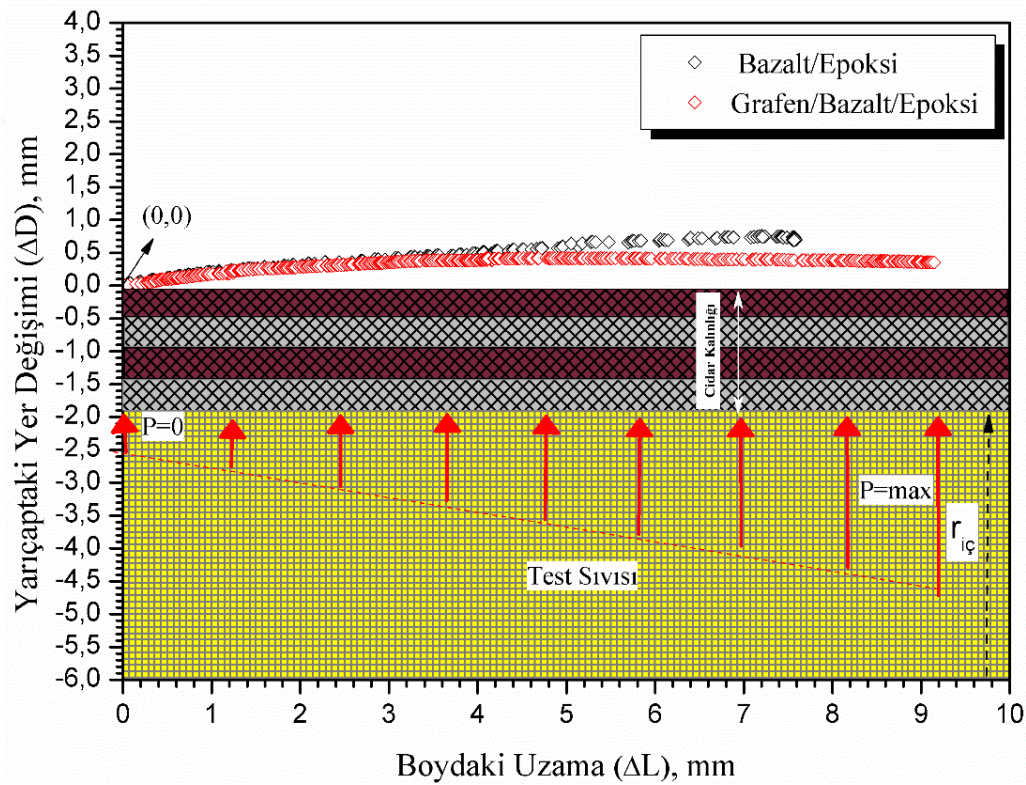


Şekil 7.20 İ basınç etkisinde zorlanan $\pm 55^\circ$ elyaf bantlarının açısal hareketi

Şekil 7.21’ de şematik olarak gösterilen boru yüzeyinde bulunan bir noktanın ((0,0) koordinatlarında) teğetsel ve eksenel doğrultudaki hareketi, i basınç altında sonuç hasarına kadar lineer konum sensörleri kullanılarak izlenmiştir. Eksenel doğrultudaki toplam şekil değişirme teğetsel doğrultuda oluşan toplam şekil değişirmeden büyük olduğu için $\pm 55^\circ$ olan sarım açısı klmştr. Sonuç olarak, bu noktadan geçen tek bir elyaf bandının açısal

hareketinin yönü ve büyüklüğü göz önüne alındığı zaman bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borulardaki 55° lik sarım açısının, sırasıyla 48.52° ve 46.99° değerlerine kadar azalma yönünde zorlandığı görülmüştür.

Tarakçıoğlu ve ark. $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açlarına sahip cam/epoksi borular üzerinde teorik ve deneysel çalışmalar yürütmüşlerdir ve farklı sarım açlarına sahip borularda maksimum kayma gerilmelerinin $\pm 45^\circ$ e sahip borularda meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, sarım açısının artması ile boruların teğetsel elastisite modüllerinin de arttığını belirtmişlerdir (Tarakcioglu ve ark., 2001).

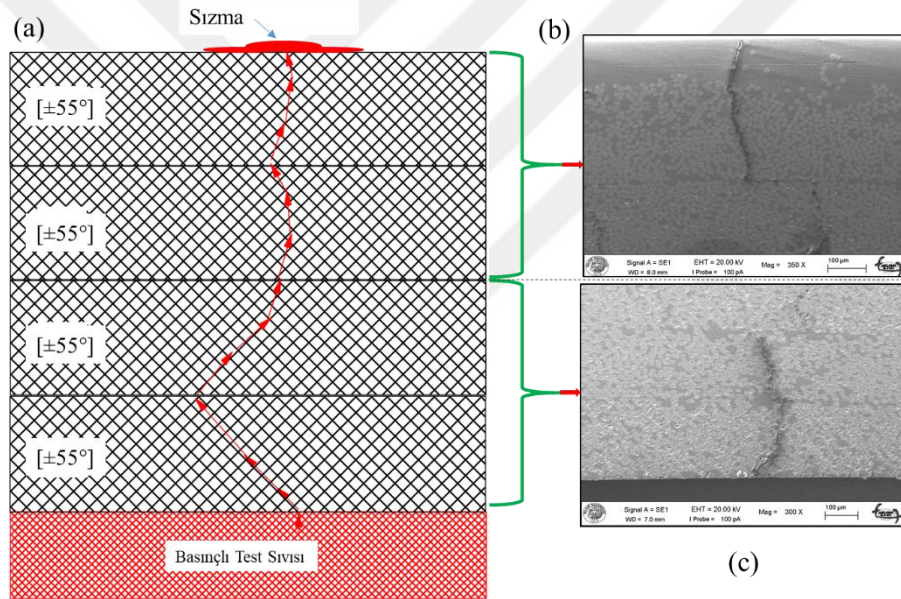


Şekil 7.21 Kapalı-uçlu iç basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borunun yüzeyindeki bir noktanın (koordinatları; (0,0)) teğetsel ve aksenal doğrultudaki yer değişimi ($P=0$ iç basınç testi başlama basıncını ve $P=max$ sonucu hasar basıncını ifade eder)

Benzer şekilde, bu çalışmada da sarım açısının 45° ye yaklaşması sonucu elyaf bantları üzerinde maksimum kayma gerilmeleri oluşmaktadır. İç basınçtan kaynaklı elyaf bantları üzerinde artan kayma gerilmelerinin etkisi ile basınçlı test sıvısı, elyaf/matris arayüzey, (debonding) ve elyafa paralel matris çatlaklarının oluşumu ve etkileşimi sonucu oluşan hasarlanma mekanizmasını kullanarak borunun iç yüzeyinden dış yüzeyine ulaşmış ve sonuç olarak boru hasara uğramıştır. Bu hasarlanma mekanizması borunun eksenine dik kesitinden alınan SEM görüntülerinden tespit edilmiş (Şekil 7.22b ve Şekil 7.22c) ve Şekil 7.22a' da

şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca bu hasarın oluşumunu destekleyen ve filaman sarma yönteminden kaynaklanan nedenler aşağıda açıklanmıştır.

Bazalt/epoksi boru halkasına yakma testi uygulandıktan sonra elde edilen $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda sarılmış bazalt elyafın helisel sarım deseni Şekil 7.23b' de gösterilmektedir. Helisel sarılmış bazalt elyaf halkasından alınan bitişik üç elyaf bandı Şekil 7.23a' da gösterilmiştir. Birbirine bitişik iki bant arasındaki bölgede oluşan boşluk, bindirme (bir elyaf bandının diğerinin üzerine sarılması) ve bağlantı zayıflığı gibi yapısal hatalar kompozit yapıyı zayıflatabilir. Bu yapısal hata bölgeleri, filaman sarma parametrelerinin bir sonucudur ve filaman sarma yönteminin dezavantajlarından biri olarak görülmektedir. Elyaf bantlarının arasında bulunan bu yapısal hatalar, kompozit test numunelerinde görülen terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının ortaya çıkmasını ve gelişmesini desteklemektedir.

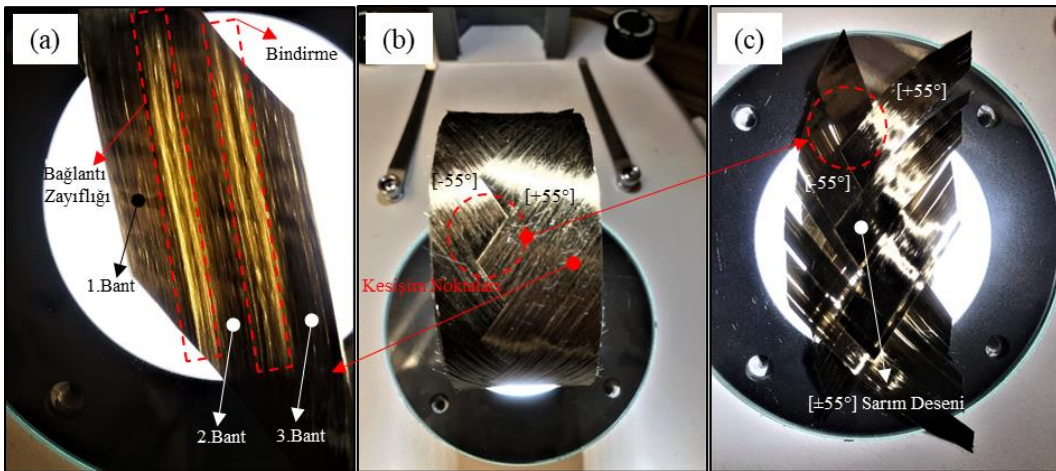


Şekil 7.22 (a) İç basınçtan kaynaklı elyaf bantları üzerinde artan kayma gerilmelerinin etkisi ile oluşan elyaf/matris arayüzey ayrılması (debonding) ve matris çatlak hasarlarının oluşturduğu sızıntı yolunun şematik gösterimi, (b ve c) elyaf/matris arayüzey ayrılması ile oluşan enine-çapraz çatlakın SEM görüntüleri

Helisel sarım sonucunda ortaya çıkan iki elyaf bandının kesişim noktaları Şekil 7.23b ve 7.23c' de gösterilmiştir. Kesişim noktalarında ve/veya bu noktaların yakınlarında bulunan elyaf bantlarında görülen dalgalanma ve boşluklar, çatlak başlatıcı olarak rol oynayabilir (Rousseau ve ark., 1999). Bu nedenle meydana gelen çatlaklar, iç basınca maruz kalan borularda terleme ve sızma şeklinde oluşan sızıntıların ortaya çıkmasını kolaylaştırmaktadır.

Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların teğetsel ve aksenal gerilmelere göre çaptaki ve boydaki değişim eğrileri sırasıyla Şekil 7.26 ve 7.27' de sunulmuştur. Test boyunca

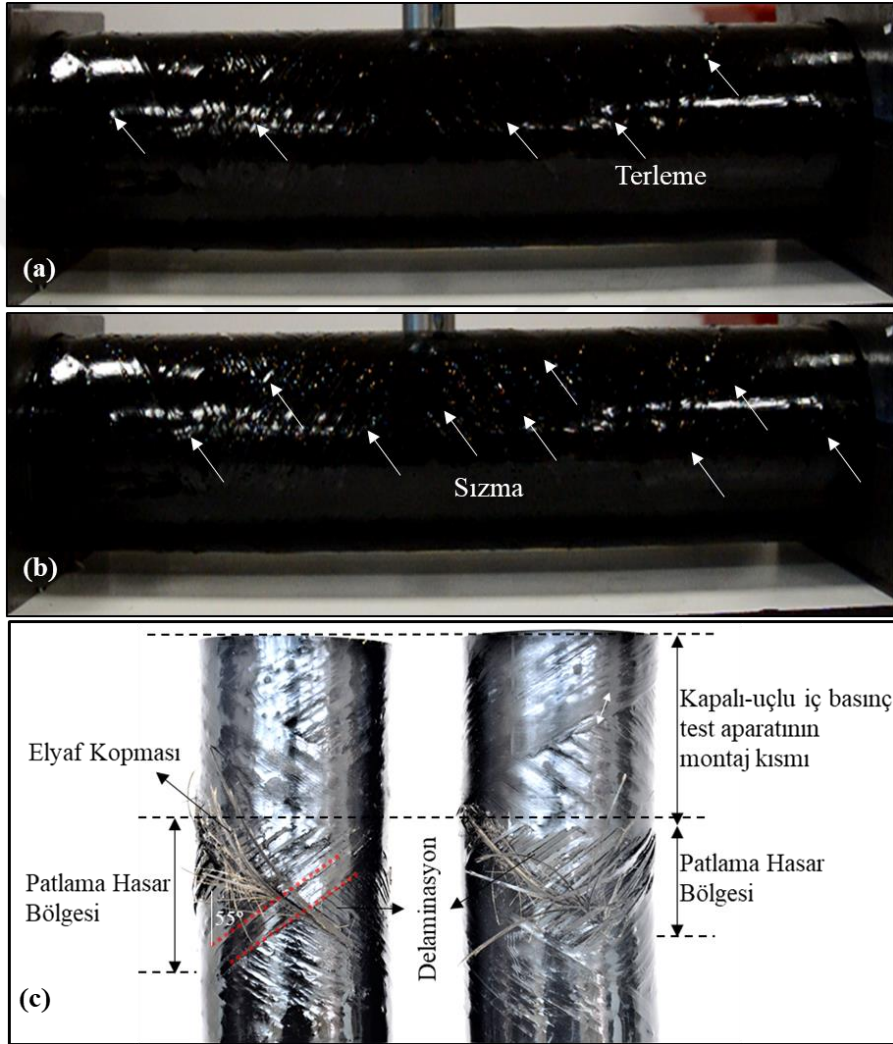
çekilen ses ve görüntü kayıtlarından, elyaf/matris arayüzey ayrılması (debonding) ve/veya matris çatlaması bazalt/epoksi borularda 143 MPa aksel gerilme değerinde başlarken bu hasarlar grafen/bazalt/epoksi borularında ise 221 MPa aksel gerilme değerinde başlamıştır. Grafen takviyesi, bazalt elyaf ve epoksi matris arasında arayüzey yapışmasını geliştirmiş ve matrisin birim şekil değiştirme değerini arttırmıştır. Bunun sonucu olarak da grafen takviyeli bazalt/epoksi borunun çapında ve boyunda daha fazla şekil değişiminin olduğu görülmüştür. Bazalt/epoksi borulara göre, grafen/bazalt/epoksi borularda aksel şekil değiştirme oranının daha yüksek olması nedeniyle, sarım açısı 46.99° değerini alarak 45° ye daha fazla yaklaşmıştır. Tarakçioğlu, serbest-uçlu iç basınç koşulları altında $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açısına sahip cam/epoksi borularda elyaf kopması şeklinde ani patlama olduğunu belirtmişken $\pm 45^\circ$ sarım açısına sahip borularda sızıntı ve akışkan jeti hasarlarının meydana geldiğini rapor etmiştir. Ayrıca, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açılara sahip numunelere kıyasla, $\pm 45^\circ$ sarım açısına sahip numunelerde daha büyük kayma gerilmesi oluşmasından dolayı; bu numunelerde ani patlama olmadan sonuç hasarının oluştuğunu bildirmiştir (Tarakçioğlu, 1992). Bu çalışmada, kapalı-uçlu iç basınç testinde patlama anında bazalt/epoksi boruların sarım açısı 48.52° kadar düşerek 45° ye yaklaşmasına rağmen borularda ani patlama oluşmaktadır. Ancak grafen takviyesi, boruların şekil değiştirme değeri arttırdığından dolayı grafen/epoksi/bazalt borularda sonuç hasarları, Tarakçioğlu'nun çalışmasında kullandığı ± 45 borularla benzer hasarlanma davranışı göstererek, patlama sonuç hasarı oluşmadan akışkan jeti veya yoğun sızma şeklinde meydana gelmiştir.



Şekil 7.23 (a) Birbirlerine bitişik üç elyaf bandı ve yapısal hata bölgeleri, (b) yakma testi sonrası elde edilen $\pm 55^\circ$ helisel sarılmış bazalt elyaf halkası (c) $\pm 55^\circ$ sarım desenine sahip elyaf bantları

Demirci, serbest-uçlu iç basınç koşulları altında ağırlıkça %4 SiO_2 takviyeli bazalt/epoksi borulara iç basınç testi uygulamıştır ve ağırlıkça %4 SiO_2 takviyesinin, epoksi

matrisin % birim şekil değiştirme oranını arttırdığını ve elyaf/matris arayüzey yapışmasını kuvvetlendirdiğini ifade etmiştir. Bunun sonucunda SiO₂ takviyeli borular, takviyesizlere göre daha fazla eğildiğini ve elyaf hasarına uğramadan akışkan jeti oluşturarak hasara uğradığını rapor etmiştir (Demirci, 2015). Sonuç olarak, SiO₂ ve grafen gibi nano takviyelerinin, elyaf/matris arayüzey yapışmasını ve epoksi matrisin % şekil değiştirme oranını artırması sonucu iç basınca maruz kalan borularda elyaf kopması olmadan sonuç hasarını oluşturacağı kanısına varılmıştır.

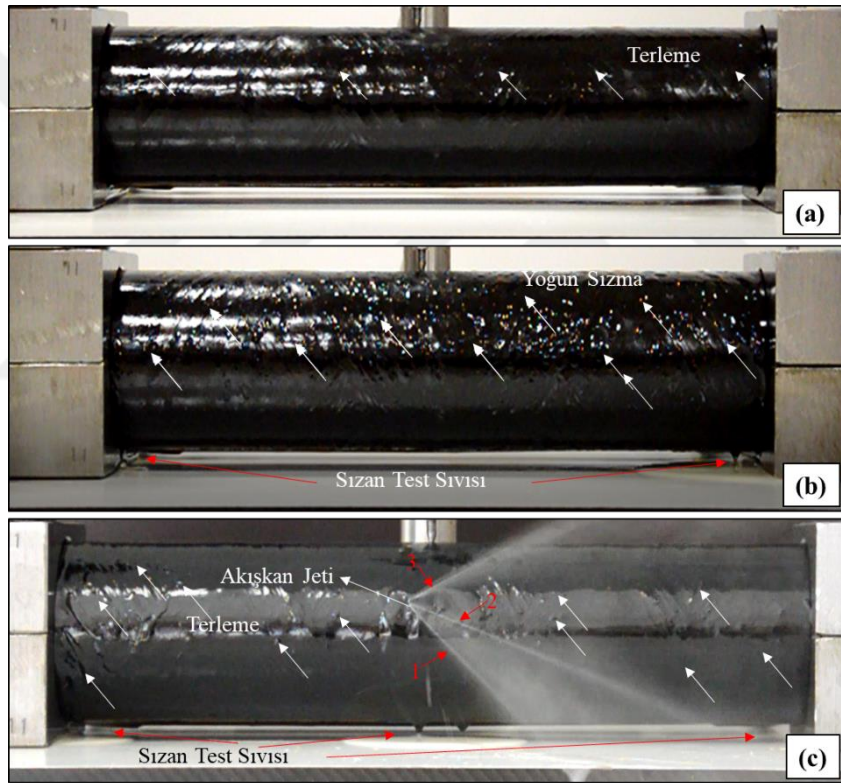


Şekil 7.24 Kapalı-uçlu iç basınç altında bazalt/epoksi borunun (a) terleme, (b) sızma, (c) patlama sonuç hasarları

Bazalt/epoksi borularda, iç basınç etkisi ile 512 MPa teğetsel ve 256 MPa aksenal gerilmelere maruz kaldığında terleme hasarının başladığı gözlemlenirken grafen/bazalt/epoksi borularda, 608 MPa teğetsel ve 306 MPa aksenal gerilme değerleri altında terleme hasarının başladığı tespit edilmiştir. İç basıncın sonuç hasarına kadar artması ile terleme hasarından sonra sızma hasarı gözlemlenmiştir. Şekil 7.24' te bazalt/epoksi boruların terleme, sızma ve patlama

sonuç hasarları gösterilmektedir. Şekil 7.25’ te ise, grafen/bazalt/epoksi boruların terleme, yoğun sızma ve akışkan jeti hasarları verilmiştir. Bu hasarlardan yoğun sızma ve akışkan jeti oluşumları, grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç testlerinde görülen sonuç hasarlarıdır.

Grafen/bazalt/epoksi borularda görülen akışkan jeti hasarı Şekil 7.25c’de gösterilmiştir. Akışkan jeti hasarı öncesinde ilk hasar olan terleme hasarı, toplu iğne ucu büyüklüğünde sızıntı oluşumu ile başlamıştır ve iç basıncın zaman içinde artması ile borunun gövde kısmında akışkan jetine dönüşen sonuç hasarı görülmüştür. İç basınç testi esnasında teğetsel ve eksenel gerilmelerin artması ile damlacık şeklinde oluşan sızıntının sayısı da gittikçe artmıştır. Akışkan jeti hasarı, tek noktadan başlamış ve artan teğetsel ve eksenel gerilme etkisi ile üç farklı noktadan yoğun akışkan jetine dönüşmüştür.



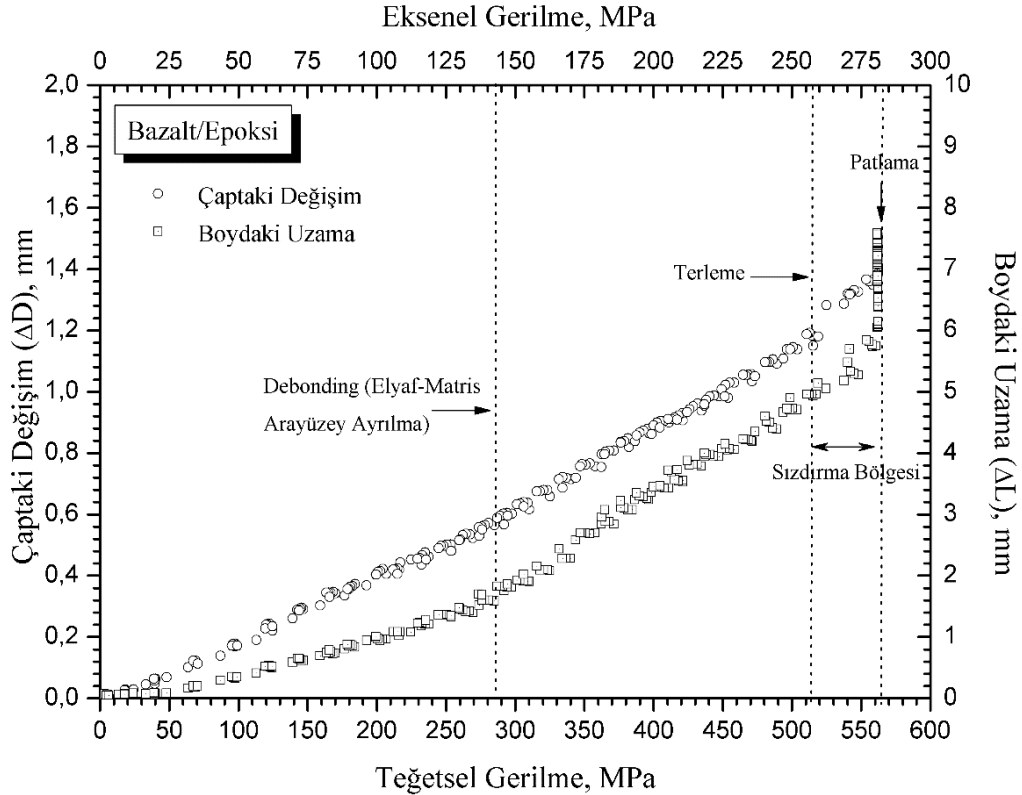
Şekil 7.25 Kapalı-uçlu iç basınç altında grafen/bazalt/epoksi borunun (a) terleme, (b) yoğun sızma sonuç hasarı, (c) üç noktada oluşan akışkan jeti sonuç hasarı

Sonuç hasarı, kapalı-uçlu iç basınç test düzeneğinden kaynaklanan gerilme yığılma bölgesinde aşağıdaki şekilde oluşmaktadır:

Uygulanan iç basınç testleri sonucunda ortaya çıkan terleme/sızma hasarı, borunun hasar gördüğünü ve kullanılamaz hale geldiğini göstermektedir. Ancak, borularda elyaf kopma hasarını ortaya çıkarmak için iç basınç testleri terleme/sızma hasarından sonra durdurulmamış ve elyaf kopma hasarına kadar devam ettirilmiştir. Sonuç olarak, bazalt/epoksi borularda

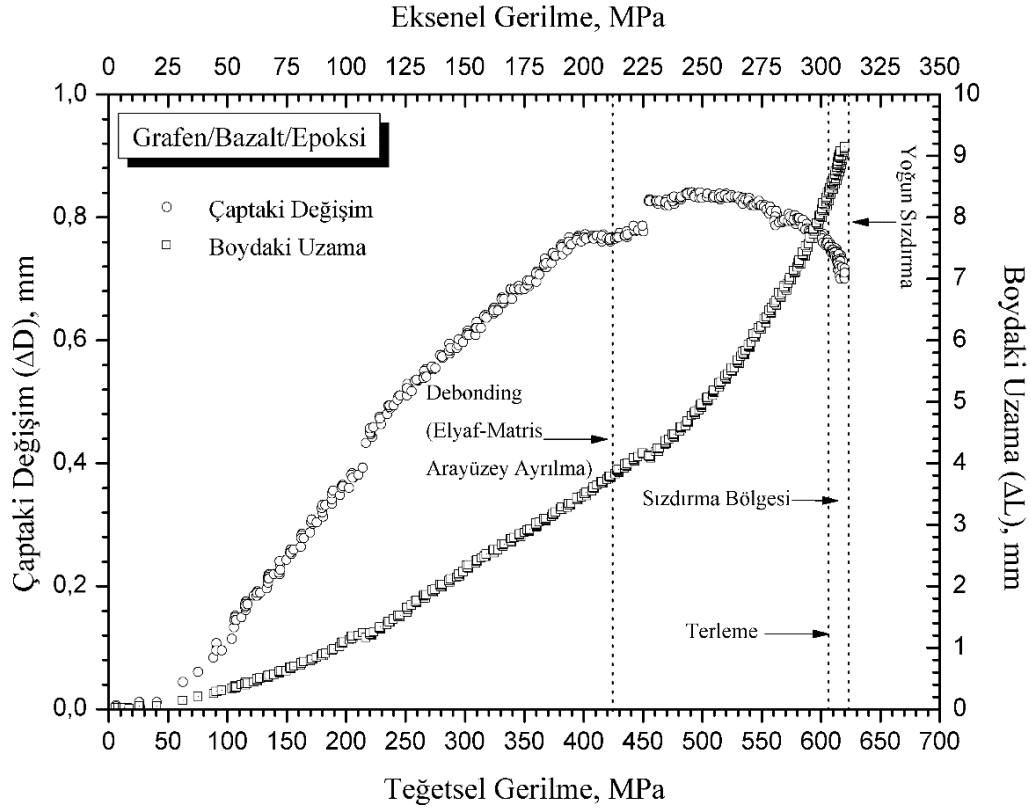
patlamaya sebep olan elyaf kopma ve sıyrılma hasarlarının, borunun iki ucunu kapatma tekniğinden dolayı ortaya çıkan gerilme yığılma bölgelerinde meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgelerde meydana gelen elyaf bantlarının ayrılması, elyaf kopma ve sıyrılma hasarları borunun gövde kısmına doğru ilerleyerek geliştiği gözlemlenmiştir. Elyaf kopması, sıyrılması ve bant ayrılması şeklinde oluşan patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi borular Şekil 7.24c’ de verilmiştir.

Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt epoksi boruların iç basınç test sonucunda teğetsel ve aksel gerilmelere göre çap ve boy değişim eğrileri sırasıyla Şekil 7.26 ve 7.27’ de gösterilmiştir. İç basınç testlerinde her iki tip boruda basıncın yükselmesi sonucunda ilk önce, elyaf/matris arayüzey ayrılma ve/veya matriste çatlak oluşma sesleri olan “çatlama” sesleri duyulmaya başlanmış ve sesler patlama sonuç hasarına kadar devam etmiştir. Ancak, bazalt/epoksi borularda çatlama sesleri, 287 MPa teğetsel gerilme değerinde, 0.52 mm çap ve 1.8 mm boy değişiminde başlarken, grafen/bazalt/epoksi borularda 424 MPa teğetsel gerilme değerinde, 0.76 mm çap ve 3.8 mm boy değişiminde başlamıştır. Bazalt/epoksi borularda terleme hasarı 512 MPa teğetsel gerilmeye başlarken, grafen/bazalt/epoksi borularda 580 MPa teğetsel gerilme değerinde başlamıştır. Bu sonuçlara göre, bazalt/epoksi borularda elyaf matris



Şekil 7.26 Kapalı-uçlu iç basınç altında $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi borunun teğetsel ve aksel gerilmelere göre çaptaki ve boydaki değişim eğrileri

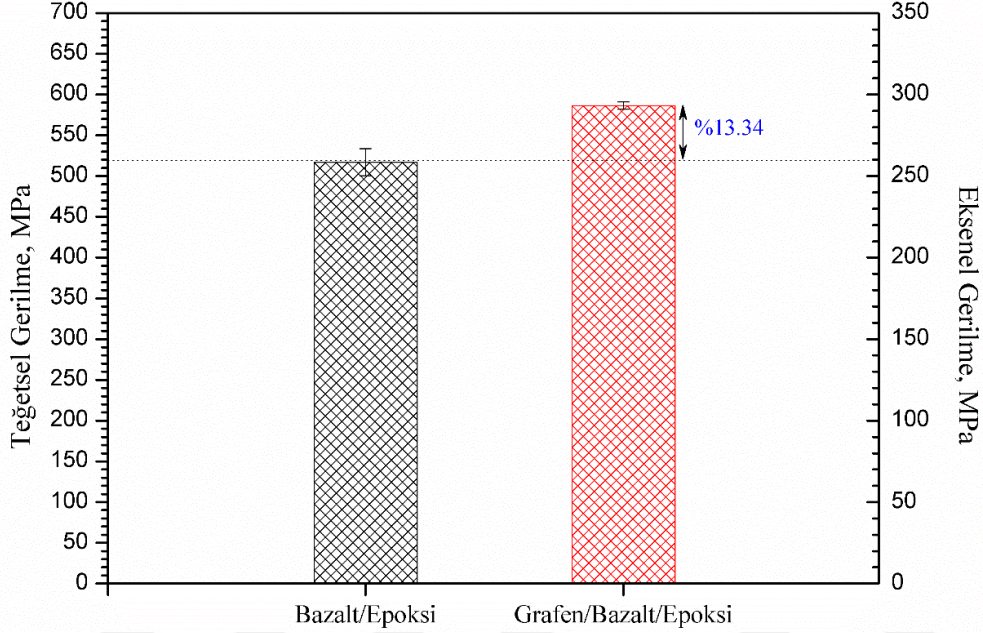
arayüzey ayrılma (debonding) hasarının başladığı teğetsel gerilme değerinin grafen takviyesi ile arttığı söylenebilir. Bunun muhtemel nedeni ise, grafen takviyesinin epoksi ve bazalt elyaf arasında güçlü bir arayüzey oluşturması olarak yorumlanabilir.



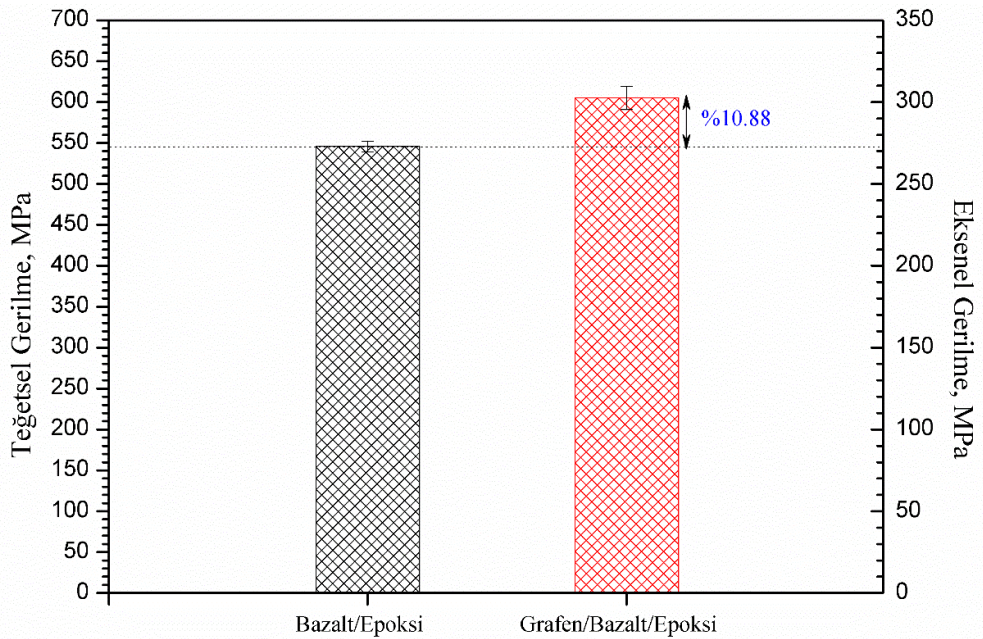
Şekil 7.27 Kapalı-uçlu iç basınç altında $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda grafen/bazalt/epoksi borunun teğetsel ve eksenel gerilmelere göre çaptaki ve boydaki değişim eğrileri

Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların terleme/sızma hasarlarının oluştuğu teğetsel ve eksenel gerilmeler Şekil 7.28’ de, yoğun sızma ve patlama sonuç hasarlarının oluştuğu teğetsel ve eksenel gerilmeler ise, Şekil 7.29’ da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İç basınç altında borularda karşılaşılan ilk hasar terleme şeklinde sızıntı hasarıdır. Ancak, boru terlemeye başladıktan hemen sonra ikinci aşama olan sızma hasarı meydana gelmektedir. Bu nedenle bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borular, terleme sonrası sızma hasarına geçtiği teğetsel ve eksenel gerilme değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Grafen takviyesi, bazalt/epoksi boruların terleme/sızma ve sonuç hasarlarının meydana geldiği teğetsel gerilme değerlerini sırasıyla, %13.34 ve %10.88 oranında arttırmıştır. Grafen takviyesinin elyaf/matris arayüzey yapışmasını ve epoksi matrisin % şekil değiştirme oranını arttırması, daha önce bahsedildiği gibi, başlangıç ve sonuç hasarlarının oluştuğu teğetsel gerilmelerdeki artışların temel nedeni olarak yorumlanmıştır.

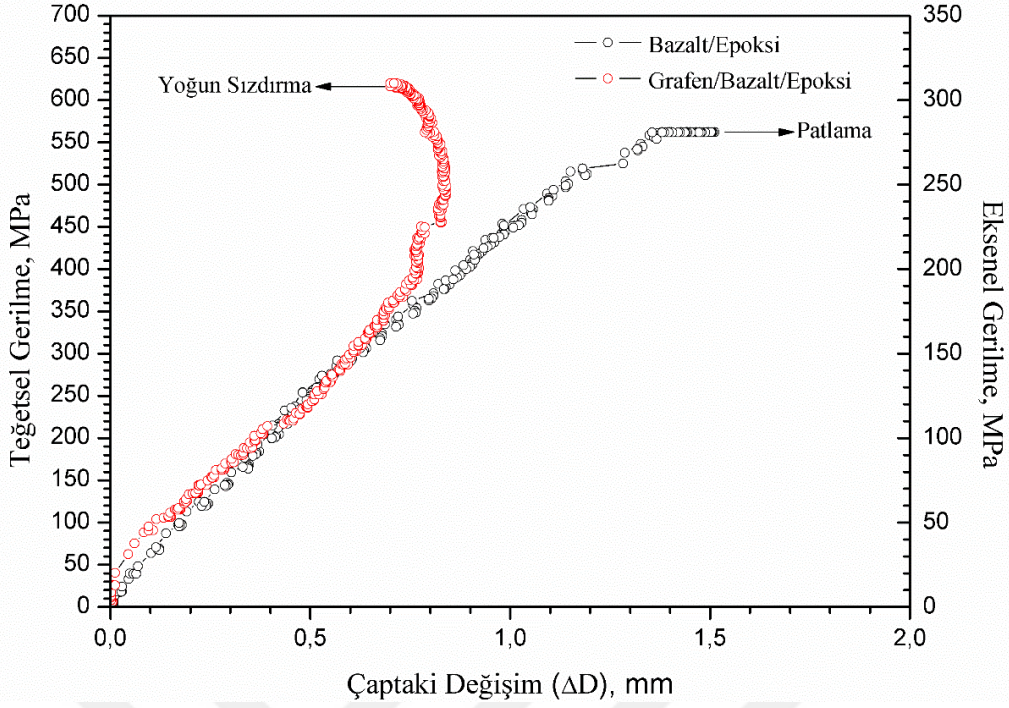
Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularda meydana gelen çap değişimi ve boydaki uzamaya bağlı olarak oluşan teğetsel gerilme değerleri sırasıyla Şekil 7.30 ve 7.31’ de gösterilmiştir. Şekil 7.30’ da gösterildiği gibi, grafen/bazalt/epoksi borularda yaklaşık 510 MPa teğetsel gerilme değerinde maksimum 0.85 mm çap artışı olduktan sonra çap değişimi azalmaya başlamıştır. Grafen takviyesinin, elyaf/matris arayüzey yapışmasını ve matrisin % şekil değişim



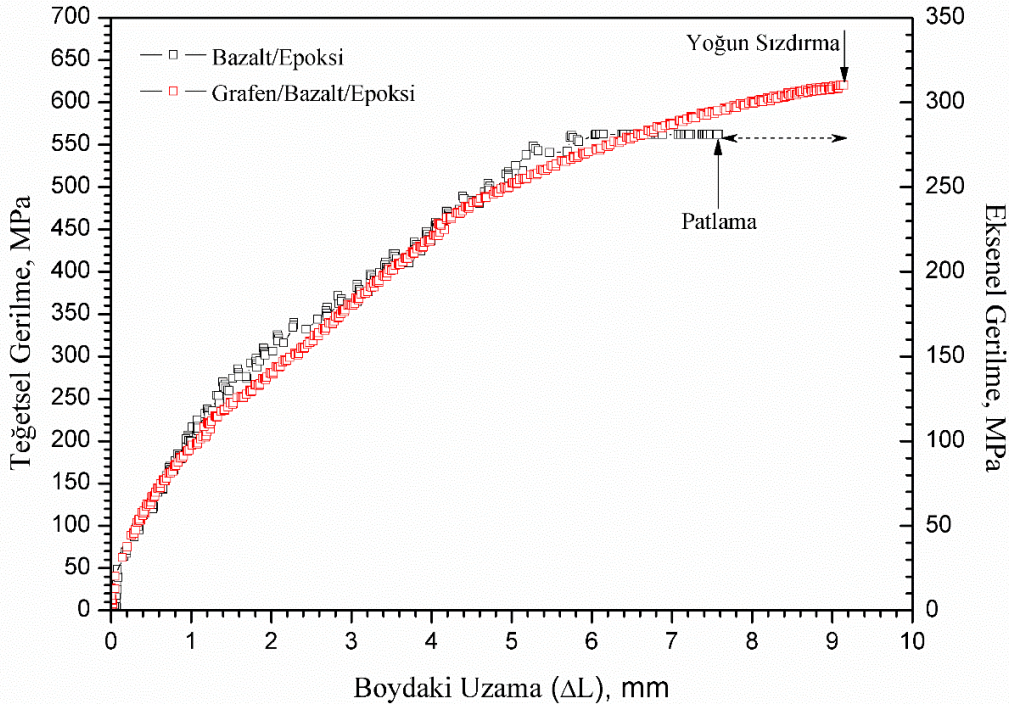
Şekil 7.28 Kapalı-uçlu iç basınç altında $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların terleme sonrasında sızma hasarlarının teğetsel ve eksenel gerilme açısından karşılaştırılması



Şekil 7.29 Kapalı-uçlu iç basınç altında $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların sırasıyla patlama ve yoğun sızma sonuç hasarlarının teğetsel ve eksenel gerilme açısından karşılaştırılması



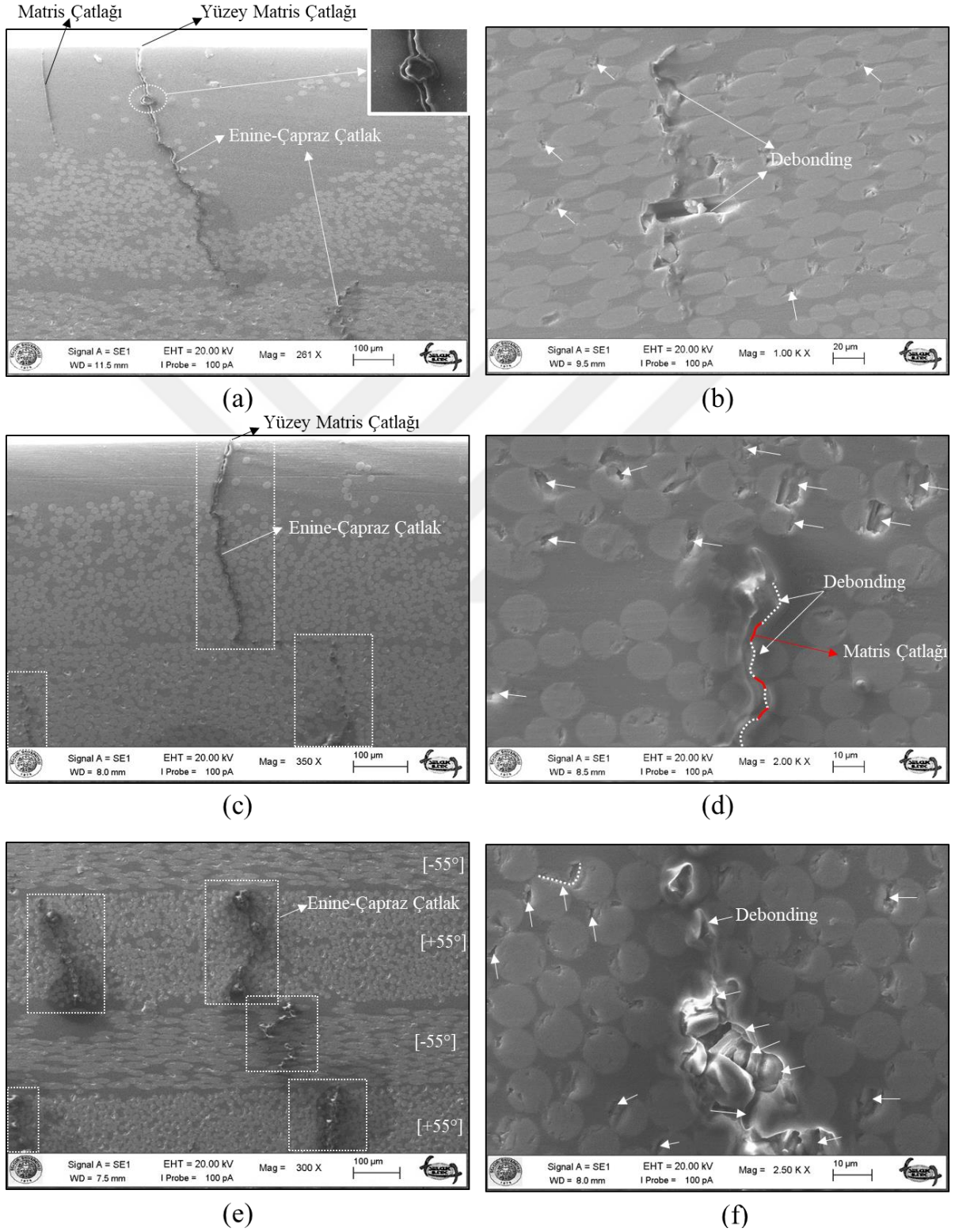
Şekil 7.30 Kapalı-uçlu iç basınç altında $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların teğetsel ve eksenel gerilme-çaptaki değişim eğrileri



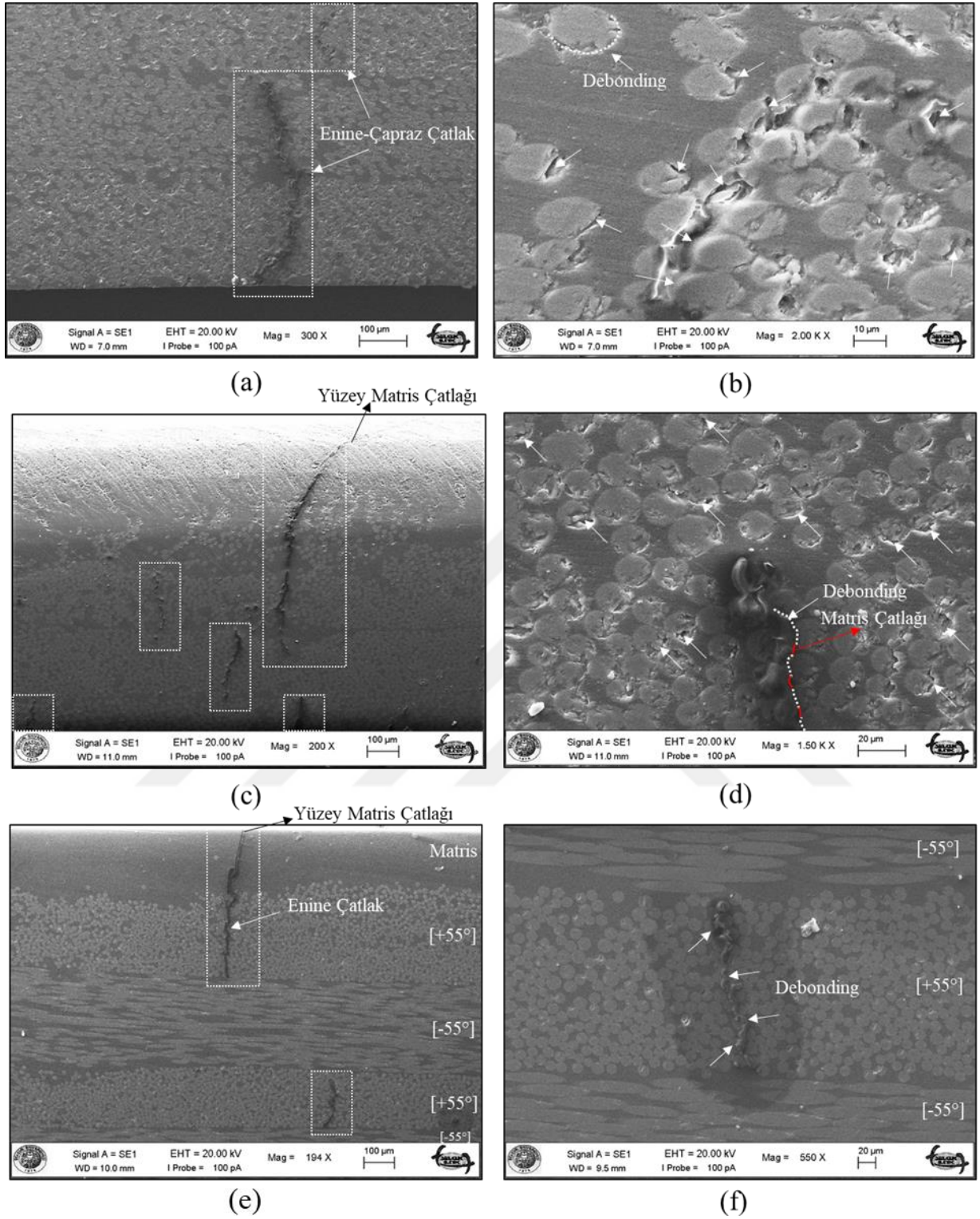
Şekil 7.31 Kapalı-uçlu iç basınç altında $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonunda bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların teğetsel ve eksenel gerilme-boydaki uzama eğrileri

oranını artırması sonucunda borunun çapındaki değişim sınırlı kalmıştır. Şekil 7.30' da görüldüğü üzere, bazalt/epoksi borularda ise, boru çapındaki değişim patlama sonuç hasarına

kadar artarak devam etmiştir. Şekil 7.31’ de gösterildiği gibi, bazalt/epoksi borulara göre grafen/epoksi/bazalt borular, %24.3 oranında daha fazla uzama göstererek sonuç hasarına ulaşmıştır.



Şekil 7.32 İç basınç testi sonucunda bazalt/epoksi boruların SEM kesit görüntüleri; (a ve b) boruların eksenine dik doğrultuda, (c ve d) boruların eksenine paralel doğrultuda, (e ve f) elyafa dik doğrultuda



Şekil 7.33 İç basınç testi sonucunda grafen/bazalt/epoksi boruların SEM kesit görüntüleri; (a ve b) boruların eksenine dik doğrultuda, (c ve d) boruların eksenine paralel doğrultuda, (e ve f) elyafa dik doğrultuda

İç basınç altında gerçekleştirilen testler sonucunda, sonuç hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların teğetsel, aksenal ve elyaf doğrultusuna dik kesitlerinin SEM görüntüleri Şekil 7.32 ve 7.33' te verilmiştir. Her iki tip borunun eksenine dik, paralel

doğrultuda ve elyaf doğrultusuna dik yönde alınan SEM görüntüleri incelendiğinde enine/çapraz çatlaklar ve debonding (elyaf/matris ara yüzey ayrılması) olarak iki ana hasar mekanizmasının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7.32 ve 7.33’ te gösterilen SEM görüntülerinden faydalanılarak; basınçlı test sıvısının, iç yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlaklar ve debonding hasarlarıyla boruların dış yüzeyine ulaşması sonucu borularda terleme ve sızma hasarlarının oluştuğu kanısına varılmıştır.

7.6. Yorulma Testlerinde Kullanılacak Olan Darbe Hasarlı Kompozit Borular İçin Darbe Enerji Büyüklüğünün Belirlenmesi

Bu çalışmada, kapalı-uçlu iç basınç altında düşük hızlı darbe etkisi ile hasara uğramış grafen takviyeli ve takviyesiz boruların değişken iç basınç altında yorulma davranışları, tek bir darbe enerjisi için incelenmesi planlanmıştır. Bu nedenle, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 ve 25 J darbe enerjisi ile hasarlandırılan boruların yorulma testleri, darbe hasarsız boruların yorulma testlerinde kullanılan yükleme oranları arasındaki en yüksek yorulma çevrim sayısını veren $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında yapılmış ve birbirleri ile karşılaştırılarak aşağıda açıklanmıştır.

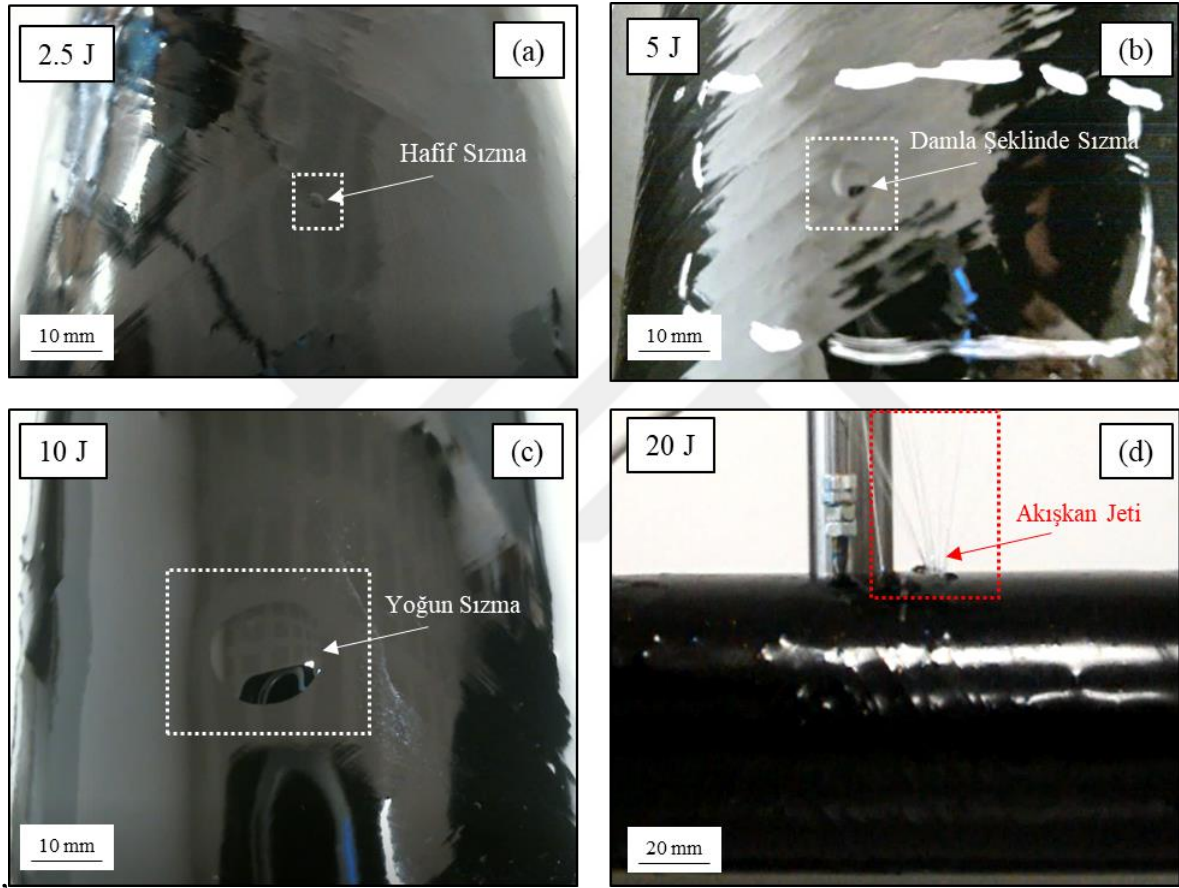
Yorulma testlerinde kullanılan iç basınç değeri, yorulmada kullanılan parametreler, yorulma sonrası çevrim sayısı ve yorulma ömrü sonunda darbe bölgesinde oluşan hasar açıklaması Çizelge 7.4 ve 7.5’ te verilmiştir.

Çizelge 7.4 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, aksenal: 49 MPa) iç basınç altında farklı darbe enerjisi ile hasarlandırılmış bazalt/epoksi borularda elde edilen yorulma ömrü verileri ve yorulma ömrü sonunda darbe bölgesinde gözlemlenen hasar açıklaması

Darbe Enerjisi	Teğetsel Ön Gerilme/İç Basınç	Eksenel Ön Gerilme/İç Basınç	Yorulma Gerilme Aralığı, ($\Delta\sigma$) $\sigma_{min} / \sigma_{max}$	$30\sigma_{t_max}$ Yorulma Yükleme Oranında Ömür	Yorulma Ömrü Sonunda Darbe Bölgesinde Oluşan Hasar Gözlemi
(J)	(MPa / Bar)	(MPa / Bar)	MPa / MPa	(Çevrim)	
2.5	98 / 50	49 / 50	7.75 / 155	14884	Hafif sızma şeklinde sıvı çıkışı
5				892	Damla şeklinde sıvı çıkışı
7.5				4	
10				1	Yoğun sızma şeklinde sıvı çıkışı
15				1	
20				1	Akışkan Jeti Oluşumu
25			Veri yok*	—	

** Darbe sonrası, darbe hasar bölgesinden test sıvısı çıkışı gözlemlendiği için değişken iç basınç altında yorulma testi yapılmadı.

Kapalı-uçlu iç basınç altında 2.5, 5, 10 ve 20 J darbe hasarlı bazalt/epoksi borularda $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında gerçekleştirilen yorulma testi sonrası darbe hasar bölgesinde gözlemlenen hasar fotoğrafları Şekil 7.34’ te verilmiştir. Şekil 7.38a’ da gösterildiği gibi, 2.5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi borularda test sıvısının 14884 çevrim sonunda darbe hasar bölgesinden hafif sızma şeklinde boru yüzeyine çıktığı gözlemlenmiştir. Şekil 7 incelendiğinde ise, 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi borularda test sıvısının 892 çevrim sonunda darbe hasar bölgesinden damla şeklinde sızdığı görülmüştür.



Şekil 7.34 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında 2.5, 5, 10 ve 20 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında gerçekleştirilen yorulma test sonrasında darbe hasar bölgesinde gözlemlenen hasar fotoğrafları; (a) hafif sızma, (b) damla şeklinde sızma, (c) yoğun sızma, (d) akışkan jeti oluşumu

Şekil 7.34c’ de, darbe hasar bölgesinde 4 çevrim sonunda yoğun sızma hasarı gözlemlenirken Şekil 7.34d’ de ilk çevrimde akışkan jetinin oluştuğu tespit edilmiştir. $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında akışkan jeti sonuç hasarı tek çevrimde oluşmuştur. Basınçlı test sıvısının akışkan jeti oluşturabilmesi için bir sızıntı yoluna ihtiyacı vardır. Bu sızıntı yolu vasıtasıyla basınçlı test sıvısı, iç yüzey matris çatlaklarından başlayarak elyaf/matris ayrılması ile oluşan enine ve/veya çapraz çatlaklar yolu ile delaminasyon alanlarına ulaşmıştır.

Daha sonra test sıvısı, delaminasyon hasar alanlarından diğer tabakalara enine/çapraz çatlak hasarı ile geçerek dış yüzey matris çatlağına ulaşmış ve sonuç hasarını meydana getirmiştir. Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 20 J darbe hasarlı boruların yorulma testi sonunda darbe hasar merkezinde birçok noktada oluşan akışkan jeti hasarı, yapıda oluşan sızıntı yollarının birden fazla olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, birçok sızıntı yolu oluşumunun gözlemlenmesi, yayılmış delaminasyon ve elyaf kopma hasarlarının oluştuğunu işaret edebilir.

Çizelge 7.5 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında farklı darbe enerjisi ile hasarlandırılmış grafen/bazalt/epoksi borularda elde edilen yorulma ömrü verileri ve yorulma ömrü sonunda darbe hasar bölgesindeki hasarın gözlem açıklaması

Darbe Enerjisi	Teğetsel Ön Gerilme / İç Basınç	Eksenel Ön Gerilme / İç Basınç	Yorulma Gerilme Aralığı, ($\Delta\sigma$) $\sigma_{min} / \sigma_{max}$	%30 $\sigma_{t,max}$ Yorulma Yükleme Oranında Ömür	Yorulma Ömrü Sonunda Darbe Bölgesinde Oluşan Hasar Gözlemi
(J)	(MPa / Bar)	(MPa / Bar)	MPa / MPa	(N)	
2.5				24101*	Terleme
5				6958	Hafif sızma şeklinde sıvı çıkışı
7.5				363	Damla şeklinde sıvı çıkışı
10	98 / 50	98 / 50	8.19 / 163.8	221	
15				23	
20				1	Yoğun sıvı çıkışı
25				Veri yok**	—

* 2.5 J darbe enerjisi ile hasarlandırılmış grafen/bazalt/epoksi boru, 24101 N sonunda hasarsız borularda gözlemlenen terleme hasarı şeklinde hasarlandığı için darbe hasarına duyarsız davrandığı yorumlanmıştır.

** Darbe sonrası, darbe hasar bölgesinden test sıvısının çıkışı gözlemlendiği için değişken iç basınç altında yorulma testi yapılmadı.

25 J darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların darbe hasar bölgesinin büyüklüğünden dolayı darbe etkisi sonrası test sıvısı boru yüzeyine çıkarak sonuç hasarını oluşturmuş ve bu nedenle yorulma testi yapılmamıştır.

Bazalt/epoksi borularda, 7.5, 10, 15 ve 20 J darbe hasarlarında sırasıyla; 4, 1, 1 ve 1 düşük yorulma çevrim değerlerinde darbe bölgesinde sızma sonuç hasarı ortaya çıkmıştır. Boruların yukarıdaki darbe enerji seviyelerinde oluşan darbe hasarlarının büyük olması nedeniyle; darbe bölgelerinde yorulma etkisi sonucu oluşacak sonuç hasarının ortaya çıkması için gereken hasar miktarı oldukça azalmıştır.

Diğer darbe büyüklüklerine göre, 2.5 ve 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların sırasıyla, 892 ve 14884 gibi çok daha yüksek yorulma çevrim değerlerinde darbe bölgesinde sızma şeklinde hasarın meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu boruların sonuçları göz önüne alındığında, 2.5 ve 5 J darbe hasarlı borular için yorulma testi sonucu delaminasyon,

enine/çapraz ve/veya matris çatlakları gibi hasarların olduğu numunelerin kesit incelemeleri neticesinde belirlenmiştir.

Çizelge 7.4 ve 7.5 göz önüne alındığında, hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma ömürlerinin, hasarlı bazalt/epoksi borulara göre daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Ek olarak, 2.5 J darbe uygulanan grafen/bazalt/epoksi borularda 24101 gibi yüksek çevrim sonunda sadece terleme hasarı ortaya çıkmış ve darbe bölgesinde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Sonuç olarak, 2.5 J darbeye maruz bırakılan boruda herhangi bir darbe hasarı oluşmadığı kanısından yola çıkarak, değişken iç basınç altında grafen/bazalt/epoksi boruların bu darbe büyüklüğüne karşı duyarsız davranması nedeniyle; hasarlı boruların yorulma davranışını incelemek için uygun bir darbe parametresi olamayacağı kanısına varılmıştır. Her iki tip boruda darbe sonrası yorulma hasarının ortaya çıkmasını sağlayacak kadar darbe hasarı oluşturabilen ve bir üst darbe parametresi olan 5 J seçilmiştir.

7.7. 5 J Darbe Etkisinde Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Test Sonuçları

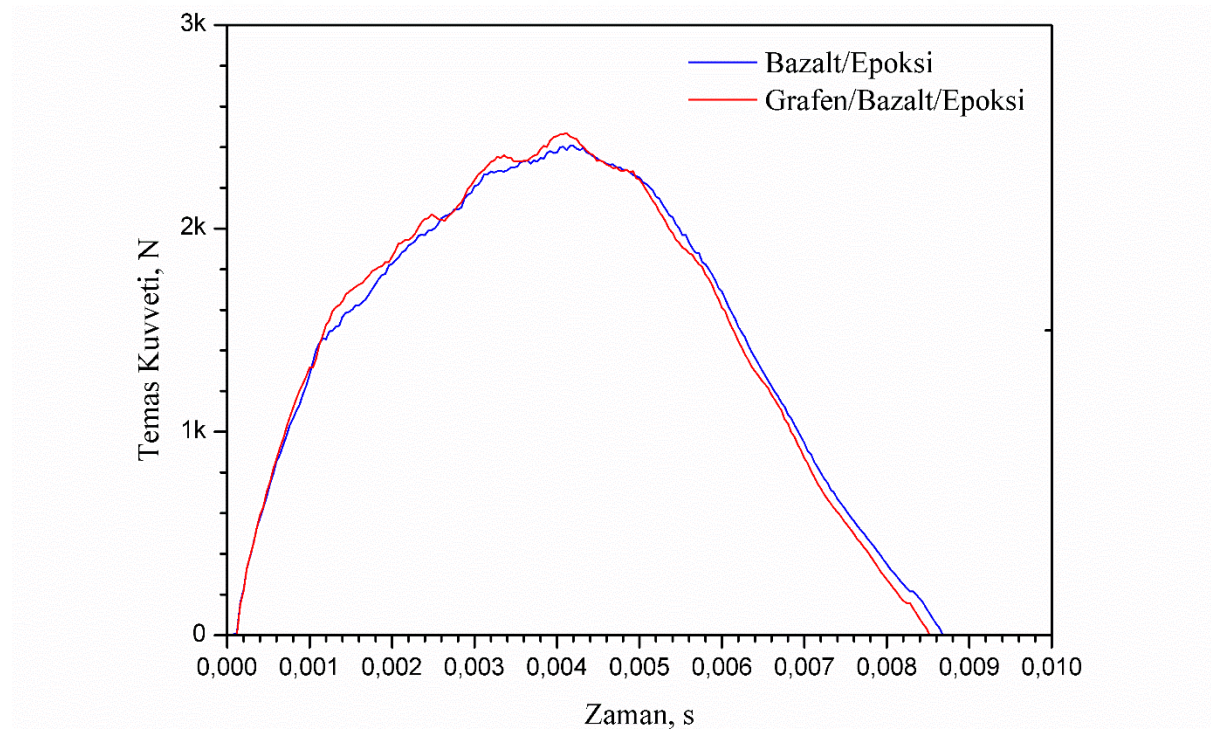
Kapalı-uçlu bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların 50 bar (teğetsel ön gerilme: 98 MPa, aksenal ön gerilme: 49 MPa) iç basınç altında düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenmesi amacıyla darbe testleri 5 J darbe etkisinde gerçekleştirilmiştir.

5 J değerindeki darbe enerjisi ve 5.6 kg vurucu kütlesi verilerini potansiyel enerji ($E=mgh$) denkleminde yerine koyarak, vurucu kütlelerinin bırakılacağı yükseklik değeri teorik olarak hesaplanmıştır. Darbe testleri, 24 mm çapında yarı küresel çelik uçlu vurucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Darbe testlerinde “tek vuruş” denilen darbe etkisi önemlidir. Darbe sonrası tutucuların mükemmel zamanlaması ile vurucu kütleinin tekrarlı (çoklu) darbe etkisi engellenmiştir. Darbe testleri sonrasında sayısal veriler, Labview yazılımı ile elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla kuvvet-zaman grafikleri çizilmiştir. Daha sonra, kuvvet-zaman verileri kullanılarak vurucu ve numune arasındaki dinamik ilişkinin kinetik analizi yapılmış ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir.

7.7.1. Temas kuvveti-zaman grafikleri

Bir malzemenin darbe kuvvetine gösterdiği dinamik davranış düşük hızlı darbe testi ile belirlenebilir. Düşük hızlı darbe etkisi ile malzemenin kısa bir zaman aralığında kuvvete karşı gösterdiği tepkinin geçmişi izlenebilir. Bu tepki, temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi olarak grafiğe dönüştürülebilir. Kuvvet-zaman grafikleri, bir malzemenin darbe davranışını

belirlemede oldukça faydalı bilgileri içerir. Kapalı-uçlu iç basınç altında 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların temas kuvveti-zaman grafikleri Şekil 7.35’ te sunulmuştur. Temas kuvveti-zaman grafiği “Gauss Çan” eğrisi grafiklerine benzemektedir. Bölüm 4’ te bahsedildiği üzere, her bir eğri iki evreden oluşmaktadır. Birinci evre başlangıç evresidir. Başlangıç evresinde temas kuvveti en büyük değerine ulaşır ve ardından ikinci evre olan ilerleme evresine geçer. İlerleme evresinde ise maksimum temas kuvveti zamanla azalarak sifira yaklaşır. Temas kuvvetinin bu değişimi, vurucunun numune yüzeyine temas etmesi anında başlar ve yüzeyden ayrılma (geri sekmesi) anına kadar geçen sürede gerçekleşir. 5 J değerinde uyguladığımız darbe enerjisinin bir kısmı test numunesi tarafından absorbe edilirken, kalan kısmı numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır.

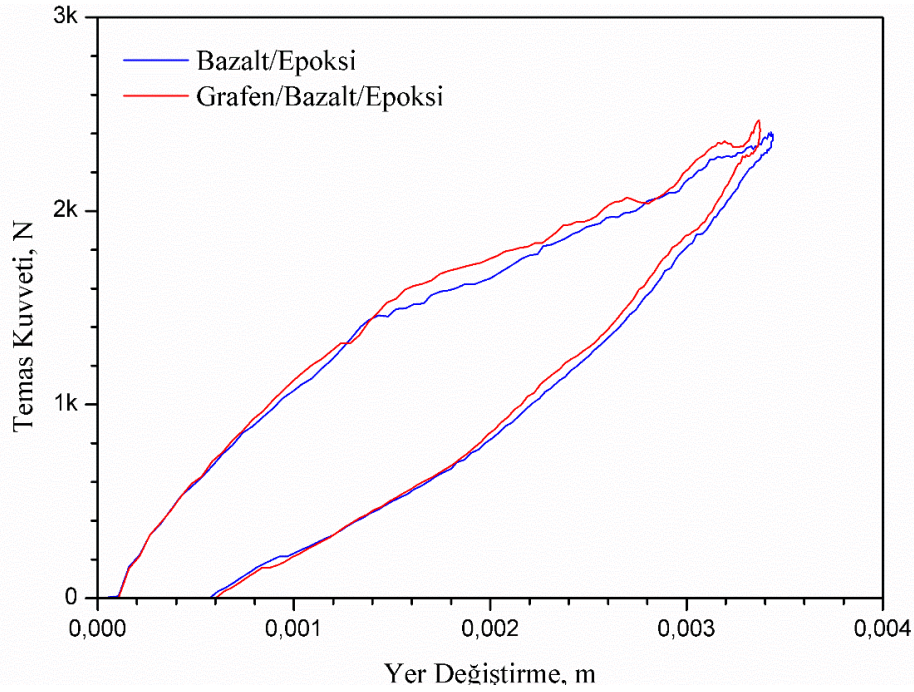


Şekil 7.35 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların 5 J düşük hızlı darbe enerjilerinde elde edilen kuvvet-zaman grafikleri

7.7.2. Temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri

Kompozit yapılarda düşük hızlı darbe etkisini detaylı olarak karakterize etmek için kuvvet-zaman verilerinden kinematik denklemler yardımıyla kuvvet-yer değiştirme grafikleri elde edilebilir. 50 bar iç basınç altında 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların temas kuvveti - yer değiştirme eğrileri Şekil 7.36’ da verilmiştir. Darbe testi öncesinde ilk hızı sıfır olan vurucu, bırakıldığı yükseklikten numunenin yüzeyine doğru hızlanarak

numuneye temas eder ve numune üzerinde bir çökmeye neden olur. Bu çökme değeri, vurucunun numune yüzeyinden ilerlediği yer değiştirme büyüklüğünü verir. Numune yüzeyinde vurucunun hızı sıfır oluncaya kadar yer değiştirme büyüklüğü artarak devam eder. 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularda absorbe edilen enerji, temas kuvveti, rijitlik ve yer değiştirme değerleri Çizelge 7.6’ da verilmiştir.



Şekil 7.36 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların 5 J düşük hızlı darbe enerji değerlerinde elde edilen kuvvet–yer değiştirme grafikleri

Grafen takviyeli ve takviyesiz boruların darbe esnasında vurucu ile toplam etkileşim süreleri yaklaşık 0.0086 s olarak bulunmuştur. Temas kuvveti, bu çok kısa süre içerisinde borular üzerinde bir implus (itme, $I= F\Delta t$) meydana getirir. Darbe esnasında vurucunun etki gücündeki değişim; yani momentum değişimi ($\Delta P=m\Delta V$, kg.m/s^2) implus’ a eşittir ($I=\Delta P$). Toplam implus, kuvvet-zaman eğrisinin altında kalan alan ile hesaplanabilir. Grafen takviyesi, bazalt/epoksi boruların toplam implus (N.s) değerinde çok az bir düşüğe neden olmuştur. Bu sonuç, absorbe edilen enerjinin de azalacağını göstermektedir. Çünkü toplam implus ve absorbe edilen enerji, darbe öncesi ve sonrası vurucunun kinetik enerjisindeki değişim ile ilgilidir.

Çizelge 7.6 ve Şekil 7.36’ da verilen darbe test sonuçlarına göre, 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi borularda temas kuvveti, grafen takviyesi ile sınırlı bir artışa sebep olmuştur. Bu sonuç, bazalt/epoksi boruların darbe etkisine göstermiş olduğu direncin, grafen takviyesi ile kısmen arttığını göstermektedir.

Çizelge 7.6 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, aksenal: 49 MPa) iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularda elde edilen absorbe edilen enerji, temas kuvveti, rijitlik ve yer değiştirme değerleri

	Toplam Impuls	Absorbe Edilen Enerji	Eğilme Rijitliği	Temas Kuvveti	Yer Değiştirme
Boru Türü	(N.s)	(J / %)	(N/m)	(N)	(m)
Bazalt/Epoksi	2681.16	2.088 / 41	694916	2407.04	0.0034
Grafen/Bazalt/Epoksi	2646.16	1.998 / 39	725797	2467.91	0.0033

Kuvvet-yer değiştirme eğrisinin birinci evresinin eğimi “eğilme rijitliği” olarak adlandırılır (Abrate, 1998; Sayer, 2009). Eğilme rijitliği, numunenin düşük hızlı darbeye gösterdiği dayanımın büyüklüğüdür. Düşük hızlı darbe sonucunda tabakalar arası kayma gerilmesi ile oluşan delaminasyon hasarı, eğilme rijitliği ile ilişkilendirilebilir (Sachse ve ark., 2012). Kompozit tabakalarda meydana gelen enine/çapraz çatlaklar, matris çatlakları ve diğer lokal hasarlar gibi hasar oluşumları darbe esnasında kuvvet-yer değiştirme grafiğinin eğiminden anlaşılabilir (Fu ve ark., 2008). Tabakalı kompozit malzemelerde eğilme rijitliğinin azalması delaminasyon hasarının şiddetini ve büyüklüğünü arttırabilir (Ulus ve ark., 2014). Bu ifadeler neticesinde, grafen takviyeli ve takviyesiz boruların eğilme rijitlik değerleri karşılaştırılarak grafen takviyesinin etkisi yorumlanabilir. Grafen takviyesi ile bazalt/epoksi boruların eğilme rijitliği artmıştır. Delaminasyon hasarı, elyaf/matris arasındaki arayüzey yapışmasının ve matrisin özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkar. Grafen takviyesinin, elyaf/matris arayüzey yapışmasını arttırarak delaminasyon hasarına neden olan tabakalar arası kayma dayanımını artmıştır. Ayrıca grafen takviyesi, matrise gelen darbe yüklerinin elyafa aktarılmasında ve matris/elyaf arasındaki yük paylaşımında görev yapar. Bundan dolayı, bazalt/epoksi boruların darbe yükü altında şekil değiştirme yeteneği gelişir ve eğilme rijitliği artar. Bu sonuçlar ile Bölüm 7.1’ de anlatılan grafen takviyeli epoksi matrisin mekanik özelliklerinin geliştirildiği sonuçlar tutarlıdır. Çünkü tabakalar arası kayma dayanımı matrisin özelliklerine bağlıdır.

Düşük hızlı darbe testlerinde elde edilen temas süresi, takviyeli epoksi matrisin özelliklerinden etkilenmez (Ulus ve ark., 2016). Şekil 7.35’ te verilen bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların kuvvet-zaman eğrileri karşılaştırıldığı zaman vurucu ve numune arasındaki temas süresinin, grafen takviyesinden etkilenmediği söylenebilir.

Kuvvet- zaman ya da kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde görülen zig-zag şeklindeki iniş ve çıkışlar, darbe bölgesinde çeşitli hasarların oluştuğunu ifade eder (Wang ve Vu-Khanh, 1994). Bu zig-zag hareketi, darbe süresi boyunca numune yüzeyinde temas kuvvetinin yer değiştirme miktarına karşı yükselip azalmasını gösterir. Kara, temas kuvvetindeki bu

salınımların etkisi ile darbe hasarlarının meydana geldiğini ve geliştiğini ifade etmiştir (Kara, 2006). Şekil 7.35’ te bazalt/epoksi borulara göre, grafen/bazalt/epoksi boruların temas kuvveti- yer değiştirme eğrilerinde görülen zig-zag şeklindeki iniş ve çıkışlar daha azdır. Bu tespit ile, darbe sonrası bazalt/epoksi borularda oluşan lokal hasarların, delaminasyon ve matris çatlak hasarlarının grafen takviyesi ile azaldığı yorumu yapılabilir.

Darbe testinde vurucunun numuneye temas anında vurucunun sahip olduğu kinetik enerji ile maksimum temas kuvvetine sahip olduğu andaki vurucunun kinetik enerjisi arasındaki fark, numunelerin absorbe ettikleri enerjiyi verir (Ajayan ve ark., 2006). Kuvvet-yer değiştirme grafiğinin yükleme evresinde darbe enerjisi numune tarafından absorbe edilir. Absorbe edilen enerji numunenin rezilyansından küçük ise, bu enerji numune ve vurucu arasındaki sürtünmeye ve numunenin elastik olarak deforme edilmesine harcanır. Eğer büyük ise, sürtünme ve elastik deformasyona harcanan enerji sonrasında kalan enerji plastik deformasyon ve/veya hasar oluşumu için absorbe edilecektir. Epoksi gibi termoset matrise sahip kompozit malzemeler genellikle gevrek kırılma karakteristiğinde oldukları için, bu tür kompozitler yük altında mikro çatlak oluşumu ve gelişimi gibi hasar oluşum mekanizmaları gösterebilir (Fu ve ark., 2008; Sachse ve ark., 2012). Çalışmada kullanılan borular grafen takviyeli ve takviyesiz epoksi matris ile üretilmiştir. Grafen/bazalt/epoksi boruların darbe esnasında absorbe ettikleri enerji yüzdesi, bazalt/epoksi borularınkinden daha düşüktür. Grafen takviyeli borularda absorbe edilen enerji miktarının azalması, yapıda oluşan hasarın azaldığını ifade eder. Sonuç olarak takviyesiz borulara göre, grafen takviyeli bazalt/epoksi boruların darbe bölgesinde daha az darbe hasarlarının oluştuğu kanısına varılmıştır.

7.7.3. Kompozit boruların 5 J düşük hızlı darbe hasar incelemesi

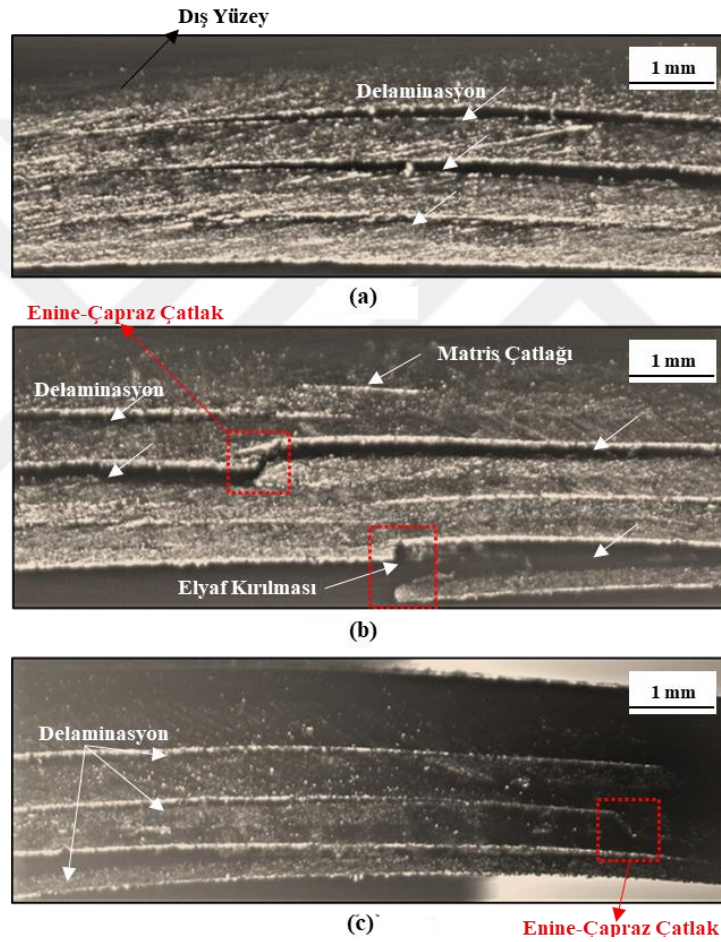
Darbe hasarlı grafen takviyeli ve takviyesiz boruların eksenine dik kesitlerinde meydana gelen hasarlar Şekil 7.37 ve 7.38’ de verilmiştir.

Darbeye maruz kalmış elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde görülen hasar çeşitleri; kesme çatlakları (shear cracks) (Gerlach ve ark., 2012), delaminasyon (tabaka ayrılması) (Zhong ve Joshi, 2015), elyaf/matris arayüzey ayrılması (debonding) (Zhong ve Joshi, 2015), elyaf kırılması (fiber fracture) (Bouvet ve ark., 2012), kesme ya da eğilme sonucu oluşan matris çatlakları (matrix crack) (Choi ve ark., 1991a; Greenhalgh, 2009), kompleks hata (complex failure) (Tinô ve Aquino, 2014), enine çatlak (transverse cracks) (Richardson ve Wisheart, 1996), Çatlamış/yarılmış çatlak (Split crack) (Atif ve ark., 2016; Kumari ve Wang,

2018), yüzey deformasyonu (surface deformation) (Greenhalgh, 2009) literatürden tespit edilmiştir.

Darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların darbe hasar bölgesinden borunun eksenine dik kesitinden alınan stereo mikroskop görüntüleri Şekil 7.37’ de verilmiştir.

Darbe hasar bölgesinde delaminasyon, enine çatlaklar ve elyaf kopma hasarları gözlemlenmiştir. Şekil 7.39b’ de, darbe merkezine yakın bölgelerde enine çatlaklar ve elyaf kopması oluşurken darbe merkezinden uzak bölgelerde delaminasyon hasarlarının (Şekil 7.37a ve Şekil 7.37b) ortaya çıktığı görülmüştür.

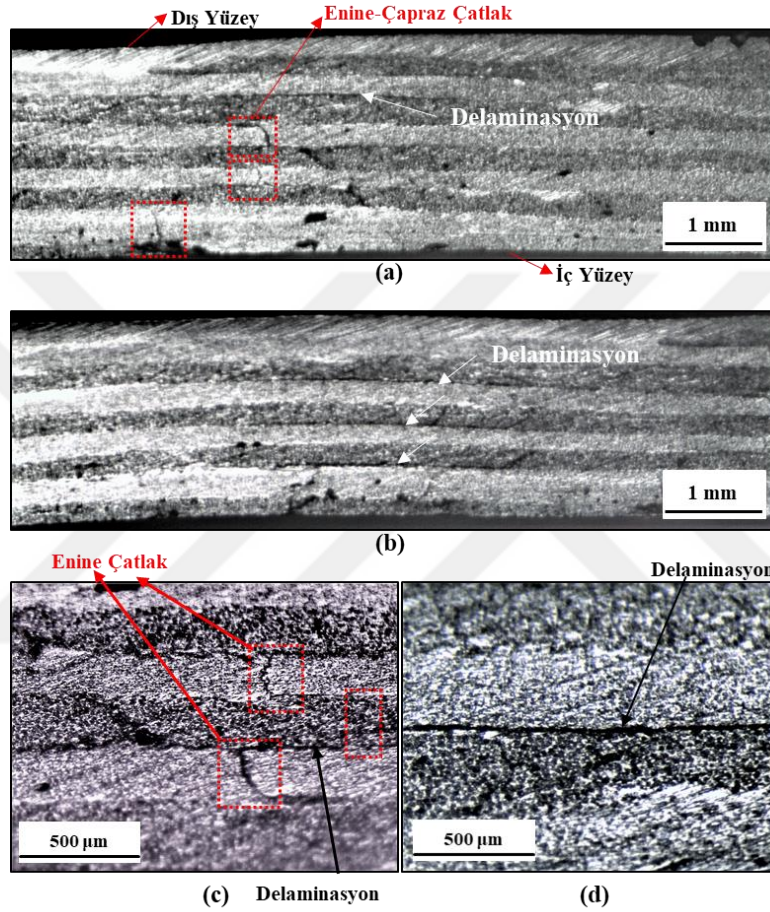


Şekil 7.37 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit görüntüleri; a) darbe merkezinin solundan, b) darbe merkezinden, (c) darbe merkezinin sağından

Darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların darbe hasar bölgesinden borunun eksenine dik kesitinden alınan stereo mikroskop görüntüleri Şekil 7.38’ de verilmiştir.

Grafen/bazalt/epoksi boruların darbe hasar bölgesinde delaminasyon ve enine çatlak hasarları meydana gelmiştir; ancak elyaf kopma hasarı görülmemiştir. Ayrıca, grafen/bazalt/epoksi boruların darbe etkisi ile oluşan hasarların borunun eksenine dik kesitinde

oluşma oranı bazalt/epoksi borununkine göre daha azdır (Şekil 7.38). Sonuç olarak; grafen takviyesi, borunun eksenine dik kesitindeki darbe hasarının oluşum miktarını azaltıcı rol oynamıştır. Grafen takviyesi için seçilen ağırlıkça %0.25 olan tek takviye oranı, epoksi matrisin çentikli darbe tokluk ve eğilme dayanım değerlerini arttırması yukarıda anlatılan sonuçların nedeni olarak gösterilebilir.



Şekil 7.38 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların eksenine dik kesitinden alınan darbe hasar bölgesinin görüntüleri; a) darbe merkezinin sağından, b) darbe merkezinin solundan, (c) enine çatlaklar ve delaminasyon hasarları, (d) delaminasyon hasarı

Ulus ve ark., nano boyuttaki takviyelerin epoksi matrise eklendiği zaman genel olarak mekanik özelliklerini arttırdığını söylemiş ve düşük hızlı darbe testlerinde görülen delaminasyon hasarının, matrisin mekanik özelliklerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Delaminasyon hasarlarının tabakalar arası kayma gerilmesi ile oluştuğunu ve nano boyuttaki takviyelerin delaminasyon hasarını geciktirerek, kritik kayma gerilme değerini arttırabileceğini bildirmişlerdir (Ulus ve ark., 2014). Yapılan çalışmada elde ettiğimiz bulgular, bu bilgiler ile örtüşmektedir. Grafen takviyesi, tabakalar arası kayma dayanımını arttırarak bazalt/epoksi boruların eksenine dik kesitinde oluşan delaminasyon hasarının büyüklüğünü azaltmıştır.

7.8. Yorulma Testleri ve Sonuçları

Bu çalışmada düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonuna sahip bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma testleri (frekans; 0.42 Hz, gerilme oranı; $R = 0.05$) gerçekleştirilerek yorulma davranışları incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, hasarsız bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçlarından elde edilen σ -N ve σ -Log N eğrileri, borularda ilk hasar belirtisi olan terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının ortaya çıktığı çevrim sayılarına göre çizilmiştir. Yorulma testleri, boruların iç basınç testinde elde edilen terleme hasarının ortaya çıktığı maksimum teğetsel gerilmenin (σ_{t_max}) %60, %50, %40, %35 ve %30 oranlarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, 5 J değerinde düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçlarından elde edilen σ -N ve σ -Log N eğrileri, darbe hasar bölgesinde sızma hasarının ortaya çıktığı çevrim sayısına göre çizilmiştir. Darbe hasarından kaynaklanan ve kısa yorulma ömrü ile sonuçlanan (%40 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında ortalama 5 çevrim) yorulma testleri için yeterli yorulma çevrim sayısına ulaşmak amacıyla, hasarsız borulardan farklı olarak %40, %35, %30, %25 ve %20 σ_{t_max} yorulma yükleme oranları seçilmiştir.

7.8.1. Darbe hasarsız grafen takviyeli ve takviyesiz kompozit boruların yorulma test sonuçları

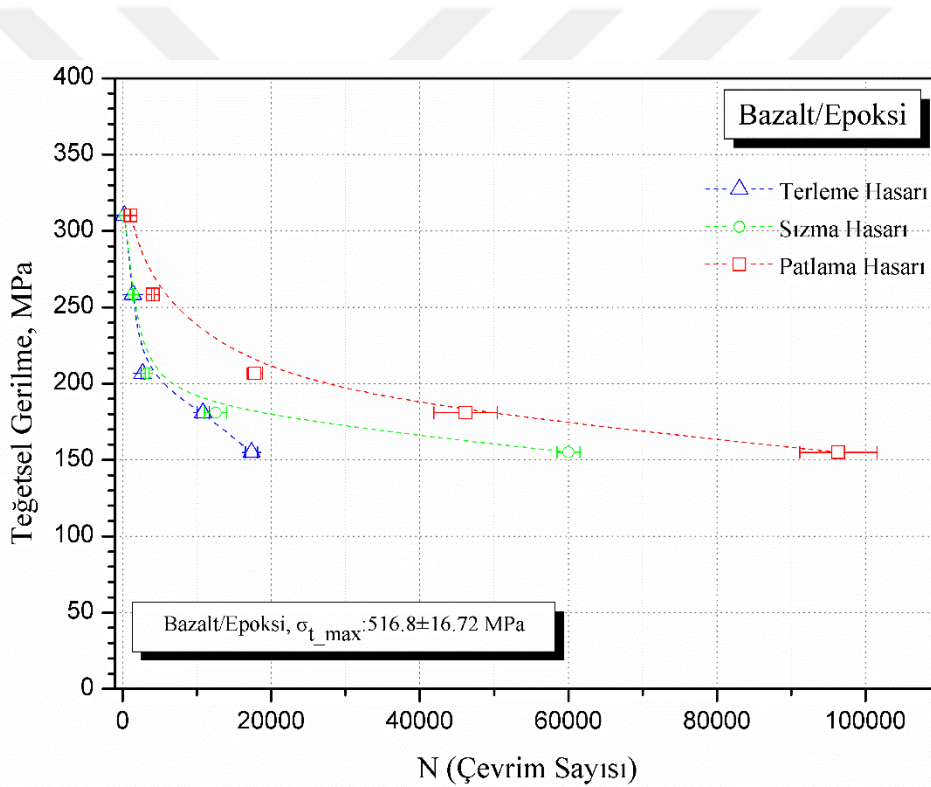
Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma testlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 7.41, 7.42, 7.47 ve 7.48' de verilmiştir.

Bazalt/epoksi boruların %60, %50, %40, %35 ve %30 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında terleme hasarının ortaya çıktığı ortalama yorulma ömürleri sırasıyla, 252, 1407, 2701, 10850 ve 17383 çevrim olarak bulunmuştur. Grafen/bazalt/epoksi borularda yukarıda belirtilen hasar ve yorulma yükleme oranlarına göre ortalama yorulma ömürleri sırasıyla, 396, 1844, 3419, 13613 ve 21405 çevrim olarak tespit edilmiştir.

Bazalt/epoksi boruların %60, %50, %40, %35 ve %30 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında ortalama sızma hasarı için yorulma ömürleri sırasıyla, 293, 1452, 3287, 12554 ve 60018 çevrim olarak elde edilmiştir. Grafen/bazalt/epoksi borularda yukarıda belirtilen hasar ve yorulma

yükleme oranlarına göre ortalama yorulma ömürleri sırasıyla, 503, 2215, 4759, 17782 ve 81476 çevrim olarak tespit edilmiştir.

Yorulma testleri esnasında terleme hasarı, elyaf bantlarının üzerinde ve bitişik iki elyaf bant arasında damlacık şeklinde sızıntı olarak tespit edilmiştir. Yorulma çevrim sayısı arttıkça terleme hasarı yerini sızma hasarına bırakmıştır. Daha sonra çevrim sayısının daha da artması sızma hasarının şiddetini arttırmış ve patlama sonuç hasarına kadar yoğun sızma hasarı devam etmiştir. Daha önce belirtildiği gibi borular, patlama sonuç hasarından önce terleme ve sızma hasarlarına uğrayarak kullanılmaz hale gelmiştir. Bundan dolayı yorulma testlerinden elde edilen σ -N ve σ -Log N eğrileri, terleme ve sızma hasarlarına göre çizilmiştir. Ayrıca, elyaf kopması ile sonuçlanan patlama sonuç hasarlarının σ -N ve σ -Log N eğrileri de grafiklerde verilmiştir.



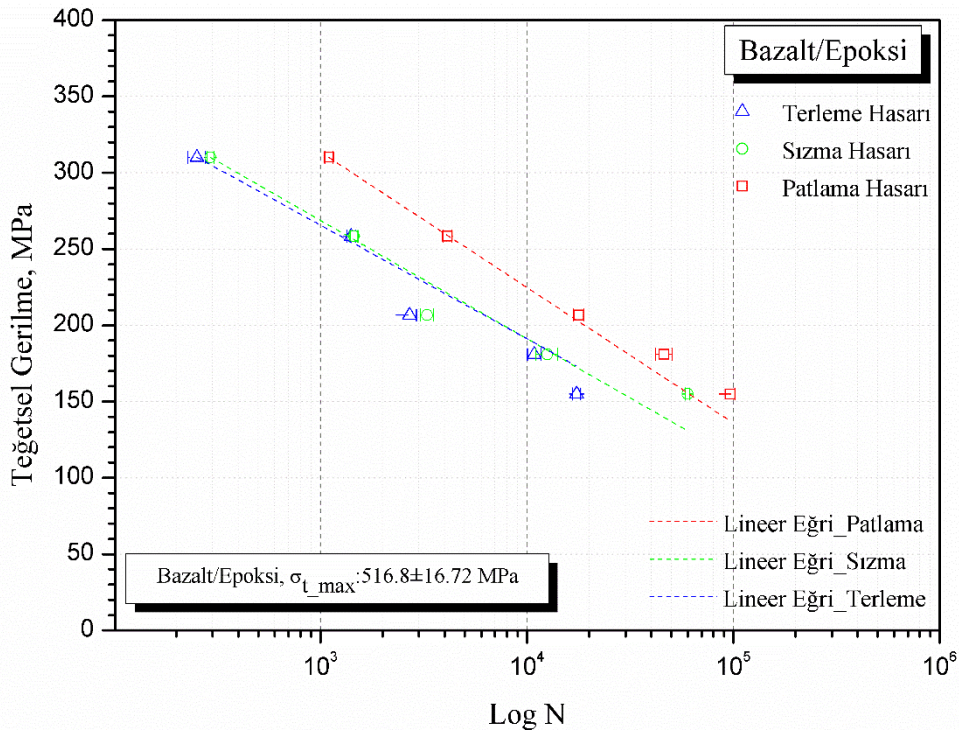
Şekil 7.39 Bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test sonuçları; terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarına ait σ – N eğrileri

Şekil 7.39 ve 7.47' de görüldüğü gibi, %60 %50, %40 ve %35 σ_{tmax} yüklem oranlarında yapılan testler sonucunda terleme ve sızma hasarlarının ortaya çıktığı çevrim sayılarının birbirlerine yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak, yukarıdaki diğer yüklem oranlarına göre, %30 σ_{tmax} yüklem oranındaki yorulma testinde yorulma gerilme aralığının (σ_{min} ve σ_{max}) daha düşük olmasından dolayı terleme ve sızma hasar çevrim sayılarının birbirlerinden uzak olduğu bulunmuştur.

$\%60\sigma_{t_{max}}$ ' dan $\%35\sigma_{t_{max}}$ ' a doğru azalan yükleme oranlarında patlama hasar çevrim sayısı ile terleme ve sızma hasar çevrim sayıları arasındaki farkın gittikçe açıldığı tespit edilmiştir.

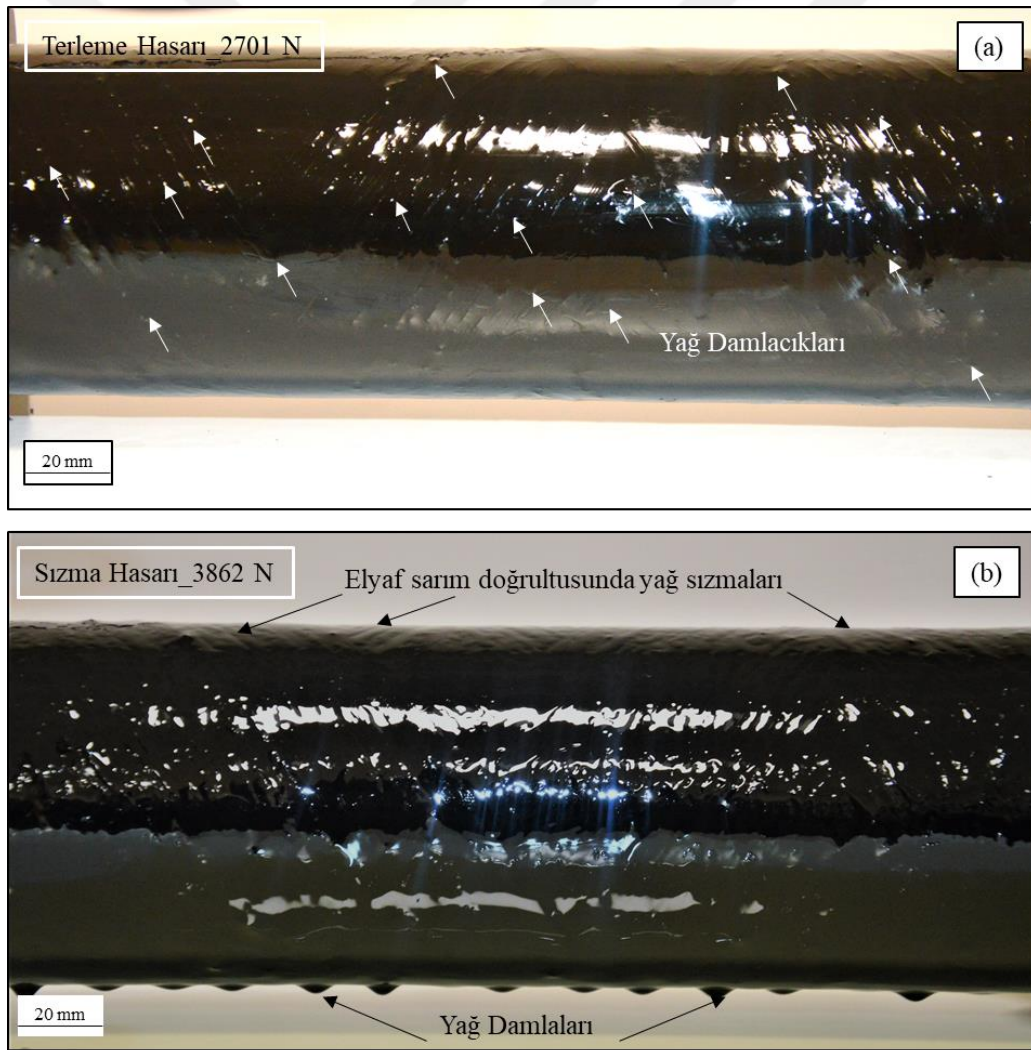
Bazalt/epoksi boruların $\%60$, $\%50$, $\%40$, $\%35$ ve $\%30\sigma_{t_{max}}$ yorulma yükleme oranında ortalama patlama ömürleri sırasıyla, 1097, 4125, 17815, 46168 ve 96341 çevrim olarak elde edilmiştir.

Grafen/bazalt/epoksi borularda yukarıda belirtilen yorulma yükleme oranlarına göre ortalama yorulma ömürleri sırasıyla, 1299, 7171, 35200, 99140 ve 356127 çevrim olarak bulunmuştur. Demirci, bazalt/epoksi borular için serbest-uçlu koşullarda değişken iç basınç altında yorulma testlerini gerçekleştirmiştir. $\%60$, $\%50$, $\%40$ ve $\%30\sigma_{t_{max}}$ yorulma yükleme oranlarında patlama yorulma ömürlerini sırasıyla; 1569, 7228, 38631 ve 223969 çevrim olarak bulmuştur (Demirci, 2015). Yapılan çalışmada, serbest-uçlu koşullarda iç basınç altında yorulma testlerine göre, kapalı-uçlu koşullarda gerçekleştirilen yorulma testlerinde bazalt/epoksi boruların ömürlerinin daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Bunun temel nedeni, serbest-uçlu test koşullarında oluşmayan; ancak kapalı-uçlu test koşullarında oluşan eksenel gerilme etkisidir. Başka bir deyişle, serbest-uçlu test koşullarına göre kapalı-uçlu test koşullarında oluşan ve Şekil 7.43b' de gösterilen eksenel gerilmenin etkisi ile elyafa dik çekme ve elyafa paralel kayma gerilme değerlerinin daha yüksek olmasıdır.



Şekil 7.40 Bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test sonuçları; terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarına ait $\sigma - \text{Log } N$ eğrileri

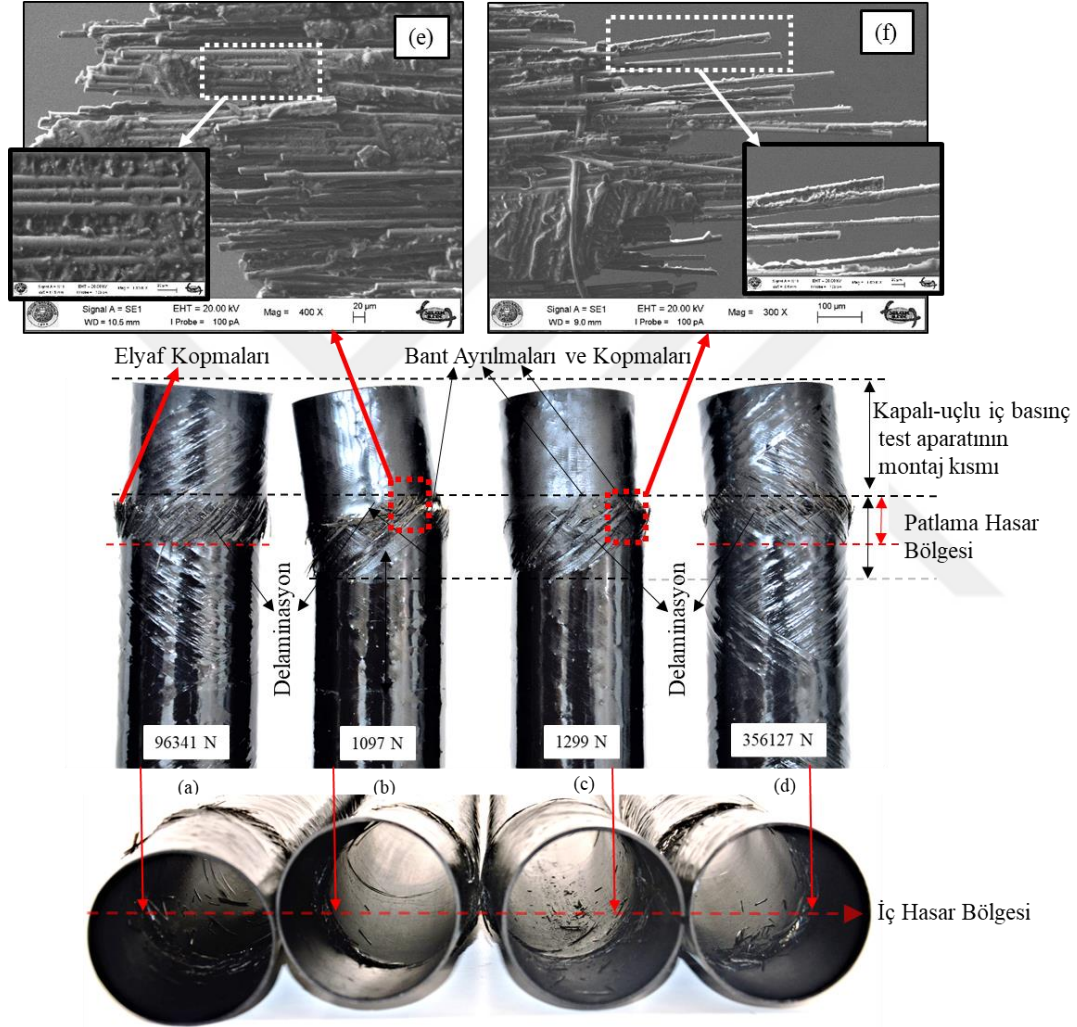
Yorulma yükleme oranı arttıkça yorulma ömrünün logaritmik olarak azaldığı Şekil 7.40 ve 7.47' de görülmektedir. Bunun ana nedeni, teğetsel ve aksenal gerilme artışı ile boruların çapında ve boyunda meydana gelen şekil değişim oranının daha fazla olmasıdır. Bununla birlikte, tekrarlı değişken iç basıncın etkisiyle zorlanan kompozit tabakalarında homojen olmayan şekil değişimleri meydana gelmektedir. Teğetsel ve aksenal gerilmelerin elyafa dik ve paralel bileşenleri, tabakalarda çatlak oluşumunu ve gelişimini hızlandırmaktadır. Terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarına neden olan birikimli hasar oluşumu (zaman içinde hasarın büyümesi), boruların rijitliğini azaltarak yorulma ömürlerini kısaltır. σ -Log N yorulma eğrilerinin eğimi, farklı malzemelerin yorulma ömrünün kıyaslanması açısından kullanılabilir (Joseph ve Perreux, 1994; Kujawski ve ark., 1996; Kujawski ve ark., 1998; Martens ve Ellyin, 2000; Kaynak ve Mat, 2001).



Şekil 7.41 Bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test hasarları; (a) $40\sigma_{t,max}$ yorulma yükleme oranında 2701 çevrim sonunda başlayan terleme hasarı, (b) $50\sigma_{t,max}$ yorulma yükleme oranında 3862 çevrim sonunda devam eden sızma hasarı

Bazalt/epoksi borunun $40\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 2701 çevrim sonunda oluşan terleme hasar fotoğrafı Şekil 7.41a’ da verilmiştir. $50\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 3862 çevrim sonunda bazalt/epoksi boruda devam eden sızma hasarı ise, Şekil 7.41b’ de gösterilmiştir.

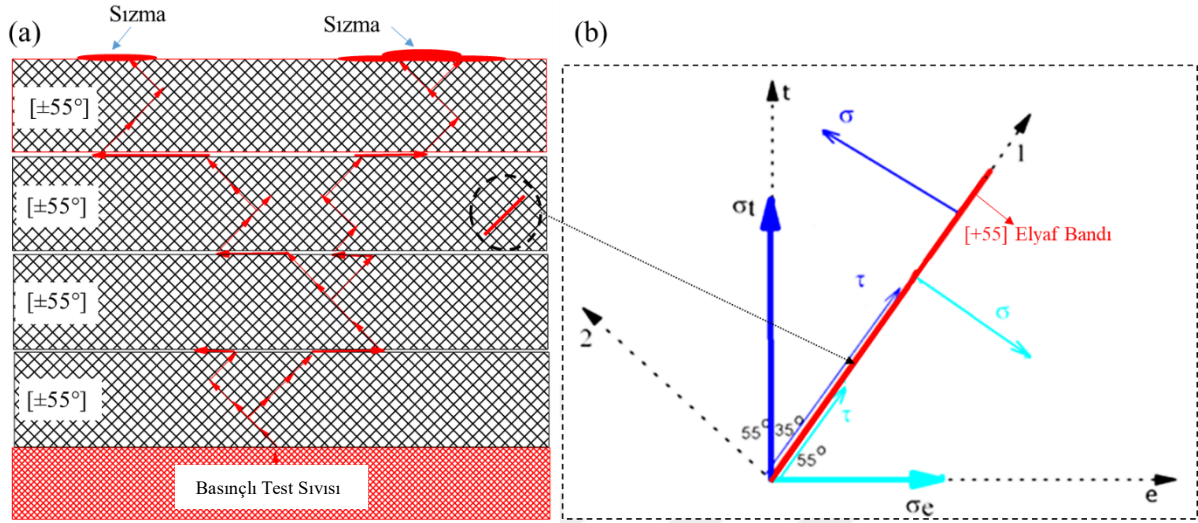
Yorulma testleri sonrasında borularda ortaya çıkan patlama sonuç hasarları Şekil 7.42’ de resimlerle örneklendirilmiştir. $60\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 1097 çevrim sonunda



Şekil 7.42 Boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma testi sonunda patlama sonuç hasarları; (a) bazalt/ epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 96341 çevrim sonuç hasarı, (b) bazalt/ epoksi boruların $60\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 1097 çevrim sonuç hasarı, (c) grafen/bazalt/ epoksi boruların $60\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 1299 çevrim sonuç hasarı, (d) grafen/bazalt/ epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 356127 çevrim sonuç hasarı, (e) bazalt/epoksi yorulma sonrası patlama sonuç hasar bölgesinden alınan elyaf kopma hasarının SEM görüntüsü, (f) grafen/bazalt/epoksi yorulma sonrası patlama sonuç hasar bölgesinden alınan elyaf kopma hasarının SEM görüntüsü

oluşan patlama sonuç hasarlı bazalt/ epoksi borular Şekil 7.42a’ da gösterilmiş ve aynı numunenin $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 96341 çevrim sonunda oluşan patlama sonuç hasarı ise, Şekil 7.42b’ de verilmiştir. Grafen/bazalt/ epoksi boruların $60\sigma_{t_max}$ yorulma

yükleme oranında 1299 çevrim sonunda oluşan patlama sonuç hasarı Şekil 7.42c’ de verilmiş ve aynı numunenin $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 356127 çevrim sonunda oluşan patlama sonuç hasarı ise, Şekil 7.42d’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.43 (a) Yorulma testi boyunca elyaf/matris arayüzeyi ayrılması (debonding), tabaka ayrılması (delaminasyon) ve matris çatlaklarından borunun iç yüzeyinden dış yüzeyine doğru basınçlı test sıvısının izlediği yolun şematik gösterimi, (b) $+55^\circ$ elyaf bandına dik oluşan çekme ve paralel oluşan kayma gerilmeleri

İç basınç yorulma etkisi ile elyafların teğetsel ve aksenal doğrultuda değişken yüklem sonucu Şekil 7.43b’ de şematik gösterilen \pm elyaf bantlarının kesiştiği noktalarda elyafa dik (çekme) ve paralel (kayma) gerilmeler oluşmuştur. Değişken iç basınç etkisiyle oluşan gerilmeler (σ_{min} ve σ_{max}) elyaf bantlarını yer değiştirmeye zorlamaktadır. Bu etki sonucunda terleme, sızma ve patlama sonuç hasarları, borularda ortaya çıkmıştır.

Yorulma sonrası, borularda tespit edilen terleme ve sızma hasarlarının oluşumu, matris çatlakları, tabaka ayrılması (delaminasyon), elyaf/matris ayrılması (debonding) ile enine ve/veya çapraz çatlak mekanizmalarının yapıda meydana gelerek ve bu mekanizmaların birbirleri ile etkileşimi sonucunda basınçlı test sıvısının takip edebileceği bir sızıntı yolunun oluşmasıdır. Bu sızıntı yolu şematik olarak Şekil 7.43a’ da gösterilmiştir. Patlama sonuç hasarının, kapalı-uçlu iç basınç koşullar altında oluşan gerilme yığılma bölgesinde olduğu Bölüm 7.5’ te izah edilmişti. Borularda, terleme ve sızma hasarlarına neden olan hasar mekanizmaları oluştuğundan sonra gerilme yığılma bölgesindeki elyaf bantlarının ayrılması, elyaf kopması ve elyaf sıyrılması şeklinde oluşan hasarlarla birlikte patlama sonuç hasarının olduğu görülmüştür.

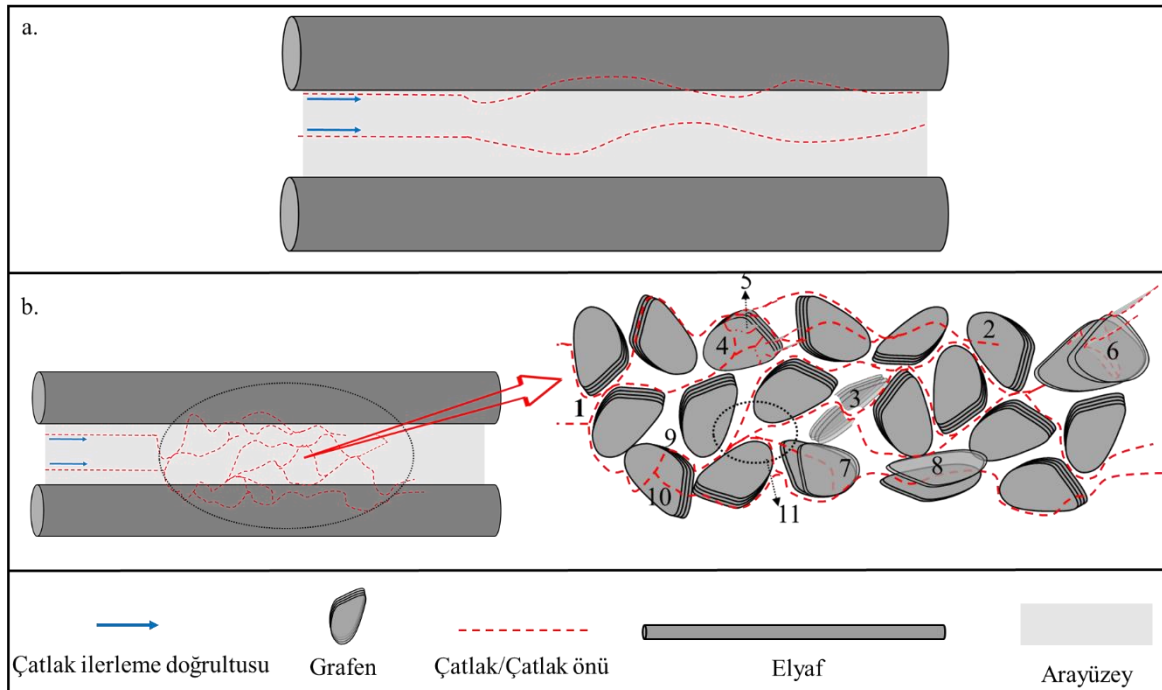
Şekil 7.42’ de görüldüğü gibi, düşük yüklem oranlarına göre, yüksek yüklem oranlarında patlama sonuç hasarı daha şiddetli bir şekilde ortaya çıkmış ve elyaf bantlarını ayırarak borunun gövde kısmına doğru ilerlemiştir. Yorulma testinde yüksek gerilme

oranlarında meydana gelen yüksek teğetsel ve aksel gerilme değerleri, düşük gerilme oranlarında oluşan gerilmelere göre daha büyüktür. Gerilmenin büyük olduğu bölgede oluşan çatlaklar, tekrarlı değişken gerilmeler etkisi ile ilerleyerek sonuç hasarına ulaşılmasını sağlayabilir. Ayrıca, gerilmenin artması, borunun çapındaki şekil değişimini arttırarak boru yüzeyinde meydana gelen patlama sonuç hasar alanını genişletmiştir.

Elyaf/matris arayüzeyinde meydana gelen kırılma mekanizmaları Şekil 7.44' te şematik olarak verilmiştir. Elyaf/matris arayüzeyinde grafen takviyesinin bulunmadığı durumda bir çatlakın hızlı bir şekilde ilerleyerek arayüzey çatlaklığı oluşturabileceği Şekil 7.44a' da şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 7.44b' de grafen takviyeli bir matriste elyaf/matris arayüzeyinde çatlak/grafen etkileşimleri sunulmuştur. Takviyesiz borulara göre, grafen takviyeli borularda yorulma testi sonrası ortaya çıkan terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının sonuç çevrim sayılarındaki artışın nedenlerini yorumlayabilmek için elyaf/matris arayüzeyinde grafen etkisinin incelenmesi gerekmektedir.

Şekil 7.44b' de gösterildiği gibi, elyaf üzerinde bulunan bir grafen, çatlak doğrultusuna paralel, dik ve ya açılı bir konumda bulunabilir. Eğer bir çatlak, bazalt elyaf/matris arayüzeyinde grafen ile karşılaşır ise, Şekil 7.5' te 1-11 sayıları ile anlatılan grafen/çatlak etkileşim mekanizmaları meydana gelebilir.



Şekil 7.44 Bazalt elyaf ve grafen/epoksi matris arayüzeyinde çatlak ilerleme modellerinin şematik gösterimi; (a) elyaf ve takviyesiz matris arayüzeyi (b) elyaf ve grafen takviyeli matris arayüzeyi

Yorulma testi sonunda oluşan patlama sonuç hasarında ortaya çıkan elyaf kopma ve sıyrılma hasarlarının SEM görüntüleri Şekil 7.42e ve 7.42f' de verilmiştir. Şekil 7.42e' de elyaf ile matris arasında zayıf ara yüzey kopması gözlemlenmiştir. Şekil 7.42e' de gösterilen bazalt elyafın düz ve pürüzsüz sayılabilecek hasar yüzeyi, zayıf arayüzey yapışmasını ifade eder. Bu zayıf arayüzey bağlantısından dolayı elyaf/matris arayüzeyinde çok sayıda debonding hasarının meydana geldiği yorumlanmıştır.

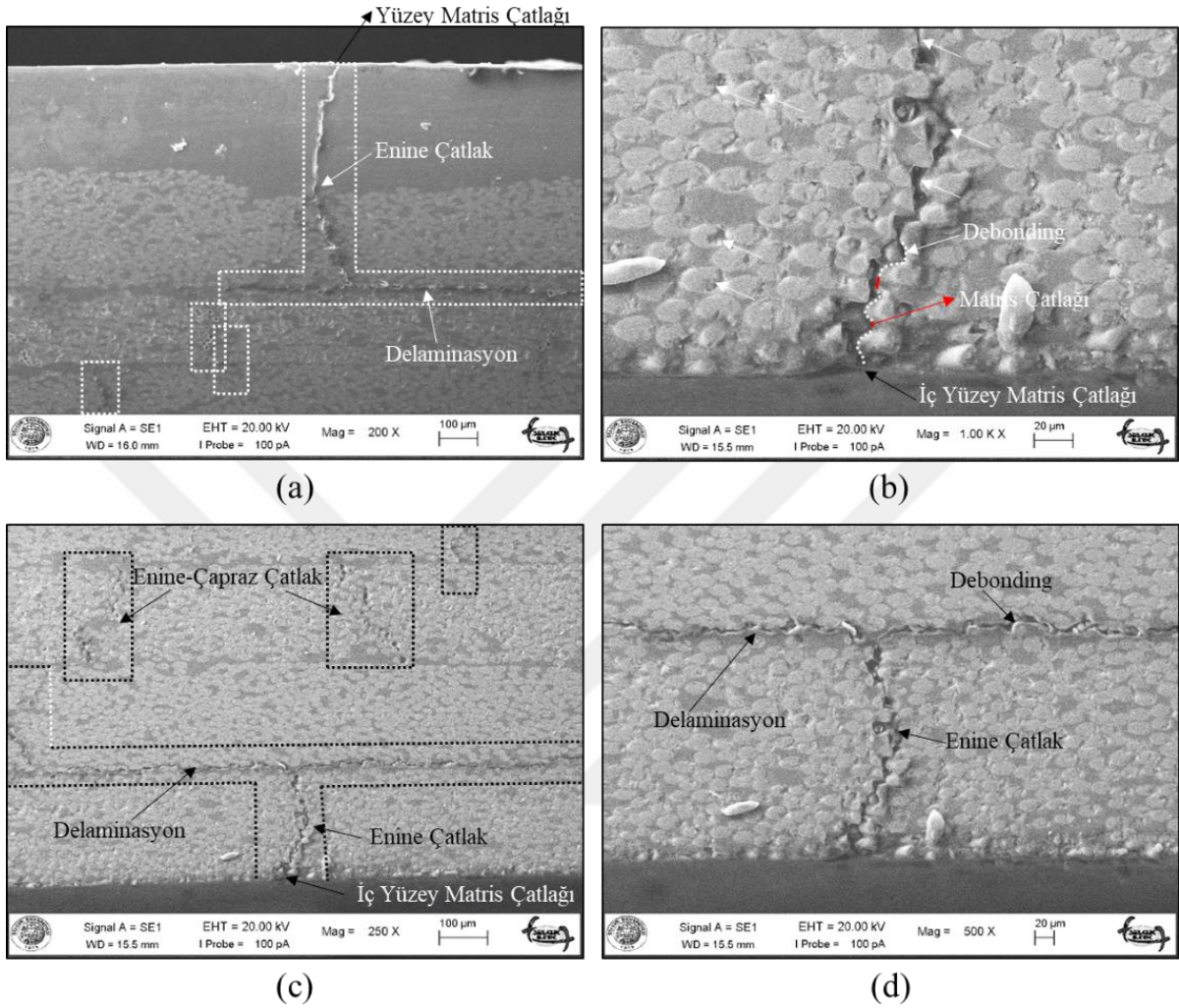
Stankovich ve ark. ve Ramanathan ve ark. yaptıkları çalışmalarda, elyafların grafen takviyeli matristen sürtünme ile çekilerek sıyrılma (frictional pull-out) mekanizması oluşturması sonucunda elyaf/matris arayüzey yapışmasının geliştiğini söylemişlerdir (Stankovich ve ark., 2006; Ramanathan ve ark., 2008). Bu çalışmaların bulguları ile yapılan çalışmanın bulgularını tutarlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bazalt/epoksi boruların yorulma ömründeki artışın nedeni, epoksi matris ve grafenin güçlü arayüzey bağı oluşturması ile bazalt elyafın grafen/epoksi matrisinden sürtünme yoluyla çekilerek sıyrılması şeklinde olduğu Şekil 42f' te pürüzlü elyaf yüzeylerinden tespit edilerek anlaşılmış ve yorumlanmıştır.

Wetzel ve ark., matriste var olan bir çatlakın grafen gibi rijit bir takviye ile karşılaşması sonucunda çatlakın bükülerek yoluna devam edebileceğini ifade etmiştir (Wetzel ve ark., 2006). Bu ifade çatlak sapma mekanizmasını tanımlar. Grafen takviyeli bazalt/epoksi boruların yorulma ömründeki artışın muhtemel diğer bir nedeni ise çatlak sapma mekanizmasıdır. Şekil 7.44' te açıklanan çatlak sapma mekanizmasının oluşması elyaf/matris arasında kuvvetli arayüzey bağının olduğunu göstermektedir.

Boruların yorulma testleri sonucunda elyaf kopması ve sıyrılması olarak oluşan patlama sonuç hasarı, gerilme yığılma bölgesinde sınır koşul şartları altında oluşmaktadır. Patlama sonuç hasarlı boruların eksenine dik doğrultudaki elyaf hasarsız kısımlarından alınan kesitler SEM ile incelenmiştir. $0.3\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 96341 çevrim sonunda oluşan patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi borunun eksenine dik doğrultudaki kesitinde oluşan hasarlara ait SEM görüntüleri Şekil 7.45a, 7.45b, 7.45c ve 7.45d' de verilmiştir. Bu hasarlar, iç ve/veya dış yüzey matris çatlakları, delaminasyon, enine/çapraz çatlaklar olarak tespit edilmiştir. Teğetsel ve eksenel gerilme etkisinde debonding ve matris çatlaklarının birleşmesiyle oluşan $+55^\circ$ sarım açılı elyaf bantlarında meydana gelen enine çatlak oluşumu Şekil 7.45b' de gösterilmiştir.

Şekil 7.45' te gösterilen hasar mekanizmaları yoluyla basınçlı test sıvısının, iç yüzey matris çatlakları ve debonding ile oluşan enine çatlak vasıtasıyla tabakalar arasında oluşan delaminasyon hasarına gelmiştir. Daha sonra, delaminasyon hasarı ile elyaf bantları arasında sızıntı yolu oluşturarak elyaf bantlarının açılma hareketi sonucunda dış yüzeyde oluşan mikro

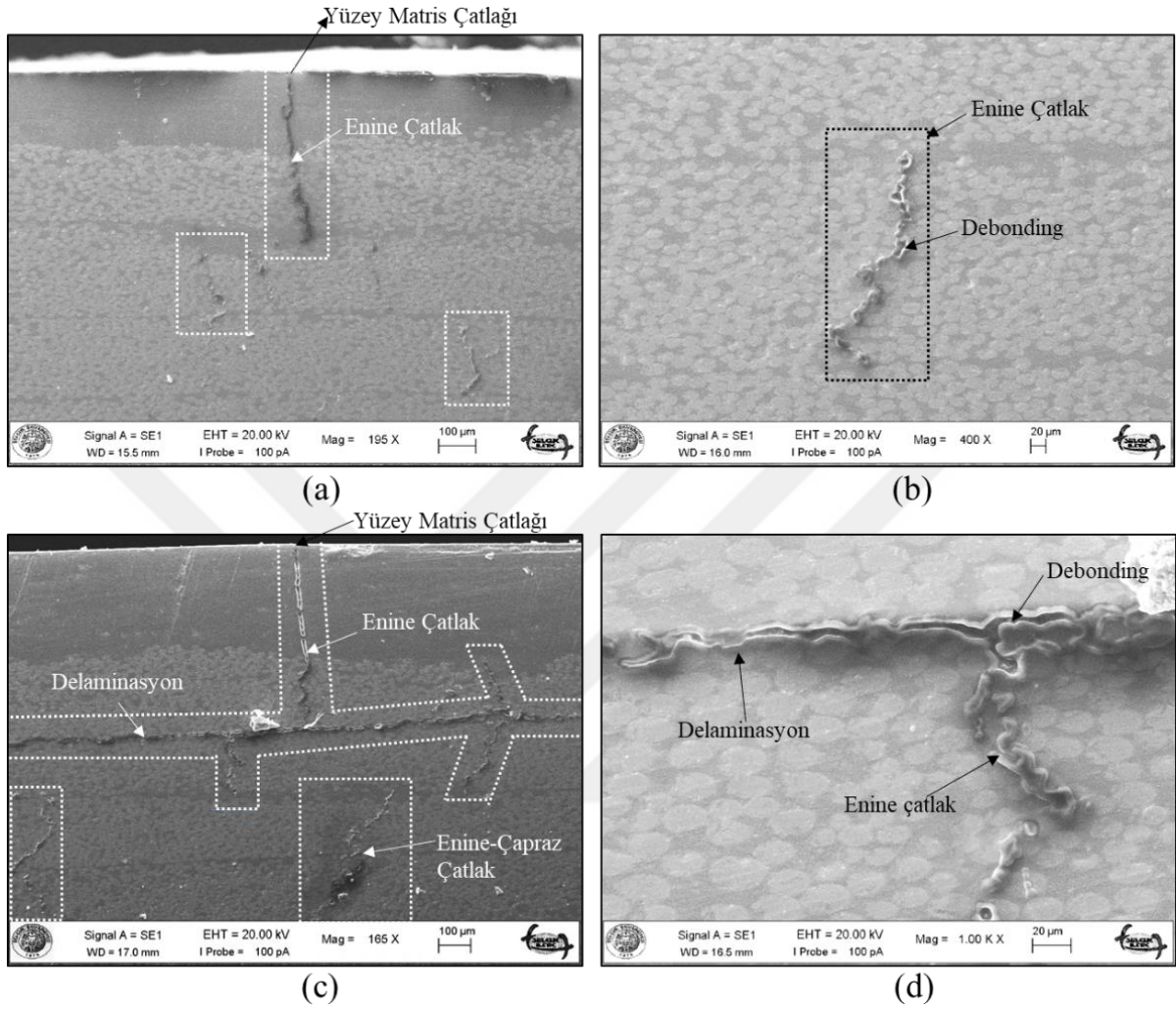
çatlaklardan sızıntı oluşumu (iğne ucu kadar) ile ilk hasar olan terleme hasarı meydana geldiği yorumlanmıştır.



Şekil 7.45 %30 $\sigma_{t,max}$ yorulma yükleme oranında 96341 N sonunda patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi boruların eksenine dik doğrultudaki kesitlerinden alınan SEM görüntüleri; (a) 200X büyütmede yüzey matris çatlağı, delaminasyon ve enine çatlak hasarları (b) 1000X büyütmede iç yüzey matris çatlağı, debonding ve matris çatlağı hasarları, (c) 250X büyütmede iç yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlaklar ve delaminasyon hasarları, (d) 500X büyütmede enine çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları

Terleme hasarı sonrası artan yorulma çevrimleri etkisinde boruların üzerinde elyaf/matris arayüzey ayrılmasıyla oluşan elyaf doğrultusuna paralel yönde çizgisel beyazlaşmalar görülmüştür. Bu çizgisel beyazlıklar, boru yüzeyinde elyafa paralel oluşan mikro çatlakların yorulma çevrimi etkisinde birleşerek ortaya çıkan çizgisel yüzey matris çatlaklarıdır. Basınçlı test sıvısı elyafa paralel bu çizgisel yüzey çatlaklarından borunun yüzeyine sızıntı şeklinde çıkması sonucunda sızma hasarı meydana gelmiştir. Elyafa paralel bu çizgisel sızıntılar, sızma hasarlarının başladığı yorulma çevrim sayılarının belirlenmesinde etkin rol

oynamıştır. Elyafa paralel yüzey çatlağının borunun eksenine dik kesitindeki görüntüsü Şekil 7.45a’ da görüntülenmiş ve yüzey matris çatlağı olarak isimlendirilmiştir.

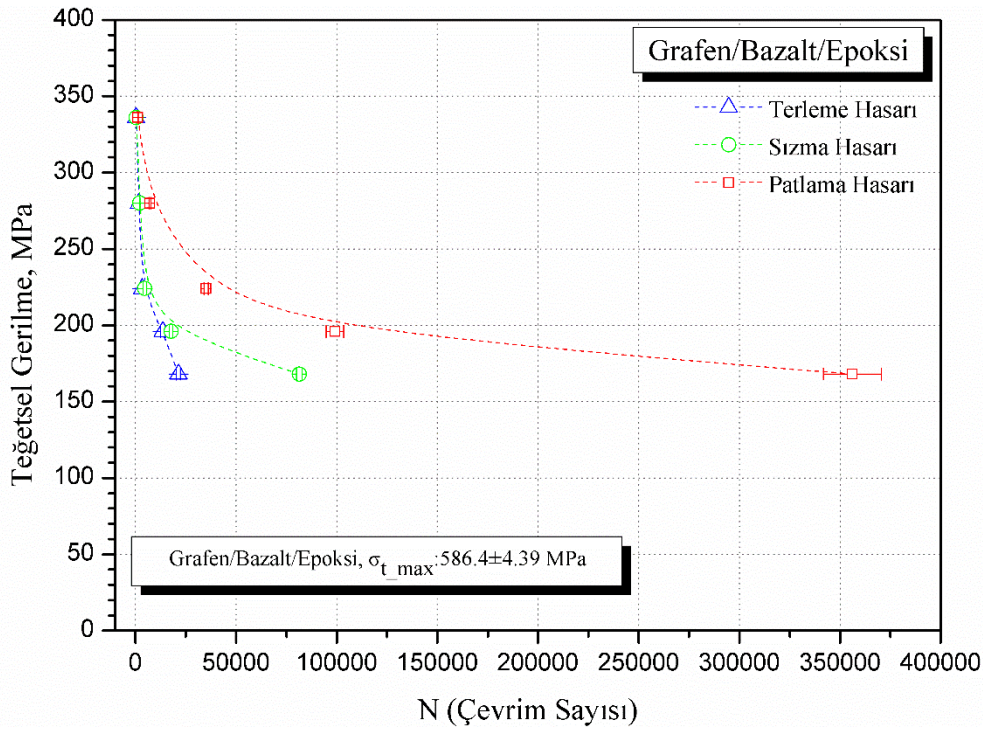


Şekil 7.46 $60\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 1097 N sonunda patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi boruların eksenine dik doğrultudaki kesitlerinden alınan SEM görüntüleri; (a) 200X büyütmede yüzey matris ve enine çatlak hasarları (b) 400X büyütmede enine çatlak ve debonding hasarları, (c) 165X büyütmede yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlaklar ve delaminasyon hasarları, (d) 1000X büyütmede enine çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları

Wolodko, elyaf takviyeli kompozitlerde görülen delaminasyon hasarlarının oluşumunu; çekme, basma, eğilme, kayma ve ya darbe yükleri etkisi ile meydana gelen çatlak gelişimine bağlamaktadır (Wolodko, 2000). Ek olarak, Frost ve ark., gerilme etkisinde elyaf bantlarının açılma hareketi sonucunda yapıda oluşacak mikro çatlak yoğunluğunun artacağını bildirilmiştir (Frost, 1995). Bu ifadelerin ışığında, kapalı-uçlu koşullar altında çekme ve kayma gerilmeleri etkisinde elyaf bantlarının $\pm 55^\circ$ lik sarım açısı, azalma yönünde kapanmaya zorlandığı için borularda birçok mikro çatlak oluşmaktadır. Bu mikro çatlaklar, borularda görülen matris,

debonding ve delaminasyon hasarlarının tetikleyicisi olarak görev yapabileceği yorumlanmıştır.

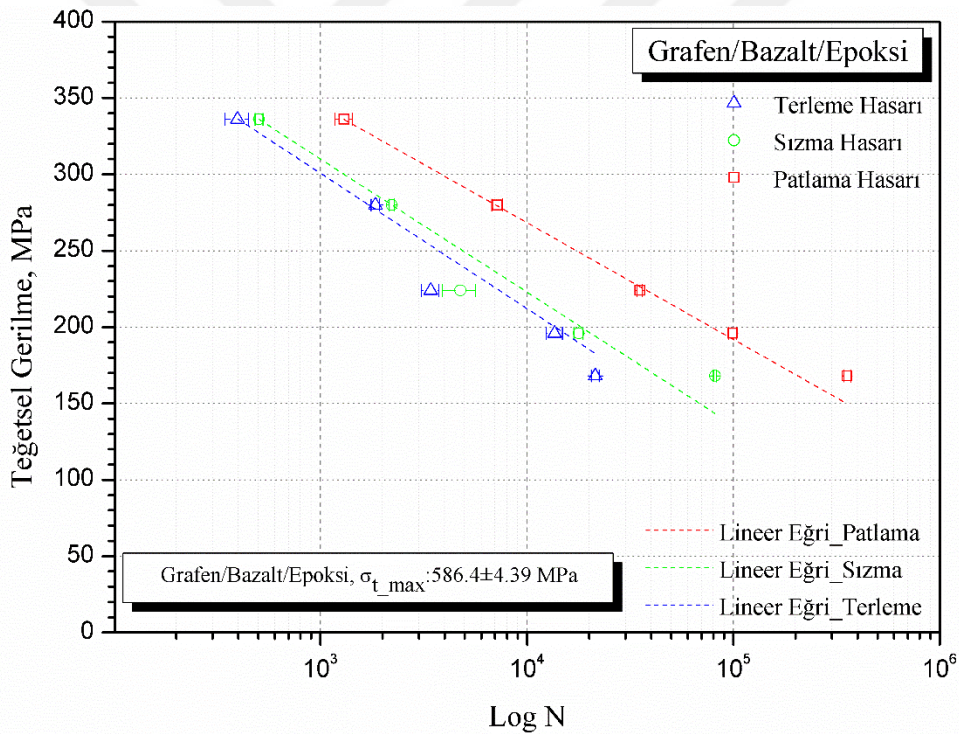
%60 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında 1097 çevrim sonunda patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi borunun eksenine dik doğrultudaki kesitte oluşan hasarların SEM görüntüleri Şekil 7.46a, 7.46b, 7.46c ve 7.46d' de gösterilmiştir. Yorulma testi sonrası oluşan bu hasarlar, dış ve iç yüzey matris çatlakları, delaminasyon, enine/çapraz çatlaklar ve matris çatlakları olarak tespit edilmiştir. Debonding ve matris çatlak hasarlarının birleşmesi ile \pm elyaf bantları arasında oluşan enine çatlak hasarı Şekil 4.46b' de gösterilmiştir.



Şekil 7.47 Grafen/bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test sonuçları; terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarına ait $\sigma - N$ eğrileri

%60, %50, %40, %35 ve %30 σ_{t_max} yükleme oranlarında grafen/bazalt/epoksi boruların patlama sonuç hasarının olduğu yorulma ömrünün, bazalt/epoksi borularinkine göre sırasıyla %18, %74, %98, %115 ve %270 oranında daha yüksek olduğu bulunmuştur. Grafen takviyesi, bazalt/epoksi boruların yorulma ömürlerini arttırmıştır. Bu sonuç, literatürde rapor edilen karbon nanotüp'ün karbon/epoksi plakalarının yorulma ömrünü arttırdığı sonucu ile paralellik göstermektedir (Zhang ve ark., 2007; Bortz ve ark., 2011). Grafen ve/veya karbon nanotüp gibi nano boyuttaki takviyelerin, elyaf/matris arayüzey dayanımını arttırdığı ve Şekil 7.5' te açıklandığı gibi nano takviye/çatlak etkileşimleri sonucunda yorulma ömürlerini iyileştirdiği sonuçları çıkarılmıştır.

Beklenildiği gibi borularda; yorulma yükleme oranı arttıkça terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının meydana geldiği ortalama yorulma ömrü çevrim sayısı azalmıştır. Terleme hasarı göz önüne alındığında, grafen takviyeli boruların %60, %50, %40, %35 ve %30 σ_{t_max} yükleme oranlarındaki yorulma ömrünün, takviyesiz borulara göre sırasıyla; %57, %31, %27, %25 ve %23 oranlarında arttığı bulunmuştur. Sızma hasarı göz önüne alındığında ise, grafen takviyeli boruların %60, %50, %40, %35 ve %30 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarındaki yorulma ömrü, grafen takviyesiz borulara göre sırasıyla; %71, %53, %45, %42 ve %36 oranlarında yükselmiştir. Yorulma ömürlerindeki bu artışın nedeni, pulcuk şeklinde grafenin (graphene nanoplatelets) 800 g/m² lik yüksek yüzey alanı ve yüksek en/boy oranına sahip olması sonucu oluşan kuvvetli arayüzey oluşumudur. Kuvvetli bir elyaf/matris arayüzeyinde meydana gelen çatlak ucu körleme, çatlak sapması ve çatlak dallanma mekanizmaları (Şekil 7.44b), yorulma esnasında oluşan ya da yapıda önceden var olan bir çatlağın gelişimini geciktirmektedir.

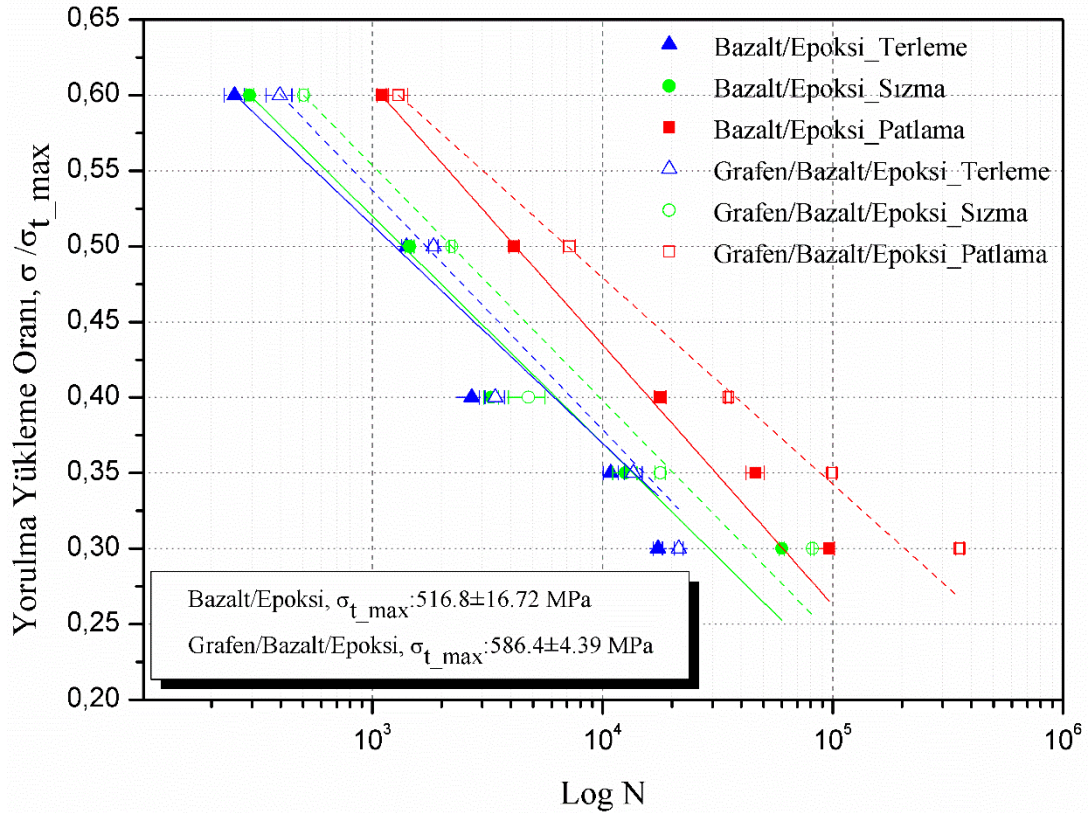


Şekil 7.48 Grafen/bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test sonuçları; terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarına ait $\sigma - \text{Log } N$ eğrileri

Yorulma testleri sonucunda grafen takviyesinin yorulma ömrü üzerinde oluşturduğu arttırıcı etkinin, yorulma yükleme oranına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Grafen/bazalt/epoksi borularda yorulma esnasında görülen terleme ve sızma hasarları göz önüne alındığı zaman grafen takviyesinin, yorulma yükleme oranına bağlı olarak yorulma ömrü üzerindeki % etki oranı (arttırıcı etkisi) daha da yükselmiştir. Ancak, iç basınç test aparatından

kaynaklı gerilme yığılma bölgesinde eğilme etkisi ile oluşan patlama sonuç hasarı için; grafen takviyesinin, yorulma yükleme oranı arttıkça yorulma ömrü üzerindeki % etki oranı azalmıştır.

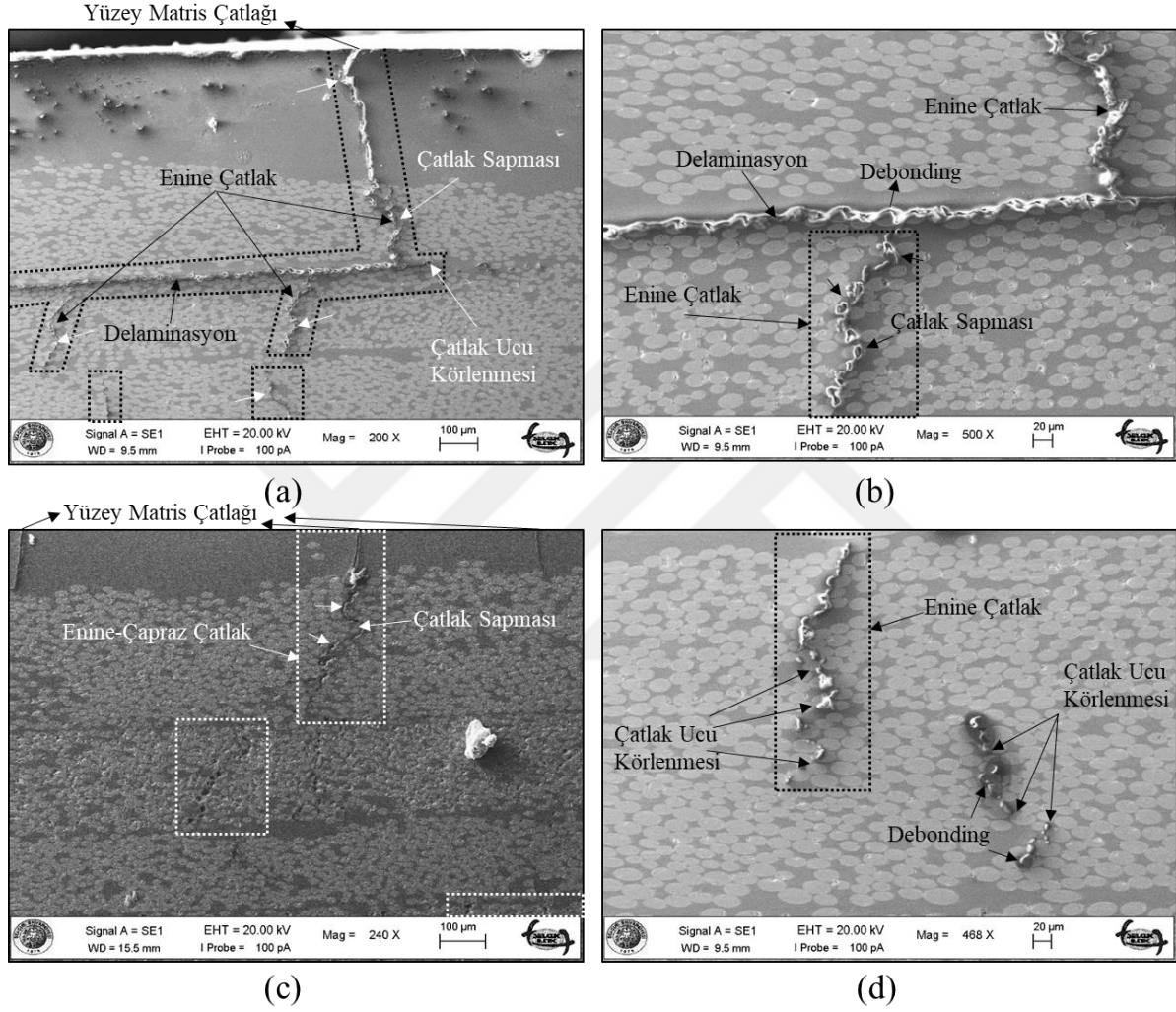
Rafiee ve ark. tarafından grafen takviyeli epoksi nanokompozitler üzerinde yorulma çatlak ilerleme testi yapılmış ve gerilme yorulma faktör genliğinin (ΔK) bir fonksiyonu olarak çatlak büyüme hızı (da/dN) bulunmuştur. Bu çalışmada grafen takviyesinin; düşük ΔK değerlerine göre, yüksek ΔK değerlerinde epoksi üzerinde yorulma ömrünü arttırıcı etkisinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Rafiee ve ark., 2009). Yorulma testi esnasında borularda oluşan mikro çatlakların ilerlemesi, yukarıdaki referansta verilen kırılma mekanizmalarına benzer şekilde gerçekleşmektedir. Rafiee ve ark. tarafından yapılan çalışma, yorulma yükleme oranının artması ile yorulma ömrü üzerinde (terleme ve sızma hasarları için) grafenin iyileştirme etkisi (çatlak ilerlemeyi yavaşlatıcı olarak)' nin yükseldiği bulgumuzu desteklemektedir.



Şekil 7.49 Grafen/bazalt/epoksi ve bazalt/epoksi boruların kapalı-uçlu değişken iç basınç altında yorulma test sonuçları; terleme, sızma ve patlama sonuç hasarları için karşılaştırmalı σ/σ_{t_max} – Log N eğrileri

Grafenin yorulma ömrü üzerindeki iyileştirici etkisinin diğer nedeni, Yu ve ark. ve Loos ve ark. tarafından ortaya konmuştur. Onlar, grafen takviyesinin elyaf/matris arasındaki yük transferini kolaylaştırdığını ifade etmişlerdir (Yu ve ark., 2008; Loos ve ark., 2012). Grafen

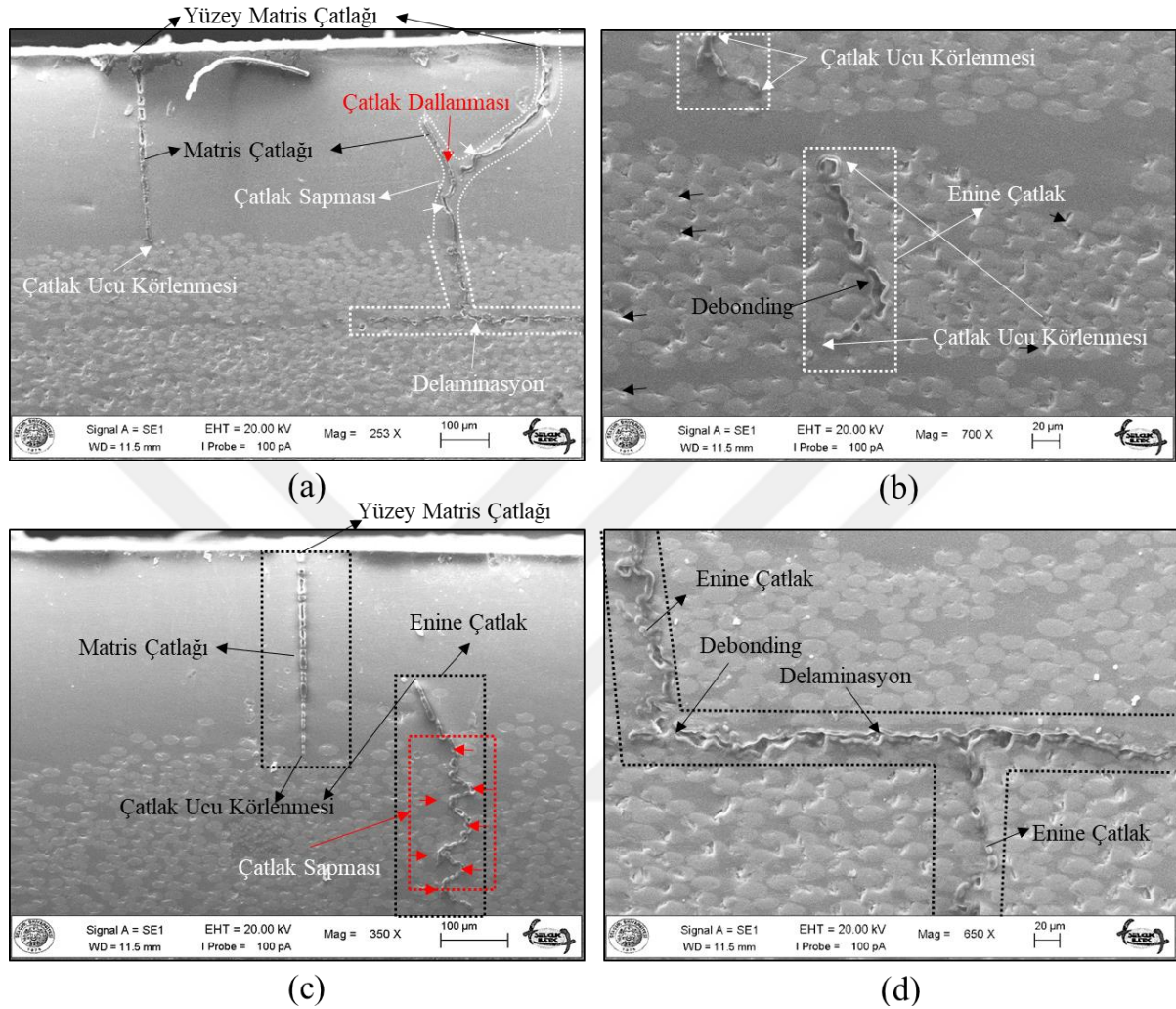
takviyesinin elyaf/matris arasında yük transferi gerçekleşirken matris hasarı oluşmadan yükü elyafa transfer edebilmesi, yük transfer kolaylığı olarak isimlendirilmiştir. Sonuç olarak, elyaf/matris arayüzeyinde yük transferinin kolaylaşması ve çatlak ilerleme mekanizmasının daha yavaş olması, düşük yorulma yükleme oranlarında (30% ve $35\sigma_{t_max}$ gibi) yüksek yorulma çevrimlerine ulaşılmasının temel nedenleri olarak yorumlanmıştır.



Şekil 7.50 $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 356127 N sonunda patlama sonuç hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların eksenine dik doğrultudaki kesitlerinden alınan SEM görüntüleri; (a) 200X büyütmede yüzey matris, delaminasyon ve enine çatlak hasarları (b) 500X büyütmede enine çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları, (c) 240X büyütmede yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlak hasarları, (d) 500X büyütmede enine çatlak ve debonding hasarları

Yorulma testi sonrasında grafen takviyeli ve takviyesiz borularda terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının σ/σ_{t_max} –Log N eğrileri, Şekil 7.49’ de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Eğrilerde görüldüğü gibi, yüksek yorulma yükleme oranlarından düşük yorulma yükleme oranlarına doğru gidildikçe yorulma ömürleri logaritmik olarak artmıştır. Grafen takviyeli ve takviyesiz boruların terleme, sızma ve patlama sonuç hasarlarının ortaya çıktığı

çevrim sayılarının yorulma yükleme oranlarına göre birbirleri ile kıyaslanabilmesi için sonuçlar toplu olarak Şekil 7.49’da verilmiştir.



Şekil 7.51 %60 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında 1299 N sonunda patlama sonuç hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların eksenine dik doğrultudaki kesit SEM görüntüleri; (a) 250X büyütmeye yüzey matris çatlakları, delaminasyon ve matris çatlak hasarları (b) 700X büyütmeye enine çatlak ve debonding hasarları, (c) 350X büyütmeye yüzey matris çatlakları, enine çatlak ve matris çatlak hasarları, (d) 650X büyütmeye enine çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları

%30 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında 356127 çevrim sonunda grafen/bazalt/epoksi borunun eksenine dik doğrultudaki kesitinde oluşan hasarların SEM görüntüleri Şekil 7.50’de verilmiştir. Bazalt/epoksi boruların yorulma ömürlerinin artmasını sağlayan çatlak sapma, çatlak ucu körelme ve çatlak dallanma mekanizmaları Şekil 7.50’de gösterilmiştir. Enine çatlak oluşumu sırasında çatlakın yana doğru eğilmesi ve bükülmesi Şekil 7.50c’de görüntülenmiştir. Bu görüntü, yorulma testleri esnasında grafen takviyeli borularda çatlak sapma mekanizmasının oluştuğunun bir kanıtıdır. Şekil 7.50d’de başka bir enine çatlak görüntülenmiştir. Bu çatlak, çatlak ucu körelme mekanizması sayesinde boru yüzeyine ve diğer elyaf bantlarına ulaşmadan

grafen etkisi ile durdurulmuştur. Bu çatlak köreldiğinden dolayı ilerleyemeyip, elyaf bantları arasına ulaşamadığı için herhangi bir delaminasyon hasarına neden olmamıştır.

$\%60\sigma_{L_{max}}$ yorulma yükleme oranında 1299 çevrim sonunda grafen/bazalt/epoksi borunun eksenine dik doğrultudaki kesitinde oluşan hasarların SEM görüntüleri Şekil 7.51' de verilmiştir. Şekil 7.50 ile Şekil 7.51' deki SEM görüntüleri karşılaştırıldığı zaman Şekil 7.51' de gösterilen çatlak sapma, çatlak dallanma ve çatlak ucu körelme mekanizmaları, yorulma yükleme oranının artmasına bağlı olarak daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Şekil 7.51' de gösterilen mekanizmaların oluşması, yorulma ömrünün artması ile sonuçlanmaktadır. Yüksek yorulma yükleme oranlarında grafen takviyesinin yorulma ömrüne % etki oranının daha fazla olduğu bahsedilmiştir. Düşük yorulma yükleme oranlarına göre, yüksek yorulma yükleme oranlarında yukarıda bahsedilen mekanizmalar sonucunda çatlak ilerlemesi daha fazla engellenmiş ve bunun sonucunda yorulma ömürleri üzerinde grafenin % etki oranının daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Demirci ve ark, küresel geometrik yapıya sahip SiO_2 nanopartikülünün, çatlak ucunu köreltmesinden dolayı çatlak gelişimini ve ikincil çatlakların oluşumunu engellediği ve/veya geciktirdiğini rapor etmiştir (Demirci ve ark., 2017). Benzer şekilde çalışmamızda; epoksi matris içerisinde homojen dağılan grafen takviyesinin yorulma esnasında çatlak sapması, çatlak ucu körelme ve çatlak dallanma mekanizmalarını ortaya çıkartarak benzer şekilde çatlak ilerlemesini geciktirdiği bulunmuştur. Ayrıca, grafen takviyesinin arayüzey yapışmasını artırması sonucunda elyaf/matris arayüzeyinde ikincil çatlakların oluşumunu da engellediği şeklinde yorumlanmıştır. Grafen takviyesinin boruların yorulma ömrüne % etki oranı, elyaf/matris arayüzeyinde ve/veya matriste oluşan çatlakın ilerleme doğrultusuna göre grafenin sahip olduğu konuma bağlı değişmektedir. Şekil 7.44b' de gösterildiği gibi, matriste ve/veya elyaf sistemi içerisinde bulunan grafen; çatlak doğrultusuna paralel, dik ve açılı bir konumda bulunmasına bağlı olarak çatlak ilerlemesini farklı şekillerde etkileyeceği yorumlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan grafenin sahip olduğu pulcuk benzeri geometrik yapısı, nano boyuttaki kalınlığı ve mikron boyutlu genişliğinden dolayı çatlakın geliş açısı önemlidir. Sonuç olarak, grafen takviyesinin yorulma ömrü üzerindeki % etki oranı, yukarıda da bahsedildiği gibi grafenin çatlak ucu önündeki konumlarından da etkilenmektedir.

Yorulma testleri sonrasında borularda meydana gelen terleme ve sızma hasarlarının oluşum mekanizması özetlenir ise; Yorulma yükleme oranına bağlı olarak değişen tekrarlı yorulma genliği etkisinde epoksi matris ve/veya bazalt elyaf/ epoksi matris arayüzeyinde oluşan mikro çatlaklar, her yorulma çevriminde ilerleyerek gelişmektedir.

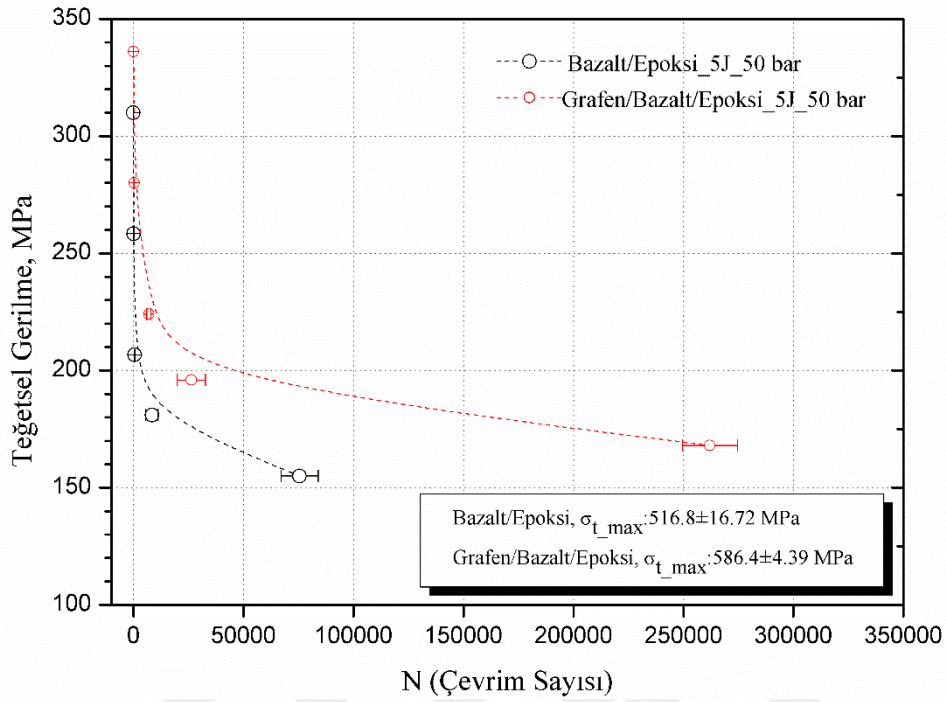
Gelişen mikro çatlaklar, elyaf/matris arayüzeyinde yoğunlaşarak elyaf/matris ayrılması olan debonding hasarına neden olmaktadır. Debonding hasarı, elyaf doğrultusuna paralel kayma ve dik çekme gerilmelerinin etkisinde oluşmaktadır. Debonding ve delaminasyon hasarları, kompozit tabaklarının şekil değişimini arttırarak rijitliklerini azaltır. İç basıncın etkisiyle teğetsel ve eksenel gerilmelere maruz kalan elyaf/matris arayüzeyinde oluşan elyaf doğrultusuna paralel kayma gerilmeleri ve elyaf doğrultusuna dik çekme gerilmeleri etkisi ile debonding hasarları gittikçe artarak enine/çapraz çatlakları oluşturur ve bu çatlakların \pm elyaf bantlarının arasına ulaşması sonucunda delaminasyon hasarları tetiklenmektedir. İç ve dış yüzey matris çatlakları, debonding, enine/çapraz çatlaklar ve delaminasyon hasar oluşumları, birbirlerine yorulma çevrimi boyunca bağlanır. Kritik yorulma çevriminden hemen sonra birbirleri ile birleşen hasarların oluşturduğu sızıntı yolu ile boru içindeki basınçlı test sıvısı, borunun dış yüzeyine ulaşarak terleme ve sızma hasarlarını meydana getirir. Terleme ve sızma hasarından sonra yorulma testi ilerledikçe, çevrim sayısı kritik bir değere ulaştığı anda oluşan patlama sonuç hasarı, gerilme yığılma bölgesinde elyaf bantlarının ayrılması ve elyaf kopması sonucu katastrofik olarak meydana gelir. Daha önce anlatıldığı gibi, kapalı-uçlu iç basınç test koşullarında gerilme yığılma bölgesinde elyaflar hem çekme hem de eğilme yüküne maruz kalır. Bundan dolayı, boruların gövde kısımlarına göre gerilmenin daha büyük olduğu gerilme yığılma bölgesinde patlama sonuç hasarı oluşmaktadır.

Grafen takviyesi, teğetsel ve eksenel gerilme altında kalan borularda meydana gelen iç ve dış yüzey matris çatlakları, debonding, enine/çapraz çatlaklar ve delaminasyon hasarlarının oluşumlarına direnç gösteren elyaf/matris arayüzey dayanımını arttırır. Grafen takviyesi, epoksi matrisin tokluğunu arttırarak matriste oluşan çatlak hasarlarını azaltır. Grafen takviyeli boruların yorulma ömürleri üzerindeki artışın nedenleri, grafenin sahip olduğu 800 g/m^2 lik yüksek yüzey alanının elyaf/matris arayüzey dayanımını arttırması ve yine grafenin; çatlak ucu körelme, çatlak sapma ve çatlak dallanma mekanizmalarını oluşturarak çatlak ilerlemesini geciktirmesi şeklinde özetlenebilir.

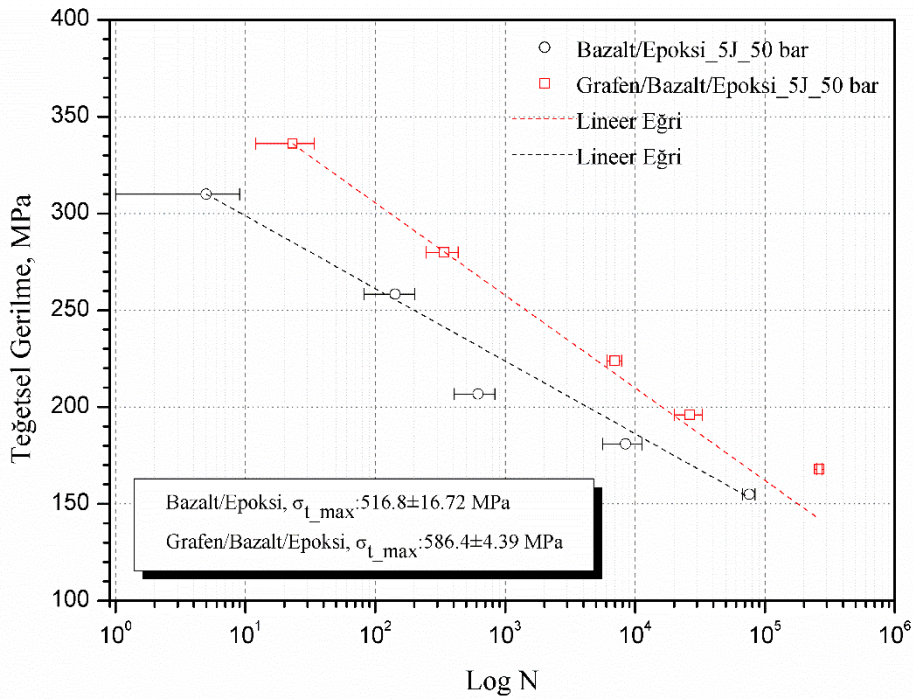
7.8.2. Düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları

5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları Şekil 7.52, 7.53 ve 7.54' de verilmiştir. Darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların %40, %35, %30, %25 ve %20 σ_{t_max} yorulma yükleme oranında ortalama yorulma ömürleri sırasıyla; 5, 142, 618, 8459 ve 75589 çevrim olarak elde edilmiştir. Aynı yorulma yükleme oranlarında darbe hasarlı

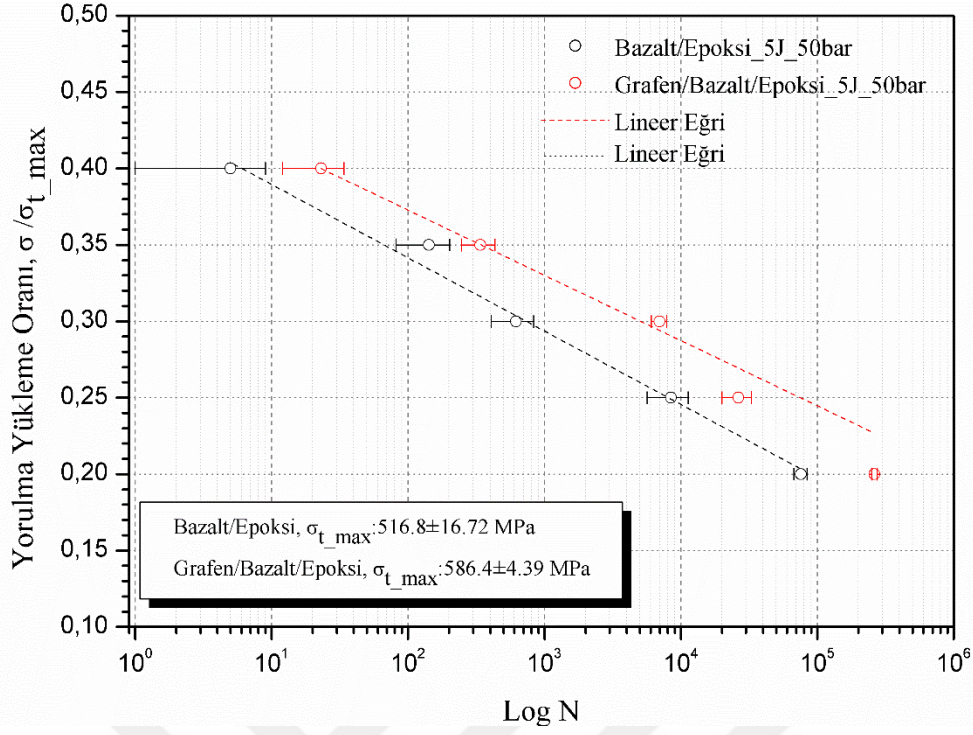
grafen/bazalt/epoksi boruların ortalama yorulma ömürleri sırasıyla; 23, 339, 6958, 26363 ve 261969 çevrim olarak bulunmuştur.



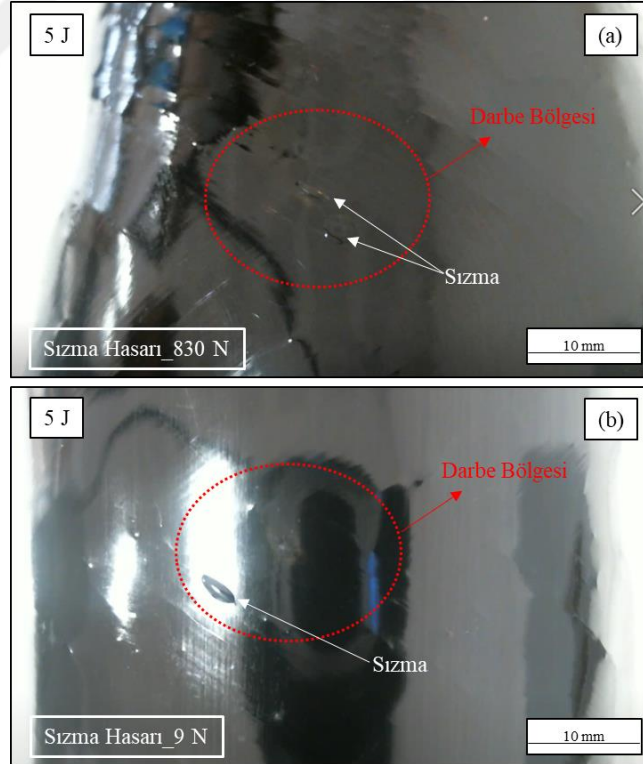
Şekil 7.52 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların sızma hasarlarına ait $\sigma - N$ eğrileri



Şekil 7.53 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların sızma hasarlarına ait $\sigma - \text{Log } N$ eğrileri



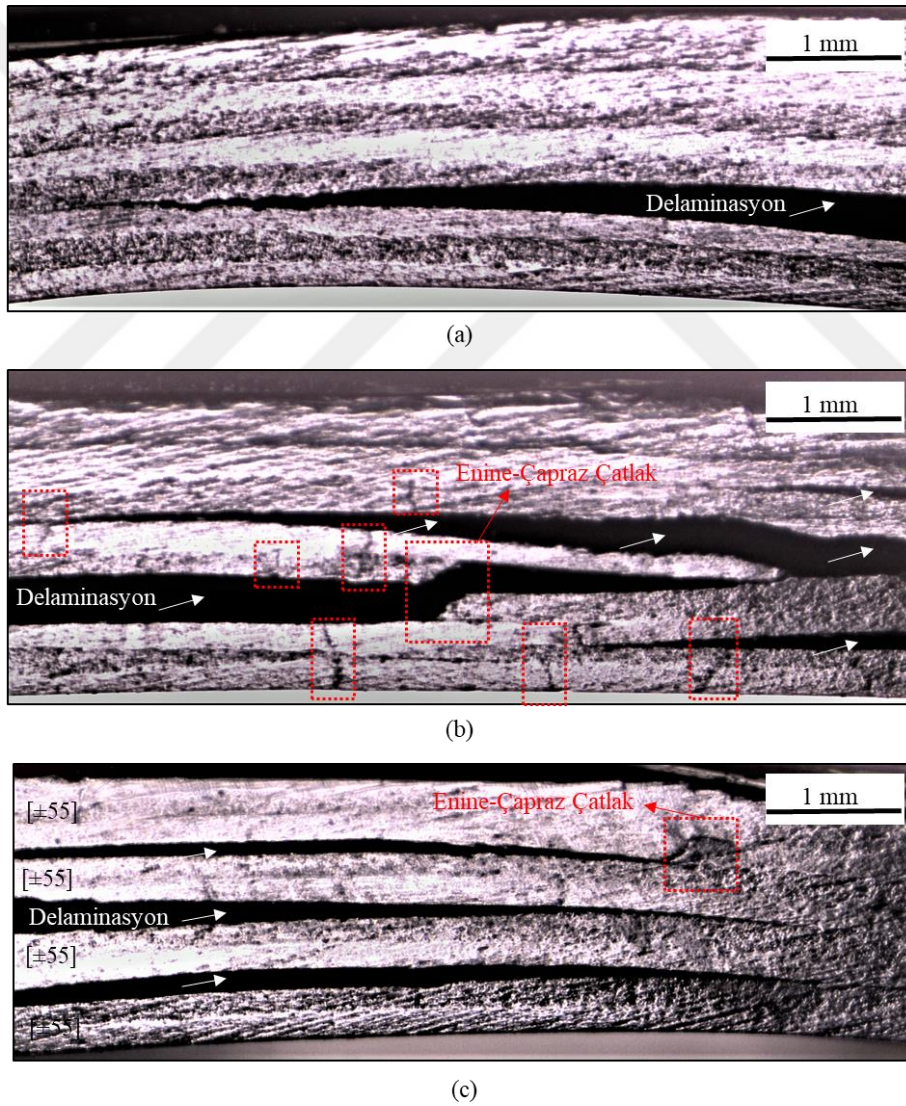
Şekil 7.54 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların sızma hasarlarına ait $\sigma/\sigma_{t_max} - \text{Log } N$ eğrileri



Şekil 7.55 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, eksenel: 49 MPa) iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların yorulma testi sonrasında darbe bölgesinden ortaya çıkan sızma sonuç hasar fotoğrafları; (a) $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 830 N sonunda, (b) $40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 9 N sonunda

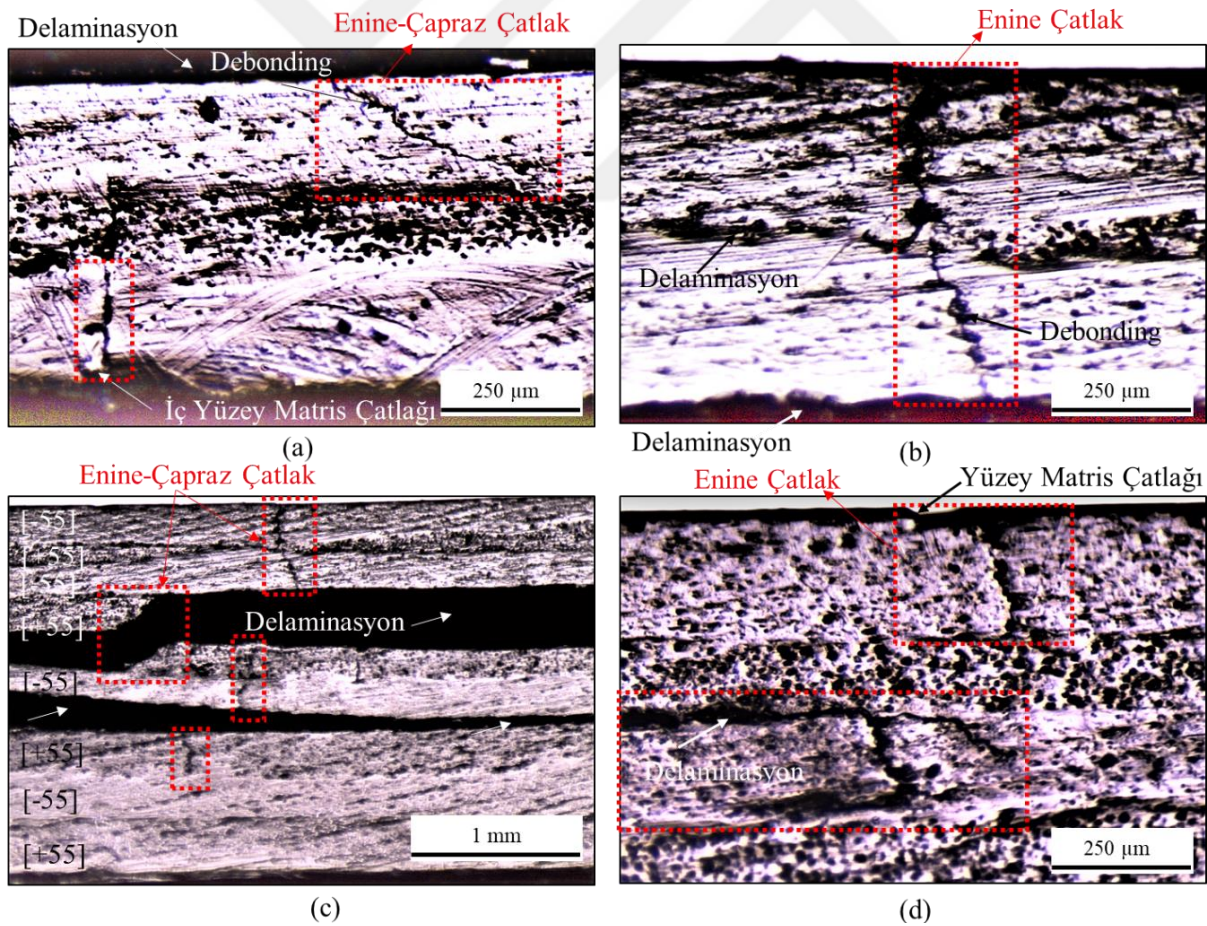
Darbe hasarlı grafen takviyeli ve takviyesiz boruların yorulma ömürleri karşılaştırıldığı zaman grafen takviyesi, hasarlı bazalt/epoksi boruların yorulma ömürlerini arttırmıştır. Darbe hasarlı bazalt/epoksi borulara uygulanan yorulma testi sonrası darbe bölgesinde ortaya çıkan sızma sonuç hasar fotoğrafları Şekil 7.55’ te gösterilmiştir.

$\%30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 830 çevrim sonunda bazalt/epoksi borunun darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik doğrultudaki kesitte oluşan hasarlar Şekil 7.56’ da verilmiştir. 830 gibi kısa bir çevrim sayısı sonunda boru sonuç hasarına ulaşmıştır. Şekil 7.56b’ de görüldüğü gibi, darbe merkezinde delaminasyon, enine/çapraz çatlak ve elyaf kopma hasarları görülürken darbe merkezinin sağında ve solunda ise, sadece delaminasyon hasarı tespit edilmiştir.



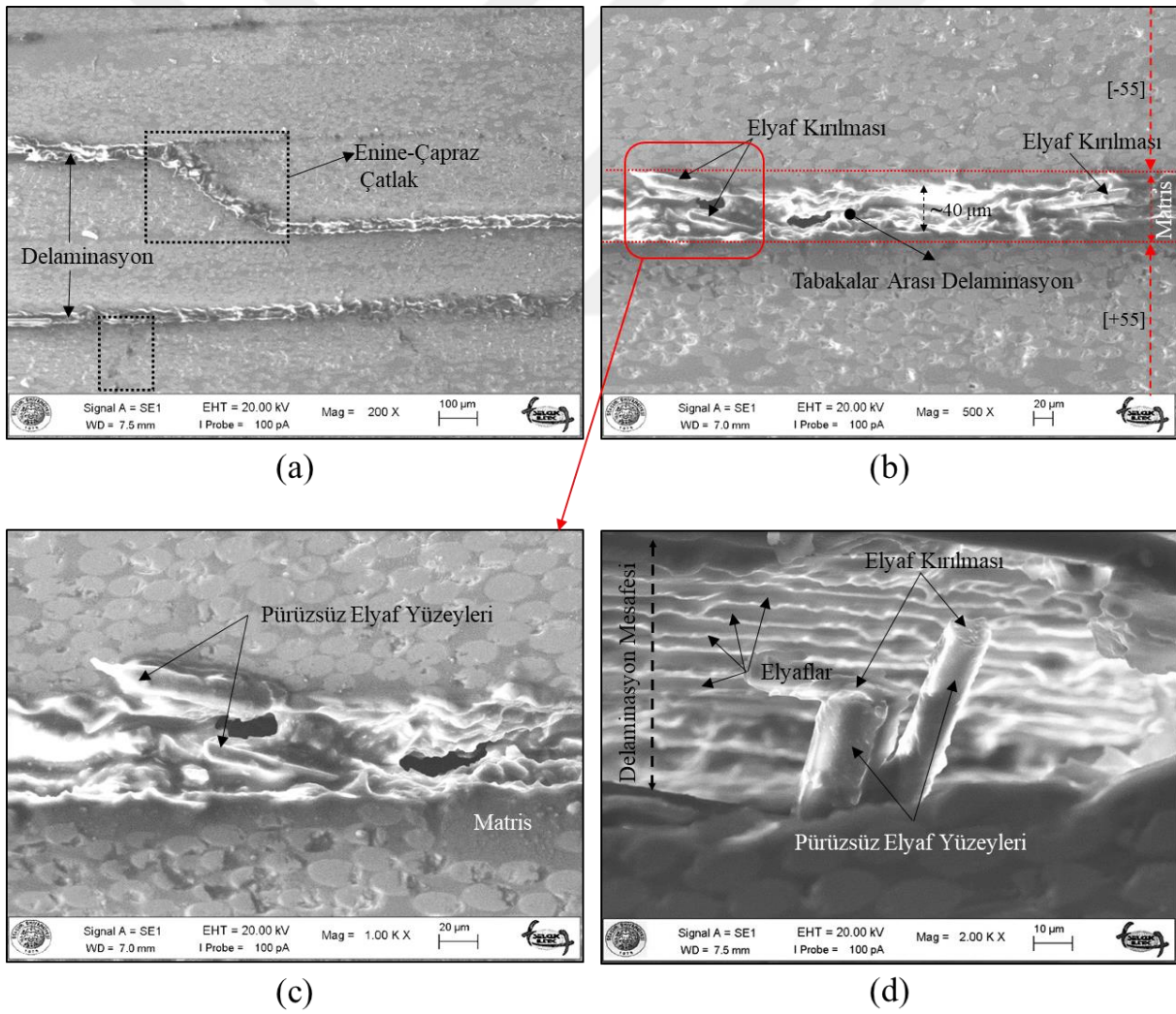
Şekil 7.56 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $\%30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 830 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit görünüşleri; a) darbe merkezinin solundan, b) darbe merkezinden, (c) darbe merkezinin sağından

Yorulma testi yapılmamış 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi borunun darbe hasar görüntüsü Şekil 7.40' ta verilmiştir. Sadece 5 J darbe hasarlı bu borunun eksenine dik kesitinde oluşan hasarlar ile 5 J darbe etkisine ve $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 830 yorulma çevrim sonunda sonuç hasarına ulaşılmış bazalt/epoksi borunun eksenine dik kesitinde oluşan hasarların kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, borunun iç yüzeyinde tespit edilen enine çatlakların yorulma testi ile oluştuğu ve enine/çapraz çatlak sayısının yorulma testi sonrasında arttığı görülmüştür. Aynı numunenin darbe hasar bölgesinde 830 çevrim sonunda oluşan sonuç hasarlı borunun eksenine dik doğrultudaki kesitinde tespit edilen iç yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları Şekil 7.57a, 7.57b, 7.57c ve 7.57d' de detaylı olarak gösterilmiştir. İç yüzey matris çatlağından giren basınçlı test sıvısı, enine/çapraz çatlaklardan ilerleyerek delaminasyon hasarına ulaşır ve kendine bir sızıntı yolu oluşturabilir. Test sıvısı, bu yolu diğer tabakalarda da tekrarlayarak yüzeyde oluşan matris çatlağına ulaşır ve borunun yüzeyinde terleme ve/veya sızma hasarı olarak sonuçlanır (Şekil 7.57d).



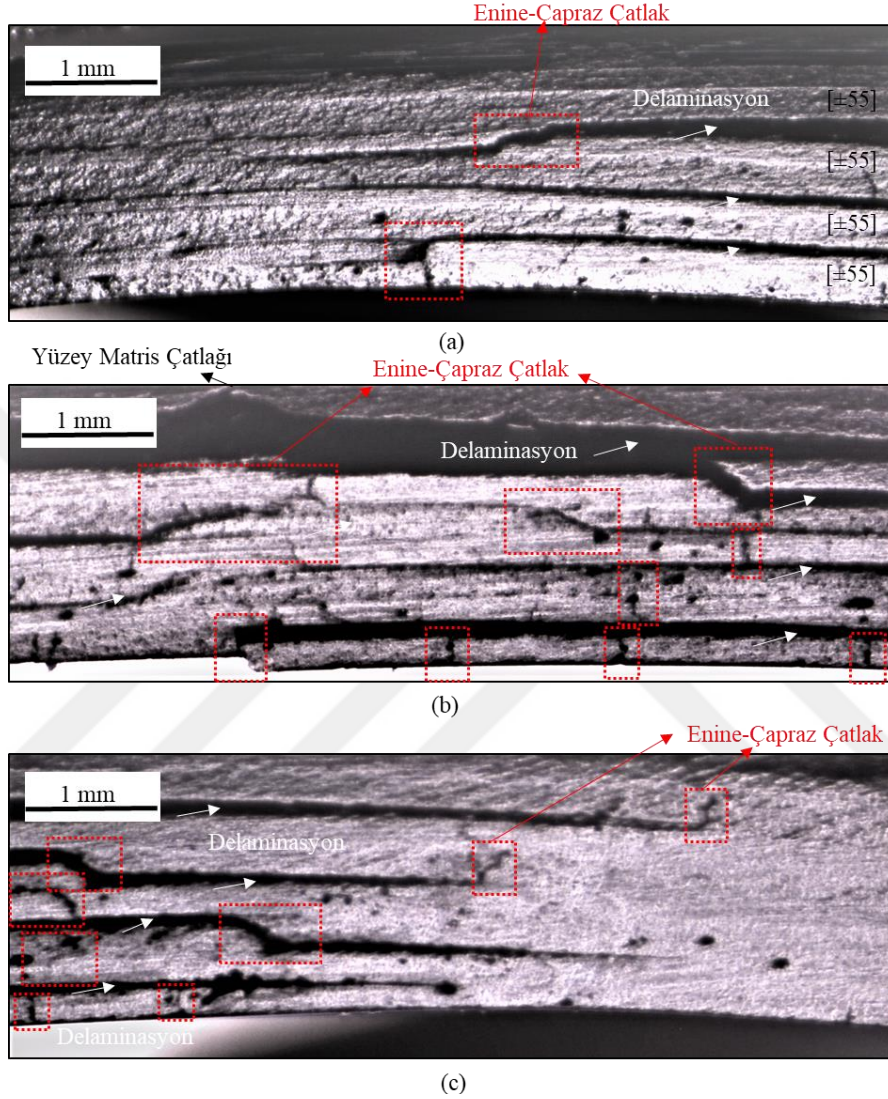
Şekil 7.57 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 830 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit görüntüleri; (a, b, c ve d) iç yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları

Darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklemesinde 830 çevrim sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesitteki SEM görüntüleri Şekil 7.58’ de verilmiştir. Enine/çapraz çatlak ve delaminasyon hasarları Şekil 7.58a’ da gösterilmiştir. Şekil 7.58b’ de görüldüğü gibi, $\pm 55^\circ$ yönelmiş elyaf bantları arasında yaklaşık $40\ \mu\text{m}$ ’ luk epoksi reçine açısından zengin olan bir bölge bulunmaktadır. Delaminasyon hasarı, bu bölgeden ilerleyerek ortaya çıkmıştır. Delaminasyon hasarında meydana gelen matris ve elyaf kopma hasarları Şekil 7.58c ve 7.58d’ de gösterilmiştir. Delaminasyon hasarında kırılan elyaf yüzeylerinin pürüzsüz olduğu bu görüntülerden tespit edilmiştir. Ayrıca, benzer pürüzsüz elyaf yüzeyleri Şekil 7.61c ve 7.61d’ de de tespit edilmiştir. Elyafların matristen sıyrılması (pull-out) sonucu oluşan pürüzsüz elyaf yüzeyi, elyaf/matris arayüzey yapışmasının zayıf olduğunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 7.58 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklemesinde 830 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit SEM görüntüleri; (a) enine/çapraz çatlak ve delaminasyon, (b) elyaf kopması ve $\pm 55^\circ$ elyaf bantları arasında delaminasyon, (c ve d) delaminasyon hasarında görülen pürüzsüz elyaf yüzeyleri

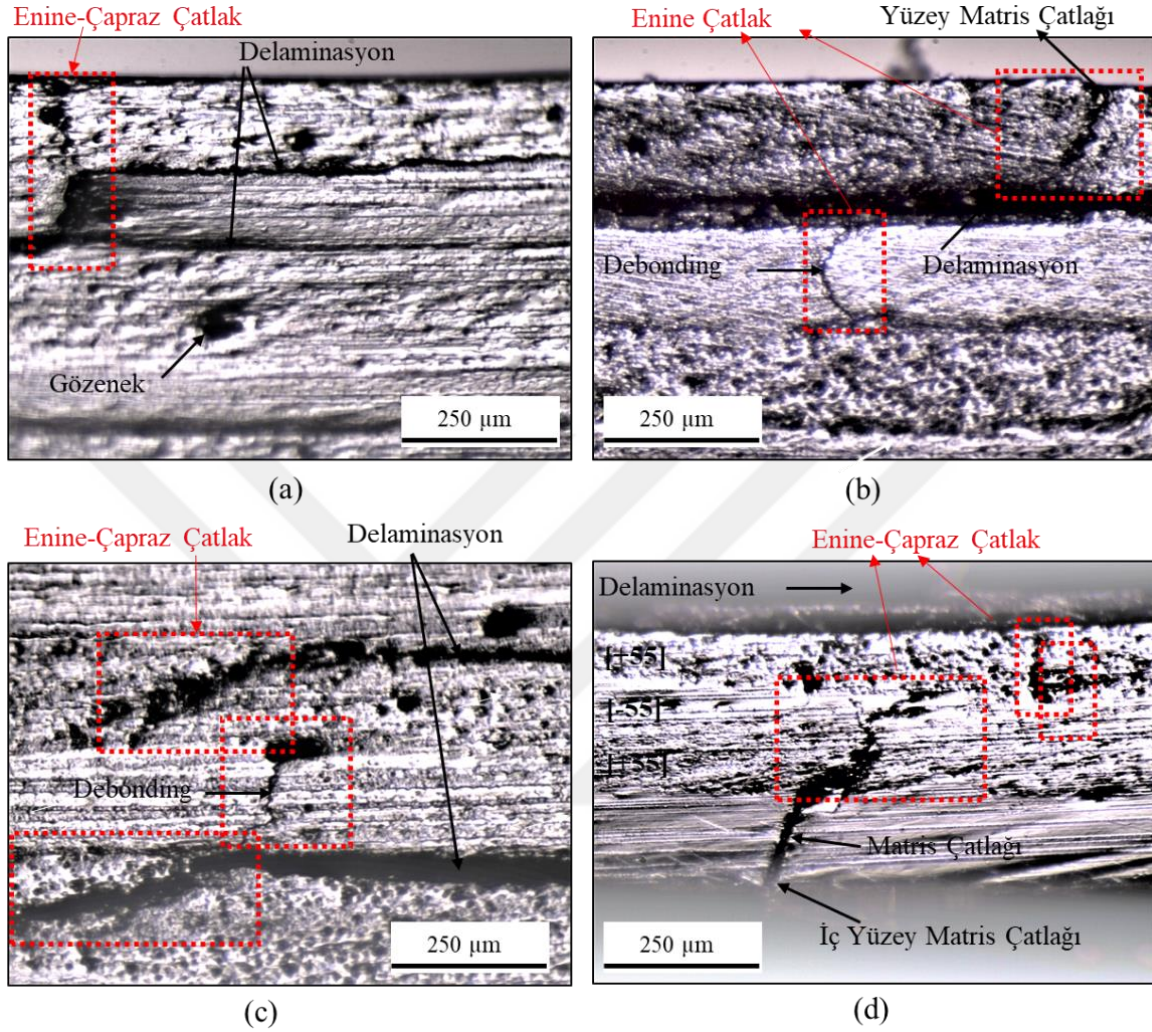
Darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 9 çevrim sonunda sonuç hasarına ulaşılmıştır. Bu borunun darbe hasar bölgesinde ve eksenine dik kesitinde oluşan hasarlar Şekil 7.59’ da verilmiştir.



Şekil 7.59 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 9 N sonunda darbe hasar bölgelerinden alınan borunun eksenine dik kesit görüntüleri; a) darbe merkezinin solundan, b) darbe merkezinden, (c) darbe merkezinin sağından

Şekil 7.56’ da gösterilen $30\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında sonuç hasarı sonunda darbe hasar görüntüsü ile Şekil 7.59’ da verilen $40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında sonuç hasarları karşılaştırıldığında delaminasyon ve enine/çapraz çatlak sayısının, yorulma yükleme oranının yükselmesi ile arttığı görülmüştür. Oluşan bu hasarların miktarının, yorulma çevrim sayısının büyüklüğünden etkilenmediği sonucu çıkarılmıştır. Aynı numunenin darbe bölgesinde 9 çevrim sonunda oluşan sonuç hasarları; iç ve dış yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlak,

delaminasyon ve debonding hasarları Şekil 7.60a, 7.60b, 7.60c ve 7.60d’ de detaylı olarak gösterilmiştir.

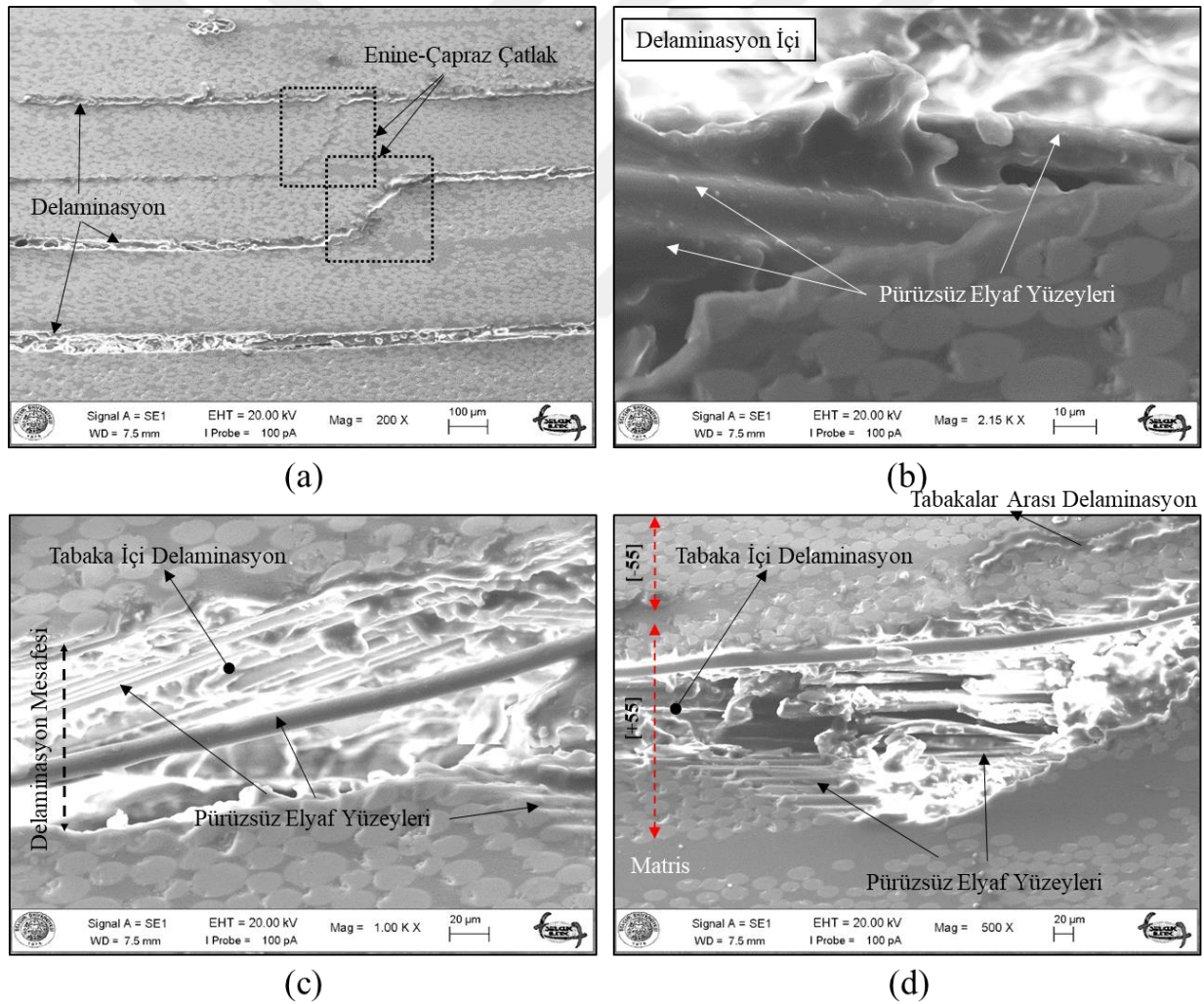


Şekil 7.60 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 9 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit görünüşleri; (a, b, c ve d) iç yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlak, delaminasyon ve debonding hasarları

Darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 9 çevrim sonunda oluşan sonuç hasarlı borunun darbe hasar bölgesinden alınan boru eksenine dik kesitteki SEM görüntüleri Şekil 7.61’ de verilmiştir. Enine/çapraz çatlak ve delaminasyon hasarları Şekil 7.61a’ da verilmiştir. $\pm 55^\circ$ elyaf bantları arasında oluşan delaminasyon hasarında tespit edilen elyaf hasarları Şekil 7.61b, 7.61c ve 7.61d’ de gösterilmiştir. Delaminasyon hasarında görülen pürüzsüz elyaf yüzeyleri elyaf sıyrılması sonucu oluşmuştur. $\pm 55^\circ$ yönlenmiş elyaf bantları arasında gelişen bir delaminasyon hasarı Şekil 7.61d’ de tespit edilmiştir. Yorulma testi sonrasında darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların eksenine dik kesitlerinde farklı yorulma yükleme oranlarına göre oluşan hasarlar Şekil 7.56 ve 7.59’ da gösterilmiştir. Bu hasar

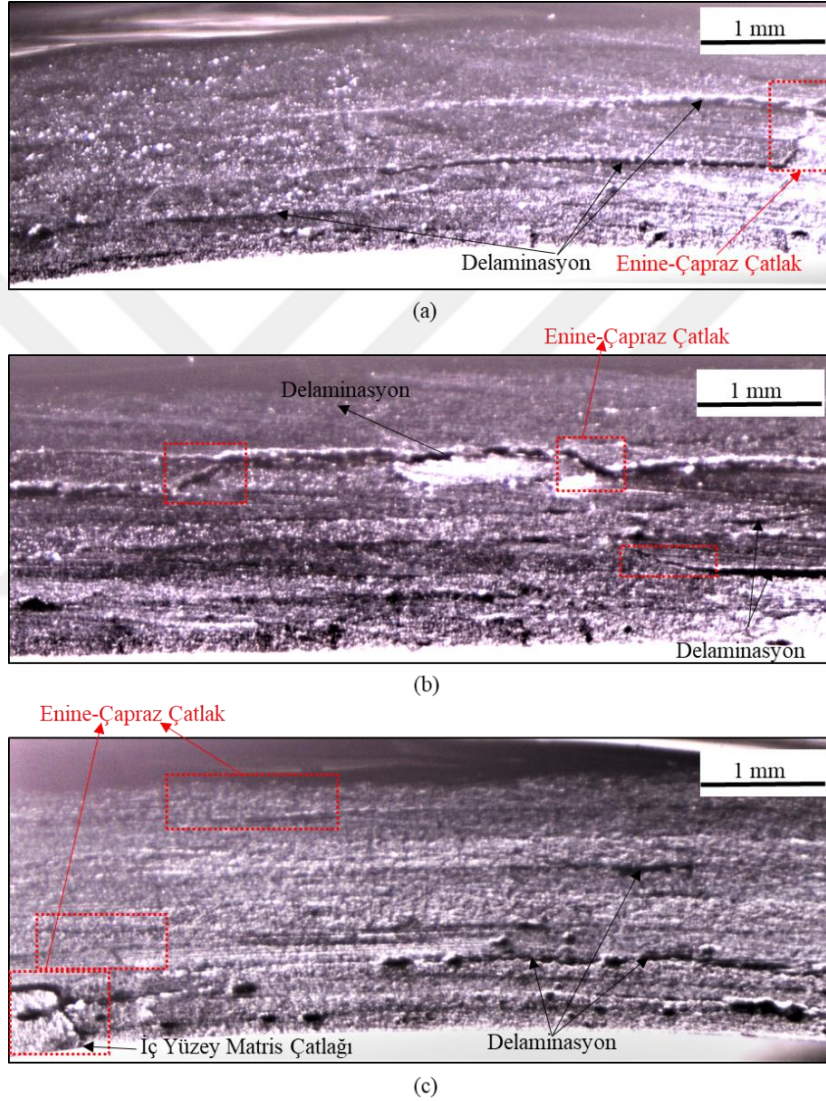
görüntüleri birbirleri ile kıyaslandığında; $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklemesine göre, $40\sigma_{t_max}$ yorulma yüklemesinde sızma sonuç hasarına neden olan enine/çapraz çatlak ve delaminasyon hasarlarının sayıları artmıştır.

Darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklemesinde 7853 çevrim sonunda oluşan sonuç hasarlı borunun darbe hasar bölgesinden alınan boru eksenine dik kesitte oluşan hasarlar Şekil 7.62’ de verilmiştir. Bazalt/epoksi boruların yorulma testi sonunda ortaya çıkan delaminasyon, matris çatlakları ve enine/çapraz çatlak hasarlarının, grafen/bazalt/epoksi borularda da benzer şekilde olduğu görülmüştür. Ancak, bazalt/epoksi borulara göre grafen/bazalt/epoksi borularda sonuç hasarı daha yüksek çevrim sayılarında ortaya çıkmıştır. Grafen takviyesinin, darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların yorulma çevrim sayılarını artırarak yorulma ömürlerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.61 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t_max}$ yorulma yüklemesinde 9 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit SEM görüntüleri; (a) enine/çapraz çatlak ve delaminasyon, (b, c ve d) elyaf kopması, $\pm 55^\circ$ elyaf bantları arasında oluşan delaminasyon hasarları ve delaminasyon hasarındaki pürüzsüz elyaf yüzeyleri

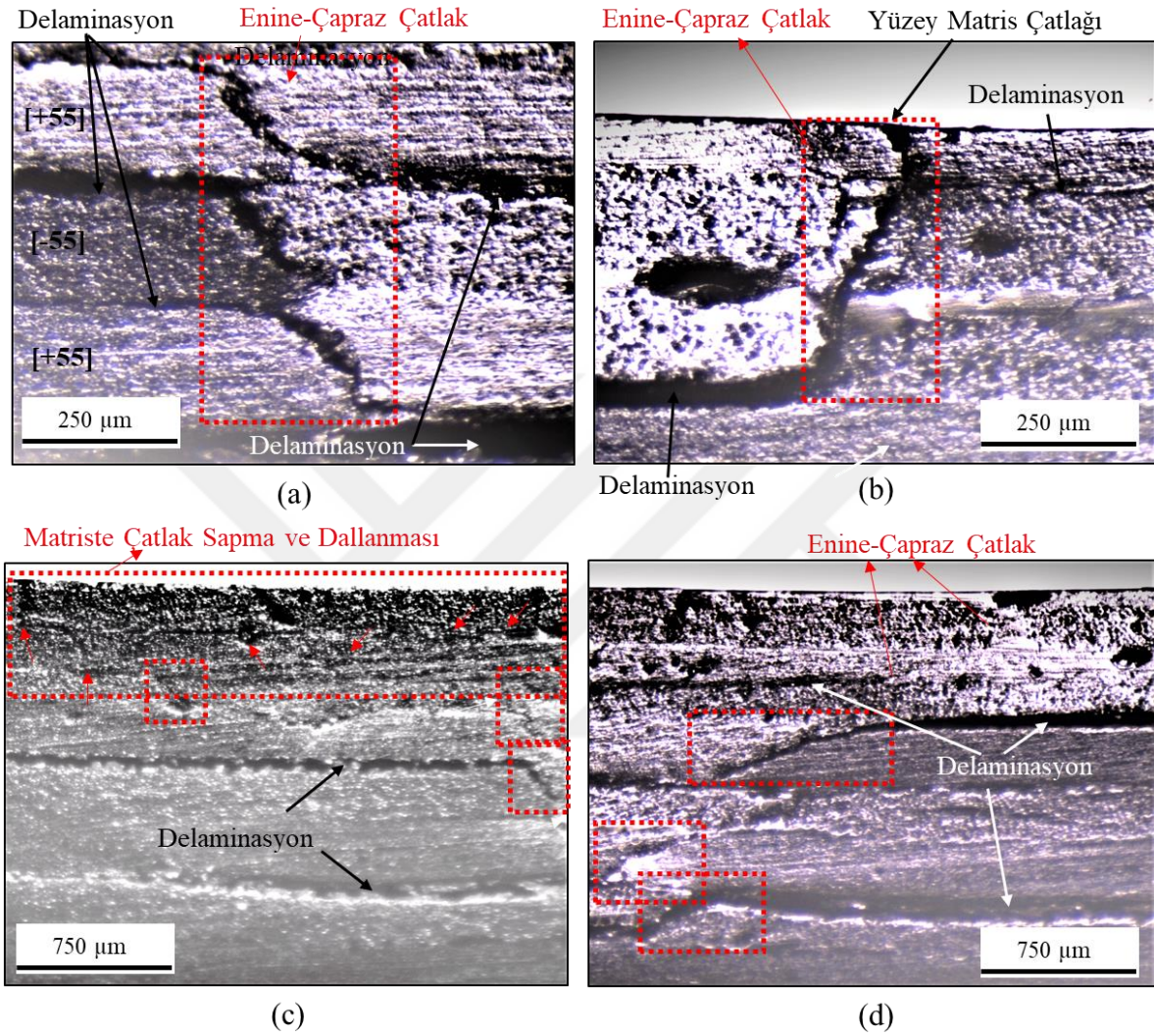
Şekil 7.62’ de görüldüğü gibi darbe merkezinde hasar oluşumu, darbe merkezinin sağındaki ve solundaki hasarlı bölgeden daha fazladır. Şekil 7.63’ deki görüntüler; matris çatlağı, enine/çapraz çatlak, delaminasyon ve matris çatlak hasarlarının daha detaylı olarak incelenmesi için verilmiştir. Darbe hasar bölgesinde meydana gelen borunun eksenine dik kesitteki dış yüzeye yakın bölgede grafen/çatlak etkileşimi ile oluşan çatlak sapması ve dallanması Şekil 7.63c’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.62 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $30\sigma_{t,max}$ yorulma yüklem oranında 7853 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun merkezine dik kesit görüntüleri; a) darbe merkezinin solundan, b) darbe merkezinden, (c) darbe merkezinin sağından

Şekil 7.64a’ da verilen SEM görüntüsü incelendiği zaman enine çatlakların oluşumunda çatlak sapması net bir şekilde belirlenmiştir. Grafen etkisi ile oluşan çatlak sapma mekanizması Şekil 7.5 ve 7.44’ te şematik olarak anlatılmıştı. Grafen takviyesi, kompozit tabakalarını oluşturan elyaf bantlarında oluşan enine/çapraz çatlakların sapmasına neden olarak çatlak

ilerlemesini yavaşlatmıştır. Böylece, sonuç hasarının ortaya çıkacağı çevrim sayısını arttırmıştır. Yorulma çevrim sayısının artması, bazalt/epoksi borularının yorulma ömrünün arttığını göstermektedir.

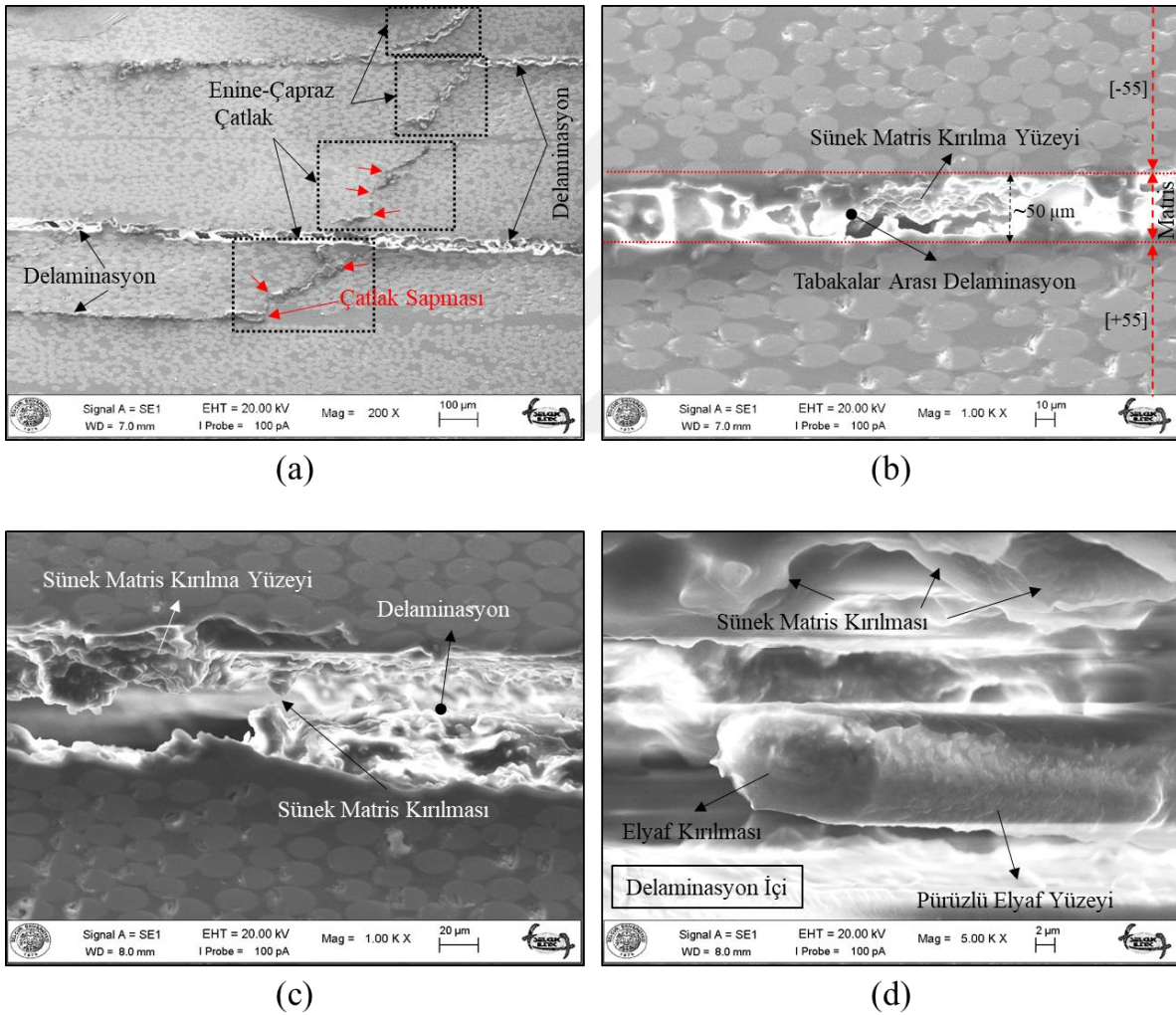


Şekil 7.63 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $\%30\sigma_{t,max}$ yorulma yükleme oranında 7853 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit görüntüleri; (a, b, c ve d) iç yüzey matris çatlağı, enine/çapraz çatlak, delaminasyon ve matris çatlak hasarları

Şekil 7.64b' de grafen/bazalt/epoksi boruların tabakalarını oluşturan ± 55 elyaf bantları arasında yaklaşık $50 \mu m$ kalınlığında delaminasyon hasarı belirlenmiştir. Burada görülen delaminasyon hasarı, epoksi reçine bakımından zengin olan elyaf bantları arasında oluşmuştur. Şekil.64' deki delaminasyon hasarının SEM görüntüsü incelendiğinde grafen takviyeli sünek matrisin kırılma yüzeyi dikkat çekmektedir. Delaminasyon hasarında görülen bu kırılma yüzeyinin, Bölüm 7.1' de anlatıldığı üzere, grafen takviyesinin epoksi matrisin birim şekil değiştirme oranını arttırması sonucunda ortaya çıktığı yorumlanmıştır.

Delaminasyon hasarında oluşan sünek matris kırılması ve yüzeyi Şekil 7.64c’de; elyaf kopma hasarı ise Şekil 7.64d’ de gösterilmiştir.

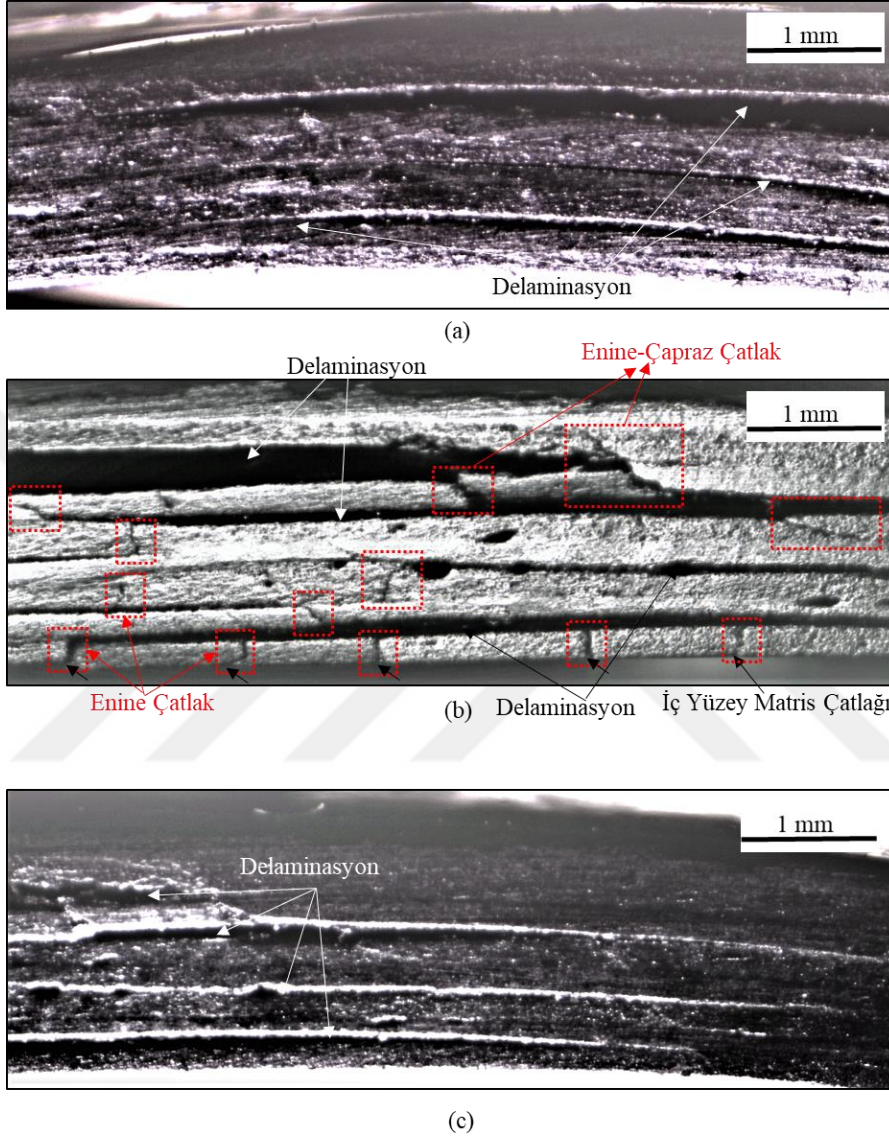
Şekil 7.58 ve 7.61’ de gösterilen bazalt/epoksi boruların delaminasyon hasarında belirlenen pürüzsüz elyaf yüzeyinin aksine, kırılan elyaf yüzeyi pürüzlü bir dokuya sahiptir. Bu pürüzlü doku, elyaf üzerinde grafen takviyeli epoksi matris kalıntılarıdır. Pürüzlü elyaf yüzeyi, elyaf/matris arasındaki arayüzey yapışmasının kuvvetli olduğunu ve elyafın matristen sürtünme sonucunda sıyrıldığını kanıtlar niteliktedir. Grafen takviyesi, bazalt elyaf ve epoksi matris arayüzey yapışmasını güçlendirerek darbe hasarlı bazalt/epoksi boruların yorulma ömrünü arttırmıştır.



Şekil 7.64 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $\%30\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 7853 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit SEM görüntüleri; (a) enine/çapraz çatlak, delaminasyon ve çatlak sapması, (b ve c) sünek matris kırılma yüzeyi ve delaminasyon, (d) sünek matris kırılma yüzeyi, elyaf kopması ve delaminasyon içi pürüzlü elyaf yüzeyi

Darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $\%40\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 34 çevrim sonrasında oluşan sonuç hasarlı borunun darbe hasar bölgesinden alınan boru eksenine

dik kesitinde oluşan hasarlar Şekil 7.65’ de verilmiştir. Aynı numunenin darbe bölgesinde borunun eksenine dik kesitinde grafen/çatlak etkileşimi ile oluşan çatlak sapma mekanizmaları Şekli 7.66a, 7.66b, 7.66c ve 7.66d’ de gösterilmiştir.

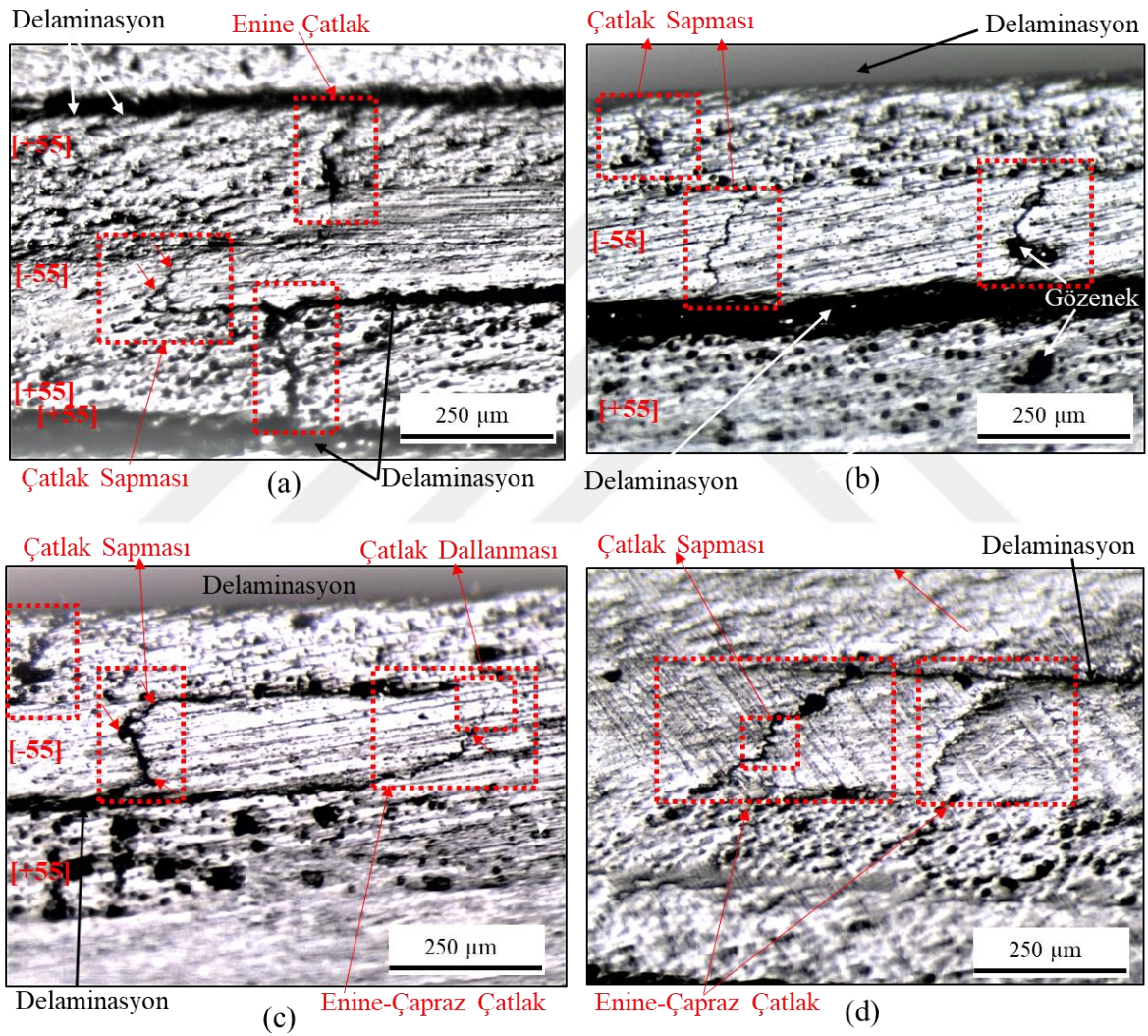


Şekil 7.65 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t,max}$ yorulma yükleme oranında 34 N sonunda darbe hasar bölgesinden borunun merkezine dik kesit görüşleri; a) darbe merkezinin solundan, b) darbe merkezinden, (c) darbe merkezinin sağından

Şekil 7.65’ de verilen borunun eksenine dik kesitte darbe etkisi ile oluşan hasar merkezinin sağında ve solundaki hasarlı bölgede sadece delaminasyon hasarı tespit edilmiştir. Şekil 7.62b’de oluşan hasarlara kıyasla, Şekil 7.65b’ de yorulma sonrası darbe merkezinde yoğun hasar oluşumu görülmüştür. Yorulma testi sonunda oluşan bu hasarların çoğu enine çatlak hasarlarıdır ve sayılarının yorulma sonrası arttığı söylenebilir. Kompozit tabakalarda meydana gelen enine/çapraz çatlak sayısının fazla olması ve elyaf kopma hasarlarının

görülmesi sonucunda; yorulma sonrası oluşan hasarların yorulma yükleme oranından etkilendiği sonucu çıkarılmıştır. Düşük yorulma yükleme oranlarına göre, yüksek yorulma yükleme oranlarında darbe hasar bölgesinde yorulma sonrası hasar oluşumlarının daha fazla olduğu görülmüştür.

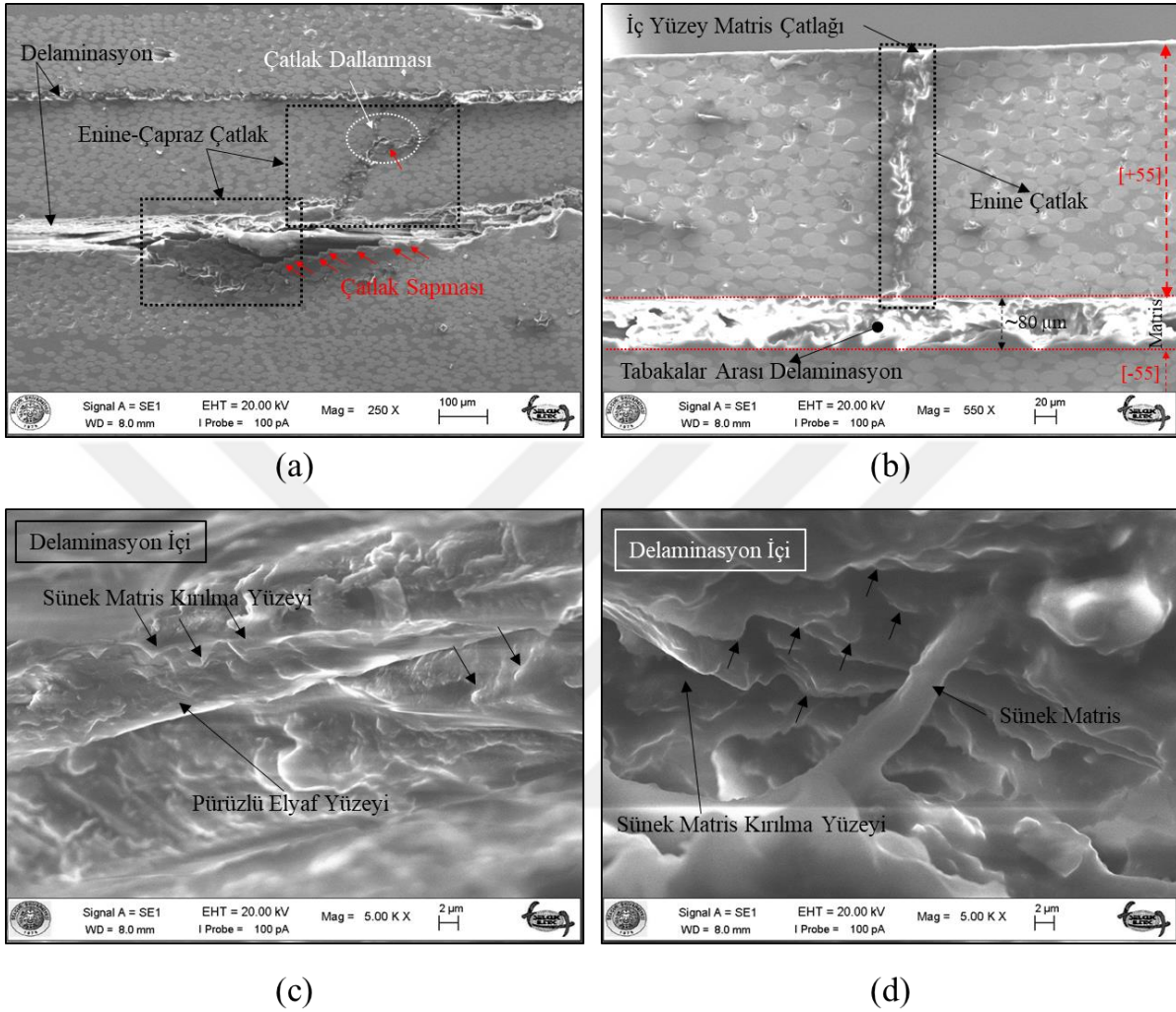
Şekil 7.66a incelendiği zaman; ± 55 elyaf bantları arasında oluşan iki farklı delaminasyon hasarı, enine/çapraz çatlak vasıtasıyla birleşerek basınçlı test sıvısı için bir sızıntı yolu meydana getirmiştir.



Şekil 7.66 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $\%40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 34 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun eksenine dik kesit görüntüleri; (a, b, c ve d) enine/çapraz çatlak ve delaminasyon hasarları

Darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $\%40\sigma_{t_max}$ yorulma yükleme oranında 34 çevrim sonunda oluşan sonuç hasarlı borunun darbe hasar bölgesinden alınan boru eksenine dik kesitteki SEM görüntüleri Şekil 7.67' de verilmiştir. Enine/çapraz çatlak hasarları oluşurken

çatlak dallanma ve çatlak sapma mekanizmalarının meydana geldiği Şekil 7.67b, 7.67c ve 7.67d’ de görülmüştür.



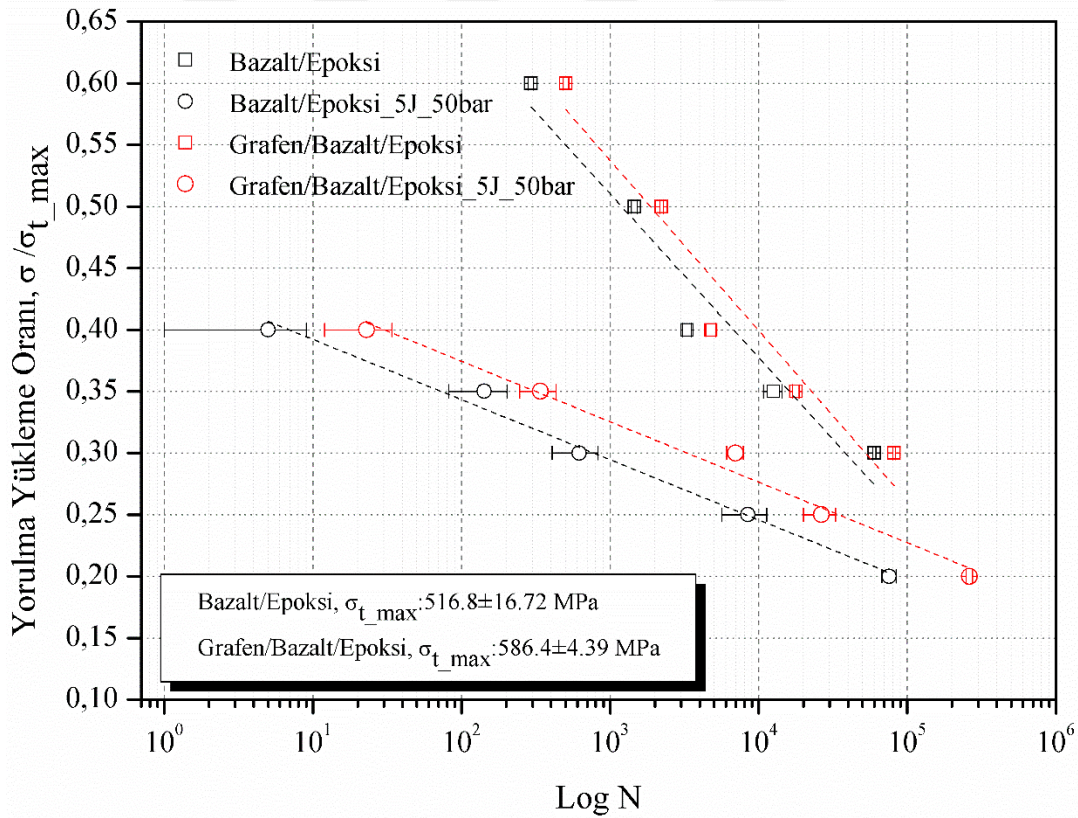
Şekil 7.67 Kapalı-uçlu 50 bar iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi boruların $40\sigma_{t_max}$ yorulma yüklem oranında 34 N sonunda darbe hasar bölgesinden alınan borunun merkezine dik kesit SEM görüntüleri; (a) enine/çapraz çatlak, $\pm 55^\circ$ elyaf bantları arasında delaminasyon, çatlak dallanması ve çatlak sapması, (b) iç yüzey matris çatlağı, enine çatlak ve delaminasyon, (c ve d) sünek matris kırılma yüzeyi, sünek matris ve delaminasyon içi pürüzlü elyaf yüzeyi

İç yüzey matris çatlağı, enine çatlak ve $\pm 55^\circ$ yönlenmiş elyaf bantları arasında delaminasyon hasarları Şekil 7.67b’ de tespit edilmiştir. Burada görülen delaminasyon hasar kalınlığı yaklaşık 80 µm’ dur. Borunun iç yüzeyinde oluşan bir çatlak, yorulma çevrimi boyunca ilerleyerek enine çatlak oluşumunu desteklemiştir; ayrıca bu çatlağın delaminasyon hasarı ile birleştiği belirlenmiştir. Grafen etkisi ile oluşan sünek matris kırılma yüzeyi, sünek matris ve delaminasyon içi pürüzlü elyaf yüzeyi Şekil 7.67c ve 7.67d’ de gösterilmiştir. Şekil 7.67d’ de görülen delaminasyon hasarında $\pm 55^\circ$ yönlenmiş elyaf bantları arasında uzamış ama kopmamış bir matris bağlantısı saptanmıştır. Sünek karakterdeki bu hasar oluşumu, grafenin

epoksi matrisin birim şekil değiştirme oranını arttırmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Ek olarak, sünek grafen/epoksi matristen sıyrılan bir elyafın pürüzlü yüzeyi Şekil 7.67c’de gösterilmiştir.

Darbe hasarlı ve hasarsız bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların sızma sonuç hasarlarının ortaya çıktığı $\sigma/\sigma_{t_max} - \text{Log N}$ eğrileri Şekil 7.68’ de verilmiştir. Şekil 7.68’de verilen lineer eğrilerde görüldüğü gibi, yorulma yükleme oranının azalmasına bağlı olarak hasarlı ve hasarsız boruların sonuç hasarları daha yüksek çevrimlerde ortaya çıkmıştır.

Darbe hasarlı ve hasarsız bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların ortalama yorulma ömürleri; %30, %35 ve %40 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında karşılaştırılabilir (Şekil 7.68). Darbe hasarlı borular hasarsız borular ile kıyaslandığı zaman yorulma ömründe önemli bir düşüş gerçekleştiği görülmüştür. Bu düşüşün temel nedeni; darbe sonrası oluşan delaminasyon, enine/çapraz çatlak ve elyaf kopması hasarlarının yorulma testi öncesi darbe etkisi ile borunun yapısında oluşmasıdır.



Şekil 7.67 Kapalı-uçlu 50 bar (ön gerilme; teğetsel: 98 MPa, aksenal: 49 MPa) iç basınç altında 5 J düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların sızma sonuç hasarının ortaya çıktığı $\sigma/\sigma_{t_max} - \text{Log N}$ eğrileri

Darbe hasarlı ve hasarsız boruların yorulma testinde, değişken iç basıncın etkisiyle $\pm 55^\circ$ yönlendirilmiş elyaf bantlarının sarım açıları, Bölüm 7.5’ te daha önce açıklandığı gibi, azalma

yönünde zorlanmaktadır. Elyafların teğetsel ve aksenal doğrultuda yüklendiği sırada, tekrar yükün kaldırılması sonucunda \pm elyaf bantlarının kesiştiği noktalarda çekme ve kayma gerilmeleri oluşmuştur. Darbe hasarlı boruların hasar bölgesinde \pm elyaf bantları arasında bulunan delaminasyon ve/veya enine/çapraz çatlak hasarları değişken iç basıncın etkisi ile defalarca elyaf doğrultusuna paralel kayma ve dik çekme gerilmelerine maruz kaldığından dolayı darbe hasarsız borulara kıyasla sızma sonuç hasarı daha düşük yorulma çevrim sayılarında ortaya çıkmıştır.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Araştırma Sonuçları

Bu tez çalışmasında, 5 J düşük hızlı darbe hasarlı ve hasarsız $[\pm 55^\circ]_4$ konfigürasyonuna sahip bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi kompozit basınçlı kapların yorulma davranışları ve mekanik özellikleri, kompozit borular üzerinden iç basınç altında kapalı-uçlu koşullar altında modellenerek belirlenmiştir. Hasarlı ve hasarsız boruların yorulma testleri ($R=0.05$ ve 25 çevrim/dk) sırasıyla; %20, %25, %30, %35 ve %40 σ_{t_max} ve %30, %35, %40, %50 ve %60 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında gerçekleştirilmiştir.

Grafen/bazalt/epoksi boruların üretimi için kullanılacak olan grafen takviye oranının deneysel olarak belirlenebilmesi için grafen/epoksi nanokompozit levhaları üzerinde çekme, eğilme ve darbe özellikleri ile ilgili bir ön çalışma yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, filaman sarma yöntemi ile üretilecek olan grafen/bazalt/epoksi borulara ilave edilmesi gereken grafen takviye oranı ağırlıkça %0.25 olarak belirlenmiş ve borularda tek takviye oranı olarak kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

8.1.1. Grafen takviyeli kompozit levhaların mekanik test sonuçları

- ❖ Ağırlıkça %0.125, %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.0 grafen takviye oranlarına sahip numunelerde çekme dayanımı, birim şekil değiştirme oranı ve elastisite modülünün en yüksek değerleri, ağırlıkça %0.25 grafen takviye oranına sahip olan numunede ortaya çıkmıştır. Saf epoksinin çekme dayanımının, % birim şekil değiştirme oranının ve elastisite modülünün sırasıyla; %11.9, %19.5 ve %6.2 oranında arttığı bulunmuştur.
- ❖ Ağırlıkça %0.25 grafen takviye oranından daha yüksek oranlara sahip numunelerin çekme özelliklerinde düşüş eğilimi görülmüştür. Bu düşüşün nedeninin, TEM görüntülerinden saptanan grafen aglomerasyonu olduğu kanısına varılmıştır.
- ❖ Saf epoksi reçineye göre, ağırlıkça %0.5 grafen takviye oranına sahip numunelerde eğilme dayanımı %20 artarken; ağırlıkça %1.0 grafen takviye

oranına sahip numunelerde eğilme modülü %41 oranında artış göstererek en yüksek değere ulaşmıştır.

- ❖ Ağırlıkça %0.125, %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.0 grafen takviyeli numunelerin çentikli darbe tokluk değerlerinde sırasıyla; %26, %358, %792, %925 ve %1127 oranlarında artış bulunmuştur.
- ❖ Ağırlıkça %0.25 grafen takviyesinin, saf epoksi matrisin % birim şekil değiştirme oranını arttırdığı ve çekme kırılma yüzeyini düz ve pürüzlü hale getirdiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, saf epoksinin gevrek kırılma davranıştan sünek kırılma davranışa geçtiğini göstermektedir.
- ❖ Ağırlıkça %0.00, %0.125, %0.25, %0.5, %0.75, %1.0 grafen/epoksi nanokompozitlerine uygulanan eğilme testleri sonrasında, makro boyutta çatlak sapma mekanizmalarını belirlemek için numune kalınlığı boyunca kırılma desen görüntüleri incelenmiştir. Grafen takviyesi ve çatlak etkileşimi ile ortaya çıkan mekanizmaların biri yada birkaçı, saf epoksinin eğilme dayanımının artışında rol oynamıştır.
- ❖ FTIR analizi için seçilen ağırlıkça %0.25 grafen takviyesinin epoksi matris ile kimyasal etkileşime girmediği tespit edilmiştir. Bu durum genelleştirilir ise, grafen ve epoksi arasında kimyasal değil, mekanik bir bağlanmanın olduğu belirlenmiştir.

8.1.2. Kapalı-uçlu iç basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların mekanik test sonuçları ve karşılaştırılması

- ❖ Grafen takviyesi, bazalt/epoksi boruların şekil değişim oranını arttırarak teğetsel ve aksenal doğrultudaki rijitliklerini azaltmıştır. Bu sonuç, Bulut' un çalışmasında (Bulut, 2017) bahsettiği yumuşatma etkisi ile benzerlik göstermektedir.
- ❖ Grafen takviyesi, bazalt/epoksi boruların teğetsel ve aksenal doğrultudaki tokluk değerlerini sırasıyla, %36 ve %10.1 oranında arttırmıştır.

- ❖ Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularının poisson oranları ($\nu_{et} = -\epsilon_t / \epsilon_e$) sırasıyla, 0.38820 ve 0.32692 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, grafen takviyesi, bazalt/epoksi borularının poisson oranını azaltıcı yönde bir rol oynamıştır.

8.1.3. Kapalı-uçlu iç basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların iç basınç test sonuçları

- ❖ Boruların çaplarına göre boylarının daha uzun ve bu doğrultudaki eksenel elastisite modülünün daha düşük olmasından dolayı boyda oluşan şekil değiştirme miktarı, çapta oluşan şekil değiştirme miktarından daha fazladır.
- ❖ Yüksek yüzey alanına sahip grafen takviyesi, elyaf/matris arayüzey yapışmasını arttırarak boruların çapında ve boyunda oluşan şekil değişim miktarını arttırmıştır. Bunun sonucunda, boruların terleme/sızma ve patlama sonuç hasar dayanımlarının arttığı bulunmuştur.
- ❖ İç basınç arttıkça bazalt/epoksi borunun çapı, patlama sonuç hasarına kadar (288 bar: ~562 MPa teğetsel gerilme) gittikçe artmıştır. Grafen/bazalt/epoksi borularda ise; boru çapında oluşan şekil değiştirme miktarı 270 bar (~530 MPa teğetsel gerilme)' a kadar artmış ancak bu basınçtan sonra sonuç hasarının ortaya çıktığı basınca kadar (320 bar: ~624 MPa teğetsel gerilme) boru çapının gittikçe azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 7.26 ve Şekil 7.27). Bunun nedeni: Bazalt/epoksi borulara göre, grafen/bazalt/epoksi boruların eksenleri doğrultusunda sonuç hasarlarına kadar %24.3 oranında daha fazla uzama göstermiş olmasıdır.
- ❖ İç basınç altında kompozit tabakalarını oluşturan $\pm 55^\circ$ elyaf bantları, sarım açısının azalması yönünde zorlanmaktadır. İç basınç etkisiyle, 55° 'lik sarım açısı, bazalt/epoksi borularda 48.52° ye azalırken grafen/bazalt/epoksi borularda 46.99° ye kadar azalmıştır. Sarım açısının 45° 'ye yaklaşması, elyafa paralel yönde oluşan kayma gerilmelerinin büyüklüğünü maksimum değere ulaştırarak, terleme ve sızma hasarlarının oluşumunda etkin rol oynamıştır.

- ❖ İç basınç testlerinin sonuç hasarları, bazalt/epoksi borularda gerilme yığılma bölgesinde elyaf kopması ve sıyrılması ile oluşan ani patlama şeklinde meydana gelirken, grafen takviyeli bazalt/epoksi borularda ise, ani patlama olarak değil, grafen etkisi ile yoğun sızma ya da akışkan jeti olarak ortaya çıkmıştır.
- ❖ Filaman sarma yöntemi ile [$\pm 55^\circ$] kompozit borularda elyaf bandının kesişim noktalarında görülen dalgalanma ve boşluklar, çatlak oluşumunda ana etkenler olabilir (Rousseau ve ark., 1999). \pm elyaf bantlarının kesişim noktalarında oluşan başlangıç çatlakları, borularda terleme/sızma ya da patlama sonuç hasar oluşumlarını destekleyebilir.

Grafen takviyesi, yukarıda bahsedilen başlangıç çatlaklarının oluşumunu engelleyerek ve/veya geciktirerek boruların yorulma ömrünün artmasında etkin rol oynadığı söylenebilir.

8.1.4. Kapalı-uçlu iç basınç altında bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları ve hasar oluşumları

- ❖ Bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularda %30, %35, %40, %50 ve %60 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında gerçekleştiren yorulma testlerinde ilk önce terleme, daha sonra sızma ve son olarak patlama sonuç hasarları oluşacak şekilde ortaya çıkmıştır.
- ❖ Bazalt/epoksi boruların; %30, %35, %40, %50 ve %60 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında ortalama yorulma ömürleri sırasıyla;
 - Terleme hasarı için; 17383, 10850, 2701, 1407 ve 252 çevrim,
 - Sızma hasarı için; 60018, 12554, 3287, 1452 ve 293 çevrim,
 - Patlama sonuç hasarı için; 96341, 46168, 17815, 4125 ve 1097 çevrim
 olarak tespit edilirken, grafen/bazalt/epoksi borularda ise, aynı yükleme oranlarına karşılık gelen ortalama yorulma ömürleri sırasıyla;
 - Terleme hasarı için; 21405, 13613, 3419, 1844 ve 396 çevrim,
 - Sızma hasarı için; 81476, 17782, 4759, 2215 ve 503 çevrim,
 - Patlama sonuç hasarı için; 356127, 99140, 35200, 7171, 1299 çevrim
 olarak tespit edilmiştir.

- ❖ Yorulma yükleme oranının büyüklüğü, borularda yorulma sırasında oluşan hasarların oluşum sırasını ve mekanizmasını etkilememiştir.
- ❖ Yorulma yükleme oranının artmasıyla (%30, %35, %40, %50 ve %60 σ_{t_max}) grafen takviyesinin yorulma ömrüne etkisinin % oranı; terleme hasarı için %20' den %60' a, sızma hasarı için %36' dan %72 'ye kadar arttığı ancak patlama sonuç hasarında ise, %270' den %20' ye kadar azaldığı bulunmuştur. Bunun nedeni, patlama sonuç hasar oluşumunda elyaf hasarı baskın iken, terleme ve sızma hasarlarının oluşumunda ise matris hasarının baskın olmasıdır.
- ❖ Patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi boruların eksenine dik doğrultudaki kesitlerinin SEM görüntüleri incelendiği zaman bazalt elyafların epoksi matristen sıyrılarak ayrılması (pull-out), elyaf/matris ayrılmaları (debonding) ve $\pm 55^\circ$ yönelmiş elyaf bantları arasında delaminasyon, matris çatlakları ve enine ve/veya çapraz çatlaklarından oluşan hasar çeşitleri tespit edilmiştir.
- ❖ Patlama sonuç hasarlı bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularda görülen elyaf bant hasarında tespit edilen elyaf yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Grafen/bazalt/epoksi borulardan alınan elyaf hasar yüzeyleri, bazalt/epoksi borularla kıyaslandığı zaman elyaf yüzeylerine yapışmış matris kalıntılarında dolayı yüzeylerin pürüzlü olduğu tespit edilmiştir. Bu kalıntılar, elyafın matristen sürtünmeli ve daha zor çekildiğini (frictional pull-out) kanıtlar niteliktedir. Bu incelemeler sonucu grafen takviyesinin, elyaf/matris arayüzey dayanımını arttırdığı yorumu çıkarılmıştır.
- ❖ Patlama sonuç hasarlı grafen/bazalt/epoksi borunun terleme ve yoğun sızma hasarlarının görüldüğü bölgeden alınan boru halkasının eksenine dik doğrultudaki kesitin SEM görüntüleri incelenmesi sonucunda çatlak ucu körleme, çatlak sapma ve dallanma kırılma mekanizmaları tespit edilmiştir.

Grafen takviyesi ile elyaf/matris arayüzeyinde oluşan yukarıdaki kırılma mekanizmaları sayesinde debonding, delaminasyon ve enine/çapraz çatlak hasarlarını oluşturan çatlak ilerlemesinin gecikmesi ve matrisin sünek davranış sergilemesine neden olan plastik deformasyon oluşumları bazalt/epoksi borularının yorulma ömrünü arttırmıştır.

- ❖ Grafen takviyesinin yeterli elyaf/matris arayüzey yapışması sağlaması (Liang ve ark., 2009; Kim ve ark., 2010) ve yük aktarımını matriste hasar oluşturmadan gerçekleştirmesi (Alexopoulos ve ark., 2017) sonucunda matrise gelen yüklerin takviye elemanına aktarılması ve elyaf/matris arasındaki yük paylaşımının daha kolay olduğu referanslarda vurgulanmıştır. Bu bilgiler ışığında grafen takviyesi, elyaf/matris arayüzeyinde yük aktarma verimliliğini artırarak, boruların yorulma ömrünün artmasında etkili rol oynamıştır.

8.1.5. Kapalı-uçlu iç basınç altında düşük hızlı darbe uygulanmış bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların yorulma test sonuçları ve hasar oluşumları

- ❖ İç basınç altında (50 bar) darbe hasarlı borular elde etmek için başlangıç testleri olarak 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20 ve 25 J darbe enerji seviyelerinde darbe testleri düşük hızlı darbe test cihazında (Şekil 6.7) gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri sonucunda temas kuvveti-zaman ve temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Sadece 25 J 'lük darbe uygulanan grafen takviyeli ve takviyesiz boruların darbe bölgesindeki yüzey matris çatlağından test sıvısının yoğun olarak sızdığı tespit edilmiştir. 20 J darbe etkisi, bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi boruların darbe sonrası sızma hasarına dayanabileceği üst sınır enerji büyüklüğü olarak belirlenmiştir.
- ❖ 50 bar iç basınç altında 2.5, 5, 7.5, 10, 15 ve 20 J darbe enerji değerleri ile hasarlandırılmış borulara $30\sigma_{t_max}$ yükleme oranlarında yapılan yorulma testi sonucunda;
 - Bazalt/epoksi borular için sırasıyla; 14884, 892, 4, 1, 1, 1 çevrim,
 - Grafen/bazalt/epoksi borular için sırasıyla; 24101, 6958, 363, 221, 23, 1 çevrim olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, bulunan yorulma çevrim sayıları göz önüne alındığında boruların yapısında darbe sonrası yorulma hasarının ortaya çıkmasını sağlayacak kadar darbe hasarı oluşturabilen 5 J değerindeki darbe enerjisi seçilmiştir.Ayrıca, yukarıdaki darbe büyüklükleri ile hasarlandırılmış borularda yorulma ömrü sonunda darbe bölgesinde hafif sızma, damla şeklinde sızma,

yoğun sızma ve akışkan jeti olarak dört farklı sonuç hasarının ortaya çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 7.34).

- ❖ 5 J 'lük darbe testi sonrası bazalt/epoksi borularda oluşan en büyük temas kuvveti ve temas rijitlik değerleri grafen takviyesi ile artarken; absorbe edilen enerji ve yer değiştirme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- ❖ 5 J 'lük darbe testi sonrası, bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borularda elde edilen eğilme rijitlikleri sırasıyla, 694916 ve 725797 N/m olarak bulunmuştur. Sonuç olarak grafen takviyesi, bazalt/epoksi boruların eğilme rijitliğini arttırmıştır.
- ❖ 5 J darbe hasarlı bazalt/epoksi borularda oluşan darbe hasarlarından yola çıkarak belirlenen %20, %25, %30, %35 ve %40 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında ortalama yorulma ömürleri sırasıyla; 75589, 8459, 618, 142 ve 5 çevrim olarak bulunmuştur.

Darbe hasarlı borularda %40 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında elde edilen çok düşük yorulma çevrimleri değerlendirildiği zaman; %40 σ_{t_max} üzerindeki yükleme oranlarında yorulma testleri, darbe hasarının büyüklüğü nedeniyle uygulanamaz hale gelmiştir. Bu yükleme oranı üzerinde yapılacak olan testlerde yorulma ömrü açısından önemli bir sonuç elde edilemeyeceği yorumlanmıştır.
- ❖ 5 J darbe hasarlı grafen/bazalt/epoksi borularda %20, %25, %30, %35 ve %40 σ_{t_max} yükleme oranlarında ortalama yorulma ömürleri sırasıyla; 261969, 26363, 6958, 339 ve 23 çevrim olarak tespit edilmiştir.

Grafen takviyesi, 5 J 'lük darbe hasarlı bazalt/epoksi borularda yukarıdaki yorulma yükleme oranlarında yorulma ömrünü sırasıyla; yaklaşık 3.5, 3.2, 11.3, 2.4 ve 5 kat arttırmıştır.
- ❖ 5 J darbe hasarlı ve hasarsız borular; %30, %35 ve %40 σ_{t_max} yorulma yükleme oranlarında yorulma ömürleri karşılaştırıldı. Sonuç olarak, darbe etkisi ile bazalt/epoksi boruların yorulma ömürlerinin, yukarıdaki yorulma yükleme oranlarına göre sırasıyla; 98, 87 ve 658 kat oranlarında azaldığı bulunmuştur.

Grafen/bazalt/epoksi boruların aynı yükleme oranlarında yorulma ömürleri sırasıyla; 51, 292 ve 1530 kat oranlarında darbe etkisi ile azaldığı tespit edilmiştir.

Darbe hasarlı borular, hasarsız borular ile kıyaslandığı zaman yorulma öncesi darbe etkisi ile oluşan delaminasyon, enine/çapraz çatlak ve elyaf kopma hasarlarından dolayı hasarlı boruların yorulma ömürlerinin çok düşük olduğu ve bazalt/epoksi ve grafen/bazalt/epoksi borular üzerinde düşük hızlı darbe etkisinin kritik derecede önemli ve tehlikeli olduğu sonucuna varılmıştır.

8.2 Öneriler

Doktora tez çalışması sırasında birçok farklı çalışma konusu ile karşılaşılmıştır. Bu konular genel başlıklar halinde aşağıda önerilmiştir.

- ✓ Cam ve/veya karbon gibi farklı elyaf parametreleri kullanılarak boruların yorulma davranışları üzerinde grafen takviyesinin etkisi araştırılabilir.
- ✓ Kapalı-uçlu koşullar altında farklı iç basınç değerlerinde düşük hızlı darbe çalışması yapılarak boruların dinamik davranışı ortaya konulabilir.
- ✓ Kapalı-uçlu iç basınç koşullar altında grafen/bazalt/epoksi boruların $\sigma - N$ grafiğinde sürekli mukavemet sınırının olup olmadığını anlamak için borulara $0.3\sigma_{t_max}$ 'dan daha düşük yorulma yükleme oranlarında yorulma testleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1991, Impact on laminated composite materials, *Applied mechanics reviews*, 44 (4), 155-190.
- Abrate, S., 1994, Impact on laminated composites: recent advances, *Applied Mechanics Reviews*, 47 (11), 517-544.
- Abrate, S., 1998, Low-velocity impact damage, *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press, 135-160.
- Abrate, S., 2005, Impact on composite structures, Cambridge university press.
- Abrate, S., 2011, Impact engineering of composite structures, Springer Science & Business Media.
- Ajayan, P. M., Suhr, J. ve Koratkar, N., 2006, Utilizing interfaces in carbon nanotube reinforced polymer composites for structural damping, *Journal of Materials Science*, 41 (23), 7824-7829.
- Alexopoulos, N. D., Paragkamian, Z., Poulin, P. ve Kourkoulis, S. K., 2017, Fracture related mechanical properties of low and high graphene reinforcement of epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 150, 194-204.
- Anonim, 2019, www.community.plm.automation.siemens.com, [18.01.2019].
- Arikan, H., 2010, Failure analysis of ($\pm 55^\circ$)₃ filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure, *Composite Structures*, 92 (1), 182-187.
- Atas, C., Icten, B. M. ve Küçük, M., 2013, Thickness effect on repeated impact response of woven fabric composite plates, *Composites Part B: Engineering*, 49, 80-85.
- Atif, R., Shyha, I. ve Inam, F., 2016, Mechanical, thermal, and electrical properties of graphene-epoxy nanocomposites—A review, *Polymers*, 8 (8), 281.
- Atif, R., Shyha, I. ve Inam, F., 2017, Modeling and experimentation of multi-layered nanostructured graphene-epoxy nanocomposites for enhanced thermal and mechanical properties, *Journal of Composite Materials*, 51 (2), 209-220.
- Bashar, M. T., Sundararaj, U. ve Mertiny, P., 2013, Mode-I interlaminar fracture behaviour of nanoparticle modified epoxy/basalt fibre-reinforced laminates, *Polymer testing*, 32 (2), 402-412.
- Bathias, C., 1999, There is no infinite fatigue life in metallic materials, *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 22 (7), 559-565.
- Bortz, D. R., Merino, C. ve Martin-Gullon, I., 2011, Carbon nanofibers enhance the fracture toughness and fatigue performance of a structural epoxy system, *Composites Science and Technology*, 71 (1), 31-38.
- Bouvet, C., Rivallant, S. ve Barrau, J.-J., 2012, Low velocity impact modeling in composite laminates capturing permanent indentation, *Composites Science and Technology*, 72 (16), 1977-1988.
- Bulut, M., 2017, Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets, *Composites Part B: Engineering*, 122, 71-78.
- Burhan, I. ve Kim, H., 2018, SN Curve Models for Composite Materials Characterisation: An Evaluative Review, *Journal of Composites Science*, 2 (3), 38.
- Cantwell, W. ve Morton, J., 1991, The impact resistance of composite materials—a review, *Composites*, 22 (5), 347-362.
- Cauchois, J. P., 2009, Processos em compósitos. In: ABMACO. Compósitos I, materiais, processos, aplicações, desempenhos e tendências., Universidade de São Paulo, p. 450-452.
- Ceyhun, V. ve Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.

- Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B. ve Schulte, K., 2014, Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 97, 90-99.
- Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N., Schlagenhaut, L., Nüesch, F. ve Chu, B., 2012a, Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites, *Carbon*, 50 (15), 5380-5386.
- Chatterjee, S., Wang, J., Kuo, W., Tai, N., Salzmann, C., Li, W., Hollertz, R., Nüesch, F. ve Chu, B., 2012b, Mechanical reinforcement and thermal conductivity in expanded graphene nanoplatelets reinforced epoxy composites, *Chemical Physics Letters*, 531, 6-10.
- Chen, W., Shen, H., Auad, M. L., Huang, C. ve Nutt, S., 2009, Basalt fiber–epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (8), 1082-1089.
- Choi, H. Y., Downs, R. ve Chang, F.-K., 1991a, A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part I—experiments, *Journal of Composite Materials*, 25 (8), 992-1011.
- Choi, H. Y., Wu, H.-Y. T. ve Chang, F.-K., 1991b, A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part II—analysis, *Journal of Composite Materials*, 25 (8), 1012-1038.
- Courtney, T. H., 2005, Mechanical behavior of materials, Waveland Press.
- Dassios, K. G., Musso, S. ve Galiotis, C., 2012, Compressive behavior of MWCNT/epoxy composite mats, *Composites science and technology*, 72 (9), 1027-1033.
- Demirci, M. T., 2015, SiO₂ nanopartikül katkısının yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların yorulma davranışlarına etkisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- 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.
- Deniz, M. E., 2011, Seawater Effect On Behaviors of Impact And Axial Compression-After Impact Of Composite Pipes Doctoral Thesis, *Dokuz Eylül University İzmir*, 83.
- Deniz, M. E., Ozdemir, O., Ozen, M. ve Karakuzu, R., 2013a, Failure pressure and impact response of glass–epoxy pipes exposed to seawater, *Composites Part B: Engineering*, 53, 355-361.
- Deniz, M. E., Ozen, M., Ozdemir, O., Karakuzu, R. ve Icten, B. M., 2013b, Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading, *Composites Part B: Engineering*, 44 (1), 304-312.
- Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S.-J. ve Hui, D., 2015, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180.
- Domun, N., Hadavinia, H., Zhang, T., Liaghat, G., Vahid, S., Spacie, C., Paton, K. R. ve Sainsbury, T., 2017, Improving the fracture toughness properties of epoxy using graphene nanoplatelets at low filler content, *Nanocomposites*, 3 (3), 85-96.
- Dorey, G., 1987, Impact damage in composites—development, consequences and prevention, *Proc. of ICCM*, 3.1-3.26.
- Edie, D., 1998, The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers, *Carbon*, 36 (4), 345-362.
- Eldeniz, İ., 1992, Yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde yorulma çatlak büyümesi ve tabaka ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Konya*.

- Ellyin, F., Carroll, M., Kujawski, D. ve Chiu, A., 1997, The behavior of multidirectional filament wound fibreglass/epoxy tubulars under biaxial loading, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28 (9-10), 781-790.
- Ellyin, F. ve Martens, M., 2001, Biaxial fatigue behaviour of a multidirectional filament-wound glass-fiber/epoxy pipe, *Composites science and technology*, 61 (4), 491-502.
- Endruweit, A., Gommer, F. ve Long, A., 2013, Stochastic analysis of fibre volume fraction and permeability in fibre bundles with random filament arrangement, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 49, 109-118.
- Erkal, S., 2007, Fatigue Damage in Composite Cylinders, Master Thesis, *Dokuz Eylül University*, İzmir.
- Fenan, C., 2019.
- Frost, S., 1995, Predicting the long term fatigue behavior of filament wound glass fiber/epoxy matrix pipes, *Tenth International Conference on Composite Materials. I. Fatigue and Fracture*, 649-656.
- Fu, S.-Y., Feng, X.-Q., Lauke, B. ve Mai, Y.-W., 2008, Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 39 (6), 933-961.
- Fukunaga, H. ve Uemura, M., 1983, Optimum design of helically wound composite pressure vessels, *Composite structures*, 1 (1), 31-49.
- Gemi, L., 2014, Düşük Hızlı Darbe Hasarlı Filaman Sarım Hibrid Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, 164.
- Gerlach, R., Siviour, C. R., Wiegand, J. ve Petrinic, N., 2012, In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading, *Composites Science and Technology*, 72 (3), 397-411.
- Gladwell, G. M. L., 2014, The behavior of structures composed of composite materials, *New York*, Kluwer Academic Publisher, p. 1-445.
- Greenhalgh, E., 2009, Failure analysis and fractography of polymer composites, Elsevier, p.
- Günaydın, B., 2003, Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.
- Günaydın, B., Dağhan, B. ve Avcı, A., 2013, Fatigue behavior of surface-notched composite pipes repaired by composite patches, *International Journal of Damage Mechanics*, 22 (4), 490-498.
- İçten, B. M., 2006, Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Low- Velocity Impact, Doctoral of Philosophy, *Dokuz Eylül University*, İzmir.
- Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M. ve Seguchi, T., 2002, Fiber reinforced plastics using a new heat-resistant silicon based polymer, *Journal of materials science*, 37 (17), 3795-3801.
- Jih, C. ve Sun, C., 1993, Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact, *Journal of composite materials*, 27 (7), 684-701.
- Joseph, E. ve Perreux, D., 1994, Fatigue behaviour of glass-fibre/epoxy-matrix filament-wound pipes: tension loading tests and results, *Composites Science and Technology*, 52 (4), 469-480.
- Joshi, S. ve Sun, C., 1987, Impact-Induced Fracture Initiation and Detailed Dynamic Stress Field in the Vicinity of the Impact.(Retroactive Coverage), *American Society for Composites Second Technical Conference*, 177-185.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- Kara, M., 2012, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Konya*.
- Kaynak, C. ve Mat, O., 2001, Uniaxial fatigue behavior of filament-wound glass-fiber/epoxy composite tubes, *Composites Science and Technology*, 61 (13), 1833-1840.
- Kim, H., Miura, Y. ve Macosko, C. W., 2010, Graphene/polyurethane nanocomposites for improved gas barrier and electrical conductivity, *Chemistry of Materials*, 22 (11), 3441-3450.
- Kim, M., Rhee, K., Park, S. ve Hui, D., 2012, Effects of silane-modified carbon nanotubes on flexural and fracture behaviors of carbon nanotube-modified epoxy/basalt composites, *Composites Part B: Engineering*, 43 (5), 2298-2302.
- King, J. A., Klimek, D. R., Miskioglu, I. ve Odegard, G. M., 2013, Mechanical properties of graphene nanoplatelet/epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 128 (6), 4217-4223.
- Krikanov, A. A., 2000, Composite pressure vessels with higher stiffness, *Composite structures*, 48 (1), 119-127.
- Krishnan, P., Abdul Majid, M. S., Afendi, M., Gibson, A. G. ve Marzuki, H. F. A., 2015, Effects of winding angle on the behaviour of glass/epoxy pipes under multiaxial cyclic loading, *Materials & Design*, 88, 196-206.
- Kujawski, D., Chiu, A. ve Ellyin, F., 1996, An effective stress parameter for long-term fatigue strength of fiber-reinforced plastic pipes, *Journal of Composites, Technology and Research*, 18 (3), 215-220.
- Kujawski, D., Ellyin, F. ve Culen, M., 1998, The fatigue behaviour of filament-wound fiberglass/epoxy tubes under cyclic pressure, *Journal of reinforced plastics and composites*, 17 (3), 268-281.
- Kumari, P. ve Wang, J., 2018, Residual Tensile Strength of the Multi-Impacted Scarf-Repaired Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Composites, *Materials*, 11 (12), 2351.
- Kwon, K.-B., Song, C.-H., Park, J.-Y., Shin, D.-Y., Cho, J.-W. ve Cho, S.-H., 2013, Rock fragmentation assessment of a drill bit by Hopkinson bar percussion test, *Tunnel and Underground Space*, 23 (1), 42-53.
- Li, B., Liu, D., Li, G. ve Yang, X., 2018, Multifold interface and multilevel crack propagation mechanisms of graphene oxide/polyurethane/epoxy membranes interlaminar-toughened carbon fiber-reinforced polymer composites, *Journal of Materials Science*, 53 (23), 15939-15951.
- Liang, J., Huang, Y., Zhang, L., Wang, Y., Ma, Y., Guo, T. ve Chen, Y., 2009, Molecular-level dispersion of graphene into poly (vinyl alcohol) and effective reinforcement of their nanocomposites, *Advanced Functional Materials*, 19 (14), 2297-2302.
- Liu, D. ve Malvern, L. E., 1987, Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates, *Journal of Composite Materials*, 21 (7), 594-609.
- Liu, D., Raju, B. B. ve Dang, X., 2000, Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates, *International Journal of Impact Engineering*, 24 (6-7), 733-746.
- Liu, L., Huang, Y., Zhang, Z., Jiang, Z. ve Wu, L., 2008, Ultrasonic treatment of aramid fiber surface and its effect on the interface of aramid/epoxy composites, *Applied Surface Science*, 254 (9), 2594-2599.
- Loos, M., Yang, J., Feke, D. ve Manas-Zloczower, I., 2012, Enhanced fatigue life of carbon nanotube-reinforced epoxy composites, *Polymer Engineering & Science*, 52 (9), 1882-1887.
- 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.

- Mazumdar, S., 2001, Composites manufacturing: materials, product, and process engineering, CrC press.
- Meyers Marc, A. ve Kumar, C. K., 1998, Mechanical Behaviors of Materials, Prentice Hall.
- Mil-Hdbk, 1998, DOD Coordination Working Draft.
- Naik, M. K., 2005, The effect of environmental conditions on the hydrostatic burst pressure and impact performance of glass fiber reinforced thermoset pipes. , M.Sc Thesis, *Kinh Fahd University of Petroleum & Minerals*, Dhahran.
- Newman, J. ve Raju, I., 1981, An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack, *Engineering fracture mechanics*, 15 (1-2), 185-192.
- Newman, J., Reuter, W. ve Aveline, C., 2000, Stress and fracture analyses of semi-elliptical surface cracks, In: Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume, Eds: ASTM International.
- Newman Jr, J. ve Raju, I., 1979, Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads.
- Olabi, A., Morris, E., Hashmi, M. ve Gilchrist, M., 2008, Optimised design of nested circular tube energy absorbers under lateral impact loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50 (1), 104-116.
- Onder, A., Sayman, O., Dogan, T. ve Tarakcioglu, N., 2009, Burst failure load of composite pressure vessels, *Composite Structures*, 89 (1), 159-166.
- Perreux, D. ve Joseph, E., 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament-wound pipes under biaxial loading: experimental results and damage model, *Composites science and technology*, 57 (3), 353-364.
- Qu, J., 1993, The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials, *Mechanics of Materials*, 14 (4), 269-281.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.-Z. ve Koratkar, N., 2009, Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content, *ACS nano*, 3 (12), 3884-3890.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z. ve Koratkar, N., 2010, Fracture and fatigue in graphene nanocomposites, *small*, 6 (2), 179-183.
- Raju, I. ve Newman Jr, J., 1977, Improved stress-intensity factors for semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates, *4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, San Francisco, California, U.S.A.
- Ramanathan, T., Abdala, A., Stankovich, S., Dikin, D., Herrera-Alonso, M., Piner, R., Adamson, D., Schniepp, H., Chen, X. ve Ruoff, R., 2008, Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites, *Nature nanotechnology*, 3 (6), 327.
- Reifsnider, K. L., 2012, Fatigue of composite materials, Elsevier.
- Richardson, M. ve Wisheart, M., 1996, Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27 (12), 1123-1131.
- Robinson, P. ve Davies, G., 1992, Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites, *International Journal of Impact Engineering*, 12 (2), 189-207.
- Rouchan, J., 1987, Matériaux composites pour d'aeronefs, *National Higher School of Aeronautical Constructions*, 95.
- Rousseau, J., Perreux, D. ve Verdiere, N., 1999, The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes, *Composites Science and Technology*, 59 (9), 1439-1449.
- Sachse, S., Silva, F., Pielichowski, K., Leszczynska, A. ve Njuguna, J., 2012, Compression strength and low-velocity impact performance of nanocored sandwich composites, *Mechanics of nano, micro and macro composite structures*, 18-20.

- Samanci, A., Avci, A., Tarakcioglu, N. ve Şahin, Ö. S., 2008, Fatigue crack growth of filament wound GRP pipes with a surface crack under cyclic internal pressure, *Journal of materials science*, 43 (16), 5569-5573.
- Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi.
- Schwartz, M. M., 1984, Composite materials handbook, McGraw-Hill, p.
- Sepet, H., 2014, Nano-Partikül Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen Nanokompozitlerin Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, 129.
- Shen, M.-Y., Chang, T.-Y., Hsieh, T.-H., Li, Y.-L., Chiang, C.-L., Yang, H. ve Yip, M.-C., 2013, Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplatelets reinforced polymer nanocomposites, *Journal of Nanomaterials*, 2013, 1.
- Shokrieh, M., Esmkhani, M., Haghhighatkah, A. ve Zhao, Z., 2014a, Flexural fatigue behavior of synthesized graphene/carbon-nanofiber/epoxy hybrid nanocomposites, *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 401-408.
- Shokrieh, M., Ghoreishi, S., Esmkhani, M. ve Zhao, Z., 2014b, Effects of graphene nanoplatelets and graphene nanosheets on fracture toughness of epoxy nanocomposites, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 37 (10), 1116-1123.
- Singh, S., Srivastava, V. ve Prakash, R., 2013, Characterisation of multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy resin composites, *Materials Science and Technology*, 29 (9), 1130-1134.
- Singh, S., Srivastava, V. ve Prakash, R., 2015, Influences of carbon nanofillers on mechanical performance of epoxy resin polymer, *Applied Nanoscience*, 5 (3), 305-313.
- Sinha, P., 2006, Composite materials and structures, *Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur*.
- Sjoblom, P. O., Hartness, J. T. ve Cordell, T. M., 1988, On low-velocity impact testing of composite materials, *Journal of composite materials*, 22 (1), 30-52.
- Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. T. ve Ruoff, R. S., 2006, Graphene-based composite materials, *nature*, 442 (7100), 282.
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. ve Fuchs, H. O., 2000, Metal fatigue in engineering, John Wiley & Sons.
- Strong, A. B., 2008, Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications, Society of Manufacturing Engineers.
- Swanson, S. R., 1974, Handbook of fatigue testing.
- Şahin, Ö. S., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, 150.
- Talreja, R., 2003, Fatigue of composite materials, In: Modern Trends in Composite Laminates Mechanics, Eds: Springer, p. 281-294.
- Tang, L.-C., Wan, Y.-J., Yan, D., Pei, Y.-B., Zhao, L., Li, Y.-B., Wu, L.-B., Jiang, J.-X. ve Lai, G.-Q., 2013, The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites, *Carbon*, 60, 16-27.
- Tarakcioglu, N., Akdemir, A. ve Avci, A., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, *Composites Part B: Engineering*, 32 (2), 131-138.
- Tarakçiöglu, N., Gemi, L. ve Yapici, A., 2005, Fatigue failure behavior of glass/epoxy±55 filament wound pipes under internal pressure, *Composites Science and Technology*, 65 (3), 703-708.
- Tarakçiöglu, N., 1992, Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız Filaman Sarım Cam-Epoksi Borularda Sarım Açısının Malzeme Özelliklerine Etkisi, *Doktora Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.

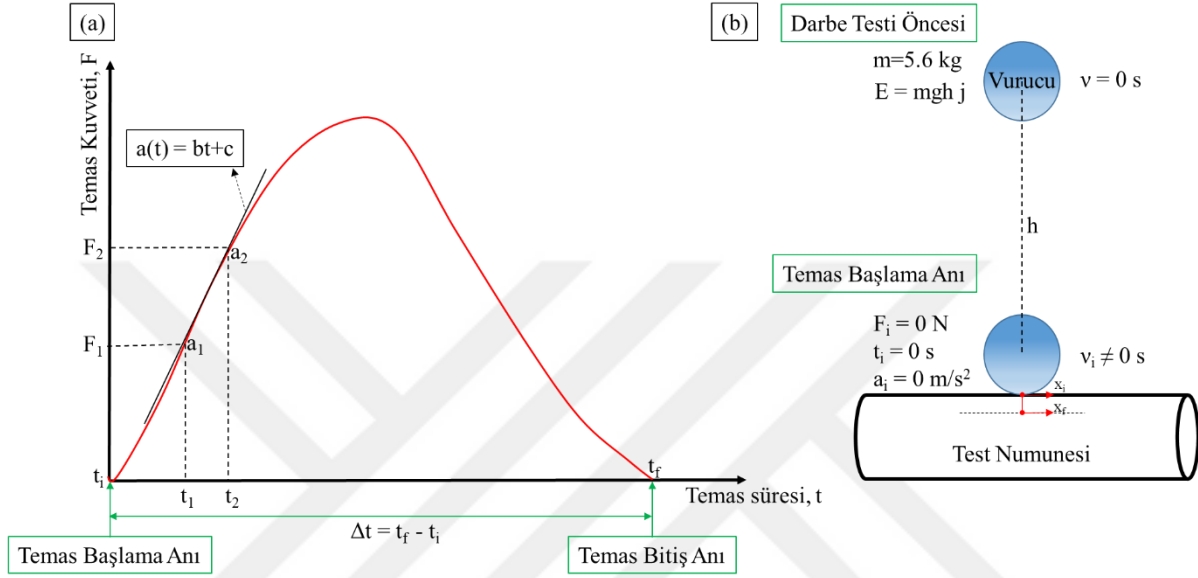
- Tinô, S. R. L. ve Aquino, E. M. F. d., 2014, Fracture characteristics and anisotropy in notched glass fiber reinforced plastics, *Materials Research*, 17 (6), 1610-1619.
- Tsai, S., 2018, Introduction to composite materials, Routledge.
- Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö. S., Avcı, A. ve Ekrem, M., 2014, Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, *Applied Surface Science*, 318, 37-42.
- Ulus, H., Üstün, T., Şahin, Ö. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V. ve Avcı, A., 2016, Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates, *Journal of Composite Materials*, 50 (6), 761-770.
- Uyaner, M. ve Kara, M., 2007, Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 41 (24), 2877-2896.
- Vasiliev, V. V. ve Morozov, E. V., 2001, Mechanics and analysis of composite materials, Elsevier.
- Vek, K., 2019, www.basfiber.com, [18/01/2019].
- Wajid, A. S., Ahmed, H. T., Das, S., Irin, F., Jankowski, A. F. ve Green, M. J., 2013, High-Performance Pristine Graphene/Epoxy Composites With Enhanced Mechanical and Electrical Properties, *Macromolecular Materials and Engineering*, 298 (3), 339-347.
- Wang, F., Drzal, L. T., Qin, Y. ve Huang, Z., 2016, Enhancement of fracture toughness, mechanical and thermal properties of rubber/epoxy composites by incorporation of graphene nanoplatelets, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87, 10-22.
- Wang, H. ve Vu-Khanh, T., 1994, Damage extension in carbon fiber/PEEK crossply laminates under low velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 28 (8), 684-707.
- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F. ve Friedrich, K., 2006, Epoxy nanocomposites—fracture and toughening mechanisms, *Engineering fracture mechanics*, 73 (16), 2375-2398.
- Wolodko, J. D., 2000, Biaxial fatigue and leakage characteristics of fiber reinforced composite tubes.
- Yang, S.-Y., Lin, W.-N., Huang, Y.-L., Tien, H.-W., Wang, J.-Y., Ma, C.-C. M., Li, S.-M. ve Wang, Y.-S., 2011, Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites, *Carbon*, 49 (3), 793-803.
- Yavari, F., Rafiee, M., Rafiee, J., Yu, Z.-Z. ve Koratkar, N., 2010, Dramatic increase in fatigue life in hierarchical graphene composites, *ACS applied materials & interfaces*, 2 (10), 2738-2743.
- Yu, N., Zhang, Z. ve He, S., 2008, Fracture toughness and fatigue life of MWCNT/epoxy composites, *Materials Science and Engineering: A*, 494 (1-2), 380-384.
- Zhang, W., Picu, R. ve Koratkar, N., 2007, Suppression of fatigue crack growth in carbon nanotube composites, *Applied Physics Letters*, 91 (19), 193109.
- Zhong, Y. ve Joshi, S. C., 2015, Impact behavior and damage characteristics of hygrothermally conditioned carbon epoxy composite laminates, *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 254-264.

EKLER

EK-1 DÜŞÜK HIZLI DARBE TESTLERİNİN KİNETİK ANALİZİ

1. Kuvvet-Yer değiştirme Eğrilerinin Oluşturulması

Darbe testleri esnasında kuvvetin zaman karşı değişimi kuvvet sensörü yardımıyla ölçülür. Sonuç olarak Şekil 1’ de görülen tipik kuvvet-zaman eğrisi çizilir.



Şekil 1. (a) Kuvvet-zaman eğrisi, (b) darbe testinin şematik gösterimi

Kuvvet-zaman eğrisinden temas süresi boyunca kuvvet değişimleri bilinmektedir. Vurucunun kütlesi 5.6 kg ve temas süresi boyunca değişmez. Bu veriler kullanılarak Newton’ un II. kanunundan t_2 anındaki vurucunun ivmesi Denklem 1’ ile bulunabilir. Şekil 1’ den anlaşılacağı gibi ivmenin zamana göre değişimi 2.dereceden bir denklemdir. Ancak ivmenin zaman göre değişimi 1. Dereceden denklem ile ele alınmıştır. Çünkü 1. ve 2. dereceden denklemler kullanılarak hesaplanan darbe test sonuçları arasında ihmal edilebilecek kadar küçük farklılıklar vardır.

$$F_2 = ma \quad (1)$$

1.dereceden denklem ile Δt ($t_f - t_i$; temas süresi) zaman aralığında ivmenin zaman ile değişimi Denklem 2’ de verilmiştir.

$$a(t) = bt + c \quad (2)$$

Burada b, 1.dereceden doğrunun eğimi ve c denklem sabiti olup bağlı olduğu değişkenler Denklem 3 ve 4’ te verilmiştir.

$$b = \frac{a_2 - a_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

$$c = \frac{t_2 a_1 - t_1 a_2}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

Zaman içinde ivme değişimine karşılık gelen hız değişimi genel olarak Denklem 5' te verilmiştir.

$$dv = a(t) dt \quad (5)$$

Denklem 5 kullanılarak vurucu hızının zamana karşı değişimi Denklem 6' da verilmiştir.

$$v = v_0 + \frac{1}{2} k(t^2 - t_i^2) + c(t - t_i) \quad (6)$$

Denklem 6, t_1 ve t_2 zaman aralığı için tekrar yazılır ise Denklem 7 elde edilir.

$$v = v_1 + \frac{1}{2} k(t_2^2 - t_1^2) + c(t_2 - t_1) \quad (7)$$

Denklem 7, c hız değişimini ifade eder. Eğer bu zaman aralığında vurucunun yer değişimi değeri Denklem 6 ve 8 kullanılarak Denklem 9'da verilen şekli ile yazılabilir.

$$dx = v dt \quad (8)$$

$$x = x_i + \frac{1}{6}k(t^3 - t_i^3) + \frac{1}{2}c(t^2 - t_i^2) - (v_i + ct_i + \frac{1}{2}kt_i^2)(t - t_i) \quad (9)$$

Denklem 9, t_1 ve t_2 zaman aralığı için tekrar yazılır ise Denklem 10 elde edilir.

$$x_2 = x_1 + \frac{1}{6}k_2(t_2^3 - t_1^3) + \frac{1}{2}c_2(t_2^2 - t_1^2) - (v_1 + c_1t_1 + \frac{1}{2}k_2t_1^2)(t_2 - t_1) \quad (10)$$

Böylelikle, Denklem 10 yardımı ile t_1 ve t_2 gibi belirli bir zaman aralığında vurucunun yer değiştirme değerleri bulunur. Eğer yer değiştirme değerini kuvvet-zaman grafiğinde görülen Δt ($t_f - t_i$; temas süresi) zaman aralığında çözersek, kuvvet, zaman ikililerine karşılık kuvvet, yer değiştirme ikilileri bulunarak kuvvet- yer değiştirme grafiği çizilebilir.

2. Darbe Sonrası Test Numunesi Tarafından Absorbe edilen Enerjinin Hesaplanması

Darbe testi esnasında vurucunun sahip olduğu enerjinin bir kısmı test numunesi tarafından absorbe edilirken geri kalan enerji geri sekme için harcanır. Absorbe edilen enerji, vurucunun darbe öncesi ve sonrası kinetik enerjileri arasındaki farktır. Bu nedenle darbe sonrası vurucunun kinetik enerjisindeki değişim tespit edilmesi gereklidir.

Newton'un ikinci kanunundan yola çıkarak ve vurucu kütesinin darbe süresi boyunca değişmediğinden Denklem 11 yazılabilir.

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (11)$$

Burada, $m \frac{dv}{dt}$ ifadesi vurucu ve test numunesi arasında merkezi bir çarpışma sonucu oluşan momentum değişimini (ΔP) verir. Böylelikle Denklem 12 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F \cdot dt = m \cdot dv \quad (12)$$

Darbe testi sonrası elde edilen Şekil 1' deki grafiğin altında kalan alan toplam implus kuvvetini (J) verir. Denklem 12 integrali alınır ise J değeri hesaplanabilir.

$$J = \int_{t_i}^{t_f} \left(\frac{dp}{dt} \right) dt = P_f - P_i = \Delta p = m \quad (13)$$

Denklem 13, J ' nin lineer momentumdaki değişime eşit olduğu sonucuna varılır. Buradan, toplam implus kuvveti (J) lineer momentumdaki değişime (ΔP) eşitlenir ise Denklem 14 yazılabilir.

$$\int_{t_i}^{t_f} F dt = \int_{v_i}^{v_f} v dp = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2) \quad (14)$$

Denklem 14' de toplam implus kuvveti (J) veya Δt zaman aralığında lineer momentumdaki değişim (ΔP) vurucunun darbe öncesi ve sonrası kinetik enerjisindeki değişime eşittir. Böylelikle, darbe sonrası test numunesi tarafından yutulan enerji hesaplanabilir.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Harun SEPET
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Gaziantep / 1985
Telefon : 0.542.466.33.27
e-mail : harunsepet@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Malcılar Lisesi	2002
Üniversite-1	: Kocaeli Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Müh.	2008
Üniversite-2	: Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği	2009
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Müh.	2014
Doktora	: Selçuk Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Müh.	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010-2011	Mühendislik	Makine ve Malzeme Mühendisi
2011-2012	Mühendislik	Makine ve Malzeme Mühendisi
2012-	Selçuk Üniversitesi	Arş. Gör.

UZMANLIK ALANI

Kompozit Malzemeler, Malzeme Mekaniği, Nanokompozitler, Mekanik Testler, Yorulma

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

Louisiana Üniversitesi, Laffayette, LA, ABD' de 2014 yılında YÖK yüksek lisans araştırma bursu kapsamında 3 Ay araştırmacı olarak görev aldım.

YAYINLAR

1.SCI Dergilerde Basılmış Makaleler

1. **Sepet, H.**, Tarakcioglu, N., & Misra, R. D. K. (2016). Investigation of mechanical, thermal and surface properties of nanoclay/HDPE nanocomposites produced industrially by melt mixing approach. Journal of composite materials, 50(22), 3105-3116 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).

2. **Sepet, H.**, Tarakcioglu, N., & Misra, R. D. K. (2016). Determination of the mechanical, thermal and physical properties of nano-CaCO₃ filled high-density polyethylene nanocomposites produced in an industrial scale. *Journal of composite materials*, 50(24), 3445-3456 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).
3. **Sepet, H.**, Tarakcioglu, N., & Misra, R. D. K. (2018). Effect of inorganic nanofillers on the impact behavior and fracture probability of industrial high-density polyethylene nanocomposite. *Journal of Composite Materials*, 52(18), 2431-2442 (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).

2.Uluslararası Hakemli Dergide Basılmış Makaleler

1. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2014). Effect of nanoclay addition on mechanical and thermal behavior of vinyl ester based nanocomposites obtained by casting. *World Journal of Engineering*, 11(1), 1-8.

3.Uluslararası Konferanslarda Sunulmuş Bildiriler

1. Taşyürek, M & **Sepet, H.**, (2012). Mechanical properties of functionalized multiwall carbon nanotubes/epoxy composites, 14th International Materials Symposium, Denizli, Turkey 774-780.
2. **Sepet, H.** & Taşyürek, M. (2012). Evaluation of Impact Strength of Functionalized Multiwall Carbon Nanotubes/Epoxy Composites International Journal of Arts & Sciences (IJAS) Conference, Gottenheim, Germany.
3. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2013). Effect of Nanoclay Addition on Mechanical And Thermal Behavior of Vinyl Ester Based Nanocomposites Obtained by Casting, 21st International Conference on Composites/Nano-Engineering, Tenerife, Canary Islands, Spain.
4. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2014). The study of physical and thermal properties of Nanoparticle/HDPE nanocomposites, Tokyo International Conference on Engineering and Applied Sciences, Tokyo, Japan (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).
5. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2014). Investigation of Mechanical Properties of Nanoclay Reinforced High Density Polyethylene Nanocomposites, Tokyo International Conference on Engineering and Applied Sciences, Tokyo, Japan (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).
6. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2015). The effect of nano calcium carbonate on the fracture mechanism of HDPE under impact load, The International Conference on Science, Ecology and Technology I, Vienna, Austria (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).
7. **Sepet, H.**, Tarakçıoğlu, N. and Topçu M.A. (2015). Mechanical properties of high-density polyethylene by nano-calcium carbonate reinforcement: HDPE nanocomposites, The International Conference on Science, Ecology and Technology I, Vienna, Austria (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).
8. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2016). A comparative study: Effect of particle size on properties of CaCO₃/HDPE composite using compounder system, International Conference on Natural Science and Engineering, Kilis, Turkey (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).
9. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2016). Weibull analyses and impact strength of polyethylene/nanoclay nanocomposites, 24st International Conference on Composites/Nano-Engineering, Haikou, China (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).

10. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2016). The role of CaCO₃ particle sized on flexural properties of industrial composite based polyethylene, International Conference On Computational and Experimental Science And Engineering, Kemer, Antalya, Turkey (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).
11. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2016). Effect of particle size on mechanical and thermal properties of CaCO₃/HDPE composite, 3rd International Conference on Mechanical Properties of Materials, Venice, Italy (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).
12. **Sepet, H.**, Tarakçıoğlu, N., and Avcı A. (2017). Fracture and tensile properties of rubber particulate/epoxy composites, 25st International Conference on Composites/Nano-Engineering, Roma, Italy (Doktora tez kapsamında yapılmıştır).
13. **Sepet, H.**, Tarakçıoğlu, N., and Arıkan H. (2017). The effect of halloysite on the fracture and tensile properties of CTBN/epoxy composite, 25st International Conference on Composites/Nano-Engineering, Roma, Italy (Doktora tez kapsamında yapılmıştır).
14. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2017). Effect of different cure processes on the mechanical properties of epoxy/CTBN blend, 2nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia, Nevşehir, Turkey (Doktora tez kapsamında yapılmıştır).
15. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2017). Fracture toughness and toughening mechanism of CTBN-modified epoxy, 2nd International Conference On Material Science and Technology In Cappadocia, Nevşehir, Turkey (Doktora tez kapsamında yapılmıştır).
16. Demet, S.M. & **Sepet, H.** (2017). A review on performance tests of composite spur gears produced injection molding, International Conference on Engineering Technologies, Konya, Turkey.
17. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2018). Flexural properties of CaCO₃ filled HDPE industrial composite/nanocomposite, The International Conference on Materials Science Mechanical and Automation Engineering and Technology, Çeşme/İzmir, Turkey (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).
18. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2018). Influence of filler particle size on impact fracture morphological and thermal characterization of high-density polyethylene, The International Conference on Materials Science Mechanical and Automation Engineering and Technology, Çeşme/İzmir, Turkey (Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir).
19. **Sepet, H.** & Tarakçıoğlu, N. (2018). Behavior of the fracture and impact of unmodified graphene / epoxy nanocomposites produced by using different mixing procedure, 26st International Conference on Composites/Nano-Engineering, Paris, France (Doktora tez kapsamında yapılmıştır).