T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SiO_2 NANOPARTİKÜL KATKISININ YÜZEY ÇATLAKLI VE ÇATLAKSIZ BAZALT ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BORULARIN YORULMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

Mehmet Turan DEMİRCİ

DOKTORA TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SiO_2 NANOPARTİKÜL KATKISININ YÜZEY ÇATLAKLI VE ÇATLAKSIZ BAZALT ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT BORULARIN YORULMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

Mehmet Turan DEMİRCİ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2015, 166 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Mesut UYANER
Doç. Dr. Ömer Faruk ERKENDİRCİ

Bu tez çalışmasında; SiO_2 nanopartikül katkısının eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt elyaf takviyeli plastik(BTP) kompozit boruların yorulma davranışlarına etkileri incelenmiştir. SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız, eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların serbest uçlu iç basınç yorulma deneyleri ASTM D 2992-12 standardına göre 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında 25 çevrim/dak ve R = 0.05 deney şartlarında gerçekleştirilmiştir. Serbest uçlu iç basınç yorulma deneyleri uygulanmadan önce $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit borulara en iyi mekanik özellikleri ve yorulma ömrünü sağlamak için epoksi matrise ilave edilen ağırlıkça % SiO_2 nanopartikül katkı oranı ASTM D 638-13 ve ASTM D 5045-99 standartlarına göre tespit edilmiştir. Ağırlıkça %4 katkı oranında SiO_2/Epoksi nanokompozitler, çekme dayanımında %14 ve Mod I kırılma tokluğunda ise %25-39 artışlar sağlayarak en yüksek mekanik özellikleri göstermiştir. Ağırlıkça %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız, eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların ASTM D 1599-99 standardına göre serbest uçlu statik iç basınç deneyleri yapılmıştır. Serbest uçlu statik iç basınç deneyleri neticesinde, SiO_2 nanopartikül katkısının eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların maksimum teğetsel gerilmelerinde %29-31.5 arasında artış sağladığı gözlemlenilmiştir.

SiO_2 nanopartiküllerin BTP kompozit borulara sağlamış olduğu en büyük etki yorulma ömürlerinde tespit edilmiştir. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız BTP kompozit borulara ağırlıkça %4 SiO_2 nanopartikül katkısı, yorulma ömürlerinde $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ 'de 1.5-2 kat, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$'de 2.5-3 kat, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$'de 4 kat, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$'de 6.5-7 kat ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında ise 8-9 kat artışlar sağlamıştır. BTP kompozit borulara %4 SiO_2 nanopartiküllerin ilavesi sadece yorulma ömürlerine etki etmemiş, sonuç hasarlarına da tesir etmiştir. SiO_2 nanopartiküller; çatlak tutulması, çatlak ucu körelmesi, çatlak sapma ve dallanmaları, çatlak oluşumunu geciktirmesi ve yavaşlatması, lokal plastik deformasyonlar ve arayüzey alanını artması gibi kırılma mekanizmları ile BTP kompozit boruların mekanik özelliklerinin ve yorulma ömürlerinin artışlarına etki ettiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt Elyaf Takviyesi, Filaman Sarım, Kırılma Mekanizmaları, Kompozit Borular, Nanokompozitler, SiO_2 Nanopartiküller, Yorulma Ömrü.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

THE EFFECTS OF SiO_2 NANOPARTICLE ADDITION ON THE FATIGUE BEHAVIORS OF SURFACE CRACKED AND UNCRACKED BASALT FIBER REINFORCED COMPOSITE PIPES

Mehmet Turan DEMİRCİ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2015, 166 Pages
Jury
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Mesut UYANER
Assoc. Prof. Dr. Ömer Faruk ERKENDİRCİ

In this Ph.D. thesis study, the effects of the addition of SiO_2 nanoparticles to the eliptical surface cracked and uncracked basalt fiber reinforced plastic composite pipes on fatigue behaviors have been investigated. According to ASTM D 2992-13 standard, the internal pressurized fatigue tests of SiO_2 nanoparticles added and pure, elliptical surface cracked and uncracked $[\pm 55^o]_6$ BFR plastic composite pipes have been performed by loading 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 and $0.7\sigma_{\theta\theta static}$ stress levels at 25cycle/min and R=0.05 open ended experimental conditions. Before the internal pressurized fatigue tests, for providing the highest mechanical properties and the fagiue life to $[\pm 55^o]_6$ BFR plastic composite pipes, %wt SiO_2 nanoparticles mixture ratio which have been added to epoxy matrix materials, have been determined accordance with ASTM D 638 -13 and ASTM D 5045 – 99 standards. 4% wt SiO_2/Epoxy nanocomposites have been shown 14% increase for tensile strength and 25-39% increases for Mod I fracture toughness. 4%wt SiO_2 nanoparticles added and pure, elliptical surface cracked and uncracked $[\pm 55^o]_6$ BFR plastic composite pipes have been carried out the static internal pressure tests at open ended experimental conditions according to ASTM D 1599 – 99 standard. At the end of the static internal pressure tests, it was observed that the maximum hoop stress of the elliptical cracked and uncracked $[\pm 55^o]_6$ BFR plastic composite pipes presented 29-31.5 increases by adding 4%wt SiO_2 nanoparticles.

The most significant effect of the SiO_2 nanoparticles have been seen on the internal pressure fatigue life of BFR plastic composites. The 4%wt SiO_2 nanoparticles adding to elliptical surface cracked and uncracked $[\pm 55^o]_6$ filament wound BFR composites pipes have been increased by up to approximately 1.5-2 times at $0.7\sigma_{\theta\theta static}$ stress level, 2.5-3 times at $0.6\sigma_{\theta\theta static}$ stress level, 4 times at $0.5\sigma_{\theta\theta static}$ stress level, 6.5-7 times at $0.4\sigma_{\theta\theta static}$ stress level and 8-9 times at $0.3\sigma_{\theta\theta static}$ stress level in the fatigue life. Not only fatigue life, SiO_2 nanoparticles have been affected the final failure of BFR composite pipes. It was commented that SiO_2 nanoparticles improved the mechanical properties and fatigue life of BFR plastic composites by ensuring the fracture mechanisms consisting of crack pinning, crack tip blinding, crack bowling and branching, retarding of crack occurance and propagation, local plastic deformation and increasing the interface area.

Keywords: Basalt Fibers, Filament Wound, Fracture Mechanisms, Composite Pipes, Nanocomposites, SiO_2 nanoparticles, Fatigue Life.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmalarının her aşamasında yardımcı olan, her konuda desteklerini esirgemeyen, danışmanım Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU'na teşekkür eder, öğrencisi olmaktan dolayı duyduğum mutluluğu ifade etmek isterim.

Statik iç basınç ve halka çekme deneylerinin her aşamasında, sonuçlarının değerlendirilmesinde ve doktora tez çalışmalarının yorumlanmasında yardımcı olan, doktora tez izleme komite üyesi Prof. Dr. Ahmet AVCI' ya ve tüm laboratuar imkânlarının sağlanmasında destekçi olan doktora tez izleme komite üyesi Prof. Dr. Mesut UYANER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan çalışmaların değerlendirilmesinde desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını eksik etmeyen Yrd.Doç.Dr. Memduh KARA, Yrd.Doç.Dr. Lokman GEMİ ve mesai arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Bu tez çalışmasını 11101030 nolu proje ile destekleyen Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne desteğinden dolayı teşekkürederim.

Çalışmalarım süresince, her zaman yanımda olan kardeşim İbrahim DEMİRCİ'ye ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürederim.

Mehmet Turan DEMİRCİ

KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **iv**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Kompozit Malzemeler 4
2.1.1. Elyaf takviyeli kompozitler 6
2.2. Polimer Malzemelerin Genel Tanımı 8
2.2.1. Termoplastikler 10
2.2.2. Termosetler 11
2.2.2.1 Epoksi 11
2.3 Polimer Kompozitlerde Kullanılan Elyaflar 12
2.3.1. Bazalt elyaflar 12
2.3.1.1. Bazalt elyaflar ile ilgili yapılan literatür çalışmaları 16
2.4. SiO_2 Nanopartiküllerin Kompozitlerde Katkı Olarak Kullanılması 24
2.4.1. SiO_2 nanopartikül katkılı polimer matrisler ile ilgili literatür çalışmaları 26
2.4.2 SiO_2 nanopartiküllerin elyaf kompozitler ile ilgili literatür çalışmaları 34
2.4.3 Diğer nanopartiküllerin Bazalt kompozitler ile ilgili literatür çalışmaları 38
2.5. Kompozit Malzeme Üretim Teknikleri 39
2.5.1. Filaman sarım tekniği 39
2.5.1.1 Helisel sarım makineleri 40
2.5.1.2 Filaman sarım kompozit borular ile ilgili literatür çalışmaları 40
2.6. Kompozitlerde Yorulma 46
2.6.1. Yorulma zorlamasının özelllikleri 47
2.6.2. Yorulma zorlamalarında kırılma 47
2.7. Kırılma Mekaniği 52
2.7.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği 54
2.7.2. Elastik plastik kırılma mekaniği 57
2.7.3. Eliptik yüzey çatlağı analizi 57
2.7.4. Şekil değiştirme enerjisi boşaltma hızının deneysel olarak belirlenmesi 58

3. MATERYAL VE YÖNTEM **60**

3.1. SiO_2/Epoksi Nano Kompozitleri Üretimi 60
3.1.1. SiO_2 Nanopartiküller 60
3.1.2. SiO_2 nano partikülleri matris içerisinde dağılımı 62
3.1.3. SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin üretimi 64
3.2. SiO_2/Epoksi Nanokompozitlerin Çekme Deneyleri 65
3.3. SiO_2/Epoksi Nanokompozitlerin Kırılma Tokluğu Deneyleri 65

3.4. SiO_2 Nanopartikül Katkılı ve Katkısız BTP Kompozit Boruların Üretimi 67
3.5. Yakma Deneyi 70
3.6. Boşluk İçeriği 71
3.7. Numunelere Yüzey Çatlağının Açılması 72
3.8. Statik İç Basınç Test Düzeneği 73
3.9. Halka Çekme Deneyi 75
3.10 Yorulma Testi 76
3.10.1. Yorulma deney seti 77

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 79

4.1. Yakma Deneyi Sonuçları 79
4.2. SiO_2/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Testleri 79
4.3. Statik İç Basınç Deneyleri 93
4.4. Halka Çekme Deneyleri 105
4.5. Yorulma Deneyleri 109
4.5.1. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız BTP boruların iç basınç yorulma deneyleri 109
4.5.2. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP boruların iç basınç yorulma deneyleri 111
4.5.3. Çatlaksız ve çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP boruların iç basınç yorulma deneylerinin karşılaştırmaları 112
4.6. SiO_2 Nanopartikül Katkılı ve Katkısız BTP Borularda Hasar Davranışları 124
4.6.1. 0,3 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında iç basınç hasar davranışları 124
4.6.2. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında iç basınç hasar davranışları 136
4.6.3. 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında iç basınç hasar davranışları 139
4.6.4. 0,6 ve 0,7 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında iç basınç hasar davranışları 142
4.7.SiO_2 Nanopartikül Katkılı ve Katkısız BTP Kompozitlerin Kırılma Hasarlarının SEM İncelemeleri 149

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 155

5.1 Sonuçlar 155
5.1.1. SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin mekanik deney sonuçları 155
5.1.2. %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların serbest uçlu statik iç basınç patlatma ve halka çekme deney sonuçları 156
5.1.3. %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız BTP kompozit boruların yorulma deney sonuçları ve hasar incelemeleri 157
5.2 Öneriler 160

6. KAYNAKLAR 161

ÖZGEÇMİŞ 167

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

K_{IC} : Kritik kırılma tokluğu

S: Mesnetler arası mesafe

W: Numune kalınlığı

B: Numune genişliği

a/W: çatlak derinliğinin numune kalınlığına oranı

f(x): ASTM D5045 düzeltme fonksiyonu

a/t : Çatlak derinliği oranı

$\sigma_{\theta\theta statik}$: Statik patlama teğetsel gerilmesi

a/c : Çatlak genişlik oranı

S-N : Yorulma ömrü eğrisi

N: Çevrim sayısı

σ_{max} : Azami gerilme

σ_{min} : Asgari gerilme

σa : Gerilme genliği

σr : Gerilme aralığı

R : Yorulma gerilme oranı

σm : Ortalama gerilme

a : Çatlak derinliği

2c : Çatlak boyu

L : Boru numunesinin boyu

d : Boru numunesinin iç çapı

D : Boru numunesinin dış çapı

t : Boru numunesinin et kalınlığı

α : Filaman sarım açısı

n : Boru numunesi tabaka sayısı

W_f : Yakma deneyi sonunda kalan elyaf ağırlığı

W_c : Kompozit numunenin ilk ağırlığı

ρ_f : Elyaf yoğunluğu

ρ_c : Kompozit yoğunluğu

T_d : Teorik kompozit yoğunluğu

Md : Ölçülen kompozit yoğunluğu

R_1 : Kompozitteki reçine ağırlığı

D_1 : Reçine yoğunluğu

r_1 : Kompozitteki elyafın ağırlığı

d_1 : Elyafın yoğunluğu

K : Yakma deneyinde birim değiştirme faktörü

σ_{zz} : Eksenel yöndeki gerilme

Δdort : İç basınca maruz kalan ince cidarlı boruların çap değişimi

ΔL : İç basınca maruz kalan ince cidarlı boruların boy değişimi

E : Elastisite modülü

γ : Poisson oranı

σa : Numunenin azami çekme gerilmesi değeri (Halka çekme testi için)

P_b : Numunenin kırıldığı azami yük

A_m : Azaltılmış bölümdeki ölçü

d_1 : Azaltılmış bölümdeki numune kalınlığı

b_1 : Azaltılmış bölümdeki numune genişliği

d_2 : Azaltılmış bölümdeki diğer taraftaki numune kalınlığı

b_2 : Azaltılmış bölümdeki diğer taraftaki numune genişliği

Kısaltmalar

RTM : Reçine transfer kalıplama

ÇKCNT : Çok duvarlı karbon nanotüp

CTP : Cam takviyeli plastik

BTP: Bazalt elyaf takviyeli plastik

SEM : Elektron taramalı mikroskop

TEM : Geçirimli elektron mikroskobu

FTIR : Fourier Transform Infra Red

PLC : Programlanabilir Lojik Kontrolör

1. GİRİŞ

Avrupa'da sanayi devrimi ile beraber artan makineleşme beraberinde birçok sorunlarıda yanında getirdi. Metalik malzemelerin dayanımını arttırmak, hafifletmek, maliyeti düşürmek gibi problemleri aşmak için birden çok farklı özelliklerdeki malzemeleri bir araya getirerek daha iyi özelliklerde ve kusurları iyileştirilmiş yeni bir malzeme üretimine yani kompozit malzemelere başvurulmuştur. Kompozit malzeme üretim metotlarından olan filaman sarım tekniği, yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahip takviye malzemesi elyafların, bağlayıcı bir reçine ile ıslatılarak, bir silindir üzerinde farklı açılarda ve çok katlı, ileri-geri, belli bir kalınlığa ulaşıncaya kadar sarılması yöntemiyle üretilen kompozit borular ve tanklar uzay, hava, ulaşım ve nakliye endüstrisinde sağladığı avantajlar nedeniyle kullanımı sürekli olarak artmaktadır. Bu yöntem ile üretilen kompozit malzemelerin başlıca kullanım yerleri, yüksek basınca ve korozif ortamlara dayanıklı borular, basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz tankı, uzay araçları, savaş ve taşıma uçaklarında yakıt tankı, denizaltı kullanımı için oksijen tüpleri, roketatarlar silahların namlu uçları, deniz altıların gövdesinde, radarların kubbe yapılarında, roket gövdeleridir.

Yüksek iç basınca dayanan filaman sarım borular ve tanklar, değişken yükleme şartlarından dolayı yorulma etkisine maruz kalırlar. Bu tür malzemeler statik olmayan ve sürekli değişen iç basınç nedeniyle, statik mukavemet değerlerinin altında hasara uğrarlar. Yorulma ile çatlak meydana gelir ve kararlı çatlak ilerleyişi hızlanarak ani kırılma meydana gelir. Bu durum basınçlı tanklarda ve borularda infilak ve yırtılma şeklinde meydana gelmektedir. Oluşan bu hasarların önüne geçebilmek ve iç basınç dayanımı ve yorulma ömrünü artırmak için araştırmacılar farklı elyaf tipleri ve matris modifikasyonları üzerinde sürekli çalışmalar yapmaktadırlar.

Filaman sarım kompozit borularda cam elyaflar yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Çok daha iyi mekanik özellikler ve hafif istenilen yerlerde ise karbon elyaflar tercih edilmektedir. Kendir gibi doğal elyafların filaman sarım ile kompozit üretiminde uygulanması çok kısıtlı olup, bu doğal elyafların nemli ortamlarda matris ile ara yüzey oluşturamaması gibi kırılma mekanizmalarını olumsuz etkileyen dezavantajları bulunmaktadır. Karbon elyafların yüksek maliyetleri ve doğal elyafların belirtilen bu olumsuz özelliklerinden dolayı araştırmacılar 1995'li yıllarda sivil hayatın

kullanımına sunulan tamamen doğal bazalt elyafların polimer ile takviyesi üzerinde çalışmaya başlamışlardır. Son zamanlarda bu elyaflar üzerine yapılan çalışmalar yeni yeni yoğunlaşmaya başlanmıştır. Bazalt elyaflar dünyada kayaç formunda yaygın olarak bulunmaktadır. Bu kayaçların 1350^{o}C – 1700^{o}C sıcaklıkları arasında ergitilmesiyle çapları 9-13µm aralığında üretilmektedir. Bazalt elyaflar, özellikle E-Cam elyaflardan daha iyi mekanik ve termal özellikler ve korozyon direnci sergilemektedir. Tüm bu özelliklerden ve mekanik performans/ağırlık maliyetlerinin E-Cam elyaflardan düşük olmasından dolayı E-Cam elyaflara ve kullanım sahalarına göre diğer elyaflara alternatif olmaktadır. Belirtilen açıklamalar doğrultusunda çalışmamızda elyaf takviyesi olarak bazalt elyaflar filaman sarım boru üretiminde kullanılmıştır.

Polimer kompozitlerde epoksiler matris olarak en yaygın kullanılan malzemesidir. Fakat epoksilerin gevrek yapıda olması, düşük % uzama miktarı, düşük yorulma ömrü ve kırılma toklukları olumsuz yönlerinden bazılarıdır. Bu tür olumsuzlukların iyileştirilmesi için araştırmacılar tarafından bir çok yöntemler uygulanmakta ve denenmektedir. Bunlardan biri de son 10 yılda, nanopartiküllerin sadece epoksilere değil tüm polimer matrislere takviye edilmesidir. Nanopartiküllerin polimer matrislere takviyesiyle, çekme ve eğilme dayanımları, % uzama miktarları, yorulma ömürleri ve kırılma toklukları arttığı gibi, nanokompozitlerin termal ve elektriksel özelliklerinde de iyileştirmeler elde edilmektedir. Polimerlerin takviyesinde birçok nanopartikül kullanılmakta olup, bunların arasında en yaygın kullanılanlardan biride karbon nanotüplerdir (KNT). Fakat KNT'lerin polimer kompozitlerde kullanılması, sadece mekanik özelliklerde değil, termal ve elektrik iletkenliğin arttırılmasında da kullanılmaktadır. Elektrik ve termal yalıtkanlıklarının olması gereken ve mekanik dayanımların istendiği yerlerde kullanılamaması ve üretim maliyetlerinin yüksek olması KNT'lerin dezavantajlarını oluşturmaktadır. Bu özellikleri verebilecek ve seramik olan nanosilikalar ise polimer takviyelendirmesinde iyi mekanik ve termal sonuçlar veren başka bir nanopartikül türüdür. Nanosilikalar polimer kompozitlere iyi mekanik ve termal performans, elektrik ve termal yalıtkanlık, korozyon direnci, kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı, birçok matris malzemeler ile iyi adezyon özelliği, çizilmeye karşı direnç ve mükemmel tribolojik özellikler sağlamaktadır.

Bazalt elyafların sağlamış olduğu avantajlardan ve araştırma sahasında yeni olması ve nanosilikaların polimer matrislerin mekanik, kırılma tokluğu ve yorulma

ömürlerinde iyileştirmeler sağlaması yapılan tez çalışmamızın konusunu belirlemede etkili olmuştur.

Bu çalışmanın amacı; en iyi çekme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerini ağırlıkça % SiO_2 nanopartikül katkı oranını tespit etmek ve bu % katkı oranınında SiO_2 nanopartikül ilavesiyle $[\pm 55^o]_6$ filaman sarım bazalt takviyeli plastik (BTP) kompozit boruların statik iç basınç testleri, yorulma ömrü testleri ve halka çekme deneyleri ile mekanik özellikleri, yorulma ömürleri, incelemektir. SiO_2 nanopartiküllerin epoksi matrise sağlamış olduğu çekme dayanımı, % uzama miktarı ve kırılma tokluklarındaki iyileştirmelerin filaman sarım BTP kompozit borulara aktarımını sağlamaktır. Bu sayede, SiO_2 nanopartikül katkısıyla BTP boruların mekanik performansları geliştirilmekte ve diğer mekanik performansı yüksek karbon elyaf gibi elyaf takviyeli filaman sarım kompozit borulara alternatif olmasına çaba sarf etmektir. Çalışmanın en önemli amacı ise SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP filaman sarım kompozit boruların yüzeylerine eliptik yüzey çatlağı açarak, hasarlı durumdaki patlatma dayanımları ve yorulma ömürlerindeki azalmaları tespit etmek ve SiO_2 nanopartiküllerin hasar durumundaki pozitif etkilerini gözlemlemektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

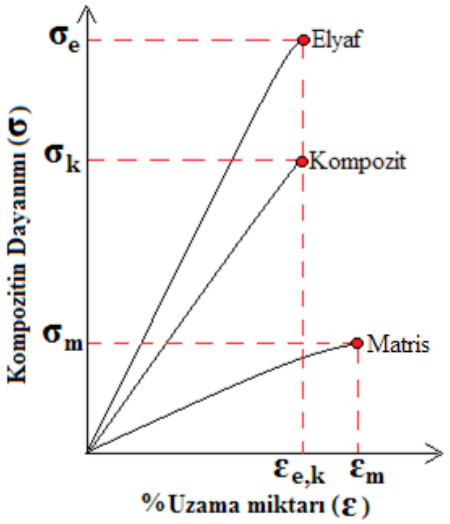
2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler genel bir tabir ile iki veya daha fazla sayıda farklı malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya getirerek ve ortaya daha iyi özellikler çıkarmak amacıyla makro, mikro ve nano yapıdaki birleşimleriyle elde edilen yeni bir yapıdır. Birleşme prosesleri esnasında yapılan karışımlar homojen ya da heterojen olabilmektedir. Elde edilen bu yeni yapıda takviye yapılan malzemeye matris, desteklenen malzemeye ise takviye malzemesi denir (Tasyurek 2004, Doğanay ve Olcay 2007). Kompozit malzemeler kullanılan takviye ve matris malzemelerine göre iki ana malzemeden oluşabildiği gibi, bu malzemelere ilaveten bağlayıcı malzemesi de kullanılarak oluşturulabilmektedir (Uluşen 2008).

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere olan üstünlükleri, birleşimlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerde uygulanan sahanın ihtiyaçlarına göre genel olarak aranan özellikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Samancı, 2004; Şahin, 2000). Bunlar;

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- İyi aşınma direnci
- Isıya karşı yüksek direnç
- İyi korozyon direnci
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği
- Düşük yoğunluk
- Estetik görünüm ve iyi yüzey kalitesidir.

Kompozit malzemelerde geliştirilmesi istenen özellikler uyarınca takviye ve matris malzemesi seçilerek en uygun üretim yöntemi belirlenmektedir. Bir kompozit malzemenin tasarımına göz önünde bulundurulacak dayanım - % uzama miktarı grafiği aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.1 Kompozit malzemenin dayanım - % uzama miktarı grafiği (Şahin, 2000).

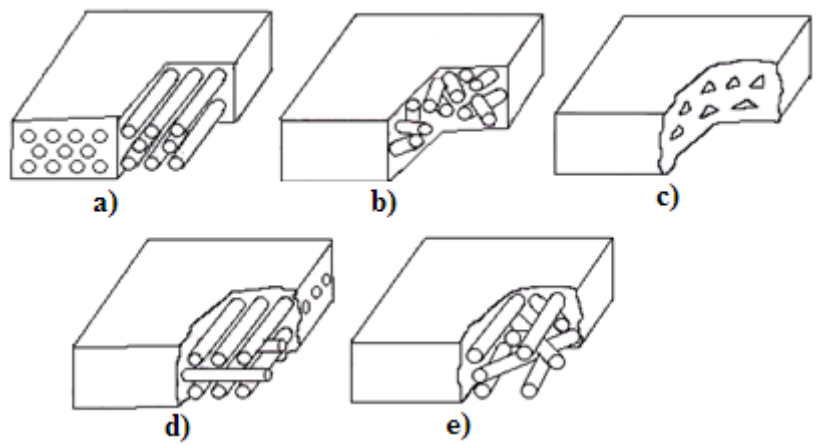
Kompozit malzemelerde ara yüzey ve ara fazlar ihtiyaç duyulan mekanik özelliklerin elde edilmesinde önem arz etmektedir. Ara yüzeyler uygulanan kuvvetin matris malzemeden takviye malzemesine aktarıldığı bölgelerdir. Dolayısıyla kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede çok etkili olduklarından kompozit malzemenin tasarımından üretimine kadar dikkatle üzerinde durulması gereken bir konudur.

Kompozitlerde ara yüzey bağı; matris ve elyaf arasındaki yapışma neticesinde çekme sonucu oluşmaktadır. İyi bir ara yüzey oluşturmak için en önemli gereksinim matrisin elyafı ıslatmasıdır. Yüzey ıslatılmasında ise öncelikli faktör bağlayıcı matrisin düşük viskozitede ve takviye malzemesinin kritik yüzey geriliminden daha düşük olmasıdır. Bir kompozitte matris ve takviye malzemesi arasındaki ara yüzey mekanizmaları; ıslatma, mekanik, difüzyon, elektrostatik çekim ve kimyasal bağlardır (Şahin, 2000).

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler olmak üzere üç farklı grupta incelenmektedir. Takviye malzemelerine göre ise yine üç farklı grupta incelenmekte olup, bunlar; elyaf, parçacık ve tabakalı kompozitlerdir. Yapılan çalışmada takviye elamanı olarak elyaf takviyeli polimer kompozitler incelenilmiştir. Bu nedenle elyaf takviyeli kompozitler başlığı altında açıklamalara yer verilmiştir.

2.1.1. Elyaf takviyeli kompozitler

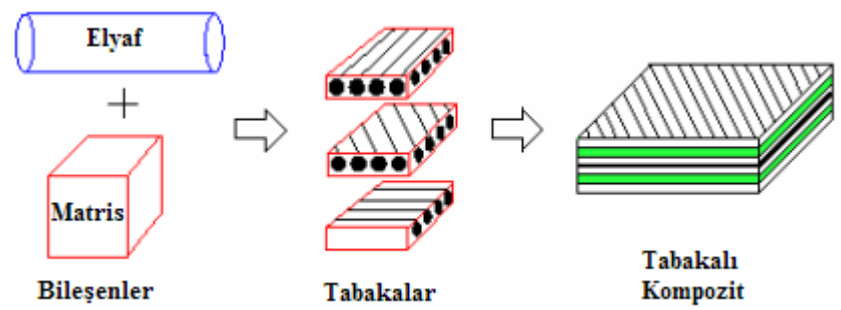
Elyaf takviyeli kompozitler, yüksek dayanım ve elastikiyet modülüne sahip olan elyaflar ile düşük dayanım ve elastikiyet modülüne sahip olan matris malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilmektedir(Gemi 2004). Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri, elyaf/matris karışım oranlarını değiştirerek ve her bir fazın sahip olduğu nitelikleri düzenlenerek ayarlanabilir. Kompozitlerin sahip oldukları nitelikleri elyafların yönlerine göre değişen malzemeler anizotropik malzemelerdir. Malzemenin anizotropik olmasının önemli sebeplerinden biri, malzeme davranışlarını izah edebilmek için ihtiyaç duyulan parametre sayısının artmasıdır. İzotropik malzemelerin elastik davranışlarını izah edebilmek için sadece sabit iki parametre gerekirken, anizotropik malzemeler için 21 ve ortotropik malzemeler için 9 sabit parametrenin bulunması gerekmektedir. Elyaflı kompozitler yumuşak ve sünek matris içine sert dayanıklı elastikliği yüksek elyafların ilave edilmesiyle çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özelliklerini iyileştirmektedir (Samancı 2004). Elyaflı kompozitler Şekil 2.2'de görüldüğü gibi tek yönlü sürekli elyaflı, kırpılmış elyaflı, ortagonal elyaflı, çapraz dizilmiş sürekli elyaflı ve rastgele dizilmiş sürekli elyaflı olmak üzere 5 ayrı sınıfta incelenmektedir (Şahin, 2000).



Şekil 2.2 a) Tek yönlü sürekli elyaflar b) Kırpılmış elyaflar c) Ortogonal elyaflar d) Çapraz dizilmiş sürekli elyaflar e) Rastgele dizilmiş sürekli elyaflar

En az iki değişik malzemenin tabakalama yoluyla birbirine yapıştırılmasıyla elde edilen kompozit malzemelere *tabakalı kompozitler* denilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerde en az iki farklı faz tabakalar halinde kompozit yapının içinde yer almaktadır. Bu fazlardan bir tanesi kompozit malzemeye özelliklerini veren sürekli faz, diğeri sürekli fazı oluşturan tabakaları bir arada tutan bağlayıcı fazdır. Tabakalanmış

elyaf kompozitler elyaf kompozit ve tabakalama yöntemlerinin her ikisini gerektiren kompozitlerin melez sınıfıdır. Tabakalama yoluyla; mukavemet, rijitlik, düşük ağırlık, korozyon direnci, dayanıklılık, ısıl izolasyon ve görünüm gibi özellikleri iyileştirmektedir. Bu kompozit malzemeler ile tekne, yat, yarış otomobilleri, uçak kanatları ve uzay araçlarındaki bazı parçalar yapılmaktadır (Arıkan, 2002). Tabakalı kompozitlerin üretimini gösteren şematik gösterim Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2.3 Tabakalı kompozit üretiminin şematik gösterimi (Ekşi, 2007).

Elyaf takviyeli polimer kompozitler, havacılık, uzay, askeri, otomotiv, yapı, taşımacılık, kimyasal prosesler, petrol ve gaz üretim hatları gibi birçok sahada düşük ağırlığa karşın yüksek mekanik, kimyasal ve ısıl dirençleri hasebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitlerde genellikle takviye malzemesi olarak cam, karbon ve aramid elyaflar kullanılmaktadır. Fakat son zamanlarda bu elyaflara alternatif olarak bazalt elyaflarda kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan tez çalışmasında elyaf takviyesi olarak bazalt elyaflar tercih edilmiştir. Bazalt elyaflarla ilgili bilgiler ve kullanım sebepleri bazalt elyaf başlığı altında açıklanmıştır. Yine kompozitlerde en çok rağbet gören matris malzemeleri termosetler için epoksi, vinilester ve polyester, termoplastikler için ise naylonlar (PA grubu), polietilen, polipropilen ve PEEK' dir. Tez çalışmasında termoset sınıfındaki epoksi matris malzeme olarak kullanılmıştır. Bununla ilgili açıklamalar polimer malzemelerin genel tanımı, termosetler ve epoksi başlıkları altında sunulmuştur.

Kompozit malzemelerde takviye/matris kombinasyonu tamamen niyet edilen uygulamaya bağlıdır. Elyaf takviyesinde aranan ilk özellik kompozitin yapısal bütünlüğünü sağlamasıdır.

Polimer kompozitlerin metallerin yerini almasında başlıca iki üstünlük önemli rol oynamaktadır. Yüksek dayanım ve rijitliğin ağırlığa oranı üstünlüklerden birini oluştururken, diğeri ise çevre koşullarında göstermiş oldukları korozyon dirençleridir. Bu özelliklerinden dolayı 40 yıldır havacılık sanayisinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

2.2. Polimer Malzemelerin Genel Tanımı

Polimerlere makromoleküller veya yüksek moleküllü birleşmeler olarak ifade edilir ve polimerleri meydana getiren küçük moleküllü maddelere ise monomerler denir. Monomer maddeler genel olarak yapılarında çift bağ, üçlü bağ, iki ve daha fazla fonksiyonel gruplar bulundururlar.

Bir maddenin polimer olabilmesi için binlerce monomerin birleşip büyük molekül meydana getirmesi gerekir. Buna göre; polimer (makromolekül), tarif olarak, tekrarlanan küçük ve basit birimlerden oluşmuş büyük bir moleküldür. Polimer molekülünün içerisinde tekrarlanan bu küçük ve basit kimyasal birime, tekrarlanan birim (mer), polimeri elde etmek için başlangıçta kullanılan küçük moleküllü organik maddelere de monomer adı verilir. Makromolekül aynı birimlerden oluşursa, böyle polimerlere "homopolimer" olarak ifade edilirken, iki veya daha fazla monomer birimlerden meydana gelirse "kopolimer" olarak ifade edilir (Kurbanova ve ark., 1997).

Bir polimerde polimeri oluşturan ana gruplar polimer türlerine göre değişik sayılarda olurlar. Ayrıca bu gruplar doğrusal; dallanmış veya çapraz bağlı bir yapı oluştururlar. Grupların bir moleküldeki sayısına "Polimerizasyon derecesi" denir. Grup molekül kütlesi ile polimerizasyon derecesinin çarpımı da plastiğin molekül kütlesini verir. Polimerlerde mol kütlesi genelde 10 000-1000 000 arasındadır. Her polimer polimerin bir başlangıç monomeri bulunmaktadır. Polimeri oluşturan monomerler ana grup hallerine geçerken bazı yapısal değişikliklere uğrarlar. Polimerleşme sonunda ele geçen ürünler doğal renkli olmakla beraber özel olarak renklendirilmiş, kullanım kolaylığı ve amacı bakımlarından da tablet, toz, plastisol, film, levha, blok, profil yada değişik biçimlendirilmiş halde piyasaya sürülürler (Yaşar, 2001).

$$nCH2 = CH_2 \xrightarrow{\text{Polimerizasyon}} (- CH_2 - CH_2 -)_n$$

Yukarıda yazılan denklem ile etilen monomerinin polimerizasyon ile n monomer içeren polietilen elde edilişi monomerden polimer elde edilişini örnek olarak göstermektedir. Polimerler doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılabilirler. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan polimerler genellikle sentetik yani yapay polimerlerdir.

Polimerler yapılarına göre; tek bir monomerin tekrarlanmasından ile oluşan homopolimer, iki farklı monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilen kopolimer ve kimyasal üç farklı tekrarlama ile de terpolimer denir (Fried, 2003).

Polimerler, günümüzde gerek miktar gerekse çeşit bakımından büyük gelişme göstermektedir. Hafif, kolay işlenebilir, korozyona karşı dayanıklı, iyi elektrik ve ısı yalıtkanlığına, iyi bir yüzey kalitesine ve görünüşe sahip polimerler, makine, uçak, elektrik, elektronik, ev aletleri gibi sanayinin hemen hemen bütün dallarında gün geçtikçe çok daha fazla kullanılmaktadır. Aynı zamanda sanayinin diğer alanlarından kırtasiye sektöründe yapıştırıcı ve ambalaj sektöründe ucuzluk, dayanıklılık ve kolay işlenebilme özelliklerinden dolayı çok fazla kullanılmaktadır.

Polimerlerin ısısal özellikleri en önemli özelliklerinden biridir. Her ne kadar bazı polimerler 100-180^{o}C aralığında uzun süreli kullanım için tavsiye edilebilir ve PTFE için 250^{o}C ve polifenilen sülfid gibi, başka polimerler 250^{o}C ‘a kadar servis ömrüne sahip olsalar da çoğu polimerler geniş sıcaklık aralığında yumuşama gösterirler. Yüksek sıcaklıklarda polimerlerin kullanılabilmelerini tayin eden yöntem yumuşama ve sapma sıcaklığıdır.

Polimerlerin önemli ısısal özelliği ısı iletkenliğidir. Genellikle polimerlerin ısı iletkenliği kötüdür. Metallerin ısıl iletkenlikleri 200 – 10 000 cal/cm.^{o}Cx10^{4} arasında iken, polimerlerin ısıl iletkenliklerinin kötü olmasından dolayı 2,0 – 8,0 cal/cm.^{o}Cx10^{4} arasındadır. Polimerlerin ısıl iletkenliklerinin düşük olmasından dolayı, sürtünme veya tekrarlanan gerilmelerin sebep olduğu sıcaklık büyümesi, malzeme içerisinde ısı birikmesine neden olur. Bu olay ısıl yorulmaya neden olur. Isıl yorulmayı azaltmak için, polimer malzemelere katkı maddeleri ilave edilir. Bu amaçla en çok kullanılan metal tozları (alüminyum, bakır) veya çeşitli elyaflar (karbon elyaf, cam elyaf)dır. Katkılı polimerlerin ısıl iletkenlikleri en az 10 kat daha yüksektir.

Polimerlerin ısıl iletkenlikleri molekül ağırlığının yanı sıra, kristalinite derecesi ve yönlenme gibi yapısal faktörlere bağlıdır. Kristalinite derecesi ve yönlenme artarsa,

ısıl iletkenliği de artar. Başka bir ısısal özellik ısısal genleşmedir. Polimer malzemelerin işlenmesinde önemli bir problem olan ısısal genleşme katsayısı, metaller göre çok daha büyüktür ve değer olarak 2-20 x 10^5 (cm/cm^{o}C) arasında değişir.

Kuvvetlendirici elyafların ilavesi polimerlerin ısıl genleşmelerini önemli derecede azaltmaktadır. Isıl iletkenlik gibi ısıl genleşmede molekül ağırlığı ve yapısal faktörlerle değişir. Polimerin kristalinite derecesinin ve çapraz bağ yoğunluğunun artmasıyla ısıl genleşme katsayısı azalır. Yönlenme yönünde katsayı azalırken, dik yönde artar. Bunların yanı sıra ısıl genleşme değerleri polimerlerin (Tg) camsı duruma geçiş sıcaklığının ve ergime (Tm) sıcaklığının üzerinde veya altında farklıdır.

Polimerler kullanım alanı olarak; polimerler, elyaflar, kaplamalar, yapıştırıcılar olmak üzere dörde ayrılırken, fiziksel esas olarak; amorf, kristalin ve kısmikristalin olmak üzere üçe ayrılırlar (Akkurt, 1991).

Polimerlerin sınıflandırılmasında en çok kullanılanı esas işleme yöntemlerine göre yapılan sınıflandırmadır. Buna göre polimerler; termoplastikler ve termosetler olarak iki ayrılırlar.

2.2.1. Termoplastikler

Termoplastikler malzemeler ısı ve basınç altında yumuşayan, akan, bu haldeyken şekil vermek amacıyla istenilen şekilli alabilen ve soğutulduğunda tekrar sertleşebilen yani katı hale gelen polimerlerdir. Bununla beraber termoplastikler tekrar ısıtıldığında istenilen şekle sokulabilen, yumuşayabilen yani tekrar kullanılabilen malzemelerdir. Şekillendirme sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar. Ayrıca uygun çözücülerde çözünebilirler. Termoplastik grubunu oluşturan en önde gelen polimerler; ABS ve SAN, Asetallar, Akrilikler, Selülozikler, Floroplastikler (PTFE), Sıvı Kristal Polimerler, Naylon (Poliamid), Polimid, Polikarbonat, Polietereterketon, Polieterimid, Polioefinler(Polietilen, Polipropilen), Polistren, Polivinil klorür'lerdir (Demirci, 2009; Akkurt, 1991).

2.2.2. Termosetler

Termosetler, ısı işlemiyle bir defa istenilen şekil alabilen polimerlerdir. Bunlar tekrar ısıtılmak suretiyle şekillendirilemezler. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler. Polikondansasyon reaksiyonu ile elde edilirler ve çapraz bağlı bir yapıya sahiptirler. Bu tip polimerlerde polirmerleşme işlemi, monomerlerin bir araya getirildiği reaktörde başlar ve kalıplama ile biter. Termoset grubunu; Alkidler, Amino, Epoksi, Feenolikler, Polyesterler, Poliüretanlar oluştururlar (Akkurt 1991).

Filaman sarım tekniği ile üretilen kompozit borularda matris malzeme olarak endüstride en çok tercih edilen epoksi kullanılmıştır. Epoksinin, ulaşım, enerji yakıtı tahliye tankları ve boruları ve savunma endüstrisi gibi birçok alanda kullanım yeri bulunmaktadır.

2.2.2.1 Epoksi

Epoksiler, epoksi gruplarının kendi aralarında homopolimerizasyonu veya anhidrid, amin, novolak gibi maddelerle reaksiyona girerek elde edilirler. En çok kullanılan epoksi reçineleri epiklorohidrin ile bisfenol-A'nın reaksiyonu ile elde edilir. Bu iki bileşenin oranının değiştirerek alçak viskoziteli sıvılardan yüksek molekül ağırlıklı katı olmak üzere, çeşitli özelliklere sahip ürünler elde edilir. Epoksilerin bir başka önemli çeşidi ECNs (epoksi krezol novalak) ve EPNs (epoksi fenol novolak) gibi novalak reçineleridir; bunların termik özellikleri ve kimyasal mukavemeti çok iyidir. Üçüncü grubu oluşturan sikloalifatikler havada dayanıklılığı ile bilinen epoksilerdir. Aromatik aminlerin epoksidasyonu ile elde edilen dördüncü grup, öok iyi mekanik ve termik özelliklere sahiptir. Epoksi reçineleri kalıplama ve dökme reçineleri olamak üzere iki gruba ayrılır. Kalıplama reçineleri cam elyafı veya meniral dolgu ile mukavemetlendirilmiş olabilir. Ayrıca aramid lifleri, pamuk ve metal yaprakları ile kuvvetlendirilmiş çeşitleri vardır.

Genellikle epoksiler çok iyi elektrik, termik ve kimyasal mukavemete sahiptir. Oldukça düşük olan mukavemetleri lifli kuvvetlendirici veya mineral dolgu ile iyileştirilebilir. Kalıplama ile elde edilen epoksi parçaları sert, rijit, nispeten kırılgandır; ayrıca çeşitli sıcaklıklarda çok iyi boyut kararlığına sahiptirler. Epoksiler ıslak iken

140ºC' ye, kuru iken 220ºC' e kadar dayanım gösterirler (Arıcasoy, 2006). Epoksilerin bir başka önemli özelliği başka malzemelere yapışma kapasitesine sahip olmalıdır. Birbirinden farklı malzemeleri yapıştıran epoksi adezifleri, tek veya iki bileşenli sistem olarak imal edilirler. Tek bileşenli sistem ancak ısı yolu ile katılaşır; iki bileşenli sistem ise oda sıcaklığında katılaşmasına rağmen ısı ile çok daha iyi sonuç verir. Bu şekilde yapıştırılmış malzemeler 230ºC'a kadar dayanabilirler, ancak bu sıcaklıkta özellikleri oda sıcaklığındaki özelliklerden çok daha düşüktür.

Epoksi reçineleri elektrik ve elektronik alanında, açık havada çalışan parçaların yapımında, ayrıca kaplama ve yapıştırma malzemesi olarak kullanılmaktadır (Akkurt, 1991, Demirci 2009).

2.3 Polimer Kompozitlerde Kullanılan Elyaflar

Kompozit malzemelerde polimerlere takviye edilen elyaflar kullanım amacı ve maliyetlerine göre çeşitlik göstermektedir. Genellikle kullanılan elyaflar tipleri cam, karbon ve aramid elyaflardır. Son zamanlarda takviye malzemesi olarak kullanımı artan ve cam elyaftan daha üstün özelliklere sahip bazalt elyaf ise diğer bir elyaf çeşididir. Doktora çalışmasında da henüz kullanımı yaygınlaşmamış olan bazalt elyaflar epoksi matrise takviye malzemesi olarak kullanılmıştır.

2.3.1. Bazalt elyaflar

Kompozit malzemelerin dayanımlarının arttırılması açısından doğal elyaflar cam elyaflara alternatif olmaktadırlar. Cam elyaflara göre doğal elyafların avantajları düşük maliyet, düşük yoğunluk, ağırlığa göre yüksek dayanım, uygulama süresince elyaf kırılma direnci, enerji absorpsiyonu ve geri dönüştürülebilirliktir. Dolayısıyla atık konumunda bile doğal elyaflardan faydalanılabilinmektedir. Doğal elyaflar, doğada elyaf formunda olup, sonradan elyaf haline de getirilmektedir.

Günümüz polimer kompozitlerde cam elyaf yoğun olarak kullanılmaktadır. Çok özelleşmiş ve kapsamlı gereksinimlerde ise karbon elyaflar tercih edilmektedir (Havacılık, Uzay, Askeri uygulamalar ve Spor gereçleri). Buna karşın karbon elyafların üretimi cam elyaflara göre çok maliyetlidir. Karbon elyaflar ile polimer matrisler

arasında adezyonu sağlamakta oldukça güçtür. Doğal elyaflarda ise çevresel koşullardan etkilenme dezavantajı bulunmaktadır. Yani neme karşı hassas olmaları ve nemli koşullarda polimer matris ile iyi bir arayüzey oluşturmaması neticesinde yapışma zayıf kalmaktadır. Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, hem çevresel uyum ve maliyet, hem de iyi bir mekanik performans gösterecek elyaf arayışına araştırmacıları sevk etmiştir (Manikandan ve ark. , 2012). Araştırmacıların bu arayışları doğrultusunda polimer kompozitlere takviye malzemesi olarak, bazalt elyaflar ön plana çıkmıştır.

Bazalt donmuş lav olan volkanik kayaçlardan elde edilen koyu veya siyah renkte, tok ve dayanaklı elyaf üretimine uygun bir malzemedir. İlk bazalt kayaçlar Romalılar tarafından sağlamlılığı ve dayanımından dolayı yol yapımında yassı taş olarak kullanılmıştır (Quagliarini ve ark., 2012) Bazalt elyaflar ile ilgili ilk denemeler 1923'de A.B.D'de Paul Dhe tarafından patentlenerek yapılmıştır. II. Dünya savaşından sonra A.B.D., Sovyetler Birliği ve Avrupa'nın bazı ülkeleri bazalt elyafları ekstrüzyon yöntemi ile havacılık, uzay ve askeri alanlarda kullanmışlardır (Quagliarini ve ark. 2012; Pavloski ve ark. 2007; Colombo ve ark. 2012). 1995 yılına kadar sivilleştirilmeyen bu malzemenin, bu yıldan sonra sivilleştirme ve ticarileştirme çalışmalarına başlanılmıştır. Dolayısıyla bu elyaf ile ilgili çalışmalar son yıllarda başlanılmış ve geliştirilmeye çalışılmıştır (Colombo ve ark., 2012). Yapılan tez çalışmasında kullanılan bazalt elyafların tercih edilmesinin sebeplerinden biride kullanım ve uygulama sahasının çok yeni olmasından dolayı araştırmaya ve geliştirmeye açık olmasıdır.

Bugün ise bazalt elyafların üretimi A.B.D., Çin, Rusya ve bazı Avrupa ülkeleri tarafından yapılmaktadır. Sürekli elyaflar, kırılmış bazalt kayaçların 1350^{o}C-1700^{o}C sıcaklıkları arasında platinyum/rodyum potalarda ergitilerek, alt haznede bulunan meme deliklerinden akıtılıp iplik haline getirilmektedir. Sonra bu iplik halindeki bazalt elyaflar yaklaşık 2000-5000 m/dk hızındaki tamburlar vasıtasıyla sarılmaktadırlar. Bazalt elyaflar hızlı soğutulduklarında camsı amorf yapıda olmaktadırlar (Deak ve Cizigany, 2012; Zhu ve ark., 2011; Quagliarini ve ark., 2012; Manikandan ve ark., 2012). Bazalt elyaflar, elyaf çapları 9-13μm aralığında üretilmektedir (Colombo ve ark., 2012).

Bazalt elyafların üretiminde cam elyafların üretiminde kullanılan ilave katkı içermemesi, fazladan ek maliyet getirmemesini ve çevre atığının az olmasını

sağlamaktadır. Böylece üretim maliyetleri açısından karbon ve cam elyaflara avantaj sağlarken, %100 doğal, çevreci ve ekolojik güvenlikte sunmaktadır (Sfarra ve ark., 2013).

Bazalt elyaflar ile E-Cam elyafların temel kimyasal içerikleri birbirine benzemektedir. E-Cam elyafların ana birleşiminde SiO_2, $Al2O_3$, CaO ve B_2O_3 bulunmaktadır. Bazalt elyaflarda ise SiO_2, AlO_3,CaO, Fe_2O_3,K_2O,MgO, Na_2O ve TiO_2 içerikleri mevcuttur (Zhu ve ark., 2011; Manikandan ve ark., 2012; Deak ve Cizigany, 2009; Kim ve ark., 2011). Cam elyaflar ile bazalt elyafların arasındaki mekaniksel ve fiziksel özelliklerindeki farklılıkları oluşturan ise ihtiva ettiği seramiklerin çeşitlilikleri ve miktarlarının farklılığıdır. Örneğin bazalt elyafların renklerinin koyu olması içerdiği Fe ve miktarından kaynaklanmaktadır (Deak ve Cizigany, 2009).

Bazalt elyaflar yüksek dayanım ve elastikiyet modülü, hasara uğrayana kadar göstermiş olduğu % şekil değişimi ve darbe direnci gibi avantajlı mekanik özelliklerinin yanında, bu mekanik özelliklerinden fazla bir kayba uğramadan -200^oC ile 600^oC sıcaklık aralıklarında çalışabilme özelliğine sahiptirler. Dolayısıyla bu yönleri ile diğer elyaflara alternatif oluşturmaktadırlar (Kim ve ark., 2011; Manikandan ve ark., 2012). Bazalt elyafların ısıl dirençlerinin çok yüksek olması nedeni ile ısı yalıtım malzemesi ve yangın yalıtım malzemesi olarak kullanılabildiği gibi gürültü izolasyonunda da iyi performanslar sergileyerek avantajlarını ortaya koymaktadırlar. Yine elektrik yalıtımında kullanılabilir olması sayesinde yer altı döşemelerinde kullanılabilmesi diğer elyaflara avantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Bazalt elyafların kimyasal içeriğinden dolayı asidik, bazik ve deniz suyuna gösterdiği direnç ve bunlara ilaveten nem absorbsiyonunun çok az olması, bazalt elyafları atık sanayisinde, deniz ulaşım araç ve ekipmanlarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Ve böylece bir diğer avantajda sağlanmış olmaktadır (Quaglirini ve ark., 2012; Colombo ve ark., 2012). Bazalt elyafların bozulma direnci gibi bir avantajının yanında UV ışınlarına karşı olan direncinin yüksek olması uygulama sahasını genişletmekte ve diğer elyaflara kendisini alternatif kılmaktadır.

Bazalt kayaçları sadece elyaf olarak sanayide kullanılmamakta, toz olarak otomotiv sanayisinde balatalarda kullanılmaya başlanmıştır. Balatalarda kullanılan zehirli ve insan sağlığına zararlı olan asbestosun yerini, aşınma direncinin yüksek

olması özelliği ile yerini almaktadır. Ayrıca yalıtımda kullanılan asbestostan tam 3 kat daha iyi ısı yalıtımı sağlamaktadır (Colombo ve ark., 2012).

Bazalt elyaflar E- cam elyaflar ile mukayese edildiğinde daha iyi mekanik ve termal özellikler sergilemektedir. Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi, karbon elyafların mekanik özelliklerinin bazalt elyaflardan yüksek olmasına karşın, maliyetinin yaklaşık 12 katı olması nedeniyle karbon elyafların hafifliğinin aranmadığı yerlerde bazalt elyaflar karbon elyaflara alternatif olmaktadır (Wu ve ark. 2010).

Çizelge 2.1 Bazalt, Karbon ve E-Cam elyafların mekanik özellikleri ve birim maliyetlerinin karşılaştırılmaları (Pavlovski ve ark., 2007; Colombo ve ark., 2012).

Takviye Malzemeleri	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Uzama Miktarı (%)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Maliyet (kg/$)
Karbon Elyaf	4800	230	1,48	1,75	30
Bazalt Elyaf	3200	109	2,31	2,6-2,7	2,5
E-Cam Elyaf	2600	74	2,05	2,5-2,6	1,1

Bazalt elyafların E-cam elyaflar ile aynı temel kimyasal içeriklere belirtildiği gibi sahiptirler. Fakat bazalt elyaflarda Al_2O_3 miktarının fazla olması ve cam elyaflarda bulunmayan ağırlıkça % 1'den fazla ilave Fe_2O_3, K_2O, MgO, Na_2O ve TiO_2 seramiklerin fazlalığı, bazalt elyafları daha mukavemetli hale getirmektedir. Ayrıca bazalt elyafların elyaf çaplarının (9-13 μm) E-Cam elyafların elyaf çaplarından (17 μm) küçük olması mekanik özelliklerin yüksek olmasını sağlayan diğer bir özelliktir (Deak ve Cizigany 2009).

Bazalt elyaflar polimer matrisleri ile iyi bir ara yüzey oluşturarak elyaf /matris arasında iyi adezyon kuvveti sağlamaktadır. Bazalt elyafların yüzeylerinin diğer elyaflardan daha pürüzlü olması sayesinde iyi yapışma elde edilmekte ve bu özelliği ile diğer elyaflara alternatif teşkil etmektedir (Wu ve ark. 2010). Bazalt elyafların % uzama miktarlarının karbon ve cam elyaflardan fazla olması olası diğer bir avantajını bizlere sunmaktadır (Sarasini ve ark. 2014; Wu ve ark. 2010).

Sürekli bazalt elyafların mekanik performanslarını filaman sarım tüplerde sürekli E-Cam elyaflar ile ASTM 2343 standardına göre mukayese edilmiştir. Testler sonucunda filaman sarım bazalt kompozit tüpler minimum %15 daha iyi çekme

dayanımı ve %35 daha fazla elastikiyet modülü sergilediği tespit edilmiştir. Minimum mekanik özellikleriyle yola çıkıldığında bir tüpün bazalt elyaf ile filaman sarımında dayanım/ağırlık oranına göre %15 hafifleme gözlemlenilmiştir. İşçi ve üretim maliyetlerini hesaba katıldığında, bazalt elyaflar ile filaman sarım yöntemiyle yapılan tüplerde maliyetlerde %5'lik kazanç elde edilmiştir (Pavloski ve ark. 2007).

Aşağıda verilen araştırmacıların yaptıkları çalışmalar ve belirtilen avantajlar göz önünde bulundurularak, tez çalışmamızda elyaf takviye malzemesi olarak kompozitlerin filaman sarımında kullanılmak üzere sürekli bazalt elyaflar tercih edilmiştir.

2.3.1.1. Bazalt elyaflar ile ilgili yapılan literatür çalışmaları

Wu ve ark. (2010) bazalt, karbon, cam, polyparaphenylenl benzobisoxazole (PBO) elyafları ve cam/karbon, bazalt/karbon hibrit elyafları epoksiye takviye etmişlerdir. Elde ettikleri bu kompozitleri %93 ile %55 maksimum dayanım oranlarında yorulma deneylerine tabi tutmuşlar ve deney neticesinde sonuç hasarlarını inceleyerek birbirleri ile mukayese etmişlerdir. Çekme dayanımlarına göre mukayese edildiğinde, bazalt/karbon hibrit kompozitlerin, cam/karbon hibrit kompozitlerden 4 kat daha fazla dayanım sergilediğini tespit etmişlerdir. Buna karşın karbon/bazalt hibrit kompozitlerin ise bazalt elyaf takviyeli kompozitlerden yaklaşık 2,5 kat daha düşük bir çekme dayanımı değerlerini verdiğini çalışmalarına kaydetmişlerdir. Wu ve ark. yorulma ömürlerine göre kompozitleri karşılaştırdıklarında, Yüksek maksimum gerilme oranlarında (%80-90) en iyi yorulma ömrünü karbon elyaf takviyeli kompozitlerin sergilediğini ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin ise hiçbir yorulma ömrü gösteremediğini, birkaç çevrim sonra hasara uğradığını gözlemlemişlerdir. Bazalt/karbon hibrit kompozitlerin düşük maksimum gerilme oranlarında yorulma ömürleri ise cam/karbon hibrit kompozitlerin 1,7 kat ve bazalt kompozitlerin ise cam kompozitlerden 3 kat daha fazla yorulma ömrü gösterdiğini çalışmalarında altını çizerek belirtmişlerdir. Bazalt takviyeli kompozitlerin performanslarının cam kompozitlerden yüksek olmasını bazalt elyafların yüzeylerinin pürüzlü olmasından dolayı epoksi ile iyi ara yüzey oluşturduğunu önemle ifade ederlerken, cam elyafların yüzeylerinin pürüzsüz olmasının elyaf/matris ara yüzey (debonding) ayrılmalarını kolaylaştığını Wu ve ark. çalışmalarında söylemeden geçmemişlerdir.

Deak ve ark. (2009) çalışmalarında, üç farklı firmadan temin edilmiş sürekli bazalt elyafların, kırpılmış bazalt elyafların ve cam elyafların elyaf çaplarının, kimyasal birleşimlerinin mekanik özelliklerine olan etkilerini incelemişler ve birbirleri ile karşılaştırmışlardır. Bazalt elyafların elyaf çaplarının küçülmesi ile çekme dayanımlarının ve elastikiyet modüllerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bazalt ve cam elyafların Al_20_3, SiO_2, CaO, B_2O_3 (bazalt elyaflar hariç) benzer kimyasal birleşime sahip iken, bazalt elyaflar bu birleşimlerin dışında TiO_2, K_2O, MgO, Na_2O ve Fe_2O_3 birleşimlerini içerdiğini belirtmişlerdir. Bu birleşimler ile Bazalt elyafların içerdiği seramik miktarının artmasının ve Al_2O_3 ve SiO_2 miktarlarının fazlalığının bazalt elyafların cam elyaflardan daha iyi mekanik özellikler göstermesine neden olduğunu çalışmalarında ifade etmişlerdir.

Deak ve Czigany (2010) polyamid 6 matris malzemeye %30 ağırlık oranında kırpılmış bazalt elyaf takviyesi yapmışlar ve çekme, üç nokta eğme dayanımları ile emdikleri darbe enerjilerini karşılaştırmışlardır. Bazalt elyaf takviyesi çekme, eğme dayanımları ve darbe enerjilerinde iki katından fazla iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir.

Petrucci ve ark. (2013) çalışmalarında bazalt, bitkisel elyaf temelli kendir ve keten elyaflar ile cam elyaflardan hibrit kompozitler üretmişlerdir. Daha sonra bu kompozitlerin çekme, eğme ve tabakalararası kayma dayanımlarını tespit etmişlerdir. Yapılan hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin bazalt kompozitlerden düşük mekanik özellikler sergilediğini tespit etmişlerdir. Hibrit kompozitlerde tabakalararası kayma dayanımında en iyi sonuçları, bazalt/keten/cam hibrit kompozitlerde elde etmişlerdir. Bazalt ile yapılan tüm hibritlemelerde ise mekanik özelliklerin iyileşmesinde ilerlemeler kaydedildiğini çalışmalarında beyan etmişlerdir.

Fiore ve ark. (2011) çalışmalarında rast gele yönlendirilmiş cam elyaf kumaşları tek yönlü bazalt elyaf kumaşlar ile takviye ederek hibrit kompozitleri üretmişlerdir. Ürettikleri bu 6 tabakalı hibrit kompozitlerde bazalt elyaf kumaşların tabaka sayılarını değiştirerek üç nokta eğme ve çekme deneyleri yaparak mekanik özelliklerini tespit etmişlerdir. Fiore ve ark. hibrit kompozitlerde bazalt kumaş tabaka sayısının artmasıyla hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir. Bazalt

kompozitlerin, cam kompozit ve bazalt ile yapılan hibrit kompozitlerden çok daha iyi mekanik özellikler sergilediğini makalelerinde yer vermişlerdir.

Subagra ve ark. (2014) karbon ve bazalt elyaf kumaşlarından farklı tabaklarda olmak üzere 6 tabaka karbon elyaf ve 4 tabaka bazalt elyaf kumaşlardan 7 ayrı hibrit kompozit imal etmişlerdir. Ürettikleri bu kompozit numunelere üç nokta eğme deneyi uygulayarak eğilme dayanımları ve % sehim miktarlarını birbirleri ile mukayese etmişlerdir. Bazalt kumaşların karbon kumaşlar ile hibritlenmesi neticesinde, karbon elyafın düşük % sehim miktarının iyileştiğini ve arttığını gözlemlemişlerdir.

Wang ve ark. (2008) bazalt elyafları aramid elyaflar ile aynı kumaş içerisinde hibritleme yaparak 2m/s ve 3m/s darbe hızlarında elyafların enlemsel ve boylamsal yönlerdeki absorbe ettikleri darbe enerjilerini mukayese etmişlerdir. Enlemsel boyunca mekanik özelliklerin boylamsal yönünden daha iyi olduğunu belirtirlerken, bazalt elyafların oluşturulan hibrit kompozitlere daha sünek bir yapı kazandırdığı makalelerin sonuç kısmında önemle ifade etmişlerdir.

Dehkordi ve ark. (2010) çalışmalarında bazalt elyafları ile naylon elyafları aynı kumaş içinde birbirleri ile hibritleme yaparak hibrit kompozitler imal etmişlerdir. Kompozitlerdeki naylon miktarını %25,%33,%50 ve %100 omak üzere belirlemişlerdir. Uyguladıkları düşük hızlı darbe deneyleri neticesinde % naylon miktarının artmasıyla darbe direncinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Dehkordi ve ark. sonuçlara naylonun % miktarının artmasıyla sonuç hasarının elyaf kırılmasından delaminasyon hasarına dönüştüğünü de çalışmalarına ilave etmişlerdir.

Zhang ve ark. (2012) polybutylene succinate (PBS) matris malzemeye %3 ila %15 aralıklarında bazalt elyaf takviyesi yapmışlardır. Üç nokta eğme ve darbe testleri ile mekanik özellikleri test etmişlerdir. Bazalt elyaf takviye oranının artmasıyla eğilme dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Darbe dayanımında ise %3 bazalt elyaf takviye oranında düşme tespit ederlerken, sonraki % takviye oranlarının artmasıyla darbe dayanımlarında artışların gözlemlendiğini çalışmalarında rapor etmişlerdir. SEM mikro yapı görüntülerini incelediklerinde bazalt elyafların matris malzeme ile iyi bir ara yüzey oluşturduklarını yorumlamışlardır.

Manikandan ve ark. (2012) bazalt ve cam elyafları asit ve baz ($NaOH\&H_2SO_4$) ortamlarında iyileştirme yapılarak ve yapılmadan polyestere takviye edilmiştir. Ürettikleri bu kompozitlerden çekme, tabakalara arası kayma dayanımları ile darbe dayanımlarını testlerle incelemişlerdir. Herhangi bir yüzey iyileştirme işlemi uygulanmamış kompozitlerden bazalt kompozitler, cam kompozitlerden %9,88 daha iyi çekme dayanımı sergilediğini bulmuşlardır. Asitle iyileştirme uygulandığında, bazalt kompozitlerin çekme dayanımı cam kompozitlerden, %24,5 daha iyi sonuç verdiğini, baz ile iyileştirme yapıldığında ise bu değerlerin %35,45 olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Asit ve baz ile etkileşime girmeyen bazalt ve cam elyafların takviye edildiği kompozitlerde, bazalt kompozitlerin cam kompozitlerden %32,05 daha iyi tabakalar arası kayma dayanımı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Asit ile etkileşimde bu değer %41,47'e çıkarken, bazalt ile etkileşiminde ise %44,24'e çıktığını belirtmişlerdir. İyileştirme yapılmayan kompozitlerde, bazalt kompozitlerin darbe enerjisi, cam kompozitten %63,26 gibi çok yüksek bir değer gösterirken, baz ile iyileştirmede bu değer %89,2'i ve asit ile iyileştirmede ise %92,51 gibi çok daha iyi darbe enerjisi değerlerini elde ettiklerini çalışmalarında ifade etmişlerdir. Manikandan ve ark. bazalt elyafların iyi mekanik özellikler ve asit-baz dirençleri göstermesini, içerdikleri Al_2O_3 ve SiO_2 seramiklerin miktarlarının cam elyaflara göre daha fazla olmasına bağlamışlardır. Manikandan ve ark. çalışmalarında vurguladığı bir konu ise bazalt elyafların, cam elyaflardan matris malzeme ile daha iyi arayüzey oluşturmalarıdır. Bu durumu da bazalt elyafların yüzeylerinin pürüzlü olmasından dolayı matris malzeme ile ara yüzeylerde mekanik kilitlemelere neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, elyaflardaki asit ve baz iyileştirmelerinin yüzeylerde –OH grupları ile kimyasal bağlanmayı da sağladıkları şeklinde bir açıklamada bulunmuşlardır.

Dorigato ve Pegoretti (2012) yaptıkları çalışmada bazalt, karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Çekme deneyinde bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımlarının carbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımlarına yakın değerler aldığını ifade ederlerken, cam takviyeli kompozitlerden ise çekme dayanımlarının ve elastikiyet modüllerinin oldukça yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin yorulma ömürlerinin ise cam elyaf takviyeli kompozitlerden daha iyi olduğunu ve özelliklede düşük % yükleme oranlarında daha da etkili olduklarını çalışmalarında altını çizerek betimlemişlerdir. Yorulma deneylerinin gözlem sonuçlarına ilaveten, düşük % yükleme

oranlarında bazalt elyaf takviyeli kompozitlerdeki rijitlik kayıplarının cam elyaf takviyeli kompozitlerinkinden az olduğunu ve bunun önemli bir avantaj olduğunu vurgulamışladır.

Sfarra ve ark. (2013) bazalt ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlere düşük hızlı darbe deneylerini 7.5, 15, 22.5 J enerjilerinde uygulamışlar ve oluşan hasar incelemişlerdir. Sonuç hasarı olarak darbe esnasında oluşan bombeleşmenin bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde az, cam elyaf takviyeli kompozitlerde fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç hasarlarında cam elyaf takviyeli kompozitlerde delaminasyon ve elyaf kırılmaları etkin hasarlar iken, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde ise elyaf kırılmalarının daha etkin hasar olduğunu tespit etmişlerdir. Enerji absorpsiyonunun bazalt kompozitlerde elyaflar tarafından yapıldığını ve delaminasyon hasarının elyaf/matris ara yüzey etkileşim durumuna göre değiştiğini çalışmalarında rapor etmişlerdir.

Wei ve ark. (2011) bazalt/epoksi ve cam/epoksi kompozitleri deniz suyu konsantrasyon ortamında 10,20,30, 50 ve 90 gün bekleterek çekme, eğme dayanımlarındaki azalmaları belirlemişlerdir. Elyaf/matris ara yüzey etkileşimlerini yorumlamak için ayrıca DCAT testi uygulayarak serbest yüzey enerjilerini tespit etmişlerdir. Korozif ortamda numunelerin bekleme süresinin artmasıyla çekme ve eğme dayanımlarının düştüğünü belirtirlerken, 10 gün bekleme süresinde cam/epoksi kompozitlerin dayanımlarının birden düşüş sergilediğini ve bazalt kompozitlerin daha iyi çekme ve eğme dayanımı gösterdiklerini ifade etmişlerdir. Bazalt elyafların serbest yüzey enerjilerini 58.57 mN/m, cam elyafların ise 40.01 mN/m olrak bulmuşlardır. Elde edilen değerlerden bazalt elyafların serbest yüzey enerjilerinin cam elyaflardan yüksek olduğunu ve epoksi/matris ile iyi bir ara yüzey oluşturduğunu sürekli altını çizerek makalelerinde vurgulamışlardır. Aynı zamanda bazalt elyafların cam elyaflardan çekme ve eğme dayanımı ve korozyon dirençlerinin yüksek olmasını, içerdikleri MgO, K_2O, Na_2O, Fe_2O_3 ve TiO_2 seramik bileşimlerinden kaynaklanmasına bağlamışlardır.

Sarasini ve ark. (2014) 5J, 12.5J ve 25J darbe enerjilerinde toplam tabaka sayısı 10 olmak üzere; bazalt/epoksi, 7 tabaka karbon ve 3 tabaka bazalt/epoksi hibrit ve karbon/ epoksi kompozitlere düşük hızlı darbe deneyleri ve darbeye maruz kalan kompozitlere üç nokta eğme deneyleri uygulamışlardır. Farklı enerjilerde uyguladıkları

darbe deneylerinde karbon takviyeli kompozitlerdeki hasar alanları, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin hasar alanlarından az olduklarını saplamışlardır. Fakat 25j yüksek darbe enerjisinde karbon elyaf takviyeli kompozitte delinmenin olduğunu, bazalt elyaf takviyeli kompozitte ise delinmenin olmadığını gözlemlemişlerdir. Bu durumu ise karbon elyafların rijitliğinin fazla olmasından dolayı baskın sonuç hasar tipinin elyaf kırılması olduğunu neden olarak belirtmişlerdir. Bazalt elyaf takviyesinde sonuç hasarlarının delaminasyon, elyaf kırılması ve elyaf sıyrılması olduğunu nedenlerden bir diğeri olarak açıklamışlardır. Bazalt elyafların % şekil değiştirmelerinin yüksek olmasının, darbe enerjisinde bazalt elyafların karbon elyaflara avantaj sağlayarak, daha fazla enerji absorpsiyonu sağladığını ifade etmişlerdir. Karbon ve bazalt hibritleme ile karbon elyaflardaki bu dezavantajın giderildiğini deneyler ile gözlemlemişlerdir. Sarasani ve ark. çalışmalarındaki diğer önemli bir detay ise darbe hasarına uğramış kompozitleri üç nokta eğme deneyine maruz bırakarak kaybettikleri eğilme dayanımı ve modüllerini tespit etmeleri olmuştur. 12,5 j darbe enerjisinde karbon kompozitlerin eğilme dayanımlarında %30, eğilme modülünde %60 kayıp, bazalt kompozitlerde ise eğilme dayanımında %9 ve eğilme modülünde ise %5'lik kayıplar tespit etmişlerdir. 25j da ise karbon kompozitlerde delinme meydana geldiğinden dayanım ve modülü hesaplayamamışlardır. Bazalt elyaflarda bu durum ise eğilme dayanımda %31, eğilme modülünde ise %15 lik bir kayıplar kaydetmişlerdir. Çalışmalarında, bazalt elyafların takviye olarak kullanılmasındaki avantajı gözler önüne serdiğini açıkça beyan etmişlerdir.

Zhu ve ark. (2011) bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin darbe enerjilerini test etmişlerdir. Deneyler neticesinde darbe enerjilerinin yüksek olmasının % şekil değiştirme miktarlarının yüksek olmasından kaynaklandığı belirtmişlerdir. Dolayısıyla bazalt elyafların dinamik darbe yükleri altında takviye malzemesi olarak rahatlıkla kullanılabileceğini ve cam elyaflara kesinlikle alternatif olduklarını çalışmalarında rapor etmişlerdir.

Kim ve ark. (2011) çalışmalarında bazalt elyafların yüzeylerini oksijen plazma ile modifiye ederek temas açılarını düşürmüşler ve böylece epoksi ile ıslatılabilirliğini arttırmayı amaçlamışlardır. DCB deneyleri ile tabakalar arası Mod I kırılma tokluklarını tespit etmişlerdir. Bazalt elyafların yüzeylerinde plazmayla yapılan iyileştirmede tabakalar arası kırılma tokluğunda %16'lık artış elde etmişlerdir. Bu artış ise

ıslatılabilirliğin artmasıyla ara yüzey dayanımında da artışa neden olduğu şeklinde açıklamışlardır.

Colombo ve ark. (2012) bazalt elyafa takviyeli epoksi ve vinilester kompozit numunelere çekme, basma, DCB ve yorulma deneyleri yapmışlar, bu farklı matrisli kompozitleri birbirleri ile karşılaştırmışladır. Bazalt/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerinin bazalt/vinilester kompozitlerden daha iyi olduklarını deney sonucunda tespit etmişlerdir. Bazalt/epoksi kompozitler bazalt/vinilester kompozitlerden sırasıyla %29, %13 ve %85 daha fazla çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve basma dayanımı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Epoksi matrisin bazalt elyaf ile daha iyi ara yüzey oluşturduklarını Colombo ve ark. makalelerinde açıklamışlardır. Yorulma ömrü grafiğinde uygulanan % yükleme oranının düşmesiyle eğimdeki logaritmik düşüşün, yüksek ve düşük % yükleme oranlarındaki hasar modlarının değişiminden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Yüksek % yükleme oranlarında matris malzemede makro çatlaklar ön planda iken, düşük % yükleme oranlarında mikro çatlakların hasar oluşumunda ön sırayı aldığını yaptıkları çalışmada açıklamışlardır.

Wei ve ark. (2010) bazalt ve cam elyaf takviyeli kompozitleri sodyum hidroksit (NaOH) ve hidroklorik asitte (HCl) farklı periyot sürelerinde bekleterek, çekme dayanımlarını tespit etmişlerdir. Deney sonucunda bazalt kompozitlerin korozyon dirençlerinin yüksek olmasından dolayı çekme dayanımlarının cam kompozitlerden daha iyi değerler verdiğini ifade etmişlerdir.

Quagliarini ve ark. (2012) bazalt elyaflarda vinilester yardımıyla çekme çubukları ve halat imal etmişlerdir. Cam elyaf ve halat malzemelerinin mekanik özellikleri ile mukayese etmişlerdir. Bazalt elyafların çekme dayanımı ve elastik modüllerinin cam elyaf kompozit çubuklardan daha iyi değerler sergilendiğini gözlemlemişlerdir.

Yeboah ve ark. (2013) bazalt elyaf takviyeli epoksi çubukların ahşap sütunlar ile ara yüzey etkileşimlerini sıyrılma ve kayma testleri ile incelemişlerdir. Sonuç olarak bazalt elyafların ahşap ile iyi ara yüzey oluşturduğunu ifade etmişlerdir.

Wang ve Wu (2010) çalışmalarında bazalt, karbon, yüksek dayanımlı çelik, bazalt/çelik ve karbon/çelik halatların uzun mesafeli köprülerde kullanılabilirliklerini araştırmışlardır. Çelik halatların çevresel şartlara karşı korozyon ve sarkma (uzama miktarı) dirençlerinin düşük olması, karbon elyafların hafifliğinden dolayı değişken hava şartlarında ve rüzgârlardan etkilenebilir olmasından dolayı bazalt elyaf ve hibritlerinin köprü halatları olarak kullanılması yönünde araştırma çalışmalarını amaçladıklarını beyan etmişlerdir. Aynı zamanda çalışmalarında yorulma ömrüne bağlı olarak maliyet analizleri yapmışlardır. Karbon elyaf halatların maliyetlerinin yüksek olması nedeni ile yüksek dayanımlı çelikler ile hibritlenerek maliyetlerinin düşürülebileceğini ifade ederlerken, bazalt elyaf halat ile yüksek dayanımlı çelik halatların maliyetlerinin birbirine yakın olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bazalt ve yüksek dayanımlı çelik halatların hibritlenmesiyle elastikiyet modülününde iyileştirildiğini çalışmalarında açıklamışlardır. Bazalt elyaf ile çelik halatların hibritlenmesiyle korozyon probleminin de önüne geçileceğini çalışmalarında bahsetmişlerdir.

Pavloski ve ark. (2007) doğalgaz depolama ve taşıma tankları için bazalt elyaf takviyesinin iyi mekaniksel özellikleri ve korozyon dirençlerinden dolayı diğer elyaflara avantaj sağlayabileceğini çalışmalarında ifade etmişlerdir. Bu bağlamda bazalt, karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi matrisli filaman sarım kompozit borulardan elde edilen halkalara SCC test metoduna (Halka Çekme Deneyi) göre çekme deneyleri uygulayarak birbirleri ile mukayese etmişlerdir. Deneyler neticesinde bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin, cam elyaf takviyeli kompozitlerden minimum % 15 daha fazla çekme dayanımı ve minimum %35 daha fazla elastikiyet modülü sergilediğini gözlemlemişlerdir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çok daha iyi çekme dayanımı ve elastikiyet modülü sergilemesine karşın, maliyetlerinin çok yüksek olması ve bazalt elyaf maliyetlerin cam elyaf maliyetlerine yakın olmasının diğer elyaflara alternatif oluşturduğunu çalışmalarında önemle bahsetmişlerdir. Bir doğalgaz tüpün bazalt elyaf ve E-cam elyaf ile üretildiğinde dayanım/ağırlık oranına göre bazalt elyafların hafiflikte %15, üretim ve işçilik masraflarının da hesaba katılmasıyla maliyette %5 kazanç sağlayacağınıda rapor etmişlerdir.

Shi ve ark. (2014) çevre şartlarında donma-erime direncini incelemek için karbon,bazalt, cam elyafları epoksiye takviye ederek üretilen kompozitlerin 100, 200 ve

300 donma-erime çevrim deneyleri yapmışlardır.Daha sonra bu kompozitlerin çekme ve kayma dayanım kayıplarını tespit etmişlerdir. Bazalt kompozitlerde 300 donma-erime çevrim sayılarında çekme dayanımında %3,5'lik bir kayıp söz konusu iken, karbon ve cam kompozitlerde ise sırasıyla %10 ve %20'lik kayıpların olduğunu belirlemişlerdir. 250 donma-erime çevrim sayısında bazalt, karbon ve cam kompozitlerin kayma dayanımındaki kayıpları ise sırasıyla %28, %30 ve %60 olarak tespit etmişlerdir. Shi ve ark. çekme ve kayma dayanımlarındaki kayıpların en fazla cam elyaf ile takviye yapılan kompozitlerde olduğunu belirtmişlerdir.

2.4. SiO_2 Nanopartiküllerin Kompozitlerde Katkı Olarak Kullanılması

Termoset polimerlerden epoksi reçinelerin yapıları gevrek olduğundan mekanik özellikleri, yorulma ömrü ve kırılma toklukları düşüktür. Epoksi gibi termoset polimerlerin bu negatif özelliklerini iyileştirmek amacıyla araştırmacılar tarafından birçok yöntemler uygulanmaktadır. Bunlardan en çok rağbet gören, etkili ve verimli olan yöntem ise nanopartiküllerin termoset polimerlere takviye edilmesidir.

Nanopartiküllerden karbon nanotüpler yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olup, üretim maliyetlerinin yüksek olması, iyi termal ve elektrik iletkenliklerinin olmasından dolayı, hem yalıtım özelliği hem de mekanik performans beklenen yerlerde beklentileri karşılayamamaktadır. Dolayısıyla araştırmacıları diğer nanopartikülleri epoksi, polyester, polietilen gibi polimer matris malzemeler içerisinde kullanılmasına ve mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesine sevk etmiştir.

Nanopartiküllerden biri olan nanosilikalar araştırmacıların ve endüstrinin kullanımına mekanik ve termal özelliklerinin farklı matris malzemelere takviye edilerek incelenmesine 2002/2003 yıllarında sunulmuştur. Termoset matris malzemelerden en yoğun olarak epoksi matrislerde kullanılmaktadır. SiO_2 nanopartikül takviyeli epoksi kompozitler, iyi mekanik ve termal performans, elektrik ve ısı yalıtkanlığı, korozyon direnci, birçok matris malzemeler ile iyi adezyon özelliği, çizilmeye direnci ve mükemmel tribolojik özellikler gibi avantajlar sunmaktadır. SiO_2/epoksi nanokompozitler havacılık, otomobil, elektronik ve spor donanımlarında ve ısı yalıtım plakaları üretim endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır.

Araştırmacılar nanosilikaları epoksilere takviye ederek çekme ve eğilme dayanımlarını, rijitlikleri, % uzama ve sehim miktarları, kırılma toklukları, enerji boşalma oranları ve ara yüzey adezyonlarında ilerlemeler kaydetmişlerdir. Bu ilerlemelerde nanosilikaların yüzey modifikasyonu, kaliteli partikül dağılımı, boyutu ve geometrisi, özgül yüzey alanları, % katkı oranları, matris ile olan etkileşimi faktörleri etkin rol oynamaktadır.

Yüzde katkı oranlarının belirlenmesinde kullanılan matris malzemenin viskozitesi ve viskoziteye etki eden nanosilikaların özgül yüzey alanı önem arz etmektedir. Yüzde katkı oranının artmasıyla birleşiminin viskozitesi de artmaktadır. Bu durum, epoksinin ağırlığını, sünekliliğini, üretilebilirliğini, saydamlılığını, elyaf takviyesinde ıslatılabilirliğini, dağıtılabilirliğini ve maliyetini etkilemektedir. Bu nedenle silika/epoksi nanokompozitleri üretmek için etkili, düşük maliyet ve en iyi mekanik performans sağlayacak düşük % katkı oranları belirlenmelidir.

Özgül yüzey alanı yüksek olan nanosilika takviyeli matrisin viskozitesi, düşük özgül yüzey alanlı nanosilika takviyeli matrisin viskozitesine oranla aynı % katkı oranlarında daha yüksektir. Bununla beraber % katkı oranı arttıkça dağıtılabilirliği de zorlaşmaktadır. Tüm bunlardan ötürü yüksek özgül yüzey alanına sahip SiO_2 nanopartiküllerin matris içerisindeki % kullanım aralığı %1-5 arasında önerilmektedir.

Yürütülen tez çalışmasında kullanılan nanosilikaların özgül yüzey alanı $650 m^2/g$'dır. Özgül yüzey alanın yüksek olması, literatürde yapılan çalışmalar ve öneriler göz önünde bulundurularak, %1-5 aralığında optimum % katkı oranı çekme dayanımı ve kırılma toklukları değerlerine göre belirlenmiştir. Deneyler neticesinde ağırlıkça %4 katkı oranı en iyi mekanik performans ve kırılma toklukları veren yüzde olmuştur.

Nanosilikaların, polimer matrise katkısı ve elyaf takviyeleri ile ilgili literatür çalışmaları aşağıda başlık altında verilmiştir. Ayrıca, doktora tez çalışmasında kullanılan bazalt elyafların nanosilika ve diğer nanopartiküller ile beraber kullanıldığı literatür özet çalışmaları da aşağıda sunulmuştur.

2.4.1. SiO_2 nanopartikül katkılı polimer matrisler ile ilgili literatür çalışmaları

Rosso ve ark. (2005) epoksi içerisine % 5 katkı oranında sol-gel yöntemiyle silan ile fonksiyonelleştirilmiş SiO_2 nanopartikülleri takviye etmişlerdir. Nanopartiküllerin mekanik özelliklere ve kırılma tokluğuna olan etkilerini incelemişlerdir. Kırılma tokluğunu incelemek için kompakt çekme testini uygulamışlarıdır. %5 SiO_2 nanopartikül katkı oranının, nano kompozitlerin kırılma tokluğunu (Gıc) %40 arttırdığını, rijitliğini (E) ise %20 arttırdığını tespit etmişlerdir. Kırılma tokluğundaki artış sebeplerinden birini nanopartikül ayrılması neticesinde ara yüzeydeki enerji absorpsiyonuna bağlarlarken, bir diğerini ise nanopartiküllerin yüzey modifikasyonunun matris malzeme ile kimyasal etkileşim sağlamasından dolayı etraflarında plastikleştirici etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Plastikleştirici etkinin aynı zamanda % uzama miktarını arttırdığını da belirtmişlerdir.

Han ve Cho (2006) epoksi matris içerisine %0, 1, 3 ve 5 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikülleri takviye ederek, tek kenar çatlaklı üç nokta eğme deneyi ile kırılma tokluklarını tespit etmişlerdir. En iyi kırılma tokluğu değerini ağırlıkça %3-5 takviye oranları arasında elde etmişlerdir. Aynı zamanda araştırmacılar nano ile mikro partikülleri hibritleme yaparak nano ve mikro boyuttaki çatlak ilerlemesini incelemişlerdir. Çatlağın SEM görüntülerinden nanopartiküllere yapılan silan ile yüzey modifikasyonu neticesinde elde edilen iyi ara yüzeyden dolayı çatlakların mikro boyuttaki partiküllere yöneldiğini ifade etmişlerdir. Nanopartiküllerin çatlak önlerinde birçok sapmalara ve yönlenmelere neden olarak, kırılma enerjisini arttırdığını çalışmalarında açıklamışlardır.

Deng ve ark. (2007) çalışmalarında ağırlıkça %0, 2, 4, 6, 8 katkı oranlarında silan ile fonksiyonelleştirilmiş SiO_2 nanopartikülleri epoksiye takviye etmişlerdir. Nanokompozitleri -50^oC ile 70^oC sıcaklık aralıklarında kırılma tokluklarını incelemişlerdir. En iyi kırılma tokluğu değerlerini %4 takviye oranlarında elde etmişlerdir. Aynı zamanda TEM görüntülerinde %4 katkı oranında matris malzeme içerisinde iyi bir nanopartikül dağılımı elde ettiklerini çalışmalarında vurgulamışlardır.

Adachi ve ark. (2008) 1,56 μm ile 240 nm çapları aralıklarında değişen SiO_2 nanopartikülleri epoksiye % 0 – 0,35 hacimsel oranlarında epoksiye takviye ederek

Mod I kırılma tokluklarını ve değişen nanopartikül boyutların kırılma tokluklarına etkisini incelemeye çalışmışlardır. Çalışmalarında tek kenar çatlaklı üç nokta eğme deneyleri ile sonuçlara ulaşmak için çaba sarf etmişlerdir. Deneyler neticesinde partikül boyutunun azalmasıyla elastikiyet modülünün fazla etkilenmediğini fakat % hacimsel takviye oranının artmasıyla elastikiyet modülünün arttığını tespit etmişlerdir. Buna karşın partikül boyutunun azalmasıyla kırılma tokluğunda artışların gözlemlenildiğini ve çatlak ilerlerken küçük boyutlu nanopartiküllerin çatlağı tutma, çatlak ucu körleme ve köprüleme gibi kırılma mekanizmalarının etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Battistella ve ark. (2008) AMEO ve GLYMO tipi silanlar ile yüzey modifikasyonu yapılmış ve yapılmamış %0.1, 0.3 ve 0.5 hacimsel oranlarında SiO_2 nanopartikülleri epoksiye takviye etmişlerdir. Numuneleri çekme ve yorulma deneylerine tabi tutmuşlar ve çekme ve kırılma tokluklarını incelemişlerdir. Epoksi içerisinde en iyi nanopartikül dağılımını GLYMO modifikasyonlu SiO_2 nanopartiküllerde elde ederlerken, en fazla nanopartiküllerin topaklaşmasını yüzey modifikasyonu uygulanmamış nanopartiküllerde gözlemlemişlerdir. Yorulma ömrünü ve %54'lük artış ile kırılma tokluğunu en iyi %0.5 hacimsel katkı oranında AMEO modifikasyonlu SiO_2 nanokompozitlerde gözlemlemişlerdir. Bu durumu ise AMEO modifikasyonlu SiO_2 nanokompozitlerde çatlak ilerleme direncinin yüksek olmasına bağlamışlardır.

Nanopartiküllerin darbe tokluklarını incelemek üzere Zhang ve ark. (2006) ticari KH-560 silan ile modifikasyonlu ve modifikasyonsuz olmak üzere %0, 3 ve 5 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikülleri epoksiye takviye etmişlerdir. En iyi darbe tokluğu değerini %3 katkı oranında elde etmişlerdir. Silan yüzey modifikasyonunun epoksi içerisinde dağılımı sağladığını ve matris malzeme olan epoksi ile nanopartikül arasında kuvvetli ve esnek ara yüzey oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca SiO_2 nanopartikül takviyesinin TGA ve DSC sonuçlarına göre nanokompozitte termal kararlılık sağladığını da çalışmalarında beyan etmişlerdir.

Zhang ve ark.(2006) sol-gel tekniği ile yüksek % hacimsel oranlarında SiO_2 nanopartikülleri epoksiye takviye etmişlerdir. Hacimsel % takviye oranlarının artmasıyla elastikiyet modüllerinin, mikrosertliğin ve kırılma tokluğunun arttığını belirtmişlerdir. Çentik Charpy darbe deneyinde darbe dayanımının ise %3-4 takviye

oranından sonra düştüğünü çalışmalarında rapor etmişlerdir. En iyi kırılma tokluğu değerini ise %14 hacimsel katkı oranında elde etmişlerdir. SEM görüntülerini incelediklerinde çapları 25 nm olan SiO_2 nanopartiküllerin takviyeden sonra 30-80nm civarında olduklarını bulmuşlardır. Bu durumu ise SiO_2'lerin çaplarının partiküllere uygulanan silan ile yüzey modifikasyonu neticesinde polimer zincirler ile SiO_2 nanopartiküller arasında kuvvetli bir kimyasal etkileşim olduğunu ve SiO_2 nanopartiküllerin polimer zincirler ile kaplanarak bir kabuk oluşturduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir.

Sadej-Bajerlain ve ark. (2011) çalışmalarında %0, 2, 4, 5, 10 takviye oranlarında ticari Aerosil7200 ve AerosilR711olan iki ayrı silan ile SiO_2 nanopartikülleri yüzey modifikasyon işlemi tatbik etmişlerdir. Oluşturulan bu kompozitlerde SiO_2'lerin dağılabilirliklerini, kırılma yüzeylerindeki pürüzlülükleri ve polimerleşme reaksiyonlarını incelemişlerdir. En iyi homojen dağılımı, polimerleşme reaksiyonunu ve AFM testi ile en fazla yüzey pürüzlülüğünü ağırlıkça %4 katkı oranında elde etmişlerdir. Ağırlıça %4 katkı oranının epoksi kompozitlerde yeterli bir katkı oranı olduğunu, bu % oranından sonra nanopartiküllerde kümeleşmelerin arttığını ve polimerleşme reaksiyonunun bundan etkilenerek düştüğünü çalışmalarında detaylı bir şekilde yer vermişlerdir. Tüm bunlara ilaveten nanopartiküllerin kümeleşmelerinin homojen dağılan bir yüzey pürüzlülüğünün önüne geçerek, yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğünü Sadej-Bajerlain ve ark. çalışmalarında bahsetmişlerdir.

Jalili ve ark.(2007) poliüratan matrise ticari iki ayrı yüzey modifikasyonu uygulanmış SiO_2 nanopartikülleri %0, 2, 4, 8 12 katkı oranlarında ilave etmişlerdir. Ağırlıkça %4 katkı oranında en iyi çekme dayanımını elde etmişlerdir. Aynı zamanda bu katkı oranında TT600 silan yüzey modifikasyonlu SiO_2 nanopartiküllerin matris içerisinde daha iyi bir dağılım sergilediklerini TEM görüntüleri ile gözlemlemişlerdir. R972 silan modifikasyonlu SiO2 nanopartiküller %4 katkı oranında en yüksek uzama miktarının arttığını ve daha sünek bir davranış sergilediğini tespit etmişlerdir. Bunlara ilaveten bu modifikasyonla aynı % katkı oranında çizilmeye karşı en yüksek direnci bulmuşlardır.

Phonthammachi ve ark. (2012) çalışmalarında ağırlıkça %0-4 takviye oranlarında silan ile yüzey modifikasyonu yapılmış SiO_2 nanopartikülleri epoksiye

takviye etmişlerdir. En iyi Mod I kırılma tokluğunu %4 katkı oranında %54'lik artış ile elde etmişlerdir. Bu katkı oranında eğilme ve çekme dayanımlarında ise sırasıyla %20 ve %17'lik artışlar elde etmişlerdir. Yüksek yüzey alanına sahip SiO_2 nanopartiküllerin polimer içerisinde ağırlıkça %1-4 katkı oranlarında kullanılmasını çalışmalarında önermişlerdir.

Wang ve ark.(2013) epoksiye %0, 3, 6, 9, 12 hacimsel oranlarda takviye edilen SiO_2 nanopartiküllerin çekme, kırılma tokluğu ve % uzaman miktarı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapmışlardır. % hacimsel katkı oranının artmasıyla çekme dayanımı ve kırılma tokluğunun arttığını fakat % uzama miktarının ise düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Tzetzis ve ark. (2012) çalışmalarında düşük viskoziteli epoksiye %0, 0.5, 1,2, 3 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikülleri takviye etmişlerdir. Tüm % katkı oranlarında % uzama miktarlarında yaklaşık %10'luk artış tespit etmişlerdir. Çalışmalarında yüksek yüzey alanına sahip SiO_2 nanopartiküllerin katkı oranı aralığının %1-5 arasında olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Tüm katkı oranlarında nanoidentation testinde dayanımlarının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Dongbo ve ark. (2006) çalışmalarında ticari KH-570 tipi silan ile SiO_2 nanopartikülleri fonksiyonelleştirerek, polipropilen (PP) polimer matris içerisine takviye etmişlerdir. Üç nokta eğme ve Izod Charpy darbe testleri sonunda %3-5 katkı oranları aralığında mekanik özelliklerde iyileştirme elde ettiklerini ifade etmişlerdir. En yüksek mekanik özelliklerini ise %4 katkı oranında elde etmişlerdir.

Zhao ve Luo (2008) epoksiye dimethylbenzanthrocene (DMBA) ve methlytetrahydrophthalie (Methpa) yüzey modifikasyonları uygulanmış SiO_2 nanopartikülleri %0-3 katkı oranlarında takviye etmişlerdir. Üretilen nanokompozitlere çekme dayanımlarını, % uzama miktarlarını ve kırılma yüzey morfolojilerini incelemişlerdir. DMBA modifikasyonlu SiO_2 nanokompozitlerde %1 katkı oranına kadar elastikiyet modüllerinde artış gözlemlerlerken, daha sonra modüllerin düştüklerini tespit etmişlerdir. % katkı oranının artmasıyla MeTHPA ile modifikasyon uygulanmış SiO_2 nanokompozitlerin % uzama miktarları arttığını araştırmalarında bahsetmişlerdir.

Zhang ve ark.(2008) %0-15 hacimsel katkı oranında epoksiye (Bisphenol F) SiO_2 nanopartikülleri sol-gel yöntemi ile karıştırmışlar ve kompact çekme, çentiksiz Charpy darbe, dinamik-mekanik termal analiz ve kırılma testlerini SiO_2 nanokompozitlere 23-80^oC sıcaklık aralığında uygulamışlardır. Nanokompozitlerde % hacimsel oranın artmasıyla rijitliğin, mikrosertliğin arttığını ve bununla beraber kırılma tokluğunun da yükseldiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında epokside çatlak ilerlemesini hızlı ve kırılma yüzeyinin pürüzsüz, nanopartikül takviyeli kompozitlerde ise yüzeylerin pürüzlü ve birçok nano-mikro çukurcukların oluştuğunu SEM görüntülerinden yorumlamışlardır. Buradan nanopartiküllerin epoksi ile iyi bir arayüzey oluşturduğunu belirtmişlerdir. % katkı oranlarında yüzey pürüzlülüğündeki anlık artışın %4 katkı oranında AFM testi ile görüldüğünü ifade etmişlerdir.

Hsieh ve ark. (2010) %0, 10 ve 20 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikülleri 4 farklı epoksiye takviye etmişler, mekanik özellikleri ve kırılma tokluklarını incelemişlerdir. Artan % katkı oranının nanokompozitlerin elastikiyet modüllerini arttırdıklarını makalelerinde bahsetmişlerdir. Kırılma tokluğu üzerindeki önemli etken faktörlerini, epoksi ve nanopartiküller arasındaki çapraz bağlanmalar, epoksi ve nanopartikül arayüzeyindeki adezyon ve gerilme yoğunluğu tarafından başlatılan lokal kayma bantları, silika nanopartiküllerin epoksiden ayrılması neticesinde oluşan boşluk ve boşluğun plastik deformasyonla birlikte büyümesi şeklinde izah etmişlerdir.

Huang ve ark.(2005) epoksiye (DGEBF) ağırlıkça %0-4 katkı oranlarında nano silikaları takviye etmişler ve ürettikleri nanokompozitlere kriyojenik ortamda çekme ve termal genleşme testlerini tatbik etmişlerdir. Kriyojenik ortamda elastikiyet modülü, % uzama miktarı ve çekme dayanımlarının katkı oranlarının artmasıyla arttığını bulmuşlardır. Çekme dayanımında yaklaşık %30'luk ve % uzama miktarında %54'lük artışla en iyi mekanik özellikleri %4 katkı oranında elde etmişlerdir. Yine bu katkı oranında en düşük termal genleşme katsayısını tespit etmişlerdir. Camsı geçiş sıcaklığının ise % katkı oranının artmasıyla arttığını çalışmalarında Tablo halinde sunmuşlardır.

Brunner ve ark. (2006) epoksi reçineye %10 katkı oranında orgonasilika takviyesi yapmışlardır. Ürettikleri nanokompozitlerin mekanik özelliklerini, kırılma tokluklarını ve alev geciktirme etkileri üzerinde çalışmışlardır. Tek kenar çatlaklı üç

nokta eğme ve DMTA testlerini mekanik ve termal özellikleri belirlemek için uygulamışlardır. Kırılma tokluğunda %40-50 arasında bir artış sağlamışlarken, % sehim miktarında ise %10-20 arasında bir artış elde etmişlerdir.

Ragosta ve ark. (2005) TGDBM/DDs epoksi reçineye %10 katkı oranında silan ile fonksiyonelleştirilmiş nano silikaları sol-gel yöntemi ile takviye etmişlerdir. Elde edilen nanokompozitlerin, nanopartikül ile reçine arsındaki kimyasal etkileşimi, kürleme davranışlarını, kırılma ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. SiO_2 nanopartiküllerin yüzeyindeki silan grupların epoksi grupları ile etkileşime girdiği ve ara yüzey adezyonunun arttırdığını ifade etmişlerdir. Nano silika takviyesiyle nanokompozitlerin dayanımları, elastikiyet modülü ve kırılma tokluğunda artışlar gözlemlenildiğini makalelerinde belirtmişlerdir. SiO_2 nanopartiküller ile epoksi arasında ara yüzey etkileşiminin olması, nanokompozitlerin sünek davranış sergilemesine neden olduğunu makalelerinde belirtmişlerdir.

Zheng ve ark. (2003) Nano silikaları %3 katkı oranında epoksiye takviye ederek ürettikleri SiO_2/epoksi nanokompozitlere çekme ve darbe testleri uygulamışlardır. Aynı zamanda yüzey modifikasyonu uygulanmış ve uygulanmamış SiO_2 nanopartiküllerin nanokompozitlere sağladıkları etkileri de elde ettikleri mekanik test sonuçlarına göre karşılaştırmışlardır. Nanosilikalara uygulanan yüzey modifikasyonunun çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve darbe dayanımında modifikasyonsuza göre ciddi bir iyileştirme sağladığını bulmuşlardır. Kırılma tokluğundaki artışı ise SEM görüntülerine göre yorumlamışlar ve kırılma yüzeylerinde oluşan kavistasyonların büyümesini ise plastik deformasyona bağlamışlardır.

Yao ve ark.(2008) %0 - 7 katkı oranlarındaki SiO_2/epoksi nanokompozitlere tek kenar çatlaklı üç nokta eğme testi uygulayarak kırılma tokluklarını tespit etmişlerdir. %3-4 katkı oranları aralıklarında %15.4'lük artış ile en iyi kırılma tokluk değerlerini elde etmişlerdir. %5 ve %7 katkı oranlarında ise nanosilikalarda kümeleşmelerin arttığını ve dolayısıyla nano silikalar ile epoksi matris arasında zayıf arayüzeylerin oluştuğunu TEM görüntüleri ile tespit etmişlerdir. En yüksek % sehim miktarının ise %7 katkı oranında elde edildiğini Yao ve ark. deneylerinin sonuç kısmında yer vermişlerdir.

Mahrholz ve ark. (2005) %5, 15 ve 25 katkı oranlarındaki SiO_2/epoksi nanokompozitlerin % çekme paylarını, termal iletkenliklerini, çekme ve eğilme dayanımlarının araştırmışlardır. % katkı oranının artmasıyla % çekme paylarının düştüğünü, termal iletkenliklerinin ise daha homojen olduğunu ifade etmişlerdir. % katkı oranının artmasıyla çekme dayanımlarının ve elastikiyet modüllerinin arttığını gözlemlemişlerdir. %5 katkı oranında ise camsı geçiş sıcaklıklarının %11'lik bir artış sergilediğini ayrıca çalışmalarında grafik şeklinde sunmuşlardır.

Gao ve ark. (2008) polipropilen (PP) matris içerisine fonksiyonelleştirilmiş SiO_2 nanopartikülleri %0-5 katkı oranları arasında takviye etmişlerdir. Elde edilen nanokompozitlerden en iyi çekme dayanımını ve matris malzeme içerisinde nano partikül dağılımını ağırlıkça %4 katkı oranında elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada nano silikalara uygulanan antioksidant yüzey modifikasyonunun matris içerisinde dağıtılabilirliğini ve polymer matris ile etkileşimi arttırdığını ifade etmişlerdir.

Guo ve ark. (2010) çalışmalarında nanopartiküllerin artan özgül yüzey alanlarının nanokompozitler üzerindeki mekanik ve termal etkilerini incelemişlerdir. Nanopartikül olarak 41, 161, 434, 563, 795, 823, ve 830 m^2/g özgül yüzey alanlarına sahip karbon nanotüp (KNT) kullanmışlardır. Polyacrylanilrile matrise %5, 10, 20 katkı oranlarında KNT takviye etmişler ve ürettikleri nanokompozitlerin çekme dayanımlarını ve elastikiyet modüllerini incelemişlerdir. Artan % katkı oranının çekme ve elastikiyet modülünü iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. KNT'lerin artan özgül yüzey alanlarının, KNT ile polimer matris arasındaki arayüzey alanını arttırdığını ve böylece polimer ile nanopartikül arasında etkileşimini de yükselttiğini bulgularında altını çizerek önemle bahsetmişlerdir. Guo ve ark. açıklamalarına devam ederek, bu durumun kompozitlerde mekanik özellikleri iyileştirmede çok önemli bir olgu olduğunun üzerinde durmuşlardır.

Arabli ve ark. (2013) epoksi reçineye nanosilika takviye etmişler ve üretilen nanokompozitlerde nanosilikaların dağılımını, kürleme hızına etkisini ve yanma üzerindeki geciktirici etkilerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %4 katkı oranında SiO_2 nanopartiküllerin epoksi reçine içerisinde katalitik etki yaparak, kimyasal reaksiyonu hızlandırdığını ve kürlemeye olumlu yönde etki ettiğini deneysel çalışmalarının bulgularında yer vermişlerdir. Aynı zamanda %4 SiO_2 nanopartikülerin epoksi matris

içerisinde homojen dağıldığını TEM görüntüleri ile izah ederlerken, yanma üzerinde geciktirici bir etkide sağladığını yorumlarında belirtmeden geçememişlerdir.

Su ve ark. (2007) SiO_2 nanopartiküllerin ağırlıkça %4 katkı oranında matris malzeme içerisinde 65,1 MPa gibi bir değer ile en yüksek adezyon dayanımı sağladığını makalelerinde belirtmişlerdir. Bu durumun ise nanosilikaların yüzey enerjisini genişlettiği ve arayüzey yapışmasını arttırdığını çalışmalarında rapor etmişlerdir.

Rostami ve ark. (2012) poliüratan matris içerisine amino %29, %45 ve %58 oranları içeren proply triethoxy silan ile yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış nanosilikaları ağırlıkça %2, %4 ve %6 katkı oranlarında takviye etmişler ve mekanik özelliklerine göre karşılaştırmışlardır. Tüm % katkı oranlarındaki nanokompozitlerde çekme dayanımında iyileştirmeler gözlemlemişlerdir. Üç yüzde oranı ile silanlama işlemi yapılmış SiO_2 nanopartikül takviyeli nanokompozitlerde en iyi çekme dayanımı artışını %4 katkı oranında elde etmişlerdir. %4 katkı oranında elde edilen yüksek dayanım, elastikiyet modülünü ve camsı geçiş sıcaklığını, silan ile yüzey fonksiyonelleştirilmiş nanosilikaların matris ile iyi bir etkileşim sağlamasından kaynaklandığını ifadesine vurgulayarak açıklamaya çalışmışlardır.

Abd ve ark. (2012) epoksi reçineye %1-20aralığındaki katkı oranlarında fonksiyonelleştirilmiş nanosilikaları takviye etmişlerdir. Kalıplara dökme yöntemi ile imal ettikleri nanokompozitlere üç nokta eğme deneyleri uygulamışlar ve eğilme dayanımları ile elastikiyet modüllerini tespit etmişlerdir. En iyi dayanım ve elastikiyet modülünü %4 katkı oranında elde etmişlerdir. Daha sonra elde edilen optimum katkı oranı olan %4 katkı oranında mikro boyutta SiO_2 partiküllerde takviye etmişlerdir. Fakat mikro partiküllerin eğilme dayanımını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Yu ve ark. (2012)γ–aminopropyltriethoxysilane,γ- glycidoxypropyltrimethoxy silane ve γ-methacryloxypropyltrimethoxy silan yüzey modifikasyonları ile SiO_2 nanopartikülleri fonksiyonelleştirmişler ve epoksiye takviye etmişlerdir. Üç nokta eğme testi ile en iyi eğilme dayanımını %4 katkı oranında elde etmişlerdir. %4 katkı oranında üç yüzey modifikasyon işlemi uygulanmış nanosilikaların epoksi ile etkileşime girdiğini FTIR testi ile belirtmişlerdir. Aynı zamanda uygulanan tüm yüzey modifikasyonlarının nanokompozitlerin eğilme dayanımlarını ve camsı geçiş sıcaklıklarını arttırdıklarını

tespit etmişlerdir. En etkili yüzey modifikasyonun ise γ-glycidoxypropyltrimethoxysilane olduğunu tespit ederek çalışmalarını neticelendirmişlerdir.

2.4.2 SiO_2 nanopartiküllerin elyaf kompozitler ile ilgili literatür çalışmaları

Tsai ve ark.(2009) %0, 10 ve 20 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikülleri, mikro küresel kauçuk, sıvı kauçuk ve bunların SiO_2 nanopartiküller ile hibritlerini, cam/epoksi kompozitlere takviye etmişlerdir. Bu kompozitlerin tabakalararası kırılma tokluğunu tespit etmek için DCB testleri yapmışlardır. %10 ve %20 nanosilika takviyesinde sırasıyla %8 ve %15 tabakalar arası kırılma toklukları elde ederlerken, %10 sıvı kauçuk takviyesinde %22, %10 nanosilika ve sıvı kauçuk takviyesinde %48, %10 mikro küresel kauçuk takviyesinde %100 ve %10 nanosilika ve %10 mikro küresel kauçukta ise %82 artış sağlamışlardır.

Wei ve ark. (2011) çalışmalarında filaman sarım sürekli bazalt elyaf demetlerine silan ile fonksiyonelleştirilmiş %5 katkı oranında nanosilika, fonksiyonelleştirilmemiş nanosilika ve katkısız olmak üzere üç tip epoksi ile ıslatarak kompozitleri üretmişlerdir. Daha sonra bu kompozitlere çekme ve tabakalar arası kayma testleri uygulayarak mekanik özelliklerini tespit etmişler ve mukayese etmişlerdir. Silan ile fonksiyonelleştirilmiş nanosilika/bazalt/epoksi kompozitlerde %30 çekme dayanımı ve %15 tabakalararası kayma dayanımda artış elde etmişlerdir. Artışların sebeplerini ise elyaf yüzeylerinin nanosilikalar ile daha pürüzlü hale getirilmesiyle elyaf/matris arayüzeyinde mekanik kilitlenmelerine, homojen dağılım vasıtasıyla gerilim transferinin artmasına ve elyaf yüzeylerinde nanosilikaların köprüleme etkisi ile çatlak oluşumunun gecikmesine bağlamışlar ve çalışmalarında bu yorumlarına kaynak göstererek sürekli vurgulamışlardır.

Subagia ve ark. (2014) bazalt elyaf takviyeli tabakalı epoksi kompozitlere %0.5, 1, 2 ve %1 katkı oranlarında fonksiyonelleştirilmiş silika bazlı mikro-nano tourmalin takviye etmişler, çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapmışlardır. % katkı oranın artmasıyla, çekme dayanımında, eğme dayanımında ve elastikiyet modülünde artış gözlemlemişlerdir. %2 katkısında çekme ve eğme dayanımında %5.9-10.2, %uzama ve

sehim miktarlarında ise %1.3-10.3 arasında artışlar gözlemlemişlerdir. Yapılan silan ile fonksiyonelleştirmede ise %1 katkıda çekme ve eğme dayanımında %16 ve %16.1'lik, eğilme modülünde %53.3'lük artışlar gözlemlemişlerdir. En iyi mekanik performansı ise yine %1 katkı oranında silan ile fonksiyonelleştirilmiş nanosilika bazlı tourmalin katkısıyla elde etmişlerdir. Subagia ve ark. çalışmalarında nanopartiküllere uygulanan yüzey modifikasyonlarının epoksi içerisinde iyi bir dağılım sağladığını ve nanopartiküller yüksek yüzey alanı sağlanılarak kuvvetli arayüzey oluşturulduğunu rapor etmişlerdir. İyi bir arayüzey adezyonunun epoksi matris ve bazalt elyaf arasında etkili yük transferi sağladığını da yine rapor etmişlerdir. Çalışmalarında rastladıkları bir diğer sonucu ise nanosilikaların ve nanosilika bazlı diğer kimyasal işleme uğramış tourmalin gibi partiküllerin temel yapılarında SiO_2 bulundurmalarında bazalt elyaflar yüzeylerinde bulunan silikon hidroksil grupları Si-O-Si kovalent bağlarını oluşturmuştur. Bu kovalent bağlanmalar neticesinde elyaf/matris arayüzeylerinin kuvvetlenmesine neden olduğunu Subagia ve ark. belirtirlerken, Davis ve ark. yaptıkları çalışmadan destek almışlardır.

Tang ve ark. (2011) %10 ve %20 katkı oranlarında nano silikaları sol-gel yöntemiyle karbon/epoksi kombinasyonuna ilave etmişlerdir. İmal ettikleri bu kompozitlere çekme, tabakalararası kayma, Mod I ve Mod II tabakalararası kırılma tokluklarını tespit etmişlerdir. Nano silikaların % katkı oranlarının artmasıyla, çekme dayanımı ve Mod I kırılma toklularının arttığını, Mod II tabakalararası kırılma tokluğunun ise düştüğünü yapmış oldukları deneyler ile gözlemlemişlerdir. % katkı oranının artmasının Mod II kırılma tokluğu ve tabakalararası kayma dayanımını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Mod I kırılma tokluğunda %20 katkı oranı ile %21-43 arasında bir artış tespit ederlerken, tabakalararası kayma dayanımında ise %12'lik bir düşüş gözlemlemişlerdir.

Manjunatha ve ark. (2010) çalışmalarında cam elyaf takviyeli (CTP) epoksi matrise %10 katkı oranında nanosilikaları sol-gel yöntemi ile takviye etmişlerdir. Daha sonra elde ettikleri nanokompozitlerin mekanik özelliklerini ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan nanosilika takviyesiyle yorulma ömründe, nanosilika takviyesiz kompozitlere göre 3-4 kat arasında artış gözlemlemişlerdir. Manjunatha ve ark. yorulma ömründeki bu artışları nanosilikaların matris malzeme içerisinde çatlak oluşumunu geciktirmesine yorumlamışlardır.

Tsai ve Cheng (2009) %10, %20 ve %30 katkı oranlarında nanosilikaları sol-gel yöntemi ile 0^o, 5^o, 10^o,15^o ve 90^o yönlendirilmiş CTP epoksi kompozitlere takviye ederek quasi statik ve dinamik basma deneylerine maruz bırakmışlardır.% nanosilika katkı oranının artmasıyla basma dayanımı ve elastikiyet modülününde artışlar gözlemlemişlerdir. Nanosilikaların CTP kompozitlere yapmış oldukları bu olumlu etkiyi elyafları çevreleyen epoksi matris malzemesi arasında ara yüzey bağlanmalarını iyileştirmesinden kaynakladığına yormuşlardır.

Liu ve ark. (2012) karbon/epoksi kompozitlere %4, 6, 8, 10, 12 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikül ve aynı oranlarda nanokauçuk takviye etmişler ve Mod I tabakalararası kırılma tokluklarına olan etkileri üzerine çalışmışlardır. %4 katkı oranında SiO_2 nanopartiküller kırılma tokluğunda iyi bir artış sağlarken, %4-6 katkı oranları arasında kırılma tokluları birbirlerine yakın seyrettiğini elde ettikleri grafikle belirtmişlerdir. %6 katkı oranında ise kırılma tokluklarında düşüşler gözlemlemişlerdir. Nanokauçuk takviyesinde ise kırılma tokluğundaki düşüşlerin %10 katkı oranında sonra olduğunu tespit etmişlerdir. SiO_2 nanopartikül takviyesinde en uygun takviye oranının %4 olduğunu ifade ederlerken, %4-6 nanosilika takviyesinde tabakalar arası kırılma tokluğunda %20-30 arasında iyileştirmelerin olduğunu önemle belirtmişlerdir.

Sun ve ark. (2010) Purdue üniversitesinde yürüttükleri proje kapsamında kevlar kumaşlara %4, %8, %16 ve %24 katkı oranlarında nanosilikaları epoksi matris ile birlikte ilave etmişlerdir. Nanopartikül takviyesiyle mekanik özelliklerde önemli iyileştirmeler elde etmişlerdir. Kevlar kumaşların çözgü yönünde %4 nanosilikaların en yüksek çekme dayanımı ve % uzama miktarı verdiklerini tespit etmişlerdir.

Wei ve ark. (2011) çalışmalarında filaman sarım bazalt elyaflara %2.5, %5, %7.5 katkı oranlarında nanosilikaları epoksiye takviye etmişlerdir. Elde ettikleri elyaf demeti şeklindeki kompozitlerin çekme dayanımlarını ve tabakalararası kayma dayanımlarını tespit etmişlerdir. Deneyler neticesinde %5 katkı oranında elyaf yüzeylerinde nanosilika takviyesiyle iyi yüzey pürüzlülüğü dağılımı elde edildiği ve böylece matris ile arayüzey etkileşiminin arttırıldığını ifade etmişlerdir. Çekme dayanımında %15'lik bir artış, tabakalararası kayma dayanımında %10'luk bir artış ile en yüksek değerleri %5 nanosilika katkı oranında elde etmişlerdir.

Deng ve ark. (2007) karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlere %0-5 katkı oranlarında nanosilikalar takviye etmişler ve Mod I ve Mod II kırılma tokluklarını tespit etmişlerdir. Yaklaşık %50'lik bir artış ile ağırlıça %4 nanosilika takviye oranında en iyi Mod I ve Mod II kırılma toklukları değerlerini elde ettiklerini çalışmalarında ifade etmişlerdir.

Böger ve ark.(2010) CTP epoksi kompozitlere %0.3 katkı oranında nanosilika ve çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇDKNT) takviye etmişler, çekme dayanımları ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Çekme dayanımında ÇDKNT takviyesiyle %8'lik artış elde ederlerken, nanosilika takviyesiyle %16'lık artış elde edilmiştir. Yorulma ömürlerinin artışında nanopartiküller çatlak oluşumunu geciktirerek elastikiyet modüllerinin ve kırılma tokluklarının artışında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Çekme-Çekme yorulma testinde nanosilika ve ÇDKNT'lerin benzer etki göstererek yakın yorulma ömür değerleri verdiğini ifade etmişlerdir. Basma-Basma yorulma testinde ise nanosilikalar, ÇDKNT'lerin önüne geçerek daha iyi yorulma ömür göstermesini sağladığını belirtmişlerdir.

Sprenger (2013) yapmış oldukları literatür tarama çalışmasında, nanosilika takviyelerin, kırılma tokluğu, çekme, eğme ve basma dayanımları, elastikiyet modülü ve yorulma ömürlerini arttırdığını kaynaklara dayanarak ifade etmiştir. Ağırlıkça %4 katkı oranında nanosilika takviyesinin kompozitlere iyi bir kırılma tokluğu sağladığını yine literatür çalışmasında beyan etmiştir.

Ajaj ve ark. (2013) rastgele yönlemiş 6 tabakalı CTP epoksiye ağırlıkça %0, 1, 3, 5, 7, 10 katkı oranlarında nanosilika takviye etmişlerdir. Elde edilen bu kompozitlerin maksimum yorulma dayanımlarını ve yorulma ömürlerini incelemişlerdir. % nanosilika takviyesinin artmasıyla yorulma ömürlerinin arttığını ifade ederlerken, en iyi maksimum yorulma dayanımlarını %3-5 katkı oranları arasında bulmuşlardır. Aynı zamanda artan epoksinin artan viskoziteye karşı uygulanabilirlik ve maliyetlerinden dolayı nanosilikaların %3-5 katkı oranı aralığında kullanılmasını tavsiye etmişlerdir. Yorulma ömrünün artışında nanosilikaların yüksek özgül yüzey alanlarının elyaf/matris arayüzeyinde arayüzey alanını arttırarak adezyonun artmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. %3-5 katkı oranları arasında yorulma ömrü artışının 4-10 kat arasında değiştiğini elde ettiği sonuçlar ile belirtmişlerdir.

2.4.3 Diğer nanopartiküllerin Bazalt kompozitler ile ilgili literatür çalışmaları

Chen ve ark. (2009) ester ve asit ile oksidasyona maruz bırakılmış %0.5 ve 1.5 katkı oranlarında çok duvarlı karbon nanotüpleri (ÇDKNT) epoksiye ilave ederek, bazalt elyaf kumaşlar ile takviye etmişlerdir. ÇDKNT/Bazalt/Epoksi kompozitlere çekme deneyleri uygulamışlar ve en iyi mekanik performansı sağlayacak ÇDKNT katkı oranını bulmaya çalışmışlardır. Deneyler neticesinde bazalt elyaf takviyesiyle 0,5 ÇDKNT katkı oranında optimum mekanik performansı bulmuşlardır.

Bashar ve ark. (2013) filaman sarım bazalt elyaf tabaka kompozitlere %1, 2 ve 3 oranlarında nanokil ve akrilik kopolimer ilavesiyle kompozitler üretmişler ve Mod I tabakalararası kırılma tokluklarını incelemişlerdir. Nanokil takviyesinde önemli bir artış tespit edemezlerken, akrilik polimerin tabakalararası kırılma tokluğunda önemli artışlar sağladığını çalışmalarında belirtmişlerdir. Ayrıca % katkı oranın artmasının kırılma tokluğunda artışı sağladıklarını da belirtmişlerdir. Bashar ve ark. çalışmalarında elde ettiği bir çıktı ise % hacimsel elyaf oranının düşmesiyle tabakalar arası kırılma tokluğunda artışların gözlenmesi olmuştur. Bu ifadeye ilaveten % katkı oranının artmasının kompozitlerde hacimsel elyaf oranını düşürmesine neden olduğunu da eklemişlerdir.

Kim ve ark. (2012) silan ve asit ile fonksiyonelleştirilmiş ÇKNT'leri bazalt/epoksi kompozitlere takviye etmişlerdir. Üç nokta eğme ve Mod I kırılma testlerine ürettikleri kompozitleri tabi tutmuşlardır. %1 katkı oranında silan ile fonksiyonelleştirilmiş ÇKNT/bazalt/epoksi ve asit ile fonksiyonelleştirilmiş ÇKNT/bazalt/epoksi kompozitlerin eğme dayanımlarının, fonksiyonelleştirilme yapılmamış ÇKNT/Bazalt/Epoksi kompozitlerden sırasıyla %14'lük ve %10'luk yüksek değerler aldığını tespit etmişlerdir. ÇKNT'lerin silan ile yapılan yüzey modifikasyonlarında tabakalararası Mod I kırılma tokluğu, asit ile yapılan fonksiyonelleştirmeden yaklaşık %40 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. ÇKNT'lerin silan ile yapılan fonksiyonelleştirmelerinde bazalt elyaflar ile epoksi matris arasında, iyi arayüzey oluşturarak adezyon kuvvetini arttırdığını ve ÇKNT'lerin epoksi matris içerisinde dağıtılabilirliklerini arttırdığını ifadesine çalışmalarında yer vermişlerdir.

2.5. Kompozit Malzeme Üretim Teknikleri

Kompozit malzemelerin elde edilmesi için kullanım yeri ve amacına uygun birçok üretim metotları mevcuttur. Bu üretim metotları; elle yatırma, püskürtme, filaman (elyaf sarma), reçine transfer kalıplama RTM/reçine enjeksiyonu, profil çekme (pultruzyon), hazır kalıplama, hazır kalıplama pestili (SMC), hazır kalıplama hamuru, vakumlama, otoklavdır (Arıcasoy, 2006). Yapılan çalışmada kompozit deney numuneleri filaman sarım tekniği ile üretildiğinden, bu metot üzerinde durulmuştur.

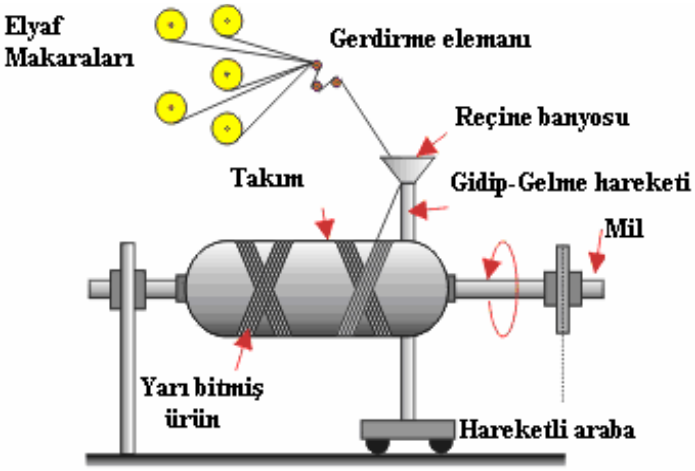
2.5.1. Filaman sarım tekniği

Filaman sarım tekniği kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan ve bilinen en verimli yöntemlerden biridir. Günümüzde filaman sarım tekniği depolama tankları, uçak, helikopter, yel değirmeni palleri, roket namlu boruları, yapı elemanları, spor malzemeleri, miller, tork çubukları, pnömatik-hidrolik silindirler, elektrik izolatör gövdeleri üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Samancı, 2004).

Tasarımları özel olarak yapılmış sargı makineleriyle kafa ve mandrel dönüş hızları ayarlanarak istenilen sarım açılarında üretim yapılır. Sarım birbirine yapışık bantlar halinde veya tekrarlanan paternlerin bütün mandreli kaplaması halinde gerçekleştirilir. İstenilen kalınlığa erişilene kadar birbirini takip eden katmanlar aynı veya değişik sarım açılarında sarılırlar. Sarım açıları mandrel boyunca doğru 25^o gibi düşük açılardan mandrel eksenine dik (90^o) açıya kadar değişebilir. Genellikle elyaflar arasındaki yapıştırıcı reçine olarak termoset reçine malzemesi kullanılır. Sıklıkla kullanılan ıslak sarımda, elyaf reçine malzemesi içerisinden geçirilerek sarım gerçekleştirilir. Diğer yöntem olan kuru sarım yönteminde, reçine önceden elyafa emdirilerek elyaf/reçine sistemleri kullanılır. Sarımlama işlemi gerçekleştirildikten sonra üretilen kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklarda fırınlanmaktadır. Filaman sarım yönteminde sıklıkla kullanılan termoset reçineler epoksi, polyester ve vinilester malzemeleridir.

2.5.1.1 Helisel sarım makineleri

Helisel sarım makineleri mandrelin dönmesi ve kafanın ileri geri strok boyunca hareket etmesiyle işlevlerini yerine getirmektedir. Mandren eksenine dik bir kızak kullanılmasıyla yada elyafı yönlendiren kılavuz halkanın düşey eksen etrafında sarım yönüne göre değişen besleme deliğinin döndürülmesiyle dördüncü eksen oluşturulmuş olur. Bu eksenler, CNC kontrollü filaman sarım makinelerinde görülmektedir (Şekil 2.4). Dördüncü eksen ile beraber elyafların uç kısımlarına daha düzgün bir şekilde yerleştirilir. Helis sargı makinelerin mekanik kontrollü olanları sürücü sistem, bağlantı zinciri ve tahrik vidalarından meydan gelirken, sayısal kontrollü makinelerde sarım ekseninde (mandrel) servo motorları mevcuttur. Aynı zamanda bu makinelerde sarım prosesi esnasında elyaf gerginliği, reçine banyo sıcaklığı, elyaf hızı, elyaf uzunluğu, oda sıcaklığı, nem gibi parametreler sürekli olarak kontrol edilmektedir (Samancı 2004).



Şekil 2.4 Filaman Sarım Makinesi (Ekşi 2007)

2.5.1.2 Filaman sarım kompozit borular ile ilgili literatür çalışmaları

Qi ve Cheng (2007) çalışmalarında $[\pm 35]_3$, $[\pm 55]_3$ ve $[\pm 70]_3$ CTP filaman sarım kompozit boruları çekme-çekme ve çekme-burulma yorulma deneylerine tabi tutmuşlardır. Deney esnasında çevrim sayısının artmasıyla yorulma dayanımında düşüşleri incelemişlerdir. Sarım açısının filaman sarım kompozitlerde iki eksenli yorulma dayanımınında etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Sarım açısının eksenel yönde küçülmesiyle yorulma dayanımının arttığını ve çok eksenli yorulma dayanımında

çevrim/gerilme oranın(R=0, R= -1) önemli olduğunu Qi ve Cheng çalışmalarında ifade etmişlerdir.

Meijer ve Ellyin (2008) $[\pm 60]_3$ ucu kapalı CTP takviyeli filaman sarım kompozit borulara farklı teğetsel ve eksenel gerilme oranlarında MTS test sistemi ile patlatma testleri uygulamışlardır. Deneyler neticesinde eksenel gerilme altında helisel çatlakların baskın olduklarını, 2:1 teğetsel/eksenel gerilme oranında sonuç hasarında terleme (weepage) hasarının olduğunu, teğetsel gerilmenin artmasıyla (4:1, 5:1) akışkan jetinin (su jeti) şeklinde lokal hasarların olduğunu ve tamamen teğetsel gerilme (1:0) altında olduğu durumda patlama hasarının olduğunu çalışmalarında rapor etmişlerdir.

Sari ve ark. (2012) $[\pm 55]_3$ CTP filaman sarım kapalı uçlu kompozit borulara, 0J, 5J, 7,5J ve 10J enerjilerinde düşük hızlı darbeye maruz bırakmışlardır. Darbe sonrası oluşan hasarlarını incelemelerini yaptıktan sonra, statik patlatma ve yorulma deneylerini yaparak patlama basınç ve yorulma ömürlerini tespit etmişlerdir. Darbe enerjisinin artmasıyla temas kuvveti, yer değişiminin ve absorbe edilen enerjinin arttığını ifade etmişlerdir. Statik iç basınç testlerinde darbe enerjisinin artmasıyla sızıntı ve basınç değerlerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir. 5j darbe enerjisi için kompozit boruların sızıntı basıncı değerinde %34, patlatma basıncında ise %40'lık basınç kaybı olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda benzer davranışları yorulma ömründe de gözlemlemişlerdir.

Mertiny ve Gold (2007) çalışmalarında $[\pm 60]_3$ kapalı uçlu CTP filaman sarım kompozit borulara farklı yükleme oranlarında, dayanım ile şekil değiştirme arasındaki ilişkinin sızıntı hasarına ve sızıntı hasarı sonucundaki akışkan kaybına olan etkisini incelemişlerdir. Deneyler neticesinde elde ettikleri dayanım – şekil değişimi ve sızıntı davranışlarından, matris hasarı ile akışkan geçirgenliğinin doğrudan ilişkili olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Artan yükleme oranının sızıntı hasarına sebebiyet veren akışkan geçirgenliğini etkilediğini ifade etmişlerdir.

Tarakçıoğlu ve ark. (2007) $[\pm 55]_3$ CTP filaman sarım açık uçlu kompozit borulara a/c = 0,2, a/t = 0,25, 0,38 ve 0,5 çatlak derinliği oranlarında çatlaklar açmışlardır. Hazırlanan bu kompozit numunelere %50, %40 ve %30 maksimum gerilme oranlarında yorulma deneylerini yapmışlardır. 0,38 a/t çatlaklarda, çatlak diplerinde

çatlağın Mod II konumunda ilerleyen delaminasyon hasarının etkin olduğunu, 0,5 a/t çatlak derinliği oranlarında ise borunun 3 tabakalı boru şeklinde yorulma hasarı davranışı sergilediğini belirtmişlerdir. Kompozit borularda ilk hasarın beyazlaşma olduğunu ve bunu elyaf/matris ayrılması (debonding) ve delaminasyon hasarlarını izlediğini ifade etmişlerdir. Sonuç hasarı olarak, patlama şeklinde elyaf kırılmalarının olduğunu çalışmalarında açıklamışlardır.

Tarakçıoğlu ve ark. (2005) $[\pm 55]_3$ sarım açısına sahip CTP kompozit borulara %30, %35, %40, %50, %60 ve %70 maksimum gerilme oranlarında yorulma testine tabi tutmuşlardır. Yorulma deneylerinde % maksimum gerilme oranı düştükçe çevrim sayısın logaritmik olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca yorulma testi boyunca, kompozit tabakalarda elyaf/matris arayüzey ayrılması (debonding), delaminasyonu ifade eden beyazlama hasarını, sızıntı başlangıcı ve patlama şeklinde elyaf kırılması şeklinde sonuç hasar tiplerini tespit etmişlerdir.

Gemi ve ark. (2009) $[\pm 75]_2$ CTP filaman sarım kompozit borularda %30, %35, %40, %50, %60 ve %75 maksimum gerilme oranlarında yorulma testlerine maruz bırakarak, yorulma ömürlerini ve oluşan hasar tiplerini belirlemişlerdir. Yüksek maksimum gerilme oranlarında sızıntı hasarı oluşmadan ani bir patlama şeklinde elyaf kırılması hasarlarını gözlemlemişlerdir. Düşük gerilme oranlarında ise iç yüzeyden elyaf/matris arayüzey ayrılması ve delaminasyon neticesinde oluşan beyazlama bölgelerinde iğne ucu olarak ifade edilen hasar oluştuğunu bahsetmişlerdir. Daha sonra iğne ucu deliği hasarının sızıntı yolunu oluşturduğunu ve ilerleyen çevrim sayıları ile elyaf kırılması sonuç hasarına ulaştığını Gemi ve ark. çalışmaların da belirtmişlerdir.

Tarakçıoğlu ve ark. (2001) $[\pm 45]_3$, $[\pm 55]_3$ ve $[\pm 75]_3$ açık uçlu sarım açılarına sahip CTP filaman sarım kompozit borulara farklı a/c ve a/t oranlarında çatlaklar açarak statik iç basınç patlatma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda Newman ve Raju yöntemiyle teorik analizler yaprak deney sonuçları ile mukayese etmişlerdir. Deney sonucunda $\pm 45^o$ sarım açısında sığ çatlak derinliklerinde kompozit boruların çatlaksız boru gibi davranış gösterdiğini, $\pm 55^o$ sarım açısında çatlak uçlarında hasar oluştuğunu ve bu hasarın delaminasyon hasarı olduğunu resimler ile görüntülemişlerdir. $\pm 55^o$ ve $\pm 75^o$ sarım açılarında a/c oranının artmasıyla teorik ve deneysel çatlaklı

kompozitlerin teğetsel dayanımının arttığını çalışmaların sonuçlar kısmına ilave etmişlerdir.

Önder ve ark. (2009) $[\pm45]_2$, $[\pm55]_2$ ve $[\pm60]_2$, $[\pm75]_2$ ve $[\pm88]_2$ filaman sarım açılarında kapalı uçlu CTP kompozit borulara statik iç basınç deneyleri uygulamışlardır. Deney sonuçlarını ANSYS 10.0 analiz programı ile teorik olarak mukayese etmişlerdir. En yüksek patlama basıncını $\pm55^o$ sarım açısında elde etmişlerdir. Ayrıca artan sıcaklığın termal gerilmeler oluşturarak, patlama basıncını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Perreux ve Joseph (1997) çalışmalarında $\pm55^o$ sarım açısında kompozit borularda frekansın yorulma ömrü, yorulma testi süresince sıcaklık artışındaki etkilerini incelemişlerdir. Frekansın artmasıyla yorulma ömrünün arttığını, düşük frekanslarda sürünme/yorulma etkileşiminin ortaya çıktığını ifade etmişlerdir.

Mertiny (2012) $[\pm60]_3$ basalt elyaf filaman sarım kapalı uçlu kompozit borularda epoksi ve bismalemide matris malzemelerini kullanmışlardır. İç basınç testleri ile oda ve yüksek sıcaklıklardaki sızıntı hasarı oluşumunu incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler neticesinde oda sıcaklığında epoksinin % şekil değişiminin bismalemide' den fazla olmasında dolayı sızıntı hasar dayanımının yüksek olduğunu, fakat ortam sıcaklığının artmasıyla epoksinin % şekil değişiminin azalma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Bismalemide matris malzeme ise % şekil değişiminde artan sıcaklık ile birlikte artış olduğu ve sızıntı hasar oluşum dayanımının arttığını, epokside ise düşme olduğunu tespit etmişlerdir. Sızıntı hasar oluşumunda matris hasarlarının etkin olduğunu ve matristeki % şekil değişiminin, sızıntı hasarı oluşumunda önemli faktör olduğunu ifade etmişlerdir.

Salavatian ve Smith (2012) yapmış oldukları çalışmada $\pm40^o$, $\pm45^o$, $\pm50^o$, $\pm55^o$ ve $\pm60^o$ sarım açılarında karbon/epoksi kapalı uçlu kompozit borulara iç basınç testleri gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada $\pm40^o$, $\pm45^o$ ve $\pm50^o$ elyaf sarım açılarında tabakalar arası kayma modu (Mod II) yani delaminasyon hasarının etkin hasar olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum ise $\pm55^o$ ve $\pm60^o$ den sonra hasar modlarında enine hasar modu diye ifade ettikleri ve elyaflara daha fazla yük binmesiyle elyaf kırılması hasar modlarının etkinleştiğini ifade etmişlerdir. Sarım açısının artmasıyla tabakalar arası kayma hasarlarının(delaminasyon) azaldığını da belirtmeden geçememişlerdir.

Martins ve ark. (2012) çalışmalarında $[\pm45]_4$, $[\pm55]_4$, $[\pm60]_4$ ve $[\pm75]_4$ sarım açılarında CTP filaman sarım kapalı uçlu kompozit borulara statik iç basınç testleri uygulamışlar ve oluşan hasar tiplerini tanımlamışlardır. $\pm45^o$, $\pm55^o$ ve $\pm60^o$ sarım açılarında sonuç hasarı olarak patlamanın meydana geldiğini, $\pm75^o$ sarım açısında ise sızıntı hasarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Sızıntı hasarından önce terlemenin (weepage) olduğunu ve sonra sızıntı hasarı akabinde ise akışkan jeti meydana geldiğini belirtmişlerdir. Terleme hasarı ve sızıntının mikro çatlakların yoğunlaşarak akışkan yolu doğrultusunda yönlendiğini ve makro çatlakları oluşturup birleşmesiyle tüpün iç yüzeyinden dış yüzeyine doğru akışkan yolu oluşturması neticesinde meydana geldikleri şeklinde açıklamada bulunmuşlardır.

Perreux ve Thiebaud (1995) çalışmalarında [±55]n 2,5m kalınlığındaki CTP filaman sarım kompozit boruların çekme ve iç basınç testlerde gösterdikleri lineer elastik ve plastik davranışları incelemişler ve elasto-plastik hasar davranışlarını modellemişlerdir. Perreux ve Thiebaud tabakalarda matris malzemenin plastisitesinden dolayı plastik şekil değiştirmenin olmadığını fakat tabakalararası sürtünmeden kaynaklanan hasar olabileceğini de çalışmalarının sonuç kısmında açıklamışlardır.

Martens ve Ellyin (2000) çalışmalarında $[\pm60^o]_4$, $[\pm66^o]_4$, $[\pm66^o]_4$ ve $[\pm66^o]_4$ CTP filaman sarım kompozit borulara iç basınç testleri uygulamışlar, farklı teğetsel ve eksenel gerilme oranlarında teğetsel ve eksene şekil değiştirmelerini ve oluşan sızıntı hasarlarını incelemişlerdir. Sızıntı başlangıcında polimer matrislerdeki hasarlar ön planda iken, artan sızıntı yoğunluğu ile makro çatlakların mikro çatlakların yerini aldığını ifade etmişlerdir. Matris çatlaklarında kümeleşmenin elyaf sarım açısı doğrultusunda yoğunlaştığını ve teğetsel gerilmenin eksenel gerilmeden fazla olduğunda delaminasyon hasarının tabakalararasında arttığını rapor etmişlerdir.

Ellyin ve Maser (2004) çalışmalarında $[\pm60^o]_3$ filaman sarım CTP kompozit boruları farklı su sıcaklıklarında hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışma neticesinde CTP kompozit borularda nem absorpsiyonun, elyaf/matris ara yüzey dayanımını azaltarak statik iç basınç dayanımının düşmesine neden olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları SEM gözlemlerine göre su sıcaklığının artmasıyla

elyaf/matris ara yüzeylerinde ayrılmaların arttığını tespit etmişlerdir. Artan sıcaklığın nem absorpsiyonunu arttırdığını sonuç olarak bulmuşlardır.

Kaynak ve ark. (2005) çalışmalarında PPG ve WRB markalı 2400 tex CTP ve Tenox S331 ve Fortafil 1200 tex KTP (karbon elyaf takviyeli plastik) ve PPG 1200 tex CTP kompozit boruları ±0º, ±25º, ±45º, ±60º ve ±90º sarım açılarında üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitleri ASTM 2990' a göre halka şeklindeki numunelere özel bir aparat ile çekme deneyleri (split disk test) yapmışlar ve mekanik özellikleri tespit etmişlerdir. Deneyler sonucunda, sarım açısının artmasıyla maksimum çekme dayanımının ve modülünün arttığını belirlemişlerdir. KTP kompozitler, CTP kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler sergilediğini bulmuşlardır. ±60º ve ±90º sarım açılarında baskın hasar modunun elyaf/matris ayrılması ve elyaf kırılması, sarım açısının düşmesiyle baskın hasar modlarının matris ve elyaf/matris ayrılması olduklarını Kaynak ve Mat yönettikleri çalışmada açıklamışlardır.

Samancı ve ark. (2011) [±45]3 CTP filaman sarım kompozit borulara a/c=0,2 ve a/t = 0,25, 0,38 ve 0,5 oranlarında çatlaklar açarak, statik iç basınç (patlatma) ve yorulma deneyleri uygulamışlardır. Sığ çatlak derinliği oranlarında (a/t=0,25) yorulma deneylerinde boruların göstermiş olduğu şişe boynu etkisinden dolayı hasarın çatlak gölgesinde ilerlemediğini tespit etmişlerdir. %50 yükleme oranında kompozit borularda çatlak bölgesinde patlama hasarı gözlemlerlerken, %40 ve %30 yükleme oranlarında su jeti şeklinde sızıntı hasarlarını tespit etmişlerdir. Çatlak derinliği oranı (a/t) artmasıyla, yorulma ömrünün de düştüğünü tespit etmişlerdir. Yüksek yükleme oranlarında sızıntı hasarı oluşmadan, ani elyaf kırılması şeklinde patlama hasarına neden olduğunu çalışmalarının sonuç kısmında belirtmişlerdir.

Kaynak ve Mat (2004) ±55º filaman sarım CTP kompozit borulara %60, %70 ve %80 yükleme oranlarında eksenel doğrultuda ve farklı frekanslarda yorulma deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda matriste çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi, elyaf doğrultusunda çatlak yoğunlaşması, beyazlaşma olarak tabir edilen elyaf/matris ayrılması ve elyaf kırılması hasarları tespit etmişlerdir. Yükleme oranının artmasıyla yorulma ömrünün azaldığını, frekansın artmasıyla da yorulma ömrünün arttığını ifade etmişlerdir.

Mertiny ve Ellyin (2002) CTP kompozit boruların $[\pm 60^o]_3$ sarım açılarında, üretim esnasında elyaf gerginliğinin çekme dayanımına ve elyaf hacimsel oranına etkisini incelemişlerdir. Elyaf gerginliğinin arttırılmasıyla, kompozit boruların hacimsel elyaf oranının ve patlatma dayanımlarının arttığını makalelerinde belirtmişlerdir.

Arıkan (2010) CTP filaman sarım kompozit borulara a/t=0,5 çatlak derinliği oranlarında ϕ = 0^o, 15^o, 30^o, 45^o, 75^o ve 90^o farklı açılarda çatlaklar açmış, statik iç basınç patlatma ve yorulma deneyleri uygulamıştır. Elde ettikleri sonuçlarda, ϕ açısının artmasıyla yorulma ömrünün arttığını tespit etmişlerdir. Çatlak açısının artmasıyla çatlak boyunun azaldığını ve çatlak dayanımının artmasında etkin olduğunu ifade etmişlerdir. Çatlak hasarı ilerlemesinin sonuç hasarı olarak seri elyaf kırılmaları ile patlama hasarı olduğunu ifade etmişlerdir.

Samancı ve ark. (2008) çalışmalarında $[\pm 75^o]_3$ filaman sarım kompozit borulara yüzey çatlakları açarak yorulma deneylerine tabi tutmuşlardır. Çatlakları a/c = 0,2 ve a/t=0,25, 0,38 ve 0,5 çatlak derinliği oranlarında açmışlardır. Çatlak derinliği oranının artmasıyla yorulma ömrünün azaldığını gözlemlemişlerdir. Yazar $[\pm 45^o]$ sarım açısındaki CTP kompozit borulara açtıkları sığ çatlaklarda (a/t =0,25) sonuç hasarının oluşmadığını belirtirken, sarım açısının artmasıyla $[\pm 75^o]_3$'de sığ çatlakta sonuç hasarının gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Çatlak hasarının Mod II delaminasyon hasarı ile ilerlediğini belirtmişlerdir. Delaminasyon hasarının çatlak boyunu aşmadığını da ayrıca belirtmişlerdir. Yine delaminasyon hasarında yükleme oranın artmasıyla hızlanmaların olduğunu da açıklamışlardır.

2.6. Kompozitlerde Yorulma

Mühendislik yapı elemanlarının yorulmadan dolayı hasar görmesi ve neticede kopması günümüzde hala güncel bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yorulmadan kaynaklanan bu problemler özellikle değişen tekrarlı yüklerin uygulandığı durumlarda ve kontrüksiyon malzemesinin önemli derecede yüzey düzgünlüğü ihtiva ettiği hallerde çok önemli olmaktadır (Eldeniz, 1992). Genel bir ifade olarak yorulma; malzemelerin statik gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlardaki davranışlarını belirlenmesi olarak tarif edilebilir. Yorulma ifadesi ASTM E 206-72'

deki şekliyle ifade edilirse; bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmaya sebep olan, lokalize sürekli gelişen, kalıcı yapı değişikliği olayıdır. Tanımlamada özellikle ifade edilen dört önemli özellik; olayın sürekli gelişmesi, bölgesel olması, çatlakların büyümesi ve sonuçta kırığın ortaya çıkmasıdır (Gemi, 2004). Makinelerde ve makine parçalarında meydana gelen büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz olarak değişen kuvvetler, gerilmeler, eğilme ve burulma momentleri etki ederler. Bu tür zorlanmaların etkileri altında makine parçaları, akma sınır altındaki bir gerilmeyle beklenilmeyen bir durumda kırılabilir. Bu şekilde meydana gelen kırılmalara yorulma kırılmaları denir (Samancı, 2004).

2.6.1. Yorulma zorlamasının özelllikleri

Yorulma zorlanması esnasında yükün zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olduğundan, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilir. Birim zamandaki "çevrim sayısı" çok düşük veya malzemenin ısınmasına neden olacak kadar çok yüksek olmamak kaydıyla yorulma ömrünü önemli derecede etkilemez. Kuvvetin ve momentin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Yorulma zorlamasının iki hali için özel isimler verilmiştir. Kuvvet veya moment aynı büyüklükte, fakat biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasındaki değişiyorsa değişken zorlama ve malzeme dayanımı bakımından değişken yorulma dayanımı değeri söz konusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeri ile belirli bir değer sınırı arasında değişiyorsa dalgalı zorlama ve malzeme dayanımı olarak dalgalı yorulma dayanımı olarak ifade edilir. Yorulma zorlaması sadece dış kuvvetlerin değil, sıcaklık farkları nedeni ile oluşan iç kuvvetlerin etkilemesi şeklinde de görülebilir.

2.6.2. Yorulma zorlamalarında kırılma

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın, yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, dolayısıyla şekil değiştirme sürekli yön değiştirerek artma-azalma gösterir. Bu şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından tam elastik olarak karşılanabildikleri sürece tehlikeli değillerdir. Küçük kalıcı

şekil değiştirmeler de kırılma olmadan kristal kafesi tarafından taşınabilirler. Kalıcı şekil değiştirmeler kristal kafesin çarpılması ile değil, kafesin değişik bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi yoluyla oluşurlar. Kafes kısımlarının birbirlerine göre ötelemelerine kayma denir.

Yorulma zorlamaları sonucu meydan gelen kayma, tek yönlü zorlamalardaki gibi dislokasyonların oluşumu ve ilerlemesi ile açıklanmaktadır. Bu şekil değiştirme mekanizması, patlatılmış deney parçalarının yüzeyinde yorulma sınırına yakın zorlamalar altında kayma çizgileri oluşmasıyla görünür duruma gelebilir. Tek yönlü zorlamalarda olduğu gibi yorulma zorlamaları sırasında da pekleşme olayı görülür. Pekleşme sadece şekil değiştirmenin miktarına değil, ayrıca az da olsa frekansa bağlıdır. Yorulma zorlaması uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu kanıtlamıştır. Tekrarlanan şekil değiştirmeler kristal kafes tarafından sürekli olarak taşınamadığı için, yorulma zorlamasının pekleşme dışında hasar etkisi de bulunmaktadır. Kaymaların miktarına ve bir ölçüde de frekansa bağlı olarak belirli bir çevrim sayısından sonra ortaya çıkan hasara, malzeme yapısıyla ilgili olarak hangi olayların yol açtığı yeterince araştırılmış ve tatmin edici bir kuramsal açıklama yapılmamıştır. Bununla beraber x-ışını araştırmaları hasar başlangıç kademeleri hakkında bazı bilgiler sağlamış ve yorulma sırasında iç gerilmelerin meydana geldiğini göstermiştir. -180^{o}C sıcaklıkta çekme-basma değişken yükleri ile zorlanan deney parçalarında yapılan mikro yapı gözlemleri de, gittikçe artan ölçüde ikiz oluşumunun varlığını ortaya koymuştur.

Yapılan açıklamalar ışığında, yorulma zorlaması sırasında tekrarlanan kalıcı şekil değiştirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu, malzemenin ayrılma dayanımının aşıldığı noktalarda mikroskobik boyuttan da küçük çatlaklar oluşmaktadır. Zorlama sırasında dışarıdan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak mikro ve makro çatlak şeklinde birleşir ve sonunda bu çatlaklardan herhangi bir yorulma kırılmasına neden olur.

Hasar çok küçük ve sınırlı bir gölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden dışarıdan herhangi bir kalıcı şekil değiştirme görülmez ve bu nedenle yorulma kırılmaları şekil değiştirme meydana gelmez. Hasarın ilk oluştuğu nokta çoğunlukla yüzeyde veya yüzeyin hemen altındadır, ancak heterojenliklerin veya malzeme hatalarının durumuna göre malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısmında da bulunabilir.

2.6.3. Yorulma deneyleri

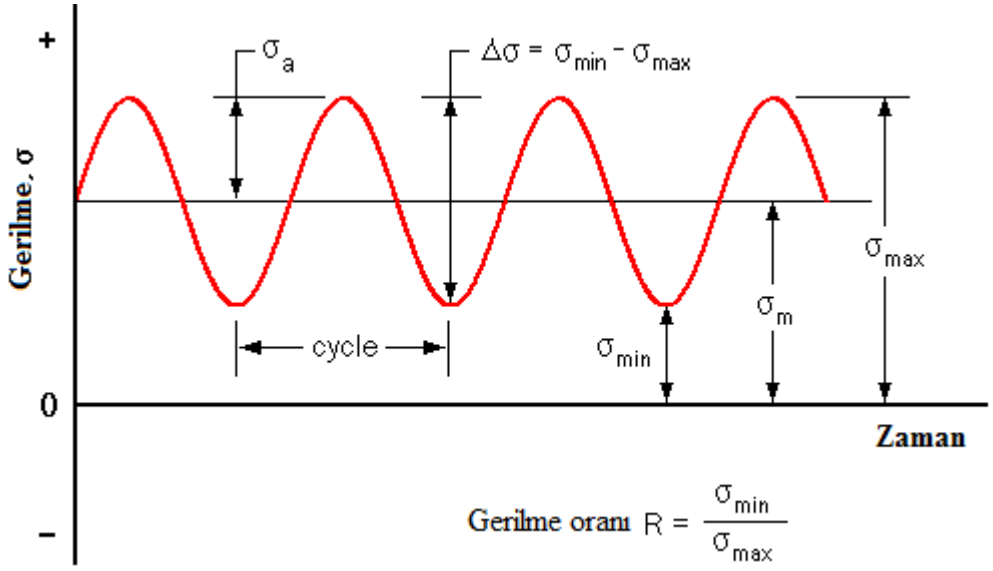
Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Fakat yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlanmalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek yorumlar yapılabilir.

Yorulma sebebiyle uygulanan yükler üç ana grupta incelenebilir; (a) sabit büyüklükte gerilme, (b) sabit büyüklükte şekil değişikliği, (c) rastgele veya sabit büyüklükte yükleme (Kayalı 1983). Deneyde kullanılan gerilme türü yorulma deneyine de adını vermektedir.

Yorulma deneyleri uygulanan yorulma hızlarına göre üç farklı grupta incelenmektedir. Bunlar; yüksek çevrim sayılı, düşük çevrim sayılı, çok yüksek hızlı yorulma deneyleridir. Genel itibariyle, uygulanan en büyük gerilme değeri malzemenin elastik sınırı altında ve yorulma ömrü yaklaşık 1.000 çevrim sayısından daha büyük ise bu tür yorulmaya yüksek çevrim sayılı yorulma denir. Uygulanan gerilme malzemenin elastik sınırının üzerinde ve 1.000 den daha düşük çevrim sayılarında hasar ortaya çıkıyorsa bu tür yorulmaya düşük çevrim sayılı yorulma denir. Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri, deney süresinin en aza indirmek, kompresör ve türbin kanatları gibi çok yüksek devirlerde çalışan elamanların denenmesini sağlamak amacıyla ve değişik çalışma hızlarının malzemenin yorulma dayanımları üzerindeki etkisini ortaya çıkarabilmek için uygulanmaktadır. Deneyin yüksek hızlı sayılabilmesi için çevrim sayısının değeri yükseltildikçe yorulma ömründe % 3 ila %13 arasında artışlar olduğu gözlemlenilmiştir (Kayalı 1983).

2.6.4. Tekrarlı yükleme gerilmeleri

Yorulma deneylerinde çoğunlukla sinüs dalgası şeklinde bir yükleme yapılır. Bu yükleme, deneylerin yapıldığı makinelerin dönen disk veya kütleler kullanmasından kaynaklanmaktadır. Tekrarlı tesir altında gerilmenin en büyük ve en küçük değerinin basınç veya çekme olması durumuna göre Şekil 2.5'de belirtilen haliyle üç farklı tekrar bölgesi düşünülebilir. Bunlardan ilki, kuvvetin negatif bir değerden negatif başka bir değere değiştiği bölgedir. Buna negatif tekrar bölgesi veya basma tekrar bölgesi denir (Dieter 1988).



Şekil 2.5 Yorulmada sinüzoidal yükleme

İkinci bölgedeki gerilme, çekme ile basma arasında değişmektedir. Buna da alternatif bölge denilmektedir. Üçüncü tekrar bölgesinde ise gerilme, pozitif bir değerden yine pozitif bir değere değişmektedir. Bu duruma pozitif tekrar bölgesi ya da çekme tekrar bölgesi denilmektedir. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç bünyesindeki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye ise yorulma ömrü denilmektedir. Aşağıda verilen denklemler yardımıyla yorulma matematiksel olarak ifade edilmektedir.

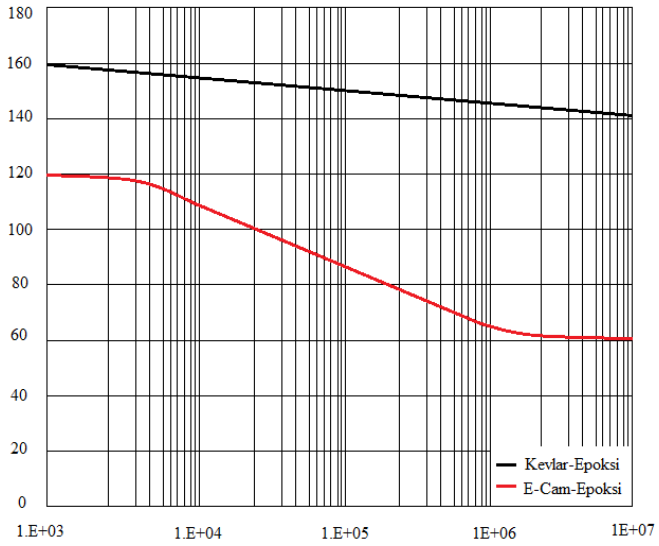
$$\sigma_r = \sigma_{maks} - \sigma_{\min}$$
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{\min}}{2}$$
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{\min}}{2} \qquad (4.1)$$
$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{maks}}$$

2.6.5. Gerilme-Çevrim Sayısı (S/N)

Yorulma ömrü, maksimum gerilme seviyesinde hasarın meydana geldiği çevrim sayısı olarka ifade edilir. Yorulma ömrünü tam olarak tanımlayabilmek için ortalama gerilme ya da gerilme oranına gerekmektedir. Yorulma ömrü; gerilmenin büyüklüğüne, gerilme oranına, yüklemenin durumuna, yükleme geçmişine ve çevre şartlarına bağlıdır.

Yorulma test grafiği, hasarın meydana geldiği çevrim sayısı logaritmik ölçekte yatay eksende, gerilme değerleri de düşey eksende olacak şekilde ve en az üç-beş farklı gerilme değerleri için çizilir. Bu gerilme değerlerinin en büyüğü, düşük çevrim sayılı yorulma için akma gerilmesi değerinin % 90 ve üzeri, uzun ömürlü yorulma için ise bu değerin altında olacak şekilde seçilir. Bu grafik S-N (Gerilme-Çevrim sayısı) eğrisi olarak tanımlanır. Malzemeye uygulanan gerilme oranlarına karşılık gelen, hasar çevrim sayıları kaydedilir. Bu noktalardan geçen eğrinin fonksiyonu; (S)=f(N) şeklinde ifade edilir. Burada uygulanan gerilme oranı (S), hasar çevrim sayısı (N)'nin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. S-N eğrisinin eğimi malzemenin yorulma direncini bir ölçütüdür (Gemi, 2004; Taşyurek, 2014).

2.6.6. Kompozit malzemelerde yorulma



Şekil 2.6 Epoksi matrisli kevlar ve E-cam kompozitlerin S-N diyagramı (Gemi 2004).

Şekil incelendiğinde S-N eğrisinin denklemi logaritmik ve üstel fonksiyon olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$S = \sigma_{tu}.(nLogN + b) \tag{2.1}$$

$$\frac{S}{\sigma_{tu}} N^{n} = b \tag{2.2}$$

E-cam epoksi kompozit malzemenin davranışı bir çok metal ile aynıdır ve düşük gerilme değerlerinde çok yüksek çevrim sayılarına çıkabilmektedir. Şekil 2.6'da iki ayrı kompozit malzemenin S-N diyagramı verilmiştir (Şahin, 2000).

2.7. Kırılma Mekaniği

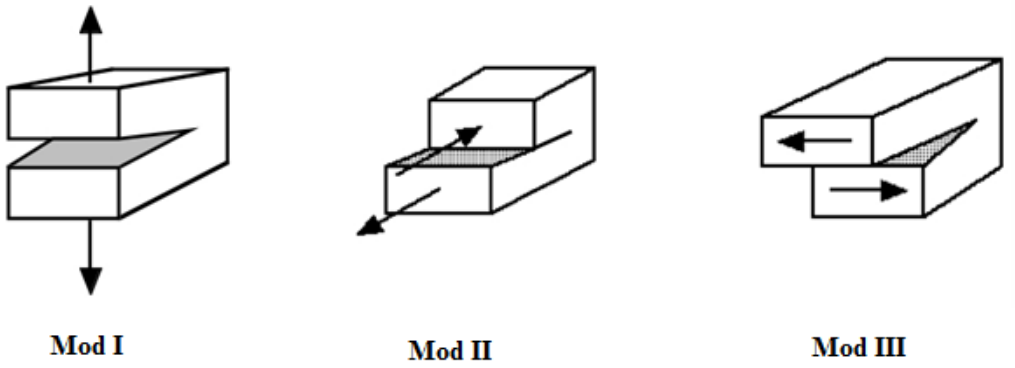
Kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu arttırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerini incelenmesidir. Makine ve kontrüksiyonlarda kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilmektedir. Malzemelerin üretimi sırasında çeşitli sebeplerden dolayı kılcal çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlakların etrafında gerilme konsantrasyonu oluşur ve kırılmaya sebep olur. Gerilme konsantrasyonu nedeniyle meydana gelen çatlaklar, kullanılan malzemenin akma gerilmesinden daha düşük gerilmelerde de olabilmektedir. Yapısında kılcal çatlaklar ve plastik deformasyona uğrayan iri boşluk ihtiva eden malzemeler genellikle gevrek kırılma gösterirler (Kayalı 1983). Çatlakların ilerleme davranışlarını belirleyen önemli iki husus vardır; bunlardan birisi uygulanan yük diğeri de ortam etkisidir. Bir malzemede uygulanan yükün çatlak düzlemine göre pozisyonuna bağlı olarak; ayrılma, kayma ve yırtılma şeklinde üç değişik hasar tipi görülebilir. Bunlar bir malzemede ayrı ayrı bulunabildiği gibi birlikte de oluşabilir. Yüzey çatlak ilerlemesi, malzemenin çalıştığı ortama, sıcaklığa ve gerilme durumuna bağlı olarak farklılık gösterir (Nishioka ve ark., 1995). Kırılma mekaniğinde kırılmayı etkiyen parametrelerden biri kırılma tokluğu yada gerilme şiddet faktörü(GŞF)dür. Gerilme şiddet faktörü K sembolü ile gösterilir. Gerilme şiddet faktörü çatlak etrafında gerilme alanı belirleyen parametre olup, geometrik hal, yükleme şekli, çatlak yeri ve oryantasyonuna göre değişiklik göstermektedir. Bu durumda malzemelerin kırılma tokluğunu, malzemede çatlak mevcut iken yük taşıma kapasitesi yada plastik deformasyona uğraması olarak ifade edilebilir. Malzeme tokluğu, düzlem gerilme şartlarında (K_c), düzlem deformasyon şartlarında ($K_{ıc}$) kritik gerilme şiddet faktörü ile tanımlandırılabilir. Bu davranışlar Lineer Elastik Kırılma mekaniğinde geçerlidir. Elastik-Plastik davranışlar için tokluk j-integrali, R-eğrisi ve çatlak ucu açılma miktarı cinsinden ifade edilmektedir (Arıkan, 2002). S maksimum yorulma gerilmesi, σ_{tu} ortalama statik mukavemet, n ve b malzemenin yorulma sabitleridir. Tek yönlü ve tek tabakalı bir kompozit yapıda üç farklı yorulma hasar tipi görülebilir. Bunlar, elyaf ayrılması, matris çatlaması ve elyaf kopmasıdır. Elyaflar yüksek rijitliğe sahip ise matris çatlaması daha az önem arz eder. Bunun sebebi elyaflar matrise aktarılacak olan şekil değiştirmeyi sınırlar. Eğer elyaf ve matris ara yüzeyi yeterince güçlü değilse elyaf matris ayrılması gözlemlenebilir. Çok

tabakalı malzemelerde belirtilen hasara ilaveten yorulma sonucu tabaka ayrılması gözlemlenebilir. Elyaf kopması olmadığı müddetçe kompozit malzemenin dayanımı fazla düşmez. Kompozit malzemelerin yorulma hasarı oluşumu safhaları ile, uygulanan gerilemeye bağlı olarak Şekil 4.3 de verilmiştir. Kompozit malzemelerde yorulma ömrü iki ayrı bölgede incelenmektedir. Bunlar çatlak oluşumu ve ilerlemesidir. Yüksek gerilme değerlerinde genellikle düşük çevrim sayılı yorulma meydana gelirken, bu şartlarda çatlak çabuk oluşur ve yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak ilerlemesi ile devam eder. Yüksek çevrim sayılı yorulmada çatlağın oluşması için daha fazla çevrim geçmesi gerekmektedir. Çatlak genellikle boşluk ve gerilme konsantrasyonunun daha fazla bulunma ihtimali olan yüzey bölgesine başlamaktadır. Kompozit malzemelerde matriste bulunabilecek süreksizler birer çatlak başlangıcı olabilir. Kayma gerilmesi sonucu meydana gelen çatlaklar kırılma yüzeyini ve çekilen enerjiyi arttırdıklarından dolayı yorulma ömrü üzerine pozitif bir etkiye sahiptirler. Ayrıca bu çatlaklar çatlağın körleşmesine de neden olmaktadırlar. Kayma çatlakları matris ve elyaf arasındaki farklı poisson oranından dolayı yorulma çatlağı boyunca oluşabilmektedirler. Eğer elyafların hasar şekil değiştirmesi matristen daha az ise elyaflar çatlak doğrultusunda hasara uğrayabilirler. Sünek elyafların gevrek matris bileşiminde matris önce hasara uğrayabilir. Elyaf açısının çatlak ilerlemesi üzerine etkisi büyüktür. Çatlak ilerlerken elyafa paralel doğrultuda çok az bir engelle karşılaşmaktadır. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı az olacağından dolayı çatlak elyafa paralel ilerlemektedir. Bundan dolayı çapraz katlı tabakalı kompozitlerde 0^o ve 90^o'lik tabakalar hem statik hem de değişken yüklemelerde ilk hasara uğrayan bölgelerdir. Enine tabakalardaki çatlaklar, tabakalar arası bölgede kayma çatlakları ve çatlak körleştirmesi sonucu durdurabilmektedir (Samancı 2004). Gerilme çevrim sayısı (S-N) eğrisi yorulma ömrünü ve toplam yorulma ömrünü oluşturan çatlak başlama ve çatlak ilerleme ömürlerini göstermektedir. Uygulanan değişken gerilmenin değeri arttıkça yorulma ömrü kısalır ve çatlağın daha az sürede başlamasına neden olur. Parçaların yüzey kısımlarında çatlaklar düzensizlikler olduğunda yorulma ömründeki çatlak başlaması için geçen zaman ortadan kalkar ve toplam yorulma ömrü kısalır. Kayma çatlakları ile oluşan, elyaf ve matris kırılmasını içeren kompozit malzemede yorulma çatlağının ilerlemesi boyunca birçok olay meydana gelmektedir. Kayma çatlakları teki başlarına çekme yükü ile yırtılmaya, matris çatlaması olmaksızın çatlak önü elyaf kırılmasına veya elyaf kırılması olmaksızın matris çatlamasına sebep olmaktadır. Şekil 4.4' de tek yönlü, tek ve çok tabakalı kompozitlerde meydana gelen çatlak ilerleme

biçimlerini göstermektedir. Çok tabakalı kompozitlerde elyaf açısı ve tabaka sınırları, yorulma çatlak ilerlemesinde önemli rol oynamaktadır.

2.7.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Elastik malzemelerde çatlağın gerilme analizlerini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağıl hareketlerini bilinmesi gerekmektedir (Irwin, 1957). Kompozit malzemede tabakalar arasındaki meydana gelen bu çatlak ilerleme davranışları üç farklı modlarda görülmektedir (Daniewicz ve ark., 2005). Farklı modlardaki çatlakların davranış modelleri Şekil 2.7'de verilmiştir.

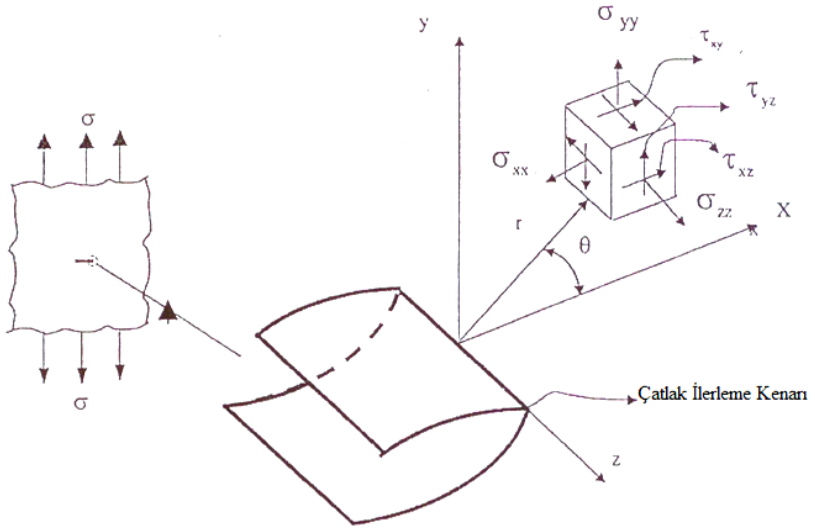


Şekil 2.7 Tabakalı kompozitlerde üç farklı modda çatlak ilerleme modları(Daniewicz ve ark., 2005).

Kırılma mekaniğinde çatlakların ilerleme davranışlarından Mod I en fazla görülen ve diğer modlara göre daha fazla kritik öneme sahip olan açılma modudur. Bu modda iki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılmaktadır. Mod II'de ise çatlak yüzeyleri x-z düzleminde zıt yönde ilerlemektedir ve kayma modülüdür. Mod III'de ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters ve simetrik olarak ilerlemektedir ve bu mod ise yırtılma modu olarak tanımlandırılmaktadır. İki kırılma yüzeyi birbirine göre eliptik çatlak ekseninde paralel yönde kaymaktadır. Irwin, izotropik malzemelerde çatlak ucu civarında gerilme deformasyonlarını bulmuştur ve çatak ucundaki gerilme şiddet faktörleri açılma modu, kayma modu ve yırtılma modu için aşağıda verilmiştir.

$$K_I, K_{II,} K_{III} \qquad K_{II} = \sigma_{II}\sqrt{\pi a} \qquad K_{III} = \sigma_{III}\sqrt{\pi a} \qquad (2.1)$$

Denklem 2.1'de verilen $K_I, K_{II,} K_{III}$ sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III gerilme şiddeti faktörleridir. Şekil 2.3'de Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemindeki şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.8 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme dağılımı (Arıkan 2002).

Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilmeler Mod I hali için aşağıdaki gibi formülüze edilebilir. Denklem 2.3'de bu denklemler verilmiştir.

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2})$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} Cos\frac{\theta}{2}(1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2})$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} (cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}) \qquad (2.3)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} (2\nu cos\frac{\theta}{2})$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

Şekil 2.8'deki gibi, açılan çatlağın şekil değiştirmeleri denklem 2.4'de verilmiştir. Denklemdeki ν, poisson oranını, σ_{xx} x eksenindeki gerilme değerini, σ_{yy} y eksenindeki gerilme değerini ve σ_{zz} z eksenindeki gerilme değerini ifade etmektedir. Daha öncede belirtildiği üzere K_I gerilme şiddet faktörünü, E elastisite modülünü ve θ ise r'nin x ekseninde yaptığı açıyı ifade ederken, u, v, w sembolleri sırasıyla x, y, z eksenlerindeki deplasmanları ifade etmektedir. Denklem 2.4, 2.5 ve 2.6 'de deplasmanlar verilmiştir (Irwin, 1962; Samancı, 2004).

$$u = \frac{K_I}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}(1+\nu)\left[(2k-1)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2}\right]$$
$$v = \frac{K_I}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}(1+\nu)\left[(2k-1)\sin\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2}\right] \quad (2.4)$$
$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E}$$

Düzlem gerilme hali için

$$\nu^* = \nu, \kappa = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \quad (2.5)$$

Düzlem şekil değiştirme hali için

$$\nu^* = 0, \kappa = 3-4\nu$$

Mod II için gerilmeler ise denklem 2.6'da verilmiştir.

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}}\sin\frac{\theta}{2}(2+\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2})$$
$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}}\sin\frac{\theta}{2}c\,\mathrm{os}\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2})$$
$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}}cos\frac{\theta}{2}(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}) \quad (2.6)$$
$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})$$
$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

Mod II durumu için deplasmanlar denklem 2.7'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$u = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}\sin\frac{\theta}{2}\left[2-2\cos^2\frac{\theta}{2}\right]$$
$$v = \frac{K_{II}}{E}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}\cos\frac{\theta}{2}\left[-1+2\nu+\sin^2\frac{\theta}{2}\right] \quad (2.7)$$
$$w = 0$$

Mod III durumu için gerilmelerin ve deplasmanların formülasyonları denklem 2.8'de verilmiştir.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0$$
$$\sigma_{yz} = \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}}c\,\mathrm{os}\frac{\theta}{2}$$
$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}}\sin\frac{\theta}{2} \quad (2.8)$$
$$u = v = 0$$
$$w = \frac{K_{III}}{E}\left[\frac{2r}{\pi}\right]^{1/2}\sin\frac{\theta}{2}$$

2.7.2. Elastik plastik kırılma mekaniği

Kırılma mekaniği hesapları çatlak ucundaki plastik şekil değişiminin küçük olduğu varsayımlarıyla elde edilmiştir. Çatlak ucunda büyük akama bölgelerinin ortaya çıkması ve böylece de plastik alanın yarıçapının, çatlak boyu ve numune ebatlarına oran küçük olmaması duruımlarında lineer elastik kırılma mekaniği kavramları geçerliliğini yitirmektedir (Pardun, 1998).

Belirli bir kritik yüklemeden sonra çatlak ilerlemeye başlar ve eğer büyük plastik bölgeler meydana gelmeye başladığında, lineer kırılma mekaniği kuramı geçerliliğini yitirir. Lineer elastik kırılma davranışını ifade eden K gerilme şiddet faktörü ve kırılma kavramları önemini kaybetmektedir. Böyle durumlarda daha büyük alanlarda ortaya çıkan ve plastik deformasyon davranışlarını içeren parametre ve kavramlar dikkate alınmalıdır. Bu durumda elastik-plastik kırılma mekaniğinde çatlak ucu durumunun karakterize eden iki parametre öne sunulmaktadır. Bunlardan biri, deformasyon yada gerilme yoğunlaşması faktörünü kullanan J-integrali ve diğeri ise çatlak ucundaki deformasyon durumu için ölçü olan çatlak ucu açılma miktarıdır (Gross ve Seeling, 2001).

2.7.3. Eliptik yüzey çatlağı analizi

Kırılma mekaniğinin önemli yönü, gerilme altında malzemelerdeki çatlak ve gerilme konsantrasyonunu arttırıcı faktörleri ele almasıdır. Makine ve yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin çoğunda imalat sırasında görünebilir veya kılcal çatlaklar meydana gelebilmektedir. Yapısında bu kılcal çatlaklar ve deformasyona uğrayan iri inkulizyon ihtiva eden malzemeler genellikle ortam şartlarında ve uygulanan yükleme hızına da bağlı olarak gevrek davranışlar sergilemektedirler (Kayalı 1983).

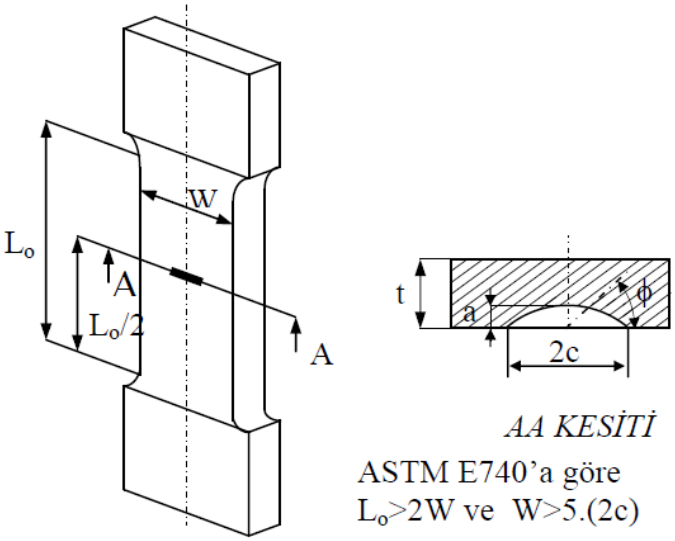
Kırılma mekaniğinin geliştiği dönemlerde çatlak ucu gerilme bölgesi ile ilgili yapılan çalışmalar genel itibariyle üç boyutlu çatlak problemlerini içerdiğini göstermektedir. Bakım ve servis durumlarında görülen en yaygın çatlak tipinin yüzey çatlağı olmuştur. Yüzey çatlağı içeren makine ve yapı elemanlarında çatlak kinetiğinin doğru olarak tespit edilmesi gerekmektedir.

Bir levhada yüzey çatlağından dolayı oluşan gerilme şiddet faktörleri levhanın kalınlığına, levhanın genişliğine, çatlak derinlik ve uzunluğa bağlı olduğu gibi, çatlak kenarını süpüren merkez açısına da bağlıdır. Çatlak ilerlemesi hem çatlak boyunca hemde çatlak derinliğince oluşmaktadır. Çekme yük altındaki izotropik malzemelerde

yarı eliptik bir çatlağın, ilerlemesi de yarı eliptik olarak kabul edilmektedir (Gürol ve Avcı, 2009).

Rice (1968), izotropik malzemelerin yüzey çatlakları için gerilme şiddet faktörü bağıntılarını Irwin, Paris ve Sin çalışmaları doğrultusuda elde etmişlerdir. Fakat anizotropik özelliğe sahip kompozitler için herhangi bir yaklaşım mevcut değildir.

Şekil 2.9'de ASTM E740 standartlarına uygun olarak hazırlanmış bir levha üzerine çatlak uzunluğu $2c$, çatlak derinliği a olan yarı eliptik bir çatlak açılmış olan numuneye y yönünde uygulanan dinamik çekme yükü tesirinde çatlak etrafında Mod I gerilme şiddeti faktörü meydana gelmektedir. Uygulanan gerilme σ nominal gerilme, a ve $2c$ çatlak boyutları, ϕ açısı ise karakteristik bir açıdır.



Şekil 2.9 Eliptik yüzey çatlağı numunesi (Önal ve Avcı 2009).

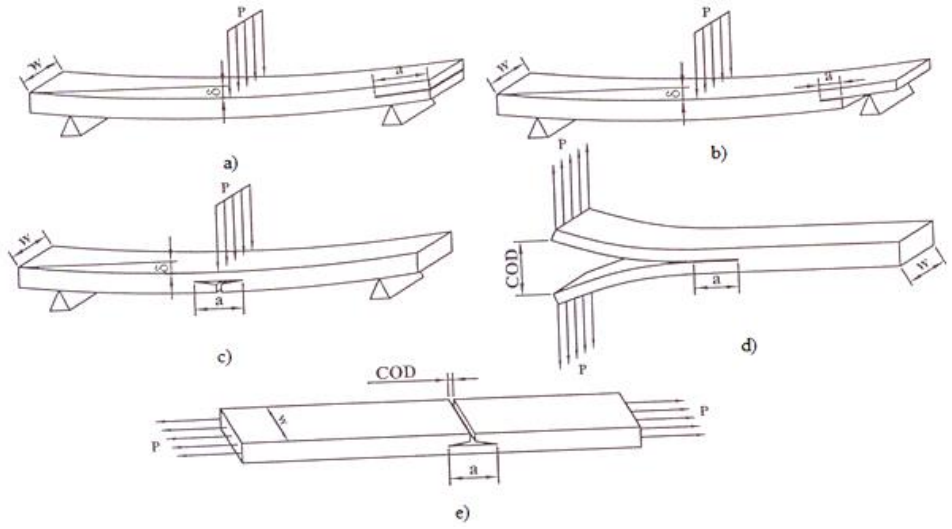
2.7.4. Şekil değiştirme enerjisi boşaltma hızının deneysel olarak belirlenmesi

Şekil değiştirme enerjisi boşaltma hızı G'nin bulunması için değişik test metotları geliştirilmiştir. Değişik yükleme tipleri için yaygın olarak kullanılan test metotları ve numune tipleri geliştirilmiştir (Martin and Murri, 1990). Bunlardan tabakalar arası kayma testinde farklı uygulamalar mevcuttur. Bunlar ise aşağıda sırasıyla verilmiştir.

Ucu çatlaklı eğilme testi, numune geometrisi Şekil 2.10.a'da, verilmiştir. Ortası çatlaklı eğilme testi, numune geometrisi Şekil 2.10.b'de verilmiştir. Mod II yüklemesine maruz, tabakaların birbiri üzerinde kaymaya zorlandığı yükleme durumlarında özellikle tabakalar arası bağ kuvveti tayininde kullanılmaktadır. Yine

Mod I ve Mod II'nin birlikte olduğu yükleme durumu için, numune geometrisi Şekil 2.10.b'de gösterilmiştir.

Tabaka ayrılma testi, numune geometrisi Şekil 2.10.d'de gösterildiği gibidir. Mod I yüklemesine maruz kalan tabakaların açılmaya zorlandığı yükleme durumlarında özellikle tabakalar arası bağ kuvveti tayininde ve yapıştırıcılar için bir ölçü olarak kullanılmaktadır. Çekme tabaka ayrılması testinde numune geometrisi Şekil 2.10' de verilmiştir. Bu numune Mod II yüklemesine maruz, tabakaların birbiri üzerinde çekme kuvveti neticesinde, zıt yönde kaymaya zorlandığı yükleme durumlarında kullanılmaktadır. Eliptik yüzey çatlaklı serbest uçlu iç basınca maruz kompozit boruların, yorulma testinde oluşan Mod II durumunu, belirtilen varsayımlar kabul edilirse, Şekil 2.10.e'de verilen çekme tabaka ayrılması test numunesinin en iyi temsil etmektedir. Buna göre yapılan kabuller aşağıda maddeler halinde verilmiştir.



Şekil 2.8 Şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı test metotları ve numune geometrileri (Samancı 2004). a)Ucu çatlaklı eğilme testi, b) Mod I ve Mod II'nin birlikte olduğu yükleme durumu, c) Ortası çatlaklı eğilme testi d) Tabaka ayrılması testi, e) Çekme tabaka ayrılması testi.

- ✓ Eliptik yüzey çatlak genişliği olan 2c mesafesinini numune genişliği olan w olarak alındığı,
- ✓ Tüm boruların ortasından genişliği w=2c olan bir dairesel halka çıkartıldığı,
- ✓ Bu halkanın çatlağın arka kısmından açılarak düzlem levha haline getirildiği,
- ✓ Eliptik yüzey çatlağının, eliptik kısmının düz alındğı,
- ✓ $\pm$ Sarım açısının etkisinin yok sayıldığı
- ✓ Açık uçlu iç basınçtan dolayı sadece teğetsel doğrultuda meydana gelen çekme kuvvetlerinin de düzlemsel kabul edildiği,

P yükünün yapmış olduğu u deplasmanı yerine çatlak açılma miktarı (COD) değerlerinin alınabileceği varsay

3. MATERYAL VE YÖNTEM

SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız $[\pm 55^o]_6$ BTP filaman sarım kompozit boruların üretim aşamalarına geçilmeden önce en iyi mekanik özellikleri ve kırılma tokluğunu sağlayan optimum % ağırlıkça SiO_2 nanopartikül katkı oranı tespit edilmelidir. Bu bağlamda, epoksi matris içerisine literatürden alınan bilgiler doğrultusunda ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve 5 katkı oranlarında SiO_2 nanopartikül katılarak ASTM standartlarında göre çekme deneyleri yapmış, Mod I kırılma tokluğu tespiti için tek kenar çentikli üç nokta eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül ve epoksi matris arasındaki kimyasal etkileşimin tespiti için FTIR analizi yapılmıştır. Kırılma yüzey analizleri ve oluşan kırılma mekanizmaların yorumlarına yardımcı olması maksadıyla SEM mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen test sonuçları ve bunların yorumlarının literatür desteğiyle birlikte, $[\pm 55^o]_6$ filaman sarım kompozit borulara katılacak en uygun ağırlıkça % SiO_2 nano-partikül katkı oranı bulunmuştur.

En uygun ağırlıkça % SiO_2 nanopartikül katkı oranı tespitinden sonra nanopartikül katkılı ve katkısız $\pm 55^o$ BTP filaman sarım kompozit boruların üretimine geçilmiştir. Üretilen kompozit borulara çatlaklı ve çatlaksız olmak üzere bir dizi deneyler uygulanmıştır. Uygulanan bu deneyler;

- Yakma deneyleri
- Boşluk içeriği deneyleri
- Serbest uçlu statik iç basınç deneyleri
- Halka çekme deneyleri
- Yorulma deneyleri
- Hasar Analizleri
- SEM Analizleridir

3.1. SiO_2/Epoksi Nano Kompozitleri Üretimi

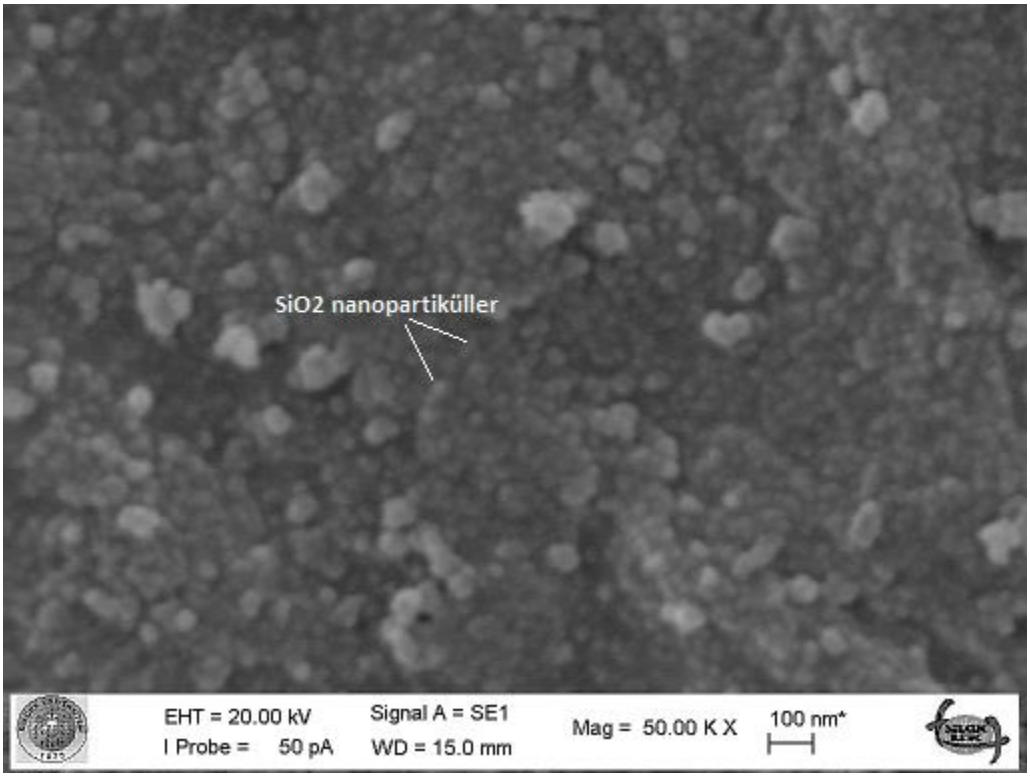
3.1.1. SiO_2 nanopartiküller

Yapılan tez çalışmada kullanılan SiO_2 nanopartiküller, MKnano Kanada şirketinden, hazır silan ile yüzey modifikasyonu uygulanmış şekilde temin edilmiştir. SiO_2 nanopartiküller ortalama 15nm çaplarında olup, küresel ve yüzeyleri gözenekli bir

yapıya sahip ve 650 g/m^2 yüksek özgül yüzey alanına sahiptirler. Nanopartiküllerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Selçuk Ünivesitesi İleri Ar-Ge Merkezinde yapılan SEM analizleri neticesinde elde edilen SiO_2 nanopartiküllerin 100nm ölçekli SEM görüntüleri Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. SiO_2 nanopartiküllerin fiziksel Özellikleri

Saflık Yüzdesi	%99.5
Kaynama Noktası	2300 ^oC
Erime Noktası	1610-1728 ^oC
Özgül Yüzey Alanı	650 g/m^2
Kristal yapısı	Düzensiz (Amorphous)
Morfolojisi	Küresel, Gözenekli
Ortalama Partikül Boyutu	15 nm
Görünüm Rengi	Beyaz
Yoğunluk	2.2-2.6 gr/cm^3
Yüzey Modifikasyonu	Silanlama



Şekil 3.1. 100 nm ölçekte SiO_2 nanopartiküllerin SEM görüntüsü.

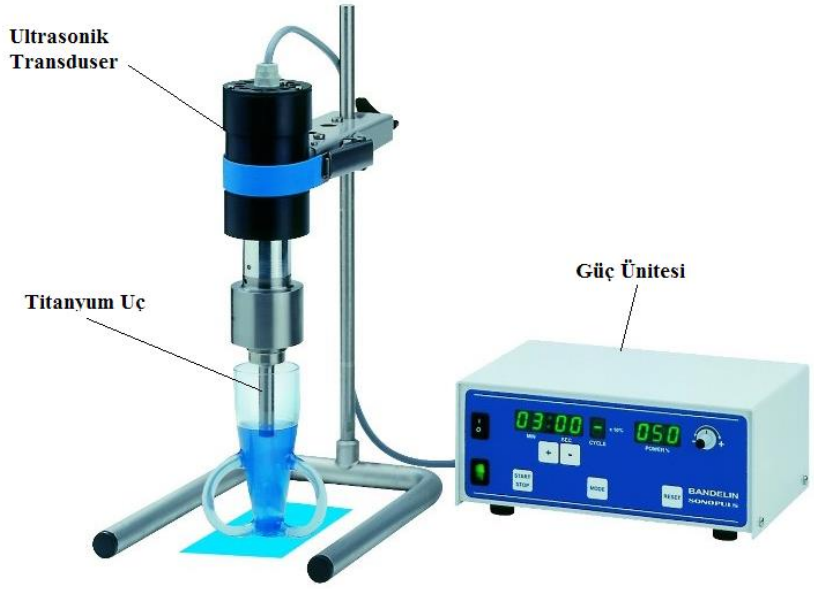
3.1.2. SiO_2 nanopartikülleri matris içerisinde dağılımı

SiO_2 nanopartiküllerin matris malzeme içerisinde dağılımlarını sağlamak için birçok karıştırma yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler, mekanik karıştırma, sıvı içerisinde ultrasonik banyo ile ultrasonik karıştırma, metal bir uçlu sonikatör vasıtasıyla ultrasonik karıştırma ve kimyasal bir karıştırma yöntemi olan Sol-Gel yöntemleridir. Kimyasal nanopartikül dağıtma yöntemi olan Sol-Gel tekniğini ise Manjunatha ve ark. (2010), Zeng ve ark.(2006) ve Deng ve ark. (2007) çalışmalarında kullanmışlardır. Ajaj ve ark. (2013) SiO_2 nanopartiküllerin matris içerisinde dağılımını sağlamak için 120 dk mekanik karıştırma yöntemi uygularlarken, Kim ve ark. (2009) mekanik karıştırma işlemini 60 dk olarak belirlemişlerdir. Adachi ve ark.(2008) ise SiO_2 nanopartiküllerin mekanik karıştırma işlemini 30 dk ile sınırlamışlardır. Zheng ve ark. (2003) SiO_2 nanopartiküllere 20 dk ultrasonik banyoda karıştırma işlemi uygulamışlardır. Chen ve ark. (2009) aynı karışım metodu ile süreyi 120 dakikaya çıkarmışlardır. Sol-gel karıştırma yöntemi dışında literatürde karıştırma proseslerinin bir arada kullanımı geniş bir yer kaplamaktadır. Yu ve ark. (2012) SiO_2 nano-partiküllere 60 dk mekanik karıştırma işlemi uyguladıktan sonra 20 dk ultrasonik banyoda, ultrasonik matris içerisinde karıştırmaya nano-partiküller maruz bırakılmıştır. Su ve ark. (2007), mekanik ve ultrasonik banyoda karıştırma işlemini 10 dk ile kısıtlamışlardır. Zhang ve ark. (2008) SiO_2 nanopartiküllere epoksi matris içerisinde 30 dk mekanik karıştırma işlemi uygulamış daha sonra metal uçlu sonikatör cihazı ile 30 dk ultrasonik karıştırma işlemini yerine getirmiştir. Muhammed ve ark.(2012) nanopartiküllere 15 dk mekanik karıştırma ve 4 dk ise metal uçlu sonikatör cihazı ile ultrasonik karıştırma işlemi yapmıştır. Tzetzis ve ark.(2013) başka bir karıştırma prosesine ihtiyaç duymadan sadece metal uçlu sonikatör ile 5 dk karıştırma işlemini nano-partikülere uygulamıştır.

Metal uçlu sonikatör cihazı ile yapılan ultrasonik karıştırma kolay uygulanabilirlik sağlayan, pratik ve etkili bir yöntemdir. Dolayısıyla BTP filaman sarım kompozit borulara SiO_2 nanopartikül katkısına olanak sağlaması çalışmalarımızda bu yöntemin kullanılmasında tercih sebebimiz olmuştur (Arabli, 2013; Taşyürek, 2014). Tez çalışmamızda ultrasonik karıştırma işlemi için Bandalin HD 2200 marka sonikatör cihazı kullanılmıştır.

SiO_2 nanopartiküllere ultrasonikasyon işlemi esnasında, basınç dalgaları sıvı reçine içerisinde yayılır. Bu yayılma esnasında yüksek ve düşük alçak basınç bölgeleri

oluşturmaktadır. Düşük basınç bölgelerinde, yüksek şiddetli ses dalgaları küçük vakum boşluklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu boşluklar kritik hacme ulaştıklarında fazla enerji yutamazlar ve yüksek basınç bölgelerinde sesli patlarlar. Bu olay ultrasonik kavitasyon olarak adlandırılmaktadır. Bu patlamalar ile yüksek sıcaklık ve basınç açığa çıkmaktadır. Bu patlamalar aynı zamanda yüksek hızlı sıvı jetlerininde oluşumuna neden olurlar. Bu sıvı jet akımlarının yeteri kadar enerji sahip olduklarında SiO_2 nano partikülleri bir arada tutan çekim kuvvetlerini yenmesini ve matris içerisine iyi bir dağılım sağlayabilmektedir. (Suslick 1990, Hasan 2013).



Şekil 3.2 Metal uçlu Bandalin HD 2220 sonikatör (Taşyürek 2014, Hasan 2013).

Bu yöntem ile yapılan dağıtımın amacı SiO_2 nanopartiküllerin birbirleri ile olan çekim kuvvetlerini yenerek kümeleşme oluşturmadan mümkün olduğunca homojen olarak epoksi reçine içerisinde dağıtmaktır.

Son yıllarda nanopartiküllerin özgül yüzey alanlarının nano partiküllerin % katkı oranlarının belirlenmesinde oldukça etkin faktörlerden biri olduğu literatür çalışmalarında belirtilmektedir. Tzetsiz ve ark. (2012) yüksek özgül yüzey alanına sahip SiO_2 nano-partiküllerin %1-5 katkı oranları aralıklarında nanokompozitlerin mekanik özelliklerini arttığını çalışmalarında söz etmişlerdir. Phanthommacha ve ark. (2012) yüksek özgül yüzey alanına sahip SiO_2 nanopartiküllerin epoksi matris içerisine %1-4 katkı oranlarında ilave edildiğinde mekanik özelliklerde artış sergilediğini çalışmalarında rapor etmişlerdir. Yapılan literatür çalışmaları göz önüne alındığında tez çalışmasında kullanılan SiO_2 nanopartiküllerin 650 g/m^2 gibi yüksek özgül yüzey

alanlarına sahip olması, en uygun % SiO_2 nanopartikül katkı oranının belirlenmesinde %1-5 katkı oranı aralıklarında nanokompozit üretimine ve mekanik testlerin uygulanmasına bizi sevk etmiştir.

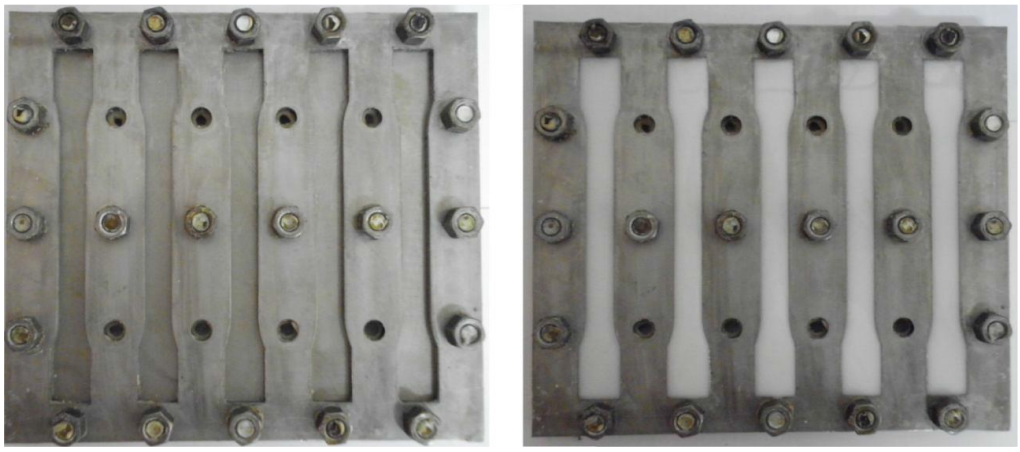
Karıştırmanın ilk aşamasında ağırlıkça %1,%2,%3,%4 ve %5 katkı oranları hassas terazi vasıtasıyla tartılmış ve beher içerisine konulan orta viskoziteli DGEBA epoksinin içerisine katılmış ve 10 dk mekanik karıştırma ile harmanlama işlemi tamamlanmıştır (Su ve ark., 2007). Daha sonra metal uçlu sonikatör yardımıyla 15 dk ultrasonik karıştırma prosesi uygunlamıştır (Taşyürek, 2014). Karıştırma işlemi bittikten sonra sıcaklığı yükselen karışıma sertleştirici ilave etmeden önce karışımın oda sıcaklığına düşmesi için soğutma işlemi yapılmıştır. Karışımın oda sıcaklığına düşürmek için su banyosu ve fan kullanılmıştır (Hasan, 2013). Karıştırmanın üçüncü aşamasında ise hassas terazide epoksinin ağırlıkça %40 oranında sertleştirici ilave edilmiştir. Sertleştiricinin karışıma ilavesinden sonra mekanik karıştırıcı vasıtasıyla 5 dk mekanik karıştırma işlemi yapılmıştır. Son olarak 20^oC'de 0.6 bar vakum altında 10 dk gaz giderme işlemi yapıldıktan sonra ASTM standartlara göre hazırlanan çekme ve tek kenar çatlaklı üç nokta eğme metal kalıplarına dökülmeye hazır hale getirilmiştir.

3.1.3. SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin üretimi

Ağırlıkça %0, %1, %2, %3, %4 ve %5 katkı oranlarında SiO_2 nanopartiküllerin epoksi reçine içerisine katkısı ile elde edilen nano kompozit karışımlar ASTM D 638 - 13 çekme kalıplarına ve ASTM D 5045-99 üç nokta eğme standartlarına göre hazırlanan kalıplara dökülmeye hazır hale getirildi. Nano kompozitlerin kalıplardan kolay ayrılabilmeleri için kalıplara QZ-13 kalıp ayırıcısı sürüldü. Tüm bu ön hazırlık işlemleri bittikten sonra karışım kalıplara döküldü. Kalıplara dökülen nano kompozitlere etüv fırınında 1 saat 90 ^oC ön kürleme işlemi yapıldı. Daha sonra 2 saat 120^oC'de son kürleme işlemi yapılarak fırın içerisinde soğumaya bırakılarak oda sıcaklığında ısıl dengeye gelmesi sağlandı. Numunelerin fırın ortamında yavaş soğumaya bırakılmasıyla oluşabilecek kalıntı gerilmelerin minimuma indirilmesi amaçlanmıştır (Hasan, 2013).

Şekil 3.3'de polimerik çekme dayanımlarının tespiti için numunelerinin üretilmesinde kullanılan kalıplar verilmiştir. Çekme kalıpları yaklaşık 4 mm kalınlığında olup, numuneler 800 ve 1000 grid zımparalar ile Metkon polisaj cihazı yardımıyla 3.2 ± 0.4 mm standart kalınlık ölçülerine getirildi. Böylece, kürleme sonrası

nano kompozit numunelerde çekme paylarından kaynaklanan kalınlık ölçülerinde meydana gelen farklılıklar giderilmiş oldu.



Şekil 3.3 ASTM D 638-13 Polimer çekme numunesi kalıbı (Hasan, 2013).

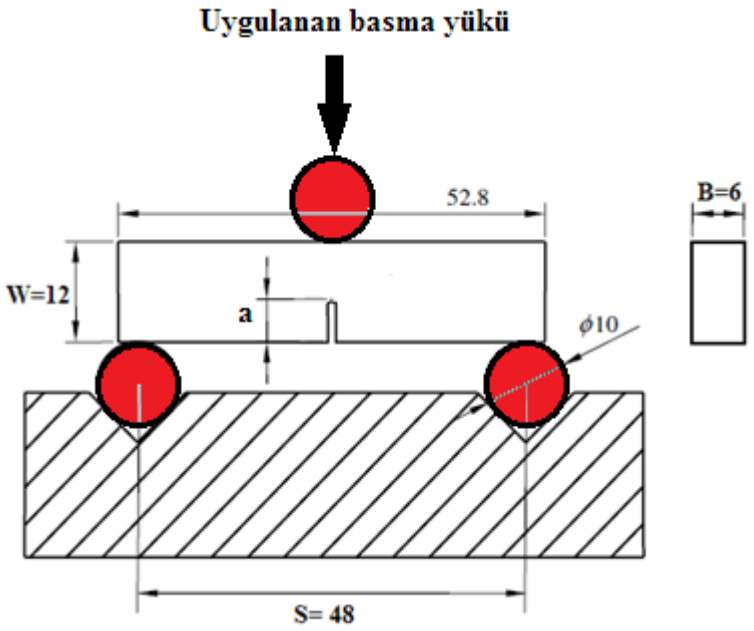
3.2. SiO_2/Epoksi Nanokompozitlerin Çekme Deneyleri

SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımı özelliklerinin tespiti ve BTP filaman sarım borulara en uygun % katkı oranını belirlemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri ASTM D638-13 standardına göre 10000N çekme ve basma kapasitesine sahip SHIMADZU plastik çekme test cihazında 2mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi öncesi numunelerin çekme cihazının numune tutma aparatlarına zımpara kağıt bağlanarak numunelerin çekme testi esnasında kaymasının ve tutma aparatları ağzında numunelerin kırılmalarının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Çekme deneyi neticesinde, %0-5 katkı oranları aralıklarındaki SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımları ve % şekil değişimleri tespit edilmiştir.

3.3. SiO_2/Epoksi Nanokompozitlerin Kırılma Tokluğu Deneyleri

SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin Mod I kırılma tokluğu tespiti için tek kenar çentikli üç nokta eğme deneyleri ise ASTM D5045-99 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Tek kenar çentikli üç nokta eğme deneyleri ile %0-5 katkı oranlarındaki nanokompozitlerin Mod I kırılma toklukları ASTM D5045-99 standardına göre aşağıda verilen denklem 3.1, 3.2 ve 3.3’ e göre hesaplanılmıştır. Çentik ince uçlu testere ile açılmış, daha sonra bistürü ile ön çatlak oluşturulmuştur. Şekil 3.4’ deki şema

resminde gösterildiği gibi 2mm/dk hızında basma kuvveti uygulanarak tek kenar çentikli üç nokta eğme deneyi yapılmıştır.



Şekil 3.4 Mod I kırılma tokluğu tespiti için tek kenar çentikli üç nokta eğme deney şeması.

ASTM D5045 standardına göre Şekil 3.4' da gösterildiği gibi S mesnetler arası mesafe, W numune kalınlığı, B ise numune genişliği ve a ise çatlak derinliğidir. Mesnetler arası mesafe numune kalınlığının 4 katı olmalıdır (S=4W). Numene genişliği ise numune kalınlığının 2 katı olmalıdır (W=2B). Çatlak derinliğinin numune kalınlığı oranın (a/W) 0.45≤a/W≤0.55 olması standart tarafından tavsiye edilmektedir. Bu çalışmamızda a/W oranı 0.45 olarak alınmıştır.

$$Kıc = \left(\frac{SP_c}{BW^{3/2}} \right) \times f(x) \tag{3.1}$$

$$f(x) = \frac{3x^{1/2}\left\{1,99 - x(1-x)(2,15 - 3,93x + 2,7x^2)\right\}}{2(1+2x)(1-x)^{3/2}} \tag{3.2}$$

$$x = \frac{a}{W} \tag{3.3}$$

3.4. SiO_2 Nanopartikül Katkılı ve Katkısız BTP Kompozit Boruların Üretimi

SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit borular İZOREEL kompozit İzole Malzemeler San. Ve Tic. Ltd. Şti firmasında imal edilmiştir. Filaman sarım BTP boruların imalinde 11-13 µm elyaf çapı aralıklarında İzoreel firmasında mevcut olan Kamenny Vek Advanced Basalt Fiber 12KV 400 tex basalt elyaflar kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak Ciba Geigy DGEBA orta viskoziteli epoksi kullanılmıştır. Epoksinin kürleşmesini sağlamak için ağırlıkça %44 oranında sertleştirici madde karıştırılmıştır. Kullanılan sertleştiriciden SiO_2 nanopartiküllerin olumsuz bir etkileşim halinde olmadığı kabul edilmiştir. Filaman sarım metodunda yaş sarım metodu kullanılmıştır. Sarım işlemi başlamadan önce mandreller 60^oC ye ısıtılmış ve mandrellerin üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme sürülmüştür. Burada kullanılan kalıp ayırıcı filaman sarım işlemi gerçekleştirildikten sonra kürlenen kompozitlerin mandrellerden kolay çıkartılmasını sağlamaktır. Basalt elyafların sarım işlemlerini kolay gerçekleştirmek ve elyafların ıslatılabilirliklerini arttırmak için epoksi reçine banyosu 60^oC sıcaklığa çıkartılmakta ve bu sıcaklık altında kontrol altında tutulmaktadır.



Şekil 3.5 CNC filaman sarım makinesi

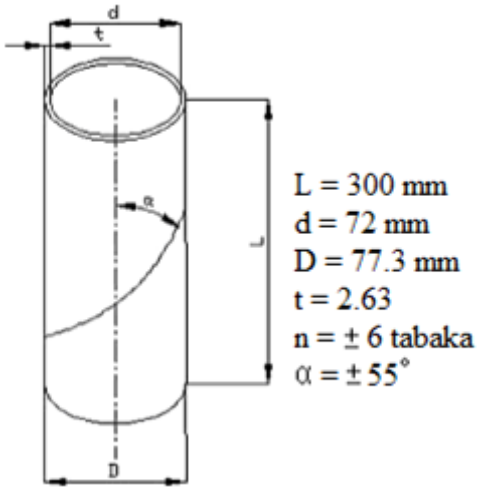
Şekil 3.5'de resmi verilen CNC filaman sarım makinesinin programlama paneline; sarım açısı, ± tabaka sayısı, sarım hızı, elyaf gerginliği, elyaf bant genişliği

gibi parametreler girildikten sonra sarım işlemi başlatılmıştır. Filaman sarım imalatında üretim parametreleri sarım açısı ±55º, tabaka sayısı ± 6, sarım hızı 600mm/dk, elyaf gerginliği 10N ve elyaf bant genişliği 11mm'dir(Demirci ve ark. 2014). Dönen disk vasıtasıyla bazalt elyaf demetleri 60ºC'e kadar ısıtılan reçine banyosunda ıslatılarak, reçine banyosu üzerinde bulunan iki dönen tambur arasından geçmektedir (Şekil 3.6). Bu dönen tamburlar arasından geçen bazalt elyaf demetleri 72 mm kalınlığı ve 1000 mm uzunluğa sahip olan mandrel üzerine ±55º sarım açısında sarılma işlemi gerçekleştirilmiştir. CNC filaman sarım makinesi, sarım tabakası ±6'a ulaşınca otomatik olarak durmakta ve sarım gerçekleştirilen 1000mm uzunluğundaki ıslak kompozit kürleme işlemine hazır hale getirilmektedir.



Şekil 3.6 Reçine banyosunda ıslatılan elyaf demetleri

Kürleme prosesinin amacı, ıslak halde bulunan filaman sarım kompozit borunun katılaşması ve sertleşmesini sağlamaktır. Kürleme prosesinde kompozit numunelerin fırın içerisinde reçinenin akmasını önlemek için sürekli olarak döndürülmektedir. Kürleme prosesi 3 saat 135ºC'de ön kürleme ve 3 saat 150ºC'de son kürleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Kürleme prosesi bittikten sonra kompozit borular çekme aparatı yardımı ile mandrellerden çıkartılmış ve 300mm uzunluklarda kesilerek deney numuneleri ölçülerine getirilmiştir. Hazır hale getirilen deney numunelerinin şematik resmi Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 BTP filaman sarım deney numunelerinin şematik resmi (Samancı 2004).

SiO_2 nanopartikül filaman sarım boruların imalatında ise yine yukarıda belirtilen aynı prosesler uygulanmıştır. Fakat filaman sarım boruların üretiminde önce Şekil 3.8'de gözlemlenildiği gibi matris malzemenin içerisine takviye edilen SiO_2 nanopartiküllerin karıştırma prosesi uygulanmıştır. Daha önce yapılan deneyler neticesinde belirlenen optimum ağırlıkça % 4 SiO_2 nanopartiküller Bandalin HD 2220 sonikatör vasıtasıyla epoksi reçine katıllmıştır.



Şekil 3.8 SiO_2 nanopartiküllerin ultrasonik karıştırma prosesi.

SiO_2 nanopartiküller 1000 ml beher içerisinde sonikatör vasıtasıyla 20 dk karıştırıldıktan sonra karışımın soğuması sağlanarak çevre sıcaklığına getirilmiştir. Daha sonra sertleştirici ilave edilmiş ve 5 dk mekanik karıştırma işlemi yapılarak

hazırlanan karışım CNC filaman sarım makinesinin reçine banyosuna katılmıştır. Daha sonra belirtilen koşullarda SiO_2 nanopartikül takviyeli BTP kompozit boruların üretimi Şekil 3.9'da gösterildiği gibi üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9 SiO_2 nanopartikül takviyeli BTP filaman sarım boruların üretimi.

3.5. Yakma Deneyi

Yakma deneyinde matris malzemenin polimer-matris kompozit numunenin yakılması neticesinde elyaf ve matris oranları tayin edilmektedir. Yakma testi ile aynı zamanda elyaf matris hacimsel elyaf oranının belirlenmesinde de kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada, elyaf hacim oranının belirlenmesi için yakma deneyleri ASTM D 2584-11'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yakma deneyi kompozit numuneler öncelikle hassas terazide tartılmaktadır. Daha sonra belirli bir sıcaklığa kadar matriks malzeme uçucu maddeye dönüşene kadar ısıtılmaktadır. Sonra kalan elyaflar tartılmakta ve kayıp yüzde hesaplanmaktadır. Elyaf yoğunluğu ve kompozit yoğunluğu faktörleri göz önüne alınarak elyaf hacim oranı hesap edilmektedir. Gerçekleştirilen yakma deneyinde ±55^o BTP filaman sarım açısına sahip olan borulardan ASTM D-2584-11 standartdına göre 50 mm uzunluğunda üçer adet yakma numuneleri kesilmiş ve hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Halka numunelerin iç çap, dış çap ve yükseklik değerlerinden hacim hesabı yapılarak yoğunluk hesaplanmıştır. Numuneler 600^{o}C sıcaklığındaki fırında 20^{o}C/dk'lık ısıtma hızı ile epoksi reçine tamamen yanıp

uzaklaşana kadar yakma deneyine devam edilmiştir. Yakma deneyi esnasında bazalt elyaflar hiçbir fiziksel değişikliğe uğramamaktadır. Yakma işlemi sonrası kalan elyafların ağırlıkları hassas terazide tekrar tartılmıştır. Yakma deneyi sonrası, nano-partikül takviyeli ve takviyesiz kompozit boruların resmi Şekil 3.10'da verilmiştir.
Elde edilen tüm veriler aşağıda verilen formül ile hesaplanarak elyaf hacim oranı tespit edilmiştir.

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \tag{3.4}$$

Burada W_f elyafın, W_c kompozitin kütlesi ve ρ_f elyafın, ρ_c kompozitin yoğunluğudur.



Şekil 3.10 SiO_2 nanopartikül takviyeli ve takviyesiz BTP filaman Sarım kompozit numunelerin yakma deneyi sonrası görüntüleri.

3.6. Boşluk İçeriği

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretim ve kürleme esnasında oluşabilecek boşluk içeriğinin tespiti için ASTM D2734-09 standardı kullanılmaktadır. ASTM D2734-09 standardına göre elyaf takviyeli kompozitlerdeki boşluk tayini için öncelikle teorik yoğunluk hesaplanmış ve deney prosedürü Metot C'ye göre ağırlık ve hacim ölçümlerinden faydalanılarak ölçülen yoğunluk hesaplanmıştır. İyi bir kompozit üretimi için kompozit numunede boşluk içeriğinin %1'den az olması tavsiye edilmektedir (Mustafa, 2014).
Boşluk içeriğin içinin tespiti için gerekli olan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$V = 100(T_d - M_d) / T_d \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'de V kompozit boşluk içeriği, T_d teorik kompozit yoğunluğu, M_d ölçülen kompozit yoğunluğudur.

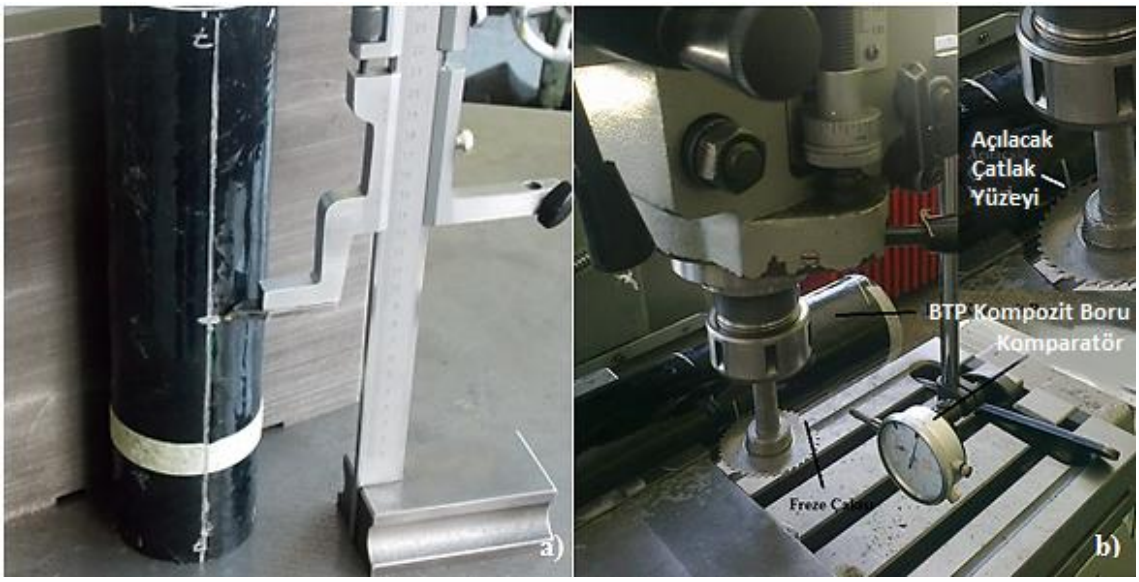
$$T_d = 100\left(R_1 / D_1 + r_1 / d_1\right) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'da R_1 kompozitteki reçine ağırlığı, D_1 reçine yoğunluğu, r_1 kompozitteki elyafın yoğunluğu, d_1 elyaf yoğunluğudur.

Netice olarak numunelerde % boşluk içeriğinin %1'den düşük olduğu tespit edilmiştir.

3.7. Numunelere Yüzey Çatlağının Açılması

BTP kompozit boruların ve SiO_2 nano partikül katkılı kompozit borulara yüzey çatlağı açılma prosesi freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle bir mihengir yardımıyla kompozit boruların yüzey çatlağı açılacak orta noktaları Şekil 3.14'de görüldüğü gibi tespit edildi. Daha sonra yüzey çatlağı açılacak olan yerin yüzeyinde üretimden kaynaklanan pürüzlülükler sırasıyla 800, 1000 ve 1200 gridlik zımparalar yardımıyla giderildi. Daha sonra kompozit borular mengene sabitlenerek çatlak açılmaya hazır hale getirildi. Çatlak açılması için freze tezgâhına sabitlenen bir komporatör yardımı ve freze çakısı ile sıfırlama işlemi yapıldı (Taşyürek, 2014). Çatlak açma işlemi, a/c =0.2 oranında sabit kalmak şartı ile a/t = 0.25 ve a/t = 0.50 oralarında çatlak derinlikleri ölçülerinde yüzey çatlağı açıldı. Açılan yüzey çatlakları bisturi ile çizilerek keskinleştirilerek ön çatlak oluşturulmuş oldu.



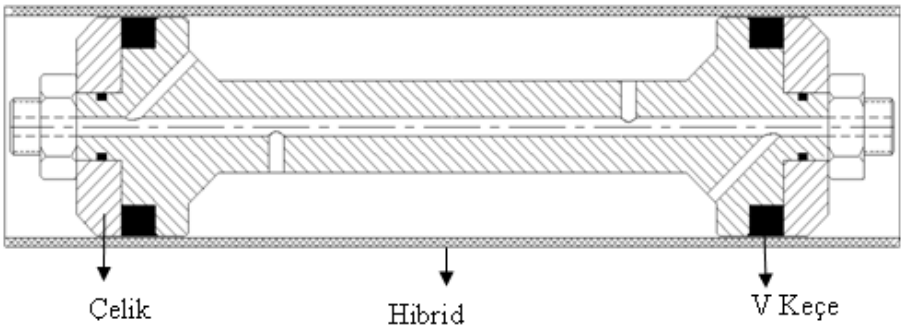
Şekil 3.11 BTP kompozit boruların a)yüzey çatlağı yerinin tespiti b)yüzey çatlağının açılması

3.8. Statik İç Basınç Test Düzeneği

ASTM D 1599-99' a göre serbest uçlu statik iç basınç patlama deneyleri için iç basınç test düzeneği Şekil 3.12'de görüldüğü hazırlanmıştır. Her iki kenarına sızdırmazlığı sağlamak için keçe yatağı açılmış aparat, çelik milden imal edilmiş ve her iki ucuna keçeleri sabitlemek ve sıkıştırmak için gerekli olan somun bağlantısı için vida açılmıştır. Yüksek basınca dayanıklı keçeler yataklara yerleştirilerek flanşlar ve somun bağlantılarıyla sabitlenmiş ve sıkıştırılmıştır. Keçeler Şekil 3.13' de gösterildiği gibi kompozit borunun içine monte edilmiştir. Dolayısıyla boruya iç basınç uygulandığında boru çapında artış meydana gelirken, boyda ise kısalma oluşmaktadır.

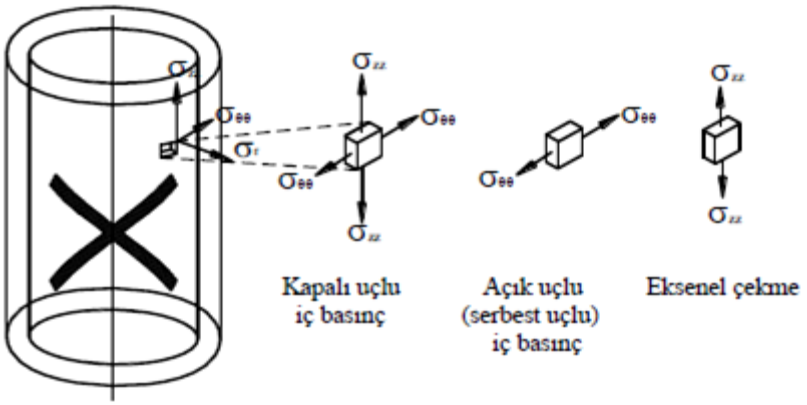


Şekil 3.12 Serbest uçlu statik iç basınç patlama test düzeneği.



Şekil 3.13 Kompozit borunun patlatma aparatına montajı.

Statik iç basınç deneylerinde boru numunelerinin içerisine hidrolik pompa vasıtasıyla basınçlandırma yapılmaktadır. Deney numunelerinin içerisine bu basınçlandırma neticesinde yağ basılırken numunede meydana gelecek sonuç hasarının 60-70 saniye arasında gerçekleşmesine özen gösterilmiş ve basınçlandırmanın lineer olması sağlanmıştır. Deney esnasında basınç artışı manometreden takip edilmiştir. Aynı zamanda elektronik yazılım basınç sensörü ile de basınç değerleri elektronik ortamda kontrol edilmiştir. Borularda poisson oranının tespit etmek için LY13 tipi eksenel ve teğetsel olmak üzere ikişer adet strain-gage yerleştirilmiş ve borular basınçlandırılmıştır. Serbest uçlu iç basınç testinde kompozit boruda meydana gelen maksimum teğetsel (çevresel) gerilme Şekil 3.14'de gösterilmekte ve ASTM D-1599-99 standardında maksimum teğetsel gerilmeyi veren denklem 3.7'de sunulmuştur.



Şekil 3.14 Serbest uçlu iç basınç esnasında kompozit boruda meydana gelen gerilmeler (Samancı 2004, Kara 2012, Taşyürek 2014).

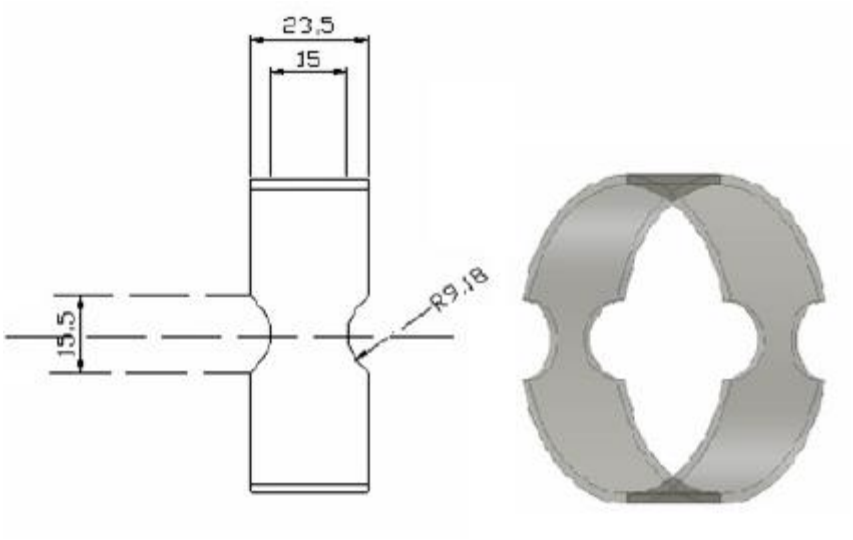
$$\sigma_{statik\theta\theta} = p(D - t_r)/2t_r \qquad (3.7)$$

Burada, $\sigma_{statik\theta\theta}$ (MPa); statik iç basınç altında maksimum teğetsel (çevresel) gerilme, MPa, D (mm) ortalama takviyeli dış çap, p *(KPa)* iç basınç ve t_r (mm) minimum takviyeli cidar kalınlığıdır.

3.9. Halka Çekme Deneyi

ASTM D 2290-22 "Split Disk Test Metodu" ile SiO_2 nano-partikül takviyeli ve takviyesiz borulardan Şekil 3.18'de verilen ölçülerde kesilen halka numunelere çekme deneyleri uygulanarak teğetsel gerilme değerleri tespit edilmiştir. Halka çekme deneyinde çekme hızı standarda göre 2 mm/dk olarak seçilmiştir. Şekil 3.15 ve Şekil 16'da halka çekme numune boyutları ve deneyinin yapılışı gösterilmektedir.

Tarakçıoglu (1993) yapmış olduğu doktora tezinde kırılma tokluğu parametrelerini tayin etmek için 45º, 55º ve 75º sarım açılarında CTP borulara halka çekme deneylerini uygulamıştır. Uygularken farklı a/W çentik derinliklerinde numuneleri hazırlamıştır. Kaynak ve ark. (2004) yine aynı Tarakçıoğlu'nun yapmış olduğu yöntemle (split-disk test) 25º, 45º, 65º ve 90º sarım açılarında CTP borulardan kesmiş olduğu halkalara çekme deneyleri uygulamışlardır. Deneyler neticesinde sarım açısının artmasıyla çekme dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Taşyürek (2014) Karbon nanotüp takviyeli ve karbon nanotüp takviyesiz 55º filaman sarım CTP borulara halka çekme deneyleri uygulayarak teğetsel gerilmeleri tespit etmişlerdir.



Şekil 3.15 Halka çekme numune boyutları.



Şekil 3.16 Halka çekme deneyi.

3.10 Yorulma Testi

SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız, eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların yorulma ömürlerini belirlmek amacıyla iç basınç yorulma deneyleri ASTM D 2992-12 standardına göre gerçekleştirilmiştir. İç basınç yorulma deneyleri; 25 çevrim/dak, R=0.05 ve SiO_2 nanopartikül katkısız ve çatlaksız numunelerin iç basınç deneylerinde elde edilen teğetsel yöndeki maksimum teğetsel

gerilmeler referans alınarak, bu gerilmelerin %30,%40,%50,%60 ve %70'ı olacak şekilde tekrarlı iç basınç uygulanarak açık uçlu deney şartlarında yapılmıştır. Her bir numune için testler 3 kez tekrarlanmıştır. Numuneler patlama ile birlikte elyaf kırılması, sızıntı ve akışkan jeti sonuç hasarlarına ulaştıklarında yorulma ömrü olarak bu çevrim sayıları esas alınmıştır. Kompozit numunelerin yorulma deney görüntüsü Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17 BTP Kompozit boruların yorulma deneyi.

3.10.1. Yorulma deney seti

Yorulma deneyleri Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü kompozit laboratuarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yorulma deney seti 250 bar azami basınç değerine, 8 l/dk debi kapasitesine sahip dişli pompasına ve 60 litre hacmine sahip bir hidrolik güç ünitesine sahiptir. Düzenek 2x2'lik yön kontrol valfi, devredeki basıncı gösteren basınç transmitteri konrol paneline sahip bir PLC sisteminden meydana gelmektedir. Gidiş ve dönüş hatlarında birer ader kısma valfi mevcuttur. Sinüzoidal bir gerilme değişimi elde etmek amacıyla bu kısma valfleri uygulanacak maksimum mukavemet değerinin oranına göre ayarlanılabilmektedir. 3 ayrı numunede yorulma test düzeneğinde kullanılabilmektedir (Taşyürek 2014). Kompozit borulara statik iç basınç test aparatına monte edildikten sonra kaplin ve hidrolik hortumlar ile bağlanılarak deneylere hazır hale getirilmektedir. Hidrolik

akışkan olarak BP marka HPL-HM68 kodlu hidrolik sistem yağı kullanılmıştır (Taşyürek 2014, Samancı 2004).

Çalışma prensibi, numune hattındaki basınç, ayarlanan üst basınç değerine ulaştığını basınç sensöründen aldığı sinyal ile algılayan kontrol ünitesi selenoid valfi kumanda ederek basınçlı yağın tanka tahliyesini sağlamakta ve ayarlanan frekans değerini sağlayacak bir süre sonunda valfi tekrar eski konumuna almaktadır. Bu işlem kullanılan numunelerden herhangi birisi hasara uğrayıncaya kadar devam etmektedir. PLC kontrol ünitesi analog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrandan oluşmaktadır. Dijital ekranda sistem üst basınç, sistem alt basıncı, anlık alt basınç, frekans, azami çevrim sayısı ve anlık çevrim sayısı görülebilmektedir (Samancı 2004).

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

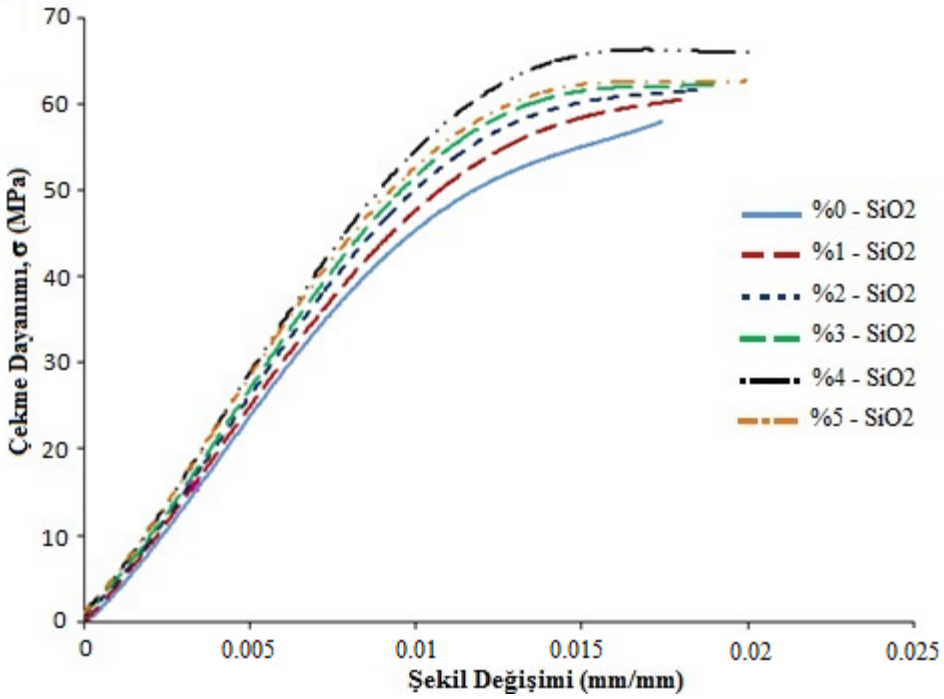
4.1. Yakma Deneyi Sonuçları

ASTM D-2584-11'e uygun olarak gerçekleştirilen $[\pm 55^o]_6$ BTP filaman sarım kompozit ve %4 SiO_2 nanopartikül katkılı $[\pm 55^o]_6$ BTP filaman sarım nanokompozit boruların ortalama hacimsel elyaf oranı (V_f), 0.61 ± 1.5 olarak bulunmuştur. Pavloski ve ark. (2007) çalışmalarında $\pm 55^o$ BTP kompozit tüplerin hacimsel elyaf oranını ortalama $(V_f), 0.65$ olarak tespit ederlerken, Tarakçıoğlu (1992) ise tez çalışmasında $\pm 55^o$ CTP filaman sarım borularda hacimsel elyaf oranını $(V_f)\, 0.63$ olarak bulmuştur. Lee and Cheon (2001) farklı hacimsel elyaf oranlarına sahip CTP epoksi plakalara yapmış oldukları darbe ve tabakalararası kayma dayanımı testlerinde, en iyi kayma dayanımı değerini 0.6 hacimsel elyaf oranında elde ederlerken, darbe absorsiyonu değerlerini ve darbe tokluklarını ise 0.6 – 0.65 hacimsel elyaf oranı aralığında elde etmişlerdir. Hacimsel elyaf oranlarının 0.65 – 0.70 değerlerinden sonra epoksi ile elyafların ıslatma problemi ortaya çıktığını ve tabakalara arası delaminasyon hasarlarının arttığını ifade etmişlerdir. Kompozitlerin epoksi reçine ile kullanımlarında 0.60-0.65 hacimsel elyaf oranları aralıklarının mekanik özelliklerinin elde edilmesi açısından uygun olduğunu Lee ve Cheon çalışmalarında belirtmişlerdir.

4.2. SiO_2/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik Testleri

$\pm 55^o$ sarım açısında BTP kompozit boruların statik iç basınç dayanımlarının ve yorulma ömürlerinin iyileştirilmesine yönelik, epoksi matrise SiO_2 nanopartiküllerin katılması amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında; literatürlerin destekleri doğrultusunda SiO_2 nanopartiküller; %1,%2,%3,%4 ve %5 katkı oranlarında epoksi matrisin içerisine katılarak, ASTM D638-13 çekme testi ve ASTM 5045-99 tek kenar çentikli üç nokta eğme testi nanokompozit numuneleri üretilmiştir. Her bir % katkı oranındaki çekme dayanımları, şekil değişimleri ve Mod I kırılma tokluklari tespit edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre, BTP kompozit borulara ilave edilmesi düşünülen % katkı oranı belirlenmiş ve SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borular belirlenen bu % katkı oranına göre filaman sarım metoduyla $\pm 55^o$ sarım açısında filaman sarım yöntemiyle üretimleri gerçekleştirimiştir.

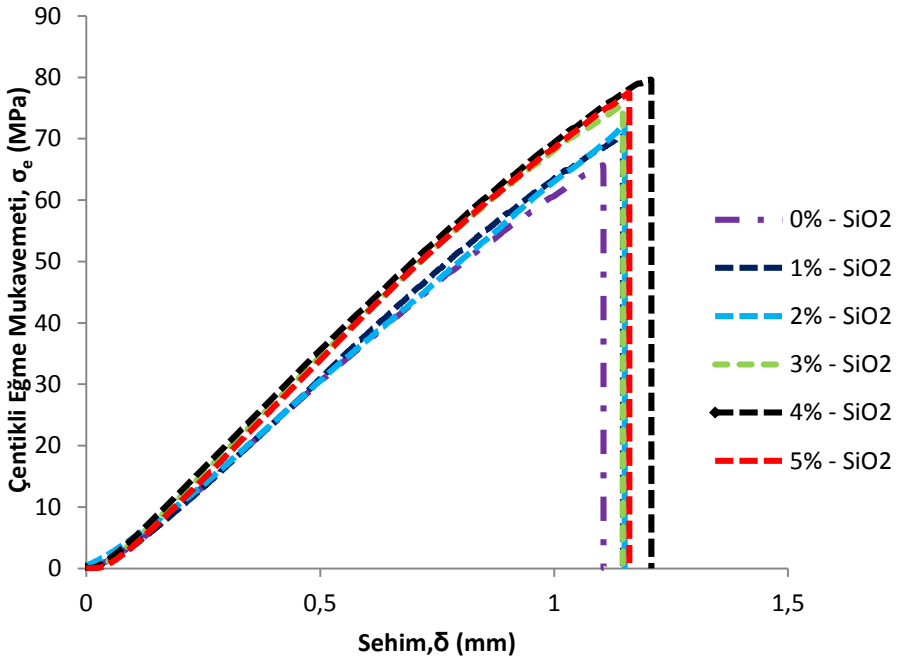
SiO_2 nanopartiküllerin epoksi matrise ilavesiyle en iyi mekanik özelliklerin hangi % katkı oranında olduğunu belirleyen mekanik testlerin sonuçları aşağıda grafikler ve literatür destekli yorumlar ile verilmiştir. Ayrıca mekanik testlerin dışında, mekanik testlerin sonuçlarının yorumlanmasında etkin rol oynayan FTIR analizi ve SEM kırılıma yüzeyi incelemeleride yapılmıştır.



Şekil 4.1 SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımları

Şekil 4.1 incelendiğinde ASTM D638-13 standardına göre gerçekleştirilen çekme deneyinde, katkısız DGEBA epoksi matrisin ortalama çekme dayanımı 57.8 MPa değeri tespit edilmiştir. Literatürde; Zhou ve ark.(2008) katkısız DGEBA epoksinin çekme dayanımı 58.7 MPa, Mohan ve ark.(2006) ve Kumar ve ark. (2011) katkısız DGEBA epoksinin çekme dayanımı yaklaşık ~60 MPa, Chen ve Chasiatis (2008) ise DGEBF katkısız epoksinin çekme dayanımını yaklaşık ~54 MPa olarak bulmuşlardır. Dolayısıyla; ortalama referans değer olarak kabul edilen katkısız DGEBA epoksi matrisin çekme dayanımının literatür ile örtüştüğü görülmektedir. Katkısız epoksi matrisin ortalama çekme dayanımı dışında, ağırlıkça %1, %2 %3, %4 ve %5 katkı oranlarındaki SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin sırasıyla ortalama çekme dayanımları 59.6, 61, 62.5, 65.9 ve 62.1 MPa değerleri olmuştur. Bu deney sonuçları içerisinde en yüksek ortalama çekme dayanımını ağırlıkça %4 katkı oranındaki SiO_2/Epoksi nanokompozitlerde elde edilirken, bu % katkı oranından sonra çekme dayanımının düştüğü gözlemlenilmiştir. En iyi ortalama çekme dayanımını sağlayan %4 katkı

oranındaki SiO_2/nanokompozitlerde, katkısız epoksi kompozitlere göre %14'lük artış sağlanmıştır. SiO_2 nanopartikül katkılı nanokompozitler üzerine araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda genel itibariyle SiO_2 nanopartiküllerin ilavesiyle çekme dayanımlarının arttığı ifade edilmiştir. Bunun yanında araştırmacılarının bir kısmı en iyi çekme dayanımlarını %4 katkı oranında elde ettiklerini çalışmalarında belirtmişlerdir (Deng ve ark., 2007; Rostami ve ark., 2012; Huang ve ark., 2005; Chen ve Chasiotis 2008). Wei ve ark.(2011) %5 katkılı oranında SiO_2/Bazalt/Epoksi nanokompozitlerde %15'lik, Huang ve ark. (2005) epoksi matrise %4 SiO_2 katkısıyla %24'lük artışlar elde ederlerken, Su ve ark. (2007) %4 SiO_2 nanopartikül katkı oranındaki nanokompozitlerde 65,1 MPa değerinde en yüksek çekme dayanımını elde ettiklerini çalışmalarında açıklamışlardır. Zhao ve Luo (2008) ise çalışmasında %2 katkıyla yaklaşık 4,8% lik artış gözlemlemişlerdir. Katkısız epoksinin çekme elastikiyet modülü ortalama 1.9 GPa olarak tespit edilmişken, %4 SiO_2 nanopartikülün ise 2.5 GPa bulunmuştur. %4 katkı oranı ile elastikiyet modülünün arttığı görülmüştür(Deng ve ark. 2007). Araştırmacıların bulgularının yapılan çalışmanın sonuçlarıyla mukayesesi yapıldığında, bulguların uyuştuğu anlaşılmaktadır.

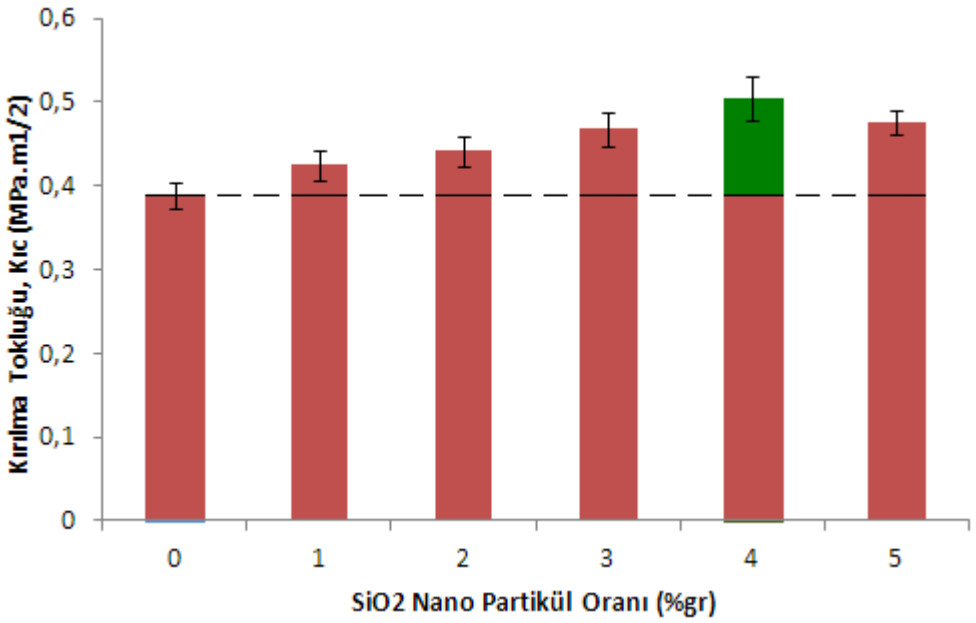


Şekil 4.2 SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin çentikli eğilme mukavemeti.

%0, 1, 2, 3, 4 ve %5 katkı oranlarında SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin tek kenar çentikli üç nokta eğme testlerinde, ortalama eğme mukavemetleri %4 SiO_2 nanopartikül katkı

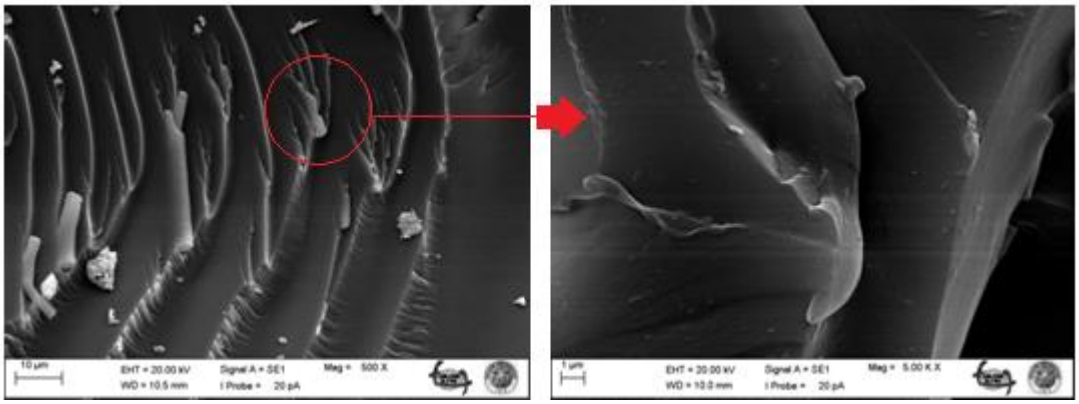
oranına kadar artış göstermiş, %4 katkı oranından sonra mukavemtin düştüğü tespit edilmiştir. SiO_2 nanopartiküllerin %0-5 katkı oranlarına göre ASTM D5045-99 standardına göre gerçekleştirilen testlerden elde edilen ortalama çentikli eğme mukavemetleri sırasıyla; 62.9, 69, 71.7, 73.6, 81.6 ve 77.1 MPa değerlerini almıştır. En yüksek ortalama çentikli eğme mukavemeti değeri ağırlıkça %4 SiO_2 nanopartikül katkı oranında Şekil 4.2'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Abd ve ark. (2012) ve Yu ve ark.(2012) %4 katkı oranında SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin en iyi eğilme mukavemetleri gösterdiklerini çalışmalarında belirtmişlerdir. Bunlara ilaveten, Yu ve ark.(2012) %4 katkı oranında SiO_2 nanopartiküllerin yüzeylerinin farklı silan tipleri ile modifiye etmesiyle, SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin eğme mukavemetini 76.4 MPa değerinden, 82.4-98.8 MPa değerlerine yükseltiğini makalelerinden ifade etmişlerdir.

SiO_2 nanopartikül ağırlıkça % katkı oranlarının şekil değiştirme davranışlarına baktığımızda (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2) % katkı oranının artmasıyla, şekil değişimi %4 katkı oranına kadar artış sergilemiştir. Bu değerden sonra ise nanokompozilterin yük altında şekil değişiimlerinde azalmanın olduğu gözlemlenilmiştir. SiO_2/Epoksi nanokompozitlerde en yüksek şekil değişimi %4 katkı oranında gözlemlenirken, ikinci yüksek şekil değişimi ise %5 katkı oranında tespit edilmiştir. Bu katkı oranında artık kümeleşmelerin nanosilikalar arasında oluşmaya başladığı ve elde edildiği düşünülen iyi dağılımın bozulmaya başlandığı şeklinde yorumlanmıştır. Matris malzemedeki sünekliliğin artışında kırılma mekanizmalarından olan çatlak uçlarındaki körelmeler ve çatlak yolunun artmasının da etkili olduğu farz edilmektedir. Silan ile modifikasyonun iyi bir dağılımın sağlanmasında etken olmasının yanında, SiO_2 nanopartikül etrafında yükleme altında lokal plastik deformasyonlara ve çatlak uçları önlerinde plastikleştirici etkilere neden olduğu literatüre dayanarak yorumlanmıştır(Mahrholz ve ark., 2005; Wang ve ark., 2013; Deng ve ark. 2007; Jalili ve ark., 2007 ve Yao ve ark., 2008). Jalili ve ark. (2007) ve Deng ve ark. (2007) %4 katkı oranındaki SiO_2/Epoksi nanokompozitlerde en fazla şekil değişiminin gözlemlediklerini belirtirlerken, Yao ve ark. (2008) % katkı oranında en iyi değeri elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmanın şekil değişimi sonuçlarına bakıldığında $SİO_2$ nanopartikül ilavesinin, gevrek epoksi matriste şekil değişiminin artmasını neden olarak sünek bir yapıya yöneltiği ve bunun literatür ile uyum sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.3 Kırılma tokluğu-SiO_2 nano partikül katkı oranı (%Ağırlık)

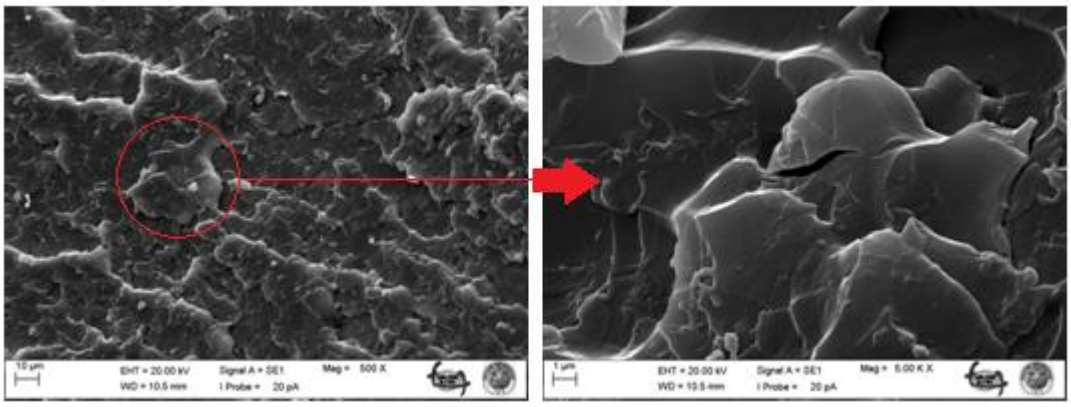
%1, 2, 3, 4 ve %5 katkı oranlarında SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin ASTM D5045-99 standardına göre gerçekleştirien deneylerin neticesinde elde edilen Mod I kırılma tokluğu değerleri Şekil 4.3'de sunulmuştur. Buna göre sırasıyla bu değerler; 0.388, 0.424, 0.441, 0.467, 0.504 ve 0.475 $MPa.m^{1/2}$ 'dir. Elde edilen deney sonuçlarına göre en yüksek Mod I kırılma tokluğu %25-39 aralığındaki %artışlar ile %4 katkı oranında bulunmuştur. Deng ve ark.(2007), Phanthomachai ve ark.(2013) ve Bleckman ve ark.(2007) SiO_2/Epoksi nanokompozitler üzerine yaptıkları çalışmada sırasıyla %25, %54 ve %27^lik artışlar ile Mod I kırılma tokluğunda en iyi değerleri %4 katkı oranında belirlemişlerdir. Yao ve ark.(2008) ise %3-4 SiO_2 katkı oranları arakığında %15.4'lük artışla yüksek kırılma toklukları elde edilebileceğini çalışmalarında ifade etmişlerdir. Han ve Cho(2006), Chen ve ark.(2008) ve Han ve ark.(2006) en iyi Mod I kırılma tokluklarının %3 ile %5 aralığında kafi olabileceğini yürütükleri projede beyan etmişlerdir. Yine Zeng ve ark.(2006) tabakalara arası delaminasyon hasar oluşumlarında %4 SiO_2 nanopartikül katkı oranının kırılma tokluğunda önemli bir artış sağladığını önemle makalelerinde arz etmişlerdir. Buna mukabil, Brunner ve ark.(2006) %10 SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin Mod I kırılma tokluğunda %40-50'lik artış sağlamıştır. Netice olarak, %katkı oranının ve kırılma tokluğunda elde edilen artışların literatür ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenilmektedir.



Şekil 4.4 Epoksi çekme numunesinden alınan kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) 10µmb) 1µm.

Katkısız epoksinin Şekil 4.4a'daki 10 µm ve Şekil 4.4b'deki 1µm'lik çekme numunesinin çekme yönüne dik meydana gelen kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, birbirine paralel, birinin ikizi gibi simetrik ve benzer, pürüzsüz yüksek çıkıntılar halinde kırılma adımları ve izleri gözlemlenilmektedir. Bu kırılma adımlarının sonlarında ise az miktarda dallanan ve akarsu akıntı çizgilerini anımsatan kırılma izlerinin birbirini takip ettiği görülmektedir. Bu kırılma adımlarının aralarının ise kalyon görünümünde olup, oldukça pürüzsüz olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Katkısız epoksinin kırılma yüzeylerinde kırılma adımlarının keskin hatlara sahip olması ve yüzeylerinin pürüzsüz olması, kırılmanın ilerlemesi halinde plastik deformasyon uğramadığı ve gevrek kırılmanın bir emaresi olduğu kanısını oluşturmuştur (Manjunatha ve ark., 2010; Zhang ve ark., 2003; Li ve ark., 2007; Zang ve ark.,2006; Brunner ve ark. 2006).

Gao ve ark.(2012), birbirine paralel bu çıkıntıları "*mirror zone*" ,ikiz hasar alanları olarak tanımlarken, çatlak başlama alanının hemen yanında olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Zhao ve Luo (2008), epoksilerde kırılma yüzeyini iki bölüme ayırmışlar ve bunları; çatlak başlama alanı ve çatlak ilerleme alanı olarak ifade etmişlerdir. Çatlak başlama alanını çevreleyen tarak uçları gibi birbirine paralel kırılma adımlarını ve sonundaki dallanmalarının çatlak ilerleme bölgesini oluşturduklarını SEM görüntüleri ile yorumlamışlardır. SEM görüntülerinde derinliği küçük çatlak adımlarının hızlı çatlak ilerleme alanları olduğunu da önemle ifade etmişlerdir. Çalışmamızda, katkısız epoksinin SEM görüntüleri ile ilgili bulgularımız yukarıda belirtilen çalışmalar ile benzerlik taşıdığı ve literatürdeki SEM görüntüleri ile kıyas edilmiştir.



Şekil 4.5 %4 nano SiO_2 katkılı epoksi çekme numunesinin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a)10 µm b) 1µm.

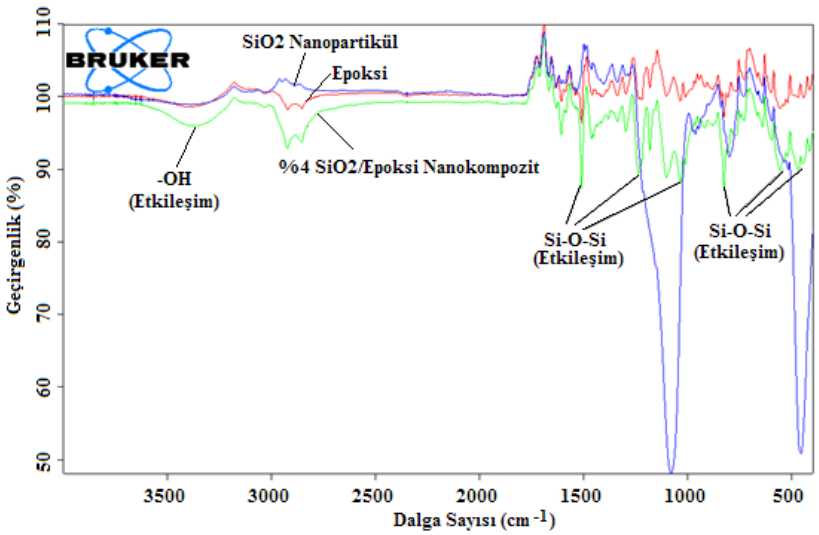
%4 katkı oranında SiO_2/Epoksi nanokompozit çekme numunesinin çekme yönüne dik kırılma yüzeylerinden alınan Şekil 4.5a'daki 10µm ve Şekil 4.5b'deki 1µm ölçeğindeki SEM görüntülerine bakıldığında, katkısız epoksilerin kırılma yüzeylerine göre çok daha fazla pürüzlü hale geldiği tespit edilmiştir. Matrise %4 SiO_2 nanopartikül ilavesiyle, kırılma yüzeylerinde birbirinin benzeri balık pılcukları gibi konkav ve hiperbolik şekillerin oluştuğu açıkça görülmektedir. Bu kırılma yüzeylerinin görünümünden, kırılma esnasında mikro boşlukların oluştuğu ve bunların plastik deformasyona işaret ettiği yorumu yapılmıştır. Literatür gözlemlemelerinde, kırılma yüzeylerindeki konkavsı görünümündeki pürüzlü kırılmaların, sünek kırılmaların belirtileri olduğunu ifade edilirken, SiO_2 nanopartiküllerin epoksi matris içerisinde iyi bir dağılımının sağlandığınında emaresi olarak belirtilmiştir (Yao ve ark. 2008; Sadej-Barjein ve ark., 2011; Zhang ve ark., 2006). Bu literatür çalışmalarına ilaveten, Sadej-Barjein ve ark. (2011) %4 SiO_2 nanopartikül katkı oranında iyi bir dağılımın sağlandığını SEM görüntülerinin eşliğinde açıklarken, bu % katkı oranında en fazla yüzey pürüzlülüğünün elde edildiğini, AFM deneyleri neticesinde tespit etmiştir.

%4 katkı oranında SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin başta kırılma toklukları olmak üzere, çekme dayanımları ve şekil değişimlerinin artışına, SiO_2 nanopartiküllerin sağlamış oldukları kırılma mekanizmaları etki etmektedir. Bu artışları sağlayan kırılma mekanizmaları aşağıda maddeler halinde verilmiş ve nano ölçekli SEM görüntüleri ve FTIR analizi ile desteklenerek açıklanmaya çalışılmıştır.

SiO_2 nanopartiküllerin epokside kırılma tokluğu artışına etki eden mekanizmaları;

- SiO_2 nanopartiküllerin matris içerisinde iyi dağılımın sağlanması
- SiO_2 nanopartiküllere uygulanan yüzey modifikasyonu
- SiO_2 nanopartiküllerin epoksi ile arayüzey etkileşimi
- SiO_2 nanopartikülerin çatlağı tutması, çatlak ucunu köreltmesi ve nanopartikül etrafında lokal plastik deformasyonlar oluşturması
- Çatlak ilerleme doğrultusunda sapmalar, yönlenmeler ve dallanmalar
- SiO_2 nanopartiküllerin boyutu, geometrisi ve özgül yüzey alanı

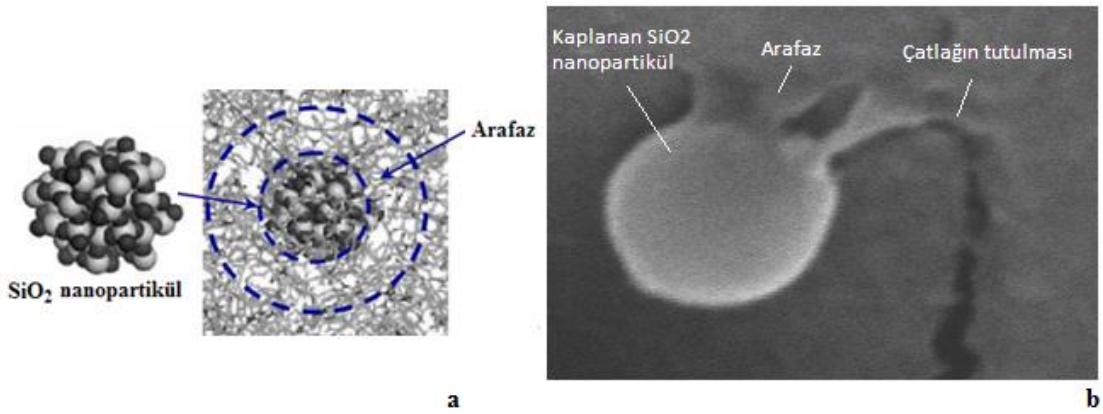
Çekme dayanımları ve kırılma toklukları ve SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere ağırlıkça %4 katkı oranında SiO_2 nanopartiküllerin epoksi matris içerisinde iyi dağılımın elde edildiği sonucu kabul edilmiştir. Bu % katkı oranından sonra kırılma tokluğu ve diğer mekanik özelliklerde azalmaların başladığı tespit edilmiştir. %4 katkı oranından sonra mekanik özelliklerdeki bu zayıflamanın SiO_2 nanopartiküllerin Wanderwalls çekim kuvvetinden etkilenerek topaklaşıp kümeleşmeye başladığını ve nanopartiküller arası mesafenin azalmasında bunda etkin rol oynadığı düşünülmüştür (Tzetzis ve ark., 2012; Wang ve ark., 2009). Ardali ve Agali (2013) SiO_2 nanopartiküllerin %4 katkı oranında herhangi bir topaklaşma ile karşılaşmayarak, iyi bir dağılım elde ettiklerini rapor etmişlerdir. %4 katkı oranında topaklaşmanın olmasının arkasında yatan diğer bir etken ise yüzeylerinin silan ile fonksiyonelleştirilmiş olması kanısıdır(Sadej-Bajelain ve ark., 2011; Phonthammacha ve ark., 2012).



Şekil 4.6. Ağırlıkça %4 takviye oranında FTIR sonuçları.

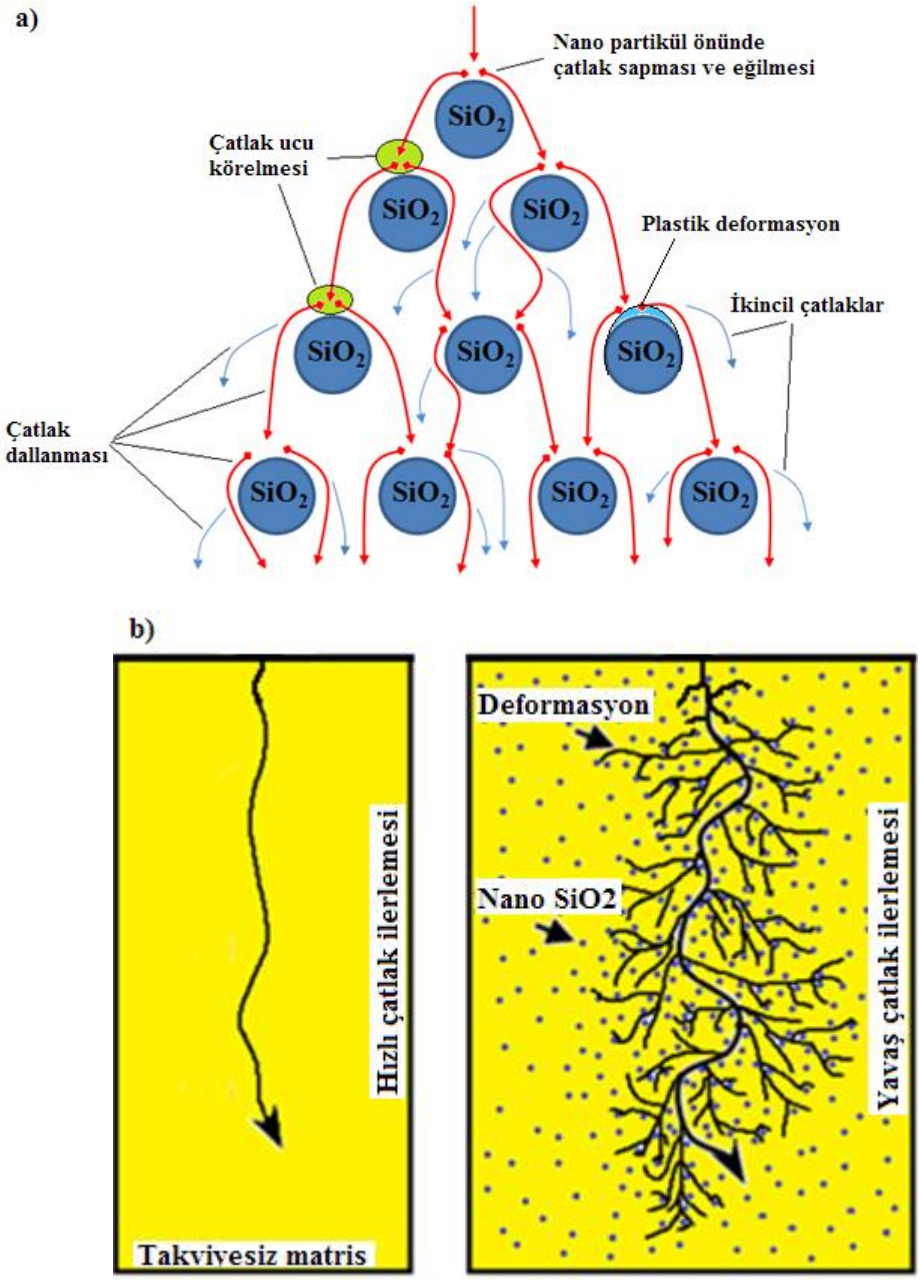
SiO_2 nanopartiküllerin %4 takviye oranında matris içerisinde iyi bir dağılımın sağlanmasında silan (SiH_4) ile yapılan yüzey modifikasyonun aktif rol aldığı FTIR ve diğer analizlerde gözlemlenilmiştir. Yüzey modifikasyonu Şekil 4.6'da gösterildiği gibi FTIR sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, epoksi ile %4 katkı oranında, nanopartikülerin yüzeylerinde bulunan Si-O-Si fonksiyonel grupları ve -OH grupları ile kimyasal bağ oluşturarak etkileşime girdiği anlaşılmıştır. Bu % katkı oranında fonksiyonel gruplar ile meydana gelen kimyasal etkileşim polimerleşmeninde ibaresi olmuştur. Dolayısıyla SiO_2 nanopartikül ve epoksi arasında kuvvetli adezyon ve esnek bir arayüzey kazanılarak, ara yüzeylerde dayanımı ve kırılma tokluğunu arttırdığı kanısını oluşturmuştur (Phonthammacha ve ark., 2012; Jalili ve ark., 2008; Zhang ve ark. 2008; Su ve ark. 2007). Bu etkileşimin özellikle kırılma esnasında çatlak önlerinde lokal plastik deformasyonu sağlayarak kırılma tokluğunu ve mekanik özellikleri iyileştirmede önemli faktör olduğu düşünülmektedir. %4 katkı oranında şekil değişiminin yani sünekliliğin matristen, yüksek değer sergilemesi bu yorumu destekler niteliktedir (Battistella ve ark., 2008; Han ve ark., 2006; Jalili ve ark. 2008). Sadej-Bajelain ve ark. (2011) ve Phonthammacha ve ark. (2012), %4 katkı oranındaki SiO_2 nanopartikülleri silan ile iyi dağıtılabilirliklerinin sağlamasının yanında, en iyi polimerizasyonuda %4 katkı oranında elde etmişlerdir. Dolayısıyla bu %4 katkı oranın dağıtılabirlik ve epoksi ile etkileşimin sağlanmasında yeterli olduğunu belirtmişler ve bu % katkı oranında kullanımını önermişlerdir.

Zhang ve ark. (2006) silan ile modifikasyon neticesinde nanosilikaların epoksi ile etkileşimiyle birlikte ara yüzeylerde ara fazların oluştuğunu belirtmiştir. Böylece nanosilikaların etrafının kaplanarak bir kabuk oluşturduğunu aşağıda verilen Şekil 4.7a ile açıklamaya çalışılmıştır. %4 katkılı SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM incelemelerinde, Şekil 4.7'de ifade edilen arafazlar Şekil 4.7b'de tespit edilmiştir.



Şekil 4.7 a) SiO_2 nanopartikül etrafından arafaz oluşumunun şematik gösterimi (Zhang ve ark. 2006), **b)** %4 katkı oranında tespit edilen arafaz ve ilerleyen çatlağın tutulması.

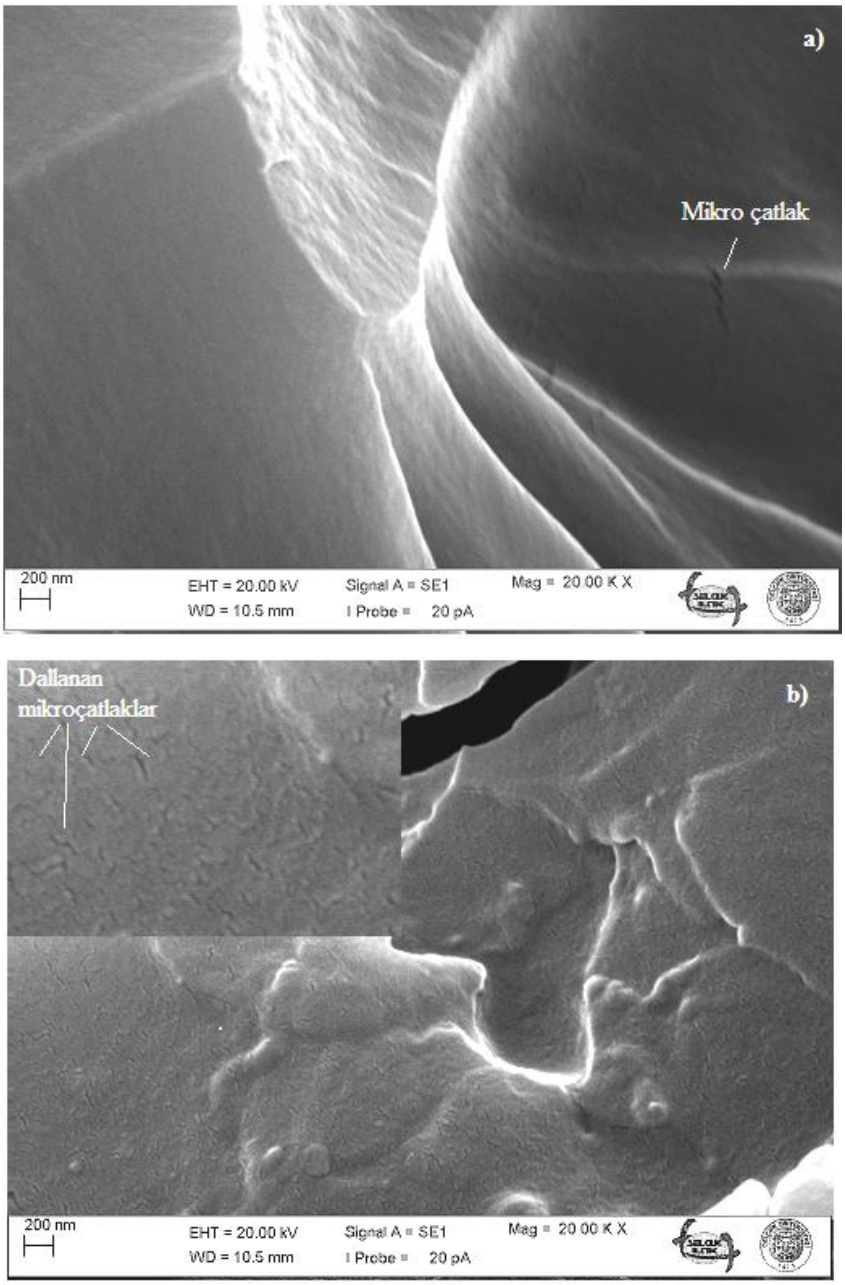
Yapılan çalışmada nanosilikaların çatlak önünde tutma, çatlak ucu körelme ve çatlak doğrultularında sapmalar ile dallanmalar %4 katkı oranında kırılma tokluğu artışına etki eden önemli kırılma tokluğu mekanizmaları olduğu düşünülmektedir. Yük altında epoksi matris malzemede oluşan çatlaklar matris malzemede ilerlemeye devam ederken SiO_2 nanopartiküller tarafından bloklanarak yakalanmış ve tutulmuşlardır (Zhang ve ark. 2006, Deng ve ark. 2008). Dolayısyla bloklanarak tutulan bu çatlak uçlarında körelmelere ve çatlak uçlarında plastik deformasyona neden olmuştur (Zhang ve ark., 2006; Han ve ark., 2006; Battistella ve ark., 2008). Çatlak uçlarında bu etkiler neticesinde nano SiO_2 partikül önünde sapmalar meydana gelmiştir. Çatlak ilerlemeye çatlak yönündeki bu sapmalarla nanopartikül epoksi etkileşim kuvvetine göre ya nanopartikül arayüzeyi boyunca etmekte yada ikincil çatlak oluşturarak ilerlemektedir. Ayrıca nanopartikül matris arayüzeyinde ilerleyen çatlak, matris ve nanopartikül arayüzey ayrılmalarına neden olmaktadır (Hsieh ve ark. 2012; Wetzel ve ark., 2006; Lazzeri ve ark. 2005). Böylece SiO_2 nanopartiküller çatlak ilerleme doğrultularında Şekil 4.8'de gösterildiği gibi ağacın dallarına benzeyen dentritik dallanmalara neden olduğu ve yavaş ilerlediği farz edilmektedir (Han ve ark., 2006; Li ve ark., 2007).



Şekil 4.8 a) Kırılma mekanizmaları, **b)** Hızlı ve yavaş çatlak ilerlemeleri (Han ve ark. 2006)

Yu ve ark.(2012) ve Deng ve ark.(2008) %4 katkı oranında SiO_2 nanopartiküllerin silan ile yapılan yüzey modifikasyonu neticesinde epoksi matris ile kuvvetli arayüzey kimyasal bağlanmalara neden olarak arayüzey dayanımını arttırdığını, dolayısıyla da çatlak uçlarında körlenmeler oluşturduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Bu körlenmeler neticesinde çatlak uçlarında sapmalar ile beraber etkili epoksi matriste yük transferi sağladığını beyan etmişlerdir. Han ve ark.(2006) SiO_2 nanopartiküllerin çatlak sapmalarıyla kırılma tokluğunun artışında önem arz ettiğini

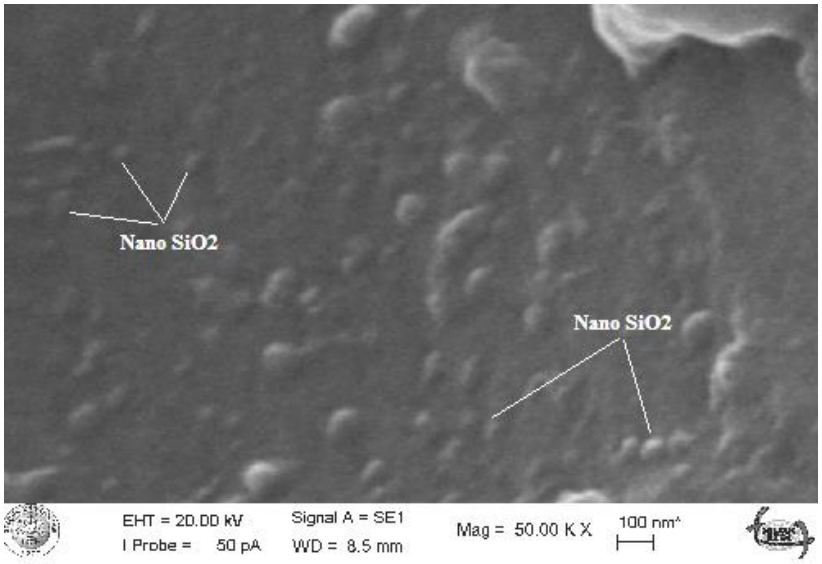
açıkladıkları gibi, kırılma esnasında sünek kırılmaların emaresi olan pürüzlü kırılmanın cereyan ettiğinden sözetmişlerdir.



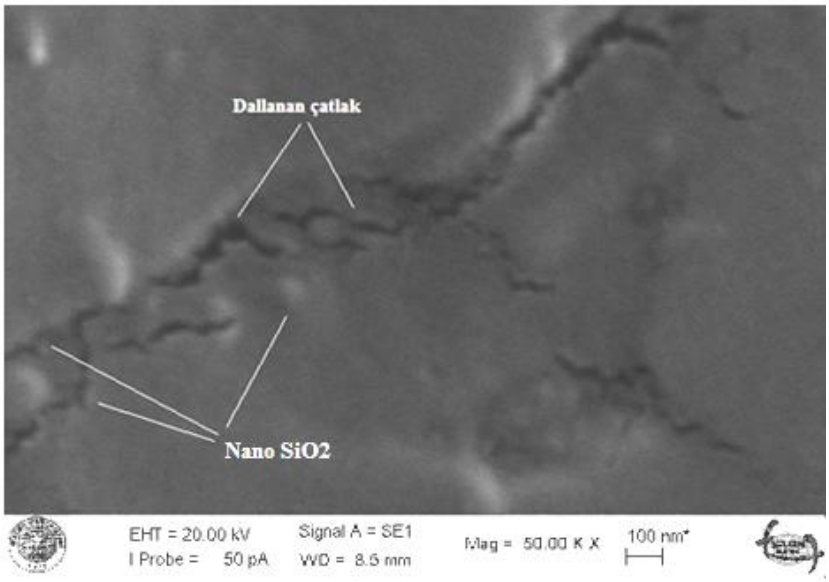
Şekil 4.9 a) Matris malzemedeki mikro çatlaklar **b)** %4 SiO_2 takviyeli matrisdeki dallanan mikro çatlaklar

Şekil 4.9a'da katkısız epoksinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde birkaç bölgede mikro ve makro çatlaklar gözlemlenirken, Şekil 4.19b ise %4 katkı oranında epoksinin kırılma yüzeyinde dallanmış çok fazla mikro çatlaklar gözlemlenilmektedir. Bu gözlemlemeler nano partiküllerin çatlak dallanmalarına neden olduğunu ispatlar nitelikte olduğu düşünülmektedir. Dallanan çatlaklar kırılma gerçekleşene kadar kırılma

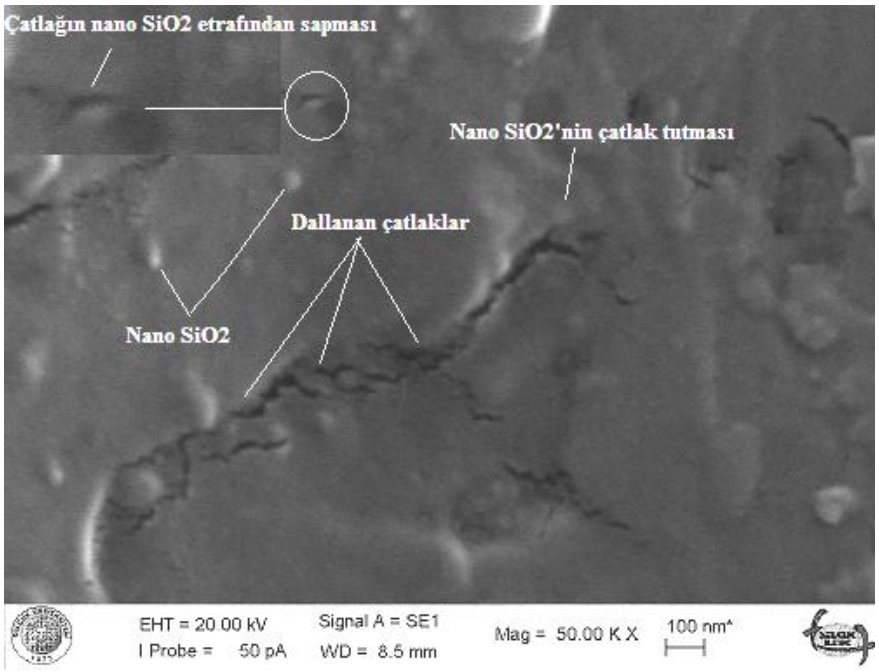
yolunu arttırarak kırılmayı geciktirdiği ve kırılma düzleminde enerji dağılımını arttırdığı yorumu yapılmıştır (Han ve ark., 2006; Zhao ve Luo, 2008). Şekil 4.10'da matris içerisinde dağılan SiO_2 nanopartiküller verilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'deki SEM görüntülerinde ise Şekil 4.8'de şematik olarak gösterilen kırılma tokluğunu artıran kırılma mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Matris içerisinde dağılan %4 SiO_2 nanopartiküller



Şekil 4.11 Matris içersinde dallanan çatlaklar



Şekil 4.12 Kırılma tokluğuna etki eden kırılma mekanizmaları

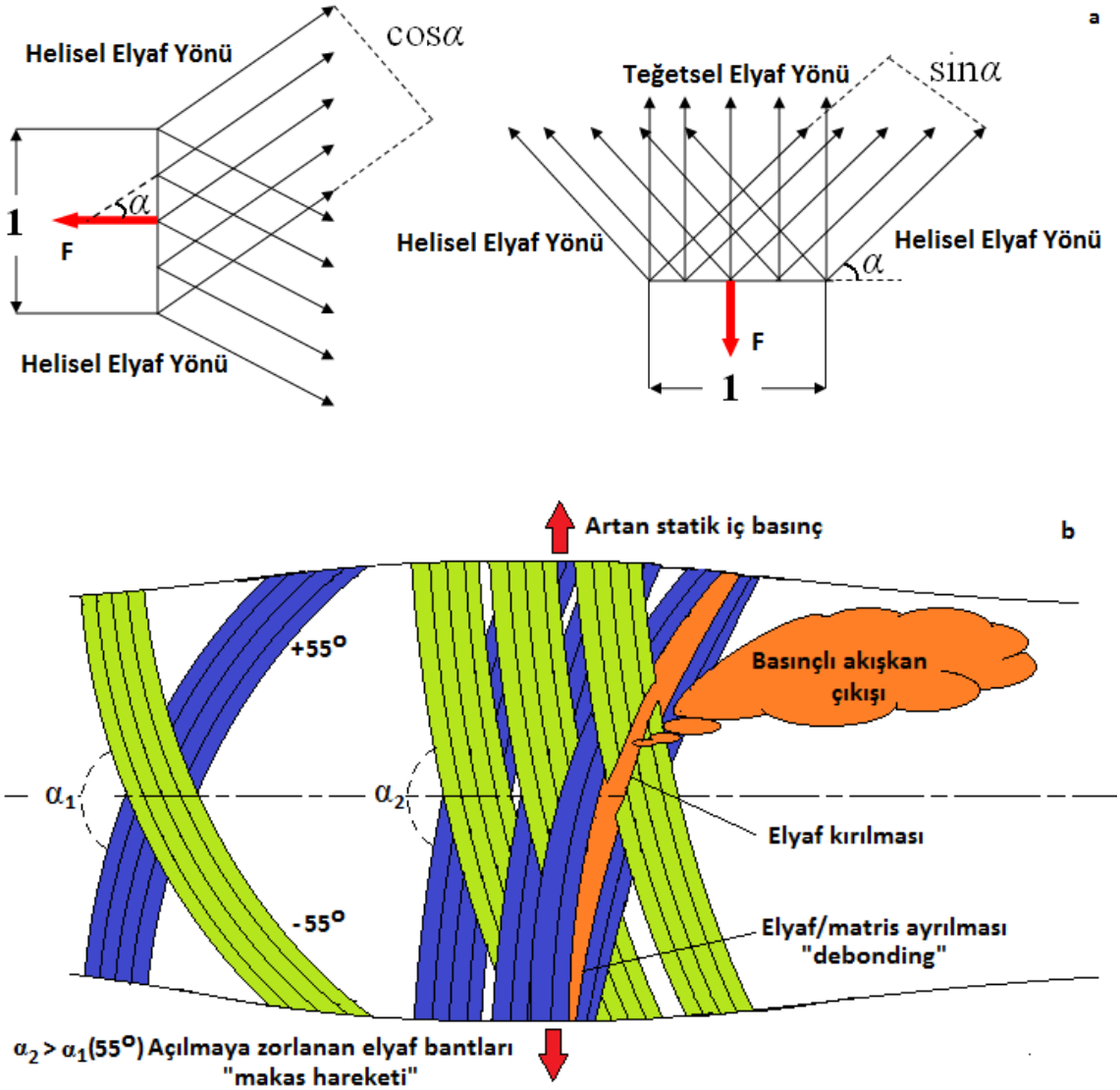
Kırılma tokluğunun artmasında nanopatiküllerin özgül yüzey alanı dolayısıyla boyutu ve geometrisinin de literatür bilgi ve yorumları doğrultusunda kırılma mekanizmalarında etkin olduğu düşünülmektedir. Adachi ve ark.(2008) SiO_2 nanopartiküllerin boyutunun ve nanopartikülleri arası mesafesinin Mod I kırılma tokluğuna etki eden faktörlerden olduğunu çalışmalarında bulmuşlardır. Zhang ve ark. (2006), Adachi ve ark. (2008) nanopartiküllerin artan özgül yüzey alanlarının, nanopartiküllerin matris malzemeye %katkı oranlarını değiştirdiklerini ifade etmişlerdir. Düşük % katkı oranlarında yüksek özgül yüzey alanı ve düşük nanopartikül boyutunun partikül/matris arayüzey ayrılmaları (debonding) ve dallanması gibi arayüzey ile ilgili kırılma tokluğunu arttıran etken faktörlerinde önemli rol oynadığını çalışmalarında tespit etmişlerdir. Bunlara ilaveten yüksek özgül yüzey alanının matris ve nanopartikül arasında gerilim transferini arttırdığını, matris nanopartikül arasında etkileşimi arttırarak yapışmayı arttırdığını makalelerinde vurgulamışlardır. Wang ve ark. (2013), nanokompozitlerde nanopartiküllerin, nanopartikül/matris arayüzey etkileşimi, yüzey modifikasyonu, nanopartikül topaklaşması, nanopartiküllerin özgül yüzey alanı, boyutu ve şeklinin aynı tip nanopartikül ve matris malzeme için farklı kırılma tokluğu etkileri oluşturduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda nanokompozitlerde hangi faktörün rijitlik, çekme dayanımı ve kırılma tokluklar üzerindeki performans değişimine etki eden bu faktörleri tahmin etmenin oldukça zor olduğunu belirtmişlerdir. Tzetzis ve ark. (2012)

ve Phonthammacha ve ark. (2012) yüksek özgül yüzey alanına sahip olan SiO_2 nanopartiküllerin %1-5 katkı oranları aralığında kullanılmasının istenilen mekanik özelliklerin elde edilişinde uygun olduğunu çalışmalarında önerirlerken, Dongbo ve ark.(2006) %3-%5 katkı oranında kullanımını önermişlerdir. Yapılan çalışmada kullanılan SiO_2 nanopartiküllerin $650 m^2/g$ yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, araştırmacıların yaptığı çalışmalardaki düşüncelere dayanılarak, benzer yorumların yapılabileceği niteliğini kazandırmıştır.

4.3. Statik İç Basınç Deneyleri

$[\pm 55^o]_6$ sarım açılı filaman sarım BTP ve SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız ve eliptik yüzey çatlaklı kompozit boruların iç basınç deneyleri ASTM D1599-99 standardına göre gerçekleştirilmiştir.

$[\pm 55^o]_6$ sarım açılı filaman sarım BTP kompozit boruların standarda göre gerçekleştirilen statik iç basınç deneylerinde, iç basıncın etkisiyle boru çapı artarak şiştiği ve boyunda ise kısalmalar olduğu gözlemlenmiştir. Artan iç basınç ± sarım açısı yönlerindeki elyaf bantlarını teğetsel doğrultuda Şekil 4.13' de verilen şemadaki gibi yönlenmeye zorlamaktadır. Bu zorlamalar neticesinde ise elyaf dik ve paralel yönlerde($\sigma_\alpha \sin^2_\alpha = \sigma_x$, $\sigma_\alpha \cos^2_\alpha = \sigma_y$) kayma gerilmelerini oluşturmaktadır(Taşyürek, 2014; Zu, 2012; Samancı, 2004). Dik ve paralel yönlerde meydana gelen gerilmeler Şekil 4.13a'da şematik hale getirilmiştir. Şekil 4.13b'de şematik olarak gösterildiği gibi artan iç basıncın etkisiyle -55^o ve $+55^o$ sarım açısındaki elyaf bantlarını tıpkı bir makas formunda açılma hareketi gibi sürekli açmaya zorlamakta ve birbirinden uzaklaşmaktırmaktadır(Samancı 2004).



Şekil 4.13 a) Helisel elyaf yönleri(Zu, 2012), **b)** açılmaya zorlanan elyaf bantlarının hareketi ve debonding neticesinde oluşan elyaf kırılması.

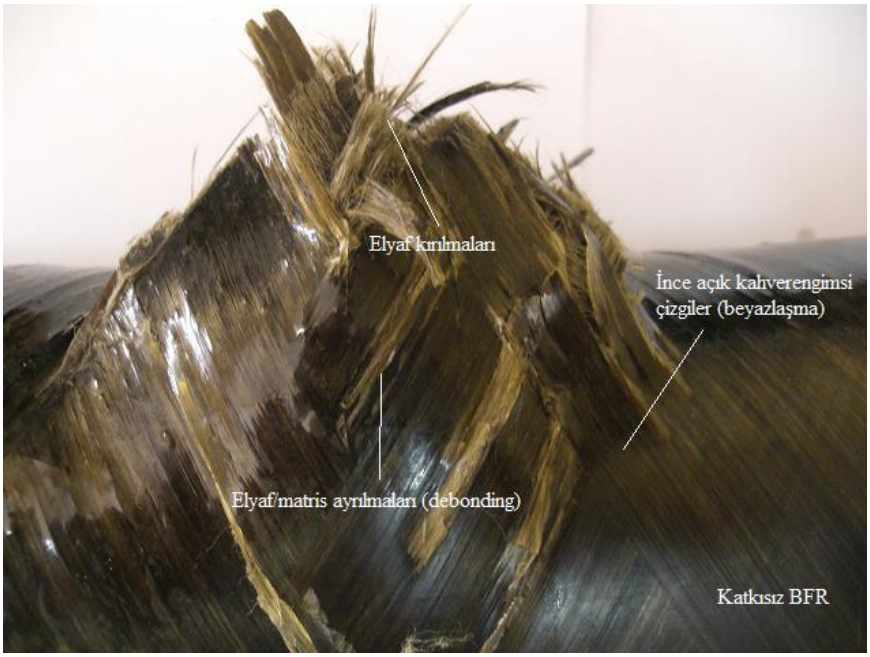
Makas formunda açılma zorlanan elyafların ara yüzeylerinde matris malzemenin birim şekil değişimine ve elyaf/matris adezyon dayanımına bağlı olarak elyaf doğrultularında "mikro çatlaklar" oluşmaktadır. Bu mikro çatlaklar elyaf bantlarının makas formunda sürekli açılmaya zorlanan hareketi sebebiyle artmakta ve elyafların doğrultularında yoğunlaşmaktadır. Elyaf doğrultusunda yoğunlaşan mikro çatlakların birleşmesiyle "makro çatlak" hasarları meydana gelmektedir. Literatürde "*debonding*" olarak ifade edilen elyaf/matris arayüzey ayrılması matris hasarları makro çatlakların oluşumuyla ortaya çıkmaktadır. "Delaminasyon" hasarı olarak ifade edilen tabakalararası ayrılma ve debonding hasarların oluşumları esnasında matris malzemenin şekil değiştirmesi ve ayrılmalar sonunda beyazımsı bir görünüm

almaktadır. Bazı kaynaklarda bu iki hasara beyazlaşma hasarıda denilmektedir(Martens ve Ellyin, 2000; Kaynak ve Mat, 2001). Bu hasarlar CTP filaman sarım kompozit borularda, saydam renklerinden dolayı rahatlıkla gözlemlenebilirken (Tarakçıoglu 1992; Kara, 2012; Taşyürek, 2014), BTP kompozitlerin renklerinin siyahımsı ve koyu kahverengimsi olmasından dolayı seçilmesi deneyler esnasında oldukça zor olmuştur. Debonding hasarları neticesinde elyaf demetleri arasına sızan akışkan yağ, elyafların sarım doğrultuları boyunca debonding hasarlarını büyütmekte ve açılmayı artırmaktadır. Aynı zamanda debonding hasarları, tabakalar arasında delaminasyon hasarlarınıda başlattığı düşünülmektedir (Wolodko, 1999; Meijer ve Ellyin, 2008; Tarakçıoğlu ve ark., 2001). BTP kompozit boruların orta bölgelerinde hasarların iç tabakalarda başlamasıyla tabakaları zayıflatarak bombeleşmelere sebebiyet vermektedir. Sürekli basıncı yükselen akışkanın oluşturduğu teğetsel gerilme zayıf düşen tabakayı eğilmeye zorlamaktadır ve sonunda patlama şeklinde elyaf kırılması sonuç hasarlarını oluşturmaktadır(Samancı ve ark. 2011). Bu hasar oluşumu Şekil 4.13'de görsel olarak tarif edilmiştir.

Çatlaksız $[\pm 55^o]_6$ sarım açılı filaman sarım BTP kompozit borularda elyafların sarım açısı doğrultusunda "debonding" hasarları neticesinde oluşan ince açık kahverengimsi çizgiler 375-410 MPa arasında görülebilmiş, patlamaya yakın 550 MPa teğetsel gerilmeden sonra elyaf doğrultusundaki bu çizgilerin yoğunlaşarak delaminasyona yol açtığı düşünülmüştür. Sonuç hasarı elyafların kopma esnasında çıkartmış olduğu seslerden de anlaşılacağı üzere birbirini izleyen bir dizi kırılmalar neticesinde yaprak şeklinde yırtılarak 595 MPa maksimum teğetsel hasar gerilmesinde ani patlama şeklinde meydana gelmiştir. Şekil 4.14'de çatlaksız BTP kompozit borununun patlama şeklinde meydana gelen hasar görüntüsü verilmiştir. Çizelge 4.1'de ise statik iç basınç deneyi sonrası elde edilen mekanik özellikler sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Katkısız BTP kompozit boruların mekanik özellikleri

Sarım Açısı (ϕ)	$\pm 55^o$
Teğetsel patlama gerilmesi, σ_T (MPa)	595
Elastisite modülü, E (GPa)	26.6
Poisson Oranı, $\nu = -\varepsilon_z / \varepsilon_x$	0.72



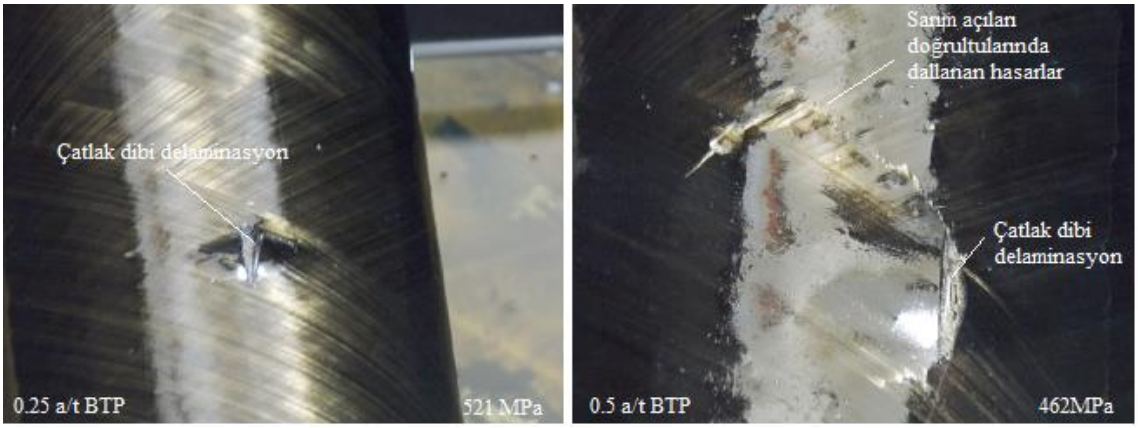
Şekil 4.14 BTP kompozit borunun statik iç basınç sonuç hasarı

0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı $[\pm 55^o]_6$ filaman sarım BTP kompozit borularda hasar mekanizmaları çatlaksız numuneler ile benzer özellikler taşımaktadır. Artan iç basıncın etkisiyle borunun çap artmakta ve boyu ise kısalarak şişmektedir. Şişmenin etkisiyle borunun en zayıf hasar bölgesini oluşturan çatlaklarda hasarlar başlamaktadır. Çatlak bölgesinde elyaf/matris arayüzey ayrılma matris hasarlarının belirtileri olduğunu düşündüğümüz, CTP kompozit borulardaki gibi net olmamak ile beraber açık kahverengi rengindeki elyaf doğrultularındaki çizgierin yoğunlaşmıştır. Kompozit boruların yüzeyi açılan eliptik yüzey çatlakları elyaf bantlarının sürekliliğinin kaybetmesine neden olmuştur. Bununla birlikte çatlakların bulunduğu tabakalarda çatlak derinliği oranlarına göre (0.25 a/t ve 0.5 a/t) lokal rijitlik kayıplarıda meydana gelmektedir(Wolodko, 1999). Artan iç basıncın etkisinde şişen BTP kompozit borular şişe boynu formunu almaktadır(Gemi, 2004; Samancı 2004). Kompozit boruların şişe boyunu formunu almaya başlamasıyla, kompozit borunun en zayıf tabakalarını oluşturan çatlak bölgeleri, tıpkı balonların şişirilmesi esnasında oluşan bombeleşmeler gibi bombe yapmaya çalışmaktadır. Rijitlik kaybına uğrayan çatlak bölgesindeki tabakalar eğilip, katlanmaya zorlanmaktadır(Şekil 4.15). Bunun neticesinde, çatlak diplerinde kompozitlerin matris hasarlarının son aşamasını oluşturan delaminasyon hasarı meydana gelmektedir. Statik iç basıncın artmasıyla çatlaklardaki kesilen

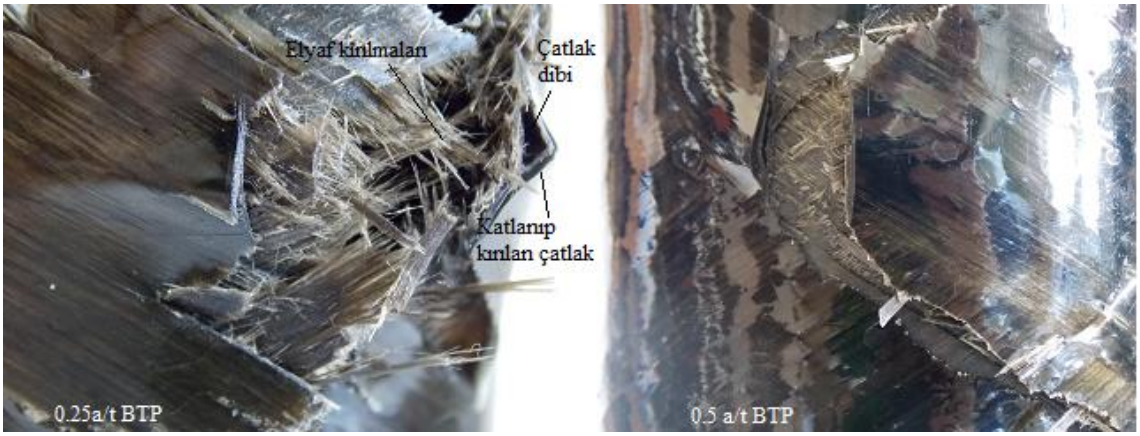
tabakaların eğilip katlanmasını dahada arttırarak(Şekil 4.16), bu tabakalarda elyafları kırmaya zorlamaktadır. BTP kompozit boruların 0.25a/t ve 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı bölgelerinde gerilme yığılmalarının artmasıyla bir dizi birbirini takip eden elyaf kopmaları neticesinde elyaf kırılması sonuç hasarı meydana gelmektedir(Şekil 4.17).



Şekil 4.15 Eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların statik iç basınç testleri esnasında oluşan hasarlar.

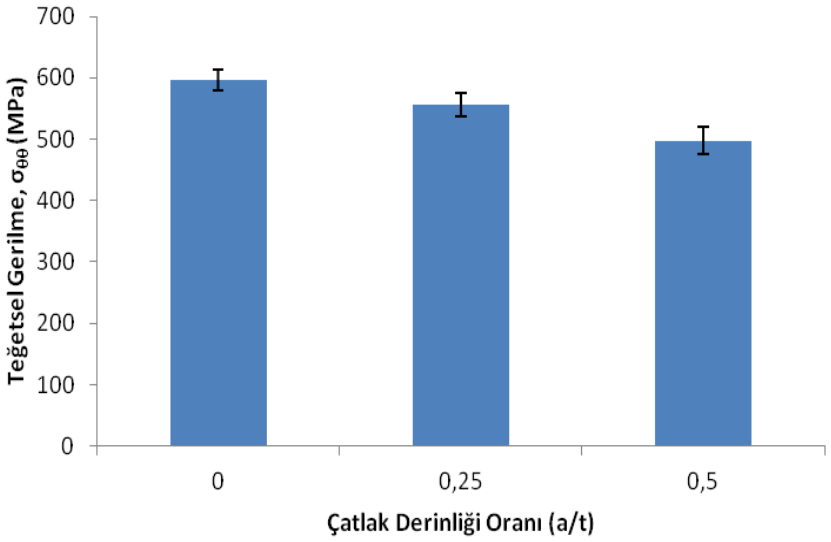


Şekil 4.16 Artan statik iç basınçla beraber eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların çatlak bölgesinde ilerleyen hasarlar.



Şekil 4.17 Eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların statik iç basınç sonuç hasarları.

0.25 a/t çatlak derinliği oranında patlama sonuç hasarı 556.9 MPa maksimum teğetsel gerilmede, 0.5 a/t çatlak derinliği oranında ise 497.8 MPa maksimum teğetsel gerilmede oluşmuştur. Şekil 4.18'deki grafikte çatlaksız ve çatlaklı $[\pm 55^o]_6$ sarım açılı filaman sarım BTP kompozit boruların patlama şeklinde sonuç hasarlarının teğetsel gerilmeleri grafik halinde sunulmuştur.

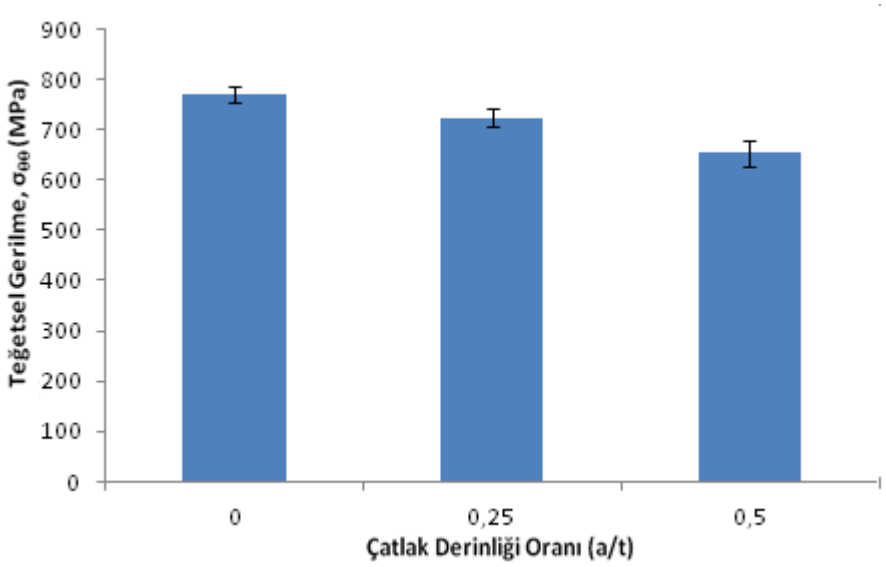


Şekil 4.18 Çatlaksız ve çatlaklı $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların patlama teğetsel gerilmeleri

Tarakçıoğlu (1992) yapmış olduğu tez çalışmasında çatlaksız $\pm 55^o$ CTP filaman sarım kompozit boruların statik iç basınç teğetsel gerilmesini 438,7 MPa, Kara (2012) ve Taşyürek (2014) ise 489 MPa olarak tespit etmişlerdir. Yapmış olduğumuz çalışmamızda çatlaksız $\pm 55^o$ BTP kompozit borular, Tarakçıoğlu'nun çalışmasındaki CTP kompozit borulardan %35'lik ve Taşyürek ve Kara çalışmalarındaki CTP kompozit borularından %21'lik daha fazla teğetsel gerilme değerleri sergilemiştir. Pavloski ve ark. (2007) $\pm 55^o$ BTP kompozit tüplerin statik iç basınç teğetsel gerilmelerinin CTP kompozit tüplerden minimum %15'lik daha fazla teğetsel gerilme değerini gösterdiğini çalışmalarında beyan etmişlerdir. CTP ile yapılan çalışmalar ile yapmış olduğumuz BTP kompozitlerin patlama hasarı teğetsel gerilme sonuçları mukayese edildiğinde, literatürü destekler nitelikte statik iç basınç sonuç hasarının mininum % 15 'lik teğetsel gerilme artışından daha yüksek olduğu görülmektedir.

SiO_2 nanopartikül katkısıyla çatlaksız ve eliptik yüzey çatlaklı $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların maksimum teğetsel gerilmelerinde Şekil 4.19'da görüldüğü gibi

ilerlemeler kaydedilmiştir. Çizelge 4.2'de statik iç basınç testi sonrası elde edilen mekanik özellikler sunulmuştur.



Şekil 4.19 SiO_2 nanopartikül katkısıyla çatlaksız ve çatlaklı $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların teğetsel gerilmeleri.

Çizelge 4.2 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların mekanik özellikleri

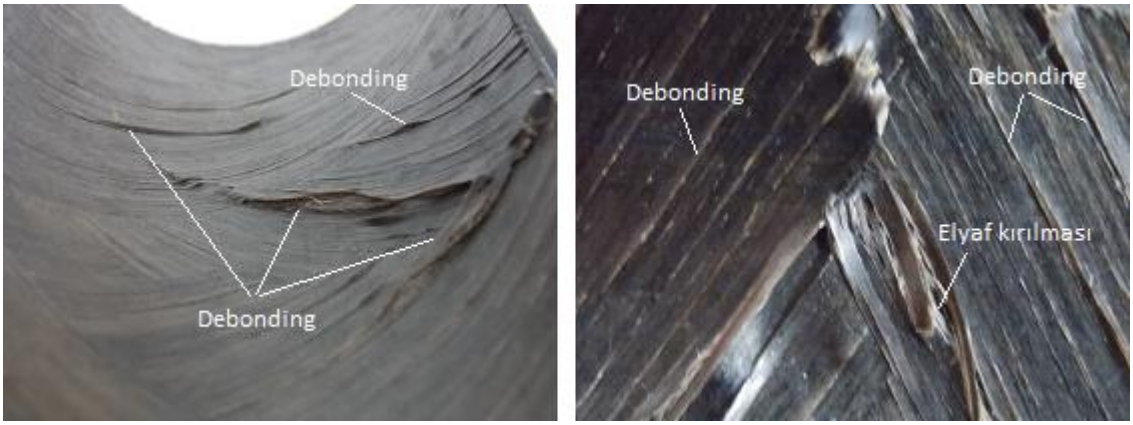
Sarım Açısı (ϕ)	$\pm 55^o$
Teğetsel patlama gerilmesi, σ_T (MPa)	769
Elastisite modülü, E (GPa)	31.4
Poisson Oranı, $\nu = -\varepsilon_z / \varepsilon_x$	0.708

SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit borularda statik iç basınç testi uygulanırken, 733 MPa teğetsel gerilmeye kadar boyca kısalmaya, çapta ise şişmeye maruz kalmıştır. Bu teğetsel gerilme değerine kadar, artan iç basınca maruz kalan SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda, "debonding" elyaf/matris arayüzey ayrılmaları ve "delaminasyon" tabakalararası ayrılma hasarları meydana gelmektedir. Katkılı BTP kompozit borularda bombeleşmenin en fazla olduğu orta bölgelerde bu matris hasarları özellikle hasarların başladığı iç tabakalarda yoğunlaştığı düşünülmüştür. Dolayısıyla matris hasarına uğrayan bu tabakalar, o bölgeyi zayıflatarak, sürekli artan iç basınca karşı tabakaların direncini düşürdüğüne yol açtığı şeklinde yorumlanmıştır.

Uygulanan bu basınç kuvvetine karşı zayıf düşen bölge, SiO_2 nanopartikülün önceden izahatı yapılan etkileri neticesinde eğilmeye maruz kalmıştır. Bu teğetsel gerilmeden sonra Şekil 4.19'de görüldüğü gibi üç nokta eğilme deneyindeki numune gibi eğilerek boru şekil değiştirmiştir. Eğilen borunun bomboleşen orta kısımlarına yakın bölgelerde maksimum teğetsel hasar gerilmesinin ortalama 769.2 MPa değerine ulaşmasıyla akışkan jeti şeklinde sonuç hasarı meydana gelmiştir. Akışkan jeti matris hasarı, "debonding" matris hasarlarının tabaklarda birleşmesiyle meydana gelen ve iğne ucu deliği diye tabir edilen delinmeyle ortaya çıkmaktadır (Mertiny ve Gold, 2007; Gemi ve ark., 2009; Martins ve ark., 2012). Katkılı BTP kompozit boruların eğilen alt kısımlarının iç tabakalarında ise "debonding", "delaminasyon" ve küçük çaplı elyaf kırılmaları (Şekil 4.20) tespit edilirken, borunun dış tabakalarında ise bu hasarlar görülmemiştir. Katkısız BTP kompozit borularda olduğu gibi patlama şeklinde elyaf kırılması sonuç hasarı meydana gelmemiştir.



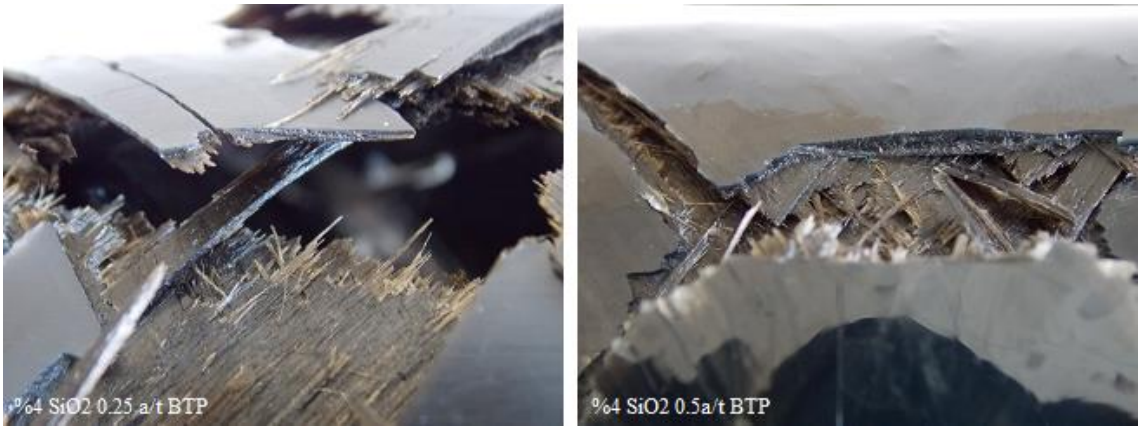
Şekil 4.20 Çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boru ve akışkan jeti hasarı



Şekil 4.21 SiO_2 katkılı BTP kompozit borunun eğilen tabakalarında meydana gelen hasarlar

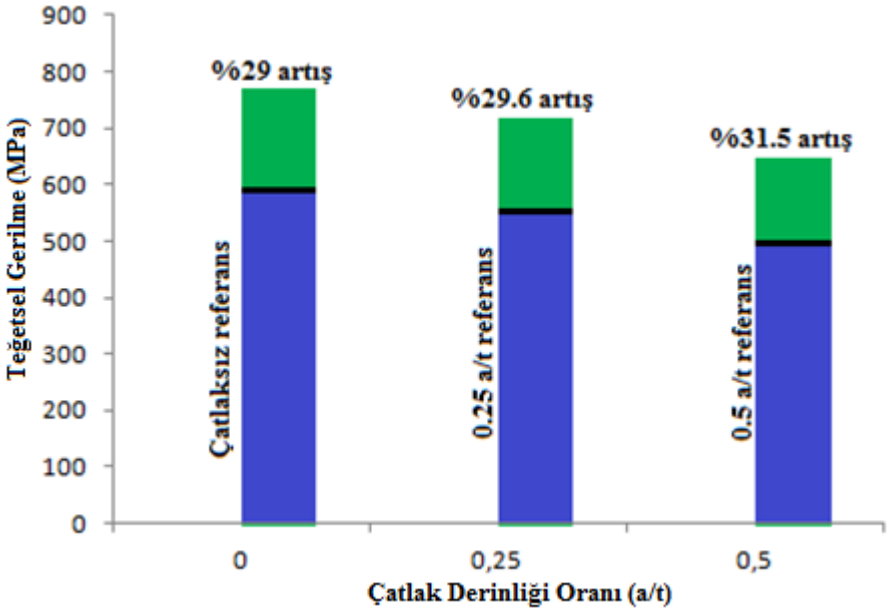
SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 ve 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda sonuç hasarları katkısızlarda olduğu gibi çatlak bölgelerinde elyaf kırılma

şeklinde meydana gelmiştir. %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda çatlak bölgelerinde meydana gelen hasar gelişimleri benzerdir. Artan statik iç basınçla beraber çatlak bölgelerinde "debonding" elyaf/matris ayrılma hasarlarını takiben, çatlağında kenar etkisiyle (Wolodko, 1999), çatlak dibinde hasarlar "delaminasyon" şeklinde ilerlemektedir. Bu durum katkısız eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerde Şekil 4.16'da gözlemlenilmiştir. Gerilme yığılmalarının artmasıyla çatlağın her iki ucundan sarım açıları doğrultularında dallanarak hasarın ilerlediği görülmüştür. SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda sonuç hasarları ani patlamayla elyaf kırılması şeklinde çatlak bölgesinde Şekil 4.22'de görüldüğü gibi meydana gelmiştir. SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlama neticesinde elde edilen maksimum teğetsel gerilmeleri sırasıyla 722.6 ve 653.1 MPa olmuştur.



Şekil 4.22 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borunun statik iç basınç patlatma hasarları.

SiO_2 nanopartikül katkısıyla çatlaksız, 0.25 ve 0.5 a/t çatlak derinliği oranlarındaki $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların sonuç hasarlarındaki teğetsel gerilmelerinde sırasıyla; %29, %29.6 ve %31.5 artışlar gözlemlenmiştir. SiO_2 nanopartikül katkısıyla elde edilen bu artışlar, çatlaksız ve çatlaklı katkısız kompozit boruların patlama teğetsel hasar gerilmeleri referans alınarak Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların % artışları

Wei ve ark. (2011) çalışmalarında silan ile modifiye edilmiş %5 SiO_2 nanopartikülleri epoksiye katmışlardır. Bazalt elyafları bu karışımla filaman sarım yöntemi tekniğinde olduğu gibi ıslatıp kaplayarak nanokompozitleri oluşturmuşlardır. %5 SiO_2/Bazalt/Epoksi nanokompozitlerin bazalt elyaf bantların çekme dayanımlarında %30'luk bir artış elde ederlerken, bazalt elyaf bantlarında tabakalararası kayma dayanımda ise %15'lik artış tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile çalışmamız benzerlik göstermekte olup, aynı şekilde SiO_2 nanopartikül ile bazalt elyaflar ıslatılıp kaplanmış ve Wei ve ark. çalışmasından farklı olarak ± 55^o sarım açısında kompozit borular üretilmiştir. BTP kompozit borular üzerinde, SiO_2 nanopartikül ile kaplanan bazalt elyaflar Şekil 4.23'de olduğu gibi seçilebilmektedir. Üretim yönteminin yanında Wei ve ark. tarafından yapılan çalışma ile yapmış olduğumuz çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar benzerlik göstermektedir. Çalışmamızda bu yakın değerler %4 SiO_2 nanopartikül katkı oranında elde edilirken, Wei ve ark. ise %5 katkı oranında elde etmişlerdir. Bu farklılığın kullanılan SiO_2 nanopartiküllerin özgül yüzey alanları, geometri, boyutları ve üretim metotlarının farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

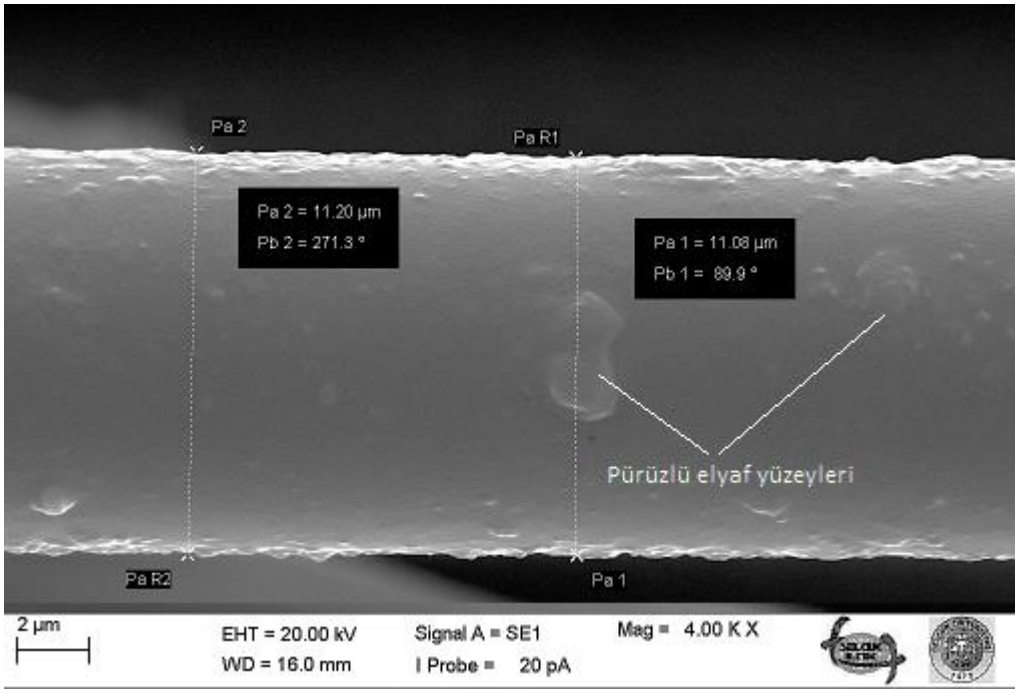
SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların statik iç basınç deneyleri sonuçlarına bakıldığında, %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla maksimum teğetsel gerilme artışının yanında elastikiyet modülününde 4.8 GPa'lik artış sergilendiği Çizelge

4.2'de görülmektedir. Dolayısıyla nanopartikül ilavesinin BTP kompozit boruların rijitliklerini arttırdığı gözlemlenmiştir. SiO_2 nanopartikül katkılı statik iç basınç maksimum teğetsel gerilmelerindeki bu iyileştirmelerde, ön deneyleri oluşturan SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin sonuçlarında tartışıldığı gibi matris malzemelerin çekme dayanımları, rijitlikleri, şekil değiştirmeleri, kırılma tokluğu artışına etki eden kırılma mekanizmaların etkin olduğu yorumu yapılmıştır. SiO_2 nanopartiküllerin BTP kompozit boruların maksimum teğetsel gerilmelerindeki artışa sebep olan mekanizmalar şu şekilde açıklanmıştır.

SiO_2 nanopartiküller matris malzemede mikroçatlak oluşumunun geciktirmesi, çatlakların tutulması, çatlakların nanosilikalar önünde yön değiştirerek dallanması, nanosilika/ matris arayüzey ayrılmaları, silan modifikasyonu ile sağlanan iyi bir dağılım, arayüzey etkileşimi ve lokal plastik deformasyonlar neticesinde katkısız epoksiye kıyasla şekil değişimi, çekme dayanımı ve kırılma tokluklarında artışlar elde edilmiştir. % şekil değişiminin artması, artan iç basınç ile birlikte ± sarım açısı yönlerindeki bantlara daha fazla makas hareketi imkânı sağladığı kanısıa varılmıştır. SiO_2 nanopartiküller, mikro çatlak oluşumundaki etkilerde göz önüne alınarak ± sarım açısı yönlerindeki bantların makas formu şeklindeki hareketleri esnasında elyaf/matris arayüzeylerinde meydana gelen "debonding" ve "delaminasyon" hasarlarını geciktirdiği düşünülmüştür. Statik iç basınç altında çatlaksız ve katkısız BTP kompozit borularda etkin hasar tipi olan elyaf kırılması hasarının yerini, çatlaksız BTP kompozit borularda SiO_2 nanopartikül katkısıyla "debonding" ve "delamiasyon matris hasarı almış ve sonuç hasarı olarak akışkan jeti meydana gelmiştir. Mertiny (2012) $[\pm 60^o]_3$ BTP kompozit borular üzerine yapmış olduğu statik iç basınç testlerinde iki farklı matris malzemenin değişen sıcaklıklar ile beraber değişen şekil değişimlerinin sonuç hasarı oluşumu üzerine etkisini incelemiştir. Bismalin matris malzemenin epoksi karşısında artan sıcaklık birlikte daha fazla şekil değişimi gösterdiğini tespit etmiş ve akışkan jeti oluşumunun yüksek maksimum teğetsel gerilme değerlerinde meydana geldiğini gözlemlemiştir. Sarım açılarının etkileri göz önünde bulundurulmadan (Salavatian ve Smith, 2012) aynı sarım açısı için Mertiny yüksek şekil değişimi gösteren matris malzemelerin filaman sarım kompozit borularda kırılma tokluğunun artışını sağlayarak, matris hasarlarını geciktirdiğini ve matris hasarlarını etkin hasar tipi haline getirdiğini ifade etmiştir. Yapmış olduğumuz çalışmada BTP kompozitlerin matris malzemesine SiO_2 nanopartikül katkısıyla, bir sonraki başlık altında incelenen halka çekme

deneylerinde de gözlemlenildiği gibi şekil değişimi arttırılmış ve Mertiny'nin bulguları ile örtüştüğü gözlemlenilmiştir.

SiO_2 nanopartiküllerin BTP kompozitlerin statik iç basınç testleri neticesinde, maksimum teğetsel gerilmelerindeki artışına bir etken olarak, nanopartiküllerin bazalt elyaf yüzeylerine yapışarak, pürüzlü olan yüzeylerini daha da pürüzlü hale getirmesi olduğu düşünülmektedir. Literatür incelemelerinde, bazalt elyafların yüzeylerinin, cam elyaf ve karbon elyaflara göre pürüzlü olduğu tespit edilmiştir (Demirci ve ark. 2014, Wei ve ark. 2011). Şekil 4.24'de tez çalışmasında kullanılan bazalt elyafların pürüzlü yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 4.24 Pürüzlü bazalt elyaf yüzeyleri(Demirci ve ark. 2014).

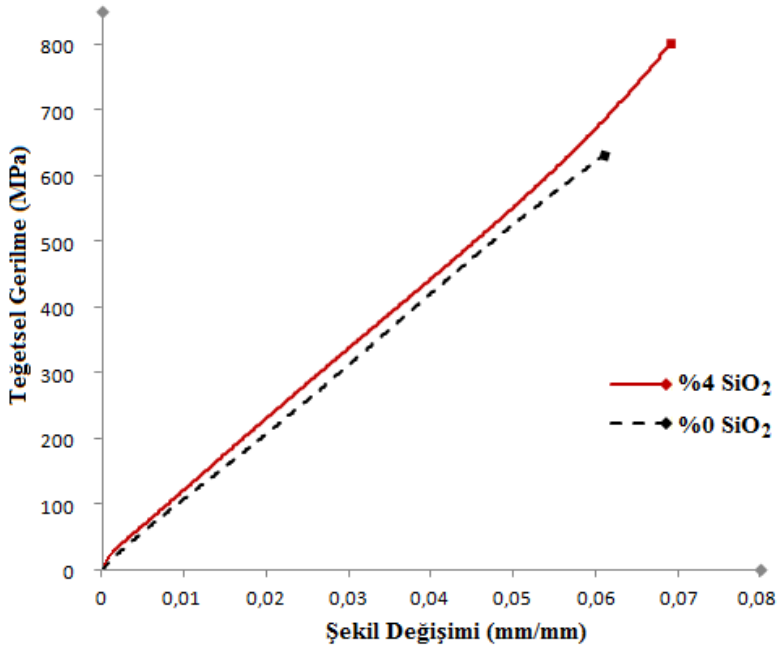
Elyafların yüzeylerinin pürüzlü olması matris malzeme ile arayüzeylerde mekanik kitlitlemelere neden olmaktadır. Dolayısıyla bu mekanik kilitlemeler, diğer elyaflara kıyasla arayüzeyde daha iyi bir adezyon sağlamakta ve adezyon dayanımını arttırmaktadır(Demirci 2014; Wei ve ark. 2011). Özgül yüzey alanı yüksek olan SiO_2 nanopartiküller, elyaf ile matris arayüzeylerinde arayüzey alanını arttırarak daha da pürüzlü hale getirdiği yorumlanmıştır. Böylece arayüzeylerde mekanik kilitlemeler çoğalmakta ve iyi bir arayüzey oluşumu sağlayarak hem matris hasarlarının oluşumunu geciktirmekte hemde sonuç hasarına neden teğetsel gerilmeleri arttırmaktadır. Bunlara

ilaveten bazalt elyafların, elyaf çaplarının (11-13µm) düşük olması aynı demet (1000m/gr) içinde geçen elyaf sayısını arttırmaktadır. Dolayısyla aynı demette geçen elyaf sayısının, diğer cam elyaflara (17µm) göre fazla olması daha fazla arayüzey alanını oluşturmaktadır. Bu durum elyaf çapı büyük olan elyaflara karşı avantaj sağlamaktadır(Wu ve ark. 2010, Deak ve Czigany 2010). Elyafların arayüzey alanlarının fazla olması SiO_2 nanopartiküllerin etkinliğini daha da çok arttıracağı düşünülmektedir. Silan ile fonksiyonelleştirilen SiO_2 nanopartiküllerin, silan ile kaplı olan bazalt elyafların yüzeylerinde Si-O-Si kimyasal bağlanmalarını oluşturduğunu çalışmalarında ifade eden Wei ve ark. (2011), yapılan çalışmada da benzer etkiyle karşılaşılabileceği yargısını oluşturmuştur. Meng ve ark. (2014) %4-4.4 SiO_2 katkı oranlarında epoksi matrisin adezyon tokluğunu %7.3 kat arttırmayı başardıklarını çalışmalarında belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, adezyon tokluğu testleri yapılmamıştır, fakat adezyon tokluğunda ciddi oranda artışların olabileği düşüncesini oluşmuştur.

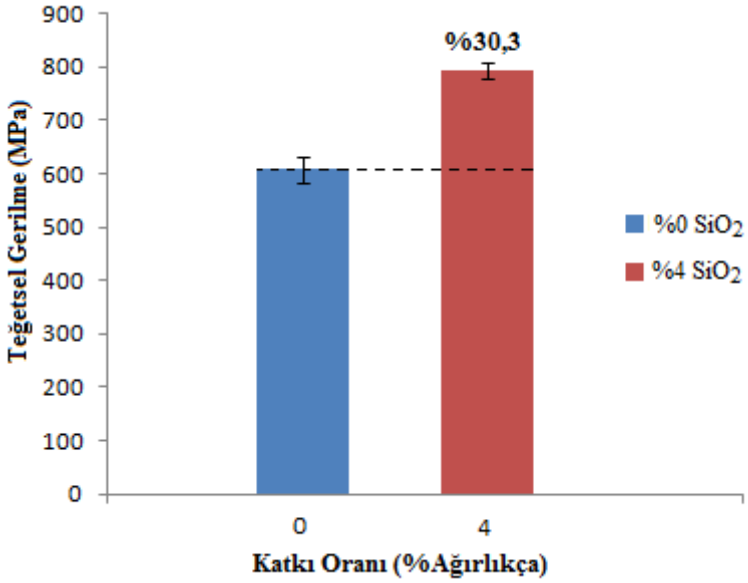
4.4. Halka Çekme Deneyleri

Halka çekme deneyleri ASTM D2990-13 stardadına uygun olarak, hazırlanan katkısız ve SiO_2 nanopartikül katkılı $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit numuneler test edildi. Elde edilen maksimum teğetsel gerilme sonuçları ve elyaf kırılması sonuç hasarına uğrayana kadar meydana gelen şekil değişimi Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27'de verilmiştir.

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilen halka çekme deneyi teğetsel gerilme değerlerine bakıldığında, değerlerin katkısız BTP kompozit numunelerde ortalama 610 MPa ve SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozitlerde ise 791 MPa civarında olduğu görülmüştür. Halka çekme deneyleri neticesinde katkısız ve katkılı BTP kompozitlerin maksimum teğetsel hasar gerilmeleri mukayese edilmiş ve grafik olarak Şekil 4.25'de verilmiştir.

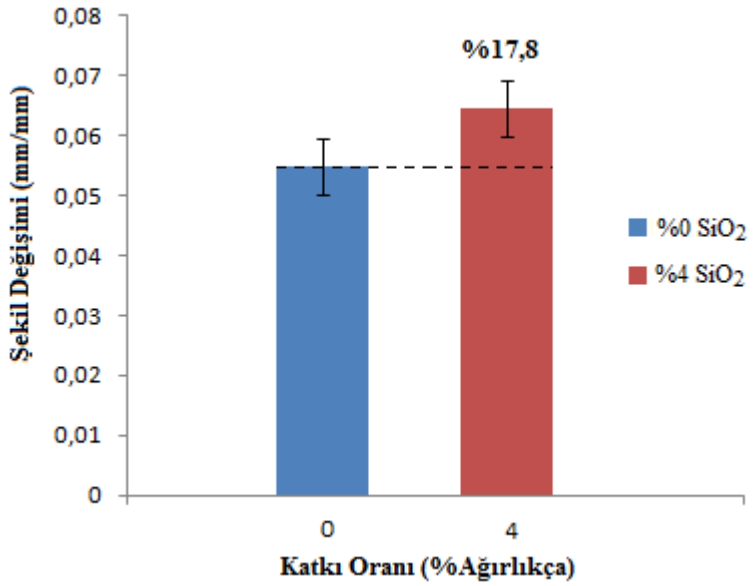


Şekil 4.25 Katkılı ve katkısız BTP kompozit halka numunelerin teğetsel gerilme-şekil değişimi grafiği



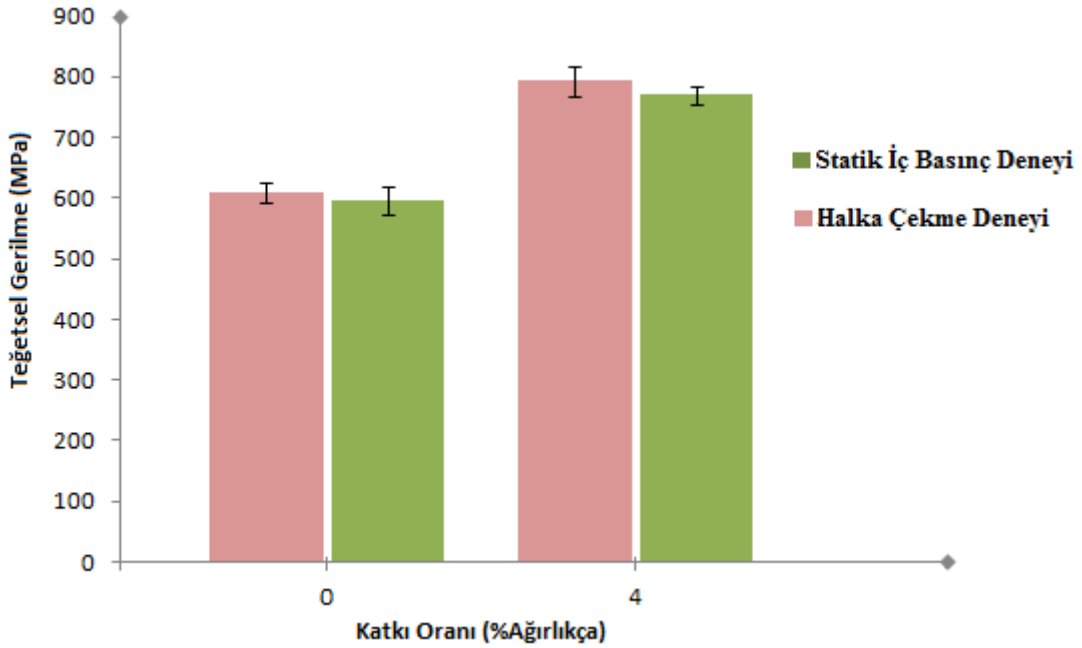
Şekil 4.26 Katkılı ve katkısız BTP kompozit halka numunlerin teğetsel gerilme-katkı oranı test sonuçları

Grafikten anlaşıldığı üzere SiO_2 nanopartikül katkısı BTP kompozit borulara, yaklaşık %30.3'lük maksimum teğetsel gerilmede artış sağlamıştır. SiO_2 nanopartiküller, sadece teğetsel gerilmede değil, aşağıda Şekil 4.27'de verilen birim şekil değiştirmede de %17.8'lik artış ile etkisini göstermiştir.



Şekil 4.27 Katkılı ve katkısız BTP kompozit halka numunelerin birim şekil değişim grafiği

Halka çekme deney sonuçları ile statik iç basınç testi sonuçlarını Şekil 4.28'de verilen grafik ile izah ve mukayese edilmeye çalışıldı.



Şekil 4.28 Statik iç basınç ve halka çekme deneylerinin mukayesesi

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi katkısız BTP kompozit numunelerin halka çekme deneyleri neticesinde elde edilen ortalama maksimum teğetsel hasar gerilmelerin, statik iç basınç testi neticesinde elde edilen değerlerden 15MPa fazla olduğu görülmüştür. Şekil 4.28'deki verilen standart sapma hata aralıklarının birbirini uyuşmasından dolayı,

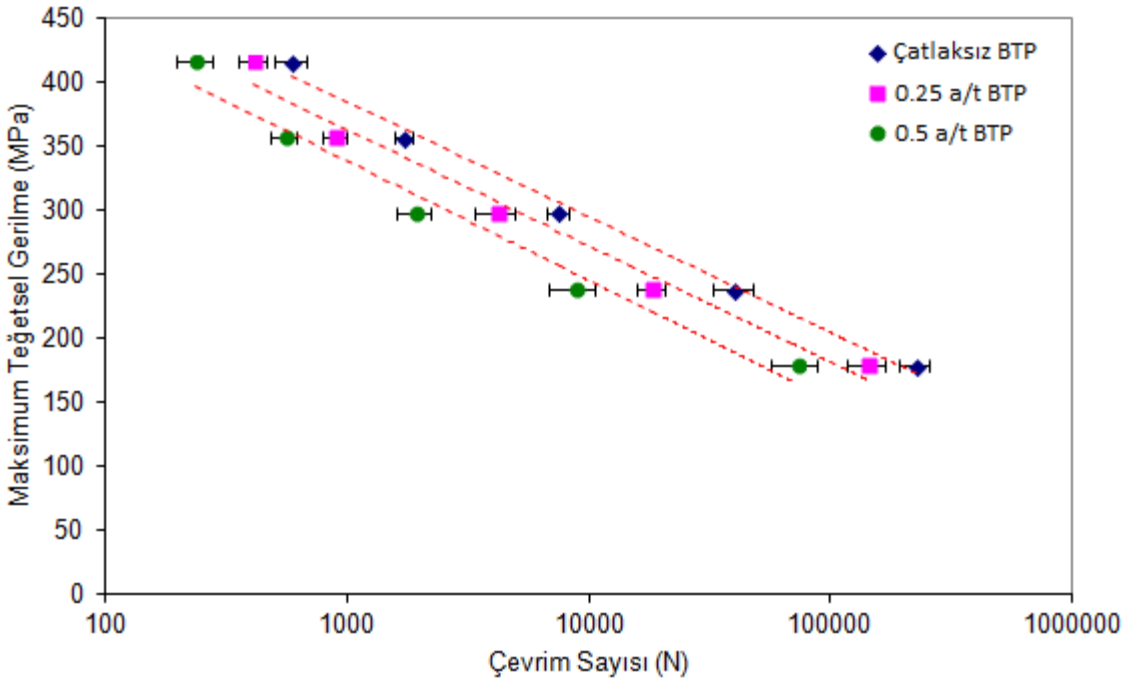
farkın tolero edilebilir olduğunu düşünülmüştür. SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozitlerin halka çekme deneyi ortalama maksimum teğetsel hasar gerilmesi, statik iç basınç testinden yaklaşık 31MPa daha yüksek değer sergilemiştir. SiO_2 nanopartikül katkısı, statik iç basınç testi hasar teğetsel gerilmesinde %29'luk artış sağlarken, halka çekme deneyinde %30.3'lük bir artış sağlamıştır. Halka çekme deneyindeki Bu %1.3'lük fazla artışın her iki test sonucunda meydana gelen sonuç hasarlarının farklılığından kaynaklandığı yorumlanmıştır. Statik iç basınç testinde katkılı BTP kompozit boruların artan basınç etkisiyle şekil değişimine maruz kalıp eğilerek bükülmekte ve eğilen borunun bombeleşen kısmında birden fazla ani su jeti hasarları meydana gelmektedir. Ani su jetlerinin akışkanının iç basıncını düşürmesinden ötürü, elyaf kırılması sonuç hasarları meydana gelmemiştir. Gemi (2004) ±45 sarım açısına sahip CTP kompozit borularda iç basıncın artmasıyla eğilmeye maruz kaldığı ve eğilen borunun bombeleşen kısmında su jeti hasarları meydana gelmesinden dolayı elyaf kırılması sonuç hasarına ulaşamadığını aynı şekilde ifade etmiştir. Halka çekme deneyinde ise sonuç hasarı elyaf kırılması şeklinde olmaktadır. Netice olarak katkılı BTP kompozit numunlerin halka çekme deneyinde ortalama hasar teğetsel gerilmelerinin yüksek olmasının doğal olabileceği kanısı oluşmuştur. Katkılı BTP kompozit numunelerin halka çekme deneylerinin ortalama sonuç hasarı teğetsel gerilmesi yüksek olmasına rağmen standart sapma hata aralıklarında kesişmelerin olduğuda vurgulanmıştır. Tarakçıoğlu (1992) ± 55^o sarım açısına sahip filaman sarım CTP kompozitlerin statik iç basınç ve halka çekme deneylerinde %0.9'lık bir farkı çalışmalarında tespit etmiştir. Bu sarım açısındaki fark ciddi bir fark olmamak ile birlikte, bu durumu halka numunelerin kesim esnasında meydana gelen kenar etkisine bağlamıştır. Taşyürek (2014) Katkısız CTP, %0.5 KNT ve %1 KNT katkılı CTP kompozit borulara statik iç basınç ve halka çekme deneylerini uygulamışlardır. Taşyürek'in çalışması incelendiğinde KNT katkı oranının artmasıyla her iki deney arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. KNT'lerin katkı oranının artmasının kenar etkisini azalttığı ve KNT'lerin adezyon etkisi oluşturduğu düşüncesini uyandırmıştır. Böylelikle SiO_2 nanopartiküllerinde BTP kompozit halka çekme numunelerinde aynı etki yaptığı yorumlanmıştır. Yapılan çalışmalar temel alınarak, çalışmamızda kenar etksini azaltmak maksadıyla halka numuneleri kesme taşı ve parmak freze kullanılarak kesilmiştir. Bunlara ilaveten kenarlara parlatma işlemi uygulanmış ve kenarlara epoksi sürülmüştür. Halka çekme numuneleri test esnasında sadece teğetsel gerilmelere maruz kalırken, statik iç basınç deneyinde BTP kompozit borular teğetsel gerilmenin yanında,

eğilmeye maruz kaldığından kayma gerilmeleride meydana gelmektedir. Dolayısıyla her iki deneylerde meydana gelebilecek farklılıklar kenar etkisinin yanında bu sebepten dolayıda kaynaklanabilir yorumu yapılmıştır. Statik iç basınç patlama testleri ile halka çekme testleri mukayese edildiğinde, maksimum teğetsel gerilmeler arasındaki farklılıkların fazla olmaması, halka çekme testlerinin statik iç basınç testlerinin yerine pratik olarak kullanılabileceğine sonucuna varmamızda yardımcı olmuştur.

4.5. Yorulma Deneyleri

4.5.1. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız BTP boruların iç basınç yorulma deneyleri

$[\pm 55^{o}]_6$ filaman sarım BTP kompozit boruların çatlaksız ve 0.25, 0.5 a/t çatlak derinliği oranlarında eliptik yüzey çatlaklı maksimum teğetsel gerilme – ömür (S-N) diyagramları Şekil 4.29'de çizilmiştir.



Şekil 4.29 Çatlaksız ve çatlaklı BTP kompozit boruların S-log N grafiği.

Çatlaksız ve çatlaklı BTP kompozit boruların S-log N eğrileri birbirleriyle paralellik göstermiştir. Numunelerin birbirleriyle paralel seyir göstermesinde, eliptik yüzey çatlaklı numunelerin çatlak bölgesi altında kalan tabakalarının çatlaksız numuneler gibi yorulma davranışı gösterdiği şeklinde yorumlanmıştır. Bu durumda ±6

tabakalı 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boru yaklaşık ±4.5, 0.5 a/t çatlaklı BTP kompozit boru ise ±3 tabakalı boru gibi yorulma davranışı sergilediği düşünülmüştür(Tarakçıoğlu, 1992; Samancı, 2004, Taşyürek, 2014).

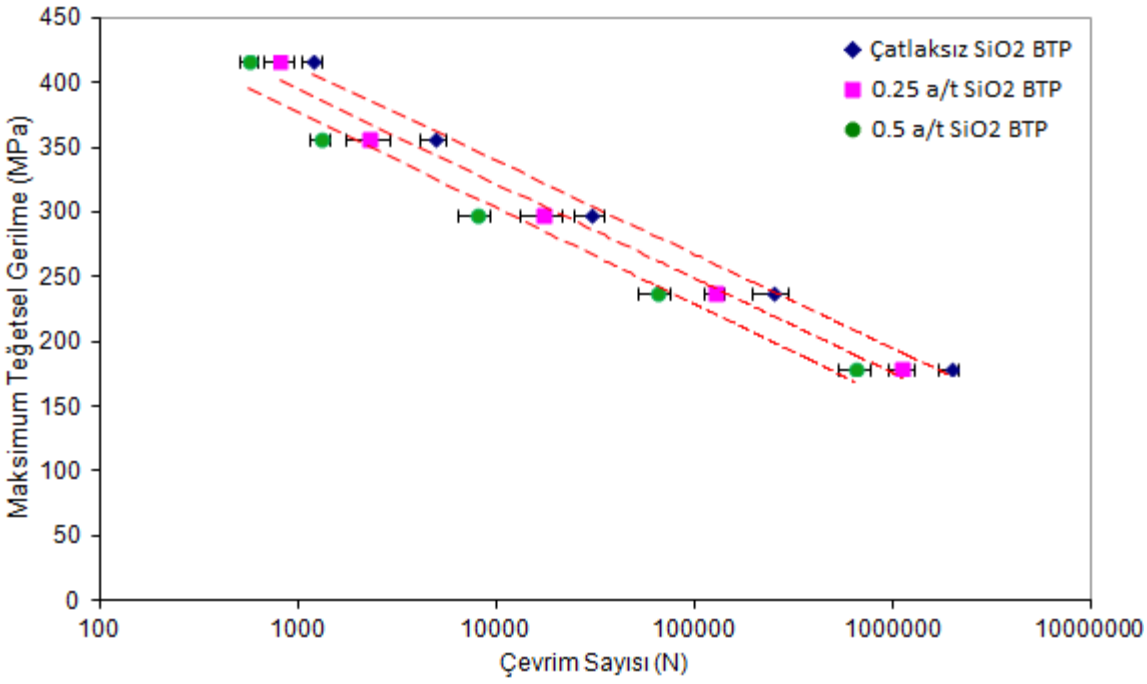
Çatlaksız BTP kompozit boruların 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ maksimum teğetsel gerilmelerinde(gerilme oranlarında) sırasıyla, 223969, 38631, 7228, 1569 ve 589 ortalama yorulma ömürleri (Çevrim Sayısı, N) elde edilmiştir. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda belirtilen maksimum teğetsel gerilmelere göre sırasıyla ortalama 142388, 18105, 4171, 892 ve 411 N bulunmuştur. 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı numunelerde ise yorulma ömürleri 71745, 8884, 1911, 552 ve 236 N değerlerini almıştır. Eliptik yüzey çatlaklı numunelerde yorulma deneyleri neticesinde sonuç hasarları açılan çatlaklar ile zayıf hale getirilen çatlak bölgesinde meydana gelmiştir (Şekil 4.24, 4.25, 4.26). Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız kompozit boruların çevrim sayıları Şekil 4.24'de sunulan S-N grafiğinde verilmiştir. Colombo ve ark.(2012) BTP kompozit plakalara 0.44-0.6σ maksimum teğetsel gerilme aralığında 12191-1032N aralığında yorulma ömürlerini tespit etmişlerdir. Aynı yorulma şartlarında 0.4σ maksimum teğetsel gerilmesinde ise ortalama 40957N yorulma ömrünü bulmuşlardır. Parnas ve ark.(2007) tarafından Massachusetts Üniversitesi NETCR63 kodlu proje kapsamında RTM yöntemi ile üretilen BTP kompozit plakaların 0.5σ maksimum teğetsel gerilme değerinde tıpkı Colombo ve ark. çalışmalarında olduğu gibi yapmış olduğumuz çalışmadaki değerlere paralellik gösteren yorulma ömürleri elde etmişlerdir.

S-N grafiği ile ilgili yapılan açıklamalara ilaveten, gerilme oranı arttıkça yorulma ömrünün logaritmik olarak azaldığı Şekil 4.23'de görülmektedir. Maksimum teğetsel gerilme artışı, kesitte ilave deplasman değişimine neden olmaktadır. Bununla birlikte, tekrarlı statik iç basıncın etkisiyle zorlanan tabakalarda uniform olmayan gerilmeler meydana geldiği düşünülmektedir. Bu gerilmeler tabakalarda çatlak oluşumunu ve gelişimini hızlandırmaktadır. Hasarların hızla gelişimi, hasar kümeleşmesini arttırarak BTP kompozit borunun rijitliğinin düşmesine yol açmaktadır(Martens ve Ellyin, 2000). Netice olarak, maksimum teğetsel gerilmenin artışı ile tabakalarda hasarların kümeleşip yoğunlaşmasıyla, yorulma ömrünü azalttığı kanısına varılmıştır(Kujawski ve ark., 1996; Kujawski ve ark., 1998; Kaynak ve Mat, 2001; Joseph ve Perreux, 1994). Yorulma ömrü grafiğinde S-N eğrilerinin, artan maksimum teğetsel gerilmeler ile logaritmik eğim göstermesinde, etkin hasar

modlarının, yüksek, orta ve düşük maksimum teğetsel gerilmelere bağlı olarak değişik göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir(Colombo ve ark., 2012).

4.5.2. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP boruların iç basınç yorulma deneyleri

$[\pm 55^o]_6$ filaman sarım %4 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların çatlaksız ve 0.25, 0.5 a/t çatlak derinliği oranlarında eliptik yüzey çatlaklı maksimum teğetsel gerilme – ömür diyagramları (S-log N) Şekil 4.30'de çizilmiştir. Çatlaksız ve çatlaklı %4 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların S-N eğrileri nanopartikül katkısız BTP kompozitlerde gözlemlenildiği gibi birbirleriyle paralellik göstermiştir. Numunelerin birbirleriyle paralel seyir göstermesinde, çatlaklı numunelerin çatlak altında kalan tabakalarının çatlaksız numuneler gibi yorulma davranışı sergilemesinden kaynakladığı yorumlanmıştır(Samancı, 2004; Taşyürek, 2014).



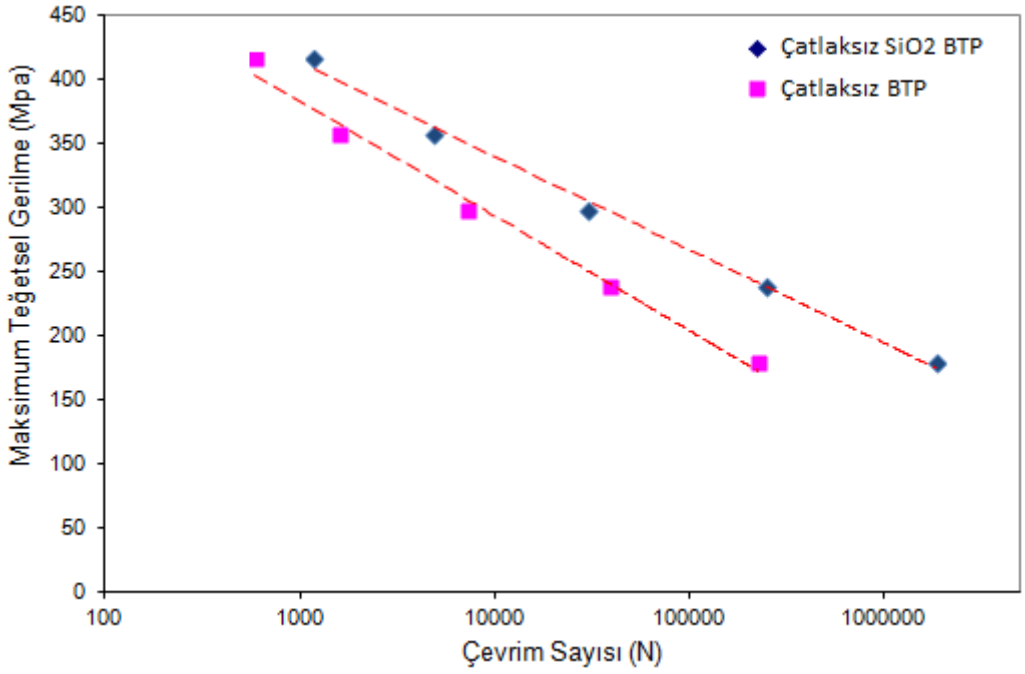
Şekil 4.30 Çatlaksız ve çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların S-log N grafiği

Çatlaksız SiO_2 katkılı BTP kompozit boruların 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ maksimum teğetsel gerilmelerinde(gerilme oranları) sırasıyla, 1838447, 247829, 29838, 4815 ve 1181 ortalama yorulma ömürleri (N) elde edilmiştir. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 katkılı BTP kompozit borularda belirtilen maksimum teğetsel gerilmelere göre sırasıyla ortalama 1125059, 126450, 17319, 2301 ve 808N yorulma ömürleri

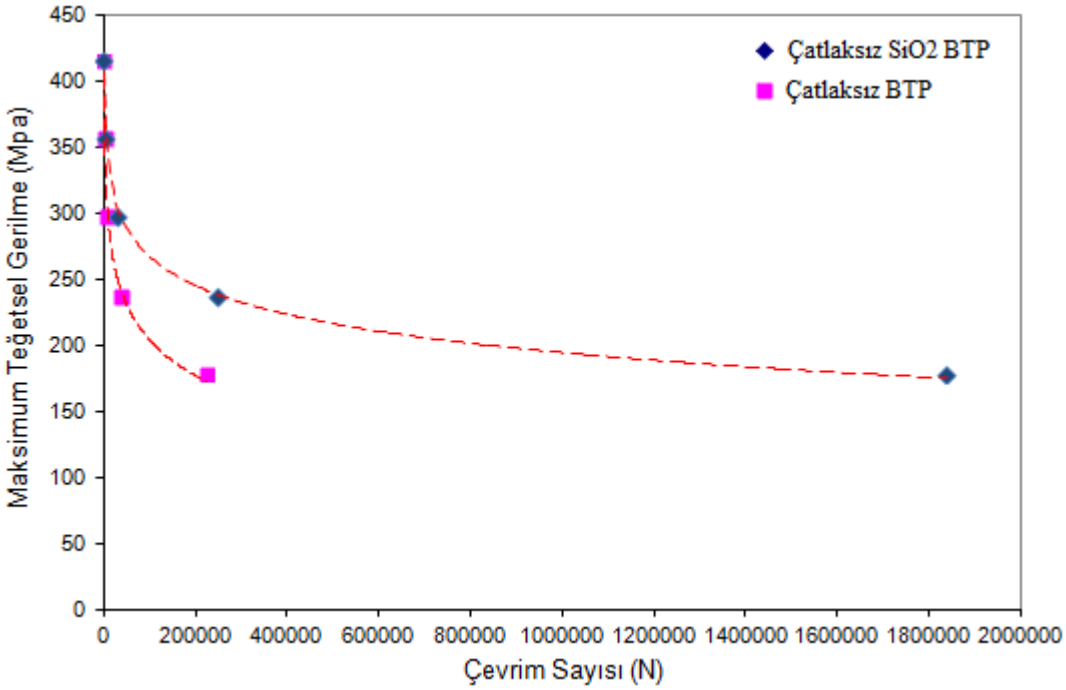
bulunmuştur. 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı numunelerde ise yorulma ömürleri 647075, 63665, 7874, 1292ve 532N değerleri almıştır.

4.5.3. Çatlaksız ve çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP boruların iç basınç yorulma deneylerinin karşılaştırmaları

Şekil 4.31'de Çatlaksız %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-logN eğrileri ve Şekil 4.32' de ise S-N eğrileri verilmiştir. Her iki eğride de görüldüğü gibi yüksek gerilmeden düşük gerilmeye doğru azalarak $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ teğetsel gerilme oranlarında yorulma ömürleri logaritmik olarak artmaktadır.

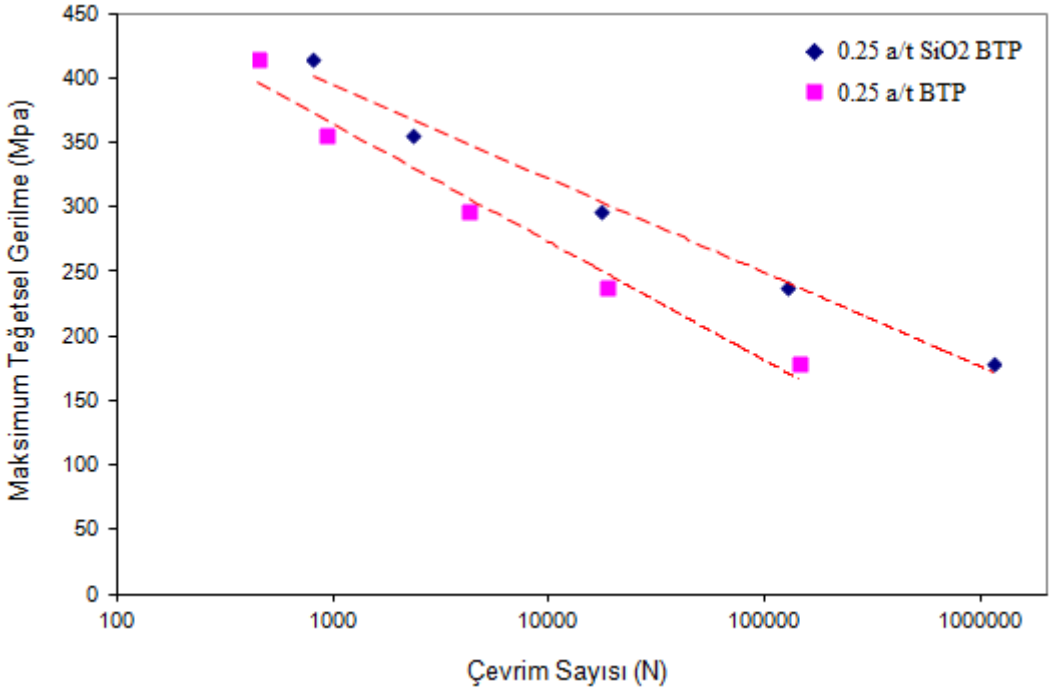


Şekil 4.31 Çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-Log(N) eğrileri.

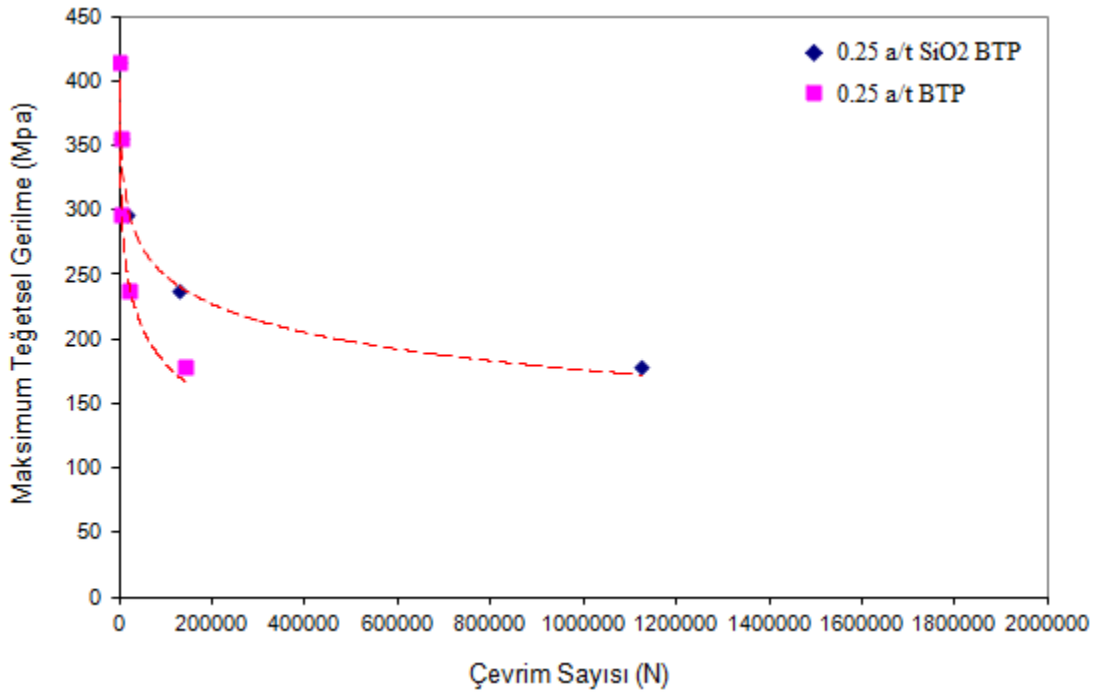


Şekil 4.32 Çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-N eğrileri.

Çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit borularda sebebi daha önceden literatür desteğiyle belirtildiği gibi S-logN eğrileri sonuç hasarına ulaşana kadar birbirine paralel bir seyir göstermiştir. Yorulma deneylerinde uygulanan teğetsel gerilme oranın azalmasıyla SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız boruların yorulma ömürleri arasındaki farklarında arttığı tespit edilmiştir. Bu durumu SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borulara sağmış oldukları % artış değerlerine baktığımızda kolaylıkla anlaşılabilinmektedir. Çatlaksız BTP kompozit borularda %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla, katkısız BTP kompozit borulara göre; $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında %200, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında %306, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme orannında %407, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında %641 ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında ise %829'luk artışlar gözlemlenilmiştir. Açıkladığımız gibi, uygulanan maksimum teğetsel gerilmelerin diğer bir tabirle gerilme oranlarının düşmesiyle, SiO_2 nanopartiküllerin etkinliğinin daha da arttığı görülmüştür. Şekil 4.31'de verilen S-logN ve özellikle S-N eğrisinin $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında nanopartikül katkılı BTP kompozit borunun sonsuz mukavemet sınırına yaklaştığı şeklinde bir varsayım yapılmıştır. SiO_2 partiküllerin yorulma ömründeki artışa sebep olan etmenler, eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların S-N eğrileri açıklandıktan sonra literatürde yapılan tartışmaları ile birlikte detaylı bir şekilde izah edilecektir.



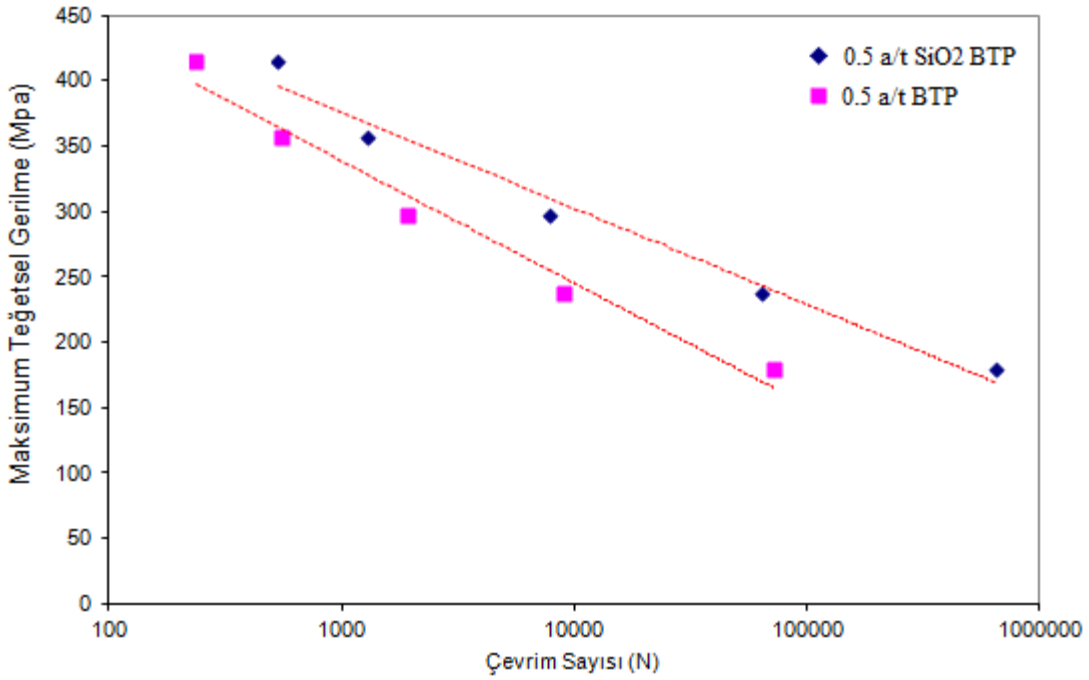
Şekil 4.33 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-Log(N) eğrileri.



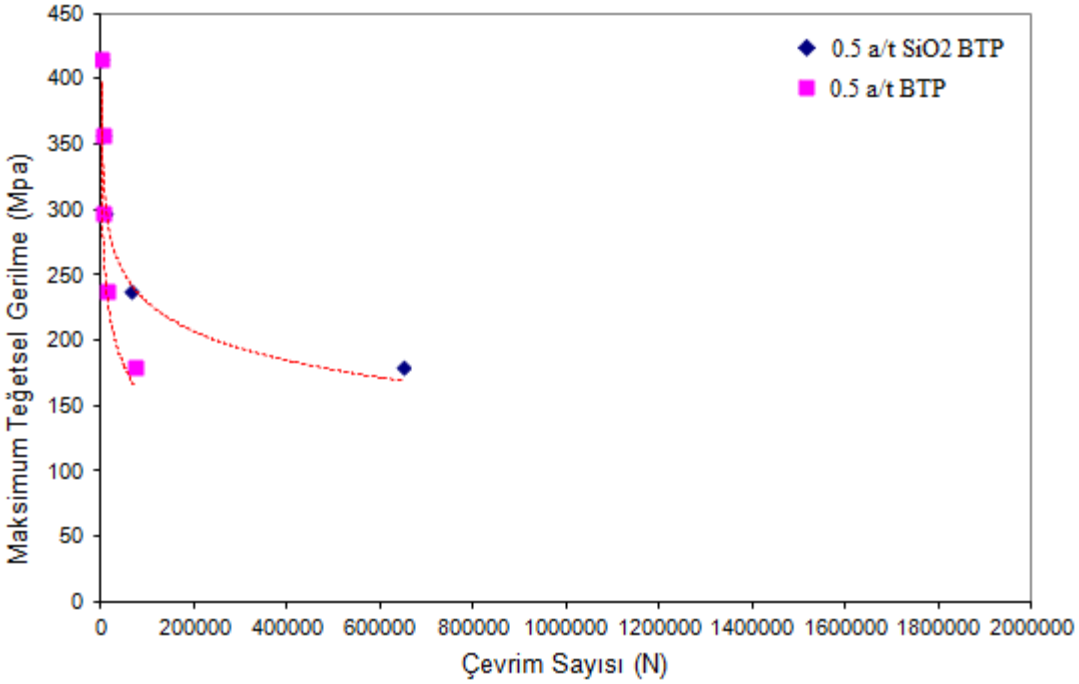
Şekil 4.34 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-N eğrileri.

SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların S-logN ve S-N eğrileri Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de verilmiştir. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borulara %4 SiO_2 nanopartiküllerin sağlamış

olduğu gerilme oranlarına göre yorulma ömründeki % artışlar $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$'de %196, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$'da %257, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ 'de %415, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$'da %685 ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$'de ise %881 olarak bulunmuştur. Çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda görüldüğü gibi, gerilme oranlarının düşmesiyle, SiO_2 nanopartiküllerin etkinliğinin daha da arttığı gözlemlenilmiştir. SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında sonsuz mukavemet sınırı eğrisine doğru gittiği görülmektedir. Bu durum katkısız BTP kompozit borularda Şekil 4.31'de anlaşıldığı üzere aynı gerilme oranında görülememiştir. Buradan sonsuz ömür eğrisi %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında elde edilebileceği varsayılabilirken, katkısız BTP kompozit borularda 0.25, 0.2 ve $0.15\sigma_{\theta\theta statik}$ gibi $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$'den daha düşük gerilme oranlarında bu eğrinin elde edilebileceği yorumu yapılmıştır. Dolayısıyla BTP kompozitlerde matris malzeme olan epoksinin silan ile fonksiyonelleştirilmiş SiO_2 nanopartiküller ile modifikasyonun göstermiş olduğu etkilerini, deney sonuçları neticesinde elde edilen S-N eğrileriyle gözler önüne sermektedir.



Şekil 4.35 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-LogN eğrileri.



Şekil 4.36 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin karşılaştırmalı S-Log N eğrileri.

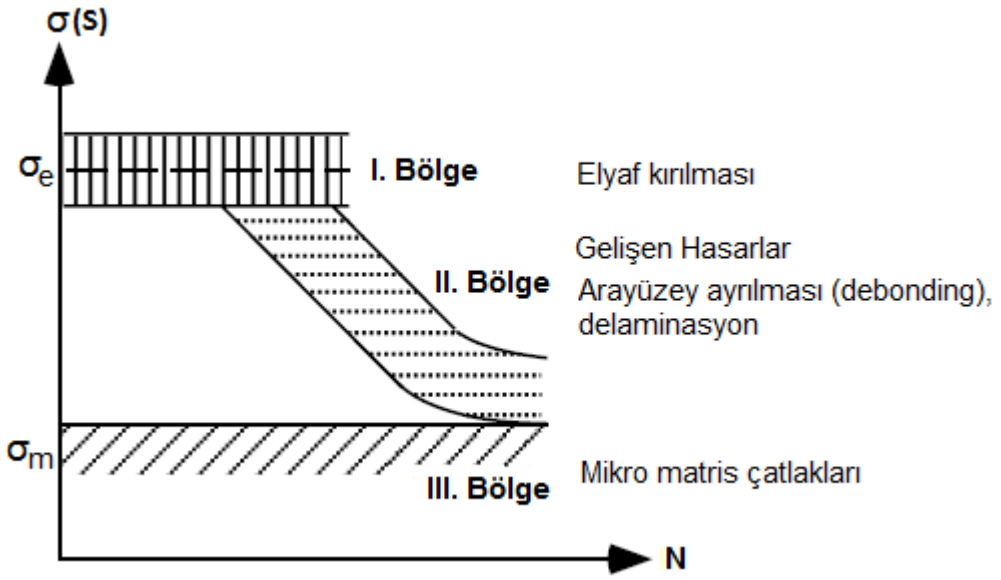
SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların S-log N ve S-N eğrileri Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'de verilmiştir. 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borulara %4 SiO_2 nanopartiküllerin sağlamış olduğu gerilme oranlarına göre yorulma ömründeki yüksek gerilme oranlarından düşük gerilme oranlarına doğru % artışlar $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$'de %225, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$'da %263, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ 'de %411, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$'da %716 ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$'de ise %901 olmuştur. Çatlaksız ve 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda görüldüğü gibi, gerilme oranlarının düşmesiyle SiO_2 nanopartiküllerin etkinliğinin daha da arttığı, elde edilen % artışlardan anlaşılmaktadır. Çatlak derinliği oranın artmasıyla, BTP kompozit borular çatlağın altında kalan tabaka sayısındaki borular gibi davranışlar sergilemektedir. Dolayısıyla tabaka sayısı azalan borularında yorulma ömürleri azalmaktadır. Bu durumu S-N eğrilerinden de görülmektedir. 0.5 a/t çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız kompozit borular ±3 tabakalı boru gibi davranışları yorulma ömrü testi süresince göstermiş ve yorulma ömrü de diğer çatlaksız ve 0.25 a/t çatlaklı BTP kompozitler gibi uzun olmamıştır. Şekil 4.35'deki S-N eğrisini incelediğimizde $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında SiO_2 katkılı BTP kompozit borular, katkısızlara göre iyi bir yüzde artışı sergilemiş fakat sonsuz mukavemet sınırına doğru giden logaritmik eğriye yaklaşmak için katkılı ve katkısız 0.5 a/t çatlaklı BTP kompozit

borularda $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$'den daha düşük gerilme oranlarında deney yapılabilineceği kanısı oluşmuştur. Fakat düşük gerilme oranlarında SiO_2 nanopartiküllerin etkinliğini ortaya koyabilmek için $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranın yeterli olduğu düşüncesine varılmıştır.

%4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların yorulma deneyleri neticesinde yorulma ömürlerine göre S-N eğrileri ile mukayese edilmiştir. %4 SiO_2 nanopartiküllerin matris malzemeye katkısıyla beraber, yüksek gerilme oranından düşük gerilme oranlarına doğru yorulma ömürlerinde önemli derecede artışlar elde edilmiştir. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız BTP kompozit borulara SiO_2 nanopartikül katkısıyla % artış oranlarında kayda değer farklılık olmamak üzere benzer değerler aldığı kabul edilmiştir. Bu durumda, %4 SiO_2 nanopartikül katkısı, BTP kompozit boruların yorulma ömürlerinde yaklaşık $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$'de 1.5-2 kat, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$'de 2.5-3 kat, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$'de 4 kat, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$'de 6.5-7 kat ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında ise 8-9 kat artışlar elde edilmiştir.
Görüldüğü gibi gerilme oranının düşmesiyle, SiO_2 nanopartiküllerin çok daha etkin olduğu, elde edilen yorulma ömründeki artışlardan kolaylıkla anlaşılabilmektedir. Yorulma deneylerinin düşük gerilme oranlarında, SiO_2 nanopartiküller çatlak tutma, lokal plastik deformasyon ve dallandırma gibi özellikleri ile çatlak oluşum ve gelişimini geciktirmektedir. Ayrıca, düşük gerilme oranlarında tekrarlı uygulanan yüklemeler neticesinde tabakalarda gerilme yığılmalarının az olması, SiO_2 nanopartiküllerin elyaf/matris arayüzeylerinde gerçekleşen yük transferini kolaylaştırdığı ve arttırdığı düşüncesini oluşturmuştur(Loos ve ark., 2012; Espinoza ve ark. 2014; Yu ve ark., 2008).

Yapılan literatür çalışmalarında incelenen sonuçlar şu şekilde açıklanmıştır. Espinoza ve ark. (2014) %6 SiO_2/Cam/Epoksi nanokompozit plakaların yorulma deneylerin düşük gerilme oranlarında, katkısız kompozitlere göre 10 kat, yüksek gerilme oranlarında ise 3 katlık yorulma ömründe artış tespit etmişlerdir. Yu ve ark.(2008) %0.5 ÇDKNT/Epoksi nanokompozitlerde, düşük gerilme oranlarında 9.3-10.5 kat yorulma ömründe artışı gözlemlerken, Loos ve ark. (2012) aynı oranlarda üretilen nanokompozitlerde yorulma ömüründe 15.5 katlık artışı düşük gerilme oranında elde etmişlerdir. Manjunatha ve ark. (2010) 10 SiO_2/Cam/Epoksi nanokompozit plakaların yorulma ömürlerini incelemişler ve 3-4 katlık yorulma ömründe ilerlemeyi çalışmalarında başarmışlardır. Manjunatha ve ark. (2009) %9 mikro kauçuk ve %10

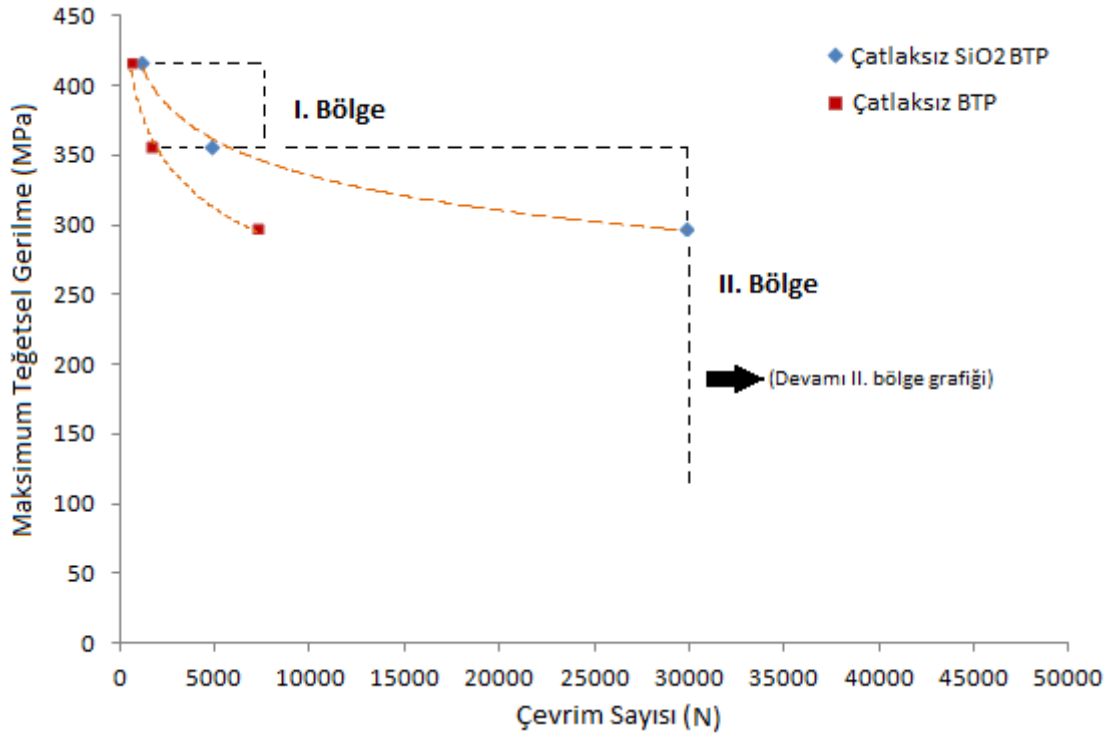
SiO_2/Cam/Epoksi nanokompozit plakalarda, katkısızlara göre düşük gerilme oranlarında 6-10 kat yorulma ömründe artış tespit etmişlerdir. Manjunatha ve ark. (2012), 2009 yılında yapmış olduğu çalışmasına 0.5 – 0.7σ orta ve yüksek gerilme oranlarınıda ilave ederek 4-5 katlık yorulma ömründe artış gözlemlemişlerdir. Gerilme oranının artmasıyla nanopartiküllerin etkinliğinin azaldığı 2009 daki çalışmasına atıf yaparak belirtmişlerdir.



Şekil 4.37 Elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin çekme yorulma S-log N eğrisinde meydana gelen hasar tipleri (Konur ve Matthews, 1989; Gamstedt ve Anderson, 2001).

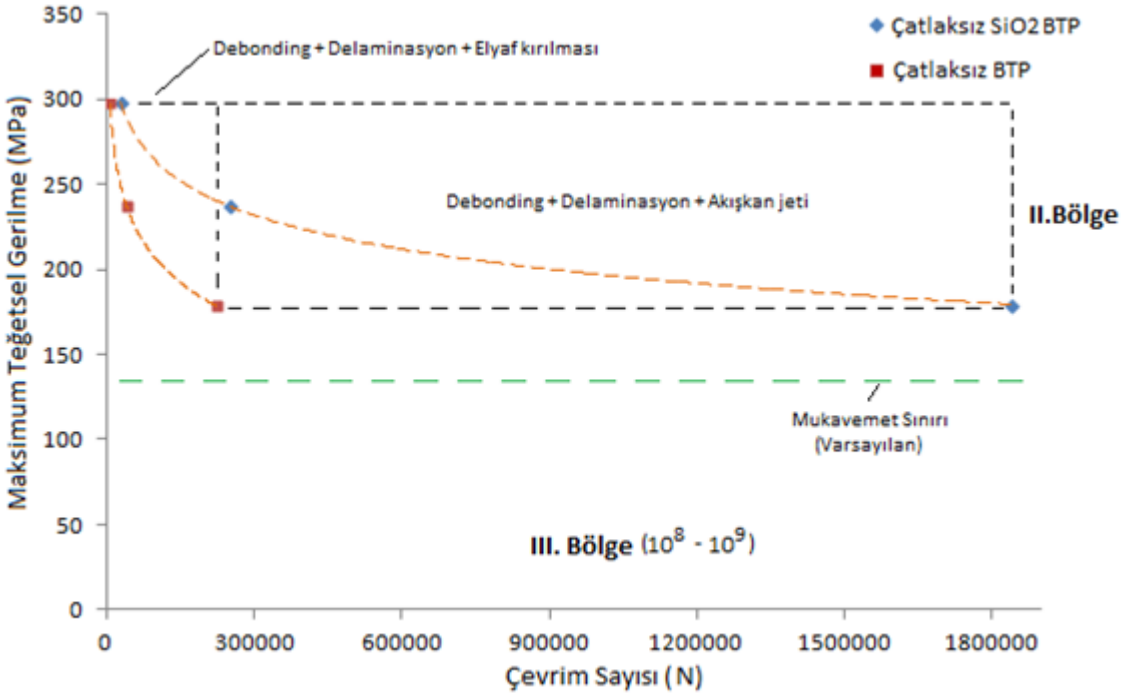
S-N eğrileri incelendiğinde gerilme oranları düştükçe logaritmik olarak çevrim sayısı artmıştır. Bir çekme yorulma deneyinde S-N eğrileri literatüründe verilen Şekil 4.37'da görüldüğü üzere üç ayrı bölgeden meydana gelmektedir (Konur ve Matthews, 1989; Gamstedt ve Anderson, 2001; Espinoza ve ark., 2014). Birinci bölgeyi gerilme oranlarının yüksek olduğu ve baskın hasarların birinci planda elyaf kırılmaları, ikinci planda delaminasyon hasarlarının oluşturduğu bölgedir. Birinci bölgede yorulma ömürleri kısa olmaktadır (Wolodko, 1999). Bu ifadenin üzerinde durarak, yorulma ömrü testinin yüksek gerilme oranlarını, $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.6\ \sigma_{\theta\theta statik}$ oluşturmaktadır. Birinci bölgede $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.6\ \sigma_{\theta\theta statik}$ gerilmelerinde matris hasarlarını oluşturan mikroçatlaklar, makroçatlaklar, debonding,ve delaminasyon hasarları hızlı oluşup gelişerek, baskın hasar tipi olan elyaf kırılmaları hasarlarına ulaştığını şeklinde yorumlamaktayız. Katkısız ve katkılı çatlaksız, 0.25a/t ve 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda bu yüksek gerilme oranlarında patlama ile birlikte tabakalar

yırtılarak elyaf kırılma sonuç hasarları meydana gelmiştir. Çatlaklı borularda bu elyaf kırılma hasarları çatlak bölgelerinde oluşmuştur. Eliptik yüzey çatlakları çatlak bölgesini zayıflatarak kesilen sarım bantlarının sürekliliğini kaybetmesine ve rijitliliğini azalmaktadır. Çatlak bölgesinde yükleme boşaltma esnasında rijitliliği azalan borunun matris hasarlarının hızla sonuca ulaşmasıyla, kompozit yapısal boru bütünlüğünü kaybederek elyaf kırılması hasarlarıyla sonuçlanmıştır. Bu bölgede yorulma yükleri elyaflar tarafından karşılanmaktadır (Majid, 2012; Noh ve Whitcomb, 2005).



Şekil 4.38 Çatlaksız SiO_2 katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin I. ve II. hasar bölgelerini gösteren S-N eğrileri.

S-N eğrisinde Şekil 4.38 ve 4.39'de görüldüğü gibi II. Bölgeyi "debonding"elyaf/matris arayüzey ayrılması, "delaminasyon"tabakalararası ayrılma ve "lokal elyaf hasarları" oluşturmaktadır. Bu II. Bölge literatürde gelişen hasar bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Gelişen hasar bölgesinde azalan gerilme oranı ile çevrim sayısı artmakta ve S-N eğrisi aşağıya doğru logaritmik eğimli bir hal almaktadır. Eğim, ilerleyen hasar mekanizmalarını anlamına gelmektedir. Yorulma ömrünün hassasiyeti bu eğim ile karakterize edilmektedir (Konur ve Matthews, 1989; Gamstedt ve Anderson, 2001, Manjunatha, 2010).



Şekil 4.39 Çatlaksız SiO_2 katkılı ve katkısız BTP kompozitlerin II. ve III. hasar bölgelerinin ifade edildiği S-N eğrileri.

II. bölgede mikro boyuttaki çatlaklar gerilme oranına bağlı olarak yavaş bir oluşum göstermekte ve yavaş bir büyüme sergilemektedirler. Bu çatlaklar genel itibariyle, elyafların çatlakları köprüleme etkisiyle elyafların etraflarında kümelenmektedirler. Kümelenen mikroçatlaklar kritik yoğunluğa ulaştığında artan lokal gerilimler makroçatlakları oluşturarak, elyaf doğrultularında "debonding" elyaf/matris arayüzey ayrılma hasarlarını oluşmasını sağlamaktadırlar(Gamstedt ve Anderson, 2001; Wolodko, 1999). Elyaf doğrultularında debonding hasarlarına neden olan bu matris çatlakları elyaf doğrultusunda ve boyunca oluşmaya meyillidirler. Çünkü elyaf doğrultularındaki çatlak oluşumu ve büyümesi için gösterilecek arayüzey dayanımı düşüktür(Majid, 2012). Filaman sarım kompozit borularda elyaf bantları doğrultusunda oluşan debonding hasarları makro çatlakların doğurduğu en önemli matris hasarlarından biridir(Tarakçıoğlu, 2001; Arıkan, 2010; Kaynak, 2005). "Debonding" hasarları yoğunluk durumlarına göre kompozit borularda rijitlik kayıplarını meydana getirdiği gibi, tabakalar arasında rijitlik kaybında farklılıklar oluşturmaktadır(Ellyin ve ark. 1997, Majid 2012). Rijitlik kayıplarından dolayı uygulanan tekrarlı iç basınçlar neticesinde tabakalarda eğilmeler meydana gelmektedir. Tabakalarda rijitlik kaybından dolayı oluşan bu eğilme, kirişlerin yük altında üç noktadan eğilmeye maruz kaldıkları gibi, alt tabakalarda basma kuvvetlerinin oluşmasına neden olurlar. Basma kuvvetlerinin etkisi

altında olan tabakalarda oluşan kayma gerilmeleri "debonding" ve matris çatlaklarının kümeleşip yoğunlaşmasıyla delaminasyon hasarlarının oluşmasını tetiklemektedir. Böylelikle bu lokal matris hasarlarının yoğunluk durumuna göre alt ve üst tabakalarda rijitlik kaybı ve farklılıklar daha da artmaktadır (Jones ve Hull, 1979, Majid 2012). Samancı ve ark.(2011) kompozit boruların sürekli yükleme-boşaltma etkisiyle ifade edilen tabakalardaki eğilmeyi şişe boynu etkisi olarak tanımlamıştır. Şişe boynu etkisiyle eğilme gerilmelerinin kayma gerilmelerini doğurduğunu ve delaminasyon hasarlarının oluşum ve gelişiminde etkin olduğunu ifade etmişlerdir. Wolodko (1999) yapmış olduğu doktora tez çalışmasında CTP filaman sarım kompozit boruların yorulma deneyi süresince meydana gelen delaminasyon hasarlarının meydana rijitlik kaybı ve eğilme esnasında basma dayanımı etkisiyle kalan tabakalarda başladığını belirtmiştir. II. bölgede mikro ve makro çatlaklar, debonding ve delaminasyon matris hasarlarının kritik seviyeye çıkmasıyla (Mertiny ve Ellyin, 2006), kompozit boruların tabakalarında akışkan bir yol bularak sızıntı, akışkan jeti ve elyaf kırılması nihai hasarları meydana gelmektedir. II. Bölgede bu nihai hasarları oluşumda debonding, delaminasyon matris hasarları baskın hasarlardır. Dolayısıyla II. Bölgenin genişliğini matris hasarları belirlemektedir(Konur ve Matthews, 1989; Wolodko, 1999; Gamstedt ve Anderson, 2001; Majid, 2012 ve Manjunatha, 2010).

Yapılan çalışmamızda, katkısız BTP kompozit borularda II. bölgeyi oluşturan 0.3, 0.4 ve $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında sonuç hasarları patlama şeklinde elyaf kırılmasıyla neticelenmiştir. Çatlaklı katkısız BTP kompozit borularda hasarlar çatlak bölgesinden başlayarak sonuçlanmıştır. SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit borularda 0.3, 0.4 ve $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında sızıntı ve akışkan jeti şeklinde sonuç hasarı oluşmuştur. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit numunelerde akışkan jeti çatlak bölgesinde meydana gelmemiştir. 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerde ise akışkan jeti çatlak bölgesinde 0.3 ve $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilme oranlarında oluşmuştur. Soden ve ark.(1989) ve Martens ve ark. (2012) yorulma deneylerinin düşük gerilme oranlarında akışkan jeti oluşabileceğini makalesinde belirtmiştir. II. bölgede katkısız BTP kompozitlerde debonding, delaminasyon ve nihai sonuç olarak elyaf kırılmalarının etkin olduğunu düşünülmektedir. %4 SiO_2 nanopartiküllerin ilavesiyle nihai elyaf kırılması hasarlarının yerini, sızıntı ve akışkan jeti matris hasarları almıştır. Örnek olarak çatlaksız nanopartikül katkılı ve katkısız karşılaştırma S-N diyagramını incelediğimizde, hasarın

gelişim bölgesi olan II. bölgeyi %4 SiO_2 nanopartiküllerin ilavesi en düşük 0.3 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 8-9 kat genişleterek büyütmüştür. Bu bölgeyi ifade eden gerilme oranlarında gerilme oranlarının düşmesiyle matrisin etkisi daha da ön plana çıkarak SiO_2 nanopartiküllerin matris malzemeye kazandırdığı şekil değişimi ve kırılma tokluğundaki artışların yorulma ömründeki etkileri 4-9 kat arasındaki artış ile bariz görülmüştür. Debonding hasarların oluşumunda makro çatlakların elyaf/matris arayüzey dayanımında etkin rol oynağını yorumlanmıştır(Gamstendt, 2000; Talreja 1993). Genellikle elyaf ve matristeki hasarlar matris malzemenin tokluğundan, arayüzey dayanımından, esnekliğinden ve hacimsel elyaf oranından etkilenmektedir. Çünkü kompozit borunun tabakalarında meydana gelen ilk hasarlar matris hasarlarıdır. Tokluğu arttırılmış matris, matris çatlak oluşumunu ve gelişimini geciktirerek kayma ve matris/elyaf arayüzey dayanımını, debonding ve delaminasyon hasarlarının oluşum direncini arttırmada en önemli faktörlerden biridir(Wolodko, 1999). Epoksiye %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla kırılma tokluğunda %25-39 aralığında artış sağlanmıştır. Kırılma tokluğunu SiO_2 nanopartikül katkısıyla arttıran kırılma mekanizmalarının hepsinin yorulma ömrünün artışında önemli bir etken olduğunu düşünülmektedir(Liu ve ark. 2012, Blackman ve ark. 2007, Battistella ve ark. 2008). Mikroçatlakların nanopartiküller tarafından tutulması, saptırması, dallanması, nanopartikül/matris arayüzey ayrılmaları ve epoksi nanopartikül etkileşimiyle oluşan arafazların plastikleştirici etkisiyle oluşumunu geciktirmiş, gelişim ve büyümesini yavaşlatmıştır (Manjunatha 2010, Manjunatha 2012, Böger ve ark. 2010). Ayrıca dallanan mikroçatlaklar, çatlakların kümeleşip yoğunlaşmasını geciktirerek ve büyüme hızını azaltarak lokal gerilmeleri dağıtma eğiliminde olmuştur (Liu ve ark. 2012, Manjunatha 2009). Dolayısıyla SiO_2 nanopartiküller mikroçatlak yoğunluğunun kritik seviyeye ulaşmasını geciktirmiştir. Böylelikle %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla matris hasarları elyaf kırılması hasarlarının çok çok önüne geçmiştir. Yorulma ömründe kırılma mekanizmalarını etkileyen matris/nanopartikül arayüzey ayrılmalarında, nanopartiküllerin özgül yüzey alanlarının yüksek olması ($650 m^2/g$) ve fonksiyonelleştirilmiş olması etken faktörlerden biridir. Başka bir önemli faktör ise SiO_2 nanopartiküllerin epoksi ve BTP kompozit borulara ilavesiyle, kompozitlerin rijitliğinin artması olmuştur. Kompozitlerde hasar gelişiminde rijitliğinin önemi birçok kez açıklanmıştır. Bu durumda nanokompozitlerde rijitliğin artması(Çizelge 4.2), rijitliği sonuçlara etki eden önemli etken haline getirmektedir.

Halka çekme deneylerinde SiO_2 nanopartikül katkısıyla şekil değişiminde yaklaşık %17.8'lik bir artış elde edilmiştir. Matris malzemenin eğilme ve çekme deneylerinde de şekil değişiminde artışlar görülmüştür. SiO_2 nanopartikül ilavesiyle BTP kompozit boruların şekil değişimindeki artışlar yorulma ömrüne ve iç basınç patlama dayanımına olumlu katkı sağladığını noktasında literatür desteklenmiştir(Legg ve Hull, 1982; Tanigushi ve ark., 1991; Mertiny, 2012). Mertiny ve Gold (2007) $[\pm 60]_3$ kapalı uçlu filaman sarım CTP kompozit borulardaki matris malzemenin şekil değişimindeki artışın yorulma ömrünün tayininde olumlu etki gösterdiğini ve akışkan jeti sonuç hasarı oluşumunda etkili olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir.

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerde III. bölge yorulmanın beklenmediği çevrim sayısının 10^8 ve 10^9 gibi katlı yüksek değerler aldığı mukavemet sınırı olarak ifade edilmektedir. Bu bölgede düşük gerilim seviyeleri neticesinde şekil değişimi çok küçük olup, hasarın gelişimi ve ilerlemesi meydana gelmemektedir. Matris hasarlarını tanımlayan gerilim seviyelerinde kümeleşen matris çatlakları kritik yoğunluğa ulaşamamaktadırlar. Dolayısıyla III. Bölge matris hasarlarının belirli bir yoğunluk seviyesinden sonra ilerleyemediği bölgedir. Bundan ötürü, bu bölge yorulma deneyi süresince tekrarlı yüklemelerde mükemmel elastik davranış sergiliyor anlamış taşımaktadır. Ayrıca S-N diyagramında III. Bölgenin tasarımı II. Bölgedeki hasar gelişimi hayati öneme sahiptir (Konur ve Matthews, 1989; Gamstedt ve Anderson, 2001; Majid, 2012).

Elyaf takviyeli kompozitlerin matrislerinde yapılan modifikasyonların, III. bölgede hasarın nasıl geciktirdiği ve mikro matris çatlaklarının nasıl tutulduğu ile ilgili bilgi sağlamada önem arz etmektedir(Gamstedt ve Anderson 2001). Özellikle çatlaksız SiO_2 katkılı BTP kompozit boruların $0.3\sigma_{\theta\theta}$statik gerilme oranındaki S-N eğrisi davranışına baktığımızda, yorulma ömründe elde edilen % artışla SiO_2 nanopartiküllerin hasar oluşumu ve gelişimlerini nasıl geciktirdiğini rahatlıkla gözlemlenilebilinmektedir. Matris malzemeye %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla yaklaşık 9 katlık bir artış sağlanmış ve II. Bölgedeki matris hasarlarını III. bölgeye yaklaştırdığını düşünülmektedir. %4 SiO_2 nanopartikülerin epoksi matris malzemeye sağlamış olduğu şekil değişimi, çekme dayanımı, rijitlik ve kırılma tokluğundaki artışların, BTP kompozit boruların yorulma ömründeki artışlara yansıdığı açıkça görülmüştür.

4.6 SiO_2 Nanopartikül Katkılı ve Katkısız BTP Borularda Hasar Davranışları

$[\pm 55^o]_6$ elyaf sarım açısına sahip çatlaksız ve eliptik yüzey çatlaklı (a/t = 0.25, 0.5) nanosilika katkılı ve katkısız BTP kompozit borulara $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$, 0.6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ ve 0.7 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilme oranlarında sonuç hasarlarına ulaşana kadar iç basınç yorulma testleri uygulanmıştır.

Nano-silika katkılı ve katkısız BTP kompozit borularda yorulma deneyleri neticesinde meydana gelen sonuç hasarları gözlemlenilmiştir. SiO_2 nanopartiküllerin epoksiye ilavesiyle BTP kompozit borularında sonuç hasarlarında nedenli değişikler oluşmuş, hasar gelişimini nasıl etkilenmiş ve hangi hasar mekanizmaları sonuç hasarını belirlemede etken olmuş, bu başlık altında bu sorulara cevap verilmeye çalışılmış ve gözlemlemeler ise fotoğraflanmıştır.

4.6.1. 0.3 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında iç basınç hasar davranışları

$[\pm 55^o]_6$ sarım açılı SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit borular $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ maksimum teğetsel gerilmede yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. En düşük maksimum maksimum teğetsel gerilmede gerçekleştirilen yorulma deneylerinde, yorulma deneyleri süresince oluşan hasarlar ve sonuç hasarları değerlendirilmiştir.

$0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ maksimum teğetsel gerilmede, çatlaksız BTP kompozit borularda yorulma deneyi süresince, elyaf/matris arayüzey ayrılmaları "debonding" ve delaminasyon hasarlarını sonuç hasarına oluşana kadar tespit etmek oldukça güç olmuştur. Bu duruma etki eden en önemli faktör bazalt elyafların içeriğinde bulunan "demir" bileşiğinin elyafların renginin siyahımsı ve koyu kahverengimsi olmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Ayrıca uygulanan maksimum teğetsel gerilme oranının düşük olması dolayısıyla elastik sınırlar içerisinde kalmasının da bir diğer etken faktör olduğu kanısı oluşmuştur.

S-N diyagramlarının izahatında da belirtildiği gibi filaman sarım kompozit borularda statik iç basınç ve yorulma deneylerinde oluşan hasar mekanizmaları sırasıyla; matris çatlakları, elyaf/ matris arayüzey ayrılmaları "debonding" delaminasyonlar ve elyaf kırılmalarıdır. Kompozitlerde ilk hasarlar, kompozit birleşenin en zayıf mekanik özelliklerini sergileyen matris malzemelerde meydana gelmektedir.

Matris çatlakları yorulma deneyi süresince gözlemlenemeyen mikro çatlaklar ve akabinde oluşan makro çatlak ve uygulanan teğetsel gerilme neticesinde borunun çapsal artışıyla birlikte meydana gelen eksenel çatlaklardır.

BTP kompozit borularda belirtilen hasar mekanizmaları, CTP kompozit boruların aksine (Samancı, 2004; Tasyurek, 2014) deney süresince tam anlamıyla tespit edilememiştir. Elyaf/matris arayüzey ayrılmaları ve delaminasyon hasarları, CTP kompozit borularda, bu boruların cam elyafların saydamsım renklerinden dolayı beyazlama hasarı olarakta tabir edilen "beyazımsı" bir görüntü olarak gözlemlenebilinmektedir. Cam elyafların saydamsı görüntülerinin dışında, matris hasarları matris malzemenin şekil değişimine bağlı olarak ta gözlemlemeye olanak sunmaktadır.

İç basınç altında filaman sarım kompozit boruların patlama şeklinde elyaf kırılması sonuç hasarına ulaşmadan önce, meydana gelen "debonnding" elyaf/matris ayrılması hasarları ve delaminasyon hasar mekanizmaları tabakalara yayılmaktadır(Majid, 2012). BTP kompozit boruların yorulma deneyleri sürecinde elyaf kırılması sonuç hasarına kadar cereyan eden hasar gelişiminin şu şekilde olduğu düşünülmektedir.

Yorulma deneyinde, çevrim sayısının artmasıyla BTP kompozit borularda hasar yığılmaları artmaktadır. Uygulanan gerilme oranının ($0.3\sigma_{\theta\theta statik}$) düşük olması BTP kompozit borulardamikro çatlak oluşumunu geciktirmektedir. Yorulmanın anlamını oluşturan iç basınç tekrarlı yükleme ve boşaltmalarda yükleme esnasında ilave deplasmanın etkisiyle $\pm 55^{o}$ 'de bantlar makas hareketi formunda açılıp kapanmaya zorlanmaktadır. Bu makas hareketi mikro çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Mikro boyutta oluşan bu matris çatlaklar ilave deplasmanın artışıyla reçinenin bol oluğu kısımlarda eksenel makro çatlakları meydana getirmektedir. Bunun dışında tabakalar arasındaki mikro çatlaklar elyaflaırn köprüleme etkisiyle, elyafların etrafında kümeleşmektedirler. Artan çevrimle sürekli artan mikroçatlaklar, kritik kümeleşme yoğunluğuna ulaşmasıyla makro çatlakları oluşturmaktadır. Makro çatlaklar, elyaf/matris arayüzey dayanımına bağlı olarak, elyaf matris arayüzeyi boyunca sarım açısı doğrultularında helisel bir yol izlemektedir. Kompozitlerde en zayıf mekaniksel özelliklerin görüldüğü halkayı, elyaf/matris arayüzeyleri oluşturmaktadır. Dolayısıyla

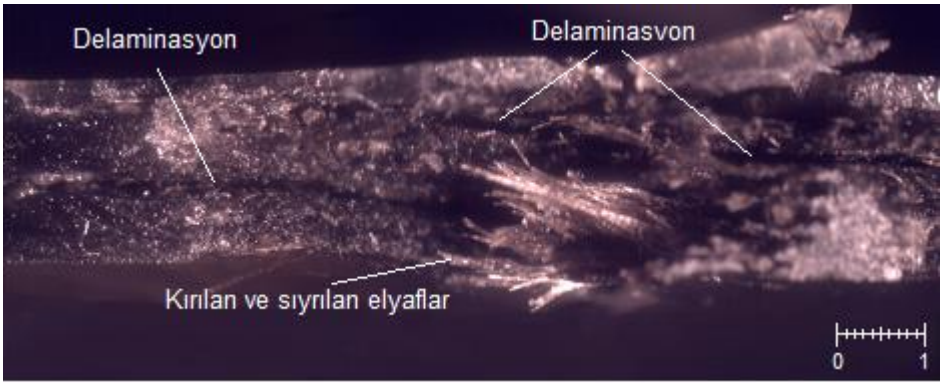
makro çatlaklar elyaf sarım doğrultusunda ilerlemeye meyillidirler. Bu durum sürekli artan çevrim sayısının doğurduğu yorulmanın etkisiyle bu arayüzey matris hasarını, aynı elyaf bandı içerisinde, diğer elyafların arayüzeylerini etkilemesine neden olmaktadırlar. Aynı elyaf bantları içerisindeki debonding hasarları, elyafların makas hareketleri neticesinde birleşmeye zorlanmaktadır. Bu hasarlar, elyaf/matris makas hareketinin doğurduğu lokal gerilmeler altında elyaf/matris arayüzey dayanımını zayıflatmakta ve kompozit borunun yapısal bütünlüğüne etki eden rijitlik kayıplarına neden olmaktadır. Debonding hasarlarının yoğunluğu komşu tabakalarda rijitlik farklılıklarına yol açmaktadır. Tabakalarda oluşan bu lokal rijitlik kayıpları ve komşu tabakalardaki lokal rijitlilik farklılıkları, kompozit borularda yorulma esnasında eğilmelere neden olmaktadır. Eğilme düzeyi, uygulanan gerilme oranına göre değişiklik göstermektedir. Eğilmenin etkisiyle, borunun iç tabakalarında basma kuvvetleri meydana gelmektedir. Basma kuvvetleri, kayma gerilmelerini oluşturarak, makas hareketinin ilave etkisiyle delaminasyon hasarlarını başlatmakta ve ilerletmektedir. Kaynak ve Mat (2001) delaminasyon hasarlarının numunelerde matris çatlağının sonlandığı yerlerde meydana geldiğini ifade etmiştir. Devam eden yorulma deneyi süresince, bu debonding ve delaminasyon hasarlarının yoğunluklarının artışı, yapısal bütünlüğü sağlayacak kompozit borunun rijitlik seviyesine kadar düşürmektedir. Sonunda bantlar içerisinde "debonding" ve "delaminasyon" hasarları neticesinde matristen ayrılan elyaflar, kirişlerdeki ankastre bağlantıların oluşturduğu kesme etkisi gibi zorlanarak kırılmaktadır. Elyafların birbirini tetikleyen bu kırılma ile birlikte, BTP kompozit boru yapısal bütünlüğünü koruyamayarak, patlama halinde sonuç hasarına uğramaktadır. Tarakçıoğlu (1992) ve Sayman (2009) elyaf doğrultusu boyunca oluşan bu debonding hasarların oluşumuna, elyafa dik çekme gerilmeleri ile eksenel doğrultuda kayma gerilmelerine neden olduğunu ifade etmişlerdir. Elyaf kırılması sonuç hasarına kadar süre gelen bu hasar mekanizmalarını, Tarakçıoğlu ve ark.(2001), Arıkan (2010), Şahin (2007), Samancı ve ark. (2008), (2011), ve Gemi ve ark. (2005), (2009) çalışmalarında belirtmişlerdir.

Şekil 4.40'de verildiği üzere çatlaksız BTP kompozit borularda elyaf kırılması sonuç hasarı, aynı bantlar içerisinde bir dizi birini tetikleyen elyaf kırılmaları neticesinde, elyaf bantlarının sarım açı yönlerinin de etkisiyle yırtılarak ani patlama şeklinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.40 $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozitlerde meydana gelen makro hasarlar.

Çatlaksız BTP kompozit borularda $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında meydana gelen patlama neticesinde elyaf kırılması hasarıyla sonuçlanan bölgeden alınan mikroskop görüntüsü Şekil 4.41'de verilmiştir. Patlama bölgesindeki elyaf kırılma hasarlarının maruz kalan bölgede enine alının mikroskop görüntüsünde, kırılan elyafların arka kısımlarındaki delaminasyon hasarlarının açık bir şekilde görülmesi yapılan yorumları destekler niteliktedir. Şekil 4.41'de aynı zamanda kırılan ve sıyrılan elyaflarda görülmektedir. Delaminasyon hasarını incelemek için kesilen yüzeylerin dışında, kırılan yüzeylere bakıldığında elyaf kırılmaları ile birlikte elyaf sıyrılması hasarları görülmüştür.



Şekil 4.41 $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozitlerde meydana gelen sonuç hasarlarının oluşturduğu delaminasyon ve kırılan elyafların görüntüleri.

0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ maksimum teğetsel gerilmesinde yorulma deneyi sonucu nihai hasar sonuçları

çatlaklarda meydana gelmiştir. Yorulma deneyi süresince, çatlaklı BTP kompozitler nihai hasara ulaşana kadar çatlaklarda hasarlar net gözlemlenememiştir. Sonuç hasarları ani patlama şeklinde çatlak bölgesinde elyaf kırılmasıyla sonuçlanmıştır. Açık uçlu yorulma deneyi şartları altında tekrarlı yükleme ve boşaltmalar neticesinde, teğetsel doğrultuda çatlaklar açılıp kapanmaya zorlanmaktadır. Uygulanan yükleme çatlaklı BTP kompozit borunun iç basıncını arttırmakta ve borunun çapında ilave deplasman değişimine yol açmaktadır. Çatlağın açılmasına dolaylı yönden bu ilave deplasman artışı neden olmaktadır. Teğetsel doğrultuda çatlağın açılmasına sebep olan bu kuvvetler, çatlağın her iki ucundan Mod I kırılma konumunda hasara uğramasına ve ilerlemesine çalışmaktadır. Fakat, elyaf bantlarının $\pm 55^{o}$ sarım açılarında yönlenmesi, çatlak uçlarından hasarların ilerlemesini saptırmaktadır. Bu durum, çatlaklarda meydana gelen ani patlama neticesinde çatlak uçlarından ilerleyen hasarın sarım açıları yönlerindeki dallanmalarından gözlemlenebilmektedir.

0.25 ve 0.5 a/t eliptik çatlaklı BTP kompozit boruların çatlaklarında sadece Mod I kırılma konumunda hasara maruz kalmamaktadır. BTP kompozit borulara çatlakların açılmasıyla, çatlak bölgesinde kesilen bazalt elyaf bantlar sürekliliklerini kaybetmektedir. Süreklik kaybının seviyesi çatlak derinliği oranına göre değişmektedir. Dolayısıyla bu çatlak derinliği oranına göre, BTP kompozit borularda, lokal rijitlik kayıpları meydana gelmektedir. Bu lokal bu rijitlik kaybına göre çatlaklı boruların yorulma ömürleri de kısalmaktadır. Çatlaklı olması nedeniyle BTP kompozit borulardaki lokal rijitlik kayıpları, yükleme-boşaltma ile çatlakların açılıp kapanmasıyla daha da artmaktadır. Çatlakların açılıp kapanmasıyla süregelen lokal rijitlik kayıplarının altında yatan sebeplerden birisi, çatlak uçları ve çatlak diplerinde elyaf/matris ayrılmalarıdır. BTP kompozit borularda deplasman değişimiyle $\pm 55^{o}$ yönlerindeki makas hareketi de çatlak diplerindeki elyaf/matris ayrılma hasarlarının bir sonraki hasar aşaması olan delaminasyon hasar oluşumunu etkilemektedir. Çatlağın neden olduğu rijitlik kaybı ve ilaveten bu bölgedeki elyaf/matris ayrılma hasarlarının yoğunluklarının neden olduğu tabakalardaki rijitlik farklılıkları, borunun çatlak bölgesindeki tabakaların eğilmesini arttırmaktadır. Bu eğilmeyle artan lokal kayma gerilmelerinin etkisiyle alt tabakalarda ve çatlak dibinde delaminasyon hasarlarını başlatmaktadır. Artan çevrim sayısıyla sürekli eğilmeye zorlanan çatlak bölgesinde meydana gelen lokal kayma gerilmeler, Mod II konumunda delaminasyon hasarlarını ilerletmektedir.

Wolodko (1999) kompozitlerde oluşan delaminasyon hasarlarının sebeplerini dört madde halinde çalışmasında sunmuştur. Bunlar;

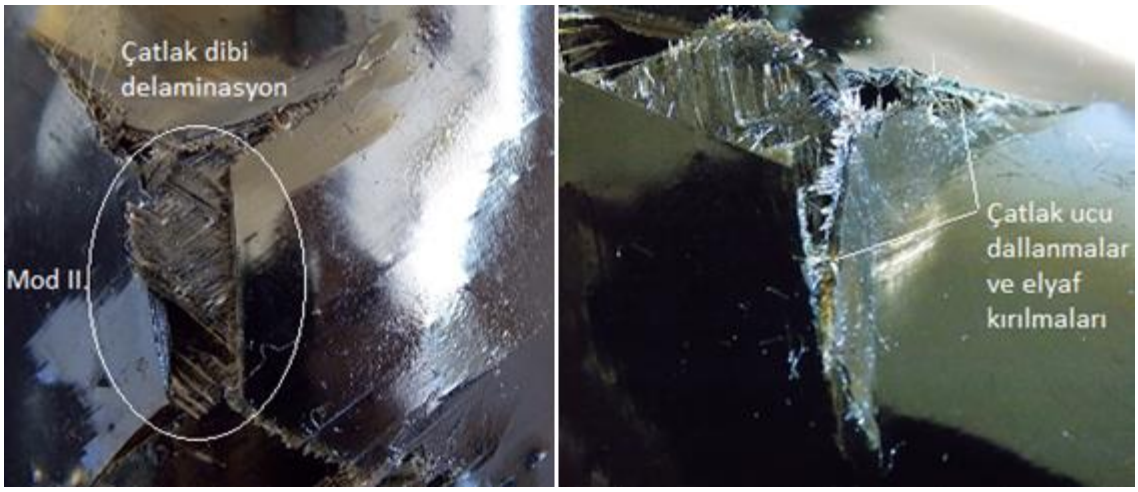
- Geometrik sınırlar (Çatlaklarda oluşan kenar etkisi)
- Matris çatlakları (Elyaf/matris arayüzeyinde ilerleyen makro çatlaklar)
- Basma yüklemeleri (Kirişlerin üç nokta eğilme etkisi)
- Darbeli yüklemelerdir.

Wolodko'nun çalışmasında ifade ettiği gibi 0.25 ve 0.5 a/t çatlaklı BTP kompozit borularda kenar etkisininde çatlak dibi delaminasyon hasarı oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. Frost ve ark. (1995) makas hareketinin sonucunda, elyafların dönmesiyle çatlak yoğunluklarının arttığını ve bunun delaminasyon hasarlarının oluşumuna etki ettiğini ifade etmiştir.



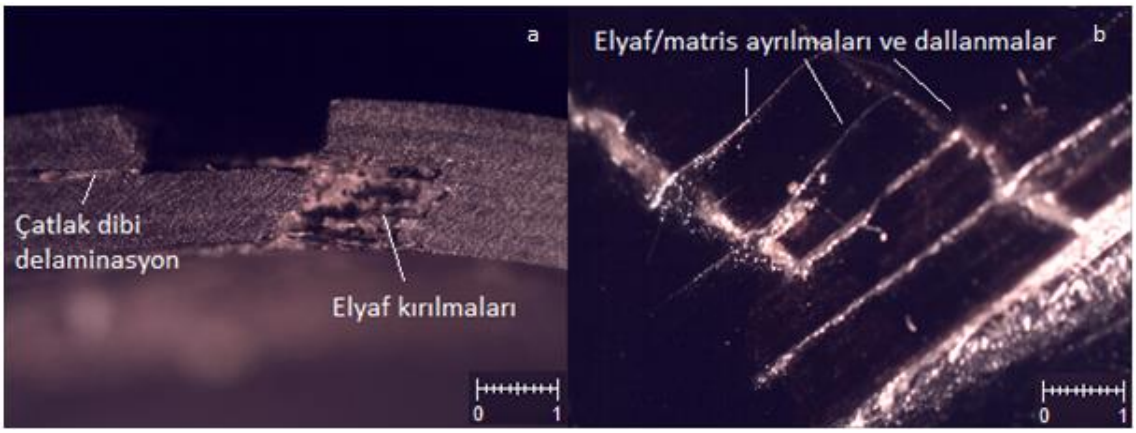
Şekil 4.42 $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerde meydana gelen makro hasarlar.

Şekil 4.42'da 0.25 a/t çatlaklı BTP kompozit boruda meydana gelen çatlak dibi delaminasyonlar ve patlamayla birlikte elyaf/matris ve elyaf kırılmaları şeklinde gözlemlenen hasar dallanmaları görülmektedir.



Şekil 4.43 $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerde meydana gelen makro hasarlar

Şekil 4.43'de 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda oluşan çatlak dibi delaminasyonlar ve patlamayla birlikte çatlak uçlarının sarım açıları doğrultularındaki hasar dallanmaları ve elyaf kırılmaları görülmektedir.



Şekil 4.44 $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerde a) çatlak dibinde meydana gelen hasarlar b) çatlak uçlarında elyaf/matris ayrılmaları.

Şekil 4.44a'da $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında çatlak bölgesinde hasara uğrayan 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borunun çatlak bölgesinde oluşan çatlak dibi delaminasyon hasarları görülmektedir. Şekil 4.42b'deki mikroskop görüntüsünde ise patlamayla birlikte çatlak ucunda elyaf doğrularındaki hasar ilerlemesinin oluştuğu, elyaf/matris ayrılma hasarı sunulmuştur.



Şekil 4.45 SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit boruların $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında meydana gelen sızıntı hasarı

%4 SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit boruların 0.3σθ0statik gerilme oranında ortalama 1838447 N çevrimde matris hasarı olan sızıntı hasarıyla yorulma deneyi sonuçlanmıştır(Şekil 4.45).

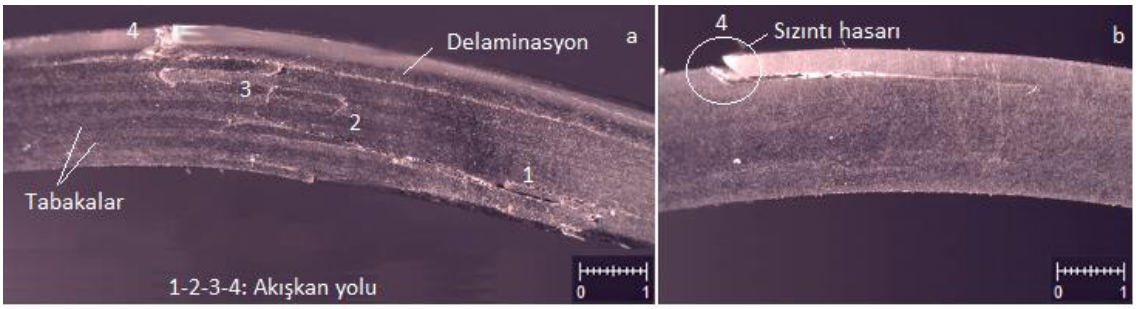
S-N diyagramının tarifinde belirtildiği üzere filaman sarım kompozit borularda meydana gelen sızıntı veya akışkan jeti hasarı şu şekilde açıklanmıştır. Öncelikle, filaman sarım kompozit borularda matris çatlakları oluşmaktadır. Yorulma deneyinde çevrim sayısına bağlı olarak, mikroçatlaklar sürekli oluşmakta ve gelişim göstererek elyafların köprüleme etkisiyle elyafların etraflarında kümeleşmektedirler. İlerleyen çevrim sayısıyla beraber, artan gerilme yığılmalarının tesiri altında mikroçatlaklar kritik çatlak yoğunluğuna ulaştığında makro çatlakları oluşturmakta ve elyaf doğrultusunda elyaf/matris ara yüzeyinde ilerlemeye çalışmaktadır. Böylelikle, elyaf ara yüzeyinde ilerleyen makro çatlaklar, "debonding" arayüzey ayrılma hasarlarını meydana getirmektedir. Bu hasarlar elyaf doğrultularında, elyaf/matris arayüzey dayanımına bağlı olrak gelişmektedir. Debonding hasarları tekrarlı yükleme-boşaltmanın tesiri altında yoğunlaşmakta ve diğer elyaf bantları ve komşu tabakaları da tesiri altına almaktadır. Tabakalardaki bu hasarlar yoğunluklarına göre, lokal rijitlik kayıpları ve farklılıklarına neden olmaktadır. Bu rijitlik kayıpları ve kayıplardaki farklılıklar, tabakalarda eğilmelere sebebiyet vermektedir. Eğilmeye maruz kalan tabakalarda, oluşan çekme-basma kuvvetleri ilave kayma gerilmelerini meydana getirmektedir. Kayma gerilmeleri "debonding" hasarlarını arttırmakta ve kümeleşme eğilimiyle delaminasyon hasarlarını başlatmakta, büyütmekte ve yaymaktadır. Matris çatlaklarının,

debonding ve delaminasyon hasar yoğunluklarının kritik seviyeye ulaşmasıyla boru içindeki akışkan kendine bir yol bularak, sızıntı ve akışkan jeti hasarı oluşturmaktadır.

SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların tabakalarındaki eğilme esnasında, delaminasyon hasarlarının oluşumuna elyaf/matris arayüzey dayanımı, kayma gerilmelerine gösterilen direnç etki etmektedir. Matris malzemenin kırılma tokluğu ve şekil değişiminin matris hasarları üzerindeki etkisi büyüktür. Bu nedenle, BTP kompozit borulara %4 SiO_2 nanopartikül katkısı, $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında önemli derecede etki etmiş, yorulma ömründe 8-9 katlık artış sağladığı gibi, sonuç hasarlarında elyaf kırılmasının yerini matris hasarları olan sızıntı hasarı almıştır (Şekil4.38 ve Şekil 4.39). Bu sonuç hasarı ile S-N diyagramının II. Bölgesini oluşturmuştur(Şekil 4.39).

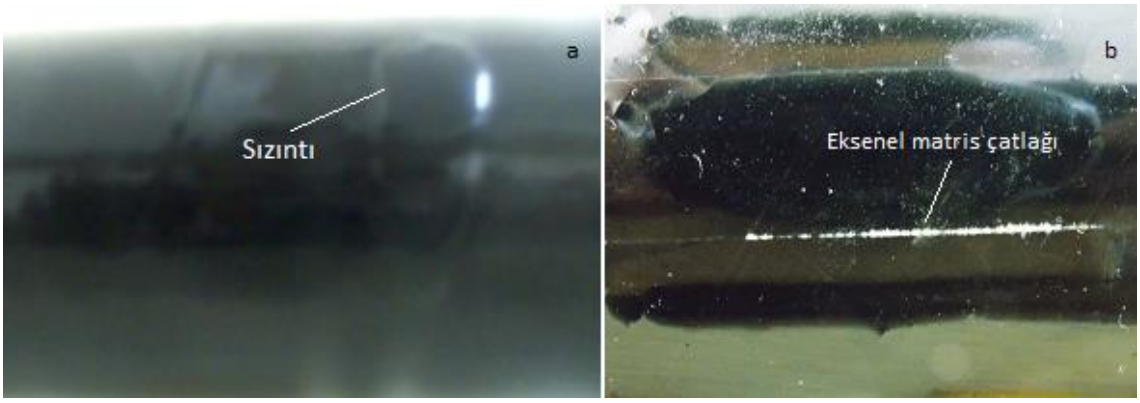
Bölüm 4.5.2'de izah edildiği gibi SiO_2 nanopartiküllerin etkileri aşağıdaki şekilde oluşmaktadır.

SiO_2 nanopartiküller çatlağı tutması, çatlağı saptırarak dallandırması, nanopartikül/epoksi ayrılmaları, silan ile yüzey modifikasyonu neticesinde arafazların plastikleştirici etkisiyle şekil değişimini ve kırılma mekanizmalarını etkinleştirerek, mikro çatlak oluşumunu ve gelişimini geciktirmiştir. Bunlara ilaveten, kullanılan SiO_2 nanopartiküllerin $650g/m^2$ gibi yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, elyaf/matris arayüzey dayanımını arttırmada etkil olduğu düşünülmektedir. Matris malzemenin kırılma tokluğunun artışının, sızıntı ve akışkan jet hasarlarının oluşumunda önemli derecede etki ettiği S-N grafiklerinin izahatında ifade edilmiştir. Dolayısıyla, sonuç hasarları incelendiğinde, SiO_2 nanopartikül etkisi açıkça görülmektedir. SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit borularda meydana gelen sızıntı hasarının mikro görüntüleri Şekil 4.46'da verilmiştir. $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında yorulma deneyi süresince içten dış tabakaya 1-2-3-4 doğrultularında oluşan delaminasyon hasarlarında akışkan kendisine bir yol bularak sızıntı hasarını oluşturduğu Şekil 4.46a'daki mikro görüntüsünden anlaşılmaktadır. Şekil 4.46b'de ise 4 rakamıyla ifade edilen bölgede akışkanın dış yüzeye ulaştığı iğne ucu deliği ve sızıntı hasarı görülmektedir.



Şekil 4.46 a) $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit meydana gelen akışkan yolu **b)** sızıntı hasarının meydana geldiği iğne ucu deliği.

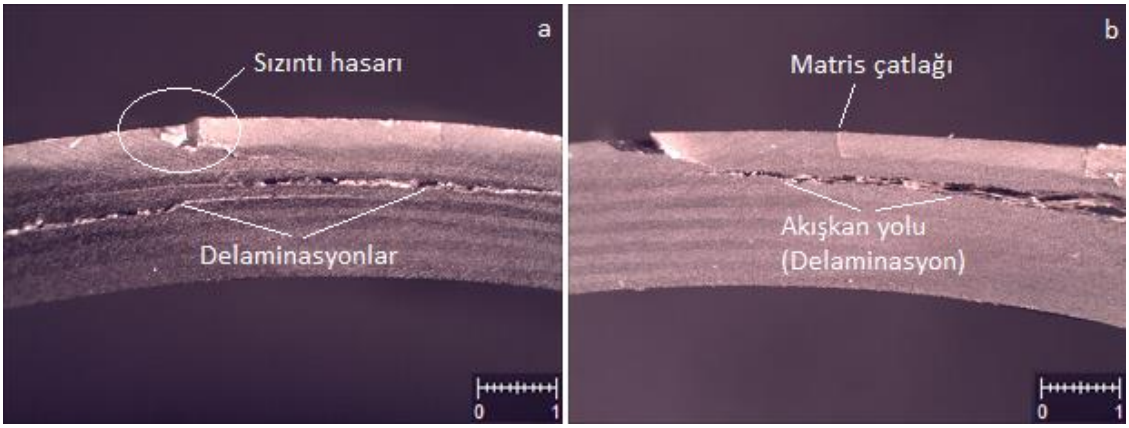
SiO_2 nanopartikül katkısı 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında sonuç hasarı ortalama 1125059 N'de sızıntı hasarı şeklinde olup, çatlaklarda meydana gelmemiştir.



Şekil 4.47a) SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t eliptik yüzeyli çatlaklı BTP boruların $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında meydana gelen sızın hasarı **b)** eksenel matris çatlağı.

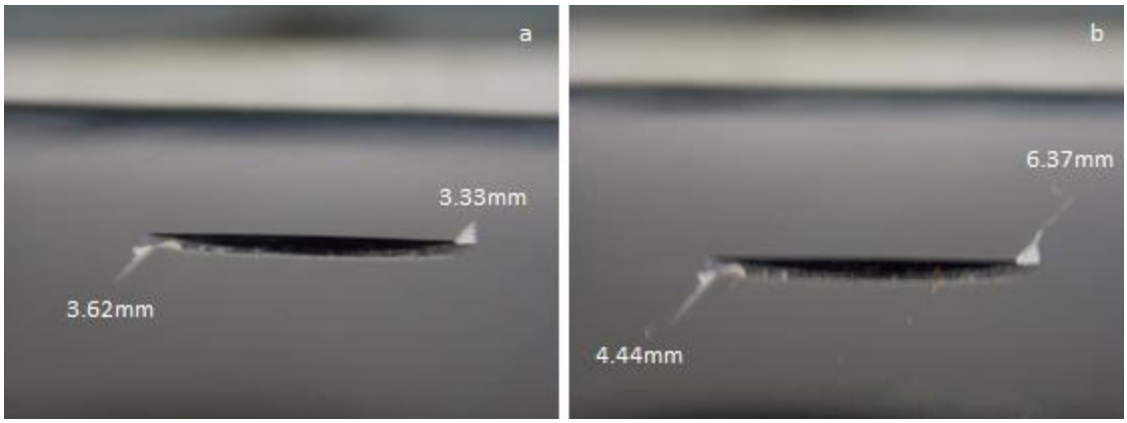
0.25 a/t eliptik yüzeyli çatlak %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla sığ çatlak etkisi göstermiştir. Reçinenin bol olduğu yerlerde 10cm'yi aşan eksenel matris çatlakları görülmüştür(Şekil 4.47b). Bunun dışından hasara etki eden debonding ve delaminasyon hasarları gözlemlenememiştir. 0.25 a/t çatlak derinliği oranında katkılı BTP kompozit borunun sığ çatlak etkisi göstermesinde %4 SiO_2 nanopartikül ilavesinin elyaf/matris arayüzey dayanımını arttırdığı düşünülmektedir. Ayrıca uygulanan gerilme oranın düşük olması, borunun çapında ilave deplasman değişimini azaltmaktadır. Dolayısıyla, S-N grafiklerinin II. Bölgede nanopartiküllerin sağlamış olduğu etki göz önüne alındığında, SiO_2 nanopartiküllerin katkısıyla matris malzemenin şekil değişimi ve kırılma tokluğuna etki eden kırılma mekanizmalarının da sığ çatlak etkisi göstermesinde etken rol aldığı yorumlanmıştır. Bunların yanında %4 SiO_2 nanopartikül ilavesiyle BTP

kompozit borunun rijitliğininde artması, dolayısıyla 0.25 a/t eliptik yüzey çatlak bölgesinde lokal rijitlik kayıplarınıda azatlığı ve sığ çatlak etkisi gösterdiği düşüncesi oluşmuştur. Şekil 4.47a'da deney sonucunca oluşan sızıntı hasarı verilirken, Şekil 4.48b'deki mikro görüntülerde sızıntı hasarına yol açan delaminasyonlar ve delaminayonların oluşturduğu akışkan yolu gözlemlenebilmektedir.



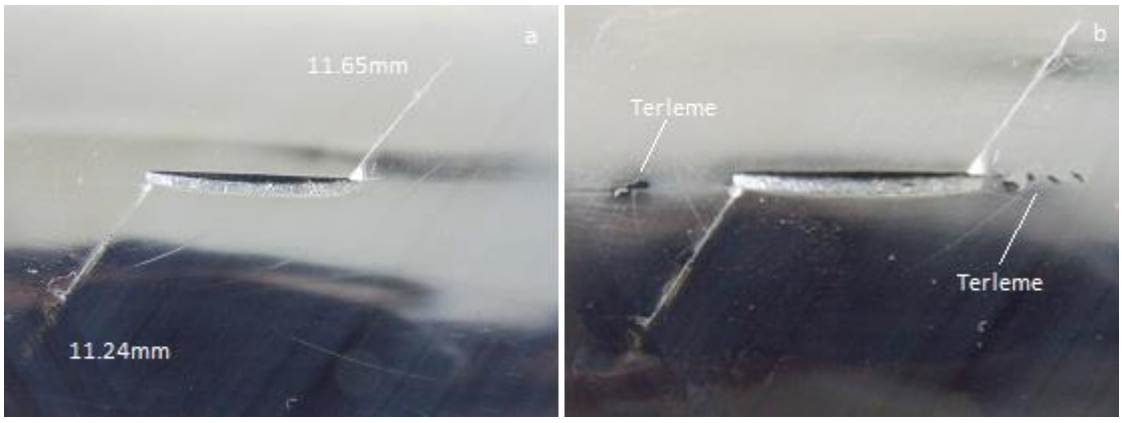
Şekil 4.48 SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t eliptik yüzeyli çatlaklı BTP boruların $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında meydana gelen sızıntı hasar bölgesinden alınan **a)** delaminasyon hasarları **b)** kesitin arka yüzünde gözlemlenen matris çatlağı ve akışkan yolu.

$0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesinde SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda, 348400-360500 N çevrim dolaylarında çatlağın her iki ucunda elyaf doğrultularında debonding ve delaminasyon hasarlarının neden olduğu çatlak ilerlemesi gözlemlenilmiştir. Şekil 4.49a'da görüldüğü gibi çatlağın sol ucunda 3.62mm sağ ucunda ise 3.33 mm'lik ilerleme kaydedilmiştir. Çevrim sayısı 421300-510000 N değerlerine ulaştığında, çatlağın sol ucunda 4.44mm ve sağ ucunda ise 6.37 mm ilerleme tespit edilmiştir.



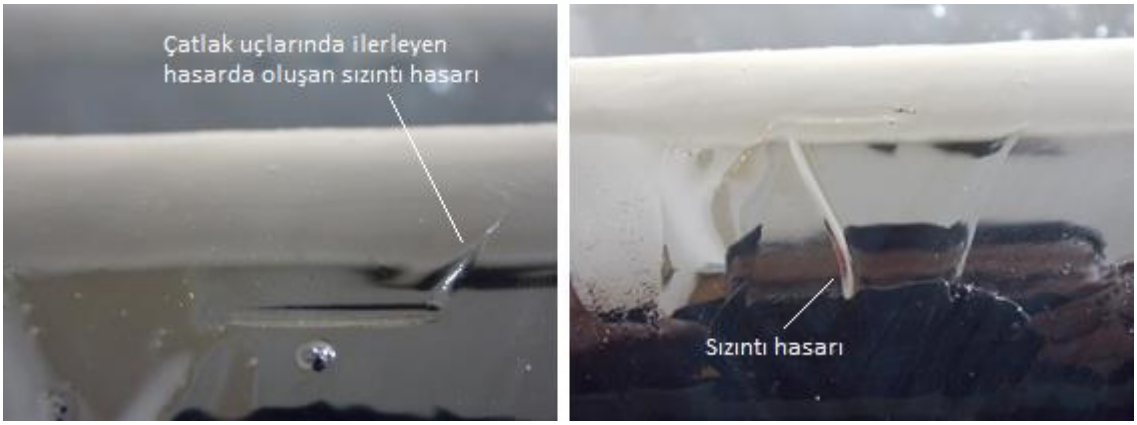
Şekil 4.49a) $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesinde SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP boruların **a)** 348400-360500 N'de çatlak ilerlemesi **b)** 421300-510000 N'de çatlak ilerlemeleri

546450-556100 N çevrimlerine ulaşıldığında, sol uçtaki çatlak ilerlemesi 11.24 mm ve sağ uçtaki çatlak ilerlemesi 11.65 mm değerlerini almıştır(Şekil 4.50a). 610000N çevrim dolaylarında Şekil 4.50b'de görüldüğü gibi çatlakların uç taraflarında debonding hasarlarının neden olduğu terlemeler görülmüştür.



Şekil 4.50 $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ yorulma gerilmesinde SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP boruların **a)** 546450-556100 N'de çatlak ilerlemesi **b)** 610000 N'de görülen terlemeler.

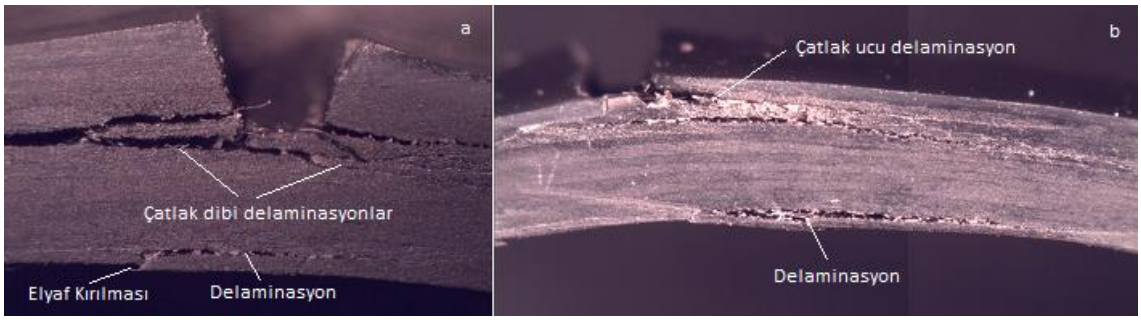
Çevrim sayısı ortalama 647075N değerine ulaştığında ise, debonding ve delaminasyon matris hasarlarının etkisiyle çatlak uçlarından sarım açıları doğrultularında ilerleyen hasar ve çatlakta akışkan kendine bir yol bularak Şekil 4.51' de görüldüğü gibi dış yüzeye ulaşarak sızıntı hasarını meydana getirmiştir.



Şekil 4.51 $0.3\sigma_{\theta 0 statik}$ yorulma gerilmesinde SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP borularda çatlakta oluşan sızıntı hasarı.

Şekil 4.52a'da çatlağın ortasına yakın bölgedeki çatlak dibinde oluşan delaminasyonlar ve en iç tabakada oluşan elyaf krılması ve delaminasyon hasarları ve

Şekil 4.52b'de çatlak uçlarında ve iç yüzeye yakın alt tabakada meydana gelen delaminasyon hasarları mikroskop görüntüleriyle tespit edilmiştir.

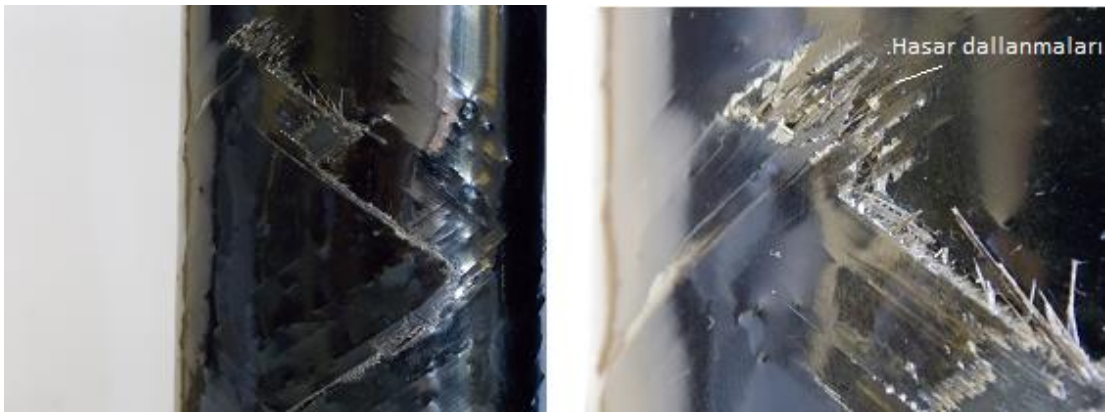


Şekil 4.52 $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların **a)** çatlak dibinde meydana gelen delaminasyon ve elyaf kırılmaları **b)** çatlak ucunda meydana gelen delaminasyonları.

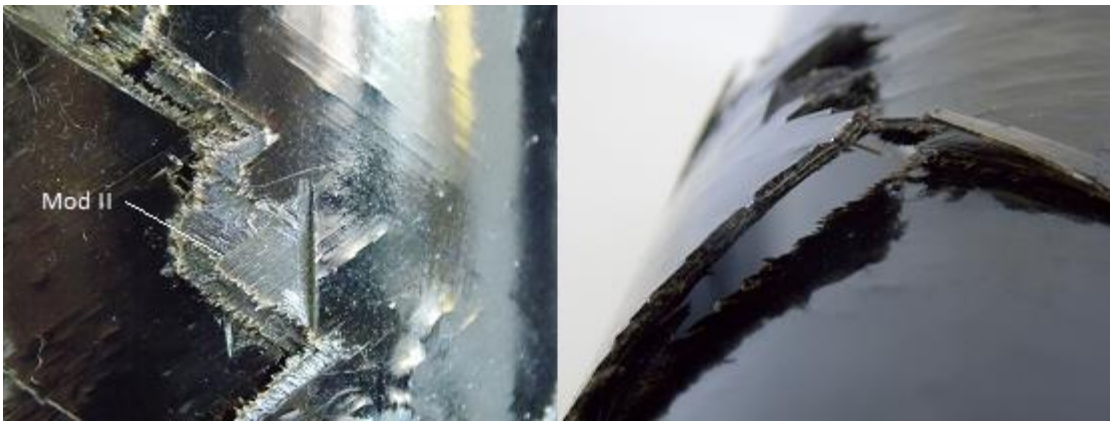
4.6.2. 0.4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında iç basınç hasar davranışları

$0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozit boruların yorulma deneyi sonucunda, ortalama 38631N'de patlamayla elyaf kırılması Şekil 4.53'de görüldüğü gibi sonuçlanmıştır.

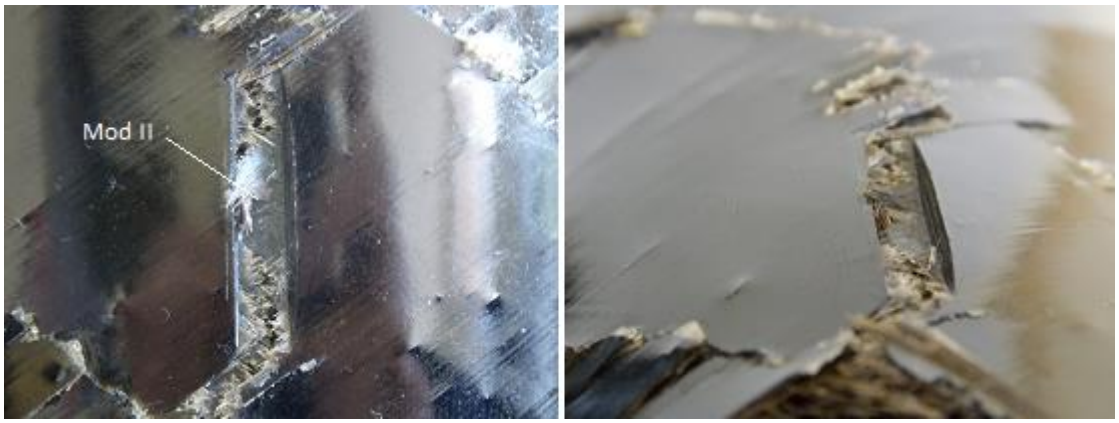
0.25 ve 0.5 a/t eliptik çatlaklı BTP kompozit boruların patlamayla elyaf kırılmasıyla sonuçlanan nihai hasarlar ortalama 18105 ve 8884N'de çatlaklarda meydana gelmiştir. Her iki çatlakta Mod I kırılma tipinin yanında delaminasyon ile sonuçlanan Mod II kırılmasıda Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'de gözlemlenilmektedir. 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borunun çatlağı enine kesilmesiyle alınan Şekil 4.56'deki mikro görüntülerden, çatlak dibi delaminasyonlar ile Mod II kırılması ve tabakalarda meydana gelen elyaf kırılmaları rahatlık görülmektedir.



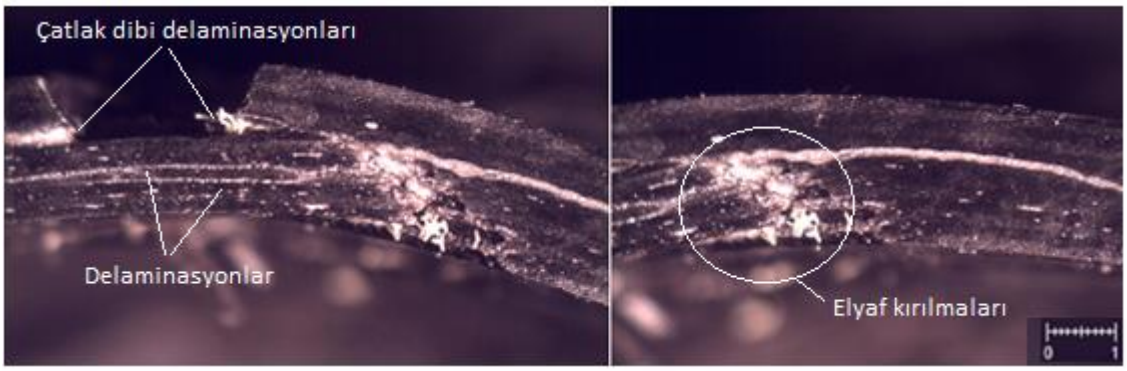
Şekil 4.53 $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozit borularda patlamayla oluşan elyaf kırılması sonuç hasarı



Şekil 4.54 $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla çatlakta oluşan elyaf kırılması sonuç hasarı.



Şekil 4.55 $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla çatlakta oluşan elyaf kırılması sonuç hasarı.



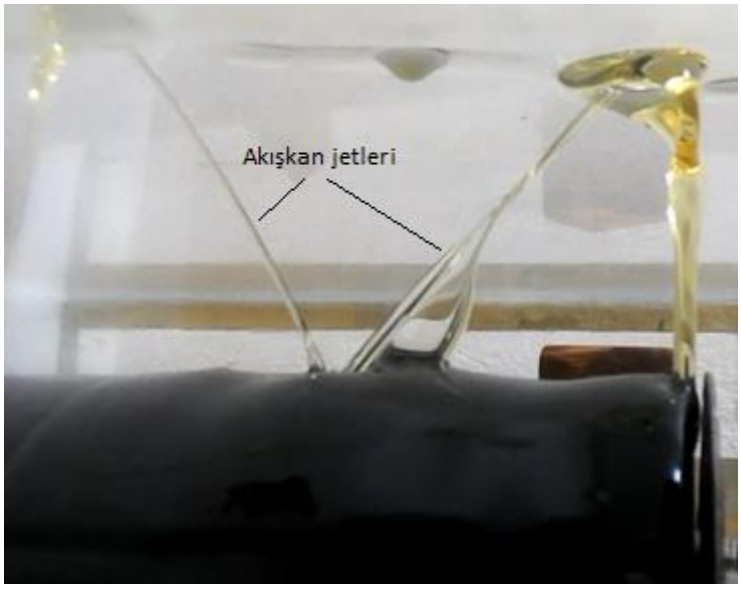
Şekil 4.56 $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP borunun çatlak bölgesinde oluşan delaminasyon ve elyaf kırılması sonuç hasarı.

$0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız ve 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda sırasıyla ortalama 247829 ve 126405N sonunda akışkan jeti matris hasarı meydana gelmiştir (Şekil 4.57 ve Şekil 4.58). 0.25 a/t

çatlaklı BTP kompozit borularda akışkan jeti matris hasarı çatlaklarda oluşmamıştır. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda SiO_2 nanopartikül katkısıyla sığ çatlak etkisi görülmüştür. SiO_2 nanopartiküllerin sağlamış olduğu kırılma mekanizmaları ve düşük gerilme oranında etkisi ve gerilme oranında düşük olması bu etkide önemli rol oynamıştır. Arayüzey ve tabakalararasında mikro çatlak oluşumunu geciktirmiş ve çatlakta kenar etkisini azatlığı şeklinde yorumlanmıştır. Bunlara ilaveten SiO_2 nanopartiküller 0.25a/t çatlak bölgesindeki BTP kompozit borunun rijitlik kaybını sağlamış olduğu rijitlik artışı ile izole ettiği fikrini vermiştir.

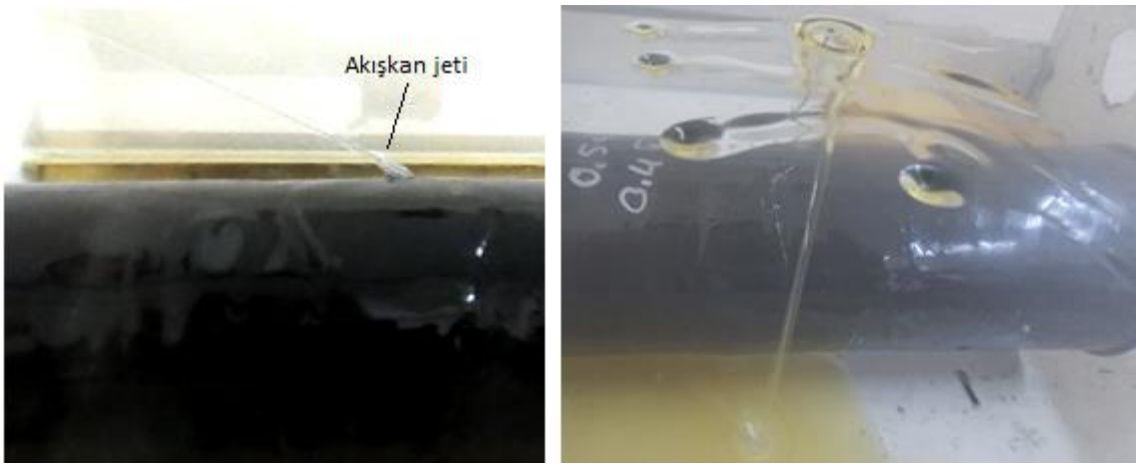


Şekil 4.57 $0.4\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP borularda meydana gelen akışkan jeti hasarları.



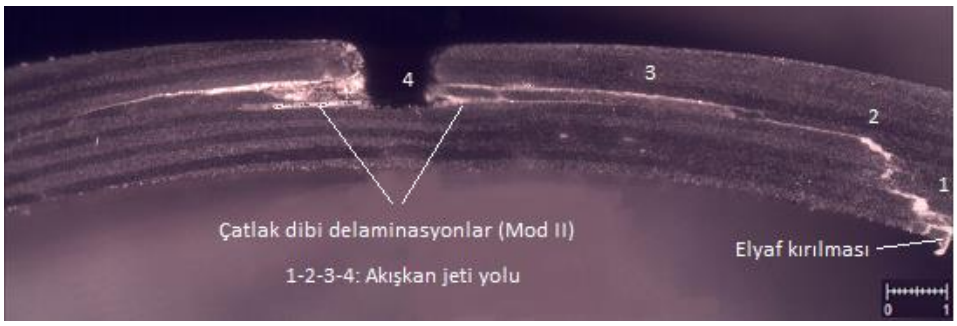
Şekil 4.58 $0.4\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP borularda meydana gelen akışkan jeti hasarları.

0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda ortalama 63665 N'de akışkan jeti matris hasarı çatlakta meydana gelmiştir(Şekil 4.59).



Şekil 4.59 $0.4\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP borularda meydana gelen akışkan jeti hasarları.

Şekil 4.60'daki mikro görüntülerden, çatlak dibindeki delaminasyon hasarları ve alt tabakalardaki delaminasyon, debonding, ve lokal elyaf kırılma hasarlarından akışkan jeti matris hasarının nasıl oluştuğu anlaşılmaktadır. İç yüzeydeki tabakadaki lokal debonding, delaminasyon ve elyaf kırılmalarının sonucunda, akışkan yağ üst tabakalardaki delaminasyon hasarlarına sızmakta, Şekil 4.59'da verilen mikro görüntüsünde 1-2-3-4 yollarını takip ederek çatlak dibindeki delaminasyon hasarından çatlağa ulaşmaktığı anlaşılmaktadır. Neticesinde yükleme ile matris hasarı olan akışkan jetini meydana getirmiştir.



Şekil 4.60 $0.4\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO2 nanopartikül katkılı BTP borularda meydana gelen akışkanın çatlak dibine kadar takip ettiği yol.

4.6.3. 0.5 $\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında iç basınç hasar davranışları

$0.5\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında çatlaksız, 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda Şekil 4.61, Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'de görüldüğü gibi sonuç hasarları elyaf kırılmasıyla neticelenmiştir. Eliptik çatlaklı BTP kompozit borularda sonuç hasarları çatlaklarda meydan gelmiştir. Şekil 4.62 ve Şekil 4.63'deki çatlak

görüntülerine bakıldığında çatlak dibi delaminasyonlar gözlemlenebilmektedir. Elyaf kırılması hasarının ise yoğunluğu, elyaf bantlarındaki patlama anındaki parçalanmalar ve elyafların birbirinden ayrılarak sıyrılma hasarıyla birlikte uçlarının fırçamsı bir şekil aldığı görülmektedir.



Şekil 4.61 $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları



Şekil 4.62 $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları

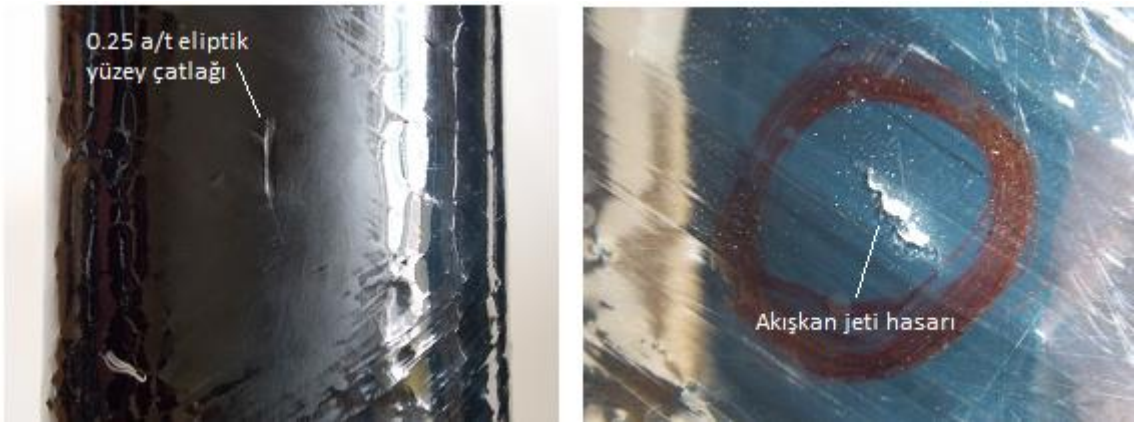


Şekil 4.63 $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları

SiO_2 nanopartikül katkılı $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız ve 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda nihai hasar matris hasarı olan akışkan jeti şeklinde Şekil 4.64 ve Şekil 4.64'de verildiği üzere oluşmuştur. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda akışkan jeti çatlakta meydana gelmemiştir. Çatlağın uçlarında ve dibinde nanopartiküllerin elyaf/matris arayüzeyleri ve tabakalararasında dayanım arttığı, matris kırılma tokluğundaki artışın çatlakta, matris çatlak oluşumunu geciktirdiği kanısı oluşmuştur. 0.5σθθstatik gerilme oranında SiO_2 nanopartiküllerin ilavesiyle sağlanılan şekil değişimi artışı, 0.25 a/t çatlak bölgesinde lokal rijitlik kayıplarının, çatlaksız tabakalardaki rijitlik kayıplarıyla fazla fark olmaması nedeniyle sığ çatlak etkisi gösterdiği düşünülmüştür.



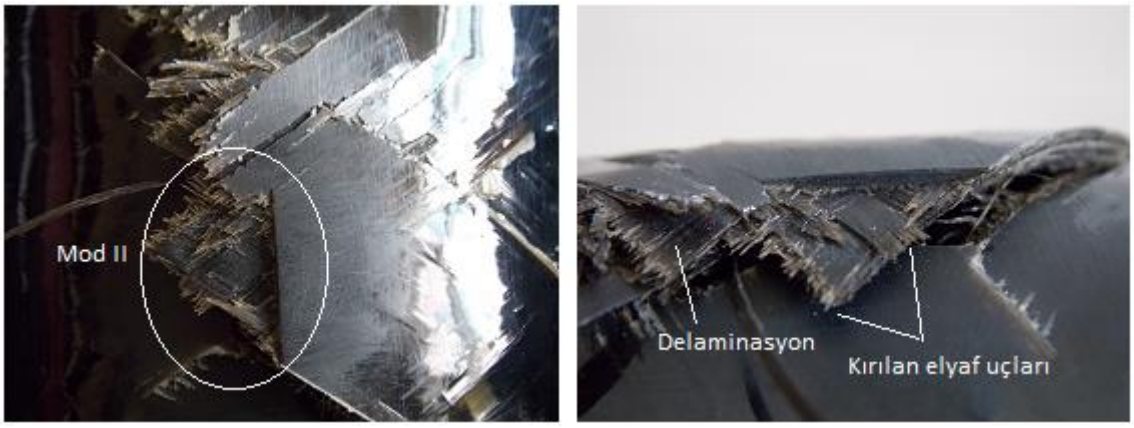
Şekil 4.64 $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit borularda meydana gelen akışkan jeti matris sonuç hasarları



Şekil 4.65 $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız BTP kompozit borularda meydana gelen akışkan jeti matris sonuç hasarları

Aynı gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda, çatlak derinliği oranının artması çatlakta rjitlik kaybı ve çatlak bölgesindeki eğilmenin

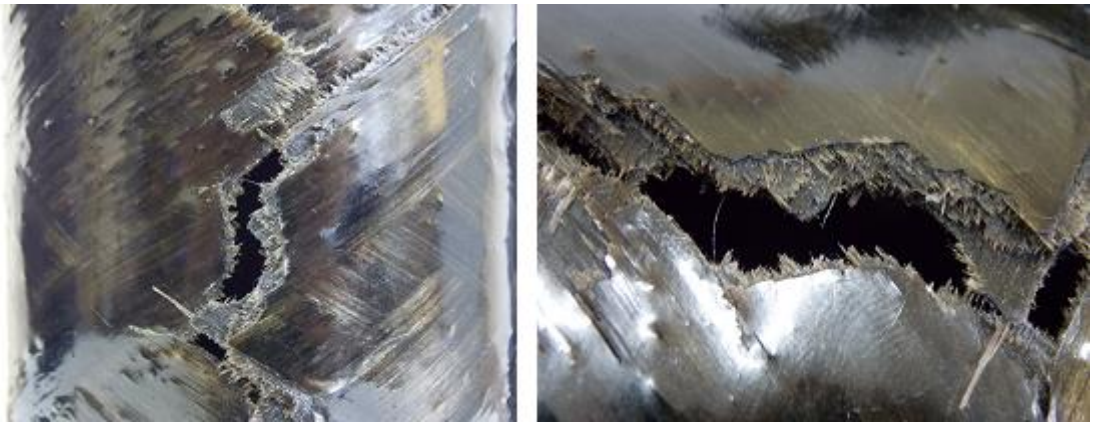
de tabakalardaki rijitlik farklılıklarının komşu tabakalarda ve bantlarda artışı, çatlakta patlamayla beraber elyaf kırılması sonuç hasarını ortaya çıkarmıştır (Şekil 4.66). Mod I kırılmanın tesiriyle çatlak dibinde oluşan Mod II kırılma hasarı ve hasarların dallanarak ilerlerken meydana gelen elyaf kırılma hasarı Şekil 4.66'de verilmiştir.



Şekil 4.66 $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda meydana gelen akışkan jeti matris sonuç hasarları

4.6.4. 0,6 ve 0.7 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında iç basınç hasar davranışları

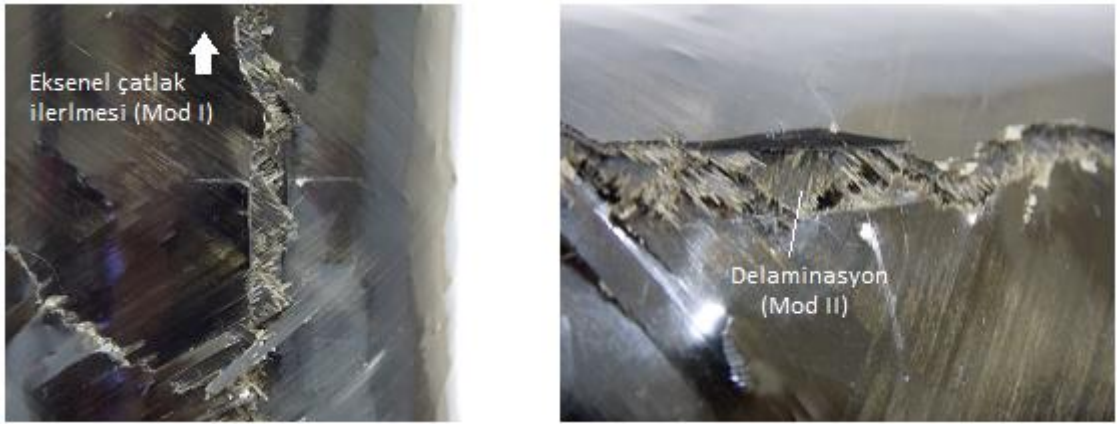
$0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında çatlaksız, 0.25 ve 0.5 a/t çatlaklı BTP kompozit borularda nihai hasarları patlamayla elyaf kırılması şeklinde sonuçlanmıştır. Çatlaklı BTP kompozit borularda nihai hasarlar çatlaklarda meydana gelmiştir(Şekil 4.67, Şekil 4.68, Şekil 4.69, Şekil 4.70, Şekil 4.71 ve Şekil 4.72).



Şekil 4.67 $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.



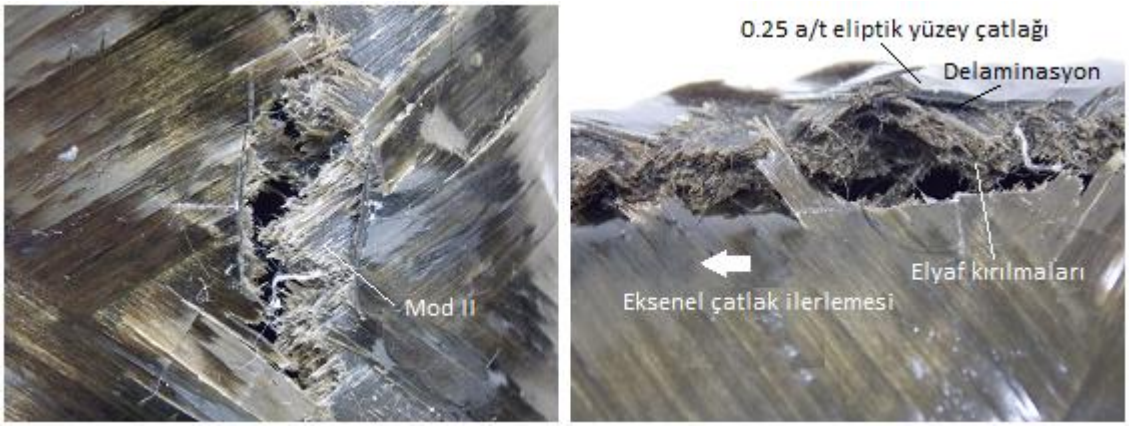
Şekil 4.68 $0.6\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.



Şekil 4.69 $0.6\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.



Şekil 4.70 $0.7\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında çatlaksız BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.



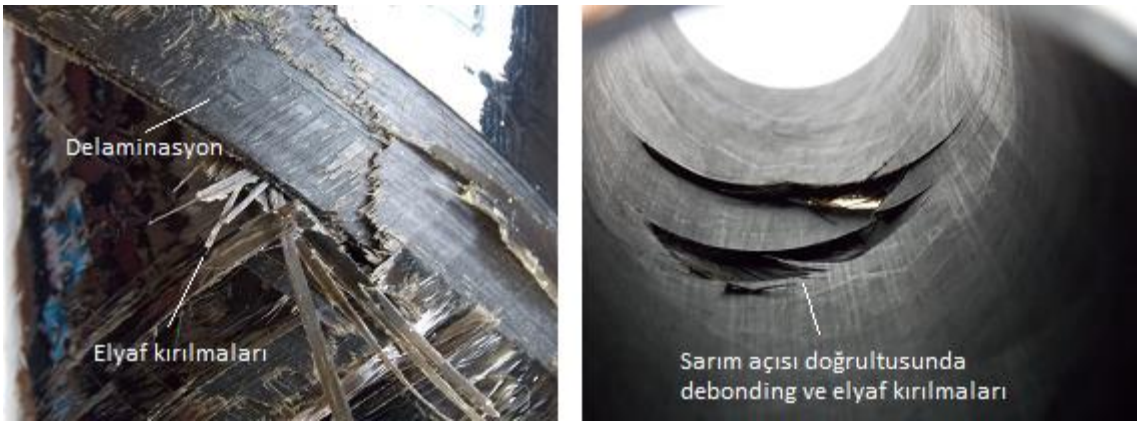
Şekil 4.71 $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.



Şekil 4.72 $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.

$0,6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0,7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında çatlaklı BTP kompozitlerde çatlaktan ilerleyen hasarların yönlerine ve dallanmalarına bakıldığında Mod II kırılma hasarlarının yanında Mod I kırılmasının sonuç hasarları üzerinde çok fazla etkinleştiği çatlak görüntülerine bakılarak yorumlanmıştır. Elyaf bantlarında kırılan elyafların uçlarını incelediğimizde, matristen sıyrılarak püskülümsü, fırçamsı görüntü sergilemektedir. Buradan matris/elyaf arayüzey dayanımlarının zayıf olduğu düşünülmektedir. Taşyürek (2014) doktora çalışmasında 0.4, 0.5 ve $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında 0.25 ve 0.5 a/t eliptik çatlaklı $\pm 55^{o}$ filaman sarım CTP boruların sonuç hasarlarının patlama neticesinde çatlaklarda meydana geldiğini gözlemlemiştir. Samancı (2004) 0.4, 0.5 ve $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında aynı kompozit borular için sonuç hasarlarının elyaf kırılmasıyla çatlaklarda meydana geldiğini belirlemiştir. Taşyürek(2014) ve Samancı (2004) çatlaklarda meydana gelen elyaf kırılması sonuç

hasarlarında Mod I, Mod II ve Mod III kırılmalarının etkin olduğunu çalışmalarında ifade etmişlerdir.



Şekil 4.73 $0.6\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme çatlaksız SiO_2 katkılı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılması sonuç hasarları.



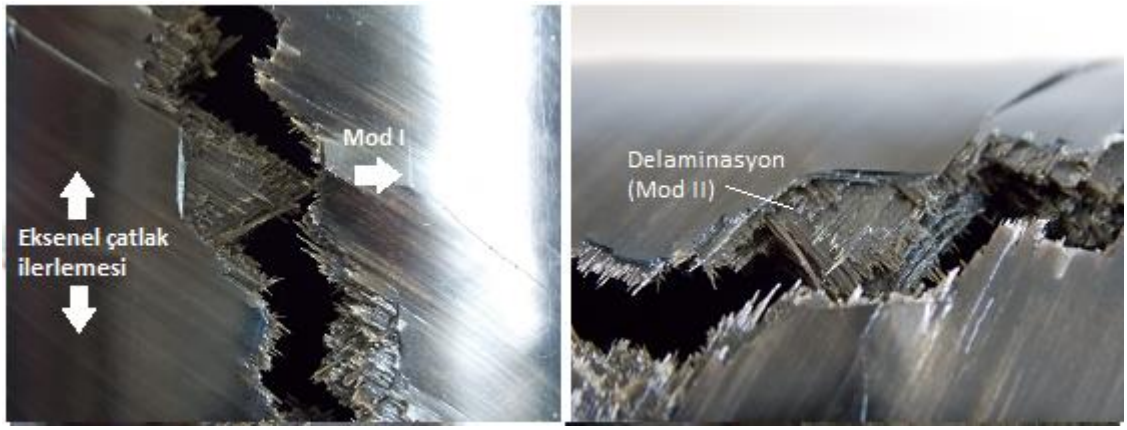
Şekil 4.74 $0.6\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen Mod I ve Mod II kırılması sonuç hasarları.



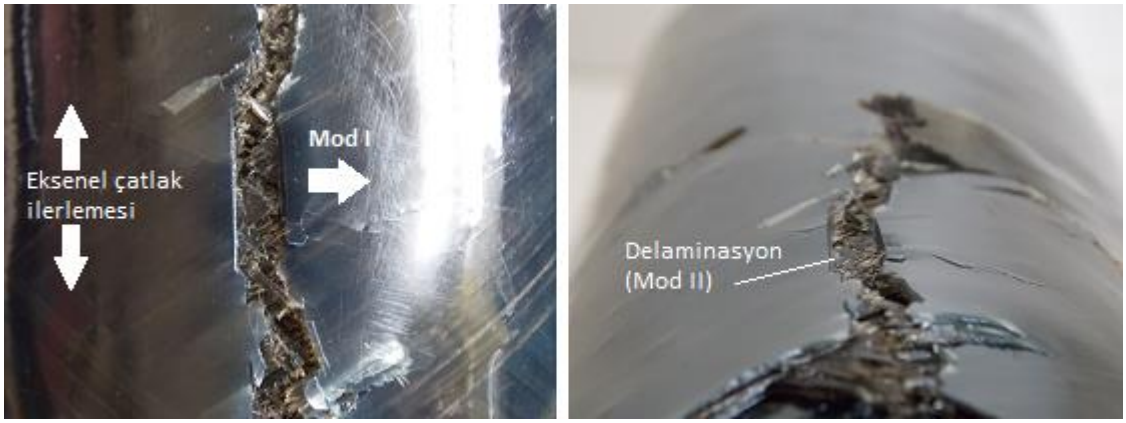
Şekil 4.75 $0.6\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen Mod I ve Mod II kırılma sonuç hasarları.



Şekil 4.76 $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılma sonuç hasarları.



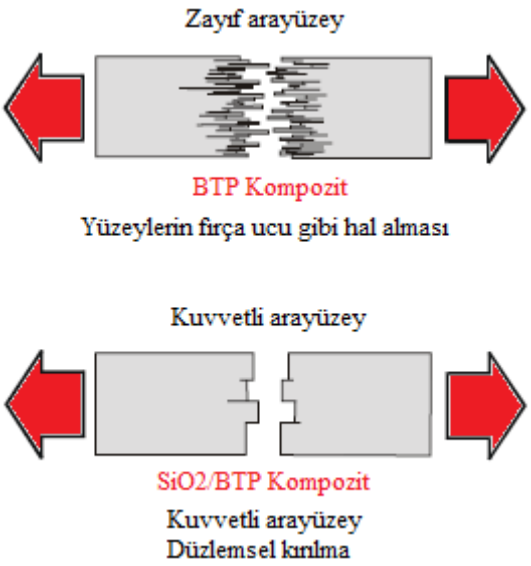
Şekil 4.77 $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılma sonuç hasarları.



Şekil 4.78 $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda patlamayla meydana gelen elyaf kırılma sonuç hasarları.

$0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında çatlaksız, 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların nihai hasarları patlama şeklinde elyaf kırılmasıyla sonuçlanmıştır(Şekil 4.74, Şekil 4.75, Şekil 4.76, Şekil 4.77,

Şekil 4.78). 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP Kompozit boruların sonuç hasarları çatlaklarda meydana gelmiştir. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda, çatlakta artan gerilme oranı matris hasarlarının oluşumunu hızlandırırken, çatlağın etkilediği tabakalarda rijitlik kayıplarını arttırdığı ve sığ çatlak etkisini azaltığı düşünülmektedir. Elyaf bantların kırılma hasarına uğrayan uçlarına bakıldığında, elyafların birbirine yapışık olduğu $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranındaki patlama hasarlarının görüntülerinden gözlemlenebilmektedir. Ayrıca statik iç basınç patlama deneylerinde Şekil 4.17 ve Şekil 4.22'e bakıldığında da rahatlıkla gözlemlenilebilmektedir. Buradan, SiO_2 nanopartiküllerin elyaf/matris arayüzeyinde kuvvetli arayüzey oluşturduğu ve dayanımı artırdığı yorumu yapılabilir. Şekil 4.79'de elyaf/matris arayüzey dayanımının elyaf kırılması üzerindeki etkileri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.79 SiO_2 nanopartikül katkısıyla elyaf/matris arayüzey dayanımının elyaf kırılması sonuç hasarı üzerine olan etkileri(Gamstedt ve Anderson, 2001).

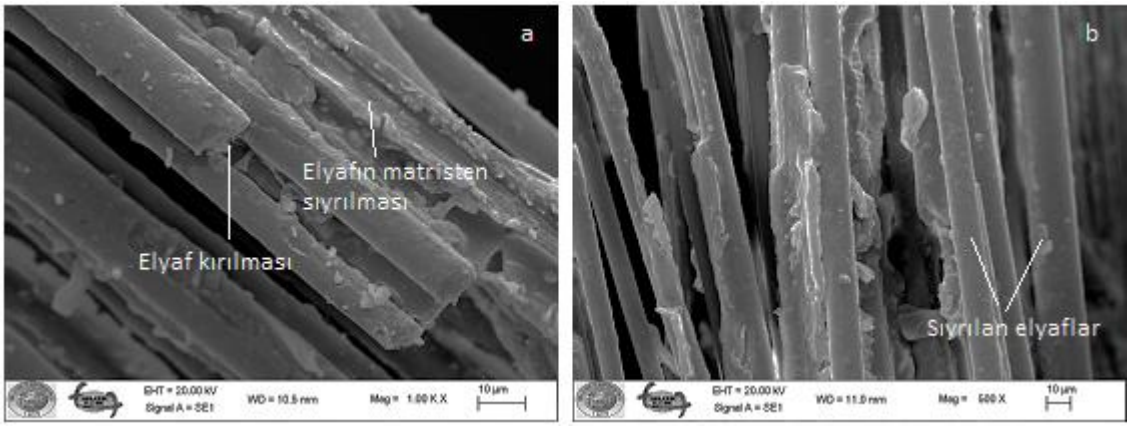
Artan gerilme oranı, tabakalarda matris hasar oluşumunu hızlandırmakta, dolayısıyla tabakalarda meydana gelen rijitlik kayıplarını ve rijitlik farklılıklarını hızlandırmaktadır. Böylelikle, çatlaklarda Mod I ve Mod II hasarlarının oluşumunu hızlandırmış ve neticelendirmiştir. S-N diyagramında belirtilen I. bölgeyi ifade eden elyaf kırılması sonuç hasarları $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında katkılı ve katkısız BTP kompozitlerde meydana gelmiştir.

Genel anlamada SiO_2 nanopartikül katkısının artan yorulma ömrü ve sonuç hasar mekanizmaları göz önüne alınarak değerlendirme yapıldığında, daha önceden de açıklandığı üzere, düşük gerilme oranlarında çok daha etkin olduğu görülmüştür. SiO_2 nanopartiküllerin matris malzemedeki modifikasyonu ile tokluğu arttırılmış epoksiden elyaflara yük transferinin düşük gerilme oranlarında arttığı, yorulma ömründeki artış ve sonuç hasarlarında meydana gelen farklılıkdan anlaşılabileceği yorumlanmıştır. SiO_2 nanopartiküllerin kırılma mekanizmalarını etkileyerek ve şekil değişimini arttırarak çatlakların oluşumu ve gelişimini geciktirmesi, matristen elyaflara yük transferini kolaylaştırmıştır(Loos ve ark. 2012, Manjunatha ve ark. 2012). Artan gerilme oranı ($0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$) makroçatlakların, debonding, delaminasyonların oluşumu ve gelişimini yoğunlaştırmakta, lokal elyaf kırılma hasarlarını tabakalarda oluşan eğilmeler ile Mod I ve Mod II kırılmalarının tesiri altında çoğaltmaktadır. SiO_2 nanopartiküllerin matris malzemedeki çatlakları geciktirme etkisine rağmen elyafların etraflarında mikroçatlakların yoğunlaşmasıyla, elyafları enine kırmaya zorlayan gerilme yığılmalarını arttırmaktadır. Netice olarak $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit borularda elyaf kırılma hasarları baskın hale gelmektedir.

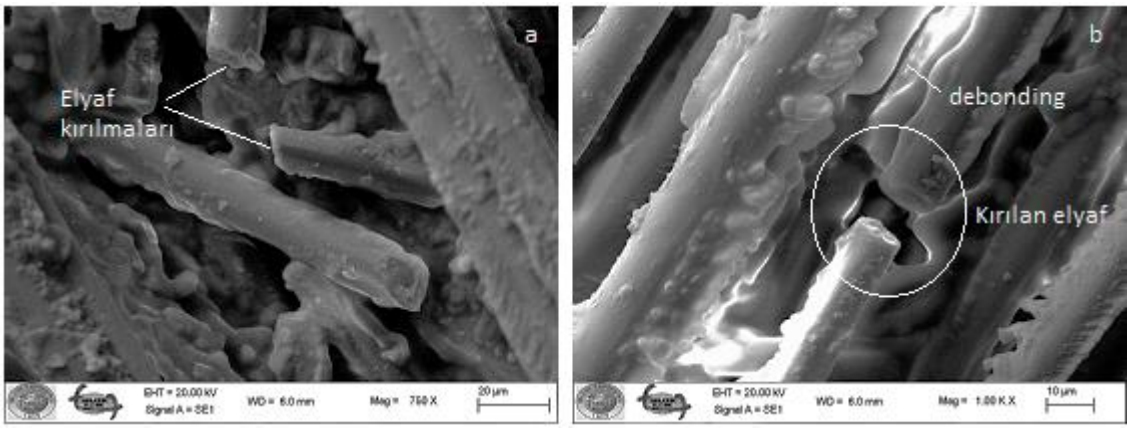
Taşyürek (2004) çalışmasında $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında %0.5 ve %1 ÇDKNT katkılı 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı CTP borularda, sonuç hasarlarının çatlaklarda olmadığını gözlemlemiştir. ÇDKNT'lerin bu gerilme oranında çatlaklarda sığ çatlak etkisini gösterdiğini çalışmasında yorumlamıştır. Gerilme oranının $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ değerine yükselmesiyle %0.5 ÇDKNT katkılı 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı CTP borularda patlamayla birlikte sonuç hasarları çatlaklarda meydana geldiğini belirlemiştir. Aynı gerilme oranında %1 ÇDKNT katkısıyla 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı CTP borularda elyaf kırılması hasarı yine çatlakta meydana gelmediği, 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklıda ise sonuç hasarının elyaf kırılması şeklinde çatlaklarda meydana geldiğini deneylerin neticesinde görmüştür. $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranına arttırıldığında, iki katkı oranında da ve 0.25 ve 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı CTP borularda sonuç hasarlarının hepsinin çatlaklarda meydana geldiğini Taşyürek(2014) doktora çalışmasında ifade etmiştir. Yapılan çalışmada da literatür ile kesişmelerin olduğu görülmektedir. Yapılan çalışma ve literatürdeki bulgular göz önüne alındığında, 0.6 ve 0.7 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yüksek gerilme oranlarının Mod I konumunda kırılmayı sonuç hasarları üzerinde çok daha fazla etkinleştirdiği ve sonuç hasarlarının patlamayla birlikte çatlaklarda meydana gelmesinde büyük rol aldığı yorumu yapılmıştır.

4.7. SiO_2 Nanopartikül Katkılı ve Katkısız BTP Kompozitlerin Kırılma Hasarlarının SEM İncelemeleri

SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların yorulma deneyleri sonunda, elyaf kırılması nihai hasarlarında kırılma yüzeylerinden numuneler alınarak SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizlerinde numunelerin kırılma yüzeylerinde oluşan hasarlar ve SiO_2 nanopartikül katkısının bu hasarlara olan etkileri incelenmiştir.



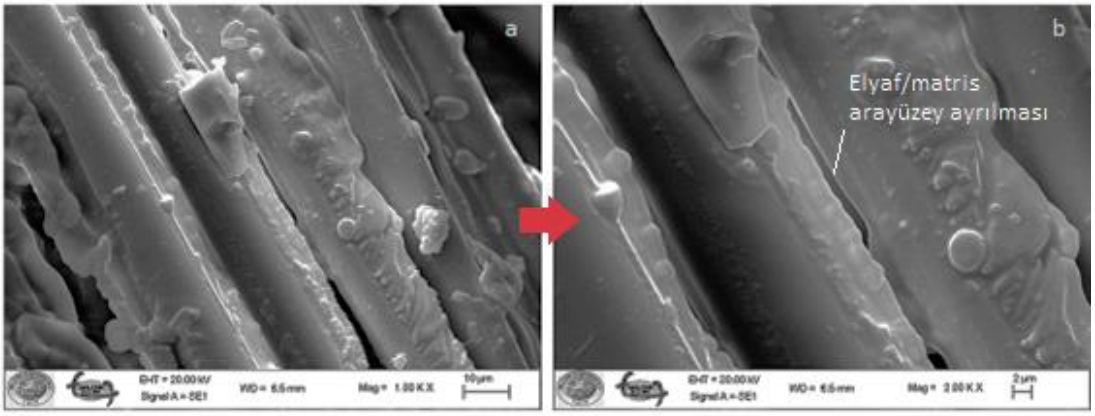
Şekil 4.80 Katkısız BTP kompozitlerin kırılma yüzeylerinde meydana gelen **a)** elyaf kırılmaları **b)** elyaf sıyrılmaları.



Şekil 4.81 Katkısız BTP kompozitlerin kırılma yüzeylerinde **a)** yoğun elyaf kırılmaları **b)** debonding ve elyaf sıyrılmaları

Şekil 4.80a ve Şekil 4.80b'deki 10µm ölçekli katkısız BTP kompozit boruların kırılma yüzeyleri incelendiğinde, bazalt elyafların epoksi matristen ayrılıp, sökülerek sıyrılma hasarına maruz kaldıkları görülmektedir. Şekil 4.81a'daki 20µm ölçeğindeki

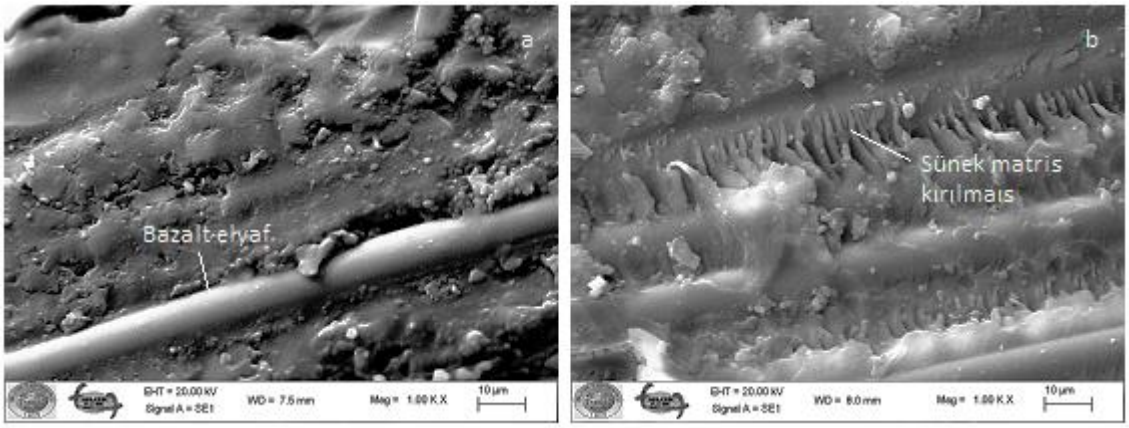
SEM görüntüsü incelendiğinde, yoğun elyaf kırılması hasarları gözlemlenilmektedir. Şekil 4.81b'deki SEM görüntüsünde ise aynı elyaf bandın içerisinde "debonding" elyaf/matris ayrılma hasarları ve elyaf kırılma hasarı verilmiştir.



Şekil 4.82 Katkısız BTP kompozitlerin kırılma yüzeylerinde elyaf matris arayüzey ayrılma hasarı **a)** 10µm **b)** 2µm

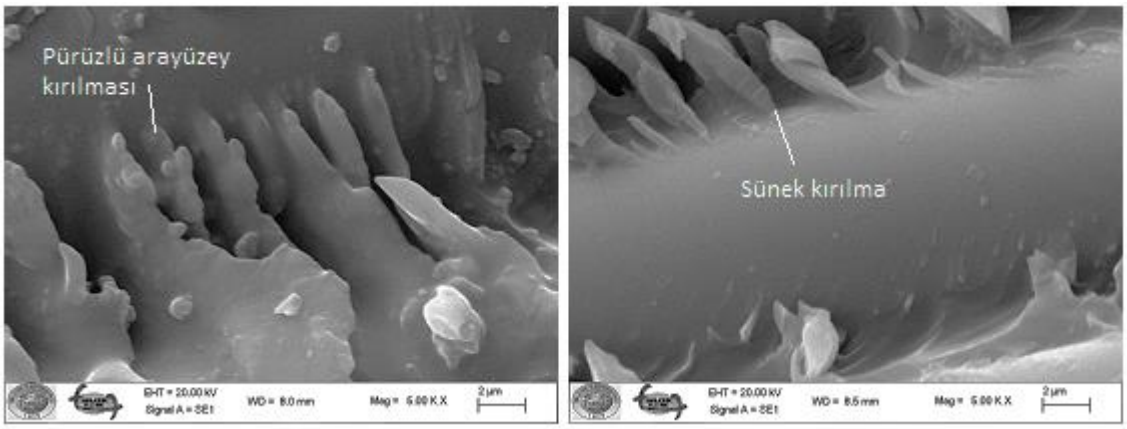
Delaminasyon hasarına uğramış numunenin Şekil 4.82a' da sunulan 10µm ölçekli ve Şekil 4.82b'de aynı görüntünün 2µm ölçekli SEM görüntülerinde "debonding" elyaf/matris ayrılma hasarları tespit edilmiştir. Bu tespit delaminasyon hasarlarının başlama sebeplerinden biri olarak nitelendirdiği, kompozit tabakalarda debonding elyaf/matris ayrılma hasarlarını ispatlar nitelikte olduğu yargısını oluşturmuştur(Wolodko, 1999). Ayrıca "debonding" ve lokal "elyaf kırılması" hasarlarının tabakalarda rijitlik kayıpları ve komşu tabakalardaki rijitlilik farklılıkları ile ilgili yapılan yorumları Şekil 4.81 ve Şekil 4.82'deki SEM görüntülerinin desteklediği düşünülmektedir.

Kırılma yüzeylerinin sıyrılma hasarlarıyla elyafların Şekil 4.80'de gözüktüğü gibi saç telleri gibi hal alması, elyaf/matris arayüzey adezyon ve dayanımının zayıflığından yorumlanmaktadır(Gamstedt ve Anderson, 2001, Wei ve ark., 2011) Buna mukabil, Şekil 4.80'deki bazalt elyafların bazılarında ve Şekil 4.81'daki SEM görüntülerinde bazalt elyafların yüzeylerine yapışmış epoksi parçacıkları görülmektedir. Bazalt elyaflar, cam elyaflar ile mukayese edildiğinde, bazalt elyafların Şekil 4.24'deki SEM görüntüsündede anlaşılacağı üzere daha pürüzlüdür. Bazalt elyafların üzerinde gözlemlenen bu epoksi parçalarının, yüzeyin pürüzlü olması sebebiyle epoks matris ile mekanik kilitlenmeler neticesinde oluştuğu fikrini vermiştir(Demirci ve ark., 2014; Wei ve ark., 2011).



Şekil 4.83 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.

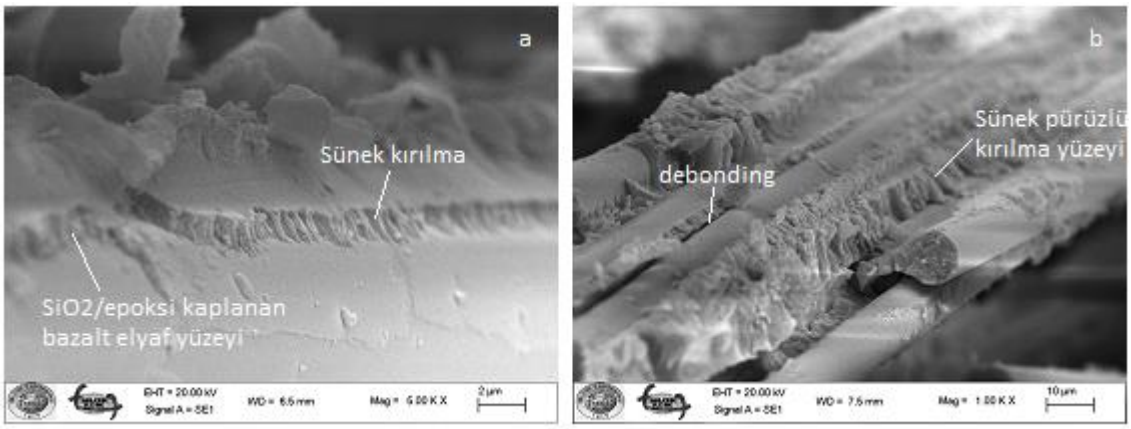
Şekil 4.83a ve Şekil 4.83b'de SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda yorulma deneyi neticesinde elyaf kırılmasıyla sonuçlanan bölgeden alınan kırılma yüzeylerinin 10µm ölçekli SEM görüntüleri sunulmuştur. Bu hasarın SEM görüntüleri incelendiğinde, sıyrılma hasarı ve "debonding" elyaf/matris ayrılma hasarlarının oldukça az olduğu görülmektedir.



Şekil 4.84 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların kırılma yüzeylerindeki elyaf/matris arayüzeyinde matriste meydana gelen pürüzlü kırılmalar.

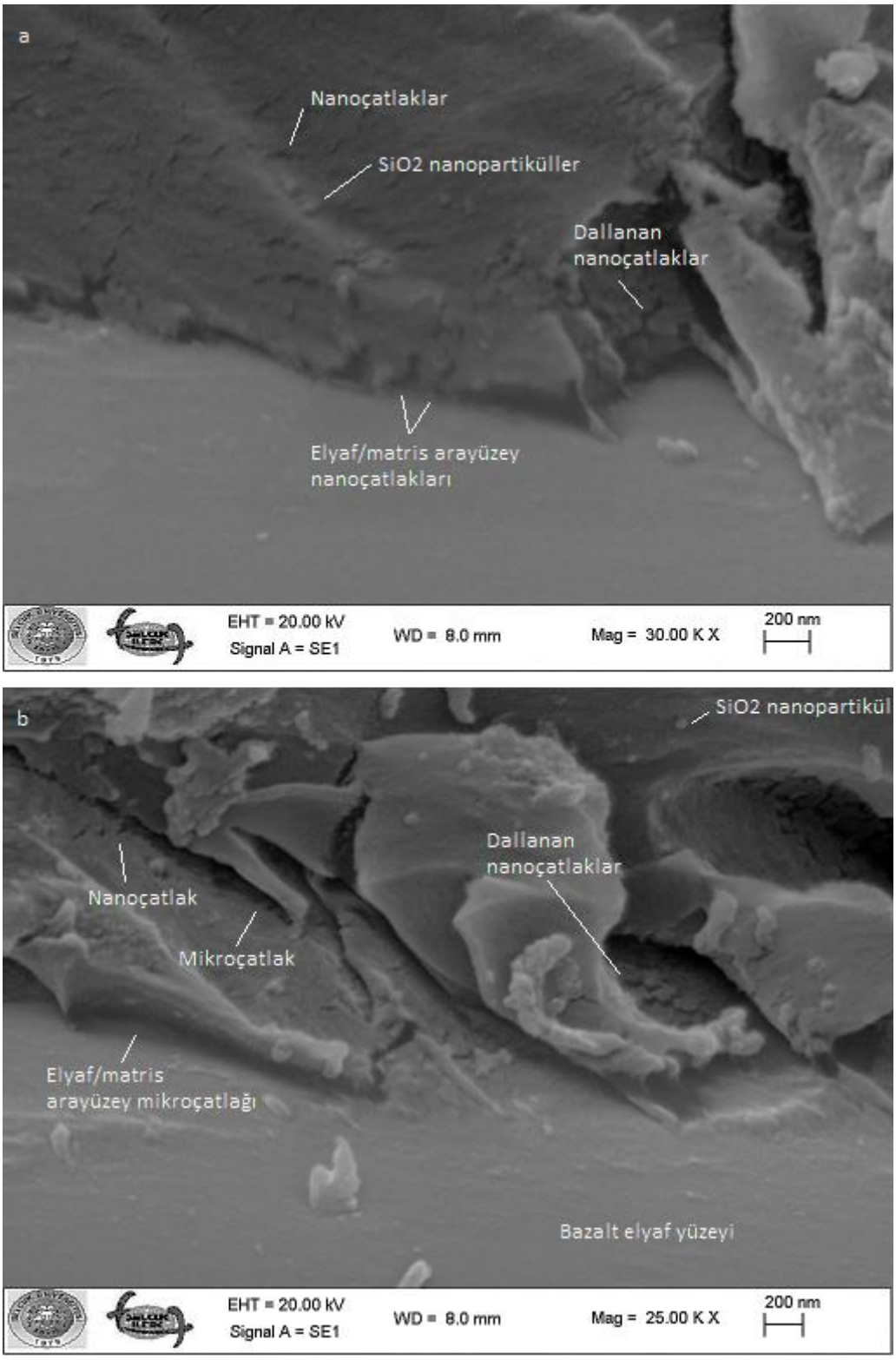
Şekil 4.84a ve 4.84b'deki 2µm lölçekli SEM görüntülerini odaklandığımızda bazalt elyaf ile SiO_2 nanopartikül katkılı epoksi matrisin arayüzeyleri daha rahat gözlemlenilebilmektedir. Tabakaların rijitlik kayıpları ve farklılıklarından kaynaklanan tekrarlı eğilme neticesinde tabakalararası ayrılmayla ilerleyen delaminasyon hasarı elyaf/matris arayüzeylerinde birbirine paralel derin çıkıntılar şeklinde pürüzlü matris kırılma hasarları oluşturduğu ve hasarın ilerlerken elyaf/matris arayüzeylerinde dallanarak kırılmaya maruz kaldığı yorumlanmıştır. Bu gözlemlenen pürüzlü

kırılmaların plastik deformasyona işaret olduğu kanısını oluşturmuştur(Chen ve ark., 2009) Şekil 4.85a'da bazalt elyafların yüzeylerini kaplayan SiO_2 nanopartikül modifiyeli epoksi matris görülmektedir. Şekil 4.85b'de kırılan elyaf yüzeyleri, SiO_2 nanopartikül katkısıyla birbirine yapıştığı, kırılmanın matris ile beraber olduğu ve saç teli gibi bir görüntüden uzak olduğu görülmektedir(Şekil 4.79). Ayrıca, Şekil 4.85'deki SEM görüntüsünde debonding hasarı ve sünek kırılma izleri görülmektedir. SEM görüntülerindeki kırılma yüzeylerindeki pürüzlüklerin artışıyla sünek bir kırılmada, kuvvetli arayüzey sağlanılarak adezyonun ve dayanımının artışında ve bunun sonucunda bazalt elyafların matris tarafından kaplanmış görünümünün arkasında SiO_2 nanopartiküllerin etken rol oynadığı olduğu yorumlanmıştır(Wei ve ark., 2011; Bashar ve ark., 2013; Tang ve ark., 2011). Bunlara ilaveten, SiO_2 nanopartiküllerin 650 g/m^2 gibi yüksek özgül yüzey alanına sahip olması bazalt elyaflar ile epoksi matris arayüzey alanını artırmasında ve arayüzey adezyonun etkinliğinin artmasında önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.85 SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların kırılma yüzeyleri a) 2µm b) 10µm SEM görüntüleri.

Şekil 4.86a ve Şekil 4.86b'deki elyaf/matris arayüzeylerinde, SiO_2 nanopariküllerin katkısıyla kırılma tokluğunun artışan neden olan mekanizmalar görülebilmektedir.



Şekil 4.86 SiO_2 nanopartiküllerin neden olduğu kırılma mekanizmları

Şekil 4.86a'da SiO_2 nanopartikülerin kırılma tokluğu artışna neden olan kırılma mekanizmalarından, nanopartiküllerin çatlak önü tutması neticesinde birçok nanoçatlaklar, nanopartiküllerin çatlakları saptırmasıyla dallanan çatlaklar ve

elyaf/matris arayüzeylerindeki oluşan ve dallanan nano ve mikro çatlaklar görülmektedir. Şekil 4.85b'de ise yorulma esnasında nanopartiküllerin etkisi altında oluşan nanoçatlakların meydana getirdiği düşünülen dallanmış elyaf/matris arayüzeyi ve matriste mikroçatlak gözlemlenilmektedir. Sunulan 200nm ölçekli SEM görüntülerinden çatlak oluşumunun ve geciktirilmesinin nasıl cereyan ettiği tahmin edilebilmektedir(Bashar ve ark., 2013).

Tang ve ark. (2011) ise yaptıkları çalışmada %10 ve %20 SiO_2 nanopartikül katkılı karbon/epoksi kompozitlerde Mod II kırılma hasarı üzerine SiO_2 nanopartiküllerin etkisini şu şekilde ifade etmiştir. SiO_2 nanopartiküllerin elyaf/matris arayüzeyini genişleterek, iyi bir arayüzey sağladığı ve elyafların nanopartikül katkılı epoksi tarafından kaplandığını SEM görüntüleri ile açıklamışlardır. Yapılan çalışmanın SEM görüntülerinde, literatürün ifade ettiği bulgular tespit edilmiş ve yorumu yapılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız olmak üzere SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız $[\pm 55^o]_6$ BTP kompozit boruların serbest uçlu statik iç basınç yorulma ömrü ve mekanik özelliklerinin tespiti amaçlanmıştır. Yorulma deneyleri, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında, R=0.05 ve 25 çevrim/dak gerçekleştirilmiştir.

En uygun ağırlıkça % SiO_2 nanopartikül katkısının tespiti için literatürün desteği doğrultusunda, ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve %5 katkı oranlarında SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımları ve kırılma toklukları tespit edimiştir. Bu sonuçlara göre BTP kompozit borulara katılıcak en uygun ağırlıkça % SiO_2 nanopartikül katkı oranı belirlenmiştir.

Yapılan doktora çalışmasında elde edilen sonuçlar uygulanan deneylere göre aşağıda maddeler halinde başlıklar altında sıralanmıştır.

5.1.1. SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin mekanik deney sonuçları

- SiO_2 nanopartiküllerin ağırlıkça %4 katkı oranında ilavesiyle SiO_2/Epoksi nanokompozitlerde %14'lik bir artışla en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. Aynı katkı oranında rijitliğinin arttığı tespit edilmiştir.
- SiO_2 nanopartiküllerin ağırlıkça %4 katkısıyla Mod I kırılma tokluğunda %25-39 aralğında en yüksek artışlar gözlemlenilmiştir.
- %4 SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, katkısızların kompozitlerin nanokompozitlerin kırılma yüzeylerine göre farklı olarak oldukça pürüzlü olduğu ve konkavsı geometrik şekillerde çukurcukların bu pürüzlü kırılma yüzeylerini oluşturduğu görülmüştür. SEM gözlemlerinden %4 SiO_2 nanopartikül katkısının, araştırmacıların bulgularına paralel olarak gevrek epoksi matrisi sünek kırılma davranışına meylettiği kanısına varılmıştır(Yao ve ark. 2008, Brunner ve ark. 2006).

- FTIR analizlerinde %4 SiO_2 nanopartikül katkısının epoksi matris ile Si-O-Si ve –OH grupları ile kimyasal etkileşime girdiği tespit edilmiştir (Chia ve He, 2012).
- %4 SiO_2/Epoksi nanokompozitlerin kırılma tokluğunun artışında, SiO_2 nanopartiküllerin kırılma mekanizmalarına etki eden çatlak tutma, saptırma ve dallandırma etkenleri 100nm ve 200nm'lik SEM görüntülerinde gözlemlenilmiştir.

5.1.2. %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların serbest uçlu statik iç basınç patlatma ve halka çekme deney sonuçları

- Çatlaksız ve eliptik yüzey çatlaklı olmak üzere, SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların, katkısız BTP kompozit borulara göre statik iç basınç deneylerinde maksimum teğetsel gerilmelerinde %29-31.5'lik artışlar elde edilmiştir.
- Çatlaksız ve SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borulara strain-gauge bağlanarak malzeme sabitleri tespit edilmiştir. SiO_2 nanopartiküllerin BTP kompozitlerin rjitliğini arttırdığı gözlemlenilmiştir.
- Statik iç basınç patlatma testlerinin sonuç hasarları, çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda akışkan jeti şeklinde matris hasarları olmuştur. Eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda ise sonuç hasarları çatlak bölgelerinde elyaf kırılması şeklinde meydana gelmiştir. SiO_2 nanopartikül katkısız, çatlaksız ve eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda sonuç hasarları patlama neticesinde elyaf kırılması şeklinde sonuçlanmıştır. SiO_2 nanopartikül katkısız eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerde sonuç hasarları çatlak bölgesinde oluşmuştur.
- BTP kompozitlerin epoksi matrislerine %4 SiO_2 nanopartiküllerin ilavesiyle, halka çekme deneylerini neticesinde elde edilen maksimum teğetsel gerilmelerde ortalama %30.3'lük artış elde edilmiştir. Aynı zamanda halka numunelerin birim şekil değişiminde %17.8'lik bir artışı neden olduğu gözlemlenilmiştir.
- Statik iç basınç patlatma ve halka çekme deneyleri neticesinde, maksimum teğetsel gerilme değerlerinde %1-1.5 arasında bir fark tespit edilmiştir. Fazla bir

fark olmamasından dolayı, kompozit boruların mekanik özelliklerinin tespitinde halka çekme deneyinin kolay uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

5.1.3. %4 SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız BTP kompozit boruların yorulma deney sonuçları ve hasar incelemeleri

- Katkısız ve Çatlaksız BTP kompozit boruların 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında sırasıyla; $2.24x10^5$, $3.9x10^4$, $7.2x10^3$, $1.6x10^3$ ve $6x10^2$ N yaklaşık yorulma ömürleri elde edilmiştir. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda yukarıdaki gerilme oranlarına göre ortalama sırasıyla; $1.4x10^5$, $1.8x10^4$, $4.2x10^3$, $9x10^2$ ve $4x10^2$ N yaklaşık yorulma ömürleri bulunmuştur. 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı numunelerde ise ortalama; $7.2x10^4$, $8.9x10^3$, $1.9x10^2$, $5.5x10^2$ ve $2.4x10^2$ N yorulma ömrü değerleridir.
- Çatlaksız SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında sırasıyla, $1.84x10^6$, $2.48x10^5$, $2.9x10^4$, $4.8x10^3$ ve $1.2x10^3$ N yorulma ömürleri elde edilmiştir. 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borularda belirtilen gerilme oranlarına göre sırasıyla $1.13x10^6$, $1.26x10^5$, $1.7x10^4$, $2.3x10^3$ ve $8x10^2$ N yorulma ömürleri bulunmuştur. 0.5 a/t eliptik yüzey çatlaklı numunelerde ise ortalama sırasıyla $6.47x10^5$, $6.4x10^4$, $7.9x10^3$, $1.3x10^3$ve $5.3x10^2$ N yaklaşık yorulma ömürleridir.
- SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların S-N grafiklerinde gerilme oranının azalmasıyla, yorulma ömrünün logaritmik olarak arttığı görülmüştür. Logarimik artışa, düşük ve yüksek teğetsel gerilmelerde hasar oluşum ve gelişimlerinin farklı ve etkin hasar modlarının değişiminden kaynaklanıdığı yorumu yapılmıştır(Colombo ve ark.2012).
- %4 SiO_2 nanopartikül katkısı, çatlaksız ve eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların yorulma ömürlerinde yaklaşık $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ 'de 1.5-2 kat, $0.6\sigma_{\theta\theta statik}$'de 2.5-3 kat, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$'de 4 kat, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$'de 6.5-7 kat ve $0.3\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında ise 8-9 kat artışlara neden olmuştur.
- %4 SiO_2 nanopartikül katkısı, katkısızlara göre BTP kompozit boruların yorulma ömürlerinde iyi bir artış sağlamıştır. Fakat S-N grafiğinde sürekli mukavemet sınırına doğru giden logaritmik eğriye yaklaşmak için SiO_2

nanopartikül katkılı BTP kompozit boruların $0.3\sigma_{\theta\theta}$'dan daha düşük gerilme oranlarında yorulma deneyi yapılması gerektiği kanısına varılmıştır.

- BTP kompozit boruların yorulma deneylerinde uygulanan gerilme oranının düşmesiyle %4 SiO_2 nanopartikül katkısının etkisini daha da arttığı elde edilen yorulma ömürlerinden anlaşılmıştır(Loos ve ark., 2012; Espinoza ve ark., 2014).
- Literatürde S-N eğrileri, hasar oluşumu, gelişimi ve sonuçlarına göre üç ayrı bölgede incelenmiştir. I. bölgede baskın hasarlarının yoğun elyaf kırılmalarının, II. bölgede debonding, delaminasyon ve lokal elyaf kırılmalarının ve III. bölgenin ise mukavemet sınırının oluşturduğu belirtilmiştir(Gamstedt ve Anderson, 2001; Espinoza ve ark. 2014). Literatürün ve hasarların gelişim ve sonuçları göz önüne alındığında I. bölgeyi 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranları oluştururken, II. Bölgeyi ise 0.3, 0.4, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarının oluşturduğu yorumlanmıştır.
- Gelişen hasarlar ve sonuç hasarları göz önüne alındığı I. bölgede SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit borularda baskın hasarları elyaf kırılmalarının oluşturduğu gözlemlenilmiştir. II. bölgede katkısız BTP kompozit borularda baskın hasarların, elyaf kırılmaları ve matris hasarları olduğu görülürken, SiO_2 katkılı BTP kompozitlerde ise baskın hasarların debonding ve delaminasyon hasarlarını meydana getiren matris hasarları oluşturmuştur.
- %4 SiO_2 nanopartikül katkısıyla 0.3, 0.4, $0.5\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında çatlaksız BTP kompozit boruların sonuç hasarları elyaf kırılmaları hasarlarının yerine, matris hasarları olan sızıntı ve akışkan jeti sonuç hasarları olmuştur. 0.6, $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında ise sonuç hasarı patlama şeklinde elyaf kırılmasıyla sonuçlanmıştır.
- 0.3, $0.4\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında 0.25a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda %4 SiO_2 nanopartikül katkısının sığ çatlak etkisi yaptığı gözlemlenilmiştir. Sonuç hasarlarını oluşturan akışkan jeti ve sızıntı matris hasarlarının çatlak bölgelerinde meydana gelmediği görülmüştür. Sığ çatlak etkisinde, %4 SiO_2 nanopartikül katkısının BTP kompozit boruların rijitliğini artmasıyla, çatlak bölgesindeki lokal rijitlik kaybının az olduğu düşünülmüştür. 0.5, 0.6 ve $0.7\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında ise SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda sonuç hasarları patlama ile birlikte elyaf kırılması şeklinde çatlak bölgelerinde meydana gelmiştir.

- 0.3, 0.4$\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda ise %4 SiO_2 nanopartikül katkısının sığ çatlak etkisi göstermeyip, sonuç hasarlarını oluşturan akışkan jeti ve sızıntı matris hasarlarının çatlak bölgelerinde oluştuğu görülmüştür. 0.5, 0.6 0.7$\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında ise SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit borularda sonuç hasarları patlama ile birlikte elyaf kırılması şeklinde çatlak bölgelerinde meydana gelmiştir.
- 0.3, 0.4, 0.5$\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında %4 SiO_2 nanopartikül katkılı çatlaksız ve 0.3, 0.4$\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında %4 SiO_2 nanopartikül katkılı 0.25 a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerin mikroskop görüntülerinde debonding, delaminasyon ve lokal elyaf kırılmaları gözlemlenmiştir. Bu matris hasarlarının oluşturduğu sızıntı veya akışkan jeti matris sonuç hasarını meydana getiren tabakalardaki akışkan yolları tespit edilmiştir. 0.3 ve 0.4$\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranlarında %4 SiO_2 nanopartikül katkılı 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozitlerin çatlak bölgelerinde meydana gelen sızıntı veya akışkan jeti sonuç hasarını oluşturan akışkan yolları mikroskop görüntüleriyle belirlenmiştir.
- SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız 0.5a/t eliptik yüzey çatlaklı BTP kompozit boruların yorulma deneyleri neticesinde hasar mekanizmaları mikroskop görüntüleriyle incelenmiş, çatlak dibi delaminasyon hasarları tespit edilmiştir.
- BTP kompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri incelendiğinde bazalt elyafların epoksi matristen sıyrıldığı, yoğun elyaf kırılmaları ve gevrek matris kırılmalarının olduğu gözlemlenilmiştir.
- SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozitlerin kırılma yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde, elyaf kırılmalarının epoksi matris ile beraber meydana geldiği gözlemlenilmiştir. Kırılma yüzeylerinin katkısız epoksi matrise göre pürüzlü ve sünek kırılma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu gözlemlerden, SiO_2 nanopartiküllerin kuvvetli elyaf/matris arayüzey dayanımı sağladığı yorumu yapılmıştır.
- SiO_2 nanopartikülerin yorulma ömrü ve mekanik özelliklerinin artışına neden olan nanopartiküllerin çatlak önü tutma ve çatlakları saptırma kırılma mekanizmaları neticesinde birçok nanoçatlaklar, dallanan nano çatlaklar ve elyaf/matris arayüzeylerindeki oluşan ve dallanan nano ve mikro çatlaklar SEM görüntüleri ile tespit edilmiştir.

- SiO_2 nanopartiküller; çatlak tutulması, çatlak ucu körelmesi, çatlak sapma ve dallanmalar, çatlak oluşumunu geciktirmesi ve yavaşlaması, epoksiyle kimyasal etkileşimi, lokal plastik deformasyonlar, yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasıyla arayüzey alanını artması gibi kırılma mekanizmları ile BTP kompozit boruların mekanik özelliklerinin ve yorulma ömürlerinin artışlarına etki ettiği yorumu yapılmıştır.

5.2 Öneriler

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, karşılaşılan konular ve yapılması düşünülen çalışmalar öneriler başlığı altında maddeler halinde ifade edilmiştir.

- Çalışmada kullanılan SiO_2 nanopartiküllerin yerine, başka nanopartiküller ve karbon nanotüpler kullanılabilir ve statik iç basınç, halka çekme ve yorulma deneylerine tabi tutulabilir.
- $\pm 55^o$ sarım açısının yanında farklı sarım açılarında BTP ve SiO_2 nanopartikül katkılı BTP kompozit borular üretilebilir ve statik iç basınç, halka çekme ve yorulma deneyleri uygulanabilir.
- SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız BTP kompozit boruların açık uçlu üretimlerinin yerine kapalı uçlu olarak üretilerek statik iç basınç ve yorulma testleri gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

Ajaj, A.E., Jubier, N.J., Majeed, K.J., 2013, Fatgiue behaviour of epoxy/SiO_2 nanocomposites reinforced with E-glass fiber, International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management 2, 62-69.

Arıkan, H., 2002, Çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışı, Doktora Tezi, S.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Adachi, T., Mayuka, O., Araki, W., Kwan, S.C., 2008, Fracture toughness of nano and micro-spherical silica-particle filled epoxy composites, Acta Materialia 56, 2101 – 2109.

Akkurt, S., 1991, Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, İSTANBUL.

Arabli, V., Aghili, A., 2013, Effect of silica nanocomposites on the curing kinetics of epoxy vinyl ester resin, Proceeding of the international conference nanomaterials: Applications and Properties 2(3), 1-4.

Abd, M.M., Jaffer, H.I., Al-Ajaj E.A., 2012, Comparision study of some mechanical properties of micro and nano silica EP composites, Iraqi Journal of Physics 10, 62-68.

Arıkan, H., 2010, Failure analysis of (±55)3 filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure. Composite Structure 92, 152-157.

Bashar, M.T., Sundararaj, U., Mertiny, P., 2013, Mode-I interlaminar fracture behaviour of nanoparticle modified epoxy/basalt fibre-reinforced laminates, Polymer Testing 32, 402-412.

Böger, L., Sumfleth, J., Hedemann, H., Schulte, K., 2010, Improvement of fatigue by incorporation of nanoparticles in glass fibre reinforced epoxy, Composites: Part A 41, 1419-1424.

Battistella, M., Cascione, M., Fiedler, B., Wichman, M.H.G., Quaresimin, M., Schulte, K., 2008, Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites, Composites: Part A 39, 1851- 1858.

Brunnner, A.J., Necala, A., Rees, M., Gasser, P.H., Karnmann, X., Thomann, r., Barbezat, M., 2006, The influence of silicate-based nano-filler on the fracture toughness of epoxy resin, Engineering Fracture Mechanics 73, 2336-2345.

Chen, W., Shen, H., Auad, M.L., Huang, C., Nutt, S., 2009, Basalt fiber-epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes, Composites:Part A 40, 1082-1089.

Colombo, C., Vergani, L., Burman, M., 2012, Static and fatgiue characterization of new basalt fibre reinforced composites, Composite Structure 94, 1165-1174.

Daniewicz, S.R., Newman, J.C., Sghwalbe, K.H., 2005, Fatigue & Fracture, ASTM International, West Conshohocken.

Demirci, M. T., 2009, Polimer esaslı kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Demirci, M.T., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., Erkendirci, Ö.F., 2014, Fracture toughness of filament wound BFR and GFR arc shaped specimens with Charpy impact test method, Composite Part: B 66,7-14.

Deng, S., Rosso, P., Ye, L., Friedrich, K., 2007, Interlaminar fracture of CF/EP composites modified with nanosilica solid state phenomena 121-123, 1403-1406.

Deng, S., Ye, L., Friedrich, K., 2007, Fracture behaviours of epoxy nanocomposites with nano-silica at low and evelated temperatures, Journal of Material Science 42, 2766 – 2774.

Deak, T., and Czigany, T., 2009, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A Comparision, Textile Research Journal 79(7), 645-651.

Deak, T., and Czigany, T., 2010, Development of long-basalt-fiber reinforced thermoplastic matrix composites society of plastics engineers, Plastics Reseach Online, 1-3.

Dehkordi, M.T., Nasraty, H., Shokrieh, M.M. Minak, G., Ghalli, D., 2010, Low velocity impact properties of intro-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics, Materials and Design 31, 3835-3855.

Dieter, G.E,, 1988, Mechanical Metallurgy, McGraw Hill Company Limited, United Kingdom.

Dong, Z., Manimala, J.M., Sun, C.T., 2010, Mechanical behaviour of silica nanoparticle-impregnated kevlar fabrics, Journal of Materials and Structure 5, 529-548.

Dongbo, W., Yujie, F., Liwei, H., Yan, T., 2006, Effect of wet surface treated nano-SiO_2 on mechanical properties of polypropylene composite, Journal of Wuhan University of Technology - Material Science Education 23(3), 354-357.

Dorigato, A., and Pegoretti A., 2012, Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates, Journal of Composite Materials 46(15), 1773-1785.

Ekşi, O., 2007, Plastik esaslı malzemelerin ısıl şekil verme özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Espinoza, S.L., Akinola, a.T., Tate, J.S., 2014, Tension-tension fatigue behavior of nanosilica modified epoxy/glas nanocomposites for wind turbine blades, SAMPLE Seattle 2014 June 2-5.

Ellyin, F., and Maser, R., 2004, Environmental effects on the mechanical properties of glass fiber epoxy composite tubular specimens, Composite Science and Technology 64, 1863-1874.

Eldeniz, İ., 1992, Yüzey çatlaklı kompozit malzemelerde yorulma çatlak büyümesi ve tabaka ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Fiorre, V., Bella, G.D., Valenza, A., 2011, Glass-Basalt/Epoxy hybrid composites for marine applications, Materials and Design 32, 2091-2099.

Frost, S.R., 1995, Predicting the long term fatigue behaviour of filament wound glass/epoxy mmatrix pipes, Proceeding of the 10th international conference of composite materials, 649-659.

Fried, J.R., 2003, Polymer Science and Technology, Prentice Hall PTR, USA.

Gamstedt, E.K., Andersen, S. I, 2001, Fatigue degradation and failure of rotating composite structure-materials characterisation and underlying mechanisms, Riso National Laboratory Riso-R-1261(EN) report, 1-55.

Gamstedt, E.K., 2000, Effects of debonding and fiber strength distiribution on fatigue damage propagation in carbon fiber-reinforced epoxy, Journal of Applied Polymer Science, 76(4),457-474.

Gao, X., Meng, X., Wang, H., Wen, B., Ding, Y., Zheng, S., Yang, M., 2008, Antioxidant behavior of a nanosilica-immobilized antioxidant in prolypropylene, Polymer Degradation and Stability 93, 1467-71.

Gemi, L., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., Şahin, Ö.S., 2009, Progressive fatigue failure behaviour of glass/epoxy $(\pm 75)^2$ filament-wound pipes under pure internal pressure, Materials and Design 30, 4293-4298.

Gemi, L., 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Guo, H., Minus, M.L., Jagonnathan, S., Kumar, S., 2010, Polyacrylonitril/Carbon nanotubes composite films, Applied Materials and interfaces 2(5), 1331-1342.

Gross, D. ve Seeling, Th., 2001, Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik, Springer Verlag, Berlin, 317.

Han, J.T., Cho, K., 2006, Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range, Journal of Material Science 41, 4239-4245.

Hsieh, T.H., Kinloch, A.j., Masania, K., Taylor, A.C., Sprenger, S., 2010, The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles, Polymer 51, 6284-6294.

Huang, C.J., Fu, S.Y., Zhang, Y.H., Lauke, b., Ye, L., 2005, Cryogenic properties of SiO_2/epoxy nanocomposites, Cryogenics 45, 450-455.

Joseph, E., Perreux, D., 1994, Fatigue behaviour of glass-fiber/epoxy-matrix filament wound pipes, Composite Science and Technology 52, 469-480.

Jalili, M.M., Maradian, S., Dastmalchian, H., Karbasi, A., 2007, Investigating the variations in properties of 2-pack polyurethane clear coat through separate incorporation of hydrophilic and hydrophobic nano-silica, Progress in Organic Coating 59, 81-87.

Kara, M., 2012, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.Kaynak, C., and Mat, O., 2001, Uniaxial fatigue behaviour of filament-wound glass-fiber/epoxy composite tubes, Composite Science and Technology 61, 1833-1840.

Kaynak, C., Erdiller, E.S., Parnas, L., Senel, f., 2005, Use of split-disk tests fort he process parameters of filament wound epoxy composite tubes, Polymer Testing 24, 648-655.

Kayalı E. S., Ensari C., Dikeç F., 1983, Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İTÜ Matbaası, İstanbul, 91-94.

Kim, M.T., Rhee, K.Y., Park, S.J., Hui, D., 2012, Effects of silane-modified carbon nanotubes on flexural and fracture behaviours of carbon nanotube-modified epoxy/basalt composites, Composites:Part B 43, 2298-2302.

Kim, M.T., Kim, M.H., Rhee, K.Y., Park, S.J., 2011, Study on an oxygen plasma treatment of a basalt fiber and its effect on the interlaminar fracture property of basalt/epoxy woven composites, Composites Part B: Engineering 42, 499-504.

Konur, O., Matthews, F.L., 1989, Effect of the properties of the constituents on the fatigue performance of composites: a review, Composites 20(4), 317-327.

Kurbanova, R., Mirzaoğlu, R., Karataş, İ., Uçan İ., 1997, Polimer ve Plastikler Teknolojisi, S.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Yayınları, KONYA.

Kujawski, D., Chiu,A.S.F., Ellyin, f., 1996, An effective stress parameter for long-term fatigue strength of fiber reinforced plastic pipers, Journal of Composite Technology&Research, 18(3) 215-220.

Kujawski, D., Ellyin, F., Culen, M.S., 1998, The fatigue behaviour of filament-wound fiber glass epoxy tubes under cyclic pressure, Journal of Reinforced Plastics and Composites 17(3), 268-281.

Lazzeri, A., Zebarjad, S.M., Cavalier, K., Rosa,R., 2005, Filler toughening of plastics.Part 1-The effect of surface interactions on physico-mechanical properties and rhelogical behaviour of ultrafine $CaCO_3$/HDPE nanocomposites, Polymer 46(3), 827-844.

Legg M.J., Hull, D., 1982, Effect of resin flexibility on the properties of filament wound tubes, Composites, 369-376.

Loos, M.R., Yang, J., Feke, D.L., Manas-Zloczower, I., 2012, Enhanced fatigue life of carbon nanotube-reinforced epoxy composites, Polymer Engineering and Science, 1882-1887.

Irwin, G.R.,1957, Analysis of stress and strain near the end of crack traversing a plate, Transaction ASME, J Applications Mechanics, 24.

Irwin, G. R.,1962, The crack extension force for a part through crack in a plate, ASME, Journal of Applied Mechanics 84, 651-654.

Mahrholz, T., Masch, j., Röstermundt, D., Riedel, U., Herbeck, L., Sinapus, M., 2005, Fibre-reinforced nanocomposites for spacecraft structures: Manufacturing Characterization and Application, Eurupean Conference on Spacecraft Structures, ESA/ASTEC, Noordwijk(NL) 10-12.

Majid, M.S.B.A., 2012, Behaviour of composite pipes under multi-axial stress, Ph.D Thesis, School of Mechanical and Systems Engineering, Newcastle Univesity, England, 1-233.

Manikandan, V., Jappes, W.J.T., Kumar, S.M.S., Amuthakkannan, P., 2012, Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites, Composites: Part B Engineering 43, 812-818.

Manjunatha, C.M., Taylor, A.C., Kinloch, A.J., Sprenger, S., 2010, The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite, Composite Science and Technology 70, 193-199.

Manjunath, C.M., Taylor, A.C., Kiinloch, A.J., Sprenger, S., 2009, The effect of rubber micro-particles and silica nanoparticles on the tensile fatigue behaviour of glass fiber epoxy composite, Journal of Material Science 44, 342-345.

Manjunath, C.M., Jagannah, N., Padmalatha, K., 2012, The fagiue and fracture behaviour of micron-rubber and nano-silica particles modified epoxy polymer, International Journal of Nanoscience 11(3), 1-7.

Meng, Q., Araby, S., Nasser, N., Kuan, H-C., Dai, J., 2014, Toughening polymer adhesives using nanosized elastomeric particles, Journal of Material Research 29(5),665-674.

Martens, M., and Ellyin, F., 2000, Biaxial monotonic behaviour of a multidirectional glass fiber epoxy pipe, Composite Part:A 31, 1001-1014.

Martin, R. H., Murri, G. B., 1990, Characterization of Mode I and Mode II delamination growth and thresholds in composites, Composite Materials Testing and Design, 11, 251-270.

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

Meijer, G., and Ellyin F., 2008, A failure envelope for ±60o filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars, Composite Part:A 39, 555-564.

Mertiny, P., and Gold, A., 2007, Quantification of leakage damage in high-pressure fibre-reinforced polymer composite tubular vessels, Polymer Testing 26, 172-179.

Mertiny, P., and Ellyin, F., 2002, Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites, Composite:Part A 33, 1615-1622.

Mertiny, P., 2012, Leakage failure in fibre-reinforced polymer composite tubular vessels at elevated temperature, Polymer Testing 31, 25-30.

Noh, J., Whitcomb, J., 2005, Effect of delaminations on openining of transvers matrix cracks, Journal of Composite Materials 39(15), 107-119.

Önder, A., Sayman, O., Doğan, T., Tarakçıoğlu, N., Burst failure load of composite pressure vessels, Composite Structures 89, 159-166.

Önal, G., Avcı, A., 2009, Yüzey çatlaklı 5086 Al*Mg alaşımının eksenel yorulma çatlak ilerleme davranışı, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi 8(3), 144-160.

Pardun M.,1998, Bruchmechanische Untersuchungen von mikrolegierten Staehlen mit mittleren Kohlenstoffgehalt nach TMB, Dissertation, RWTH Aachen, 135.

Parnas, R., Shaw, M., Liu, Q., 2007, Basalt fiber reinforced polymer composites, New England Transportation consorsium NETCR63 report, University of Massachusetts, 1-143.

Pavloski, D., Mislavsky, B., Antonov, A., CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, Reinforced Plastics 7, 36-39.

Perreux, D. and Joseph E., 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament wound pipes under biaxial loading experimental results and damage model, Composite Science and Technology 57, 353-364.

Perreux, D., and Thiebaud, F., 1995, Damaged elasto-plastic behaviour of [+φ, -φ]n fibre- reinforced composite laminates in biaxial loading, Composite Science and Technology 54, 275-285.

Phonthammacha, N., Chia, H., He, C., 2012, One-Step synthesis of oval shaped silica/epoxy nanocomposite: Process, formation mechanism and properties, The Delivery of Nanocomposites 23, 497-508.

Petrucci, R., Santulli, C., Puglia, D., Sarasini, F., Torre, L., Kenny, J.M., 2013, Mechanical characterization of hybrid composite laminates based on basalt fibers in combination with flax hemp, and glass fibres manufactured by vacuum infusion, Materials and Design 49, 728-735.

Ragosta, G., Abbate, M., Musto, P., Scarinzi, G., Mascia, L., 2005, Epoxy-silica particulate nanocomposites:Chemical interactions, reinforcement and fracture toughness, Polymer 46, 10506-10516.

Rice, J.R., 1968, Mathematical analysis in the mechanics of fracture, Chapter 3, 191-311.

Rosso, P., Ye, L., Friedrich, K., Sprenger, S., 2006, A Toughed epoxy resin by silica nanoparticle reinforcement, Journal of Applied Polymer Science 100, 1849-1855.

Rostami, M., Mohseni, M., Ranjbar, Z., 2012, An attempt to quantitatively predict the interfacial adhesion of differently surface treated nanosilicas in a polyurethane coating matrix using tensile strength and DMTA analysis, International jorunal of Adhesion and Adhesives 34, 24-32.

Sajej-Bajerlain, M., Gajzewski, H., Andrejewska, E., 2011, Monomer/modified nanosilica systems: Photopolymerization kinetics and composite characterization, Polymer 52, 1495-1503.

Salavation, V., and Smith, L.V., 2012, Matrix damage in composite pressure vessels with a bias orientation, Journal of Composite Materials 42, 2793- 2802.

Samancı, A., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışları, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 10-42.

Samancı, A., Tarakcıoğlu, N., Akdemir, A., 2011, Fatigue failure analysis of surface-cracked (±45º)3 filament-wound GRP pipes under internal pressure, Journal of Composite Materials 46(9), 1041-1050.

Samancı, A., Avcı, A., 2008, Tarakcıoğlu, N., Fatigue crack growth of filament wound GRP pipes with a surface crack under cyclic internal pressure, Journal of Material Science 48, 5569- 5573.

Sfarra, S., Ibana-Castanedo, C., Santalli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, I., Bendada, A., Maldague, X., 2013, Falling weight impacted glass and basalt fibre woven composites inspected using non-destructive tehcnigues, Composites: Part B Engineering 45, 601-608.

Sarasini, F., Tirillo, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., Gaudenzi, P., Cioffi, S., Lannace, S., Sorrentino, L., 2014, Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, Composites: Part B 59, 204-220.

Sarı, M., Karakuzu, R., Deniz, M. E., İçten, B.M., 2012, Residual failure pressures and fatigiue life of filament wound composite pipes subjected to lateral impact, Journal of Composite Materials 46(15), 1787-1794.

Shi, J-W, Wu, H., Wu, G., Wu, Z-S, 2014, Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freze-thaw cycling environments, Composites:Part B 60, 239-247.

Sprenger, S., 2013, Improving mechanical properties of fiber-reinforced composites based on epoxy resin containing industrial surface-modifed silica nanoparticles:review and Outlook, Journal of composite materials, 0-11.

Soden, P.D., Kitchhing, r., TSE, P.C., 1989, Experimental failure stresses for ±55º filament wound glass fibre reinforced plastic tubes under biaxial loads, Composites 20(2), 129-135.

Subagia, I.D.G.A., Kim, Y., Tijing, L.D., Kim, C.S., Shan, H.K., 2014,Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybirid composites reinforced with carbon and basalt fibers, Composite Part B: Engineering 58, 251-258.

Subagia, I.D.G., Tijing, L.D., Kim, Y., Kim, C.S., Vista, F.P., Shan, K.H., 2014, Mechancal performance of multiscale basalt fiber-epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles, Composites:Part B 58, 611-617.

Su, F-H., Zhang, Z-Z, Liu, W-M, 2007, Tribological and Mechanical properties of Nomex fabric composites filled with polyfluo 150wax and nano-SiO_2, Composite Science and Technology 67,102-110.

Suslick, K.S., 1990, Sonochemistry, Science, 247, 1439-1445.

Şahin, Y., 2000, Kompozit malzemelere giriş, Gazi Kitapevi, Ankara.

Talreja, R., 1993, Fatigue of composite materials, Structure and Properties of Composite 13, 538-607.

Tanigushi, M., 1991, Third-order asymptotic properties of a class of tests statistics under a local of alternative, Journal of Multivariate Analysis 37, 223-238.

Tarakcıoğlu, N., Samancı, A., Arıkan H., Akdemir, A., 2007, The fatigue behavior of (±55)3 filament wound GRP pipes with a surface crack under internal pressure, Composite Structure 80, 207-211.

Tarakçıoğlu, N., Gemi, L., Yapıcı, A., 2005, Fatigue failure behavior of glass/epoxy ±55 filament wound pipes under internal pressure, Composite Science and Technology 65, 703-708.

Tarakçıoğlu N., Akdemir A., Avcı, A., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, Composite Part:B 32, 131- 138.

Tarakçıoğlu, N., 1992, Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız Filaman Sarma Cam-Epoksi Borularda Sarım Açısının Malzeme Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Taşyürek, M., 2014, Yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55º filaman sarım CNT takviyeli CTP kompozit boruların mekanik özelliklerinin ve iç basınç etkisi altındaki yorulma davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

Tsai, J.L., Huang, B.H., Cheng, Y.L., 2009, Enhancing fracture toughness of glass/epoxy composites by using rubber particles together with silica nanoparticles, Journal of Composite Materials 43, 3107-3123.

Tang, Y., Ye, L., Zhang, D., Deng, S., 2011, Characterization of transverse tensile interlaminar shear and interlaminate fracture in CF/EP laminates with 10wt% and 20wt% silica nanoparticles in matrix, Composites: Part A 42, 1943-1950.

Tsai, J.L. and Cheng, Y.L., 2009, Investigating silica nanoparticle effect on dynamic and quasi-static compressive strengths of glass fiber/epoxy nanocomposites, Journal of Composite Materials 43, 3143-3155.

Tzetzis, D., Mansour, G., Tsiafis, I., Pavlidou, E., 2012, Nanoidentation measurements of fumed silica epoxy reinforced nanocomposites, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 0-14.

Qi, and Cheng, G., 2007, Fatigue behaviour of filament – wound glass fiber reinforced epoxy composite tubes under tension/tension biaxial loading, Polymer Composites, 116-123.

Quagliarini, E.,Monni, F., Lenci, S., Bondioli, F., 2012, Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes:A first contribution, Construction and Building Materials 34, 372-380.

Uluşen, T., 2008, Plastik esaslı kompozit malzemelerin kimyasal kaplama işlemlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 1-20.

Ulus, H., 2014, Ark deşarj yöntemiyle bor nitrür nano levha üretimi karakterizasyonu ve karbon kumaş/epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine katkısının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversiteisi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Wang, X., Hu, B., Feng, Y., Liang, F., Mo, J., Xiang, J., Qui, Y., 2008, Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites, Composite Science and Technology 68, 444-450.

Wang, Z., Liu, F., Liang, W., Zhow, L., 2013, Nanoscale analysis of tensile properties and fracture of nanoreinforced epoxy polymer using micromechanics, Reinforced Plastics and Composites 32(16), 1224-1233.

Wang, X., Wu, Z., 2010, Evaluation of FRP and hybrid FRP cables for super long-span cable-stayed bridges, Composite Structure 92, 2582-2590.

Wei, B., Song, S., Cao, H., 2011, Strengthening of basalt fibers with nano-SiO_2-epoxy composite coating, Materials and Design 32, 4180-4186.

Wei, B., Cao, H., Song, S., 2010, Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers, Materials Science and Engineering A 527, 4708-4715.

Wei, B., Cao H., Song, S., 2011, Degaradation of basalt fiber and glass fibre/epoxy resin composites in seawater, Corrosion Science 53, 426-431.

Wei, B., Cao, H., Song, S., 2010, Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment, Materials and Design 31, 4244- 4250.

Wei, B., Cao, H., Song, S., 2011, Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings, Composites: Part A 42, 22-29.

Wetzel, b., Rosso, P., Haupert, F., Friedrich, K., 2006, Epoxy nanocomposites-toughnening mechanisms, Engineering Fracture Mechanics 73, 2375-2398.

Wu, Z., Wang,X., Iwashita, K., Sasaki, T., Yasumasa, H., Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets, Composites Part B: Engineering 41(5), 396-402.

Wolodko J.D., 1999, Biaxial fatigue and leakage characteristic of fiber reinforced composite tubes, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Alberta, Canada.

Yaşar, H., 2001, Plastikler Dünyası, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, ANKARA.

Yaboah, D., Taylor, S., McPolin D., Gilfillan, R., 2013, Pull-out behaviour of axially loadded basalt fibre reinforced polymer (BFRP) rods bonded perpendicular to the grain of glulam elemets, Construction and Building Materials 38, 962-969.

Yao, X.F., Zhou, D., Yeh, H.Y., 2008, Macro/microscopic fracture characterizations of SiO_2/Epoxy nanocomposites, Aerospace Science and Technology 12, 223-230.

Yu, Z-Q, You, S-L, Baier, H., 2012, Effect of orgonosilane coupling agents on microstructure and properties of nanosilica/epoxy composites, Polymer Composites, 1516-1524.Zeng, Y., Liu, H.Y., Mai, Y.W., Du, X.L., 2012, Improving interlaminar fracture toughness of carbon fibre/epoxy laminates by incorporation of nano-particles, Composites:Part B 43, 90-94.

Yu, N., Zhang, Z.H., He, S.Y., 2008, Fracture toughness and fatigue life of MWCNT/epoxy composites, Materials Science and Engineering A 494, 380-384.

Zhang, Y., Chunxiao, Y., Cu, P.K., Lv, F., Zhang, C., Ji, J., Zhang, R., Wang, H., 2012, Mechanical and thermal properties of basalt fiber reinforced poly(butylene succinate) composites, Materials and Physics 133, 845-849.

Zhang, X., Xu, W., Xia, X., Zhang, Z., Yu, R.,2006, Toughening of cycloaliphatic epoxy resin by nanosize silicondioxide, Materials Letters 60, 3319-3323.

Zhang, H., Zhang, Z., Friedrich, K., Eger, C., 2006, Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content, Acta Materialia 54, 1833- 1842.

Zhang, h., Tang, L-C, Zhang, Z., Friedrich, K., Sprenger, S., 2008, Fracture behaviour of in situ silica nanoparticle – filled epoxy at different temperatures, Polymer 49, 3816-3825.

Zhao, R., Luo, W.,2008, Fracture surface analysis on nano-SiO_2/epoxy composite, Materials Science and Engineering A, 313-315.

Zheng, Y., Zheng, Y., Ning, R., 2003, Effects of nanoparticles SiO_2 on the performance of nanocomposites, Material Letters 57, 2940-2944.

Zhishen, W., Xin, W., Gang, W., 2009, Advancement of structural safety and sustainability with basalt fiber reinforced polymers, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Proceedings of CICE 2012, Rome Italy, 1-27.

Zhu, L., Sun, B., Gu, B., 2011, Frequency features of basalt filament tows under quasi-static and high strain rate tension, Journal of Composite Materials 46(11), 1285-1293.

Zu, L., 2012, Design and optimization of filament wound composite pressure vessels, Master of Science in Engineering Mechanics, Xi!an University of Technology, Xi'an, China.

.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Mehmet Turan DEMİRCİ
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	ANKARA, 1982
Telefon	**:**	5354897535
Faks	**:**	
e-mail	**:**	turandemirci@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Fatih Sultan Mehmet Süper Lisesi, Keçiören, ANKARA	2000
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği	2004
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi Makine Eğitimi	2009
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Müh.	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2005	**Selçuk Üniversitesi**	**Arş. Gör.**

UZMANLIK ALANI
Nanoteknoloji, Kompozit

YABANCI DİLLER
İngilizce

YAYINLAR

A - Uluslararası Çalışmalar
A-1) TUBİTAK yayın teşvik listesindeki A ve B grubu dergilerde yayınlanan araştırma makalesi

*Guluzade R., Avcı A., Demirci M.T.,Erkendirci Ö.F. Fracture toughness of recycled AISI 1040 steel chip reinforced AlMg1SiCu aluminum chip composites, Material and Design 2003;52, 345-352
*Demirci M.T., Düzcükoğlu H., Wear Behaviors of Teflon and Glass Fiber Reinforced Polyamide 66 Journal Bearings, Material and Design, 2014; 57, 560-567.
*Demirci M.T, Tarakçıoğu N., Avcı A., Erkendirci Ö.F., Frature Toughness of Filament Wound BFR and GFR Arc Shaped Specimens with Charpy Impact Test Method, Composites: Part B, 2014, 66, 7-14.

A-3) Diğer uluslararası hakemli dergilerdeki yayınlar
*Yakut R., Düzcükoğlu H., Demirci MT., Wear Behaviors of Pa 66 GFR 30 Gear Mechanisms, Journal of Materials Science and Engineering A. 2013;3(5),299-304.

*Demirci M.T., Düzcükoğlu H., Yakut R., Investigation of Temperature Effects on Tribological Properties of Glass Fiber and MoS2 Reinforced PA 6.6 and PA 66 Journal Bearings, Journal of Materials Science and Engineering A, 2013; 3(11), 738-742.
*Yakut R., Düzcükoğlu H., Demirci MT., The Load Capacity of PC/ABS Spur Gears and Investigation of Gear Damage, Archives of Materials Science. 2008;29 84-91.
*Özdemir C, Savur A., Kalıpçı E., Şahinkaya S., Demirci MT., Determination and Control of Noise Pollution Risk Points at the Level of Touristic Hotels, Middle-East Journal of Scientific Research 7. 2011;1, 95-102.
*Demirci M.T., Asiltürk İ.,Canlı E., Surface roughness of milling process of AISI 1045 steel with taguchi technique, Journal of Selçuk University Natural and Applied Science, 2(4), 10-20.

B- Uluslararası Bildiriler
B-1) Tam metinli bildiriler

*Yakut R., Düzcükoğlu H., Demirci MT., The Load Capacity of PC/ABS Spur Gears and Investigation of Gear Tooth Damages, Proceeding of 12 th International Materials Symposium, vol.1, 1229- 1237, October 15-17, 2008, , Denizli, TURKEY.
*Demirci MT., Acricultural Drip İrrigation Method with The Wind Enerji, 8 th International Scientific Conference, Modern Management of Mine Producing, Ecology and Enviromental Protection SGEM, Vol 1., 609-614, 16- 20 June, Varna, BULGARIA.
Düzcükoğlu H.,,Demirci M.T.,b, Yakutc , S. Ekincid, Plastik Dişli Çarkl Yüzeyinde Oluşan Temas Sıcaklığının Diş Hasarı Üzerine Etkisi, 5. Uluslararası ileri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 828-832, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
*Demirci MT.,Düzcükoğlu, H, Limited Pressure-Velocity Journal Bearing Test Equipment Design for Determining of Tribological Behaviours of Polymers, 1. International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE 14), 54-56, 8-9 Mayıs 2014, Karabük, TÜRKİYE
*Çelik S., Düzcükoğlu H., Demirci M.T., Metalik Toz Kaymalı Yatakların Yeni Dizayn Kaymalı Yatak Test Donanımı ile Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, 1. International Symposium on Industrial Design Engineering (ISIDE 14), 54-56, 8-9 Mayıs 2014, Karabük, TÜRKİYE
*Demirci, MT., Düzcükoğlu H., The Investigation of Pa66 Journal Bearing Wear Characteristics and Effects of Wear Temperatures, 13. International Materials Symposium IMSP2010, 1446-1452, 13-15 November 2010, Denizli, TURKEY.
*Asilturk, İ.,Demirci MT., Frezelemede Taguchi Metodu ile Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu, , 680-686, 13. İnternational Materials Symposium IMSP2010, 1446-1452, 13-15 November 2010, Denizli, TURKEY.
*Demirci M .T.,Samancı A., Tarakçıoğlu N., Asiltürk I., Optimization of Fatigue Life Parameters with Taguchi Method, 6th. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 453-456, 16-18 May 2011, Elazığ, TURKEY
*Tasyürek M., Demirci M.T., Functionalization of Multiwall Carbon Nanotubes with Acids Mixture, International Scientific Conference (Unitech 11), Vol II, 253-255, 18-19 November 2011, Gabrova, BULGARIA.
*Demirci MT., Düzcükoğlu H., Ekinci Ş., The Effects of Temperature on the Wear Behaviour of Glass Fiber Reinforced PA 6.6 Journal Bearings, 6th. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 457-460, 16-18 May 2011, Elazığ, TURKEY
*Ekinci Ş., Akdemir A., Demirci MT., Effect of Surface Roughness of Salt Bath Nitrided AISI 4140 to The Wear Rate, 6th. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 431-435, 16-18 May 2011, Elazığ, TURKEY.
*Mirik M., Tarakçıoğlu N., Şahin Ö. S., Taşyürek M., Demirci MT., Karbon Nanotüp Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Nanokompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Prooceeding of 9th International Fracture Conference, 182-192, 19-21 October 2011, Istanbul, TURKEY.
*Guluzade R., Avcı A., Demirci M.T., Producıng of Steel Chıps Reınforced Alumınum Composıtes wıth Powder Metallurgy, 6. International Powder Metallurgy Conference, 0509 October 2011, ODTU, Ankara, TURKEY.
*Demirci, M.T., Tarakçıoğlu N., Avcı A., Burst Failure of Basalt Fiber Reinforced Filament Wound Pipe, 14th International Materials Symposium, 287-293, 10-12 October 2012, Denizli, TURKEY.
*Yakut, R., Düzcükoğlu H., Demirci, MT., The investigation of wear behaviors of glass fiber reinforced Pa66 gear mechanisms on the different gear surfaces, 14th International Materials Symposium, 1339-1344, 10-12 October 2012, Denizli, TURKEY.

B-1.1) Özet (Abstract)
(Yabancı dilde sözlü sunulan ve özeti yayınlananlar)

*Demirci MT., Tarakçıoğlu N., Avcı A., Mechanical Properties of CNT and SiO_2 Nano Hybrid Epoxy Composites, 6th International Conference on Carbon Nano Particle Based Composites, C14, 22-25 September 2013,Dresden, GERMANY.
*Demirci MT, Tarakçıoğlu N., Avcı A., Charpy Impact Fracture Toughness of Nano SiO_2 Epoxy Composite, P42, 22-25 September 2013,Dresden, GERMANY.

D- Ulusal Çalışmalar
D-1) Araştırma makalesi

*Demirci, M.T., Acaroğlu, M., Yakıt Pilleri ve Yakıt Pillerinin Voltaj Etkinliği, Makine İhtisas Dergisi, Cilt1, Sayı 40, 34-43, İstanbul, 2006.
*Düzcükoğlu H., Demirci M. T., Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları, Makine Teknolojisi Dergisi, Cilt 3, 21-31, 2008.
*Asiltürk İ., Demirci M. T., Talaşlı İmalat Sensörlerle Takım, Tezgah ve İş Parçasının İzlenmesi, Metal Makina,Cilt 1., 238-244, İstanbul,2011.
*Asiltürk İ., Akkuş H., Demirci M.T., Regresyonla Titreşim, Akustik Emisyon ve Kesme Parametrelerine Bağlı Yüzey Pürüzlülüğünün Modellenmesi, Mühendis ve Makine, Cilt 53, Sayı: 632, 55-63, 2012

E- Ulusal Bildiriler
E-1) Tam metinli bildiriler

*Demirci, MT., Köse, F., Acaroğlu, M., Hidrojen Çevrim Teknolojisi, 3. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu, 451-461,24-26 Mayıs 2006,Muğla.
*Asiltürk, İ., Demirci, MT., Talaşlı İmalat Proseslerinde İzleme Sistemlerinin İncelenmesi, 2.Ulusal Talaşlı *İmalat Sempozyumu, 292-306,1-2 Ekim 2010, Konya.
*Asiltürk, İ., Demirci, MT., Karbür Kesici Kullanarak Sertleştirilmiş AISI 1040 Çeliklerin Frezelenmesindeki Yüzey Pürüzlülüğünün Regresyonla Modellenmesi, 2. Ulusal Tasarım-İmalat-Analiz Kongresi, 20-30, 11-12 Kasım 2010, Balıkesir.
*Asiltürk İ., Akkuş H., Demirci M.,T., Regresyonla Titreşim, Akustik Emisyon ve Kesme Parametrelerine Bağlı Yüzey Pürüzlülüğünün Modellenmesi, Matit 2011, Konya, Türkiye.