



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY ÇATLAKLI VE ÇATLAKSIZ ±55° FİLAMAN SARIM CNT TAKVİYELİ CTP KOMPOZİT BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE İÇ BASINÇ ETKİSİ ALTINDAKİ YORULMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Mustafa TAŞYÜREK

DOKTORA TEZİ

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Ocak-2014
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YÜZEY ÇATLAKLI VE ÇATLAKSIZ ±55° FİLAMAN SARIM CNT TAKVİYELİ CTP KOMPOZİT BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE İÇ BASINÇ ETKİSİ ALTINDAKİ YORULMA DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Mustafa TAŞYÜREK

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2014, 147 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Doç. Dr. Mesut UYANER
Doç. Dr. Ahmet SAMANCI
Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Doç. Dr. Recai KUŞ

Bu çalışmada, filaman sarım metodu ile imal edilen E camı - epoksi kompozit boruları ile, çok duvarlı karbon nanotüplerle takviye edilen nanokompozit boruların iç basınç etkisi altında yorulma ömürleri deneysel olarak araştırılmıştır.

Farklı derinlik oranlarında (a/t=0,25 ve a/t=0,50) açılmış olan eliptik yüzey çatlakları incelenmiştir. Yapılan tüm deneyler esnasında yüzey çatlağı, yorulma çatlak büyüme oranı ve kırılma tokluğu incelenmiştir. Çalışmada, % 0,5 ve % 1 olmak üzere iki farklı oranda nano malzeme takviyesi kullanılarak, referans malzemesi olan takviyesiz cam takviyeli plastik (CTP) ile kıyaslama yapılmıştır. Ayrıca her çeşit numunenin hem yüzey çatlaklı numunelerin hem de çatlaksız numunelerin yorulma ömrüne etkisi araştırılmıştır.

Araştırma sonuçlarında cam elyaf ve reçine oranını belirlemek için yakma testi yapılmış, daha sonra yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış olan numunelere statik iç basınç testi uygulanmıştır. Statik iç basınç testi değerlerinde, karbon nanotüp takviyesi ile % 10'a kadar artış bulunmuştur. Yorulma ömürlerinin tespit edilmesi için farklı yorulma gerilmesi değerlerinde deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Yorulma ömrü % 1 CNT takviyesiyle 5 kata kadar attırılmıştır. Bu artış yüzey çatlaklı borularda 7 kat artmıştır. Tüm bu deneyler ile malzeme sabitleri ve hasar mekanizmaları belirlenmiştir. Bunların yanı sıra deneysel olarak elde edilen σ_N- a/t değişim grafiği teorik bağıntı mukavemet değişimi karşılaştırılarak filaman sarım işlemi ile imal edilen kompozit ve nanokompozit CTP borulardaki uygunluğunun bulunması için Newman-Raju analitik yaklaşımı kullanılmıştır. Tüm deneylerde ilgili standartlar ve referanslar kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda patlama mukavemeti ve yorulma ömrü karbon nanotüp takviyesi ile artmıştır. Sonuç olarak yüzey çatlaklı ve çatlaksız CTP boruların karbon nanotüp takviyesinin malzeme özellikleri üzerine etkisinin belirlenmesi ile elde edilen sonuçlar irdelenerek değerlendirilmiştir. Deney şartlarına göre % 1 CNT'nin CTP'lere takviye edilmesinin daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filaman Sarım, Karbon Nanotüp, Kompozit Boru, Nanokompozit, Yorulma, Yüzey Çatlağı

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND FATIGUE BEHAVIOR UNDER INTERNAL PRESSURE EFFECT OF THE ±55° FİLAMENT WİNDİNG CNT REINFORCED CTP COMPOSITE PİPE WİTH AND WİTHOUT SURFACE CRACK

Mustafa TAŞYÜREK

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR
IN MECHANICAL EDUCATION

Advisor: Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

2014, 147 Pages

Jury
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Assoc. Prof. Dr. Mesut UYANER
Assoc. Prof. Dr. Ahmet SAMANCI
Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Assoc. Prof. Dr. Recai KUŞ

In this study, fatigue life of glass fiber - epoxy matrix material produced by the filament winding composite pipes and matrix material reinforced with multi-walled carbon nanotubes nanocomposite filament winding tubes were determined experimentally under the influence of internal pressure.

Elliptical surface cracks which opened in different depth ratio (a/t=0,25 ve a/t=0,50) were examined. During all the experiments, the surface crack, fatigue crack growth rate and fracture toughness were investigated. In this study, two different rates of 0,5% and 1% by addition of nano-reinforced material were compared with the pure epoxy material (CTP). Also, fatigue life of both surface cracks samples and non-cracks samples were investigated.

In the research results, combustion test was performed to determine the proportion of glass fiber and resin then the static internal pressure test was applied to the samples of opened and unopened surface flaw. Static internal pressure test values were increased by up to 10% with the addition of carbon nanotubes. Fatigue test performed at different stress values to determine the fatigue life. Fatigue life up to 5 times increased with 1% CNT reinforcement. It also fractured surface in pipes 7 times. The material constants and failure mechanisms were determined at all these experiments. Experimentally obtained graph of σ_N- a/t compared with theoritical correlation for investigation suility composite and nanocomposite pipe by fabricated filament winding process. So Newman-Raju analytic approach was utilized. For all these experiments the relevant standards and references were utilized. As a results of this work, it was determined that the explosion strength and fatigue life increases with carbon nanotubes rate. In conclusion, by determining of the effect of the reinforcement of carbon nanotubes GRP pipes with and without surface cracks on the material properties were discussed. According to the experimental conditions, the suitability of 1% CNT reinforcement to the CTP pipes was determined.

Keywords: Carbon Nanotubes, Composite Pipe, Fatigue, Filament Winding, Surface Crack

ÖNSÖZ

Projede kullanılan kompozit malzemeleri üreten ve nanokompozit malzemelerin üretimi için şirket imkânlarını kullanıma sunan İzoreel Kompozit A.Ş. yetkilileri ve çalışanlarına, deneysel aşamada laboratuarları açarak yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet AVCI ve Yrd. Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e, tezin ana deneyleri olan yorulma deney numunelerinin şekillendirilmesi ve denenmesi hakkında büyük katkı sağlayan Doç. Dr. Ahmet SAMANCI ve Öğr. Gör. Harun KOÇAK'a, deneylerin gerçekleştirilmesi sırasında bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen Yük. Tek. Öğr. Lokman GEMİ'ye, Öğr. Gör. Dr. Memduh KARA'ya, Arş. Gör. Dr. Şerafettin EKİNCİ'ye ve Arş. Gör. Mahmut ÜNALDI'ya, tezin yürütülmesi sırasında belirli aralıklarla Tez İzleme Komitesi olarak tezi şekillendiren Doç. Dr. Mesut UYANER ve Doç. Dr. Recai KUŞ'a,

Tezi 10101020 numaralı tez projesi ile finansal olarak destekleyen Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne,

Projenin önerilmesinden tamamlanmasına kadar imkânsızlıklarda yolumu açan, bilgi ve tecrübesiyle çalışmaların bitirilmesinde önemli katkılarını veren danışmanım Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU'na,

Beni büyüten ve bu yaşlara getiren destek ve teşviklerini gördüğüm babama, anneme ve ağabeyime,

Tüm tez boyunca benden maddi manevi desteğini esirgemeyen eşim NEŞE ve çocuklarım RÜYAM BİLGE ile RANA BENGÜ'ye

SONSUZ TEŞEKKÜR EDERİM.

Mustafa TAŞYÜREK
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Karbon nanotüplü kompozit malzeme hakkında yapılan çalışmalar 4
2.2. Kompozit malzemeler, filaman sarım yöntemi ve yüzey çatlağı hakkında yapılan çalışmalar 8

3. MATERYAL VE YÖNTEM **13**

3.1. Plastiklerin Tanıtılması 13
3.1.1. Termosetler 14
3.2. Kompozit Malzemeler 15
3.2.1. Tabakalı Kompozitler 18
3.2.2. Cam Elyaf 19
3.2.3. Matriks Malzemeler 20
3.3. Kompozit Üretim Yöntemleri 23
3.4. Nano teknoloji ve karbon nanotüp 26
Şekil 3.7. Kullanılan karbon nanotüpün FTIR sonucu 31
3.4. Yorulma 31
3.4.1. Yorulma 31
3.4.2. Çevrim Sayısı Eğrileri 35
3.4.4. Yorulmanın Gelişimi 36
3.4.5. Kompozit Malzemelerde Yorulma Hasar Gelişimi 38
3.5. Kırılma Mekaniği 39
3.5.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği 41
3.6. Eliptik Yüzey Çatlağının Analizi 43

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **45**

4.1. Deney Numunelerinin Üretilmesi 45
4.1.1. Nanokompozit boruların imalatı: 47
4.2. Yakma Deneyi: 49
4.3. Boşluk İçeriği: 52
4.4. Numunelere Yüzey Çatlağı Açılması: 53
4.5. Numunelerin Statik İç Basınç Testine Hazırlanması: 54
4.6. Serbest Uçlu Statik İç Basınç Testleri: 55
4.6.1. Nano takviyesiz CTP boruların statik iç basınç deneyi 57

4.6.2. % 0,5 CNT'li CTP boruların statik iç basınç deneyi 59
4.6.3. % 1 CNT'li CTP boruların statik iç basınç deneyi 60
4.7. Halka Çekme Testi 61
4.8. Teorik Çatlaklı Mukavemet Değerlerinin Hesap Edilmesi 63
4.9. Yorulma Testi 67
4.9.1. Yorulma Deney Seti 67
4.9.2. Eliptik Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız CTP Borularda İç Basınç Yorulma Deney Sonuçları 69
4.9.3. % 0,5 CNT Takviyeli Eliptik Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız CTP Borularda İç Basınç Yorulma Deney Sonuçları 72
4.9.4. % 1 CNT Takviyeli Eliptik Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız CTP Borularda İç Basınç Yorulma Deney Sonuçları 76
4.9.5. Gerilme – Yorulma Ömrü (S-N) Eğrileri 79
4.9.6. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 81
4.9.7. 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 83
4.9.8. 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 85
4.10. CTP Borularda İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 87
4.10.1. Nano Takviyesiz CTP Borularda 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 87
4.10.2. % 0,5 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 92
4.10.3. % 1 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 95
4.10.4. Nano Takviyesiz CTP borularda 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 98
4.10,5. % 0,5 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 103
4.10.6. % 1 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 105
4.10.7. Nano Takviyesiz CTP borularda 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 107
4.10.8. % 0,5 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 111
4.10.9. % 1 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları 114
4.11. Tabaka Ayrılması 116

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 121

5.1. Sonuçlar 121
5.2. Öneriler 124

KAYNAKLAR 125

ÖZGEÇMİŞ 136

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a/t	: Çatlak derinliği oranı
$\sigma_{\theta\theta statik}$	: Statik patlama teğetsel gerilmesi
K_{IC}	: Kritik kırılma tokluğu
J_{IC}	: J integrali kritik kırılma tokluğu
a/c	: Çatlak genişlik oranı
Al	: Alüminyum
S-N	: Gerilme çevrim sayısı eğrisi
σ_{max}	: Azami gerilme
σ_{min}	: Asgari gerilme
σ_a	: Gerilme genliği
σ_r	: Gerilme aralığı
R	: Yorulma gerilme oranı
σ_m	: 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
M_d	: Ölçülen kompozit yoğunluğu
R_1	: Kompozitteki reçine ağırlığı
D_1	: Reçine yoğunluğu
r_1	: Kompozitteki elyafın ağırlığı
d_1	: Elyafın yoğunluğu
FAW	: Elyaf alan ağırlığı
K	: Yakma deneyinde birim değiştirme faktörü
σ_{zz}	: Eksenel yöndeki gerilme
Δd_{ort}	: İç basınca maruz kalan ince cidarlı boruların çap değişimi
ΔL	: İç basınca maruz kalan ince cidarlı boruların boy değişimi
E	: Elastisite modülü
Y	: Poisson oranı
σ_a	: 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
K_Q	: Kırılma tokluğu

F : Düzeltme faktörü
Q : Şekil faktörü
σ_N : Yorulma ömrü

Kısaltmalar

RTM : Reçine transfer kalıplama
SMC : Hazır kalıplama pestili
BMC : Hazır kalıplama hamuru
CNT : Karbon nanotüp
CTP : Cam takviyeli plastik
MWCNT : Çok duvarlı karbon nanotüp
PVC : Polivinil klorid
PTFE : Politetrafloraetilen
E camı : Elektrik uygulamalarında tercihen kullanılan elyaf
C camı : Korozyona dayanıklı kompozit malzeme imal ettirmede kullanılan elyaf
S camı : Yüksek silika miktarına sahip elyaf
CVD : Kimyasal buhar biriktirme yöntemi
TEM : Geçirimli elektron mikroskobu
FTIR : Fourier Transform Infra Red
PLC : Programlanabilir Lojik Kontrolör
SCTP : Nano takviyesiz (saf epoksili) cam takviyeli plastik
NCTP : Nanokompozit cam takviyeli plastik

1. GİRİŞ

Günümüzde kompozit malzemeler, hayatımızın her noktasında karşılaşabileceğimiz bir yaygınlıkta kullanılmaktadır. Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyden nano düzeye kadarlık ölçü aralıklarında birleştirilmesiyle oluşturulan malzeme olarak adlandırılırlar.

Nano kelimesi dilimize sonradan yerleşen cüce anlamını ihtiva eden bir kelimedir. Bu kelime bir ölçünün çok küçük birime sahip olduğunu belirtebilmek için seçilmiştir. Herhangi bir fiziki büyüklüğün bir milyarda birini ifade etmek için kullanılır. Nanometre kavramı ise 1 metre uzunluğundaki bir ölçünün 1 milyarda biri demektir.

Ölçünün ne kadar küçük olduğunu daha iyi anlamak için insan saçı örneği verilebilir. Gördüğümüz en ince yapılardan birisi olan insan saçı ortalama olarak 0,05 - 0,1 mm kalınlığındadır. Buna kıyasla bir insan saçının yaklaşık 100.000 - 200.000 nanometre arası olduğu söylenebilir. Yani nano boyutun atomsal boyutta olduğu söylenebilir (Tarakçıoğlu ve ark. 2012). Polimer nano kompozit, nanometre boyutundaki takviye tanecikler ile polimer matriksin moleküler seviyede olan karışımlarıdır. Takviye maddelerinin boyutları küçüldükçe yüzey alanlarının artmasıyla oluşan güçlü etkileşim sonucu polimer nano kompozitlerin özellikleri daha çok gelişmiştir. Böylelikle polimer nano kompozitlerin gerilme dayanımı ve sertliği artmış, ısıl dayanımı artmış, bariyer özellikleri gelişmiş, maliyeti düşmüş ve modül değerleri artmıştır.

Bundan yüzyıllar önce başlayan tekstil çağı modern çağdaki gelişmelerin ilk adımı olarak kabul görmektedir. Daha sonra bunu demiryollarındaki gelişim ve içten yanmalı motorların icadıyla birlikte otomotiv çağı almıştır. Yaklaşık son 70 yıl içerisinde bilgisayar teknolojisinin doğmasıyla birlikte endüstri çağından bilgi çağına atlanarak insanlık için adeta büyük bir adım atılmıştır. Bilgisayar teknolojisinin çok hızlı bir şekilde ilerlemesi iletişim, görsel medya ve görüntü işleme sistemleri gibi konularda çok yararlı olmuştur.

Görüntü işleme sistemlerinin gelişimi bilim dünyasını mikro boyuttan nano boyuta çekerek araştırma ve inceleme imkânlarını geliştirme safhasına yükseltmiştir. Bu gelişme de bilim adamlarını artık nano teknolojinin açılmamış kapılarından içeri sokmuştur. Bilim adamlarının yapmış oldukları yayın, kitap ve patent gibi

çalışmalardaki "nano" kelimesinin kullanımındaki büyük artış bunun ispatı niteliğindedir. Nano kompozitlerin temel yapı taşları nanometre boyutunda parçacıklar olduğundan dolgu maddesi ve matris arasında çok büyük miktarda yüzey alanına sahiptirler. Nano kompozitlerin çok önemli özellikleri bu yüzeyler arası etkileşimlerden kaynaklanır.

Epoksi reçineleri düşük molekül ağırlığına sahip organik sıvı malzemelerdir. Epoksi oksijen bağlarına sahip eteri yapısında bulundurur. Epoksi diğer polimer matrislere göre pahalı olmasına rağmen, üstün mekanik özellikleri, korozif sıvılara ve ortamlara dayanımı, üstün elektriksel özellikleri, yüksek ısı derecelerine dayanımı gibi birçok özelliğinden dolayı kompozitler için en çok tercih edilen polimer matrislerin arasındadır.

Karbon nanotüpler 1991'de Iijima tarafından keşfedildiğinden beri araştırmalar bu alan üzerinde yoğunlaşmıştır. Üstün elektriksel ve ısıl özelliklerinin yanı sıra yüksek derecede sertlik, mukavemet, rezilyans özelliklerinden dolayı, karbon nanotüpler tamamen geniş bir sınıf kompozit için ideal takviye malzemesi olabilir. Karbon nanotüplerin bireysel olarak eşsiz mekanik özelliklere sahip olduğu birçok bilim adamı tarafından çalışmalar ile ispatlanmıştır. Bunlar hem tek duvarlı hem de çok duvarlı karbon nanotüpler için geçerlidir.

Yaklaşık son yirmi yıldır çeşitli araştırma grupları çalışmalarını karbon nanotüpleri (CNT) polimer matriks içerisinde takviye malzemesi olarak kullanmaya odaklamışlardır. Son yıllarda, elyaflar üzerinde görülen karbon nanotüpler elyaf-matriks ara yüzeyini geliştirmek için geleneksel elyaf takviyeli kompozitlerde ilave takviye bileşeni olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Mekanik yük altında çalışan cam elyaf takviyeli plastiklerin yorulma ömrünü arttırmak için matriks malzemesinin nano malzemelerle takviye edilmesinde büyük bir potansiyel vardır.

Mekanik karıştırıcı gibi ya da manyetik karıştırma barları olan karıştırıcılar gibi geleneksel karıştırma metotlar homojen karışım için etkili değillerdir. Nano partiküllerde düzgün bir dağılım için kesme karıştırma ve ultrasonikasyon gibi yüksek enerjili metotlar artarak tercih edilmektedir. Bu karıştırma metotları tipik olarak nanotüpleri bireysel olarak ayırmak için mikron altı skalada ultrasonik biçimde enerji üretir ve topaklanmayı önler.

Cam, grafit, alüminyum oksit ve silikon karpitten yapılan kırılgan elyaflar yüksek performanslı mekanik ve yapısal özelliklere sahip olan kompozit malzemeler üretmek için plastik, seramik ve metal matrikslerin takviyesi şeklinde yaygın olarak

kullanılır. Bu liflerle ilgili konulardan birisi ölçülen deneysel mukavemet değerinin teorik mukavemet değerlerinden daha düşük olmasıdır. Malzemelerin mukavemeti imalat ve kullanım sırasında oluşan yüzeydeki ve içteki kusurların varlığı ile etkilenir.

Epoksi kökenli malzemeler kullanıldığı zaman elyaf yüzeyindeki kusurların dağılımı kaplamasız elyaflara göre daha dardır. Bu sebeple cam elyaflara nano malzeme kaplama çalışması takviyeli polimer malzemelerde oldukça yararlıdır. Liflerdeki çekme mukavemeti iyileşmesinin, elyaf yüzeyindeki kusur uçlarında bir köprü gibi davranarak çatlak açılmasını geciktiren polimer içindeki CNT'lerden kaynaklandığı bilinmektedir.

Nanomalzemeler belirli özellikler için tasarlanabilen gelişmekte olan sıra dışı malzemeler ailesidir. Bu malzemeler dizayn edip geliştirmek istediğimiz kullanılan malzemelerin davranışlarında önemli değişiklikler meydana getirebilir. Aşağıda verilen özellikler bunun için uygundur: deformasyon ve kırılma dayanımı, süneklik, sertlik, mukavemet, aşınma, sürtünme, korozyon direnci, termal ve kimyasal stabilite ve elektriksel özellikler. Nano partiküller ve elyaflar önemli kusurlara sahip olmak için çok küçüktürler, daha dayanıklı yapılabilirler ve ultra yüksek mukavemetli kompozit malzemeler geliştirmek için kullanılabilirler.

Dünyada ve Türkiye'de hızla gelişen nano teknolojinin önümüzdeki yıllarda birçok alan için ne kadar vazgeçilmez olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Özellikle Tıp, savunma, tekstil, enerji, elektronik ve gıda gibi alanlarda nano teknoloji ile elde edilecek ürünler insanoğlunun hayatını kolaylaştırmaktadır. Gerçekleşen tüm gelişmeler sonucunda, 19. yüzyılda dünyayı yeniden şekillendiren sanayi devrimine eşdeğer bir bilimsel ve teknolojik gelişim başlatmıştır. Bu gelişimin de kaynağı nano boyutun küçüklüğünün vermiş olduğu devasa güçtür.

21. Yüzyılın dünyası teknoloji ağırlıklı ve geliştirilen teknolojilerin hızla ürüne ve uygulamalara dönüştürüldüğü bir dünya olacaktır. Nano teknoloji önümüzdeki 30-40 yıl için ekonomik refah, ülke güvenliği, sağlık ve kaliteli yaşam sağlanması yönünden en önemli Ar-Ge alanıdır.

Bu çalışmanın amacı çok duvarlı karbon nanotüp ile takviye edilen cam takviyeli plastiklerin mekanik özelliklerini araştırmaktır. Karbon nanotüp takviyesi bireysel olarak göstermiş oldukları üstün mekanik özellikleri matriks malzemesine aktararak kompozit yapının mekanik özelliklerini geliştirmektir. Bu sayede oluşturulan nanokompozit malzemelerin karbon nanotüp takviyesi yapılamayan kompozit malzemeye alternatif bir malzeme olması amaçlanmaktadır. Bu amaçla yüzey çatlağının neden olduğu yorulma ömründeki azalma karbon nanotüp takviyesiyle giderilebilir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Karbon nanotüplü kompozit malzeme hakkında yapılan çalışmalar

Allaoui ve ark. (2002), MWCNT-epoksi kompozitinin mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan ağırlıkça % 1 oranında CNT takviyeli epoksinin takviyesiz malzemeye göre hem çekme gerilmesinde hem de çekme uzama yüzdesinde artış meydana geleceğini bildirmişlerdir. Performanstaki bu artışın MWCNT'lerin yüksek boy oranından kaynaklandığını belirtmişlerdir.Ayrıca eğer rastgele dağıtım yapılacaksa yüksek yüzdede CNT takviye edilmesinin yararlı olmayacağını bildirerek, kritik takviye yüzdesinin % 0,5 ile % 1 arasında olabileceğini vurgulamışlardır

Ayatollahi ve ark. (2010), epoksi ve çok duvarlı karbon nanotüpten imal ettikleri nanokompozit numunelere belirli oranlarda yüzey çatlağı açarak kırılma tokluklarını eğme ve kesme yükleme şartları altında araştırmıştır. Katılan karbon nanotüp içeriğinin artmasının aynı uzama durumunda daha yüksek gerilme değeri gösterdiğini göstermiştir. Ayrıca Mod I ve Mod II kırılma durumlarını incelemiş, %1'lik karbon nanotüp takviyesinin Mod II'ye göre % 45 oranında tokluk artışı sağladığını kaydetmiştir. Böylece karbon nanotüp varlığının normal yük ve kesme yükü altında kırılma tokluğunun geliştirilmesi adına büyük bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

Böger ve ark. (2010), cam elyaf takviyeli epoksi matriksi karbon nanotüp ile takviye etmiş ve yorulma ömürlerini incelenmiştir. Nano partikül takviyesinin elyaflar arası kırılma mukavemetini % 16 kadar arttırdığını vurgulayarak bu durumun yorulma ömrünü arttırdığını bildirmiştir.

Chandrasekaran ve ark. (2010), epoxy-cam elyaf –karbon nanotüp hibrid kompozitinin tabakalar arası kayma gerilmesini incelemişlerdir. Çalışmada takviyeli kompozitler ile takviyeiz kompozitleri karşılaştırmışlardır. Buna göre CNT takviyesini ultrasonik karıştırma metodu ile gerçekleştirdiklerinde epoksinin viskozitesinin ve yüzey gerilmesinin değiştiğini, bu sebeple de hibrid kompozitteki tabakalararası kayma gerilmesinin arttığını vurgulamışlardır. Bu durumun da karbon nanotüp ilavesiyle daha da arttığını bildirmişlerdir.

Cheng ve ark. (2009), ağırlıkça % 16,5 oranında homojen şekilde dağıtılmış karbon nanotüp epoksi karışımı kompozit numuneler üretmiş, Young modülü ve çekme gerilmesini incelemiştir. Saf epoksi malzemesine göre çekme gerilmesinde % 160,

Young modülünde ise % 716 oranında daha yüksek bir değer kaydedildiğini bildirmiştir.

De Greef ve ark. (2011), elyaf-matriks kompozitinde karbon nanotüp kullanımının etkisini araştırmıştır. Takviye olarak ağırlıkça % 0,25 gibi düşük bir miktar kullanılmıştır. Elyaf doğrultusundaki çekme testinde çok düşük takviye oranı nedeniyle elastikiyet modülünde % 10 gibi düşük yüzdede gelişme gösterdiğini ve mukavemet ile şekil değiştirmede önemsiz değişiklikler görüldüğünü belirtmiştir. Buna rağmen akustik emisyon ölçümlerinde önemli gelişmeler bulmuşlardır. Karbon elyaf epoksi kompozitlerinde matriks çatlaklarının oluşumu ve gelişimi üzerine karbon nanotüplerin engelleyici etkisinin bu malzemelerin yorulma ömrünün geliştirilmesinde araştırma çabaları için önemli bir kavram olabileceğini sunmuşlardır.

Fan ve ark. (2008), % 0,5 ile % 2 arasında MWCNT'yi cam elyaflı epoksi kompozite takviye ederek tabakalar arası kayma gerilmesini araştırmışlardır. Buna göre takviye miktarı ile tabakalar arası kayma gerilmesinin artış gösterdiğini, % 1 takviyenin verdiği artışın % 0,5 takviyenin verdiği artışa göre 2 kat olduğunu bildirmişlerdir.

Gkikkas ve ark. (2012), epoksi matriks içerisine % 0,5 ve % 1 oranında MWCNT takviye ederek termo-mekanik özelliklerini ve tokluklarını incelemişlerdir. Çalışmada takviyeli kompozitlerin takviyesizlere göre çekme mukavemetini ve eksenel yüzde uzamasını arttırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca % 1 CNT takviyesinde 30 dk ile 2 saat arasında sonikasyon yapmanın mukavemeti düşürdüğü görülmektedir. Yüksek süreli sonikasonun CNT yapısını kırarak hasara uğrattığı bildirilmektedir. Daha düşük oranlarda CNT takviyesi yapmanın mukavemette önemli bir artış yapmayacağını da vurgulamışlardır.

Gojny ve ark. (2003, 2004, 2005), epoksi matriks içerisinde karbon nanotüpleri dağıtarak mekanik özelliklerini incelemiştir. Buna göre epoksi matriks içerisine % 0,1 gibi çok düşük yüzdesel oranlarda karbon nanotüp ilave etmiş ve ASTM D 5045-96 standardına göre kırılma tokluğu Kıc değerini incelemiştir. % 1 ilavenin % 0,1'e göre çekme gerilmesinde ve kırılma tokluğu değerinde artış görüldüğünü, kırılma uzamasında ise düşüş gözlemlendiğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra Young modülünün de 2,6 GPa'dan 2,8 GPa'a kadar artış gösterdiğini bildirmiştir. Vermiş oldukları grafiklerde MWCNT – epoksi kompozitlerinin tekerrür sonuçlarının diğer kompozitlere göre birbirlerine daha yakın sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Grimmer ve Dharan (2010), Cam elyaflı polimer kompozitlerde yorulma delaminasyon direncini arttırmak için çok duvarlı karbon nanotüp kullanmışlardır.

Kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntülerine göre, yüzeydeki CNT'lerin hem sıyrıldığı hem de kırıldığı görülmüştür. Çatlak ilerleme oranı arttıkça kırılan CNT'lerin sıyrılanlara göre daha fazla görülmeye başladığını belirtmişlerdir. Ayrıca hibrid kompozit numunelerdeki çatlak ilerlemesinin geleneksel kompozitlere göre daha yavaş olduğunu bildirerek, bunun nedeni olarak da CNT köprüleme olayının, CNT sıyrılma olayının ve CNT kırılma olayının meydana gelmesini belirtmişlerdir.

Guo ve ark. (2007), epoksi matriks içerisinde çok duvarlı karbon nanotüpün homojen dağılımını ve bu durumdaki mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Buna göre matriks içerisine %8'e kadar farklı yüzdelerde çok duvarlı karbon nanotüp ilave edilmiş ve katılma yüzdesi arttıkça çekme mukavemetinin % 11,65 ve kırılma uzamasının % 127,8 oranına kadar artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca aynı uzama yüzdesinde saf epoksiye göre daha düşük gerilme değerleri gösterse de sonuçta daha yüksek değerlere ulaşabildiğini bildirmiştir. Homojen dağılım açısından da yüksek enerjili sonikasyon tekniğinin yararlı bir yaklaşım olacağını vurgulamıştır.

Kang ve ark. (2014), karbon nanotüplü epoksi malzemenin yapışma özelliklerini inceleyerek çekme testi ve yorulma testinde deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada % 2 oranında CNT takviyesi yapmanın çekme mukavemetini % 36 oranında düşürmesine rağmen yorulma deneyleri sonucunda ilerleme göstermiştir. Çekme testi değerindeki azalmanın kompozit ve yapışkan arasındaki ara yüzey oluşumu hatasından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Yorulma testinde ise, CNT'li numunelerde ara yüzey hatası, CNT'siz numunelerde ise tabakalar arası hata meydana geldiğini, bu yüzden de CNT'siz numunelerin daha kısa ömürlü olduğunu vurgulamışlardır.

Loos ve ark. (2013), karbon nanotüp takviyeli termoset reçineyi çekme-çekme yorulmasına maruz bırakarak gerilme seviyeleri ile yorulma ömürleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Buna göre % 50 oranında yorulma gerilmesi durumunda CNT takviyesinin ortalama yorulma ömrünü % 248 oranında arttırabildiğini bildirmişlerdir. CNT'lerin pull-out işleminin enerji emme mekanizması olduğunu ve çatlak köprüleme işlemi ile de yorulma ömrünü arttıran ana mekanizma olduklarını vurgulamışlardır.

Mirik (2010), Çok duvarlı karbon nanotüpleri termoplastik esaslı matriks malzeme içerisinde % 1, % 3 ve % 5 oranında dağıtmış ve % 3'lük nano malzeme takviyesinin çekme dayanımına en iyi katkıyı sağladığını bildirmiş fakat darbe kırılma tokluğunun nano malzeme takviyesi ile düşüş gösterdiğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra karbon nanotüplerin matriks içerisinde daha homojen şekilde dağıtılabilmesinin malzeme özelliklerini daha olumlu etkileyeceğini bildirmiştir. Çalışmaya göre % 1

oranında CNT takviyesinin plastik enjeksiyon üretimi sonucunda % 9,75; sıcak pres üretimi sonucunda ise % 1,54 oranında mukavemet artışı sağladığı bildirilmiştir.

Montezari ve ark. (2010), % 3'e kadar değişik oranlarda karbon nanotüp ile takviye edilmiş epoksi matriks kompozit malzemelerin viskoelastik ve mekanik özelliklerini incelemiş, en uygun karbon nanotüp yüzdesinin kullandığı oranlar arasından % 3 olduğunu belirtmiştir. Buna göre yüzdesel içerik arttıkça hem uzama miktarında hem de gerilme değerinde artış meydana geldiğini tüm numunelerin nano takviyesiz numuneye göre daha iyi sonuçlar sergilediğini bildirmiştir. Ayrıca elastikiyet modülünün karbon nanotüp yüzdesinin % 3'e kadar yaklaşık % 78 oranında artış kaydedildiğini fakat çekme mukavemetinde % 2 CNT takviyesinden sonra artış sağlanmadığını bildirmiştir. Buna göre diğer çalışmalarında (2011), %2'ye kadar takviye kullanmış ve çekme mukavemeti ve elastikiyet modülünde sırasıyla % 17 ve % 23 oranlarında artış bulmuşlardır.

Siddiqui ve ark. (2009, 2010), çeşitli boy ve kalınlıklardaki cam elyafı demetlerinin çeşitli oranlarda karbon nanotüp ilave edilmiş ve hiç ilave edilmemiş epoksi ile kaplayarak çekme mukavemetlerini incelemişlerdir. Elde edilen bu değerler, kaplama yapılmamış elyaf demetlerinin çekme mukavemet değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, epoksi kaplamasının düşük ölçü boyundaki elyaflar hariç bir iyileştirme kaydedildiğini, karbon nanotüp takviyesi yapılmış nanokompozit kaplaması yapılmış numunelerde de bir iyileştirme yaşandığını bildirmişlerdir. Bunların arasında ise ağırlıkça % 0,3 CNT-epoksi kaplamasının saf epoksinin mukavemetdeğerine göre daha yüksek değerleri verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çekme mukavemetini iyileştirmek için ara yüzey etkileşiminin önemli bir parametre olduğunu bunun için de fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp kullanılmasının olumlu etkide bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Song ve Youn (2005), karbon nanotüp-epoksi nanokompozit malzemenin mekanik özelliklerini incelemiş, takviye malzemesinin dağılımı üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında % 0 ve % 1,5 arası oranlar kullanılmış, matriks malzemesi içerisinde homojen dağılan karbon nanotüpün çekme mukavemetini iyileştirdiğini aksi halde düşüş sergilediğini belirtmişlerdir. Homojensizliğin kırılma uzama miktarını % 20 civarlarında gerilettiğini, homojen dağılımın çekme mukavemetini % 15 kadar arttırdığını bildirmişlerdir.

Yeh ve ark. (2006), sıcak pres altında % 0 ve % 5 arası yüzdesel dilimlerde karbon nanotüp-epoksi karışımı kompozit malzeme üretmişler ve mekanik özelliklerini

incelemişlerdir. Çalışmada kompozit malzemelerin uzamalarının saf malzemeye oranla azaldığı fakat çekme gerilmesi değerinde artış gözlendiği belirtilmiştir. Ayrıca nano kompozit malzemeler incelendiğinde % 2 CNT'li kompozit malzemeden sonra dayanımdaki artışın beklenildiği kadar meydana gelmediğini, % 3'ten sonra ise azalma meydana gelmeye başladığını vurgulamışlardır.

Zhang ve ark. (2013), epoksi matrikse ağırlıkça % 1 oranında takviye edilmiş CNT'lerin etkisini incelemiştir. Filaman sarım tekniği ile üretilen karbon elyaflı numuneler üzerinde yaptığı çalışmada, matriks malzeme içerisinde iyi dağıtılmış CNT'nin mikro çatlakların ve matriks kusurlarının azaltılması üzerine etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Nano takviyesiz numunelerde elyaflar ile matriks arasında zayıf bir ara yüzey bağı olduğunu, bunun karbon nanotüp takviyesi ile iyileştirilebildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca SEM görüntülerinin nano takviyeli olan numunelerde takviyesiz numunelere göre daha kaba görünmesi sonucu, daha kuvvetli elyaf-matriks ara yüzeyi tabakalar arası kayma gerilmesinin daha yüksek hale getireceğini vurgulamışlardır. Sonuçlara göre % 1 oranında CNT takviyesinin çekme mukavemetini % 7,5 oranında arttırdığını, çekme uzamasını ise % 7 oranında arttırdığını bildirmiştir.

2.2. Kompozit malzemeler, filaman sarım yöntemi ve yüzey çatlağı hakkında yapılan çalışmalar

Arıkan (2007, 2010), ±55° filaman sarım açısına sahip CTP boruların iç basınç altında hasar analizini incelemiştir. Çalışmada boru eksenine göre değişik açılarda ve çatlak derinliğinin boru et kalınlığının yarısı olacak şekilde çatlaklar oluşturularak yüzey çatlağı parametresinin etkisi araştırılmıştır. Çatlaksız patlama değerinin 465 MPa bulunduğu çalışmada yüzey çatlağının boru eksenine göre açısının artması, patlama basıncı değerini daha yüksek değerlere çekmiştir. Ayrıca çatlak ilerlemesinin Mod II şeklinde gerçekleştiğini ve çatlak açısının artması patlama basıncıyla orantılı olarak delaminasyon alanını da geliştirmiştir.

Avcı ve ark. (2003), CTP kompozitin kırılma davranışını incelemiştir. Çalışmada hem elyaf takviyesi yapılmış hem de yapılmamış yüzey çatlağı açılmış numunelerin eğme dayanımlarının ve modüllerinin polyesterin ağırlıksal içeriğinin arttırılması ile arttığını belirtmişlerdir. Başlangıç çatlağı metoduna göre, J integrali ve kompliyans metotlarına göre K_{IC} değerinin artış gösterdiğini, bunun yanı sıra K_{IC} ve J_{IC}'nin çatlak derinlik oranına bağlı olmadığını bildirmişlerdir. Yine Avcı ve ark.

(2007), korozif bir ortamda yüzey çatlaklı filaman sarım boruların yorulma davranışını incelemiş, gerilme şiddet faktörü ile çatlak büyüme oranları değişiminin lineer bir ilişki gösterdiğini vurgulamışlardır. Avcı ve ark. başka bir çalışmalarında (2007), çatlaklı cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kırılma ve hasar davranışını incelemişlerdir. Buna göre gerilme şiddet faktörünün kopma öncesine kadar kararlı ilerlediğini, daha sonra kararsız bölgeye geçerek numunenin aniden koptuğunu bildirmiştir.

Bai ve ark (1996), cam elyaf ve epoksiden oluşan filaman sarım 55° sarım açılı kompozit boruların iç basınç hasar davranışını incelemişlerdir. Buna göre elyafsız bölgelerde çatlakların çekme yönüne dik oluştuğunu, düşük elyaflı bölgelerde mikro çatlakların elyaf demetleri etrafında oluştuğunu, yüksek elyaflı bölgelerde mikro çatlakların elyaf – matriks ara yüzeyinin ayrılmasıyla meydana geldiğini vurgulamıştır.

Ellyin ve ark (1997), çok yönlü filaman sarım cam elyaf-epoksi kompozit boruları çift eksenli yük altında davranışını incelemişlerdir. 45° sarım açısı ile 45°-70° arası sarılmış kompozit borularda eksenel gerilmede 160 MPa'a kadar, teğetsel gerilmede ise 290 MPa'a kadar değerler elde etmiştir. Ayrıca gerilme oranının eksenel lineer elastik modülünü etkilediğini fakat teğetsel modülü etkilemediğini nedeninin ise matriks davranışından kaynaklandığını belirtmiştir. Bir diğer çalışmalarında ise (2001); çok yönlü filaman sarım cam elyaf/epoksi boruların çift eksenli yorulma davranışını incelemiştir. Bu çalışmaya göre matriks çatlamasının ultraviyole ışık altında incelenebileceğini ve hasarın çift eksende uygulanan gerilme oranı ve azami gerilmeye bağlı olduğunu vurgulamıştır.

Gemi (2004), filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışını incelemiş, yapılan deneyler sonucunda 0,42 Hz frekans ve R= 0,05 gerilme oranında ±45°, ±55° ve ±75° sarım açılı boruların sarım açısının artışına uygun olarak hem iç basınç patlama değerlerinde hem de yorulma ömürlerinde artış gözlendiğini bildirmiştir. Ayrıca sarım açısının artması ile malzemede gözlemlenen hasarın matriks hasarından elyaf hasarına doğru kaydığını bildirmiştir. Başka bir çalışmalarında (2009) ise; ±75° sarım açılı kompozit boruların iç basınç altında R=0,05 gerilme oranında yorulma ilerlemesini incelemiştir. İncelemenin ana adımlarını beyazlaşma, sızıntı ve sonuç hasarı olarak belirtmiş ve hasar başlangıcının beyazlaşma ve ardından görülen matriks çatlaması olduğunu, matriks çatlamasının ise iç yüzeyden dış yüzeye doğru bir sızıntı yolu oluşturduğunu bildirmiştir. Ayrıca uygulanan yükün düşüklüğüne göre sızıntının sonuç hasarı ile çakıştığını vurgulamıştır. Sonuç olarak 270, 337,5 ve 405

MPa değerlerinde yaptığı yorulma deneylerinde sonuç hasarlarının sırasıyla 7794, 2127 ve 850 çevri sayısında gerçekleştiğini bildirmiştir.

Günaydın (2003), yüzey çatlağı açılmış olan kompozit malzemelerin R=0 yorulma yük oranı ve 3,6 Hz sabit frekansta eksenel çekme yorulması çatlak ilerlemesini incelemiştir. *a/t* oranının arttırılmasının yüzey çatlağının daha çabuk ilerlediğini ve yorulma ömrünü azalttığını, *a/c* oranının arttırılmasının ise çatlak boyunu derinlik yönünde değiştirmediğini uzunluk bakımından ise azalttığını böylece çatlak ilerlemesini geciktirdiğini vurgulamıştır. Ayrıca çatlak derinliğinin delaminasyonu azalttığını da bildirmiştir. *a/c* oranının sabit kalması şartıyla *a/t* oranının 0,34'ten 0,88'e kadar artmasıyla yorulma ömrünün 10000'den 3500'e kadar azaldığını bildirmiştir.

Hu ve ark. (1998), filaman sarım CTP boruların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada farklı metotlardaki elastik modül ve poısson oranlarına araştırarak benzerliklerini göstermişlerdir. Deneysel yöntemle elde edilen elastsite modülünü 10-11 GPa bulurken poısson oranını aksiyal-teğetsel yönde 0,59 olarak vermişlerdir. 3D sonlu elemanlar yöntemi ve Mori-Tanaka teorisine göre elastisite modül değerlerinin yakınlık gösterdiğini vurgularken, poısson oranını Mori-Tanaka teorisine göre 0,84 olarak bildirmişlerdir.

Martins ve ark. (2013), filaman sarım metodu ile farklı sarım açılarında üretilmiş kompozit boru numunelerinin çift eksenli yük altında kapalı uçlu sistemde test etmişlerdir. Deneysel sonuçlara göre en yüksek değerleri ±55° ile sarılan numunelerde kaydetmişlerdir.

Önder ve ark. (2008), farklı sarım açılarında üretilmiş filaman sarım boruların yük altında patlama basınçlarını incelemişlerdir. Tek tabaka için sarım açısının artmasının patlama basıncı değerini arttırdığını, bunun yanı sıra patlama basıncı değerinin sıcaklığa bağlı olduğunu, 20° C'de en yüksek değerin elde edildiğini bildirmişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda termal gerilme meydana geldiğini ve kompozit malzemenin mukavemetini azalttığını vurgulamıştır. Çalışma sonucunda analitik sonuçların deneysel sonuçlarla benzerlik göstermesi sonucunda optimum sarım açısının ±55° olduğunu belirtmiştir.

Samancı (2004), yüzey çatlağı açılmış farklı sarım açılarında filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altındaki yorulma davranışlarını incelemiş ve sarım açısı arttıkça yorulma ömrünün arttığını belirlemiştir. ±55° CTP numuneler için serbest uçlu iç basınç testi sonucunu 405 MPa olarak tespit etmiştir. Yorulma ömürlerini ise 0,4 ve $0{,}5\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değeri için sırasıyla sığ yüzey çatlaklı numunelerde 9664

ve 33600 olarak bulurken, derin yüzey çatlaklı numunelerde ise 410 ve 2500 olarak bulmuştur. Ayrıca hasar mekanizmasının oluşumu ve gelişiminin sırasıyla; elyaf matriks ayrılması (fiber debonding), matriks çatlaması (matrix cracking), tabaka ayrılması (delaminasyon) ve elyaf kopması (fiber fracture) şeklinde meydana geldiğini bildirmiştir. Bunun yanı sıra hasar gelişim aşamalarının tek tek ya da eşzamanlı olarak gerçekleşebileceğini ilave etmiştir.

Şahin (2011), ±55° sarım açılı CTP boruların darbe hasarsız, 5 J ve 10 J darbe enerjisi ile hasarlandırılarak iç basınç altında yorulma davranışını incelemiştir. Buna göre darbe enerjisinin yorulma ömrü ile ters orantılı olduğunu ve yorulma son hasarının darbe bölgesinde meydana geldiğini bildirmiştir. Ayrıca farklı gerilme kademelerindeki yorulma hasar davranışının izotropik malzemelerdekine benzer olarak yüksek gerilme oranlarında kısa sürede, düşük gerilme oranlarında ise uzun sürede gerçekleştiğini belirtmiştir.

Tarakçıoğlu ve ark. (2000), farklı derinlik ve boylarda yüzey çatlağı açılmış filaman sarım cam takviyeli plastik (CTP) boruların mukavemetini incelemişlerdir. Çatlak derinliğinin boyu hangi değerde olursa olsun mukavemeti olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir. Bu durumu üç değişik sarım açısında incelemişler ve durumun her şart altında olumsuz etkilendiğini ortaya çıkarmışlardır. Yine başka bir çalışmalarında (2004, 2007), epoksi ve E camından imal edilmiş yüzey çatlaklı 55° filaman sarım açısına sahip CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada % 30, % 40 ve % 50 gerilme seviyeleri oluşturulmuş ve yüzey çatlağı boyutları değiştirilmiştir. Çalışmaya göre delaminasyonun ilk aşamada hızlı bir şekilde gerçekleştiği daha sonra bu durumun yavaşladığını vurgulamışlardır.

Xia ve ark. (2001), elyaf takviyeli filaman sarım boruları kombine olarak iç basınç ve termomekanik yükleme altında analiz etmiş ve bununla ilgili olarak bir metot sunmuşlardır. Metot klasik lamine tabaka teorisine dayanmaktadır. Numune geometrisi ve imalat malzemesine bağlı olarak optimum sarım açısının ±55° olduğunu vurgulamışlardır.

Çalışmada kullanılan kompozit malzemede matriks malzemesi olarak epoksi, takviye malzemesi olarak ise cam elyaf seçilmiştir. Karbon nanotüpler ilave bir takviye malzemesi olarak matriks malzemesine karıştırılmıştır. Oluşturulan kompozit ve nanokompozit numunelerden boru numuneleri üretilmiştir. Numuneler statik iç basınç deneyine, iç basınç etkisi altında yorulma deneyine, yakma deneyine ve halka çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Üretilen tüm numunelere a/t=0,25 ve a/t=0,50 oranlarında

yüzey çatlağı açılmıştır. Tüm numuneler statik patlama mukavemeti değerinin % 40, % 50 ve % 60' kadar yorulma gerilmesi değerlerinde teste tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda yüzde karbon nanotüp ilavelerinin, yüzey çatlağı oranlarının ve yorulma gerilmesi değerlerinin yorulma ömrüne etkisi araştırılarak yorumlar yapılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Plastiklerin Tanıtılması

Plastik malzemeler; kimyasal esas, yapı esası, işleme esası, kullanım alanı ve fiziksel esas olarak çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Kimyasal esas olarak organik ve inorganik, yapı esası olarak homopolimer, kopolimer ve terpolimer olarak, kullanım alanı olarak plastikler, fiberler (elyaflar), kaplamalar ve yapıştırıcılar olarak, fiziksel esas olarak amorf, kristalin ve kısmik kristalin olarak, işleme esası olarak da termoplastik ve termoset olarak sınıflandırılırlar. Polimerler genellikle petrol türevi ürünlerinden elde edilen malzemelerdir. Yapılarında genelde karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt mevcuttur. Bu gruba giren malzemelerin yapısı merlerin birleşerek polimer adı verilen uzun bir zincir oluşturması ve bu uzun zincirler birbirlerine zayıf ikincil bağlar veya güçlü çapraz bağlar ile birleşmesiyle oluşur (Aran 2008).

Malzemede yerine göre sağlamlık, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ısınları, gibi) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yasamda kullanılan terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel bir dille ısısal genleşe katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranır. Bütün istenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olaydır.

Plastiklerin işlenme sıcaklıkları oda sıcaklığında 250 °C'ye kadar, özel durumlarda 400 °C'ye kadar yükselen aralıktadır. Düşük sıcaklıkta işlenmesi katkı maddeleri katılmasını kolaylaştırır. Bu katkılar sayesinde aşınmaya, ışığa, darbeye dayanıklı plastikler üretilir.

Çeşitli mühendislik uygulamalarında metallerin yerini tercihen kullanılan polimer kompozitler sadece hafiflik, mekanik dayanım gibi özellikler değil, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve organlar gibi uygulamaların dışında "optik elyaf" ve basınç ile elektrik üretebilen piezo elektrik özellikli ve istenildiği gibi işlenebilen özel sistemlerin yapımında da metal ve seramik malzemelerin yerlerine kullanılmaktadır.

Polimerler, yapıları gereği çelik ve diğer konvansiyonel malzemelerden farklıdırlar ve onların avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir (Eker 2008).

3.1.1. Termosetler

Termoplastik molekül zincirleri arasında ilave bir kimyasal bağ doğmuşsa üç boyutlu bir ağ oluşumundan söz edilebilir. Bu hacimsel ağdaki bağlantı yerlerine düğüm ve bunların meydana getirdiği amorf ağ birimine göz denilirse termosetlerin yapısı anlaşılabilir. Termosetlerin yapısında bu gözenekli yapı çok sık düğümlerle belli olur.

Moleküller arası kimyasal bağ kuvvetleri ısınmayla zayıflamaz, termoplastiklerin aksine sert kalırlar. Bu sertlik ağ oluşumunun sıklığından ileri gelir. Yani ısı işlemiyle bir defa istenilen şekli alabildiklerinden sonra tekrar ısıtılmakla şekillendirilemezler.

Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar. Sertleştirme ısı verilerek ya da sertleştirici veya katalizör katılması suretiyle yapılabilir. Her iki işlemin yapılarak uygulandığına da rastlanabilir. Bu işlemde kimyasal anlamda bir hacimsel ağlaşma başlangıcında istenilen şekil verilebilir. Ağ teşekkülü ile sertleşme başlar, zamanla artar ve sonunda şekil verme özelliği kalmaz. Parça tahrip olana kadar imalat sırasında verilen şekli muhafaza eder. Bu özellik bu malzemelerin yapıya bağlı olarak karşımıza çıkan en önemli sonuç özelliğidir. Fakat talaş kaldırma, tornalama, testereleme gibi çeşitli kesim ve şekil verme işlemleri ile işlenebilirler. Termoset matriksler en çok kullanılan matriks malzemedir.

Termoset polimerler elyaf takviyeli kompozitler için matriksler kaplamalar dâhil çok sayıda endüstriyel ilişkili uygulamalı bir dizi polimeri kapsar. Böylece termoset polimerlerle karbon nanotüpler ile birleştirme fikri değişik perspektiflerden çok ilgi çekmiştir. Çeşitli polimerler arasında epoksi reçine yüksek çekme dayanımı, modülü, kürleme avantajı, iyi kimyasal ve korozyon direnci, yüksek adezyon ve boyutsal kararlılığından dolayı değişik uygulamalarda kullanılan en yaygın termoset reçinesi sınıfıdır. Termosetlerin genel özellikleri olarak şunlar sıralanabilirler:

- Sıcaklıkla birlikte yumuşatılamazlar, şekilleri değiştirilemez.
- Eritici maddelere karşı diğer plastiklere göre daha mukavemetlidirler.
- Gazlar ve sıvıların nüfuz etmelerine karşı dirençlidirler.
- Emerek şişme özelliği yoktur (Monteiro 2012).

Epoksi, polyester, melamin ve fenol reçineleri önemli bazı termosetler olarak sayılabilir. Termoset plastikler termoplastik malzemelerden daha kuvvetlidirler ve daha yüksek sıcaklıkta kullanılabilirler. Yüksek mukavemet gerektirmeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin

üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır (http://www.efunda.com). Plastik malzemelerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.1.'de şu şekilde sıralanmıştır:

Çizelge 3.1. Plastik malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Takviye edilebilirlik	Metal, seramik ve ahşaptan daha az rijitlik
Yapısal uygulamalarda kullanım	Metal ve seramiklerden daha az mukavemet
Geniş çaplı sıcaklık aralığında kullanım	Metal ve ahşaptan daha büyük kırılganlık
Yüksek mekanik mukavemet	Düşük sertlik / kolayca çizilir
Kimyasal saldırılara dayanım	Metallerden daha büyük ısıl genleşme
Şeffaflık	Düşük sıcaklıklarda yüksek kırılganlık
Yarı-yağlayıcılık	Metal ve camdan daha büyük geçirgenlik
Ekonomik fabrikasyon	Metaller ve seramiklerden daha fazla yanabilirlik
Esneklik	Yüksek sıcaklıklarda metaller ve seramiklerden daha yumuşaktır
İyi elektriksel özellikler	Yüksek sıcaklıklarda termal bozunma ve oksidasyondan zarar görür
İyi ısıl İzolatörler	Birçok organik kimyasala karşı düşük direnç
Dekoratif kullanım	

3.2. Kompozit Malzemeler

İki veya daha fazla malzemenin, iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak için, mikro, makro veya nano seviyede heterojen veya homojen karışımıyla oluşan malzemeye Birleşik veya Kompozit Malzeme denir. Yeni kompozitlerin ve kompozitlerde yeni uygulamaların gelişmesi geleneksel tek yapılı malzemeler tarafından karşılanamayan özelliklerin alışılmadık kombinasyonu ile malzeme gereksiniminden dolayı hızlanmaktadır. İki malzemeden çekirdek olarak kullanılan cam elyaf malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini üzerine alırken matriks malzeme olarak kullanılan epoksi ise yük altında elyaf demetlerini bir arada mümkün olduğu kadar hareketsiz tutarak plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici olarak rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Bu durumun yetersiz kaldığı durumlarda ise matriks malzemesi elyaf malzemesinden ayrı olarak başka bir malzeme ile takviye edilebilmektedir. Bu sayede plastik deformasyona geçiş aşamasında oluşması muhtemel çatlakların oluşumu geciktirilmektedir.

Malzemede yerine göre sağlamlık, esneklik, hafiflik, çevre şartlarına (nem, güneş ısınları, gibi) dayanıklılık, darbe dayanımı, sertlik gibi günlük yasamda kullanılan

terimlerle ifade edilen özellikler yanında daha bilimsel bir dille ısısal genleşe katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme, eğme dayanımları ve benzeri değerlerin uygunluğu aranır. Bütün istenen özellikleri tek bir metal, seramik veya polimer malzemede bulmak son derece ender rastlanan bir olaydır (Eker 2008).

Ayrıca kompozit malzemeyi tanımlayabilecek başka kriterler de vardır. Bunlar;

- kompoziti oluşturan yapı bileşenleri farklı özellikler taşırken, kompozit malzeme farklı özellikler sergiler. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin birbirinden farkı ayırt edilebilmelidir.
- Kompozit malzemeler çeşitli metotlarla farklı malzemelerin belirli düzenlerle karıştırılıp bir araya getirildiği malzemelerdir. Buna dayanarak kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler birbiri içerisinde çözünmemelidir.
- Kullanılan her malzeme ağırlıkça ya da hacimce belirli bir oranda olmalıdır.
- Kompozit malzemede bileşenlerinin her birinin en iyi özellikleri görülmelidir.
- Kompozit malzemenin kimyasal yapıları birbirinden farklı en az iki malzemenin birlikteliğinde oluşması ve genellikle bir ara yüzeyle ayrılması gerekmektedir (Anonim).

Birçok plastik malzeme kararlı fiziksel ve kimyasal özellikleri dolayısıyla iyi yalıtkandırlar. Plastiklerin kimyasal kararlılıkları birçok şartlarda kullanılmalarına imkân vermektedir. Farklı inorganik kuvvetlendiriciler ile plastiklerin modifikasyonu mekanik, elektrik ve operasyonel özelliklerini değiştirmek için tercih edilir. Nano boyuttaki doldurucular yani takviye elemanları bir dizi özelliği ile polimer matriks kökenli kompozit malzemelerin meydana getirilmesi için özellikle ilgi çekmektedir.

Kompozit yapı oluşumuyla geliştirilmesi istenen özelliklerin birkaçı şöyle sıralanabilir;

• yorulma dayanımı,
• aşınma dayanımı,
• mukavemet,
• korozyon dayanımı,
• kırılma tokluğu,
• yüksek sıcaklık özellikleri,
• elektrik iletkenliği,
• ısıl iletkenlik,
• ağırlık,

• rijitlik,

• fiyat (maliyet),

• estetik görünüm (Güvensoy 2010) (Anonim).

Kompozit malzemeler reçine (Matris) ve takviye bileşenlerinden oluşur. Kompozitler temel olarak kalıp görevi gören reçine içinde yer alan takviye elemanlarından oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin, metallere göre avantaj ve dezavantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

Avantajları:

- Çatlak ilerlemesi olayı minimize edilmiştir.
- Titreşimleri absorbe edilme özelliği sağlanmıştır.
- Kompozitlerden bazıları çok yüksek akma sınırı (akma gerilmesi) değerlerine sahiptir.
- Korozyon problemi yoktur. Burada matris ve malzemenin uygun seçilmesinin önemi büyüktür. Aksi takdirde birbirleri ile temasta bulunan malzemeler pil oluşturacak ve galvanik korozyona neden olacaktır.
- Kopma uzaması metallere göre daha yüksektir.
- Yorulma dirençleri oldukça yüksektir.
- Ağırlıkça tasarruf edilmiştir. Esnektirler.
-Yama yapma metodu gibi uygulamalarla tamir edilebilir özelliğe sahiptir.
- Kompozitler içerisine demir, ahşap, halat, tel, mukavva, poliüretan sert köpük gibi malzemeler gömülerek mekanik özellikleri farklılaştırılabilir.
- Kompozitler bir tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif ya da fonksiyonel amaçlı olarak tasarlanabilir.
- Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar.
-Kompozit ürünler, çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi işlemini tek parçada kalıplama olanağı ile ortadan kaldırmaktadır.
- Kompozitler, cam kadar ışık geçirgen olabilir. Tam şeffaf olması nedeni ile ışığı yayması sayesinde, diffüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kolektörü yapımında önemli avantaj sağlar.
- Kompozit ürünler, termoset plastikler grubundan polyester reçineler ile yapıldığı için yumuşamaz ve şekil değiştirmez (http://www.zinisan.com.tr) (Eserci 2007) (http://www.vakumpompasi.tr) (Anonymous ASM).

Dezavantajları:

- Kür işlemine tabi tutulmadan kullanılamazlar.
- Değişik doğrultuda değişik mekanik özelliklere sahiptir. Aynı kompozit malzemeler için çekme, basma, kesme, eğilme mukavemet değerleri farklı olabilir. Elyaf doğrultusundaki elastik modülü, elyafa dik doğrultudaki elastik modülünden daha büyüktür.
- Üretimi nispeten pahalı ve karmaşık olabilir.
- Sıcaklık değişimlerinden etkilenir.
- Nem ve hava zerrecikleri belli bir yüzdenin üzerine çıktığı zaman kompozitlerin mekanik ve yorulma özelliklerini olumsuz yönde etkiler.
- Delik delme ve kesme türü işlemler liflerde açılmaya ve mikro çatlaklar gibi ilk hasarın başlatılmasına yol açmaktadır (http://www.zinisan.com.tr) (Eserci 2007) (http://www.vakumpompasi.tr) (Anonymous ASM).

3.2.1. Tabakalı Kompozitler

İki veya daha fazla sayıda değişik malzemenin tabakalar halinde dizilerek, tek ve bütün bir eleman gibi birbiriyle birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelere tabakalı kompozitler denir. Tabakalama, tabakaları meydana getiren malzemelerin daha faydalı bir malzeme oluşturması için teşkil edilir. Bu teşkilde iki farklı faz yer almaktadır. Bunlardan birisi kompozit malzemeye özelliklerini kazandıran sürekli faz, diğeri ise sürekli fazı oluşturan tabakaları bir arada tutan bağlayıcı fazdır. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemelerin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, ısıl izolasyonu ve görünüm gibi özellikleri iyileştirilir. Bu sebepten ısıya ve neme dayanıklı malzemelerdir. Bu tür iyileştirilmiş özellikler bir metalden haddelenmiş metallerden, tabakalanmış camlardan, plastik tabakalı laminantlarda çok güzel şekilde görülebilir. Organik ve inorganik malzemeler tabakalar halindedir (Şahin 2000, Erkendirci 2006).

Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler çok katlıdırlar. Her tabaka tasarım açlarına bağlı olarak değişen elyaf doğrultuları ile tek katlı kompozitten oluşabilir. Her kattaki kompoziti oluşturan elemanlar aynı ise bunlar "İzotropik" olarak adlandırılır. Birçok katlı kompoziti oluşturan malzemeler farklı malzemelerden oluşuyorsa bunlar "Ortotropik" veya "karma ve melez laminentler" olarak adlandırılır (Karagöz 2008) (Vatangül 2008). Tabakalı kompozitler anizotropik olarak da adlandırılır.

3.2.2. Cam Elyaf

Elyaf çeşitleri olarak cam elyaflar, bor (boron) elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar, silisyum karbür elyaflar, grafit elyaflar, bazalt elyaflar söylenebilir. Bunların yanı sıra alümina elyaflar, silikon karpit de kullanılmaktadır. Ayrıca metal kökenli elyaflar da tercih edilmektedir.

Cam elyaflar da sentetik organik bir malzemedir. E camı, S camı ve C camı gibi çeşitleri mevcuttur. E camı elektrik uygulamalarında tercihen kullanılır. İyi derecede mukavemet değeri ve elastikiyet modülü değeri gösterir. C camı korozyona dayanıklı kompozit malzeme imal ettirmede tercih edilir. S camı ise yüksek silika miktarına sahiptir. Bu sebeple yüksek sıcaklıklara karşı direnç gösterir. Cam elyafı iyi bir kimyasal direnç ve kolay işlenebilirlik gösterir. Ayrıca temin edilebilinmesi de diğer elyaflara göre çok daha kolaydır. Çekme mukavemetleri mükemmeldir. Buna rağmen uzun süreli yükler altında kaldıklarında bozulabilirler. Cam elyaflar kalıba çok kolay yatırılabilirler (Genç 2006) (http://www.camelyaf.com.tr) (Anonymous).

Cam elyaflar polimer esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan ve en ucuz olan takviye elemanıdır. Ticari olarak en çok kullanılan malzemedir (http://www.advancedcomposites.com). Yüzme havuzu kısımları, sörf tahtaları, kapılar, spor ekipmanları, tekne gövdeleri ve otomobil parçaları, elektriksel uygulamalar, korozyon dirençli ürünler, inşaat malzemeleri ve ısı izolasyonu gerektiren ürünler cam elyaftan yapılma ürünlerin geniş yelpazesi içerisinde yer almaktadır (Karadeniz 1989, Johnson 2012). Bunun yanı sıra cam elyaflar hafif ama dayanıklı olduğu için devre kartları gibi hassas uygulamalar için de idealdir. Cam takviyeli kompozit malzemenin dizaynında cam elyafın kimyasal bileşimi, elyaf çapının seçimi ve takviye malzemesinin geometrisi dikkate alınması gereken kriterlerdendir. Bu yüzden cam takviye, büzülmüş veya düz sürekli elyaf, keçe, kumaş ve kırpılmış elyaf gibi farklı tiplerde üretilir ve kullanılır (http://www.compositesworld.com).

Cam takviyeli plastikler (CTP) imalatta yüksek dayanım/ağırlık oranına ve dış alaşımlara karşı mukavemetli olan kompozit numunelerin üretiminde kullanılır. Tipik uygulamaları olta çubukları, gemi tankları, kruvazörler ve yatlar gibi deni araçları, koruma kaskları, döküm kalıpları, makine parçaları koruma kapakları, planör ve model uçaklar olarak söylenebilir.

Lifleri bir arada tutmak için polyester reçineler yaygın olarak kullanılırlar. Fakat epoksi reçineler maliyet artışına rağmen en yüksek dayanımın istendiği durumlarda elyaflar ile CTP oluşturmada tercih edilir. Cam elyaf olarak adlandırılan bu maddenin

bileşiminde yüksek yüzdede silikon dioksit, kalsiyum oksit, alüminyum oksit, bor oksit, çok az miktarda da sodyum oksit, potasyum oksit ve magnezyum oksit bulunur.

3.2.3. Matriks Malzemeler

Plastik matriksli kompozitler otomotiv sektöründe, denizcilik sektöründe ve havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin büyük bir çoğunluğu polimer esaslı matriksler ile üretilmektedir (Şen 2010). Bunlar termoplastik matriksli ve termoset matriksli olabilirler. Matriks malzemeler lifler arasındaki gerilme transferini sağlarlar. Elyaf yüzeylerini aşınmaya karşı korurlar. Ayrıca korozyon ve oksidasyon gibi çevresel etkilere karşı elyafları koruyarak, elyaf ve matriks arasında alternatif hasar oluşturarak çatlak ilerlemesine karşı koyarlar (Anlak 2007). Matriks malzemeleri termoplastik matriks malzemeleri ve termoset matriks malzemeleri olarak iki durumda ele alınabilir.

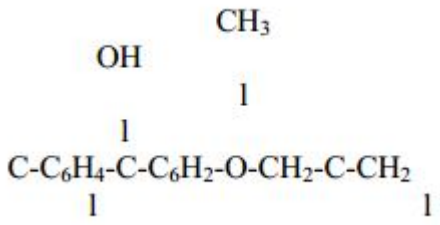
Termoplastik matriks malzemeler yüksek maliyete sahiptirler yani hammaddeleri daha pahalıdır. Ayrıca üretimde zorluklarla karşılaşılabilir. Bu sebeple termosetlere nazaran daha az tercih edilirler. Oda sıcaklığında işleme kaliteleri düşük olduğundan üretim kaybı gözlenir. Buna rağmen çekme mukavemetini ve eğme mukavemetini arttırdığı için tercih edilebilirler.

Termoset matriks malzemeler çeşitlidirler:

- Vinilester reçine matriksler polyesterlere benzerler ve elyaf – matriks arasında yüksek bağ dayanımı sergilerler.
- Fenolik reçine matriksler yüksek sıcaklığa karşı oldukça dirençlidirler. Fakat mekanik özellikleri düşüktür. Bu sebeple mekanik özelliklerinin yüksek olması istenen kompozitlerde daha az tercih edilirler.
- Polyester matriksler; Polyesterin ana tipleri, polyester bileşeninin doymuş asitle ya da alternatif malzeme olarak glikolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi artırılabilir. Düşük viskoziteye sahiptirler. Polyesterlerin maliyeti düşüktür. Geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Fakat kürleme işlemi esnasında yüksek egzotermik reaksiyon zayıf elyaf/matris bağı mukavemetine neden olur. Ayrıca kimyasal dirençleri oldukça zayıftır. Polyesterler genelde lifli veya film şeklinde olurlar (Timings 1995).

Bir diğer reçine matriks çeşidi ise epoksilerdir:

Epoksiler iki veya daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşurlar. Polifenolün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilir. Yani, epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Açık renkli yarı şeffaf akışkanlığı değişken olarak bulunabilen bir maddedir. Genellikle oda sıcaklığında sıvı halinde bulunur, bir sertleştirici ile katı halini alır (Akkurt 1991). Epoksiler sıkı bir C-O-C halkası içeren karmaşık monomerler, daha sonra iskelet yapı içerisine bağlanan, çizgisel zincirler içerisine bir katılma mekanizması ile polimerize edilir (Askeland 1998). Kimyasal formülü şu şekildedir.



Şekil 3.1. Epoksinin kimyasal formülü

Epoksi reçineler, bisfenol-A bazlı reçineler, glisidil esterler, glisidil aminler, novolaklar, bromlu reçineler, sikloalifatikler ve diğer reçineler olmak üzere çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu çeşitlerinde ise farklı formüller kullanarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Bu farklılıklar göz önünde bulundurularak seçim yapılırken oldukça dikkat edilmelidir. Epoksi reçineler olgunlaştırıldıklarında yani çapraz bağlandıklarında yan ürün açığa çıkarmazlar ve bu nedenle düşük olgunlaşma büzülmesi gösterirler, polyesterlere göre daha yüksek adezyonları vardır (http://www.efunda.com).

Epoksiler kendilerine uygulanan kür işlemi sonucunda 300° C – 400 °C gibi yüksek sıcaklıklara kadar dayanıklılık gösterirler. Sertleştiricisinin özellikleri ve karışım oranı kompozit özelliğini büyük ölçüde değiştirdiği için tüm bunlar dikkate alınarak uygulanan kür işleminin 60° C sıcaklıklardan 300° C sıcaklıklara kadar değiştiği söylenebilir. Kür işlemleri uygun katalizörlerin üreticiler tarafından öngörülen oranlarda karıştırılarak hızlandırılabilir.

Epoksi reçineler, uzay ve havacılık gibi ağırlığın kritik olduğu ve yüksek mukavemet istenen yerlerde tercih edilir. Ayrıca döküm ve kalıplama malzemesi olarak, yüzey kaplama malzemesi olarak, yapıştırıcı olarak, katmanlı levha, boru ve parça üretiminde, boya türlerinin bileşiminde taşıyıcı olarak kullanılabilirler (Yaşar 2001) (Hashim 2011). Polyester gibi daha ucuz olan bir reçineye tercih edilme sebepleri, daha

iyi mekanik özellikler, yorulma dayanımı, ısıl dayanım, takviye malzemesine iyi yapışma ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı şeklinde sıralanabilir. Değişik epoksilerin bazı özellikleri Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Epoksi özellikleri (Sorucu 2007)

Özellikler	Oda Sıc. Kürlenmiş Epoksi	Yük. Sıc. Kürlenmiş Epoksi	Gelişmiş Epoksi	Polyester	Fenolik Reçine
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	1.1-1.3	1.2-1.4	1.3	1.2	1.2-1.3
Elastik Modül (GPa)	2-3	2.5-3	3.5	2-3	5-11
Çekme Mukavemeti (MPa)	50-70	70-90	60	50-60	50-60
Kopma Uzaması (%)	2-6	2-5	2	2-3	1.2
Azami İşlem Sıc. (°C)	70-100	100-180	180	60-80	100-125

Epoksilerin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Avantajları:

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Islanma ve yüksek nem dâhil kötü çevre koşullarına karşı yüksek direnç
- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur (Anonymous).

Dezavantajları:

- Polyesterle karşılaştırıldığında sertleştiricisi de göz önünde bulundurulduğunda daha pahalıdır.
- Polyestere oranla daha yüksek viskoziteye sahiptirler.

Epoksi reçineleri genel olarak şu amaçlar için kullanılmaktadır:

- Genel amaçlı yapıştırıcılar
- Çimento ve harçlarında bağlayıcı olarak
- Sert köpükler
- Koruyucu ve süs kaplaması
- Kaymaz kaplamalar, konserve ve fıçı kaplamaları
- Petrol sondaj kumlu yüzeyler katılaşabilme
- Endüstriyel kaplamalar

- Fiber takviyeli plastikler (Johnson 2012) (Anonymous).

Tüm bu alanların arasında epoksi terimi genel olarak elyaf takviyeli polimer kompozitlerde kullanımı için adapte edilmiştir. Bu yüzden epoksilerin çeşitleri aracılığıyla sayısız kullanım geliştirilmesi ile uygun endüstriler ve oralarda kullanılan ürünler sürekli olarak geliştirilmektedir. Epoksiler karbon elyaf, aramid elyaf, bazalt elyaf ve en çok kullanılan çeşidi olan cam elyaf olmak üzere tüm elyaf çeşitleri ile kullanım için uygundur. Elyaf takviyeli epoksiler filaman sarım metodunda basınçlı kap, roket yuvaları, dinleme ekipmanları ve boru imalatında tercih edilirler (Chen 2009, Warrier 2010, Liu 2005).

3.3. Kompozit Üretim Yöntemleri

İstenilen özellik ve biçimde kompozit malzeme üretebilmek için farklı yöntemlerle işlem yapılabilmektedir. Bu yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

- Hazırlanmış kalıp üzerine takviye elemanları elle yatırılarak üzerlerine akışkan halde olan matriks malzemesinin yayıldığı elle yatırma yöntemi,
- Düşük ve orta hacimdeki açık kalıplar için kullanılan püskürtme yöntemi,
- Lifli kompozit kumaş malzemesinin bir kalıp içerisine elle yatırılması ve reçinenin elle kalıp içerisine dağıtılması nı esas alan vakum torbalama yöntemi,
- Basınçlı bir metal içerisinde ısıtılmask suretiyle işlem yapılan otoklavda torba kalıplama yöntemi,
- Silindirik şekle sahip olan kalıpların imal edilmesinde kullanılan santrifüj kalıplama yöntemi,
- Hazır kalıplama pestili (SMC) ve hazır kalıplama hamuru (BMC),
- Enjeksiyon kalıplama yöntemi,
- Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi,
- Sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretildiği profil çekme (pultruzyon) yöntemi,
- Elyaf takviyesinin katalist sistemi katılmış reçine ile birlikte iki plastik film arasında sıkıştırılarak çekilirken fırınlanması prensibine dayanan devamlı levha üretim yöntemi.
- Filaman sarım yöntemi (Turgut 2012), (Aktaş 2012), (Yöney 2007), (Deniz 2005), (Arıcasoy 2006).

Filaman sarım tekniği bileşik bir ürün oluşturtmak için sürekli takviye malzemesinin tek olarak veya belli genişlikte bir bant oluşturması halinde döner bir kalıp üzerine değişik geometrik ölçülerle sarılmaları olarak tanımlanabilir. İplik sarma süreci, tipik olarak içi boş bir çekirdek ile dairesel kompozit ürünler oluşturmak için kullanılır ve kompozit malzeme üretim yöntemleri içinde uygulanma mantığı basit, basit olduğu kadar da verimli bir yöntemdir. Filaman sarma tezgâhlarında torna tezgâhı gibi döner harekete sahip tezgâhlarda olduğu gibi döner bir mandrelin dönüş hızı ile takviye malzemesinin ilerlemesinin taşıyıcı bir araba ile senkronize edilmesi suretiyle istenildiği açılarda sarım gerçekleştirilebilir. Sarım birbirine yapışık belli bir genişliği olan elyaf bantlarının reçine içine daldırılıp çıkarılmasıyla ıslatılarak ıslak sarım ya da daha önceden ıslatılmış fakat sertleştirilmemiş elyafla kuru sarım olarak mandrel üzerine sürekli olarak sarılmasının tüm mandreli kaplaması ile tabakalar halinde meydana gelir. Sarım istenilen bir kalınlığa ulaşılana kadar veya istenilen bir tabaka sayısı tüm mandrel üzerinde elde edilene kadar devam ettirilebilir.

Sarım açısı 25° gibi düşük açılardan başlayarak 90°'ye yaklaşan açılara kadar arttırılabilir. Daha düşük açılı sarım işlemleri teorik olarak olabilmesine rağmen pratikte uygulanabilirliği sarım tezgâhlarının boyutları göz önünde bulundurulduğundan dolayı pek mümkün olmamaktadır.

Sarım işleminde bağlayıcı olarak epoksi, polyester veya vinilester gibi termoset reçineler tercih edilirken takviye elemanı olarak farklı elyaflar tek tek veya hibrid oluşturacak şekilde kullanılırlar. Takviye malzemesi elyaflarda şekillendirilebildiği gibi matriks malzemesi içerisinde homojen olarak dağıtılması suretiyle de kullanılabilir (http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas).

Filaman sarma işlemi kullanılarak oluşturulan ürünlerin kullanım alanları şöyle sıralanabilir:

- Golf kulüpleri malzemeleri
- Bisiklet parça ve tüpler
- İletim direkleri
- Tekne direkleri
- Uçak gövdesi
- Gaz ve su tankları
- Çimento Mikserler
- Ağır inşaat ürünleri ve yapı elemanları
- Borular

- Roket namluları
- Depolama tankları
- Spor malzemeleri
- Hidrolik ve pnömatik silindirler

Filaman sarımın içi boş kompozit ürünler yaratma sürecinde birçok avantajı vardır.

Ağırlık - Filaman sarma sürecinin önemli bir avantajı tüm ürünlerin içi boş ve kalıcı bir iç sistem olmadan yapılabilmesidir. Çünkü sebebi son derece hafif olmasıdır.

Tasarım - Farklı sargı teknikleri kullanarak tasarım ve mühendislik sürecinde değişiklikler, kür ve malzeme seçenekleri esneklik, kuvvet ve basınç tutma kapasitesi gibi varyasyonlar için izin verir.

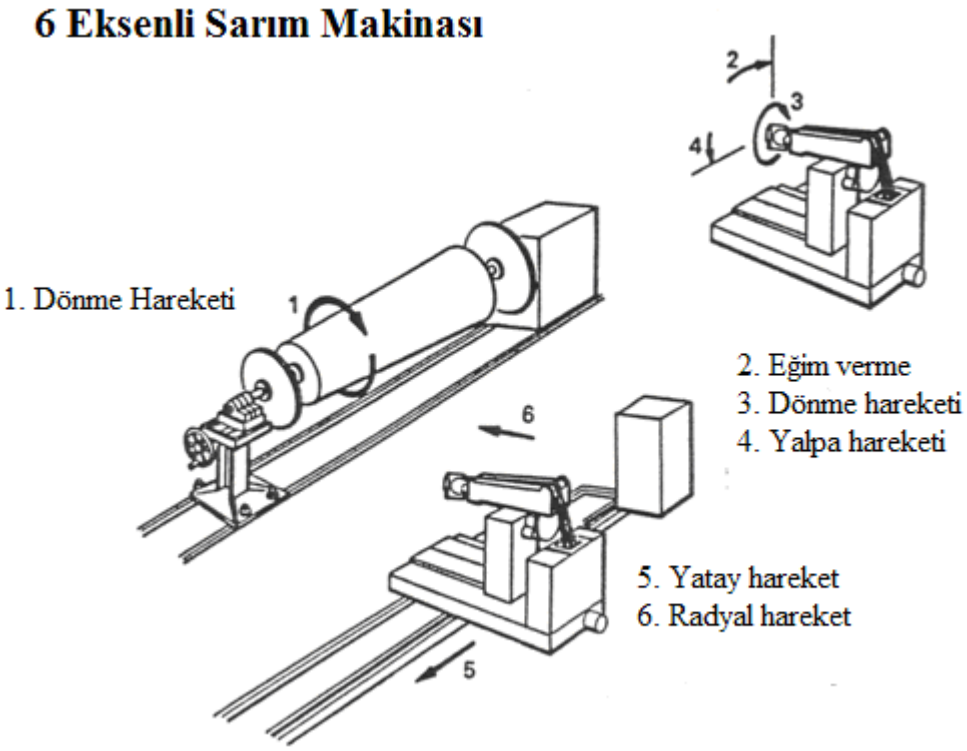
Otomasyon - Filaman sarma hızlı ve doğru aynı bileşenleri üretmek için makineler kullanarak yüksek hızlı bir süreç içinde yapılabilir. Bu süreç karmaşık makine ve karmaşık mühendislikte dairesel olmayan kompozit malzeme oluşturmak için bir yazılım içerebilir. Süreci yüksek derecede otomatize edilebilir olduğundan, ölçeklenebilir ve son derece karmaşık bileşenlerin hassas seri üretimi için izin verir.

Etkin Maliyet - Düşük maliyetli malzeme ve otomasyon bileşenleri üretmek için maliyeti önemli ölçüde azaltır. Süreci daha az malzeme, daha az emek ve komponent üretim yöntemleri için daha az nakliye maliyeti içerir.

Bunların yanı sıra bu teknikte mandreller karmaşık ve pahalı olabilir. Kompozitler ve plastiklerin imalatı için özel ekipmanlar gerektirebilir (Johnson 2012).

Filaman sarma süreci, yaygın olarak benzersiz bir esneklik ve mukavemet özelliklerine sahip son derece özel bir içi boş çekirdek yapılarını oluşturmak için bileşik imalatında kullanılır. Bu süreç, ölçeklenebilir otomatik ve maliyet etkin bir biçimde bu yapıların oluşturulmasını sağlar.

Şekil 3.2.'de 6 eksenli bir filaman sarım tezgâhının şematik görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.2. 6 eksenli filaman sarım tezgahı

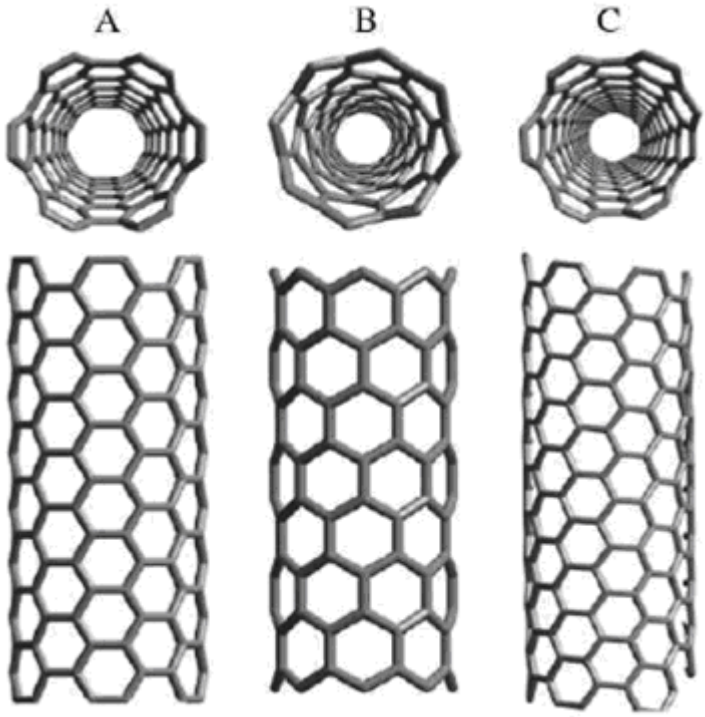
3.4. Nano teknoloji ve karbon nanotüp

Karbon nanotüplerin birçok morfolojik değişkenleri iyi bilinmektedir. Mesela düz, kıvrılmış, dallı, balıksırtı ve yığılmış isimlerindeki farklı tüp yapıları, tek, çift ve çoklu olan tabaka sayıları, iyi hizalanmış ve bozulmuş olan tabaka kristalliği, topolojik ve boşluk kusurları, fonksiyonel grup, kaplama ve oksidize olan yüzey kimyası şeklinde listelenebilir. Nanotüpler grafen düzlemi denilen örülü bir yapının, silindir şeklinde sarılması ve uçlarının kapak gibi kapatılmasıyla oluşur (Küçükyıldırım, B., O., 2012). Tek-katmanlı nanotüpler temel silindirik yapı gibi düşünülebilir ve bu da çok-katmanlı nanotüplerin yapı taşlarını oluşturur (Koç 2003). Mekanik dayanım (Godara 2009, 2010, Breton 2004), ısıl ve elektrik iletkenliği (Kaneto 2011, Spitalskaya 2010, Balakrishnan 2010), kimyasal kararlılık, yoğunluk ve matriks malzemesi ile birleşme eğilimi gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri (Hayashi 2011) (Mora 2009) karbon nanotüplerin değişik tipleri arasında farklılık göstermektedir (Shen 2007). Bundan dolayı her bir nanokompozit uygulaması için uygun karbon nanotüplerin stratejik olarak seçilmesi gerekmektedir. Var olan gereksinimleri kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) bünyesinde barındırmaktadır.

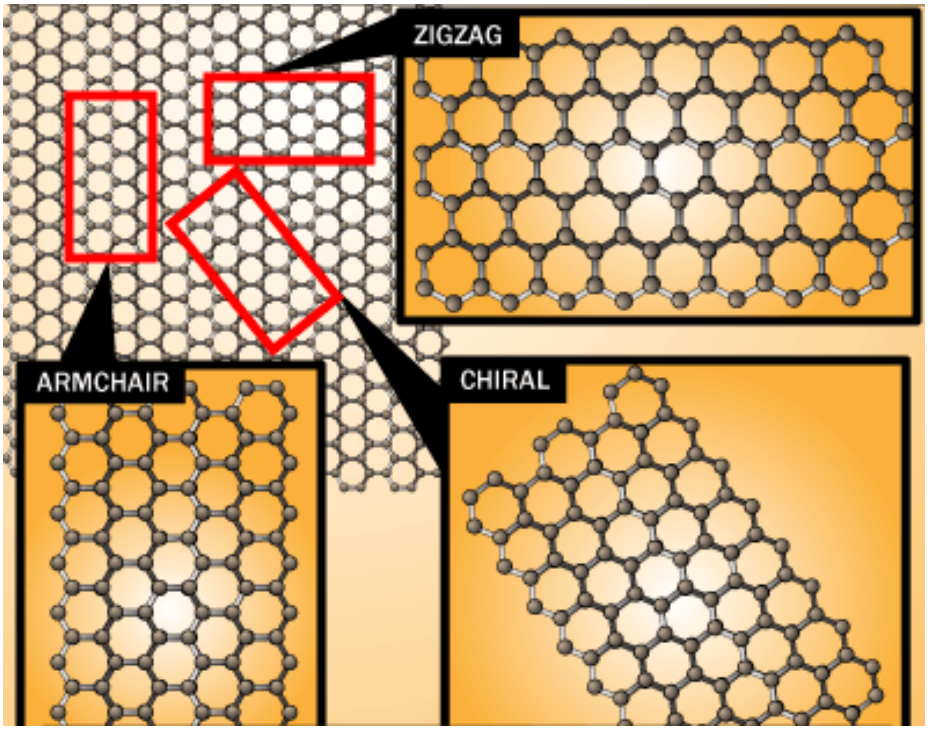
Nanotüplerin nanokompozit malzemeler içerisinde en çok kullanılanı çok duvarlı karbon nanotüpler olduğu için düşük maliyet gerektiren nanotüpleri sentezleme

olayı yararlı bir metottur. Eğer bazı özel uygulamalar varsa ve uygun bir türde karbon nanotüp, boy, saflık, kristallik ve yüzey işlemi seçilirse önceden tasarlanmış olan mekanik, kimyasal ve taşıma özellikleri olan ideal nanokompozit oluşması muhtemeldir. Karbon nanotüplerin boyları nanokompozit performansı için önemli bir kısımdır ve daha uzun bir tüp daha iyi mekanik özellik eldesi için kullanılmalıdır. Ancak dağılım ve karmaşıklık probleminden dolayı uzun bir tüp matrikste boşluk oluşmasına sebep olabilir. Bu yüzden dağılımla ilgili olarak daha iyi sonuç elde etmek için daha kısaltılmış nanotüpler tercih edilmektedir.

Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'te farklı formlarda bir araya gelmiş karbon atomlarının görüntüleri verilmiştir (www.robaid.com).



Şekil 3.3. Karbon nanotüp şekilleri (a) koltuk, (b) zigzag (c) kiral (Tepe 2007)



Şekil 3.4. Karbon atomlarının silindir oluşturma şekilleri (Bonsor 2012, http://science.howstuffworks.com)

Hem termoset plastiklerde hem de termoplastik plastiklerde takviye olarak kullanılabilen karbon nanotüplerin yüzey iyileştirmesi, nanokompozit malzemelerde karbon nanotüp kullanımının kritik bir parçasını oluşturur. Çünkü karbon nanotüpün yüzeyi genel olarak hidrofobiktir ve matriks malzeme ile karbon nanotüp arasındaki ilişki matriks malzemesini kuvvetlendirmede bir anahtardır (Vineet ve ark. 2006). Bir takviye elemanı plastik esaslı matriks malzemeleri içerisinde değişik yüzdelerde eklendiğinde katkı sağlayabilir (Moczo, J., 2008). Karbon nanotüpler de bu tür malzemelerden birisidir. Nanokompozit bir sistemin toplam enerjisinin polimerin enerjisinin yanı sıra karbon nanotübün enerjisinin ve matriks ve nanotüp arasındaki moleküller arası olan enerjinin toplamından meydana geldiğini bildirmiştir. Ayrıca karbon nanotüp dağılımı eşit önemdedir ve yüzeylerinde bir fonksiyonelleştirme gibi işlemlerin yapılmasının iyi bir dağılım elde etmek için faydalı bir yoldur. Karbon nanotüplerin polimerler içerisinde dağılımı için karıştırma, ekstrüzyon ve yoğurma gibi birçok karıştırma tekniği vardır. CNT'leri karıştırmak için kullanılan en yaygın teknik sonikasyon tekniğidir. Bir kesikli ultrason CNT'leri matriks içerisinde etkili bir şekilde dağıtır ve bir araya toplanmış olanları da temizler. Bununla birlikte bu metot sonik ucundan artan mesafe ile titreşimsel enerjinin aşırı azalmasından dolayı yalnızca küçük miktarlar için etkili olmaktadır. Bu metodun başka bir zararlı etkisi de lokal enerji

girişinden dolayı CNT parçalanmasıyla etkin uzunluğun azalmasına yol açmasıdır (Ma 2010, Wang 2009) (Sahoo 2010).

Kompozit malzemelerde yük transferi için ara yüzey yapışma eksikliği aşılması gereken önemli bir unsurdur. Ara yüzey, matriksten takviye elemanına gerilme transferine izin verdiğinden dolayı bu problem matriks malzemesine karbon nanotüp takviyesi yapılarak çözülebilir.

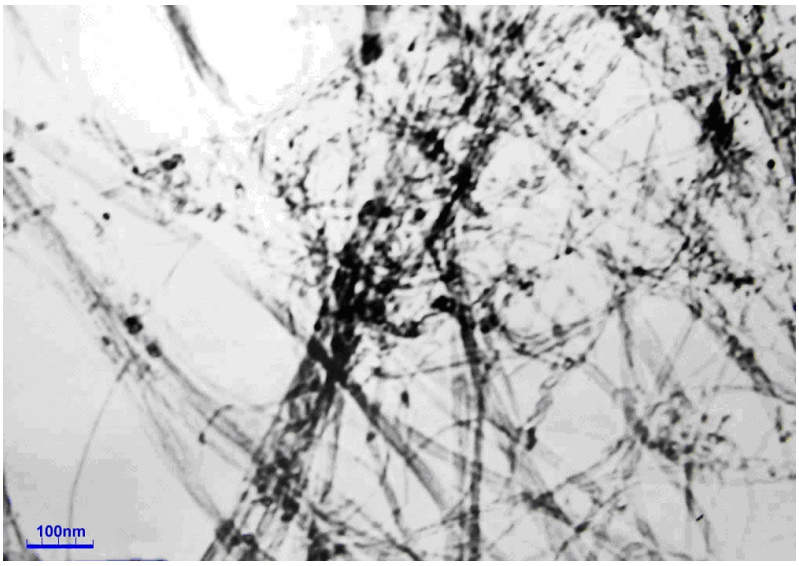
Zayıf polimer matrikslerin içine karbon elyaflar ve cam elyaflar gibi geleneksel takviye elemanlarınkinden daha yüksek olan CNT'lerin bireysel özelliklerinin transferi ve daha sonra daha üstün nitelikli mekanik özelliklere sahip olan kompozitlere dönüşmesi hala bir sorundur.

Ancak problem polimerlere ilgi çekici mekanik, ısıl ve elektrik özellikleri transfer etmektir. Doldurucu olarak karbon nanotüp takviyesi ile plastiklerin malzeme özelliklerini efektif olarak geliştirmek için çözülmesi gereken iki ana konu vardır. Bu konular ara yüzey bağı ve karbon nanotüplerin bireysel olarak uygun bir şekilde dağılmasıdır (Martone 2010).

Kullanılan çok duvarlı karbon nanotübün özellikleri Çizelge 3.3.'te, TEM görüntüsü Şekil 3.5. verilmiştir.

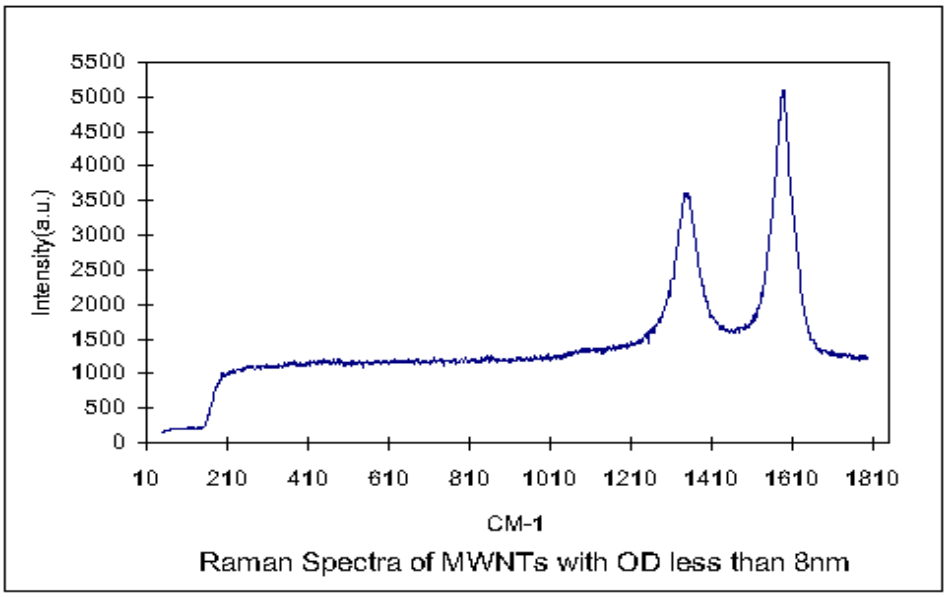
Çizelge 3.3. Karbon nanotüpün özellikleri

Özellik	Değer
Dış Çapı	< 8 nm
İç Çapı	2-5 nm
Kül (ağırlıkça)	< %1.5
Saflık	> % 95
Boy	10-30 mikron
Özgül Yüzey Alanı	500 m^2/g
Elektrik İletkenliği	> 100 S/cm
Hacimsel Yoğunluk	0.27 g/cm^3
Gerçek Yoğunluk	2.1 g/cm^3



Şekil 3.5. Karbon nanotüpün klasik bir TEM görüntüsü (http://www.cheaptubesinc.com)

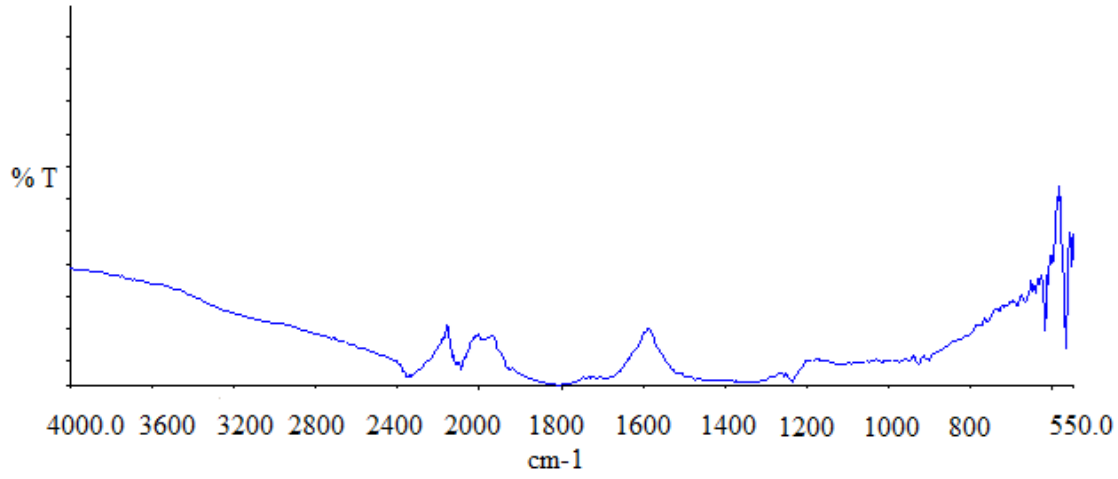
Şekil 3.6. ve Çizelge 3.4.'te kullanılan karbon nanotübün Raman spektroskopi ile elemental analizi ve elementlerin yüzdesel içerikleri görünmektedir. Analiz metodu olarak enerji dağılımı X-ışını (EDX) kullanılmıştır. Şekil 3.7.'de ise kullanılan karbon nanotüplerin fonksiyonelleştirilmemiş olduğuna dair FTIR testi sonucu verilmiştir.



Şekil 3.6. Kullanılan karbon nanotüpün raman spektroskobu değerleri

Çizelge 3.4. Kullanılan karbon nanotüpün elemental analizi

Bileşenler	% İçerik
Karbon (C)	97.44
Alüminyum (Al)	0.19
Klor (Cl)	1.03
Kobalt (Co)	1.10
Kükürt (S)	0.24



Şekil 3.7. Kullanılan karbon nanotüpün FTIR sonucu

3.4. Yorulma

3.4.1. Yorulma

Birçok makine parçaları ve yapı elemanları kullanılma esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadırlar. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. Çünkü bir malzeme statik yüklemede dayanabildiği gerilmelere tekrarlı yük altında dayanamamaktadır. Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genleşme ve büzülmelerden doğan ısısal gerilmeler de neden olabilmektedir. Makine elemanlarında meydana gelen hasarların büyük bir çoğunluğu yorulmadan kaynaklanmaktadır (Savaşkan 2004).

Buna göre yorulma olayı ASTM D 2992 standardına göre şöyle tanımlanmıştır. "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" şeklinde tarif edilmiştir. Yani yorulma deneyi bir malzemenin belirli bir tekrar sayısı için güvenle dayanabileceği gerilmeyi tayin eder.

Yorulma mukavemetine etkiyen başlıca etkenler aşağıdaki biçimde sıralanabilir:

- Parçanın yüzey işleme kalitesi
- Malzemenin cinsinin, bileşiminin ve yapısının etkisi

- Sıcaklık
- Çevrenin etkisi
- Frekans (deney hızı)
- Gerilme koşulları
- Çentik (yüzey çatlağı) etkisi
- Korozyonun etkisi (Polatlı 2008).

Bu etkilerden sıcaklık çoğunlukla mukavemetleri azaltıcı yönde etkilediğinden yorulma mukavemetinin de azalması doğaldır. Gerilme koşulları statik kaldığı vakit yukarıdaki ilk dört etkenin yaratacağı neticeler ayrı ayrı saptanabilir. Bunların yanında buna ilave olarak gerilme koşulları da yorulma mukavemetine etki eder. Özellikle eksenli gerilme hallerinin getireceği biçim değiştirme kısıtlamaları malzeme ömrünü arttırıcı yönde etki eder. Normal koşullarda frekansın yorulma mukavemetine etkisi önemsizdir. Bundan dolayı yorulma deneylerinde deney süresini kısaltmak için yüksek frekanslı gerilme uygulayan deney makineleri tercih edilir. Hidrolik yorulma makineleri 50 Hz'i geçmediği halde elektromıknatıslarla güç uygulayan makinelerde bu değer 400 Hz'e kadar çıkartılmıştır. Çok yüksek frekanslarda plastik biçim değiştirme için daha az vakit kaldığından çoğunlukla yorulma mukavemeti yaklaşık %10 kadar artar. Değişken gerilme altında çevrenin kimyasal etkisi daha şiddetli olur, dolayısıyla yorulma ömrü kısalır. Uygulamada korozyon yorulması kritik mesele yaratabilir. Buna ilave olarak korozif bir ortamda demir esaslı alaşımların S-N diyagramlarının devamlı azaldığı ve asimptotik bir değere ulaşmadığı görülmüştür. Tekrarlı sürünen yüzeylerde korozyon daha etken olur. Fretting korozyonu denen bu hadise de yorulma mukavemeti azalır. Özellikle asma köprülerde çelik kablo ile birlikte irtibat kelepçelerinin temas yüzeylerinde bu çeşit korozyon oluşur, bu da köprü ömrünü etkileyen en kritik olaydır. Yorulma çatlağı, yüzeyde başlayıp içeriye doğru yayıldığından yüzey işleme kalitesinin önemi büyüktür. Yüzeydeki pürüzler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi arttıkça yorulma mukavemeti de büyür.

Yorulma davranışı iki aşamada tanımlanır:

- Çatlak oluşumu
- Çatlak ilerlemesi

Yorulma olayında çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak teşekkülü için genellikle şu üç ana faktör gereklidir:

a. Yeteri derecede yüksek bir max. çekme gerilmesi,

b. Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması,

c. Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı.

Bu ana faktörlerin yanında yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, bileşik gerilmeler, gerilim konsantrasyonu, frekans, mikro yapı (tane boyutu, faz dağılımı, inklüzyonlar, v.s.) gibi çok sayıda yan faktörler de sayılabilir

Yukarıda sayılan faktörler göz önünde bulundurulacak olursa, genel olarak parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü arttırmak için, etkili faktörleri en zararsız halde bulunduracak çok iyi bir dizayna gerek vardır. Ancak küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarını karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür. Laboratuarda, standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterirler. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenlerle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılamazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Yorulma deneyleri uygulanan yorulma hızlarına göre de üç grupta incelenir;

• Yüksek çevrim sayılı

• Düşük çevrim sayılı

• Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri (Eskizeybek 2006).

Genel olarak 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 küçük çevrim sayılarında hasar ortaya çıkıyorsa bu tür yorulmaya düşük çevrim sayılı yorulma denir. Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri, deney süresini en aza indirmek, kompresör ve türbin kanatları gibi çok yüksek devirlerde çalışan elemanların denenmesini sağlamak amacıyla ve değişik çalışma hızlarının malzemenin yorulma dayanımları üzerindeki etkisini ortaya çıkarabilmek için uygulanmaktadır. Bir deneyin yüksek hızlı olabilmesi için çevrim sayısının dakikada 10.000 den daha fazla olması gerekir.

Kompozit malzemelerde kırılma her zaman sadece bir noktadaki makro çatlağın büyümesi ve gelişmesi ile başlamaz. Ayrıca çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin matriks çatlağı ve elyaf kırılması ile malzeme içerisinde meydana gelmesi muhtemeldir.

Yorulma yükü altında da bu kusurlar çatlak oluşumuna ve ilerlemesine yol açan unsurlardır. Kusurların büyümesi malzemeler içerisinde mikro yapısaldır ve matriksteki çatlakları, delaminasyonu ve elyaflardaki kırılmaları kapsamaktadır. 0° ve 90° arasındaki sarım açıları arasında eksenel yükleme olmayan tek yönlü kompozitlerde, çatlak zirvesi iki yer değiştirme bileşenine bağlıdır: normal modda açılma ve elyaflardaki paralel kayma modu. İki hasar tipinin de etkileri yükleme açısına bağımlıdır.

Yorulma deneyi sonuçlarının bir anlam verebilmesi için aşağıdaki bilgilerin belirtilmesi gerekir;

1. Malzeme özellikleri.
   - Malzeme cinsi
   - Malzemenin piyasaya sunuluş durumu
   - Ergitme ve döküm koşulları
   - Son mekanik işlemler ve ısıl işlemler
   - Kimyasal bileşim
   - Yüzey durumu ve kalitesi
2. Deney numunesinin şekil ve boyutları.
3. Deney cihazının tipi, çalışma prensibi ve deneyin yapılışı esnasında uygulanan gerilme ile frekans.
4. Deneyin yapıldığı ortamın koşulları ve sıcaklığı.
5. Bazı hallerde malzemenin diğer mekanik özellikleri ile metalografik yapısı.

Kompozit malzemeler elyaf oryantasyonunda ve şeklinde farklı kombinasyonlar gösterebilir yorulma çalışması bilhassa karmaşık ve zorludur.

Yorulma hatası öncelikle düşük şekil değiştirme değerleri ile karakterize edilen kırılgan malzemelerde meydana gelir. Bu yüzden matriks çatlaklarının oluşumundan önce hasarlanır. Yorulma hatası kompozit malzemelerde elyaf kırılması, elyaf – matriks ara yüzey hatası, delaminasyon ve matriksteki çatlak varlığı gibi değişik şekillerde alınabilir. Çatlaklar kompozit malzemelerdeki sertlik ve dayanımı azaltır. Çatlak şekli ve sayısı elyaf oryantasyonuna bağlıdır. Değişik elyaf oryantasyonu olan kompozit malzemelerde çatlaklar önce zayıf olan kısımlarda ortaya çıkar daha sonra güçlü olan

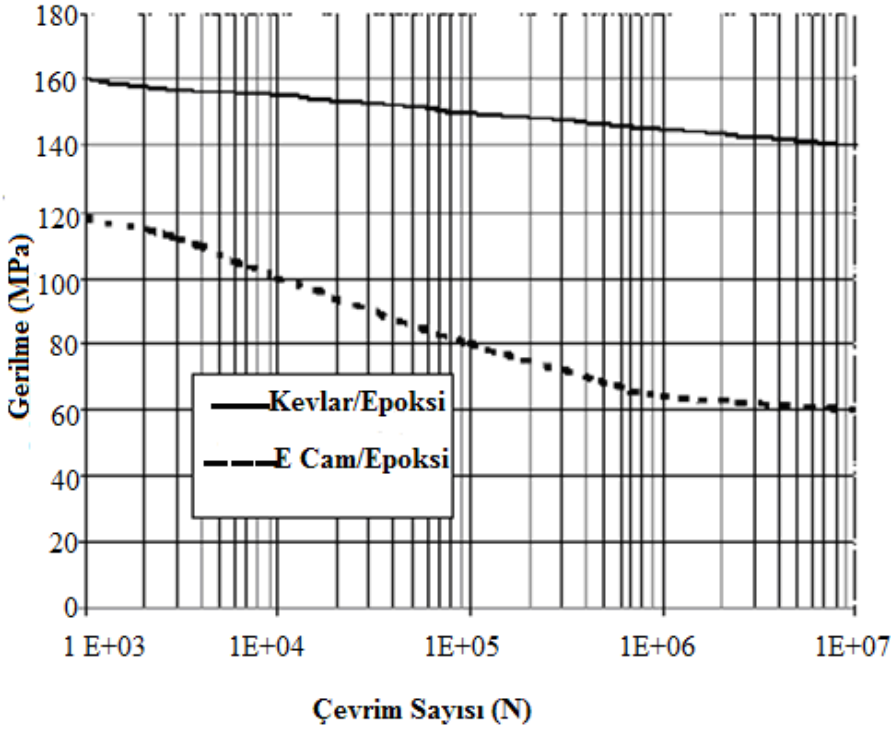
kısımlarda ortaya çıkar. Cam elyaflı kompozit malzemeler geniş bir geometri kullanışlılığına sahiptir. Fakat tabakalar cam elyafın çarpılması nedeniyle daha düşük sertlik ve statik mukavemet sunar. Başka bir neden ise elyaf yüzdesinin % 60-65'ten daha az olmasıdır.

3.4.2. Çevrim Sayısı Eğrileri

Bu diyagram, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı verir. S - N eğrisinin çizilmesi için genellikle birbirine benzer çok sayıda numune kullanılır. Ortalama gerilme (σ_m) tüm deneylerde sabit kalmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına veya kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olacağından, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Deneylerin tümünde gerilme genliği (σ_a) deney süresince sabit tutulur.

Gerilme ekseni olan ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu eksende ya azami gerilme (σ_{max}), ya asgari gerilme (σ_{min}) veya gerilme genliğinden (σ_a) biri kaydedilir. Çevrim sayısı ekseni olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır. Böylece test sonuçları, logaritmik skalada hasarın oluştuğu çevrime karşılık azami yorulma gerilmesi olarak grafiklenmiş olur. Bu eğri de S-N diyagramı ya da Wöhler diyagramı olarak adlandırılır.

S - N eğrileri 10^6 çevrimden sonra genellikle apsis eksenine asimptotik bir durum gösterirler. Bu durumu aşağıdaki şekilde verildiği gibi örneklemek mümkündür. Şekil 3.8.'deki örnekte bir cam elyaf ile epoksi matriksin meydana getirdiği bir kompozit malzemenin de göstermiş olduğu çevrim sayısına göre gerilme durumu ve yorulma sınırı görülmektedir.



Şekil 3.8. Örnek S-N diyagramı (Şahin 2000)

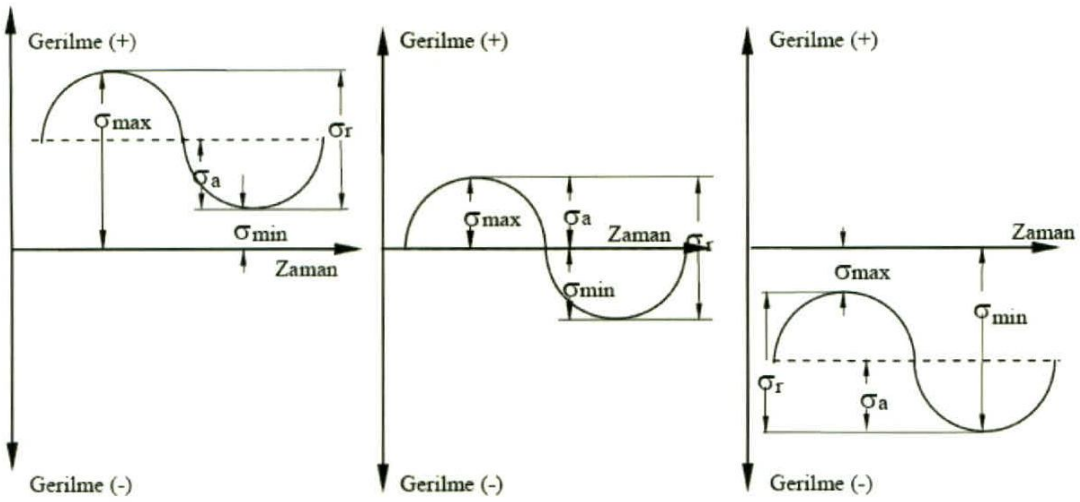
S-N grafiğinin eğimi veya matematiksel fonksiyonu, malzemenin yorulma direncinin bir ölçüsüdür ve yorulmayı temsil eden en genel yollardan birisidir. Grafik her malzeme için farklı bir durum gösterir. Ayrıca yorulma ömrü gerilmenin büyüklüğüne, gerilme oranına, yüklemenin durumuna ve çevre şartlarına göre değişiklik gösterir.

3.4.4. Yorulmanın Gelişimi

Bazı yapı elemanları üzerinde oluşan yüklerin belli zaman aralıklarında ve belli sürelerde uygulanmasıyla oluşan yüklere tekrarlı yükler, bunun sonucunda da oluşan gerilmelere tekrarlı gerilmeler denir. Tekrarlı yüklerin ve tekrarlı gerilmelerin olduğu durumlarda ise yorumla olayı meydana gelir. Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzemeye bir gerilme uygulanması, gerilmede değişimlerin meydana gelmesi ve plastik şekil değişiminin oluşması gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri oluşmazsa yorulma çatlağı başlamaz ve ilerlemez. Çatlağın ilerlemesi de gerilmenin etkisiyle olur.

Yorulma olayında gerilmenin basma veya çekme şeklinde etki etmesine göre üç tip çevrim bölgesi vardır. İlk bölgede kuvvetin en büyük gerilme değeri de en küçük gerilme değeri de negatif değer gösterir. Bu bölgeye negatif tekrar bölgesi denir. İkinci bölgede gerilme çekme ile basma arasında değişiklik gösterir. Burası alternatif bölge

olarak adlandırılır. Üçüncü bölgede ise kuvvetin en büyük gerilme değeri de en küçük gerilme değeri de pozitif değer gösterir. Bu bölgeye ise pozitif tekrar bölgesi denir. Bu bölgeler Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Tekrarlı gerilme-zaman eğrileri (Erkendirci 2006, Karcı 2009, Karacaer 2009)

Burada görülen en yüksek ve en düşük gerilme değerinden yararlanılarak gerilme aralığı (σ_r), gerilme genliği (σ_a), yorulma gerilme oranı (R) ve ortalama gerilme (σ_m) gibi parametreler bulunabilir.

$$\sigma_r = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (3.1.)$$

$$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min}) / 2 \quad (3.2.)$$

$$\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / 2 \quad (3.3.)$$

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} \quad (3.4.)$$

Yorulma gerilme oranı (R) değeri yorulmada yükleme biçiminin bir göstergesidir. Çizelge 3.5.'te yorulma yük biçimleri, yani R değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Yorulma yük biçimleri için R değerleri

Yorulma Yük Biçimi	Yorulma Yük Oranı
Statik Yük	R=1
Çekme – Yükünü Boşaltma	R=0
Çekme – Çekme	0<R<1
Çekme – Basma	R= -1
Çekme - Basma	-1<R<0

3.4.5. Kompozit Malzemelerde Yorulma Hasar Gelişimi

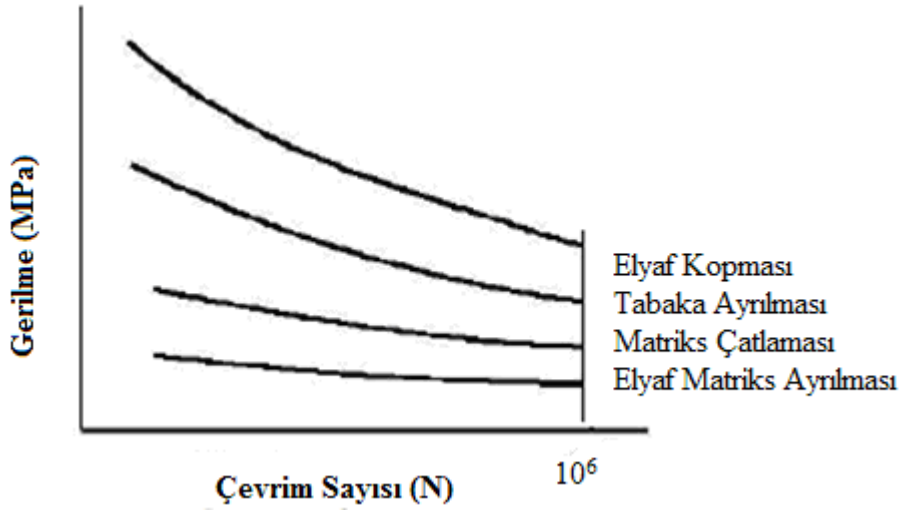
Tek yönlü ve tek tabakalı kompozit malzemelerde yorulma hasarı, elyaf kopması, matriks çatlaması ve elyaf – matriks ayrılması şeklinde üç aşamada meydana gelir. Elyafın kopması kendi mukavemeti ile ilgilidir. Matriks çatlağında ise; elyaflardan matriks malzemesine aktarılan şekil değiştirme miktarı önlenebilir. Elyaf – matriks ara yüzeyinde bağ, elyaf – matriks bağlanma dayanımının zayıflaması ile büyür ve ayrılma olayı gerçekleşir.

Çok tabakalı kompozit malzemelerdeki durum daha farklıdır. Burada hasar şekillerine ilave olarak yorulma gerilmesinin etkisiyle son hasardan hemen önce tabaka ayrılması adı verilen bir hasar aşaması daha meydana gelir.

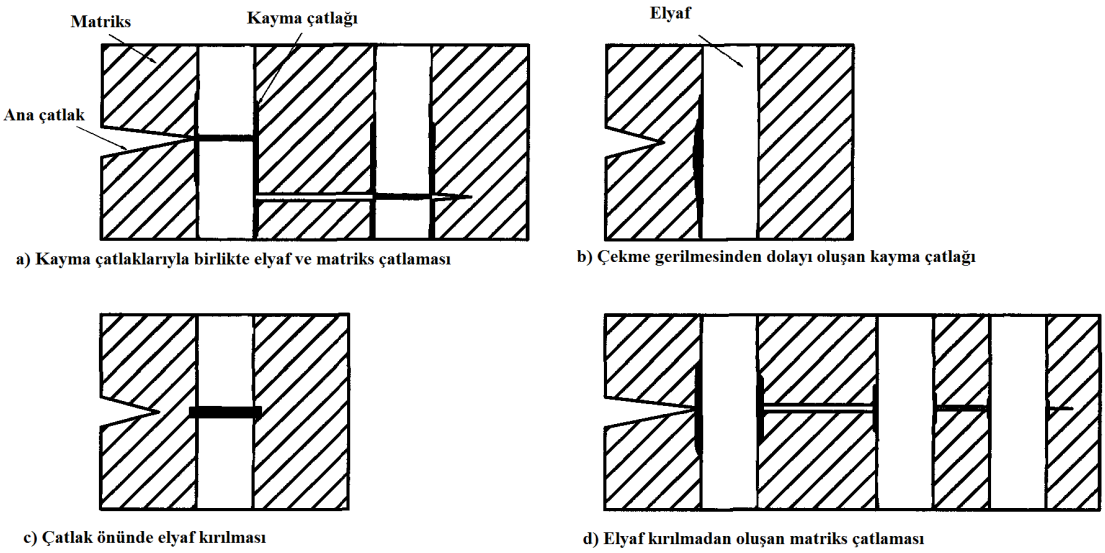
Yorulmaya bağlı olarak ilk önce elyaf-matriks ara yüzey ayrılması görülür. Daha sonra gerilmeyle birlikte matriks çatlakları düzlem içinde elyaf yönlenmesine dik olacak şekilde oluşur. Bu çatlaklar çoğunlukla epoksi reçineler gibi kırılgan matrikse sahip olan kompozitlerde meydana gelir, fakat eğer matriks metal matriksler gibi sünekse de görülebilir.

Malzemenin ilk imalatından kaynaklanan mikro kusurlar yorulma yükü ile birlikte sürekli olarak artar ve kusur hacimleri karakteristik bir boyuta ulaşır.

Diğer aşama delaminasyondur. Birincil çatlaklar katmanların ara yüz yakınında ikincil çatlak yayılmasından dolayı yayılır. İkincil çatlaklar genellikle birincillere dikey konumda olurlar ve çatlakların primer ekseni boyunca yönlenen gerilmeler yüzünden oluşur. Yüksek tabakalar arası gerilmeler tabaka içindeki delaminasyona neden olan tabakalar arası çatlakların oluşumuna sebep olur ki bu bölgede birincil çatlaklar da ikincil çatlaklar da vardır. Daha sonraki aşama da elyaf kırılmasıdır. Bunlar son hasarın nedenidir. Birçok durumda kırık liflerin üçte ikisinin toplam çevrim sayısının ilk kısımlarında söylenebilir. Bununla birlikte sonuç hasarı, kırılan elyaflar temel gerilmeler ile hizalandığı zaman meydana gelir ya da kayma etkisiyle oluşan çatlakların ilerlemesiyle birlikte elyafların ve matriks malzemesinin çatlaması ile oluşabilir. Hasar modelinin aşamaları malzeme ömrü içinde ayrı bir bölgeyi işgal etmez, buna rağmen matriksteki çatlakların şekillenmesi hasarın ilk aşamasını karakterize eder. İkinci aşamayı da delaminasyon karakterize eder. Tabakalı kompozit malzemenin ayrıntılı hasar aşamaları Şekil 3.10.'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Kompozit malzemelerde yorulma hasar şekli S-N grafiği (Şahin 2011)



Şekil 3.11. Kompozit malzemelerde yorulma sırasında oluşan hasar çeşitleri (Günaydın 2003)

3.5. Kırılma Mekaniği

Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma mekaniği malzemenin deformasyonunu ve kırılmasını inceler (Sorucu 2007). Kırılma olayı bir çatlağın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir.

Bir malzemenin yorulma ömrü çatlağın oluşumunu ve kritik boya kadar büyümesini sağlayan yük tekrar sayısı ile belirlenir. O halde tıpkı statik yükleme durumlarında olduğu gibi bir malzemenin yorulma ömrü;

- çatlak oluşumu
- çatlağın büyümesi
- kırılma safhalarından ibarettir.

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyarmadan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

Kırılma mekaniğinin ana öğesi yapı elemanlarında bulunan keskin çatlak ucundaki gerilme bölgesidir. Bu bölge gerilme şiddet faktörü adı verilen ve K ile gösterilen bir parametre ile ifade edilir. K çatlak geometrisine ve nominal gerilmeye bağlıdır. Bu sebeple çatlak ve gerilme konsantrasyonunu arttırıcı faktörler de kırılma mekaniği incelenirken göz önünde bulundurulmalıdır.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \tag{3.5.}$$

şeklinde ifade edilir.

Periyodik yükleme dolayısıyla σ_{max} ve σ_{min} arasındaki farkı $\Delta\sigma$ ile gösterip δ çatlağı eğrilik yarıçapı ise;

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta K}{\sqrt{\delta}} \tag{3.6.}$$

ifadesi bulunur.

Kırılma mekaniği bu bağıntıdan yola çıkarak ve bunu temel alarak çatlak başlangıcı için genel ifadeler bulmaya çalışır. Bunun için numuneler üzerinde değişken yarıçaplı yüzey çatlakları açılır. Yalnız boyları (l) sabit tutulur. Bu duruma göre çatlak derinliği l+δ olur. Yani değişken yüzey çatlağı derinlikleri elde edilmiş olur. Daha sonra numuneler periyodik yüklemeye tabi tutularak $\Delta\sigma$ değerinde ve kaç devir sayısı (N) sonunda çatlağın oluştuğu gözlenir. Sonuç olarak gerilme – yorulma ömrü grafiği elde edilmiş olur. Buna göre yüzey çatlağı yarıçapları küçüldükçe çatlak başlangıç ömrü kısalmaktadır. Daha sonra yüzey çatlağının durumuna göre ΔK değerleri bulunur. Burada önemli bir nokta çatlağın oluşabilmesi için ΔK'nın buna bağlı olarak da $\Delta\sigma$'nın belli bir kritik değeri aşması lazımdır. Bu kritik değer malzemeye ve malzeme-çatlak formuna göre değişmektedir (Uğuz 1996).

Çatlağın oluşmasına kadar ömür önemli bir şekilde malzemenin yüzey durumuna bağlıdır. Yüzeydeki hasarlar ve düzgünsüzlükler ömrü gerilme yığılması dolayısıyla azaltır. Çentiksiz, yüzeyi pürüzsüz malzemelerde ömür, malzemenin plastik

deformasyon kabiliyeti ile ilgilidir. Çünkü yükleme elastik bölgede kalsa bile mikro çatlaklar civarında gerilme yığılmaları dolayısıyla bu bölgelerdeki gerilme miktarı plastik bölgeye geçer. Neticede dislokasyonlar bu bölgelerde hareket ederek kayma bantları oluşturur. Bu bantlar yüzeye kadar çıkarak oralarda mikro çentikler oluşturup, gerilme yığılmalarının meydana gelmesine yani malzemenin ömrünün kısalmasına sebep olurlar. Daha sonra çatlak, devir sayısı başına angström mertebesinde büyürken ikinci safhada büyüme devir sayısı başına mikron mertebesine çıkar. Bu büyüme dalgalı şekil gösterir. Her bir dalga bir yük tekrarı ile oluşur. Kırılma mekaniği açısından en önemli husus çatlak büyümesinin ne zamana kadar kararlı olacağının hesaplanmasıdır. "a" boyunda çatlağa sahip bir malzeme periyodik yüklemeye zorlanırsa çatlağın zamanla büyüdüğü görülecektir. Bir yük tekrarı için çatlak boyundaki artış $\Delta a/\Delta N$ eğrilerinden hesaplanabilir.

Kompozit malzemelerin, kırılma ve hasar davranışlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Dinamik gerilme durumu mevcut olan makine elamanlarında yorulma olayı malzemelerde çatlaklar ve hasarların sürekli olarak gelişmesi, ilerlemesi ve malzemenin hasar görmesiyle sonuçlanır. Dolayısıyla çatlak boyutları ve ilerleme şekli bilinirse makine elemanı tasarım aşamasında iken hasarı önlenebilir.

Bir malzemenin kırılma tokluğu, malzemede çatlak mevcut iken yük taşıyabilme kapasitesi veya plastik olarak deforme olabilmesi diye tanımlanabilir. Kırılma tokluğu, düzlem gerilme şartlarında (K_Q), düzlem deformasyon şartlarında (K_C) kritik gerilme şiddet faktörü ile ifade edilebilir. Bu davranışlar, lineer elastik kırılma mekaniğinde geçerlidir. Elastik-plastik davranışlar için tokluk, J-integral, R-eğrisi ve çatlak ucu açılma miktarı (CTOD) cinsinden ifade edilir.

Kırılma mekaniği; lineer elastik kırılma mekaniği ve elastik-plastik kırılma mekaniği olarak iki kısımda incelenmelidir.

3.5.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Lineer elastik kırılma mekaniği gerilme bölgesinin büyüklüğünü, gerilmenin çatlak ucundaki dağılımını, çatlağın şeklini, boyutlarını ve oryantasyonunu ve malzeme özelliklerini temel teşkil eden analitik işlemlere dayanır (Akdemir 1992, Suresh 2004, Sorucu 2007).

Yapı elemanlarında gevrek kırılma nedeni olan birçok faktör vardır. Bu faktörler sıcaklık, tokluk, gerilme, dizayn ve yorulma gibi sıralanabilir.

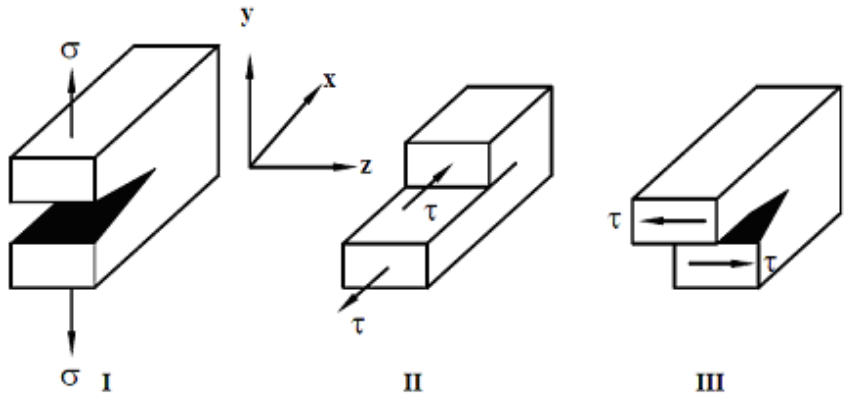
Tokluk, çatlaklı bir malzemenin yük taşıyabilme kapasitesi ya da plastik deformasyon olabilmesi diye tabir edilmektedir ve darbelere karşı mukavemeti arttırır. Malzeme tokluğu, düzlem gerilme şartlarında (K_C), düzlem deformasyon şartlarında (K_{IC}) kritik gerilme şiddet faktörü ile ifade edilir (Akdemir 1992) (Akkurt 1991).

Gevrek kırılmalar çeşitli cinsteki süreksizliklerden başlar. Bu süreksizlikler çok küçük çatlak veya hatalardan çok büyük yorulma çatlaklarına kadar değişebilir. Malzemede imalat aşamasından gelen veya yorulma deneyinde başlayan çok küçük çatlaklar servis sırasında kritik boyuta erişebilir.

Ayrıca gevrek kırılmanın olabilmesi için gerilme şarttır. Bu gerilme klasik gerilme analizleri ile tespit edilebilir.

Elastik cisimlerdeki yüzey çatlağının gerilme analiz metodunu kurmak için çatlak yüzeylerinin bağıl hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı açılma, kayma ve yırtılma diye adlandırılan üç tip halinde analiz edilebilir. Bir elemanda çatlak ilerleme davranışı bu üç tipten herhangi birisine benzeyebildiği gibi bunlardan ikisine ya da üçüne de benzeyebilir. Bunlardan I numara ile gösterilen mod açılma (çekme) modudur ve Mod I diye adlandırılır. En çok görülen ve diğer modlara göre daha kritik olan moddur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve dik olarak ayrılırlar. II numara ile gösterilen kayma modudur ve Mod II diye adlandırılır. Mod II x-z düzlemi ile simetrik, iki kırılma yüzeyi birbiri üzerinden ve ters yönde kayarlar. III numara ile gösterilen ise yırtılma (makaslama) modudur ve Mod III ile adlandırılır. Bu moda x-y ve x-z düzlemleri ters simetriktir ve çatlak bu düzlemlere göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirlerine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar.

Şekil 3.12.'de üç tip kırılma modu görülmektedir.



Şekil 3.12. Çatlak ilerleme modları (Akdemir 1992) (Er 2006) (ASM)

Lineer elastik kırılma mekaniğinin dayandığı esaslar şu şekilde sıralanabilir:

- Tüm malzemeler mikro çatlaklar içerir,

-Verilen bir yükleme durumu ve çatlak hali için gerilme şiddet faktörü K hesaplanabilir,
- Verilen bir malzeme için K belli bir kritik değeri aştığı zaman o malzemede hasar oluşabilir.

İzotropik malzemeler için çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin (1962) tarafından tespit edilmiştir. Her üç kırılma modu için K değerleri formül 3.7., 3.8. ve 3.9.'da verilmiştir.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.7.)$$

$$K_{II} = \tau_{II}\sqrt{\pi a} \quad (3.8.)$$

$$K_{III} = \tau_{III}\sqrt{\pi a} \quad (3.9.)$$

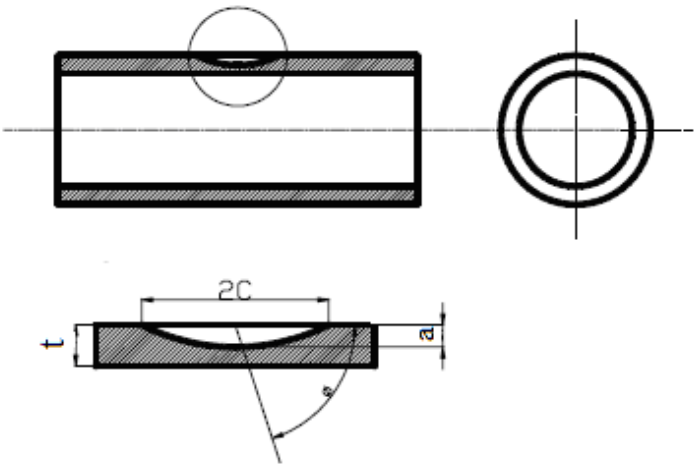
Kompozit malzemelerde yaşanan kırılma olayı izotropik malzemelerdekine göre daha karmaşıktır.

3.6. Eliptik Yüzey Çatlağının Analizi

Yüzey çatlağı birçok yapı elemanında bulunduğundan dolayı kırılma tokluğunun bulunması gerekmektedir. Yapılan araştırmalar üzerinde çeşitli şekillerde ve yapı elemanının çeşitli kısımlarında çatlak bulunan, çekme veya basma yükü altındaki izotropik levhalarda gerilme şiddet faktörlerini ortaya çıkarmıştır.

Yüzey çatlağından dolayı oluşan gerilme şiddet faktörü, levhanın kalınlığına, levhanın genişliğine, çatlağın derinliğine ve çatlağın uzunluğuna bağlı olduğu gibi, çatlağın kenarını süpüren merkez açısına da bağlıdır. Çatlak ilerlemesi, hem çatlak boyunca, hem de çatlak derinliği boyunca olmaktadır. Çekme yükü altında izotropik malzemelerde yarı eliptik bir çatlağın, ilerlemesi de yarı eliptik olarak kabul edilmektedir.

Boru numunesi üzerine açılmış olan yüzey çatlağının geometrisi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekil 3.13. üzerinde gösterilen açı yüzey çatlağı parametrik açısı olup çatlak merkezinden alınan bir doğrunun çatlak yüzeyinde süpürdüğü açı değeridir. Ayrıca yüzey çatlağının numune üzerinde açıldığı yer de görülmektedir.



Şekil 3.13. Yüzey çatlağı geometrisi

Newman ve Raju sonlu bir levhada yer alan yarı eliptik yüzey çatlaklı levha için deneysel gerilme şiddet faktörlerinin ifadesini aşağıdaki gibi vermiştir:

$$K_I = S\sqrt{\pi\frac{a}{Q}}F_s\left(\frac{a}{c},\frac{a}{t},\frac{c}{b},\phi\right) \tag{3.10.}$$

F_s, düzeltme faktörü olup *a/t*, *a/c*, *c/b* ve ϕ'nin fonksiyonudur. Q ise şekil faktörüdür, eliptik bir fonksiyondur ve değerleri şu şekilde izah edilmiştir:

- $0 \leq a/c \leq 2$
- $c/b \leq 0{,}5$ ve
- $0 \leq \phi \leq \pi$ değerleri için düzeltme faktörü aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$F_s = M.f_1f_2f_3 \tag{3.11.}$$

$$Q = 1 + 1{,}464(a/c)^{1.65} \tag{3.12.}$$

$$M = M_1 + M_2\left(a/t\right)^2 + M_3\left(a/t\right)^4 \tag{3.13.}$$

a/c≤1 değeri için değerler şu şekilde formüle edilir:

$$M_1 = 1{,}13 - 0{,}09(a/c) \tag{3.14.}$$

$$M_2 = \frac{0{,}89}{[0{,}2 + (a/c)]} - 0{,}54 \tag{3.15.}$$

$$M_3 = 0{,}5 - \frac{1}{[0{,}65 + (a/c)]} + 14(1 - a/c)^{24} \tag{3.16.}$$

$$f_1 = 1 + \left[0{,}1 + 0{,}35\left(a/t\right)^2\right](1 - \sin\emptyset)^2 \tag{3.17.}$$

$$f_2 = [(a/c)^2\cos^2\emptyset + \sin^2\emptyset]^{1/4} \tag{3.18.}$$

$$f_3 = \left[\sec\left(\pi c/2b\right)\sqrt{a/t}\right]^{1/2} \tag{3.19.}$$

Burada, f_2 fonksiyonu gömülmüş eliptik çatlak çözümünden alınan açısal bir fonksiyondur. f_3 ise sonlu genişlikteki levhalar için düzeltme faktörüdür.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında öncelikle filaman sarım metodu ile imal edilen nano takviyeli ve takviyesiz boru numunelerinin yüzdesel cam elyaf ve epoksi reçinesi oranını belirleyebilmek için yakma deneyleri yapıldı. Daha sonra eliptik yüzey çatlağı açılmış ve yüzey çatlağı açılmamış olan numunelerin serbest uçlu iç basınç statik deneyleri ve bu deneylerin sonuçlarına göre iç basınç altında yorulma ömrünü belirlemek amacıyla yorulma deneyleri gerçekleştirildi. Bu deneylerin yanı sıra çekme yükü altındaki boruların kırılma tokluğu değerlerinin belirlenebilmesi için halka çekme deneyleri gerçekleştirildi.

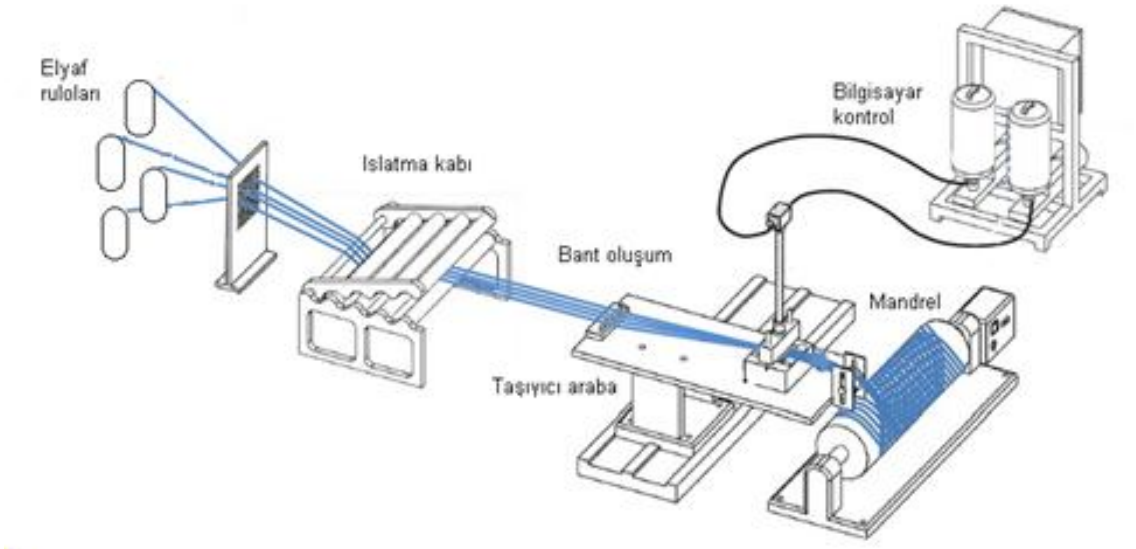
4.1. Deney Numunelerinin Üretilmesi

Filaman sarım nano takviyesiz CTP borular İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. Ve Tic. Ltd. Şti. tarafından imal edilmiştir. Karbon nanotüp takviyeli nano kompozit boruların üretimi yine aynı firma bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Filaman sarım CTP boruların imalinde elyaf olarak 17 mikron çapında Vetrotex 1200 teks E camı ve matriks malzemesi olarak orta viskoziteli Ciba Geigy Bisfenol A ve epiklorohidrinden üretilen Epikote 828 XA epoksi reçine kullanılmıştır. Yaklaşık olarak ağırlıkça % 44 oranında sertleştirici madde karıştırılmıştır. Kullanılan karbon nanotüplerin sertleştirici malzemeden etkilenmediği kabul edilmiştir. Sarım işlemine başlamadan önce bilgisayar desteğinden program girdileri yapılarak mandrelin dönüş hızını, elyaf taşıyıcı arabanın mandrel ekseni boyunca gidiş ve dönüş hızını dolayısıyla elyaf sarım açısını ve boru uç kısımlarında taşıyıcı kafasının dönüşü kontrol edilmektedir.

Daha sonra reçine, optimum sıcaklık aralığı değerlerinden olan 65 °C sıcaklığa getirilmiştir. Reçine sıcaklığı da yüksek sıcaklıklara getirilirse reçine viskozitesi aşırı derecede düşeceğinden elyaf demetlerini yeterli miktarda ıslatamayacak ve reçine elyaf demetleri üzerinden akıp gidecektir. Düşük sıcaklıklarda tutulması da reçinenin orijinal viskozitesini istenildiği ölçüde düşüremeyecektir ve elyaflar reçine banyosunun içinden geçirildikten sonra fazla reçinenin elyaf demetleri üzerine aşırı şekilde yapışmasına neden olacaktır. Bu durum da elyaf hacim oranını doğrudan etkileyecek bir parametredir.

Daha sonra 4 eksenli CNC filaman sarım makinesinde 1 m boyundaki 72 mm çapındaki mandrel ısıtılarak bir bez yardımıyla üzerine QZ-13 kalıp ayırıcı sürüldü.

Kalıp ayırıcısının bu şekilde sürülmesiyle borunun iç cidarlarında oluşması muhtemel pürüzlülük ve mandrel üzerine borunun yapışması durumu önlenmiş oldu. Her bir boru için baştan sonuna kadar tek bir sarım açısı seçilmiş ve bu açı değiştirilmemiştir. Dönen disk 65 °C' ye kadar ısıtılan reçinenin içinden geçerek reçineyi üzerinde bulunan başka bir disk ile arasına sıkıştırmış, elyaflar ise elyaf rulolarından çıkıp bir araya geldikten sonra bu iki dönen parça arasındaki kalan reçineni içerisinden geçerken ıslatılmıştır. Islatmanın gerektiği kadar olması için elyaf çekme hızı fazla tutulmamıştır. Elyafların ıslatılması bant haline getirilmeden yapılarak her bir elyafın daha iyi ıslanmasını sağlayarak elyaflar arası kuru bölgelerin kalması önlenmiştir. Aynı anda elyaf demetleri iki rulo arasında sıkıştırılarak sarıma elverişli hale getirilmektedir. Bu sayede sarım esnasında sarılan tabakanın bombeli görüntü oluşumunun önüne geçilmiş olur. Filaman sarım şematik gösterimi Şekil 4.1.'de görülmektedir.

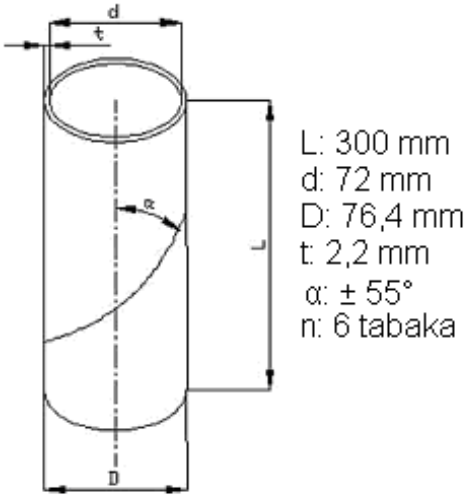


Şekil 4.1. Filaman sarım şematik gösterimi

Elyaf bant genişliği 5 elyaf rulosundan alınan elyafların yan yana getirilmesiyle 12 mm olacak şekilde ayarlandı. 600 mm/dk hızla yapılan sarım işlemi sonucunda 1 m boyunda, 72 mm iç çapa ve 55° sarım açısına sahip, ortalama 2,2 mm et kalınlığındaki numuneler elde edilmiş oldu.

Bu yöntemde gerçekleştirilen işlemler sonucunda elde edilen numuneler kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Kürleme işleminin amacı, sarım sonrasında mandrel ile birlikte kürleme fırınına konulan numunelerin ısıtılmak suretiyle katı hale geçirilmesidir. Kürleme işleminde numuneler fırın içerisinde reçinenin akmaması için

sürekli olarak döndürülmek suretiyle 3 saat 135 °C'de ardından 3 saat 150 °C'de tutulmuştur. Daha sonra borular çekme aparatları yardımıyla mandrellerden çıkarıldı ve kesme makinesi ile 300 mm boyunda kesilerek deney numunesi ölçülerine getirildi. Son hali verilen numune geometrisi Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Numune Geometrisi

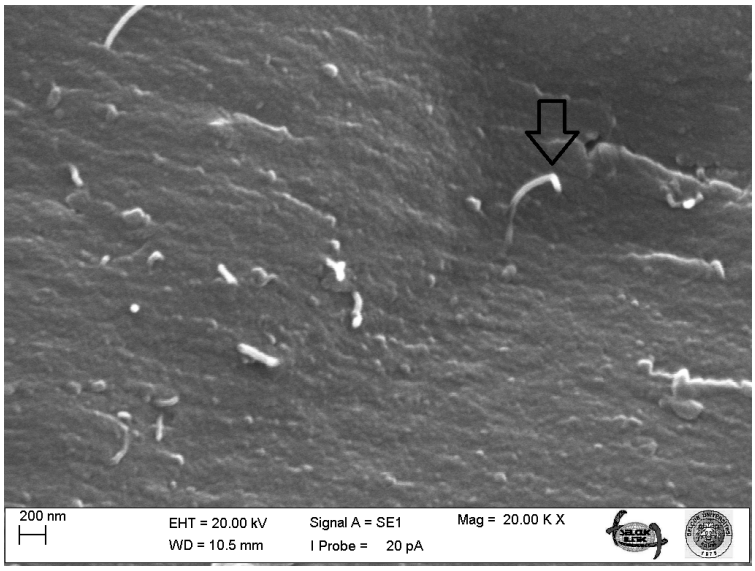
4.1.1. Nanokompozit boruların imalatı:

Nanokompozit CTP boruların imalatı nano takviyesiz CTP boruların imalatından farklı değildir. Fakat karbon nanotüplerin epoksi içerisine karıştırılması imalat prosesinin ilk kısımlarını değiştirmiştir.

Önceden ısıtılarak viskozitesi düşürülmüş olan reçinenin sıcaklığının düşmesi bir süre beklenmiştir. % 0,5 ve % 1 oranlarında önceden tartılan karbon nanotüpler reçine içerisine atılarak öncelikle mekanik olarak karıştırılmıştır. Daha sonra Bandelin HD 2200 marka ultrasonik homojenizatör kullanılarak % 65 güçte karbon nanotüplerin reçine içerisinde homojen bir şekilde karışması sağlandı. Cihazın karıştırma gücü, kullanılan uç seçimi ve karıştırma miktarı dikkate alınarak seçilmiştir. Daha yüksek güçte karıştırma karbon nanotüplerin boylarında kısalmalara, kırılmalara ve tüp şeklinin bozularak avantajının kaybolmasına neden olacağından yüksek güce ayarlanmamıştır.

Bunun yanı sıra düşük güçte karıştırma da kullanılan reçine gibi orta viskoziteli akışkanların 500 ml'den fazla olduğu durumlarda karbon nanotüplerin matriks içerisinde ilerletemeyerek homojen bir şekilde dağılmasına müsaade etmemektedir. Aynı nedenlerden dolayı karıştırma süresi de önem arz etmektedir. Bu nedenle karıştırma süresi daha önceki çalışmalar göz önünde bulundurularak 15 dakika olarak seçilmiştir (Taşyürek 2012, Taşyürek ve Sepet 2012). Çünkü daha uzun süreli

karıştırmalarda da yüksek güçte karıştırmalarda yaşanabileceği gibi ultrasonik ses dalgaları nanotüp boylarında kısalmalar meydana getirebilir. Bu da karbon nanotüplerin matriks malzemesine vereceği mukavemet artışını olumsuz etkileyecektir (Taşyürek 2012). CNT'lerin yüksek sonikasyon sürelerinde kırılarak hasara uğradıkları Gkikkas (2012) tarafından da benzer şekilde bildirilmiştir. Bu durumun bir örneği Şekil 4.3.'te ok ile gösterilmektedir.



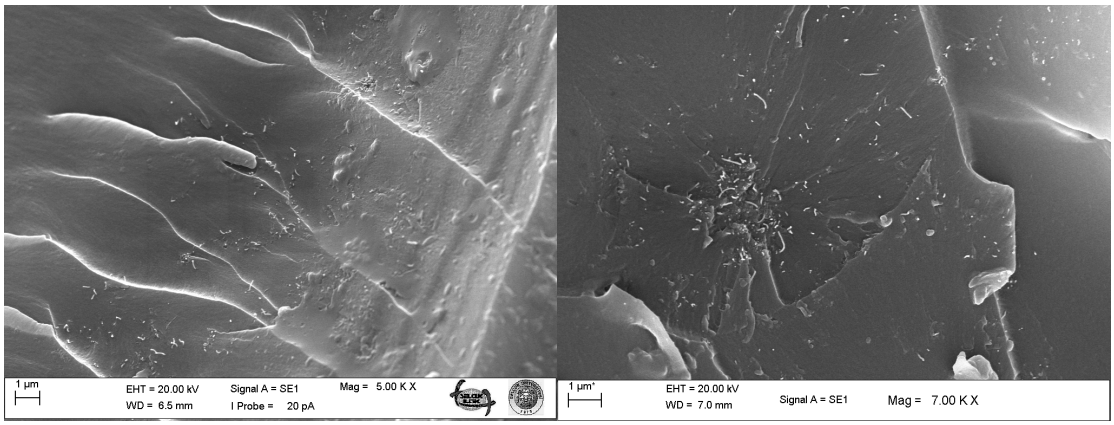
Şekil 4.3. Yüksek sürelerde (15 dk üzeri) karıştırılmış karbon nano tüplerin deformasyon hali

Nanokompozit CTP imalatında dikkat edilecek bir diğer husus da sarım sıcaklığıdır. Ultrasonik karıştırıcı karbon nanotüpleri epoksi içerisine dağıtırken sıcaklığı epoksiye geçerek onu da ısıtacaktır. Bundan dolayı karışım sonrası oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle epoksinin viskozitesi oldukça düşecektir. Bu durum, sarımda istenmeyen bir durumdur. Bu durumun önüne geçmek için homojen dağıtım sonrasında matriks sıcaklığı istenen seviyeye gelene kadar bir süre beklenmelidir. Sarım sonrasında kürleme ve kesme işlemleri kompozit numunelerinki ile aynıdır. Şekil 4.4.'te nanokompozit numunelerin sarım işlemi esnasındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.4. Nanokompozit numunelerin üretilmesi

Şekil 4.5. (a) ve (b) incelendiğinde orta kısımlarda bir toplanma hali düşünülse de tüm çerçeve içerisinde değerlendirildiğinde küçük beyaz noktalar ve çizgiler halinde görülen CNT'lerin durumu, epoksi matriks içerisindeki dağılımın homojen sayılabilir.



Şekil 4.5. (a), (b) Karbon nanotüplerin matriks içerisindeki homojen dağılımı

4.2. Yakma Deneyi:

Bu teknik reçine kütlesi olarak kabul edilen kürlenmiş polimer-matriks kompozitinin yakılması sonucu elyaf ve matriks oranlarının belirlenmesini sağlar. Yakma testi bu durumu ortaya çıkarmak için kullanılabileceği gibi elyaf hacim oranı gibi özellikleri belirleyebilmek için de kullanılabilir.

Tez kapsamında, yakma testleri ASTM D-2584'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu test metodu kürlenmiş takviyeli, reçineli bir numunenin yakılması sonucunda elyaf hacim oranını araştırmak için kullanılır. Yani matriks malzemeye takviye olarak kullanılan malzemenin hacimsel oranı belirlenmiş olur. Aynı zamanda yapısal şekil olan elyaf mimarisini incelemek için de kullanılabilir.

Teknikte belli bir ağırlığa sahip olan numune, belirli bir sıcaklığa kadar reçine matriks oksidize olana kadar ve uçucu maddelere dönüşene kadar ısıtılır. Arta kalan tüm küller uzaklaştırıldıktan sonra kalan elyaf tartılır ve kayıp yüzde hesap edilir. Elyaf yoğunluğu ve kompozit yoğunluğu elyaf hacim oranının hesap edilmesi için önemli unsurlardır. Eğer elyaf kazanımı ya da kaybı söz konusu olursa test şartları göz önünde bulundurulduğunda sonuçlar hatalı olacaktır.

Geçekleştirilen yakma deneyinde ±55º açı ile filaman sarım yapılmış tüm boru numunelerinden 50 mm genişliğinde üçer adet yakma numuneleri kesilmiş ve elektronik hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Daha sonra halka numunelerin iç çap, dış çap ve yükseklik değerlerinden hacmi hesaplanarak yoğunluk hesabı yapılmıştır. Daha sonra numuneler 600 °C'lik fırında 20°/dk'lık bir ısıtma hızı ile cam elyaflar reçinesiz kalana kadar yakılmıştır. Epoksi matriksin yakıldığı sıcaklıkta cam elyaf hiçbir fiziksel değişikliğe uğramamaktadır. Yakma sonrasında kalan elyafların ağırlığı tekrar tespit edildi. Ateş'e (2011) göre elyaf takviyeli polyester matriksli termoset kompozit malzeme için ideal elyaf hacim yüzdesi en büyük basma değerine sahip olduğundan dolayı diğer yüzdesel içerikli numunelere kıyaslandığında % 55 olarak belirlenmiştir.

Cam elyafın yoğunluğu ρ=2.6 g/cm^3 olarak alındı. Alınan tüm verilere göre elyaf hacim oranı;

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

formülü ile hesaplandı.

W_f: Elyaf ağırlığı (yakma sonundaki kalan ağırlık)

W_c: Kompozit numunenin ağırlığı (tartılan ilk ağırlık)

ρ_f: Elyaf yoğunluğu

ρ_c: Kompozit yoğunluğu

Elyaf hacim oranının hesap edilmesinin başka bir yöntemi ise şöyledir:

$$V_f = \frac{FAW.n}{t.\rho_f}.k \quad (4.2.)$$

V_f = Elyaf hacim oranı

FAW = elyaf alan ağırlığı (kattaki alan başına kütle)

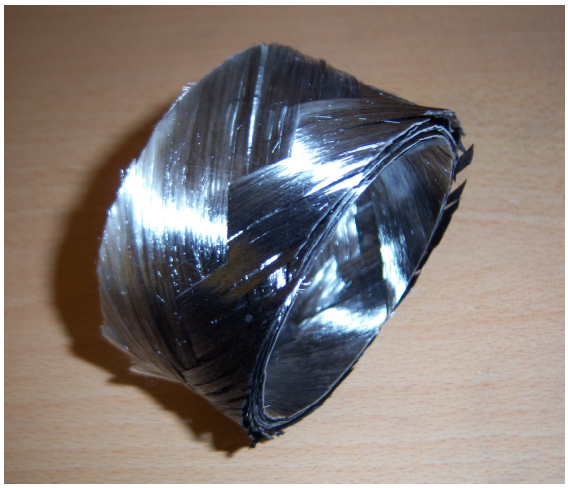
n = tabaka sayısı

t = numunenin ölçülen tabaka kalınlığı

ρ_f= takviye edilmiş elyafın yoğunluğu

k = gerekirse birim değiştirme faktörü

Yakma deneyi sonrasında numune görüntüleri Şekil 4.6. ve Şekil 4.7. (a)- (b)'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin yakma deneyi sonucunda elyaf hacim oranları nano takviyesiz olarak üretilen malzeme, % 0,5 ve % 1 karbon nanotüp takviye edilmiş nano kompozit malzeme için Denklem 4.1. kullanılarak sırasıyla 0,52, 0,53 ve 0,52 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6. Yakma deneyi sonunda nano takviyesiz deney numunesi



(a) (b)

Şekil 4.7. (a) (b) Yakma deneyi sonunda % 0,5 ve % 1 CNT'li deney numuneleri

4.3. Boşluk İçeriği:

Takviye edilmiş plastik malzemelerde ister istemez boşluklar meydana gelmektedir. Bir kompozit malzemede kesir veya yüzde olarak ifade edilen artan boşluk hacmi mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir. Yüksek boşluk içeriği genellikler düşük yorulma direncine, su geçirgenliğine daha fazla duyarlılık ve mukavemet özelliklerinde artan değişkenliğe neden olmaktadır. Bu nedenle kompozitin kalitesini tahmin edebilmek için boşluk içeriğinin bilinmesi istenmektedir. Kürlenmiş polimer matriks bileşikler arasındaki boşluklar görüntü analiz değerlendirme yoluyla elde edilebilir. Hacimsel boşluk içeriğini hesaplayabilmek için yoğunluk ve bileşen içerikleri verileri kullanılır. Görüntü analizi değerlendirme mikrografik yöntem ile elde edilir.

Bu test metodu takviye edilmiş kompozitlerin ya da plastiklerin boşluk içeriğini belirlemeyi kapsamaktadır. Test metodu malzemeler üzerinde tutuşma etkileri bilinen kompozitler için geçerlidir. Birçok plastik, cam ve kuvvetlendiriciler bu sınıfa girer. Tutuşma etkileri bilinmeyen malzemeler için kullanılamaz.

Testte öncelikle kompozit kuvvetlendirici ve reçine yoğunluğu bulunur. Daha sonra reçine içeriği teorik kompozit yoğunluğu hesaplanarak ölçülür. Ölçülen kompozit yoğunluğu ile karşılaştırılır. Yoğunluklardaki fark boşluk içeriğini vermektedir. İyi bir kompozit % 1'den daha az boşluk içeriği vermelidir. Fakat birçok durumda bu oran %5'e kadar kabul edilebilirdir.

Takviyeli plastik boşluk içeriği için test yöntemi ASTM D 2734, boşluk içeriğini belirlemek için kullanılan en yaygın test yöntemidir. Deney doğruluğunun ±% 0,5 olduğu tespit edilmiştir. Deneysel hatayı en aza indirmek için numunenin yeterli büyüklükte olması gerekmektedir.

Verilere göre kompozit malzemenin boşluk içeriği

$$V = 100(T_d - M_d)/T_d \qquad (4.3.)$$

formülü ile hesaplandı.

T_d= Teorik kompozit yoğunluğu

M_d= Ölçülen kompozit yoğunluğu

$$T_d = 100/(R_1/D_1 + r_1/d_1) \qquad (4.4.)$$

R_1= Kompozitteki reçine ağırlığı

D_1= Reçine yoğunluğu

r_1= Kompozitteki elyafın ağırlığı

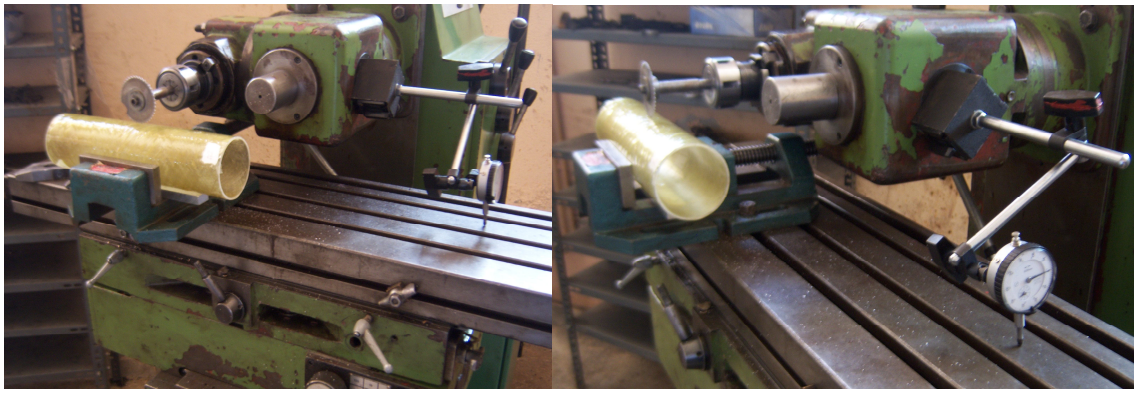
d_1= Elyafın yoğunluğu

ASTM D2734 numaralı takviyeli plastiklerin boşluk içeriği için standart test metoduna göre teorik yoğunluk hesaplanmış, test prosedürü metot C'ye göre ağırlık ve hacim ölçümlerinden faydalanılarak ölçülen yoğunluk hesaplanmış ve neticesinde numunelerde % 0,24 oranında boşluk miktarı belirlenmiştir.

Numunelerdeki muhtemel boşluklar sünekliği azaltıcı yönde etkiye sahiptir. Bu durum çekme uzamasının azalmasından anlaşılabilir (Loos 2012). Fakat bu delikler MWCNT takviyesiyle doldurulduğu için ara yüzey oluşturulması sebebiyle azaltılabilir (Tang 2011). Bu sayede süneklik arttırılabilir. Ayrıca numunede yer alan boşlukların karbon nanotüpler tarafından doldurulabildiği, bu sayede de kırılma tokluğunu arttırıcı yönde etkide bulunduğu söylenebilir. Bu ifade Yu (2008) tarafından da benzer şekilde bildirilmiştir.

4.4. Numunelere Yüzey Çatlağı Açılması:

Yüzey çatlağının açılması işlemi bir freze tezgâhında gerçekleştirildi. Freze mengenesine yatay eksene paralel olarak bağlanan boru numunesinin önceden belirlenmiş olan orta noktasına freze çakısı bağlanarak temas ettirildi. Bu konumda tezgâha bir saatli komparatör bağlanarak sıfırlama işlemi yapıldı. Düşey eksende hareket ettirilen tezgâhın mesafesi manometreden okunarak çatlak boyunun a/c=0,2 oranında sabit tutulması şartıyla a/t=0,25 ve a/t=0,50 oranlarında çatlak derinlikleri mesafesince yüzey çatlağı açılmış oldu. Açılan yüzey çatlakları bisturi ile çizilerek keskinleştirilmiştir. Yüzey çatlağının açılma işlemi Şekil 4.8. (a) ve (b)'de görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.8. (a) (b) Numunelere yüzey çatlağı açılma işlemi

4.5. Numunelerin Statik İç Basınç Testine Hazırlanması:

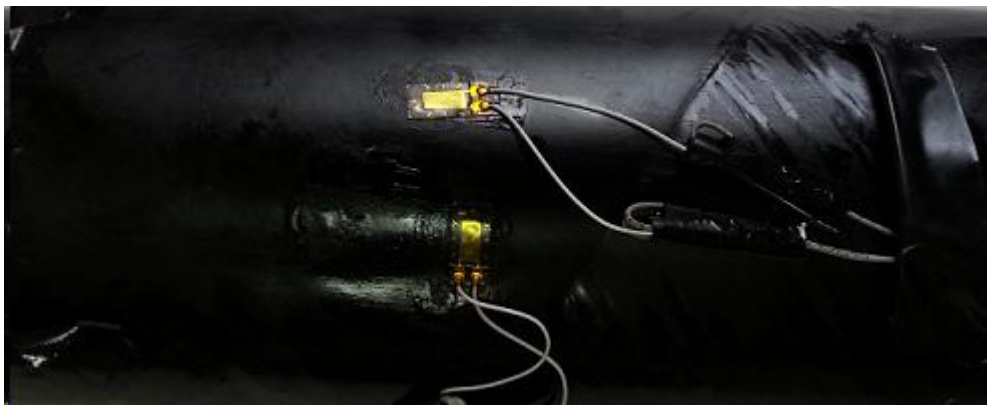
Statik iç basınç testi öncesinde numunenin ilk hali ile strain gauge yapıştırılacak kısmın zımparalanıp temizlenmiş durumu Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da görülmektedir. Daha sonra strain gaugelerin eksenel ve teğetsel doğrultuda yapıştırılma konumları ve yerleri Şekil 4.11.'de verildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 4.9. Numunenin ilk hali



Şekil 4.10. Numunenin zımparalanmış ve temizlenmiş hali



Şekil 4.11. Numunelere strain gaugelerin yapıştırılma şekilleri

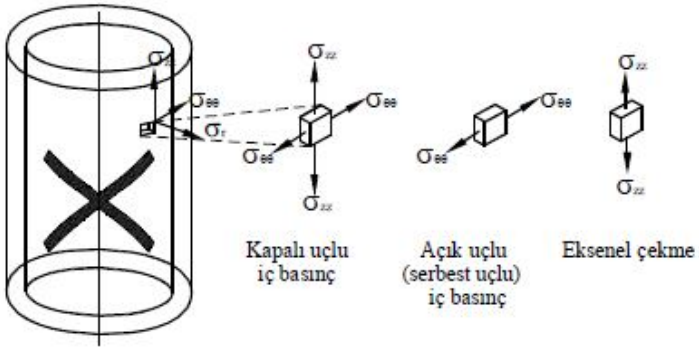
4.6. Serbest Uçlu Statik İç Basınç Testleri:

Şekil 4.12.'de ince cidarlı bir borunun üzerindeki sonsuz küçük bir dV hacim elemanına etki eden kuvvetler ve aynı borunun eksenel çekme, kapalı uçlu iç basınç ve açık uçlu iç basınç yükü altında olması halinde gerilme durumu şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde açık uçlu sistemlerdeki teğetsel gerilmenin yönü görülmektedir. Bu gerilme de Denklem 4.6.'da verildiği gibi hesaplanır.

$$\sigma_{zz} = Pd / 4t \quad (4.5.)$$

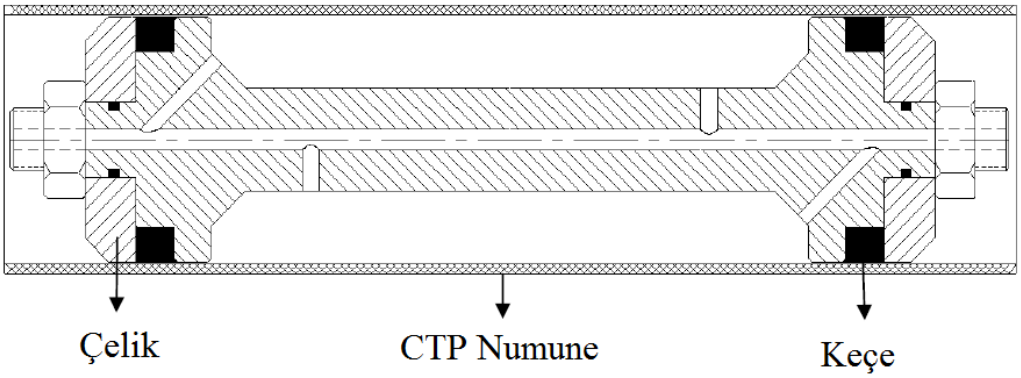
$$\sigma_{\Theta\Theta} = Pd / 2t \quad (4.6.)$$

Burada σ_{zz} eksenel gerilme $\sigma_{\Theta\Theta}$ ise teğetsel gerilmeyi belirtirken t et kalınlığını, d boru çapını p ise boruya uygulanan iç basıncı göstermektedir.



Şekil 4.12. İç basınca maruz kalan ince cidarlı borudaki gerilmeler (Samancı 2004)

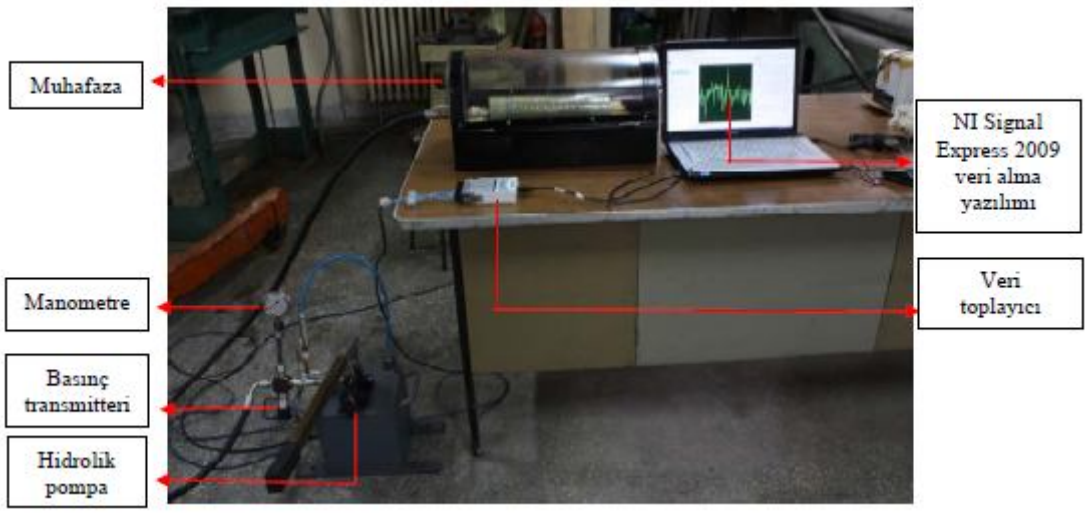
Şekil 4.13'te serbest uçlu iç basınç test aparatı ve Şekil 4.14.'te ise muhafaza kabini içine yerleştirilen numune görülmektedir. Şekil 4.15.'da ise test düzeneği görülmektedir. Statik iç basınç deneylerinde numune içine hidrolik pompa ile basınç yüklemesi yapılmıştır. Basınç yüklemesi lineer bir şekilde yaklaşık 1 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında bir manometre yardımıyla basınç artışı kontrol edilmiştir. Düzenekteki basınç sensörü basınç değişimine göre gerilim üretmektedir. Bu gerilim NI Signal Express yazılımına iletilmiş ve basıncın zamana göre değişim grafiği elde edilmiştir.



Şekil 4.13. Serbest uçlu iç basınç test aparatı (Şahin 2011)



Şekil 4.14. İç basınç test aparatı yerleştirilmiş deney numunesi ve muhafaza kabini (Kara 2012)



Şekil 4.15. Serbest uçlu iç basınç deney seti (Kara 2012)

Çizelge 4.1.'de ASTM D 1599'a göre yapılan serbest uçlu CTP boruların statik iç basınç deney sonuçları ve malzeme sabitleri verilmiştir. Son hasar basıncına ait teğetsel hasar gerilmesi Denklem 4.6. yardımıyla elde edilmiştir. Elastiklik modülünde görülen yüzdesel artış % 0,5 ve % 1 CNT takviye edilmiş numuneler için Tang'ın (2011) yaptığı çalışma ile benzerlik göstermektedir.

Çizelge 4.1. Serbest uçlu CTP ve CNT takviyeli CTP boruların iç basınç deney sonuçları

Karbon Nano Tüp Takviyesi (%)	0	0,5	1
Teğetsel Hasar Gerilmesi (MPa)	489	516,8	534,64
Lineersizliğin Başladığı Teğetsel Gerilme	327	342,3	358,6
Poisson Oranı	0,89	0,901	0,883
Elastisite Modülü (GPa)	10,21	10,24	11,80

4.6.1. Nano takviyesiz CTP boruların statik iç basınç deneyi

±55° sarım açılı CTP boruların statik iç basınç deneyinde iç baıncın etkisiyle boru çapında şişme ve boru boyundaki kısalmanın etkisiyle ± yönde sarılan elyaf demetleri teğetsel doğrultuya yönelmişlerdir. Sonucunda da elyafa dik olan çekme gerilmeleri ile elyafa paralel olan kayma gerilmelerini oluşmuştur. Bu gerilmeler neticesinde mikro matriks malzemede mikro çatlaklar oluşmaya başlamış bu da ilk hasar belirtisi olarak yaklaşık 327 MPa teğetsel gerilme değerinde görülen elyaf matriks ayrılmasını meydana getirmiştir. Bu hasar aşaması ince beyaz çizgilerin oluşmaya başlaması ile fark edilmiştir. Basıncın arttırılmasıyla birlikte bu çizgilerin sayısında da artış görülebilir. Beyazlaşmanın ardından tek tek elyaf kopmaları gerçekleşirken çıkarmış oldukları sesler sayesinde anlaşılmıştır. Patlama anına yaklaştıkça elyaf kopmalarının seslerinin sayısında da artışlar meydana gelmiştir.

489 MPa teğetsel gerilme değerinde yoğun beyazlaşmanın olduğu kısımdan şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Yüzey çatlaklı ve çatlaksız CTP numunelerinin hiçbirinde sızıntı oluşumuna ve su jetine rastlanmamıştır. Sonuç hasarı Şekil 4.16.'da görülmektedir.



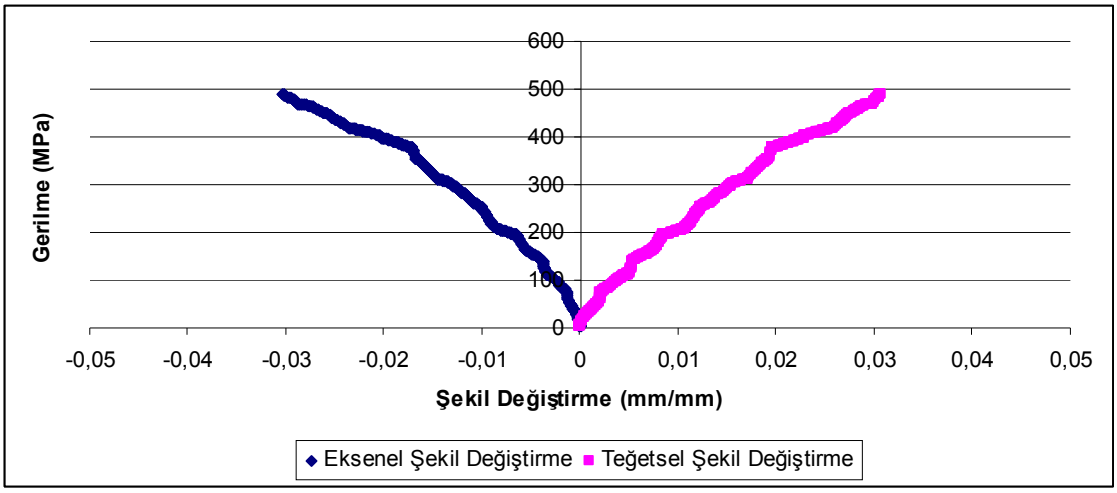
Şekil 4.16. Yüzey çatlaksız CTP numunenin serbest uçlu iç basınç testi numune sonuç hasarı

Açılan yüzey çatlağı ile çatlak bölgesindeki tabaka sayısında azalma meydana gelmiş, bu azalma ile boru numuneleri daha ince cidarlı olarak iç basınca maruz kalmışlardır. Bu da patlama basıncının düşmesine neden olmuştur. Test esnasında ve test sonucunda elde edilen özellikler Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Nano takviyesiz numunelerin iç basınç testi sonuçları

Özellik/yüzey çatlağı derinlik oranı	0	0,25	0,50
İlk beyazlaşma (MPa)	327	327	302
Yoğun beyazlık (MPa)	415	407	391
Patlama (MPa)	489	481	471

Yüzey çatlağı açılmayan numuneler için deney boyunca kaydedilen zaman, basınç, teğetsel gerinim ve eksenel gerinim değerleri yardımıyla teğetsel gerilme ile teğetsel ve eksenel gerinim grafiği Şekil 4.17.'deki görüldüğü gibi çizilmiştir. Şekil 4.17.'deki Şekil 4.18.'deki ve Şekil 4.19.'daki verilere göre bulunan malzeme sabitleri Çigzelge 4.1.'de verilmiştir. Elde edilen patlama basıncı değeri yorulma testlerinde teğetsel yorulma gerilmesi değerlerinin oluşturulmasında kullanılacaktır.



Şekil 4.17. Nano takviyesiz CTP numunelerin gerilme – şekil değiştirme grafiği

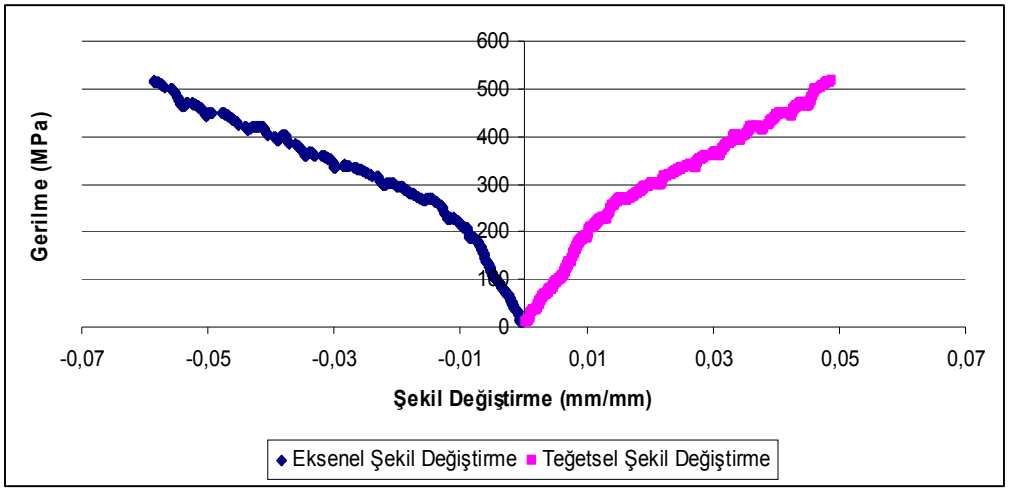
4.6.2. % 0,5 CNT'li CTP boruların statik iç basınç deneyi

±55° sarım açılı ağırlıkça % 0,5 karbon nanotüp ilaveli cam takviyeli plastik boruların statik iç basınç deneyinde ilk hasar belirtisi olarak yaklaşık 342 MPa teğetsel gerilme değerinde nadiren görülen elyafa paralel ince beyaz çizgilerin oluşmaya başlamasıdır. Matriks çatlama sesleri ise bu gerilme değerinden hemen önce yaklaşık olarak 325 MPa değerinde duyulmaya başlamıştır. 20-30 barlık basınç artışını takiben boru merkezinde şişme görülmeye başlanmıştır. Bu şişme görüntüsü yüzey çatlaklı borularda çatlak etrafında gözlemlenmiştir.

Yaklaşık olarak 517 MPa teğetsel gerilme değerinde yoğun beyazlaşmanın olduğu kısımdan şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Hasar yüzey çatlağı açılmış olan numunelerde çatlak bölgesinde meydana gelmiştir. Yüzey çatlağı etkisi patlama değerini daha düşük gerilme değerlerine çekmiştir. Patlama sonuç hasarı şekil olarak elyaf sarım açılarına paralellik göstermiştir. Test esnasında ve test sonucunda elde edilen özellikler Çizelge 4.3.'te verilmiştir. İç basınç testi sonucu elde edilen grafik Şekil 4.18.'de görülmektedir. CNT takviyeli yüzey çatlaklı ya da çatlaksız numuneler takviyesiz CTP numuneler ile kendi aralarında değerlendirildiklerinde patlama mukavemetinde artış olduğu görülmektedir.Karbon nanotüplerin matriks malzemesine homojen dağıtılması ile çok sayıda ara yüzey oluşturması kompozit malzemenin mukavemetinin artmasına neden olmuştur.

Çizelge 4.3. % 0,5 CNT takviyeli CTP numunelerin iç basınç testi sonuçları

Özellik/yüzey çatlağı derinlik oranı	0	0,25	0,50
İlk beyazlaşma (MPa)	342	326	310
Yoğun beyazlık (MPa)	424	407	375
Patlama (MPa)	516,8	500	469



Şekil 4.18. % 0,5 CNT'li CTP numunelerin gerilme – şekil değiştirme grafiği

4.6.3. % 1 CNT'li CTP boruların statik iç basınç deneyi

±55° sarım açılı ağırlıkça % 1 karbon nanotüp ilaveli cam takviyeli plastik boruların statik iç basınç deneyinde ilk hasar belirtisi olarak yaklaşık 359 MPa teğetsel gerilme değerinde nadiren görülen sarım açısı doğrultusunda ince beyaz çizgilerin oluşmaya başlamasıdır. Matriks çatlama sesleri ise bu gerilme değerinden hemen önce yaklaşık olarak 330 MPa değerinde duyulmaya başlamıştır. 20-30 barlık basınç artışını takiben borunun orta kısımlarında şişme görülmüştür. Şişme boyda kısalmaya çapta ise genişlemeye neden olmuştur. Bu şişme görüntüsü borularda açılan yüzey çatlağı etrafında gözlemlenmiştir.

Basıncın arttırılmasıyla birlikte boru şeklindeki değişiklik elyaflar üzerinde gerilmelere sebebiyet vermiş ve elyafları kopmaya zorlamıştır. Elyafların tek tek kopmaya başlaması henüz kopmamış elyafların üzerine düşen birim gerilmeyi arttırmış ve onları daha fazla kopmaya zorlamıştır.

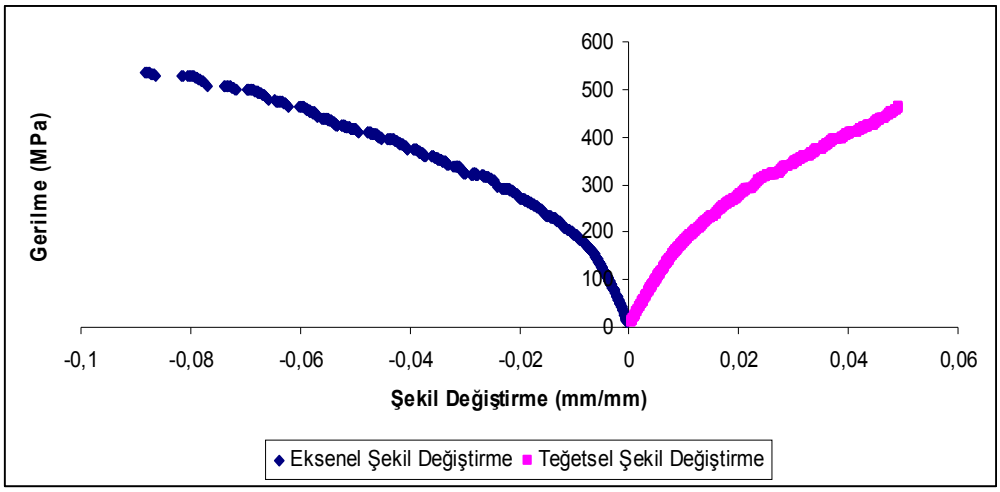
Yaklaşık olarak 534 MPa teğetsel gerilme değerinde yoğun beyazlaşmanın olduğu kısımdan şiddetli bir patlama ile sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Patlama yüzey çatlağı açılmış olan numunelerde çatlak bölgesinden meydana gelmiştir. Yüzey çatlağı etkisi diğer numunelerdeki gibi patlama değerini düşürmüştür. Patlama 110°'lik bir açı

yapacak şekilde yani sarım açısı doğrultusunda ± yönde sarım yapılan elyafların tümüne paralellik oluşturacak şekilde meydana gelmiştir. Test esnasında ve test sonucunda elde edilen özellikler Çizelge 4.4.'te verilmiştir. İç basınç testi sonucu elde edilen grafik Şekil 4.19.'da görülmektedir. % 0,5 CNT takviyeli numunelerde görülen mukavemet artışı % 1 CNT takviyeli numunelerde daha da yüksek değerlerdedir.

Karbon nanotüpler matriks malzemeye takviye edildiklerinde hem süneklik kazandırarak daha çok şekil değiştirme göstermesini sağlamış hem de oluşturdukları sayısız ara yüzey bağlarıyla mukavemetartışına neden olmuşlardır. Yüzey çatlağının takviyesiz numunelerde vermiş olduğu etki CNT takviyeli numuneler için de geçerlidir.

Çizelge 4.4. % 1 CNT takviyeli CTP numunelerin iç basınç testi sonuçları

Özellik/yüzey çatlağı derinlik oranı	0	0,25	0,50
İlk beyazlaşma (MPa)	358	350	326
Yoğun beyazlık (MPa)	440	415	391
Patlama (MPa)	534	515	482



Şekil 4.19. % 1 CNT'li CTP numunelerin gerilme – şekil değiştirme grafiği

4.7. Halka Çekme Testi

ASTM D 2290 Split disk test metodu ile filaman sarım takviyeli nano takviyeli ve takviyesiz kompozit boru numuneleri test edilmiştir. CTP boruların teğetsel yöndeki malzeme özelliklerini belirlemek için kullanılan metotlardan birisi halka çekme deneyidir. Halka çekme deneylerinin uygulanmasıyla maksimum gerilme için K_Q değerleri tespit edilebilir. Bu değerlere karşılık Newman-Raju bağıntısındaki σ_N teorik olarak hesaplanabilir. Hesaplamalar sonucunda σ_N-a/t grafikleri çizilebilir. Deneysel olarak bulunan σ_N-a/t grafikleri ile karşılaştırıldığında ise Newman-Raju bağıntısı ile

deneysel çatlaklı mukavemet değişimi karşılaştırılarak bu bağıntının filaman sarım CTP ve CNT takviyeli CTP borulardaki uygunluğu araştırılmış olacaktır.

Testte test makinesi çenesinin çekme hızı, nem, sıcaklık ve ön uygulama gibi şartlar dikkate alınmıştır. Sıcaklık; standart laboratuar atmosfer sıcaklığı olan 23° C ± 2° C, nem; %50 ± 5'dir. Test hızı asgari 0,1 inç/dk'dır. Test ±55° sarım açılı CTP ve nanokompozit CTP borularda gerçekleştirilmiştir. Her numuneden gerekli ortalamayı elde edebilmek için üçer numune test edilmiş ve ortalaması baz alınmıştır. Ayrıca testin uygulanması eğilme momentinin etkisi minimize edilerek dizayn edilmiştir. Bunun uygulanması için özellikle tespit pimlerinin ısıl sertleştirilmeden geçirilmiştir. Zira test aparatında meydana gelebilecek herhangi bir şekil değişimi alınacak grafiğin yanlış çizilmesine ve sonuçların hatalı olmasına yol açabilir (ASTM D 2290, Erdiller 2004).

Gerilme değerinin hesaplanması aşağıda verilen formül ile gerçekleştirilir:

$$\sigma_a = P_b/2A_m \qquad (4.7.)$$

σ_a = Numunenin azami çekme gerilmesi değeri (MPa)

P_b = Numunenin azami kırıldığı yük (N)

A_m = Azaltılmış bölümdeki iki ölçü. $d_1.b_1 + d_2.b_2$

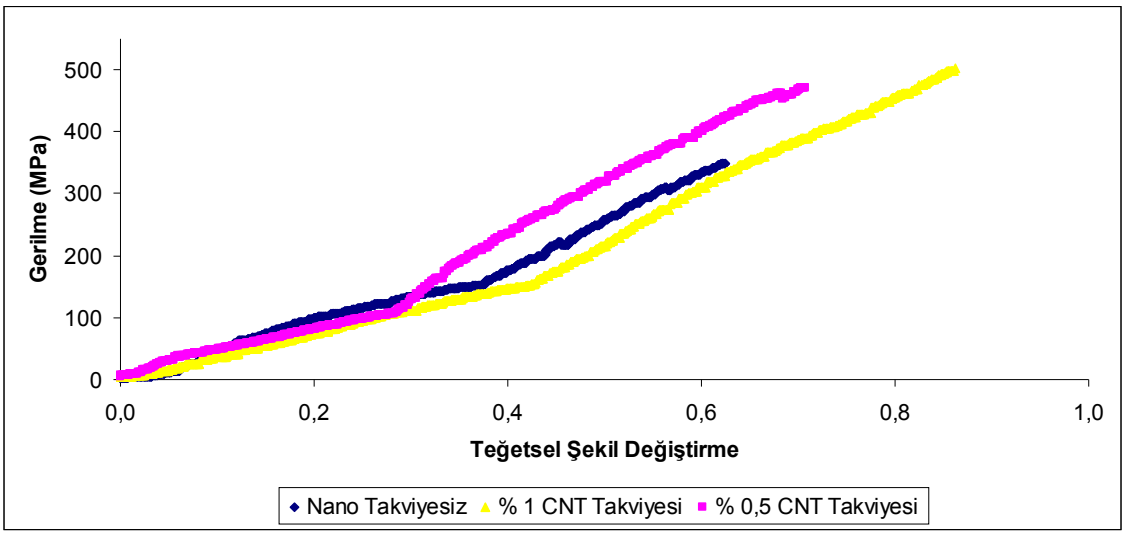
d_1 = Azaltılmış bölümdeki numune kalınlığı

b_1 = Azaltılmış bölümdeki numune genişliği

d_2 = Azaltılmış bölümdeki diğer taraftaki numune kalınlığı

b_2 = = Azaltılmış bölümdeki diğer taraftaki numune genişliği

Test sonucunda elde edilen özellikler Çizelge 4.5.'te gerilme-şekil değiştirme grafiği ise Şekil 4.20.'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Halka çekme gerilme şekil değiştirme grafikleri

Çizelge 4.5. Halka çekme deneyi sonuçları

	Maksimum Kuvvet (N)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Uzaması (mm)	Kopma Uzaması (%)	Gerilme (N/mm^2)
Nano takviyesiz	16936	88	6,9	64,0	347,6
% 0,5 CNT	22899	98	9,1	85,0	470,0
% 1 CNT	24448	108	11,0	102,6	501,8

Karbon nanotüp takviyesi sünekliği arttırdığı için teğetsel halka çekme testinde elde edilen kopma uzaması yüzdesinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca maksimum kuvvette de etkisini göstermiştir. Numune testlerinde elyafların kopma ile hasar uğramasına kadar duyulabilir ve gözle görülebilir bir hasar gözlemlenmemiştir.

İç basınç testi sonuçları ile bulunan malzeme sabitleri bu testte aynı şekilde tespit edilememiştir. Ayrıca iç basınç testlerine göre halka çekme teğetsel gerilme sonuçları daha düşük değerler göstermiştir. Bu testlerde sonuçlar arasındaki meydana gelebilecek farkın sebebi kenar etkisidir (Tarakçıoğlu 1992). Halka çekme testi numunelerinin boyları iç basınç testi numunelerinkinden daha kısa olduğu için kenar kısımlarındaki elyaf uçları çekme etkisi ile daha kolay sıyrılabilmekte ve gerilme sınırlarını düşürebilmektedir. Bu etkiler dikkate alınarak halka çekme testi sonuçlarından gerilme ve uzama değerleri verilmiştir.

4.8. Teorik Çatlaklı Mukavemet Değerlerinin Hesap Edilmesi

İzotropik malzemelerde yüzey çatlağı probleminin lineer elastik teorik çözümü üzerinde Newman ve Raju (1983) tarafından ortaya çıkarılmıştır. Yüzey çatlağı açılmış olan kompozit malzemelerin gerilme şiddet faktörünü veren bir bağıntı tespit edilemediğinden dolayı bu bağıntılar kullanılmıştır. Deneysel olarak bulunan çatlaklı mukavemet değerleri, Newman – Raju (4.9.) bağıntısı ile hesaplanan teorik çatlaklı mukavemet değerleri ile karşılaştırılmıştır. Benzer uygulamalar Smith ve Kirby, Yingzhi, Tarakçıoğlu, Tan ve ark., tarafından da gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda farklı şekillerdeki yüzey çatlaklarına sahip numunelerin çatlaklı mukavemet değerleri araştırılmıştır. Ansari ve ark. (2010), iç basınç altında radyal ve teğetsel yöndeki uzamanın tabakalar arasında farklılık gösterdiğini belirtmiştir.

Bu çalışmada benzer tarzda imal edilmiş ve benzer ölçülere sahip farklı içeriklerdeki CTP borular üzerine eksenel doğrultuda merkez çatlakları açıldı. K_Q

değerlerinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla eksenel yönde çatlaklı halka çekme numuneleri hazırlandı. Bu numunelere çekme deneyleri uygulanarak

$$K_Q=S(\pi a/Q)^{1/2}F \quad (4.8.)$$

formülündeki verilere ve elde edilen maksimum gerilme için K_Q değerleri literatür desteği alınarak tespit edilmiştir (Akdemir ve ark. 2000). Buna göre maksimum gerilme için K_Q değerleri nano takviyesiz olarak üretilmiş CTP numunelerde 31,98 MPa $m^{1/2}$, % 0,5 CNT takviyeli CTP numunelerde 43,24 MPa $m^{1/2}$ ve % 1 CNT takviyeli CTP numunelerde 46,16 MPa $m^{1/2}$ olarak tespit edilmiştir. Uygulanan yönteme alternatif olarak Pyo ve ark. (2010) tarafından basma testi ile tespit edilmiştir.

CNT'ler epoksi matriks içerisine homojen bir şekilde dağıtıldığında çatlak ucunda ikincil çatlaklar oluşturarak veya çatlak köprülenmesi ile tabakalar arası kırılma tokluğunun artmasına neden olurlar (Eskizeybek 2012, Gojny ve ark., 2005).

$F(\pi a/Q)^{1/2}$ ifadesi a/c, a/t, c/2b ve Φ değişkenlerine bağlı olduğundan dolayı bu değerlere karşılık gelen Newman-Raju bağıntısındaki çatlaklı mukavemet değeri;

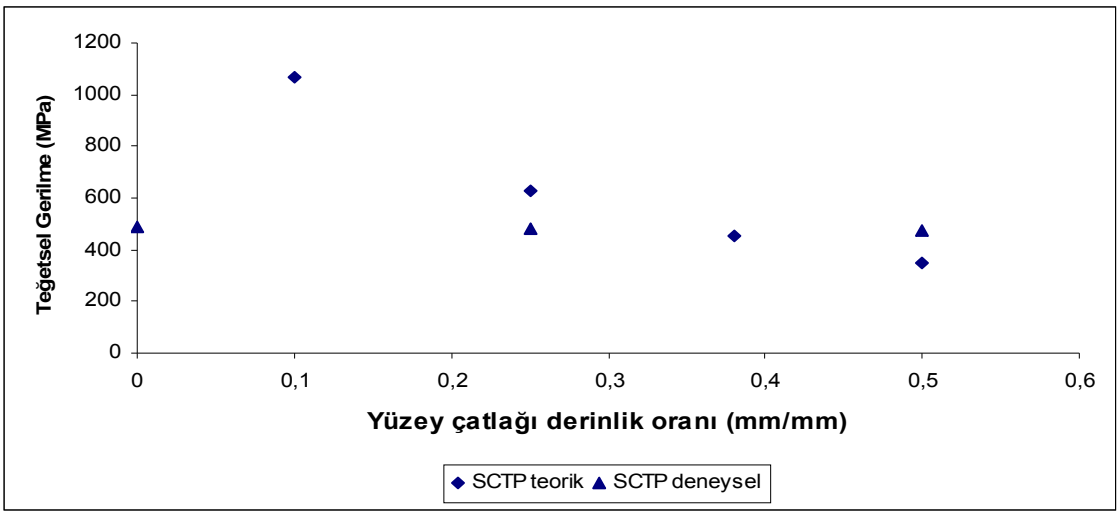
$$\sigma_N = \frac{K_Q}{F\sqrt{\frac{\pi a}{Q}}} \quad (4.9.)$$

formülü ile teorik olarak hesaplanmıştır. Bu sayede deneysel ve teorik grafik değerleri arasındaki ilişki ortaya çıkarılabilir. Bu verilere bağlı olarak σ_N- *a/t* değişim grafiği de çizilebilir. Bunun yanı sıra deneysel olarak elde edilen σ_N- *a/t* değişim grafiği teorik bağıntı mukavemet değişimi karşılaştırılarak filaman sarım işlemi ile imal edilen kompozit ve nanokompozit CTP borulardaki uygunluğu ortaya çıkarılabilir.

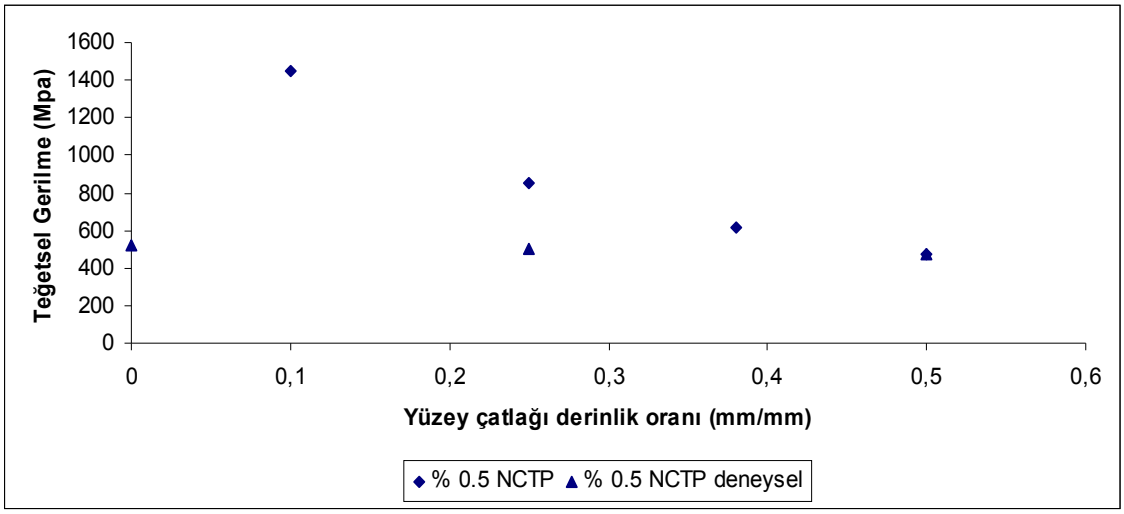
İzotropik malzemeler için uygulanan Newman-Raju bağıntılarından hesaplanan teorik çatlaklı mukavemet değeri ile statik iç basınç patlama testi ile deneysel olarak ölçülen yüzey çatlaklı numunelerin mukavemet değerleri karşılaştırıldıklarında kısmi bir yakınlık gözlenmiştir. Şekil 4.21., Şekil 4.22. ve Şekil 4.23. incelendiğinde yüzey çatlağı mukavemet değerini önemli oranda etkilediği görülmektedir. Yüzey çatlağı etkisi ile mukavemet değeri düşmektedir. Teorik ve deneysel sonuçların grafiklerinin eğimleri kısmi bir paralellik göstermektedir. Yüzey çatlağının derinliği azaldıkça deneysel veriler ile teorik hesaplama verileri arasındaki fark açılmakta ve gözlemlenen yakınlık durumu ortadan kalkmaktadır. Bu durum hem kompozit hem de nanokompozit CTP boru numuneleri için geçerlidir. Karbon nanotüp takviyesi ile kırılma tokluğunun artması, teorik mukavemet değerlerinin artmasına neden olmuş ve teorik veriler ile deneysel verilerin birbirlerine göre daha farklı sonuçlar

vermesine yol açmıştır. Buna göre Newman-Raju bağıntısının filaman sarım CTP ve CNT takviyeli CTP borular için uygulanamayacağı söylenebilir.

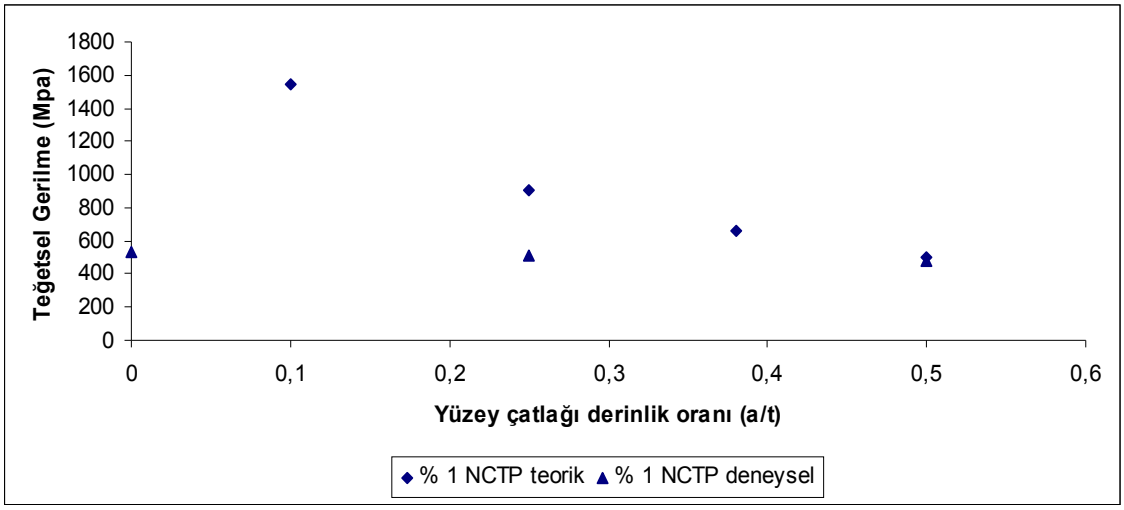
Newman-Raju teorik yaklaşımını deneysel çalışmalara uyarlayan ve aralarındaki ilişkiyi gösteren Tarakçıoğlu (1992) ±55° sarım açılı filaman sarım CTP borularda teorik ve deneysel çatlaklı mukavemet sonuçlarının kısmi bir paralellik gösterdiğini vurgulamıştır. Şekil 4.24., Şekil 4.25. ve Şekil 4.26.'de tüm kompozit (SCTP) ve nanokompozit (NCTP) numuneler için aynı geometrik şekle ve sarım açısına sahip CTP numunelerle kıyaslama verilmiştir. Karşılaştırmaya göre teorik ve deneysel verilerin karşılaştırılmasındaki durum desteklenmiştir.



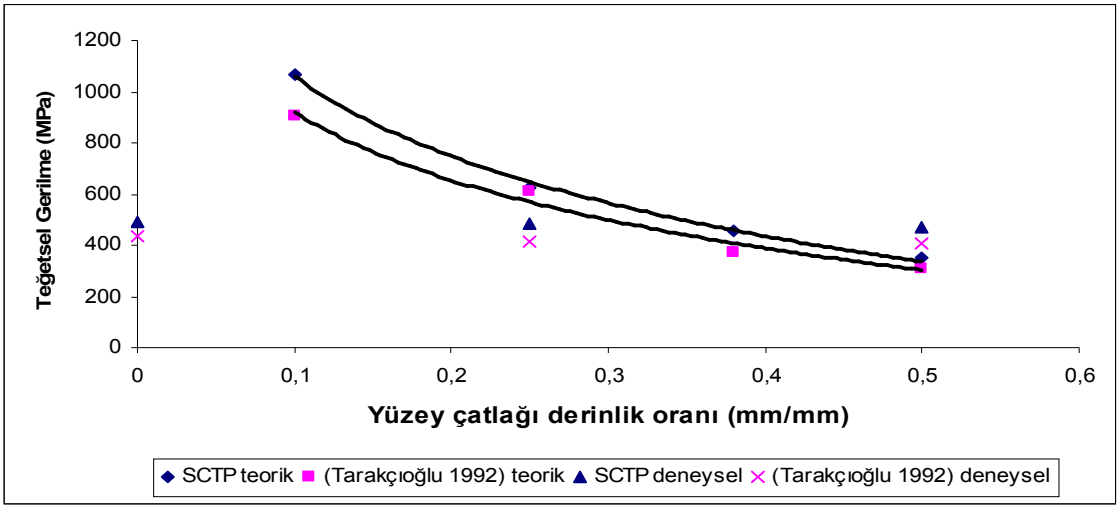
Şekil 4.21. Nano takviyesiz CTP boru halka çekme teorik ve deneysel σ_N-*a/t* grafiği



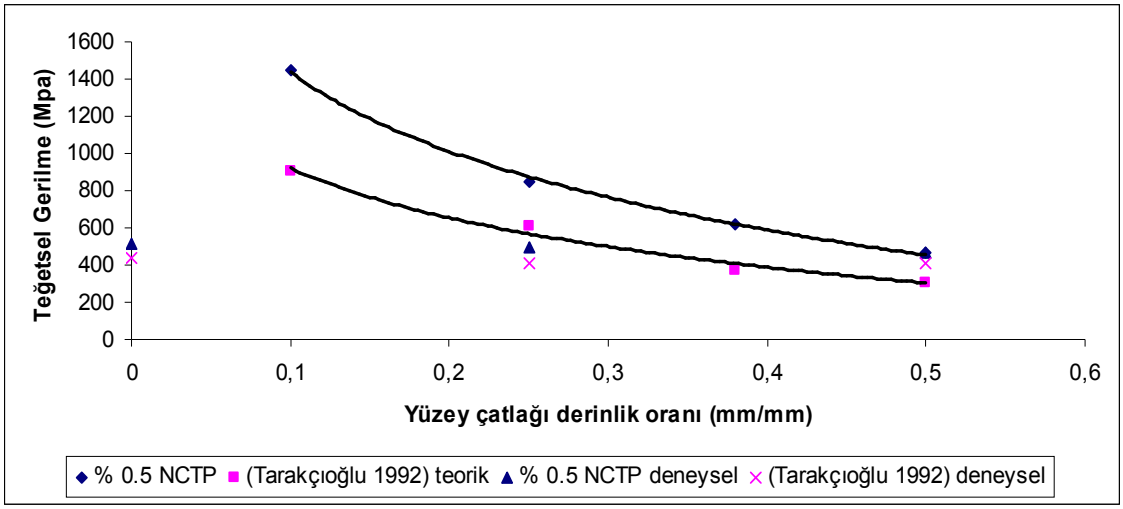
Şekil 4.22. % 0,5 CNT takviyeli CTP boru halka çekme teorik ve deneysel σ_N-*a/t* grafiği



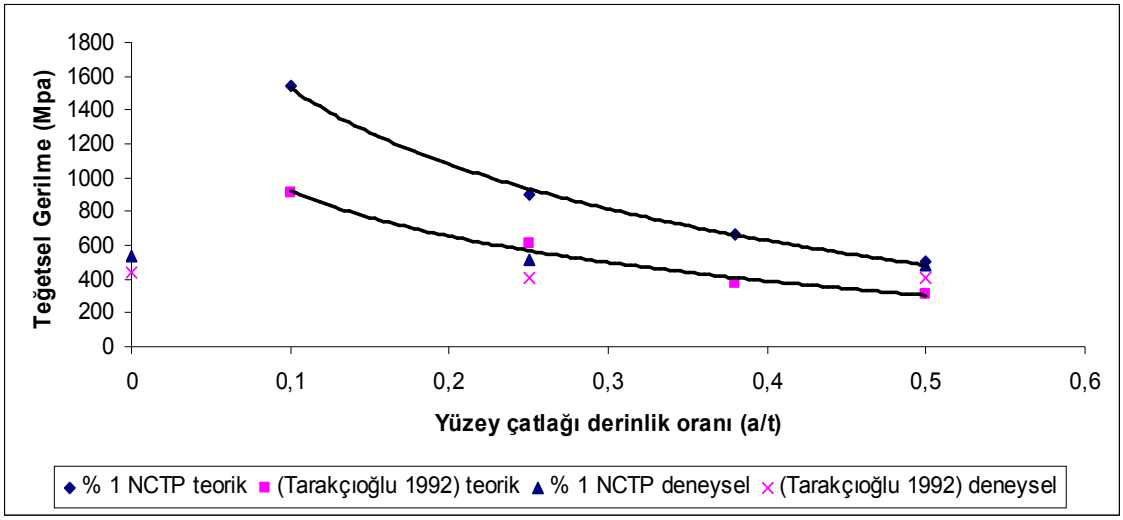
Şekil 4.23. % 1 CNT takviyeli CTP boru halka çekme teorik ve deneysel σ_N-*a/t* grafiği



Şekil 4.24. Nano takviyesiz CTP boru halka çekme teorik ve deneysel σ_N-*a/t* sonuçlarının (Tarakçıoğlu 1992) kaynak sonuçları ile karşılaştırma grafikleri



Şekil 4.25. % 0,5 CNT takviyeli CTP boru halka çekme teorik ve deneysel σ_N-*a/t* sonuçlarının (Tarakçıoğlu 1992) kaynak sonuçları ile karşılaştırma grafikleri



Şekil 4.26. % 1 CNT takviyeli CTP boru halka çekme teorik ve deneysel σ_N-*a/t* sonuçlarının (Tarakçıoğlu 1992) kaynak sonuçları ile karşılaştırma grafikleri

4.9. Yorulma Testi

Bu bölümde kullanılan yorulma deney seti, çalışma prensibi ve deney sonuçları hakkında bilgi ve grafikler sunulmuştur. $\pm 55^{\circ}$ sarım açısına sahip nano takviyesiz ve % 0,5 - % 1 CNT takviyeli numunelerin iç basınç altında yorulma ömrünü belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde yorulma gerilme oranı R=0,05 ve gerilme değeri yüzey çatlaksız numunelerin açık uçlu iç basınç deneylerinde elde edilen teğetsel yöndeki maksimum mukavemet değerlerinin %40, %50 ve %60'ı olacak şekilde tekrarlı iç basınç uygulanmıştır. Numuneler patlama ile sonuç hasarına ulaştıklarından dolayı yorulma ömrü olarak bu çevrim sayıları esas alınmıştır. Hasar davranışları ile ilgili açıklamalar Bölüm 4.10.'da aktarılacaktır.

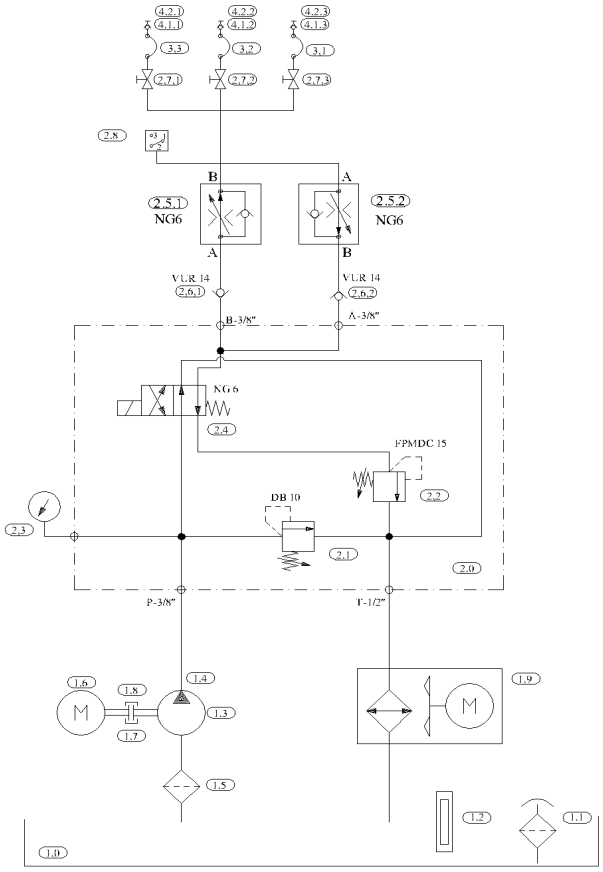
4.9.1. Yorulma Deney Seti

Yorulma deneyleri Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Kompozit Laboratuarı ve Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Kompozit Laboratuarında gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan hidrolik güç ünitesi 250 bar azami basınç potansiyeline, 8 l/dk debi kapasiteli dişli pompasına ve 60 litre hacimli tanka sahiptir. Düzenek bir PLC sistemine sahiptir. Ayrıca 2x2'lik bir yön kontrol valfi, devredeki basıncı görebilmek amacıyla analog basınç transmitteri vardır. Gidiş ve dönüş hatlarında birer adet kısma valfi vardır. Sinüzoidal bir gerilme değişimi elde etmek amacıyla bu kısma valfleri ayrı olarak ayarlanabilir. Hidrolik düzenek aynı anda 3 adet numuneyi test edebilecek durumdadır.

Kullanılacak numune sayısına göre kısma valfleri ayarlanabilir. Test numuneleri düzeneğe quick kaplin ve hidrolik hortumlar ile monte edilmiştir. Hidrolik akışkan olarak BP marka HPL-HM 68 kodlu hidrolik sistem yağı kullanılmıştır.

Çalışmadaki yüzey çatlağı açılmış açılmamış her bir numunenin statik patlama deneyi değerine göre % 40, % 50 ve % 60'lık basınç değerlerinde yorulma testleri yürütülmüştür. Testler 3 tekerrür olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 4.27.'de yorulma deney seti hidrolik devre şeması görülmektedir.



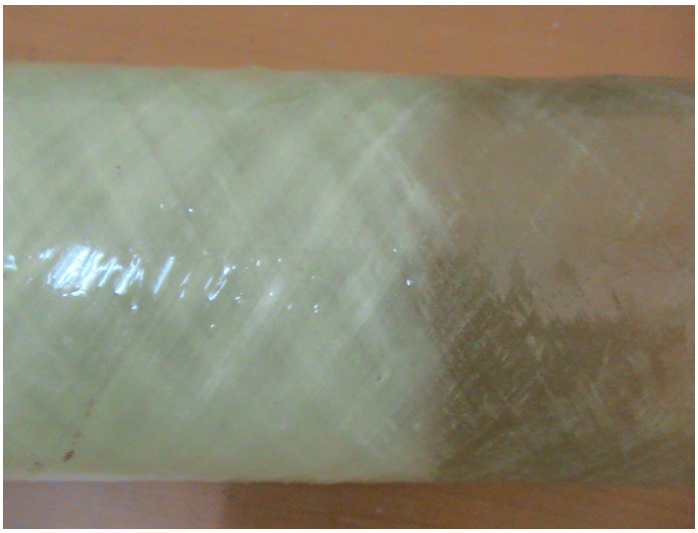
Şekil 4.27. Yorulma deney seti devre şeması

Çalışma prensibi, numune hattındaki basınç, ayarlanan üst basınç değerine ulaştığını basınç sensorundan 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 (Samancı 2004).

PLC kontrol ünitesi analog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrandan oluşmaktadır. Dijital ekranda sistem üst basıncı, anlık üst basınç, sistem alt basıncı, anlık alt basınç, frekans, azami çevrim sayısı ve anlık çevrim sayısı görülebilmektedir.

4.9.2. Eliptik Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız CTP Borularda İç Basınç Yorulma Deney Sonuçları

Deney statik patlama basıncının % 40'ı değerinde bir yorulma gerilmesi oluşacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi düzeneğe yerleştirildikten itibaren uygulanan ilk iç basınç ile birlikte boru çapında artış boyunda ise kısalma görülmüştür. Çap artışı yine yalnızca mandrel keçelerinin ortasında kalan kısmında meydana gelmiştir, sızdırmazlık keçelerinin dış taraflarında kalan kısımlarda çap artışı gözlenmemiştir. Çevrim sayısının artmasıyla birlikte elyaf boyunca meydana gelen beyazlaşma ile kendini göstermektedir. Şekil 4.28.'de çap değişimi görülmektedir.

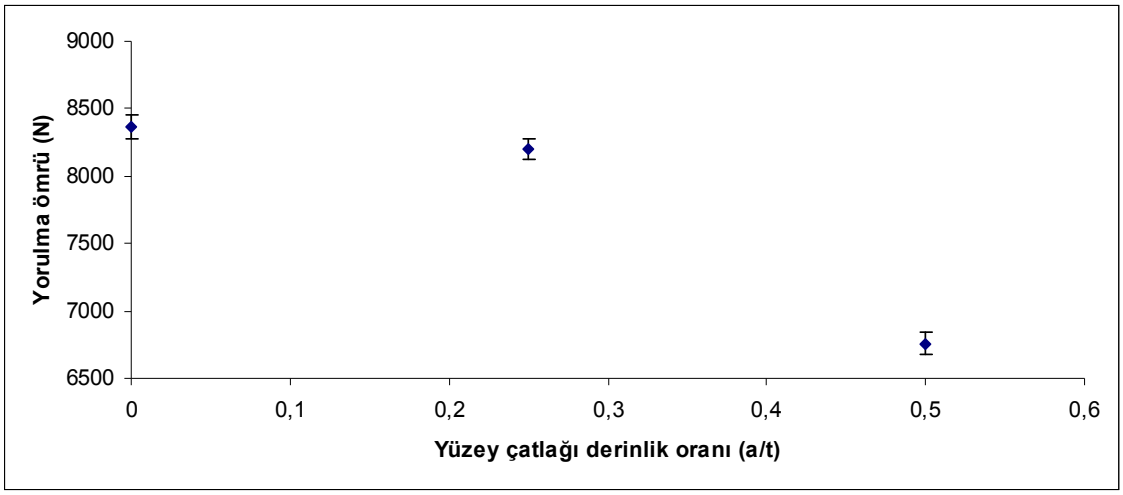


Şekil 4.28. Boru çap değişimi durumu

±55° elyaf sarım açısına sahip, üzerlerine farklı eliptik yüzey çatlağı açılmış olan CTP borular 0,4; 0,5 ve 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerlerinde iç basınç yorulma testine tabi tutulmuştur.

±55° elyaf sarım açısına sahip numunelerin 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranında yüzey çatlaksız numunede ortalama yorulma ömrü 8363 iken, a/t= 0,25 oranında yüzey çatlağı açılmış ve a/t= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan numuneler için sırasıyla 8202 ve 6760 olarak ölçülmüştür. Sığ çatlaklı numune ile yüzey çatlağı açılmamış olan numunelerin yorulma ömürleri yakın değer

göstermişlerdir. Burada sığ yüzey çatlaklı numunede yüzey çatlağının yorulma ömrüne olumsuz bir etkisi olduğu söylenebilir. Her iki numunenin yorulma ömrü sonuçları beklenildiği gibi derin çatlaklı numunenin ömür sonucundan daha yüksek değerler vermiştir. Sonuçlara göre a/t=0,25 oranındaki yüzey çatlağı yüzey çatlaksız numunelere göre yorulma ömrünü % 1,92 oranında azaltırken, a/t=0,50 oranında açılan yüzey çatlaklı numuneler ise % 19,16 oranında azaltmıştır. Elde edilen çevrim sayılarına göre yüzey çatlağı – ömür diyagramları çizilmiştir. Numuneler arasındaki ilişkiyi gösteren durum Şekil 4.29.'da verilmiştir.



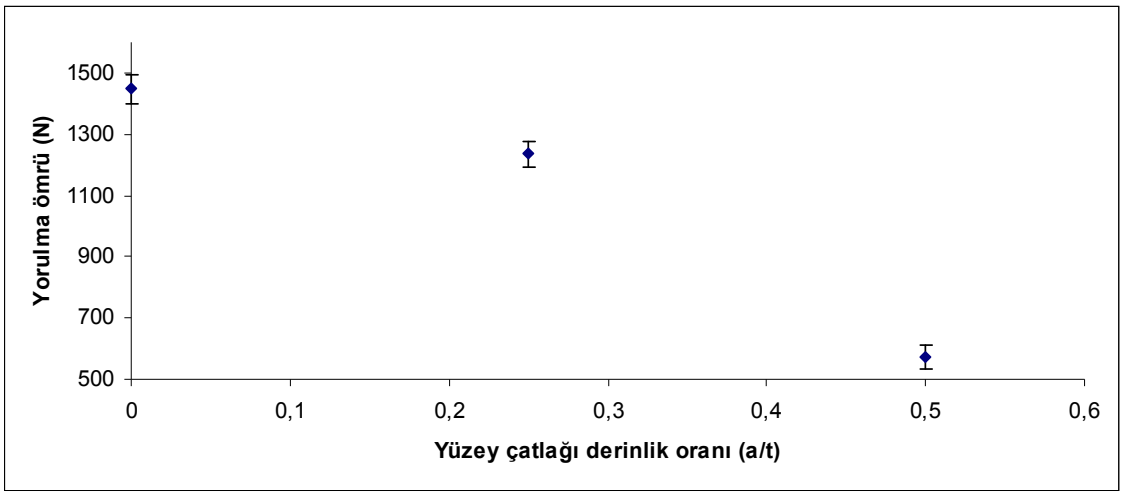
Şekil 4.29. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız nano takviyesiz CTP boruların 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yorulma grafiği

Şişen orta kısım ile şekil değiştirmeyen keçe dışında kalan uç kısmın birleştiği yerde şişe boynu durumu gözlenmiştir. Bu hal sızdırma keçelerinin görevlerini yaptığının da bir işaretidir. Durumun bu şekilde olumlu seyretmesine rağmen sızdırmazlık keçelerinin olduğu kısımda borunun dışına metal kelepçeler takılarak alternatif tedbir alınmıştır. Bu sayede boru numunesinin tam boydan çap değişimine bir engel olunmuş ve basınçlı yağın numune ve keçe arasından sızmasının önüne geçilmiştir. Metal kelepçelerin iç çapı 78 mm'dir. Bu sayede borunun teğetsel yönde hareket etmesine müsaade verilmezken eksenel yönde hareket etmesine müsaade verilmiştir. Boru boyundaki değişmeler de dikkate alınarak borunun süreç esnasında mandrel üzerinden taşmaması için boru uç kısımlarına boydaki kısalma yönündeki değişimi engellemeyecek şekilde metal contalar ilave edilmiştir. Bahsi edilen kelepçeleme durumu Şekil 4.30.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Boru test numunesi

±55° elyaf sarım açısına sahip numunelerin 0,5 $\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme oranı değerinde yüzey çatlaksız numunede yorulma ömrü ortalaması 1445 iken, *a/t*= 0,25 oranında yüzey çatlağı açılmış ve *a/t*= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan numuneler için ortalama yorulma ömürleri sırasıyla 1236 ve 573 olarak belirlenmiştir. Buna göre sığ yüzey çatlağı (a/t=0,25) yorulma ömrünü % 14,46 oranında, derin yüzey çatlağı da (a/t=0,50) % 60,34 oranında azaltmıştır. Karbon nanotüp takviyesiz olarak imal edilmiş yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki yorulma ömürleri Şekil 4.31.'de görülmektedir.

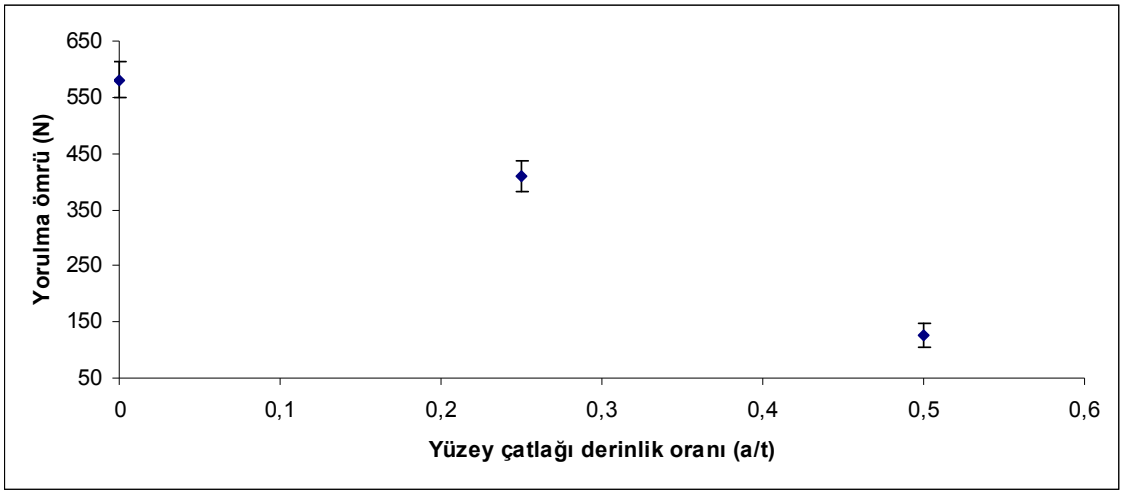


Şekil 4.31. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız nano takviyesiz CTP boruların 0,5 $\sigma_{\theta 0 statik}$ gerilme değerinde yorulma grafiği

0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde henüz deneyin başlarında beyazlaşma ile kendini belli eden elyaf – matriks ayrılması hasar aşaması gözlemlenmiştir. Bu durum Bölüm 4.10.7.'de verilmiştir. Bu hasar aşamasının bu kadar kısa süre içerisinde görülmesinin nedeni yorulma gerilmesinin % 60 gibi yüksek değerde uygulanmış olmasıdır. Bu tür bir teğetsel gerilme patlama basıncı değerine oldukça yakın bir değer olduğundan çevrim sayısı bakımından hasar aşamalarının erken görülmeleri normaldir.

±55° elyaf sarım açısına sahip numunelerin 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yüzey çatlağı açılmamış numunede yorulma ömrü ortalama 581 iken, *a/t*= 0,25 oranında sığ yüzey çatlağı açılmış ve *a/t*= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan numuneler için sırasıyla ortalama 409 ve 126 olarak ölçülmüştür. Yorulma ömürleri sığ yüzey çatlağında % 29,6 oranında, derin yüzey çatlağında ise % 78,31 oranında azalmıştır.

Karbon nanotüp takviyesi yapılmamış, yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış CTP borulardaki yorulma ömürleri Şekil 4.32.'de görülmektedir.



Şekil 4.32. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız nano takviyesiz CTP boruların 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yorulma grafiği

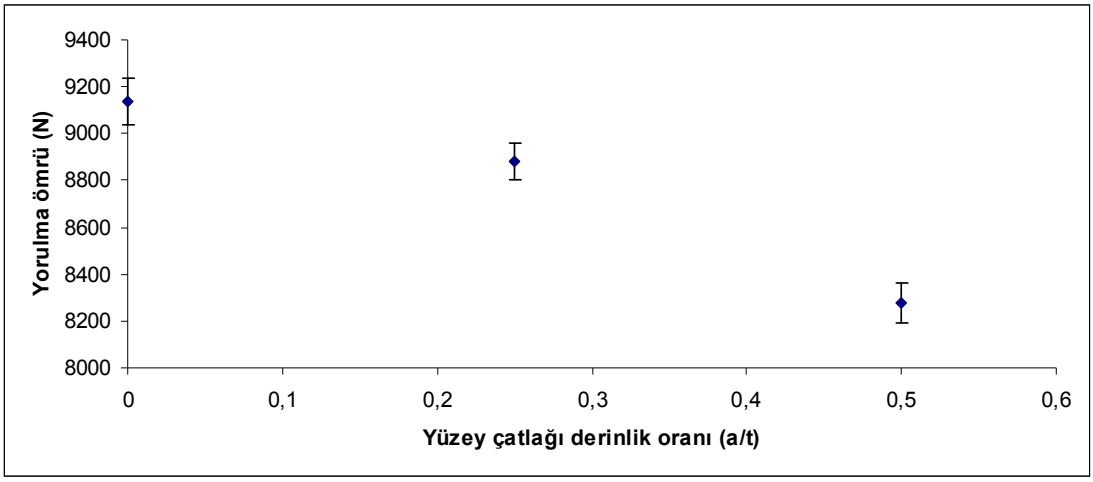
4.9.3. % 0,5 CNT Takviyeli Eliptik Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız CTP Borularda İç Basınç Yorulma Deney Sonuçları

% 0,5 CNT takviyeli eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° sarım açılı numuneler nano takviyesiz CTP numuneler ile aynı *a/t* oranı ve aynı yorulma gerilmesi değerinde teste tabi tutulmuşlardır.

İlk iç basıncın verilmesinden itibaren metal kelepçelerin arasında kalan kısımlarda çap artışı, tüm boru boyunda ise 1 cm'den daha kısa olmak üzere kısalma meydana gelmiştir. Çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi düşük oranda ilave edilmesine rağmen yine boyutsal şekil değişiminin verdiği hasar aşamalarının görüntülenmesini zorlaştırmıştır. Ayrıca yüksek gerilim değerlerinde karbon nanotüp – matriks ara yüzeyi hasar görebilir. Bu yüzden düşük gerilim değerlerinde görülen yük transfer etkinliği Loos'un (2013) da belirttiği gibi azalma gösterir. Fakat bu hasarın deney esnasında görülmesi yüksek yorulma gerilmesi oranlar dışında fark edilemez.

±55° elyaf sarım açısına sahip ağırlıkça % 0,5 karbon nanotüp ilaveli CTP numunelerin 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranında yüzey çatlaksız numunedeki yorulma ömrü ortalama 9137 olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra sığ yüzey çatlaklı (*a/t*= 0,25) nanokompozit numunede ve derin yüzey çatlaklı (*a/t*= 0,50) nanokompozit numunede görülen yorulma ömürleri sırasıyla ortalama 8879 ve 8279 olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre sığ yüzey çatlağı % 2,82 oranında derin yüzey çatlağı da % 9,39 oranında yorulma ömründe azalma görülmesine neden olmuştur. % 0,5 oranında karbon nanotüp takviyesi, takviye yapılmamış numunelerin sonuçlarına göre daha yüksek değerler vermiştir fakat bu fazlalık istenilen değerde elde edilememiştir.

% 0,5 oranında CNT takviyesi yapılan farklı oranlarda yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki 0,4 $\sigma_{\theta\theta}$statik yorulma gerilmesi oranında meydana gelen yorulma ömürleri Şekil 4.33.'te görülmektedir.

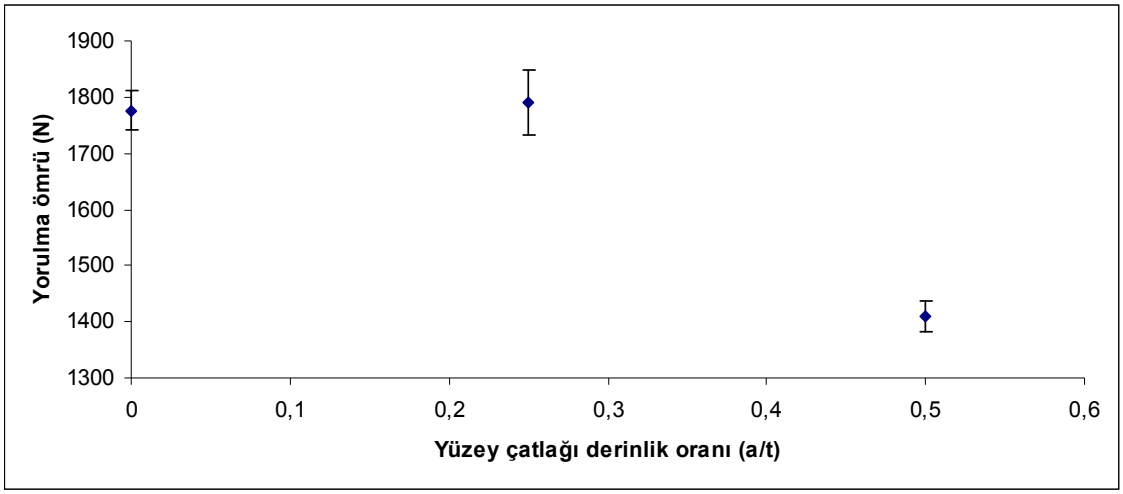


Şekil 4.33. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız % 0,5 CNT takviyeli CTP boruların boruların 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yorulma grafiği

0,5 $\sigma_{\theta\theta}$statik yorulma gerilmesi oranında % 0,5 CNT takviyeli eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° sarım açılı numuneler, nano takviyesiz CTP numunelerle aynı a/t oranı ve aynı yorulma gerilmesi değerinde teste tabi tutulmuşlardır.

±55° elyaf sarım açısına sahip ağırlıkça % 0,5 karbon nanotüp ilaveli numunelerin 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranı değerinde yüzey çatlaksız numunede ortalama yorulma ömrü 1776 iken, *a/t*= 0,25 oranında yüzey çatlağı açılmış ve a/t= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan numuneler için ortalama yorulma ömrü değerleri sırasıyla 1790 ve 1411 olarak belirlenmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi karbon nanotüp takviyeli nano kompozit boruların yorulma ömrü değerleri nano takviyesiz numunenin değerlerine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Özellikle yüzey çatlağı açılmış olan numunelerde yüksek yüzdelerde artış olduğu göze çarpmaktadır. Sığ yüzey çatlağklı numunelerin yorulma ömürleri ile yüzey çatlaksız numunelerin yorulma ömürleri arasında aynı sonuçlar elde edilmiş ve sığ yüzey çatlağının yorulma ömrüne bir olumsuz etkisi bulunamamıştır. Derin yüzey çatlağı ie yorulma ömrünü % 20,55 oranında azaltmıştır.

% 0,5 oranında CNT takviyesi yapılmış olan farklı oranlarda yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranında tespit edilen yorulma ömürleri Şekil 4.34.'te görülmektedir.



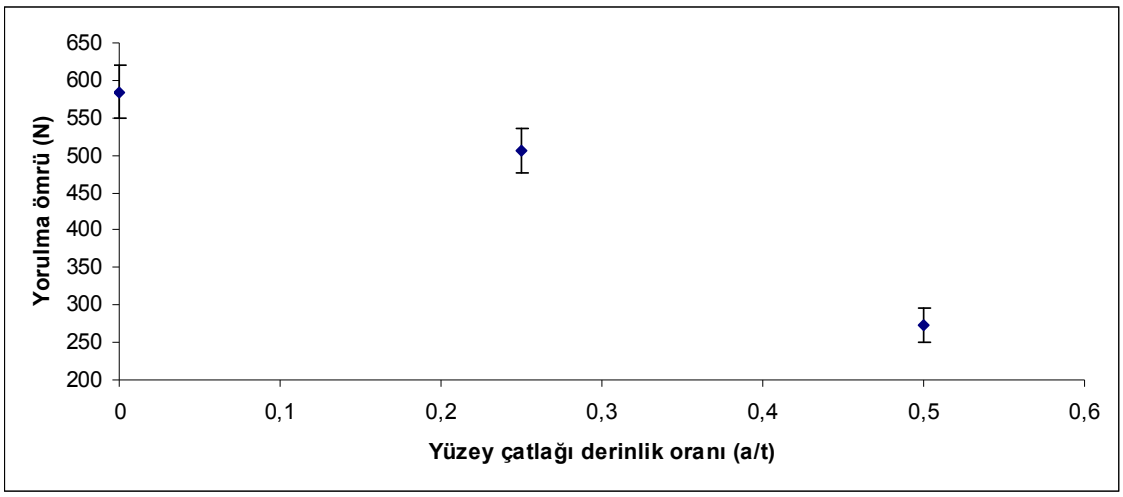
Şekil 4.34. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız nano takviyesiz CTP boruların 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yorulma grafiği

0,6 $\sigma_{\theta\theta}$statik yorulma gerilmesi oranında da % 0,5 çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° sarım açılı numuneler nano takviyesiz numuneler ile aynı *a/t* oranlarında ve aynı yorulma gerilmesi değerinde teste tabi tutulmuşlardır.

İlk iç basınç ile birlikte diğer gerilme oranlarındaki numuneler gibi çapta büyüme-küçülme boyda ise kısalma-uzama hareketleri gözlenmiştir. Fakat maksimum gerilme değerinin yüksek olması yani uygulanan iç basıncın yaklaşık olarak 180 barın üstüne çıkması fiziksel hareketlerin değişme mesafesini arttırmıştır. Yüksek gerilme değeri birlikte gelen şekil değişiminin vermiş olduğu ilk hasar aşamaları karbon nanotüplerin özelliklerinden dolayı diğer gerilme oranlarında yapılan testlerdeki gibi gözle kontrol edilememiştir.

±55° elyaf sarım açısına sahip ağırlıkça % 0,5 karbon nanotüp ilaveli numunelerin 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranında yüzey çatlaksız numunede ortalama yorulma ömrü 584 iken, sığ yüzey çatlağı açılmış (*a/t*= 0,25) nano kompozit borularda yorulma ömrü 506 ve derin yüzey çatlağı açılmış (*a/t*= 0,50) nano kompozit numuneler için yorulma ömrü 273 olarak belirlenmiştir. Karbon nanotüp takviyeli nano kompozit boruların yorulma ömürleri yüzey çatlaklı borularda takviye yapılmamış olan borulara göre daha iyi sonuçlar verirken çatlaksız numunelerde çok yakın değerler görülmüştür. Aynı gerilme oranı ve aynı nano malzeme takviyesi ile test edilen bu numunelerin yorulma ömürleri de değişiklik göstermiştir. Yorulma ömrü sığ yüzey çatlağı durumunda % 13,35 oranında derin yüzey çatlağı durumunda ise % 53,25 oranında azalma göstermiştir.

% 0,5 oranında CNT takviyesi yapılan farklı oranlarda yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki 0,6 σθθstatik yorulma gerilmesi oranında tespit edilen yorulma ömürleri şekil 4.35.'te görülmektedir.



Şekil 4.35. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız % 0,5 CNT takviyeli CTP boruların 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde yorulma grafiği

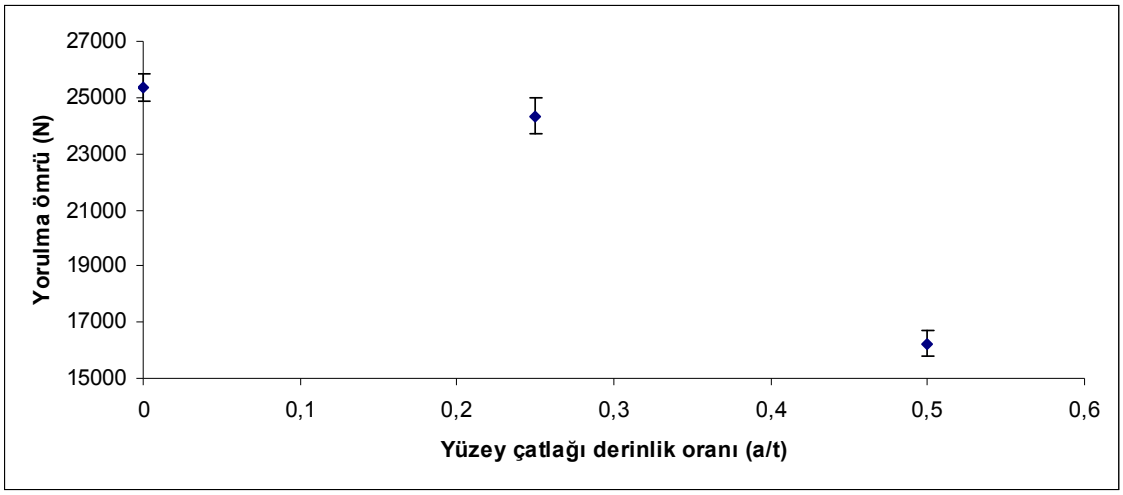
4.9.4. % 1 CNT Takviyeli Eliptik Yüzey Çatlaklı ve Çatlaksız CTP Borularda İç Basınç Yorulma Deney Sonuçları

% 1 CNT takviyeli eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° sarım açılı numuneler, nano takviyesiz CTP numuneler ile aynı çatlak derinlik oranları ve aynı yorulma gerilmesi değerlerinde teste tabi tutulmuşlardır. Test esnasında artan basınç ile beraber keçenin, mandrel ve numune arasından çıkmasını önlemek adına, nano takviyesiz numunelerde yapıldığı gibi metal kelepçe ve conta kullanımına gidilmiştir. Kullanım şekli Şekil 4.42'de verilmiştir.

Karbon nanotüplerin boyar özelliğe sahip olmasından dolayı test esnasındaki beyazlaşmalar nano takviyesiz CTP boru numunelerindeki kadar açık şekilde görülememiştir. Bunun yerine boru boyutlarındaki çap artışı, boy değişimi ve şişe boynu gibi gözle görünür değişimler, elyafların yorulma esnasındaki açısal değişimleri ve sonuç hasarına yakın matriks malzeme ile aralarındaki durumları gibi fiziksel değişimlerden yararlanılmıştır. ±55° elyaf sarım açısına sahip ağırlıkça % 1 karbon nanotüp ilaveli numunelerin 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranında yüzey çatlaksız numunede ortalama yorulma ömrü 25347 olarak tespit edilmiştir. Aynı gerilme oranında sığ yüzey çatlağı (a/t= 0,25) açılmış olan nano kompozit numunelerdeki ortalama yorulma ömrü 24341 olarak çatlaksız numunenin yorulma ömrüne oldukça yakın bir sonuç göstermiştir. Bir diğer çatlaklı numune olan derin yüzey çatlağı (a/t= 0,50) açılmış olan nano kompozit numunelerde ortalama yorulma ömrü 16224 olarak tespit edilmiştir. Ağırlıkça % 1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp takviye edilmiş

numunelerin yorulma ömrü sonuçları hem nano takviyesiz kompozit boruların hem de ağırlıkça % 0,5 oranında çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi yapılmış olan nano kompozit numunelerin yorulma ömürlerinden oldukça yüksek değerler göstermiştir. Bu sonuçlar karbon nanotüpün ancak belli bir oranın üzerinde ilave edilmesinin yorulma ömrüne dikkate değer bir katkı sağladığını göstermektedir.

% 1 CNT takviyesi yapılmış olan farklı oranlarda yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranındaki yorulma ömürleri Şekil 4.36.'da görülmektedir.

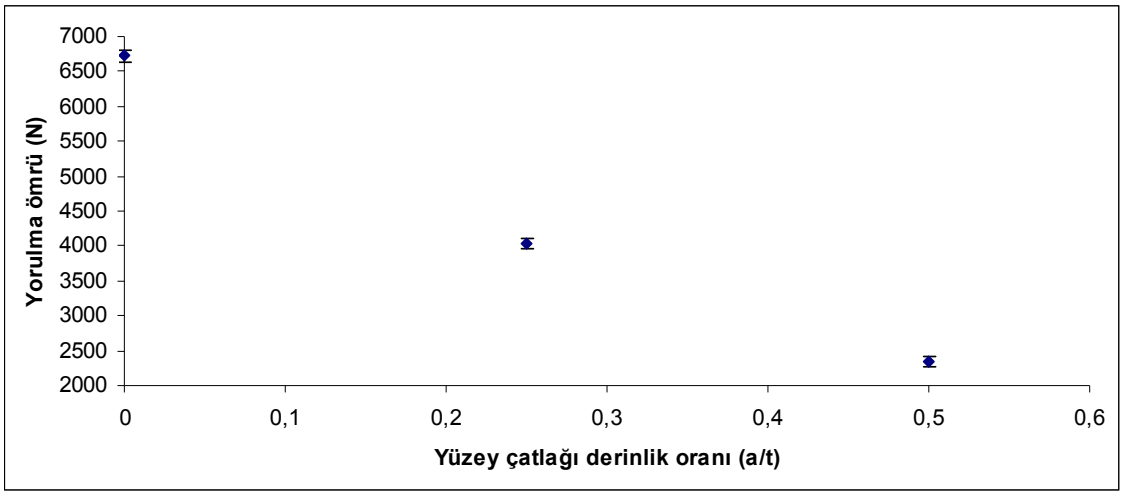


Şekil 4.36. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız % 1 CNT takviyeli CTP boruların boruların 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yorulma grafiği

Bu sonuçlara göre yorulma ömrü sığ yüzey çatlağında % 3,96 oranında, derin yüzey çatlağında ise % 35,99 oranında azalma göstermiştir.

±55° elyaf sarım açısına sahip ağırlıkça % 1 karbon nanotüp takviyeli numunelerin 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında yüzey çatlaksız numunede yorulma ömrü 6721 iken, *a/t*= 0,25 oranında yüzey çatlağı açılmış ve *a/t*= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan numuneler için gerilme değerleri sırasıyla 4032 ve 2340 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar sığ yüzey çatlağının yorulma ömrünü % 40 azalttığını, derin yüzey çatlağının ise % 65,18 azalttığını göstermektedir. Yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış olsun tüm numunelerde hem nano takviyesiz numunelere kıyasla hem de diğer nano malzeme takviyesi olan numunelere kıyasla yorulma ömrü değerlerinde dikkate değer bir şekilde artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

% 1 CNT takviyeli yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki 0,5 gerilme oranındaki tespit edilen yorulma ömürleri Şekil 4.37.'de görülmektedir.

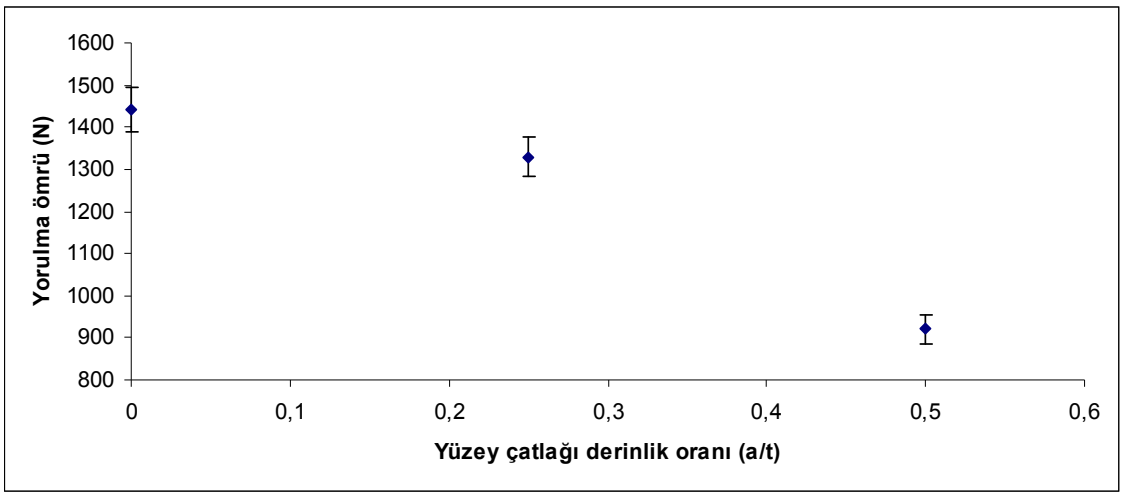


Şekil 4.37. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız % 1 CNT takviyeli CTP boruların 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranı değerinde yorulma grafiği

% 1 oranında nano malzeme katılması görsel izleme açısından % 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ oranında nano malzeme katılmasından farklı değildir. Hasar aşamaları diğer test edilen numunelere göre daha uzun çevrim sayılarında gözlemlenmiştir. ±55° elyaf sarım açısına sahip ağırlıkça % 1 karbon nanotüp ilaveli numunelerin 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranında yüzey çatlaksız numunede yorulma ömrü 1442 iken, *a/t*= 0,25 oranında yüzey çatlağı açılmış ve *a/t*= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan numuneler için yorulma ömrü çevrim sayıları sırasıyla 1329 ve 920 olarak belirlenmiştir. Buna göre sığ yüzey çatlağı yorulma ömrünü % 7,83 oranında azaltırken, derin yüzey çatlağı da % 36,19 oranında azaltmıştır.

Yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış olsun tüm numuneler hem takviyesiz hem de düşük takviyeli numunelere göre diğer yorulma gerilmesi oranlarında olduğu gibi daha iyi sonuçlar vermişlerdir. % 1 oranında CNT takviyesi derin yüzey çatlağı açılmış olsa bile % 60 gibi yüksek bir iç basınç oranında yüzey çatlaklı olsun ya da olmasın tüm numunelerden daha yüksek yorulma ömrü sonuçları göstermiştir.

% 1 oranında karbon nanotüp takviyesi yapılmış olan farklı oranlarda yüzey çatlağı açılmış ve çatlaksız CTP borulardaki 0,6 gerilme oranındaki yorulma ömürleri Şekil 4.38.'de görülmektedir.



Şekil 4.38. Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız % 1 CNT takviyeli CTP boruların 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi oranındaki yorulma ömrü grafiği

4.9.5. Gerilme – Yorulma Ömrü (S-N) Eğrileri

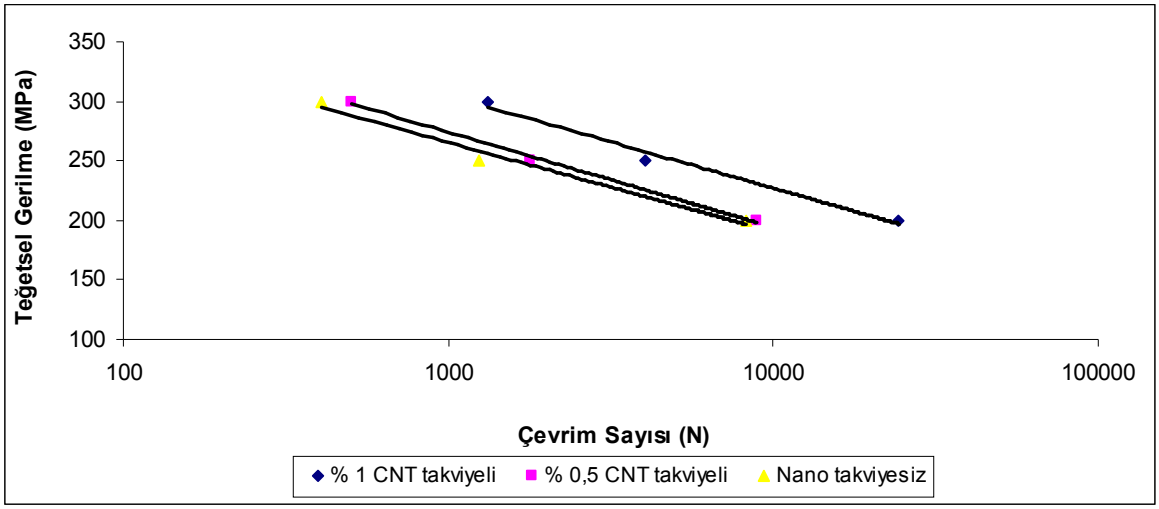
±55° sarım açısına sahip CTP ve karbon nanotüp takviyeli CTP numunelerin üzerlerine farklı eliptik yüzey çatlağı açılmış durumunda 0,3; 0,4 ve 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde sonuç hasarına ulaşana kadar iç basınç altında yorulmaya maruz bırakılmışlardır. Elde edilen ömür çevrim sayıları ile gerilme değerleri arasındaki ilişki sığ yüzey çatlağı açılan, derin yüzey çatlağı açılan ve yüzey çatlaksız numuneler için sırasıyla Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'de verilmiştir. Grafiklerde yatay eksenler logaritmik eksen olarak verilmiştir.

Her çeşit yüzey çatlaklı ve yüzey çatlaksız numunelerin S-N grafikleri incelendiğinde nano takviyesiz numunelerin eğrisi ile takviyeli numunelerin eğrileri arasında bir paralellik gözlemlenmektedir. % 1 CNT takviyeli numuneler her gerilme oranında ve her yüzey çatlağı şartı altında açıkça daha üstün sonuçlar vermektedir. Gerilme değerleri arttıkça tüm numunelerde yorulma ömrünün azaldığı görülmektedir. Yorulma ömründeki bu düşüşler gerilme oranı değerinin artmasıyla birlikte oluşan ilave deplasman değişimi sebebiyle oluşmaktadır.

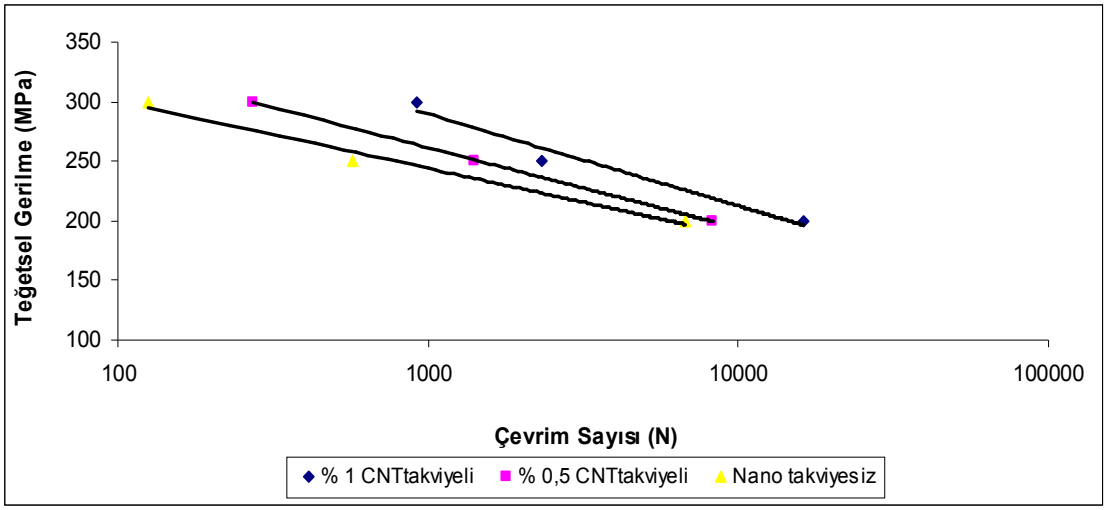
Karbon nanotüp takviyesi yapılan numunelerin yorulma ömürlerinin nano takviyesiz numunelerin yorulma ömürlerine göre olan artışları kullanılan her gerilme oranı seviyesinde ve her tür çatlak derinlik oranında meydana gelmiştir. Buradaki anahtar nokta karbon nanotüplerin homojen olarak matriks malzeme içerisinde dağıtılabilmesidir. Karbon nanotüplerin homojen dağıtılabildiği Şekil 4.5.'te verilmiştir. Ayrıca CNT'lerin yaptığı köprüleme görevi matrikse verimli bir yük transferi aktarımı

sağlar ve matriks malzemesinin plastik deformasyona uğramasını azaltıp geciktirebilir. Bu durum Şekil 4.45'te görülmektedir.

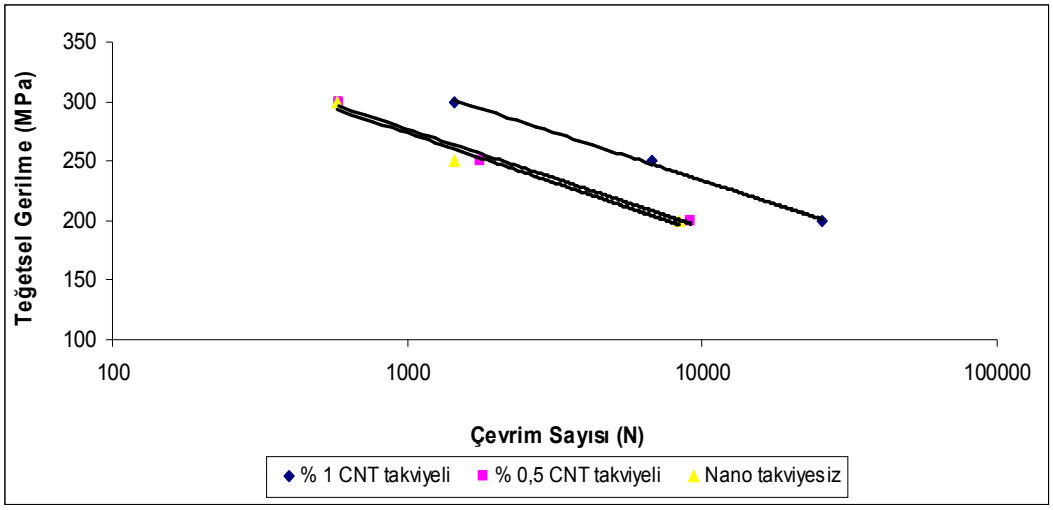
Ayrıca karbon nano tüplerin çok sayıda ara yüzey oluşturmasından dolayı büyük çatlakların oluşumunu engellediği ve yorulma hatasını geciktirdiği, bu sayede de yorulma ömür artışı sağladığı Loos (2013) tarafından bildirilmiştir. Bu olay % 1 oranındaki karbon nanotüp takviyesinde daha çok meydana geldiğinden yorulma ömründe görülen artış olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.39. Sığ yüzey çatlaklı CTP ve CNT takviyeli CTP numunelerin S-N grafiği



Şekil 4.40. Derin yüzey çatlaklı CTP ve CNT takviyeli CTP numunelerin S-N grafiği



Şekil 4.41. Yüzey çatlaksız CTP ve CNT takviyeli CTP numunelerin S-N grafiği

4.9.6. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değeri malzeme üzerinde düşük bir gerilim oluşturan değerdir. Bu sebeple tüm numunelerin yorulma ömürleri kendi aralarında değerlendirildiklerinde dikkate değer bir artış olması kaçınılmaz görülmektedir. Bunun aksi durumlarda üretilen numunelerin imalat hasarı taşıdıkları söylenebilir.

Yüzey çatlaksız numunelerde çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi, nano takviyesi yapılmamış CTP numunelere göre aynı gerilme oranında daha yüksek değerlerde bir yorulma ömrü getirmektedir. Yapılan deneyler sonucunda yorulma ömrü çevrim sayılarındaki artış her çeşit numunede belirlenmiştir. Özellikle % 1 oranında karbon nanotüp takviyeli nanokompozit CTP numunelerde bu artış daha göze çarpar niteliktedir. Fakat % 0,5 oranında karbon nanotüp takviyeli CTP numunelerin yorulma ömrü epoksi matriks – cam elyaf kompozitininkine göre çok yüksek oranda oluşmamıştır. Bu sebeple nano malzeme takviyesinin yüzdesel olarak belli bir seviyenin altında olmaması gerektiği söylenebilir.

Ağırlıkça % 0,5 oranında CNT ilave edilmiş nanokompozit numunenin takviyesiz CTP numuneye göre göstermiş olduğu yorulma ömrü artışı % 9,25; % 1 oranında CNT takviyeli nanokompozit numunenin ise % 303,08 gibi büyük oranda olmuştur.

Çekme-çekme yorulmasına maruz bırakılan CNT'li numunelerin yüksek çevrimli olarak gerçekleştirilen testlerinde gösterdiği artış Bortz (2011) tarafından

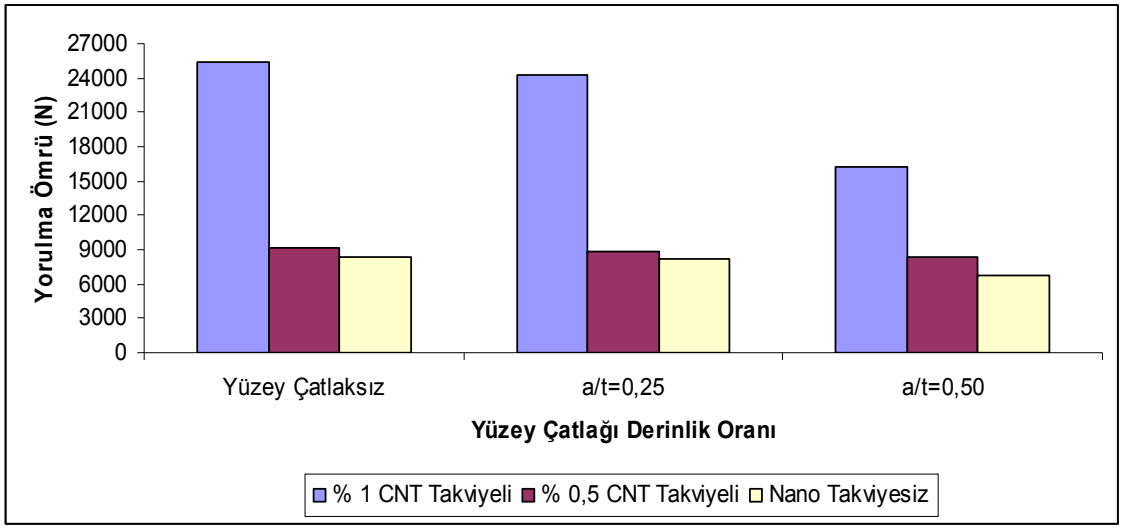
desteklenmektedir. Yorulma ömründeki, bu artış CNT'lerin dağılım kalitesiyle ve geometrisiyle ilişkilendirilmiştir.

Nano malzeme takviyeli numuneler kendi arasında değerlendiğinde % 1 oranında takviye yapmak karbon nanotüplerin kendi aralarındaki etkileşimini, epoksi matriks içerisinde tüm yüzeye dağılmasını ve tabakalar arasına da nüfuz ederek derinlemesine etkide bulunmasını arttırmıştır. Karbon nanotüplerin kendi aralarındaki çekim kuvvetini aşarak homojen şekilde yayılması ve matrikse bağlanmaları her iki düzeydeki nano malzeme takviyesinde de meydana gelmiştir.

Yüzey çatlaklı numuneler değerlendirildiğinde; a/t=0,25 oranında açılan sığ yüzey çatlağı kompozit ve nanokompozit numunelerin 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesinde yani düşük gerilim altında yorulma ömürleri araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda sığ yüzey çatlağının düşük yorulma gerilmesi altında pek fazla etkide bulunmadığı söylenebilir. Bu söylem hem patlama ile son bulan numune hasarı görüntüsünden hem de yüzey çatlağı açılmamış olan numunelerin yorulma ömürleri ile yapılan kıyaslamalardan desteklenebilir. Ağırlıkça % 0,5 oranındaki CNT takviyesinin nano takviyesiz olarak üretilen kompozit borulara nazaran gösterdiği yorulma ömründeki artış % 8,25 ve % 1 oranındaki CNT takviyesinin göstermiş olduğu çevrim sayısı artışı ise % 296,76 oranında dikkate değer bir seviyededir.

a/t=0,50 oranında açılan derin yüzey çatlağında da nano malzeme kullanılmasının etkileri açıkça görülmektedir. Çeşitlendirilmiş diğer numunelerde olduğu gibi bu çeşit numunelerde de % 1 CNT takviyesinde karbon nanotüplerin daha etkili olduğu belirlenmiştir. Buradaki ilerleme karbon nanotüplerin bireysel özelliklerinin kompozit malzeme içerisine istenildiği ölçüde aktarılabildiğinin de bir işaretidir. % 0,5 ve % 1 oranlarındaki karbon nanotüp takviyesi ile oluşturulan nanokompozit numunelerin takviyesiz olarak imal edilen CTP borulara göre göstermiş olduğu yorulma ömrü artışı sırasıyla % 22,47 ve % 240 olarak belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.42.'de görüldüğü üzere % 1 CNT'li nanokompozit boruların yorulma ömürleri % 0,5 CNT'li nanokompozit borulara göre iki kata yakın bir artış göstermesi, nano malzeme takviyesinin % 0,5'lik oranlara kadar düşürülmemesi gerektiğinin ispatıdır. Düşük gerilim seviyelerinde CNT-matriks ara yüzey bütünlüğü korunur (Loos 2013). Bu sayede CNT takviyesi Şekil 4.43.'te görüldüğü gibi yorulma ömründe artış meydana getirir. Bu da elyaflar arasında çatlak başlangıcının gecikmesinin işareti olarak kabul edilebilir.

Şekil 4.42.'de yüzey çatlaklı ve çatlaksız olan tüm numunelerin 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde yorulma ömürlerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 4.42. Yüzey çatlaklı ve çatlaksız CTP ve CNT'li CTP numunelerin 0,4 gerilme oranındaki yorulma ömürleri

4.9.7. 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yüzey çatlaksız numuneler değerlendirildiklerinde çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde yorulma ömründe artış görülmektedir. Ağırlıkça % 0,5 oranındaki CNT takviyesinin gösterdiği ilerleme % 22,90 kadardır. % 1 oranındaki CNT takviyesi ile üretilen nanokompozit numunelerin yorulma ömürleri ise nano takviyesiz olarak üretilmiş olan kompozit numunelerin yorulma ömürlerine göre % 465,12 gibi büyük oranda artış göstermiş olduğu görülmektedir.

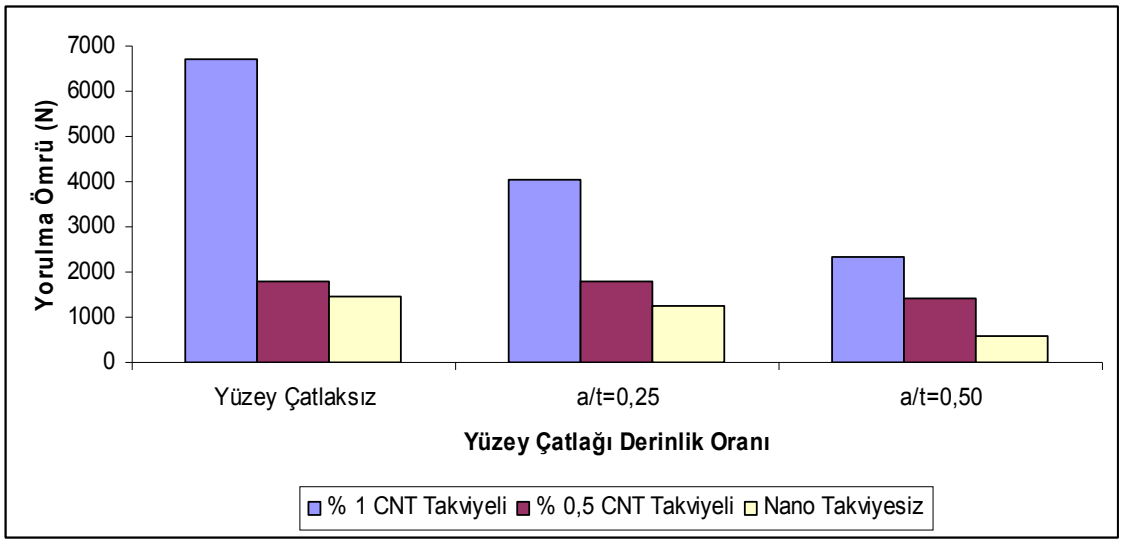
Ayrıca nano malzemeler kendi arasında değerlendirildiklerinde % 1 oranında takviyede bulunmak karbon nanotüplerin kendi aralarındaki etkileşimini çok daha arttırmış ve uygulanan yükü üzerine alarak hem matriks malzemesinin hem de elyafın üzerine gelen yükü azaltmıştır. Bu da karbon nanotüplerin bireysel olarak gösterdikleri özellikleri matriks malzemesine aktarabildiklerini göstermektedir. Elyaf takviyesiz olarak yapılan çalışmalar da bu ifadeyi destekler niteliktedir.

a/t=0,25 oranındaki yüzey çatlağının 0,5 yorulma gerilmesi altında üç çeşit numunenin yorulma ömürleri diğer deney şartlarında olduğu gibi sırasıyla % 1 CNT takviyeli, % 0,5 CNT takviyeli ve nano takviyesiz numuneler şeklindedir.

Yapılan deneylere göre ağırlıkça % 0,5 oranındaki CNT takviyesinin nano takviyesiz kompozit numunelere göre gösterdiği ilerleme % 44,82; ağırlıkça % 1 oranındaki CNT takviyesinin gösterdiği ilerleme ise % 326,21'dir. Meydana gelen yorulma ömürleri sonucunda her iki düzeyde nano malzeme takviyesinin de yorulma ömrünü % 1 oranında nano malzeme takviyesi deney sonucu elde edilen yüzdesel artışa göre de göreceli olarak muhtemel daha düşük bir yüzdesel artış da istenen derecededir. Bu değerlere göre nano malzeme takviyesi yorulma ömürlerini sığ yüzey çatlağı açılması durumunda da artırmıştır. Fakat nanokompozit numunelerin sığ yüzey çatlağına duyarsız kalmasının yüzdesel artışın beklenenden bir miktar daha yüksek çıkmasına neden olduğu düşünülebilir.

a/t=0,50 oranında yüzey çatlağı yorulma ömürleri karşılaştırılmıştır. Yorulma gerilmesi değeri yüksek olduğu için 0,4 gerilme değerine göre yorulma ömrü çevrim sayılarında düşüş vardır. Yorulma ömrü çevrim sayıları nano takviyesiz numuneler için 573 iken, % 0,5 ve % 1 oranında takviye yapıldığı durumlarda 1411 ve 2340 olarak belirlenmiştir. Buna göre çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi yapıldığı takdirde yorulma ömrü artışı gözlemlenmiştir. CNT takviyeli numunelerin yorulma ömürlerindeki meydana gelen artış nano takviyesiz CTP numunelere göre, ağırlıkça % 0,5 oranındaki ilavede % 246,24; % 1 oranındaki CNT takviyesinde ise % 408,37'dir.

Yüzey çatlaklı ve çatlaksız 0,5 gerilme oranındaki numunelerin yorulma ömürleri karşılaştırmaları Şekil 4.43.'te görülmektedir.



Şekil 4.43. Yüzey çatlaklı ve çatlaksız CTP ve CNT'li CTP numunelerin 0,5 gerilme oranındaki yorulma ömürleri

4.9.8. 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değeri iç basınç etkisi altında gerçekleştirilen yorulma deneylerinde yüksek gerilme oranı diye adlandırılır ve yorulma ömrünü diğer gerilme oranlarına göre oldukça azaltır. Yüksek gerilme oranı, numuneler arası farkın tespit edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu zorluk numunenin hasar aşamalarının gözlenmesine yansımıştır. Bu orandaki yorulma gerilmesi sayesinde hasar aşamaları nın gözlemi düşük gerilim seviyelerindeki aşamalara göre daha erken çevrim sayılarında meydana gelmiş ve daha fark edilir durumdadır.

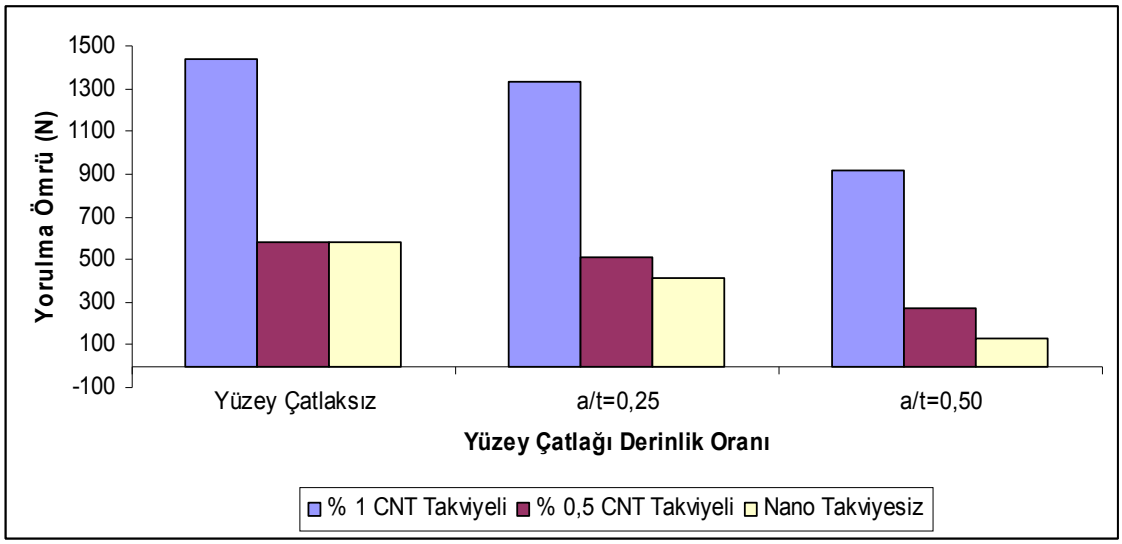
Yüzey çatlağı açılmamış olan numuneler değerlendirildiklerinde, % 0,5 oranında CNT'li CTP numuneler takviyesiz numunelere göre yorulma ömrü artışı gösterememiştir. Fakat tüm yüzey çatlağı ve tüm gerilme oranı şartlarında olduğu gibi % 1 oranda karbon nanotüp takviyesi bu şartlar altında da vermiş olduğu üstün nitelikleri göstererek yorulma ömrünü olumlu derecede etkilemiştir. Ağırlıkça % 1 oranındaki ilavenin gösterdiği yorulma ömrü artışı % 248,19'dur.

Karbon nanotüp takviyesi ile imal edilen nanokompozit malzemeler kendi arasında değerlendirildiklerinde % 1 oranında takviye edilen karbon nanotüplerin aralarındaki etkileşimi çok daha arttırdığı düşünülebilir.

a/t=0,25 oranında yüzey çatlaklı numunelerde uygulanan yorulma testlerinde yorulma ömürlerinde diğer gerilme oranlarına göre azalma meydana gelmiştir. %1 oranında CNT takviyesi ise büyük ölçüde bir artış yaşandığı gözlenmiştir. Bu artış nanokompozit numunelerin arasındaki yorulma ömrü değerlerinde de yaşanmıştır. Artış miktarı nano takviyesiz kompozit numunelere nazaran % 0,5 oranındaki ilavede % 23,71 iken, % 1 oranındaki ilavede % 324,93 oranındadır.

0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi tez kapsamında başvurulan en yüksek gerilme oranıdır. Yorulma ömrünü en çok etkileyen çatlak derinlik oranı da a/t=0,50 olan derin yüzey çatlağıdır. Her iki parametre aynı numuneler üzerinde bir araya getirildiğinde beklenildiği gibi yorulma ömürleri çok düşük değerler vermişlerdir. CNT takviyesi her iki oranda da dikkate değer bir yorulma ömrü artışı getirmektedir. Ağırlıkça % 0,5 oranındaki ilavenin gösterdiği ilerleme % 216,66'dır. % 1 oranındaki CNT takviyesinin nano takviyesiz olarak üretilmiş olan kompozit numunelerin yorulma ömürlerine göre artışı ise % 730.15 gibi büyük bir orandadır. Bu artış miktarı Şekil 4.45.'te görülmektedir.

Yüzey çatlaklı ve çatlaksız 0,6 gerilme oranındaki tüm numunelerin yorulma ömürleri şekil 4.44.'te görülmektedir.

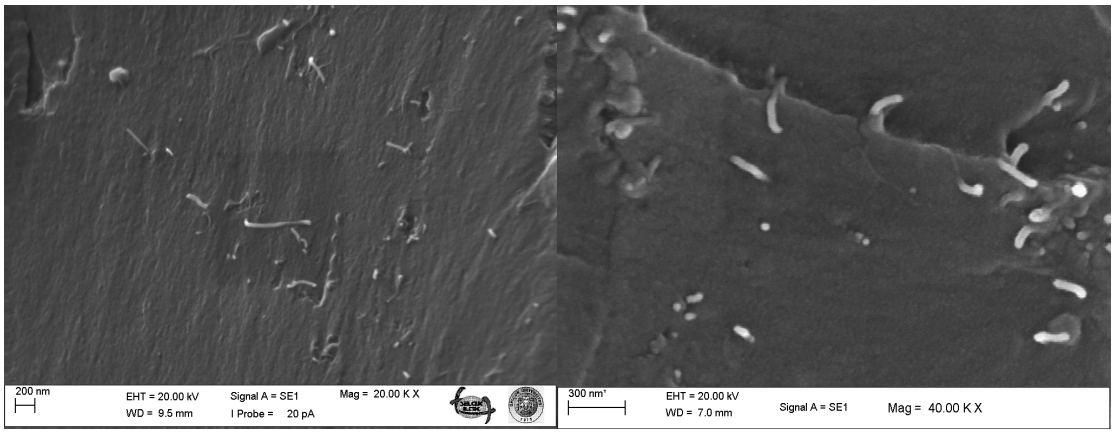


Şekil 4.44. Yüzey çatlaklı ve çatlaksız CTP ve CNT'li CTP numunelerin 0,6 gerilme oranında yorulma ömürleri

Tüm gerilme oranları değerlendirildiğinde % 1 oranında CNT takviyesi yorulma ömrünü oldukça arttırmıştır. Ayrıca karbon nanotüp takviyesi mukavemet artışı da sağlamaktadır.

Ayrıca tüm gerilme seviyelerinde CNT takviyesi yorulma ömrünü arttırmıştır. Bu artış CNT'lerin çatlak köprüleme işlemi ve matriks malzemeden pull-out şeklinde sıyrılmasından kaynaklanmaktadır. CNT'lerin bireysel olarak gösterdikleri pull out enerji emme mekanizmasından sorumlu tutulmaktadırlar (Loos 2013).

Şekil 4.45 (a) ve (b)'de ise kırılmış matriks yüzeyinden homojen dağılmış ve kırılma esnasında epoksi matriksten sıyrılmış durumdaki CNT'ler görülmektedir. Epoksi matriks içerisinde CNT'ler birbirlerinden ayrılmış şekilde gözlenmektedir. Bu ayrılma hali CNT'lerin matriks içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabildiğinin bir göstergesidir. Ayrıca matriksten sıyrılan CNT'lerin sıyrılma uzunlukları mikron seviyesine kadar çıkmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.45 (a)-(b) Karbon nanotüplerin matriks içinden sıyrılma görüntüleri

4.10. CTP Borularda İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° elyaf sarım açısına sahip üzerine farklı oranlarda eliptik yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış CTP borular 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi, 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi ve 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerlerinde patlama davranışını gösterene kadar iç basınç yorulma testine tabi tutulmuşlardır.

Yüzey çatlağı bölgesinde yapılan cidar kalınlığı incelemelerinde dboru numunesinin en dışında yer alan epoksi tabakasının yaklaşık olarak 0,2 mm olduğu görüldüğünde ayrıca ortalama cidar kalınlığının 2,2 mm olduğu bilinmektedir. ğine göre sığ yüzey, derin Buna göre *a/t*=0,25 oranında açılan eliptik yüzey çatlağının 1-1,5 tabaka arası kesim yaptığı, *a/t*= 0,50 oranındaki yüzey çatlağının ise 2,5-3 tabaka arası kesim yaptığı kabul edilmektedir. Numune kalınlığındaki bu azalmanın yorulma ömrünü etkileyip etkilemediği, etkilediyse ne şekilde etkilediği araştırılmıştır.

4.10.1. Nano Takviyesiz CTP Borularda 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

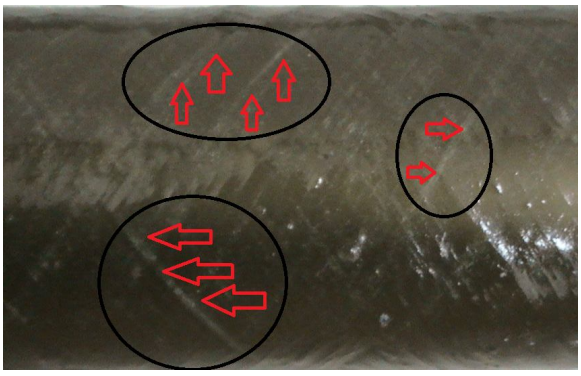
Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° elyaf sarım açılı nano takviyesiz kompozit boruların yorulma testleri 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde her iki yüzey çatlağı oranı da sonuç hasarında etkili olmuştur ve yorulma ömrü buna göre değişiklik göstermiştir. Hasar mekanizmasının nasıl gerçekleştiği ve aşamaları aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

Hasar aşamalarındaki ilk bölüm elyaf matriks ayrılmasıdır. Bu hasar aşaması literatürde Samancı (2004) ve Gemi (2004) tarafından da bildirilmiştir. Gerilme değerinin yaklaşık olarak 200 MPa gibi düşük bir değerde olması bu hasar aşamasının

diğer gerilme oranlarına nazaran daha yüksek çevrim sayılarında gerçekleşmesine sebep olmuştur. Bu hasar aşaması sarım yönleri + ve – yön diye tabir edilen elyaf demetlerinin birbiri üzerinde, artan iç basıncın bir sonucu olarak boru boyutlarındaki değişimle beraber hareket etmesi ile meydana gelmekte ve beyazlaşma ile kendisini göstermektedir. Beyazlaşma her iki yöndeki elyaf sarım doğrultusuna paralel şekildedir. Aşama çatlak derinlik oranına göre değişik çevrim sayılarında gerçekleşmiştir. Elyaf matriks ayrılması derin çatlak oranlı numunelerde 100 çevrimden itibaren sarım esnasında bant olarak sarılan elyaf demetlerinin arasında olacak şekilde görülmeye başlanmıştır. Yani beyazlaşmalar ilk olarak sadece iki elyaf bandı arasında başlamıştır. Bu işaret sığ yüzey çatlaklı numunede 500 çevrim sayısında görülmüştür. Şekil 4.46 (a), (b) ve (c)'de sırasıyla derin yüzey çatlaklı numune, sığ yüzey çatlaklı numune ve yüzey çatlaksız numune için elyaf matriks ayrılmaları görülmektedir.



(a) (b)



(c)

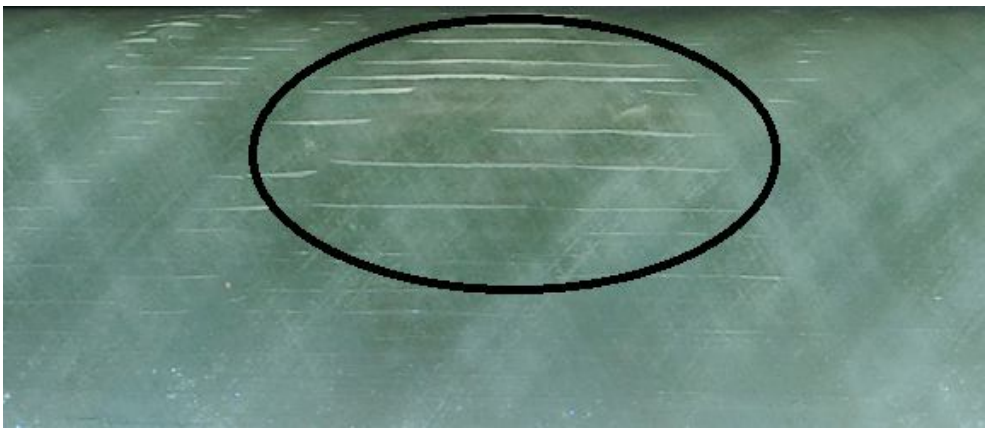
Şekil 4.46. Elyaf-matriks ayrılması örnekleri (a) *a/t*=0,25 yüzey çatlaklı numunede (b) *a/t*=0,50 yüzey çatlaklı numunede (c) Yüzey çatlaksız numunede

İç basıncın artıp azalması ve bunun 0,42 Hz frekans ile tekrarlanması sonucu elyaflar sarım demetleri halinde birbirleri üzerinde kayma hareketi yapmışlardır. Bu da elyaflar arası kayma gerilmesi oluşturmuştur. Reçinenin mukavemet değeri aynı zamanda tabakalar arası bağ kuvvetini temsil etmektedir (Samancı 2004). Bu kayma

gerilmesi de elyaf matriks ara yüzeyindeki bağ kuvvetini yenerek tabaka ayrılmasından önce elyaf matriks ayrılmasına sebep olmuştur.

Aynı zamanda boru çapının artması ile oluşan gerilme değeri matriks malzemesinin çekme mukavemetinin üzerine çıkılan bölgelerde dış yüzeyde, boru eksenine paralel çatlamalar meydana getirmiştir. Numunelerin yorulma gerilmelerine çok sayıda maruz kalmasının bir sonucu olarak matriks çatlamaları uzamış ve çoğalmıştır.

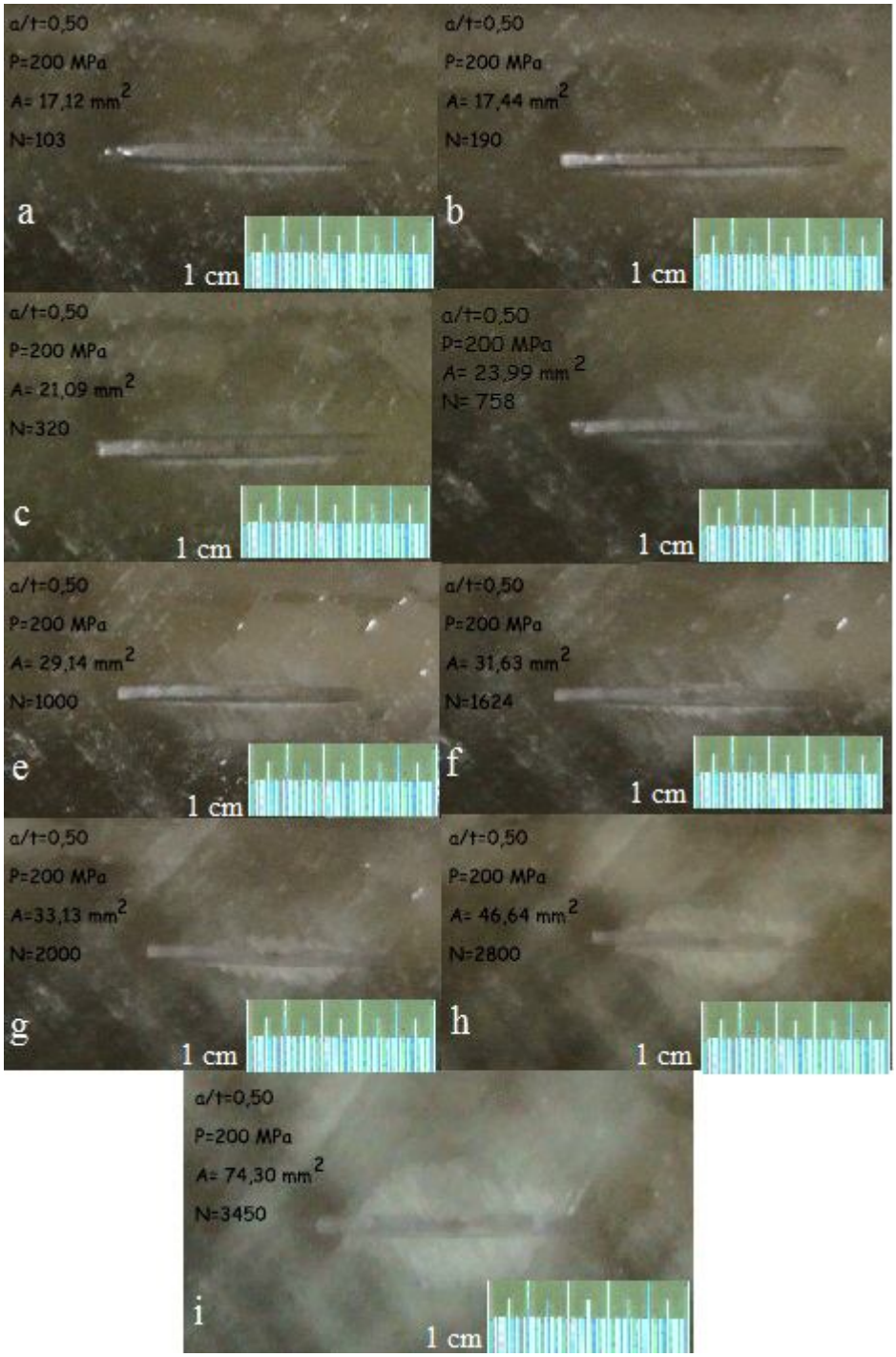
400 çevrimden itibaren nadiren görülen matriks çatlakları artan çevrim sayısı ile beraber hem sayı bakımından daha çok görülmüş hem de daha uzun boylu olarak meydana gelmiştir. Samancı (2004)'da benzer tarzda üretilen CTP numunelerde elyaf matriks ayrılması aşamasından sonra matriks çatlaklarının oluştuğunu ve artan çevrim sayısı ile çoğalarak uzadıklarını bildirmiştir. Numune dış yüzeyindeki matriks çatlakları öncelikli olarak numunenin deney seti içerisindeki duruşuna göre alt kısımlarında meydana gelmiş, ilerleyen çevrimlerde boru geneline yayılmıştır. Matriks çatlaklarının birbirlerine göre mesafeleri birkaç mm genişlikte olmasının yanı sıra boyları 1-2 cm'den birkaç cm'ye kadar değişiklik göstermektedir. Şekil 4.47.'de oluşan matrik çatlakları görülmektedir.



Şekil 4.47. Matriks çatlağı

Hem yüzey çatlağı bölgesindeki azalan tabaka sayısı durumu hem de imalat sürecinde yaşanması muhtemel olan aksaklıklar ortaya çıkarak numunenin zayıf bölgesini ön plana çıkarabilmektedir. Şekil 4.48.'de a/t= 0,50 oranında yüzey çatlağı açılmış olan CTP boruların çevrim sayılarına göre tabaka ayrılması durumu görülmektedir. Tabaka ayrılması alanları sırasıyla Şekil 4.48 (a)'da 17,12 mm^2, Şekil 4.48 (b)'de 17,44 mm^2, Şekil 4.48 (c)'de 21,09 mm^2, Şekil 4.48 (d)'de 23,99 mm^2, Şekil

4.48 (e)'de 29,14 mm^2, Şekil 4.48 (f)'de 31,63 mm^2, Şekil 4.48 (g)'de 33,13 mm^2, Şekil 4.48 (h)'de 46,64 mm^2 ve Şekil 4.48 (i)'de 74,30 mm^2 olarak ölçülmüştür.



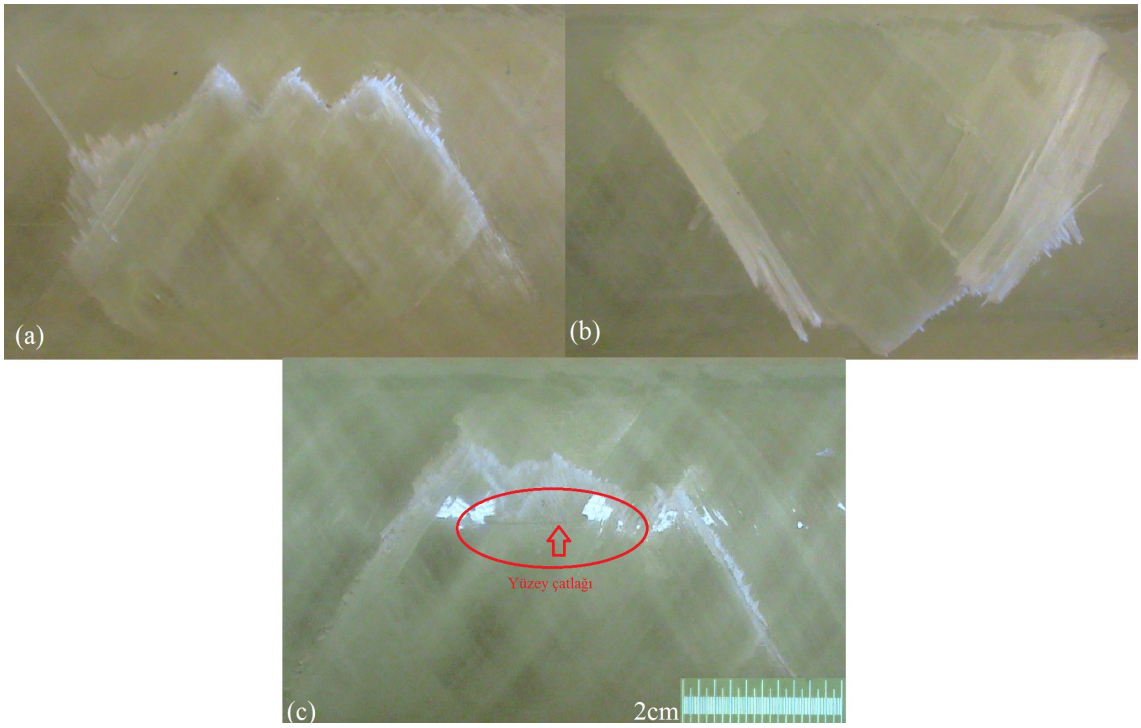
Şekil 4.48. Tabaka ayrılması durumu çevrim sayıları ve görüntüleri

Tabaka ayrılması alanı artan çevrim sayısı ile birlikte büyümektedir. Bu ayrılma sonucu numune iç yüzeyinden gelen basınçlı akışkan en zayıf bölgeden ya da bölgelerden dış yüzeye çıkmaya çalışmaktadır. Derin yüzey çatlaklı numunede en zayıf

bölge tabii ki çatlak bölgesidir. Derin yüzey çatlaklı numunelerde maksimum gerilme yüzey çatlağının altındadır. Bu sebeple tabaka ayrılması buradan oluşmaya başlamaktadır. Yüzey çatlağının alt kısmında kalan tabakalar üst taraftaki çatlak tarafından kesilen tabakalardan bağımsız hareket etmişlerdir. Bu şekilde Mod II'ye uygun olarak birbirleri üzerinde kayma yaparak kırılmaya tabakalar arası ayrılmanın oluşmasını sağlamışlardır. Buna göre nano takviyesiz numunelerinin Newman-Raju bağıntısından bağımsız olarak hareket ettiği söylenebilir.

Bu sonuçlar altında nano takviyesiz olarak imal edilmiş kompozit borularda *a/t*= 0,25 ve *a/t*= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne etkileri belirlenmiş oldu. Yüzey çatlağı açılmamış olan numune baz alınarak söylenebilir ki; *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranında % 1,92, *a/t*= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranında ise % 19,16 oranında azalma meydana gelmiştir.

Sonuç hasarı patlama şeklinde gerçekleşmiş, su jeti oluşumuna rastlanmamıştır. Bu sebepten dolayı su jeti çevrim sayısının sonuç hasarı olan elyaf kopması çevrim sayısı ile birlikte meydana geldiği kabul edilmektedir. Elyaf kopmaları Şekil 4.49. (a), (b) ve (c)'den görüleceği gibi patlama bölgesi uç kısmında yan yana sarılmış olan birkaç bantta yırtılma sonrasında ise en son yırtılan elyaf bantlarından elyaf sarım açısı doğrultusunda hasarın ilerlemesi şeklinde gerçekleşmiştir. Hasar aşamaları De Greef'in levhada yaptığı çalışmaya göre (2011) ilk çevrimlerde elyaf-matriks ara yüzeyinin ayrılması şeklinde başlamış, daha sonra gerilim dağılımı sebebiyle enine çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar matriks içine ilerleyip diğer çatlaklarla birleşebilmektedir. Sonuç hasarından önceki görülen aşamada ise tabakalar arasında ayrılmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.49. CTP numunelerin patlama görüntüleri (a) yüzey çatlaksız (b) sığ yüzey çatlaklı (c) derin yüzey çatlaklı

4.10.2. % 0,5 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° sarım açılı % 0,5 karbon nanotüp takviyeli CTP borular 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ değerindeki düşük gerilme oranında sonuç hasarına uğrayıncaya kadar test edilmişlerdir. Bu tür borular bu gerilme oranında eliptik yüzey çatlağına kısmen duyarsız davranmışlardır.

Hasar aşamalarındaki ilk önce elyaf matriks ayrılması şeklinde olmuştur. Fakat gerilme değerinin 200 MPa gibi düşük bir değerde olması bu hasar aşamasının nano takviye yapılmamış numunelerdeki gibi yüksek çevrim sayılarında gerçekleşmesine neden olmuştur. Ayrıca nano takviye bu hasar aşamasının meydana gelirken şeffaflığı engellediği için deney süresince gözlemlenememesine yol açmıştır. Yüzey çatlaklı ya da çatlaksız olan tüm numunelerdeki yorulma ömür sayıları nano takviyesiz numunelerinkine yakın sonuçlar vermiştir.

Matriks çatlaması deney esnasında nanokompozit borularda tespit edilememiştir. CNT'ler çatlak köprüleme yaparak kompozit malzemenin özelliklerini modifiye etmesi sonucu matriks çatlaklarının oluşumu nano takviyesiz numunelerdekine göre gecikir. Bu geciktirme durumu De Greef (2011) tarafından da bildirilmiştir.

Patlama hasarı çevrim sayısına yaklaşıldığında en dış tabakada elyaf sarım açısı doğrultusunda bir açılma görülmüştür. Söz konusu açılma çatlağın uç kısmındaki gerilme değerinin maksimum değer olduğu için buradan başlamıştır. Bu durum Mod I ile ilişkilendirilebilir ve Newman-Raju bağıntısı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Bu değişiklik derin yüzey çatlaklı numunede yaklaşık olarak 6500 çevrim sayısında gerçekleşmiştir ve Şekil 4.50.'de görülmektedir.

% 0,5 karbon nanotüp takviye edilmiş nanokompozit borular sonuç hasarında yüzey çatlağından patlama göstermeyerek yüzey çatlağına duyarsız kalmışlardır. Sığ (a/t=0,25) yüzey çatlağında son hasar çevrim sayısı yüzey çatlağı açılmamış olan numune ile oldukça yakın değer göstermiştir. Her iki çeşit nanokompozit boruda da derin yüzey çatlaklı boruya göre daha yüksek yorulma ömrü değerleri belirlenmiştir. Fakat bu sonuçlardaki artış diğer numunelerdeki artışlar kadar dikkate değer olmamıştır. Tarakçıoğlu (1992) ve Samancı (2004)'te belirtildiği gibi bazı numunelerde şişe boynu etkisinin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.50. % 0,5 CNT takviyeli CTP numunede çatlak ucu açılma görüntüsü (a/t=0,50)

Derin (a/t= 0,50) yüzey çatlaklı nanokompozit boru test esnasında çatlak bölgesinde Mod I'in etkisinde hasar başlamasına rağmen, boru uç kısımlarında meydana gelen eğilme nedeniyle oluşan eğilme gerilmesiyle numune bu bölgeden geniş bir bantta patlayarak son hasara ulaşmıştır. Elyaf matriks ayrılmaları yüzey çatlağından başlayarak boru uç kısmına doğru paralel şekilde ilerlemiştir. Bu ayrılmalardan yüzey çatlağına

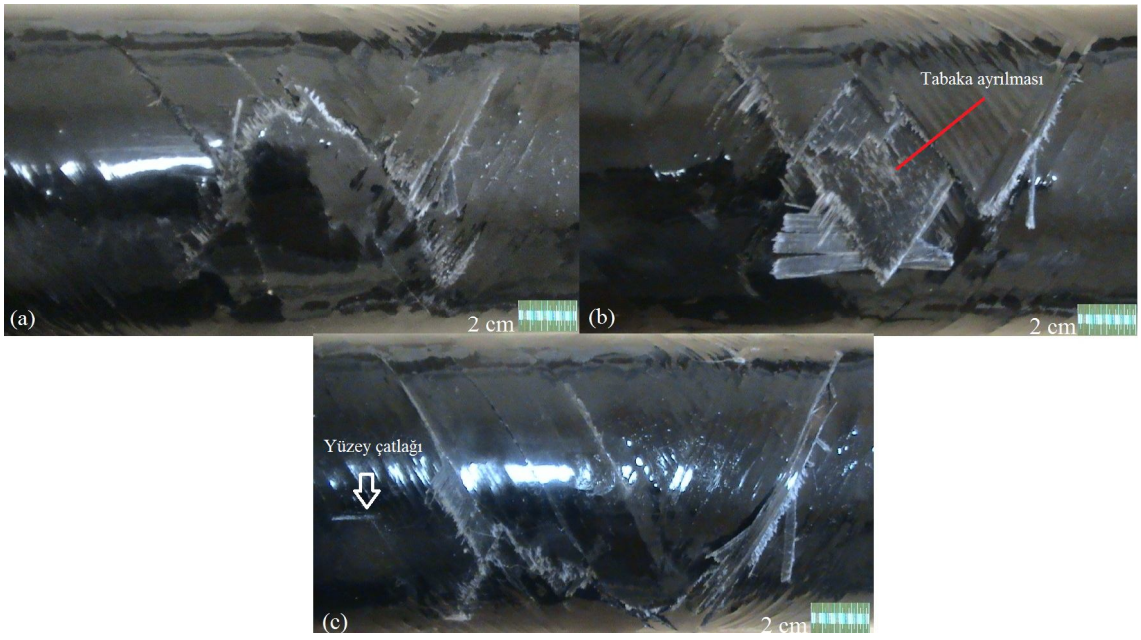
yaklaşık olarak 2 elyaf sarım bandı genişliği mesafede ilk hasar noktası başlamıştır. Şekil 4.51 (c).'de görüldüğü üzere elyaf sarım açısına paralel olacak şekilde birkaç bant halinde hasar meydana gelmiştir. Hasara uğramış bu bantlardan en zayıf olarak sarılanda ise patlama yaşanarak sonuç hasarı oluşmuştur.

Nano takviyesiz numunelerde görülen tabaka ayrılması aşaması CNT takviyeli numunelerde görülmemiştir. CNT'lerin çatlak köprüleme ve ikincil çatlak oluşturma gibi özellikleri çatlağın yönünü değiştirerek kırılma modu üzerinde etki yapmaktadır.

Buna göre *a/t*= 0,50 yüzey çatlağına sahip numuneler yüzey çatlağından kısmen etkilenerek ortalama 8279 çevrim sayısında, *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranlı numuneler ortalama 8879 çevrim sayısında, eliptik yüzey çatlağı açılmamış olan numuneler ise ortalama 9137 çevrim sayısında sonuç hasarına ulaşmışlardır. Her üç tip numune de patlama göstererek sonuç hasarı göstermişlerdir.

Bu sonuçlara göre ağırlıkça % 0,5 oranında çok duvarlı karbon nanotüp takviyesiyle imal edilmiş nanokompozit borulardaki yüzey çatlağının yorulma ömrüne bir etkisi olup olmadığı belirlenmiştir. % 0,5 çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi altında imal edilmiş nanokompozit borularda yüzey çatlağı açılmamış olan numuneye göre; *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı durumunda % 2.82, *a/t*= 0,50 yüzey çatlağı durumunda ise % 9.39 oranında azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.51.'de sırasıyla % 0,5 CNT takviyeli yüzey çatlaksız, *a/t*=0,25 ve *a/t*= 0,50 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumu görülmektedir.



Şekil 4.51. % 0,5 CNT takviyeli CTP borularda patlama hasarı görüntüleri (a) yüzey çatlaksız numune (b) *a/t*=0,25 yüzey çatlaklı (c) *a/t*=0,50 yüzey çatlaklı

4.10.3. % 1 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° sarım açılı % 1 karbon nanotüp takviyeli CTP borular düşük gerilme oranı diye adlandırılan 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde hasara uğrayana kadar test edilmişlerdir. Bu tür borular düşük gerilme oranında derin yüzey çatlağına duyarlı olarak davranış gösterirken sığ yüzey çatlağında duyarsız davranmışlardır.

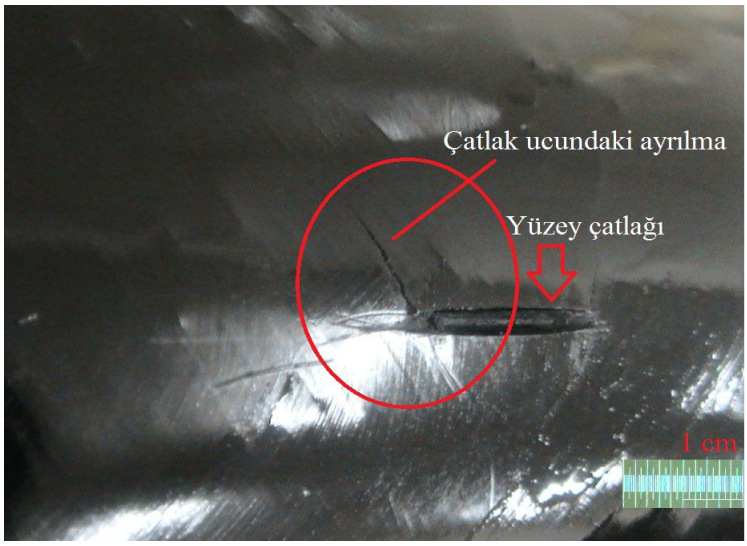
Bu gerilme oranında sistemdeki maksimum teğetsel gerilme 200 MPa'dır. Uygulanan iç basınç değerinin yani sonucunda gerilme değerinin çok daha düşük olması yorulma ömrünün diğer gerilme oranlarındaki aynı test numunelerinkine göre arttırmıştır. Yine düşük gerilme oranından dolayı diğer gerilme oranlı deneylerde çok nadir de olsa görülebilen hasar aşamaları çok net görülememiştir. Hatta yüksek çevrim sayılarına kadar hiçbir numune üzerinde hiçbir aşama belirtisi kaydedilememiştir.

Hasar aşamalarından ilk aşama olarak bahsedilen elyaf matriks ayrılması karbon nanotüp takviyesi yapılmamış olan numunelerdeki gibi beyazlaşma ile belli olmamıştır. Beyazlaşma yerine numune üzerinde çok hassas şekilde elyaf sarım doğrultusuna paralel olarak çıkıntılar gözlemlenmiştir.

Daha sonraki hasar aşaması olarak kabul edilen matriks çatlaması nanokompozit borularda karbon nanotübün boyar özellikte olması ve CNT'lerin matriksi modifiye etmesi sebebiyle tespit edilememiştir. Buradaki durum matriks çatlaklarının siyah zemin üzerinde yer alan siyah çizgi durumunda olmasıdır. Fakat tabaka ayrılması derin yüzey çatlaklı nanokompozit numunede çatlak uç kısmında meydana gelen maksimum gerilme sonucunda oluşan fiziki değişimlerle yaklaşık olarak 15000 çevrim sayısı civarında Şekil 4.52.'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

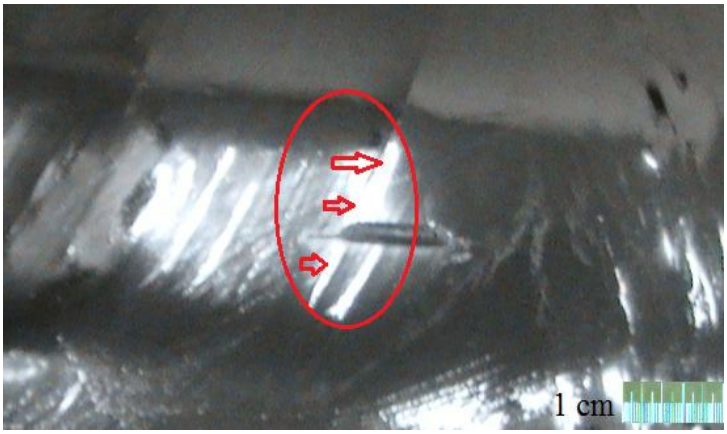
Derin yüzey çatlaklı numunedeki maksimum gerilme çatlak uç kısmında meydana geldiği için çatlak ucundan elyaf sarım açısınıa paralel olacak şekilde açılma oluşmuştur. Bu açılma Mod I'in etkisiyle oluşmuş olup Newman-Raju bağıntısına yakınlık gösterdiğinin işareti olarak görülebilir. Numune sonuç hasarı burada meydana gelen hasar sonucunda çatlak bölgesinden yırtılarak patlamasıyla oluşmuştur ve Şekil 4.55.'te görülmektedir. Nano takviyesiz numunelerde görülen tabaka ayrılması aşaması % 1 CNT takviyeli numunelerde görülmemiştir. CNT'lerin çatlak köprüleme ve ikincil çatlak oluşturma gibi özellikleri çatlağın yönünü değiştirerek kırılma modu üzerinde

yaptığı etki % 0,5 CNT takviyeli numunelerdekine ilaveten hasarı bu bölgeden devam ettirmiş ve sonuç hasarının yüzey çatlağı bölgesinden Mod I etkisiyle oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 4.52. % 1 CNT takviyeli CTP boru derin yüzey çatlaklı (*a/t*=0,50) numune 15000 çevrim çatlak ağzı ayrılması

Aynı durum derin yüzey çatlaklı numunedeki kadar net olmamakla birlikte 19000 çevrim civarında *a/t*=0,25 oranında yüzey çatlaklı nanokompozit numunede de Şekil 4.53.'teki gibi gözlemlenmeye başlanmıştır. Fakat numune aynı anda boru uç kısımlarından da oluşan eğilme gerilmesinin etkisiyle bu bölgeden sonuç hasarına uğramıştır. Bu sebeple sonuç hasarına son noktayı koyan unsur yüzey çatlağı etrafındaki açılma olmamıştır.



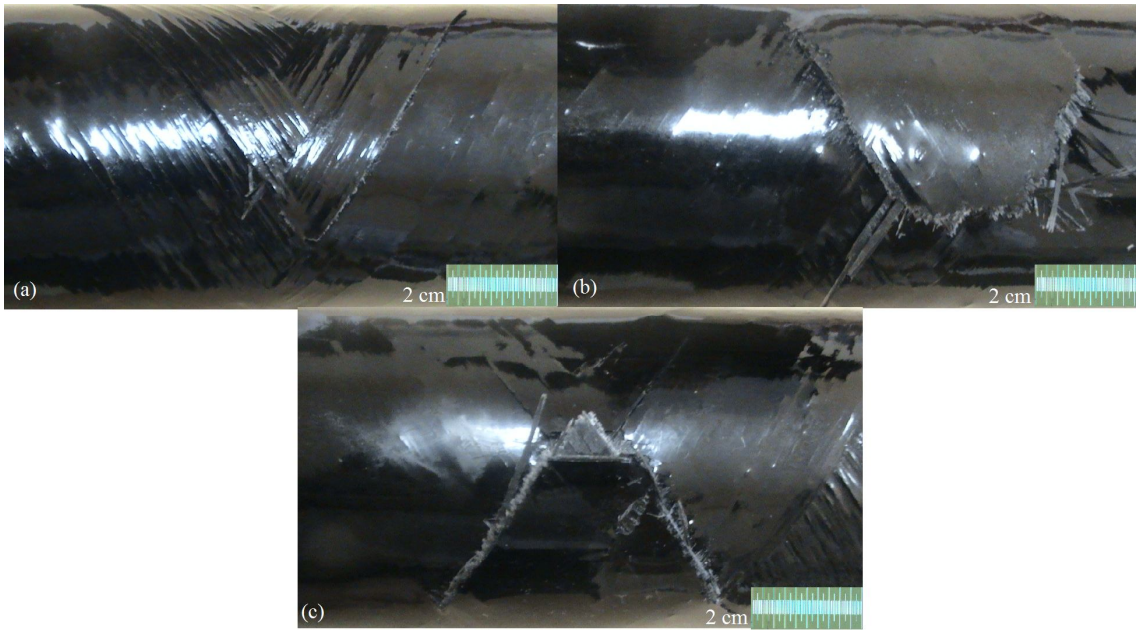
Şekil 4.53. % 1 CNT takviyeli CTP boru sığ yüzey çatlağı (a/t=0,25) 19000 çevrim

Yorulma çevrim sayısı tüm yüzey çatlağı çeşitlerinde kendi gerilme oranı içerisinde diğer tüm numunelerle kıyaslandığında son derece yüksek değerler elde edilmiştir. Elde edilen yorulma ömrü sonuçları karbon nanotüp takviyeli nanokompozit numuneler içerisinde de yüzdesel içeriğinden dolayı yüksek artış sağlamıştır.

% 1 karbon nanotüp takviye edilmiş nanokompozit borulardan sığ yüzey çatlağı (*a/t*=0,25) açılmış olan nanokompozit numune Şekil 4.55.(b)'de görüldüğü gibi eğilme gerilmesine maruz kalan bölgeden patlama ile son hasara uğrayarak yüzey çatlağına duyarsız davranmıştır. Fakat *a/t*=0,50 yüzey çatlaklı numune yüzey çatlağı bölgesinden hasar görerek duyarlılık göstermiştir. Bu sonuç hasarı patlama çevrim sayısına ulaşmadan önce çatlak bölgesinde meydana gelen fiziksel değişimler ile belli olmuştur. Hem yüzey çatlaksız hem de sığ yüzey çatlaklı nanokompozit boru, derin yüzey çatlaklı (*a/t*= 0,50) boruya göre beklenildiği gibi daha iyi performans göstermiştir. Bu performansta sığ yüzey çatlaklı numunenin yüzey çatlağına duyarsız kalarak çatlaksız bir numune gibi davranış göstermesinin de etkisi vardır.

Bu sonuçlar ışığında ağırlıkça % 1 çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi altında imal edilmiş nanokompozit borularda *a/t*= 0,25 ve *a/t*= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne bir etkisi olup olmadığı tespit edilmiş oldu. % 1 çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi altında imal edilmiş nanokompozit borularda yüzey çatlağı açılmamış olan numuneye göre; *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranında % 3.96, *a/t*= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranında ise % 35.99 oranında azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.54.'te % 1 CNT takviyeli yüzey çatlaksız, *a/t*= 0,50 ve *a/t*=0,25 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumları görülmektedir.



Şekil 4.54. % 1 CNT takviyeli CTP boru sonuç hasarları (a) yüzey çatlaksız (b) *a/t*=0,25 oranında yüzey çatlaklı (c) *a/t*=0,50 oranında yüzey çatlaklı

4.10.4. Nano Takviyesiz CTP borularda 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° elyaf sarım açılı nano takviyesiz kompozit boruların yorulma testleri 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde tüm yüzey çatlağı oranları sonuç hasarında etkili olmuştur ve yorulma ömrü buna göre değişiklik göstermiştir. Hasar mekanizmasının nasıl gerçekleştiği ve aşamaları aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

Hasar aşamalarındaki ilk bölüm yine elyaf matriks ayrılmasıdır. Gerilme değeri 250 MPa'dır. Bu hasar aşaması artan iç basıncın bir sonucu olarak boru boyutlarındaki değişimle beraber elyaf demetlerinin birbiri üzerinde hareket etmesi ile meydana gelmektedir. Bu durumda elyaflar arası kayma gerilmesi oluşturmuş, bu kayma gerilmesi de elyaf matriks ara yüzeyindeki bağ kuvvetini yenerek elyaf matriks ayrılmasına sebep olmuştur. Elyaf ile matriks arasındaki beyazlaşma ile fark edilmektedir. Beyazlaşma her iki yöndeki elyaf sarım doğrultusuna paralel olarak gerçekleşmiştir. Bu gerilme oranı için beyazlaşma belirtileri ilk olarak 95 çevrim sayısında görülmüş, 133 çevrim sayısında beyazlaşmalar numune genelinde belirginleşmiştir. Elyaf matriks ayrılmaları Şekil 4.55. ve Şekil 4.56.'de görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.55. CTP boruların 100 çevrim yorulma görüntüleri (a) *a/t*=0,50 yüzey çatlaklı (b) *a/t*=0,25 yüzey çatlaklı



Şekil 4.56. Yüzey çatlaksız kompozit boruların 100 çevrim yorulma görüntüsü

Daha sonraki çevrim sayılarında yorulma gerilmesi değeri epoksinin çekme mukavemeti değerinden daha yüksek olduğu için matriks malzemesinin çatlama şeklinde ayrılmasına neden olmuştur. Bu ayrılma çok sıklıkla görülmemesinin yanı sıra ince çizgiler şeklinde boru eksenine paralel doğrultuda kendisini belli etmektedir. Matriks çatlakları çevrim sayısının artmasıyla birlikte sayıca artmış ve boyca uzamışlardır. Şekil 4.57.'de nano takviyesiz numunelerde deney esnasında fark edilen ilk matriks çatlağı görülmektedir. Şekil 4.59.'da ise nano takviyesiz epoksili *a/t*= 0,50 ve *a/t*=0,25 oranlarında yüzey çatlağı açılmış olan CTP boruların çevrim sayılarına göre tabaka ayrılması durumu görülmektedir.



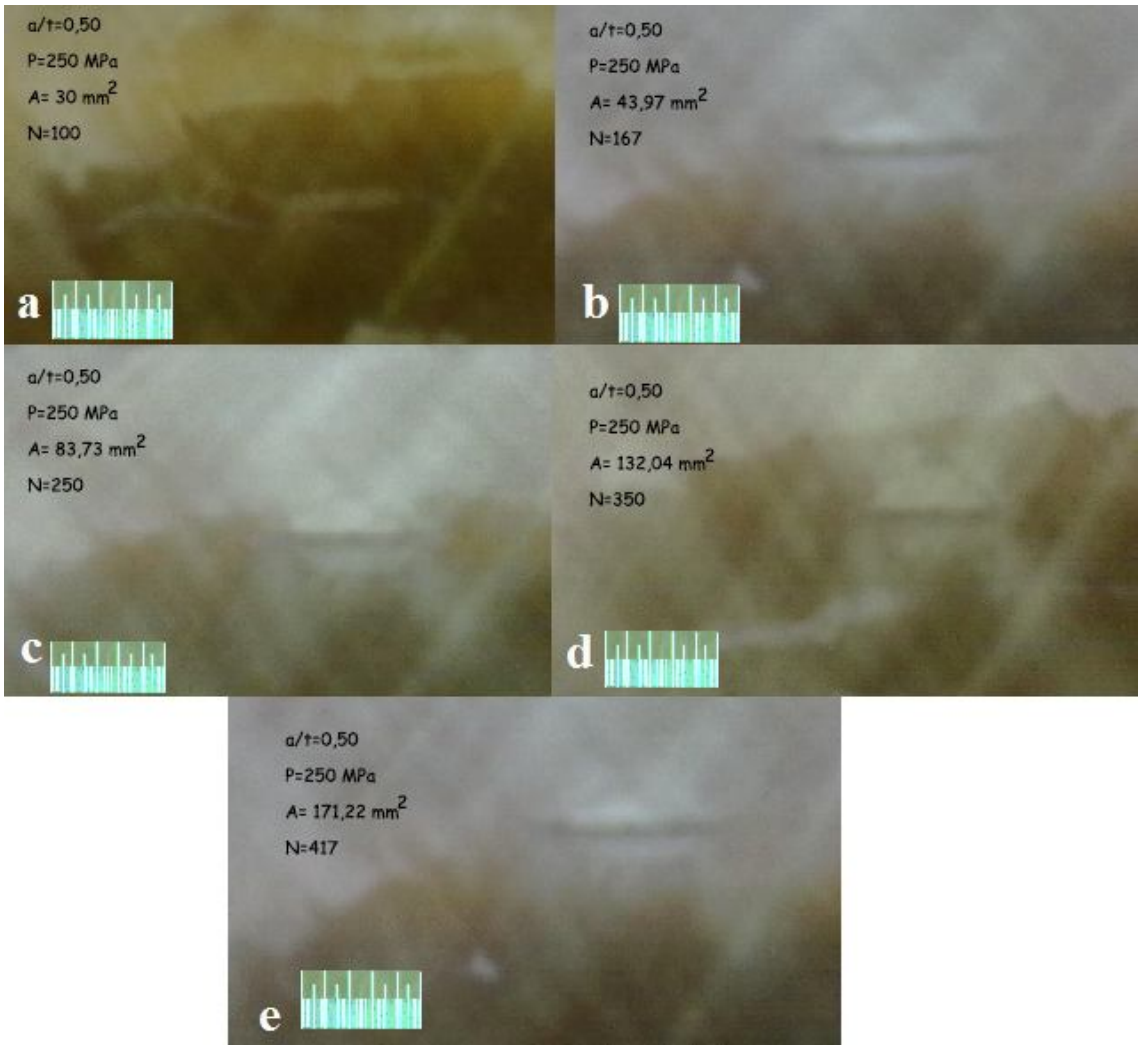
Şekil 4.57. Nano takviyesiznumune matiks çatlağı

Tabaka ayrılması alanı artan çevrim sayısı ile birlikte artış göstermektedir. Bu ayrılma sonucu numune iç yüzeyinden gelen basınçlı akışkan en zayıf bölgeden ya da bölgelerden dış yüzeye çıkmaya çalışmaktadır. Bu durum genel olarak derin yüzey çatlaklı numunelerde daha düşük çevrim sayılarında oluşmaktadır ve çatlak bölgesinde görülmektedir.

Sonuç hasarına kadar hasar aşamalarından çok az miktarda terleme görülmüştür. Damlacık oluşumu ve su jetinin meydana geldiği fark edilememiştir. Bu sebepten dolayı su jeti çevrim sayısının sonuç hasarı olan elyaf kopması çevrim sayısı ile birlikte meydana geldiği kabul edilmektedir. Nano takviyesiz olarak imal edilmiş kompozit borularda hem derin yüzey çatlaklı numunede hem de sığ yüzey çatlaklı numunede, sonuç hasarı yüzey çatlağı bölgesinde oluşmuştur. Elyaf kopmaları Şekil 4.60.'dan görüleceği gibi elyaf sarım açısına paralel doğrultuda gerçekleşmiştir. Sonuç hasarı sadece birkaç elyaf demetinin kopmasıyla üçgen şeklinde meydana gelmek yerine son çevrim sayısındaki iç basınç gerilmesiyle yan yana sarılan birkaç elyaf demetinin aynı anda kopması sonucu ve takiben elyaf sarım açısına paralel yırtılmalar ile oluştuğu görülmektedir.

Kırılma tipi olarak düşünüldüğünde; Mod I, Mod II ve Mod III'ün tamamının meydana geldiği söylenebilir. Her çevrimde gerçekleşen basınç artışı sonucu boru çapının artışı birbiri üzerine sarılan elyaf tabakalarının ve eliptik yüzey çatlağının Mod I durumunda açılmaya maruz kaldığı söylenebilirken, gerçekleşen elyafa paralel gerilmenin eksenel bileşeni de Mod III kırılma tipi ile yırtılma etkisi yapmaktadır. Bu etkilerin yanı sıra yüzey çatlağı ile kesilen tabakalarla kesilmeyen alt tabaka arasında

oluşan izafi hareket nedeniyle tabakalar arası kayma gerilmeleri oluşur. Bu da Mod II diye adlandırılır. Bu durum daha önceki yapılan çalışmalar (Samancı 2004) ile de desteklemektedir. Fakat nano takviyesiz numunelerin 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında gerçekleştirilen yorulma testlerinde tabaka ayrılması olayının görülmesi yüzey çatlağı altında kalan kesilmemiş tabakalar ile üst taraftaki kesilen tabakaların birbiri üzerinde hareket etmesiyle delaminasyonlar çatlak dibinden başlamıştır ve böylece oluşan kaymanın daha etkin olduğunu göstermektedir. Bu duruma göre bu tür numuneler için Mod II'nin daha etkin olduğu ve Newman-Raju bağıntısından bağımsız hareket ettiği söylenebilir. Şekil 4.58.'de derin yüzey çatlağı açılan numunelerin çevrim sayısına göre tabaka ayrılması görüntüleri verilmiştir.



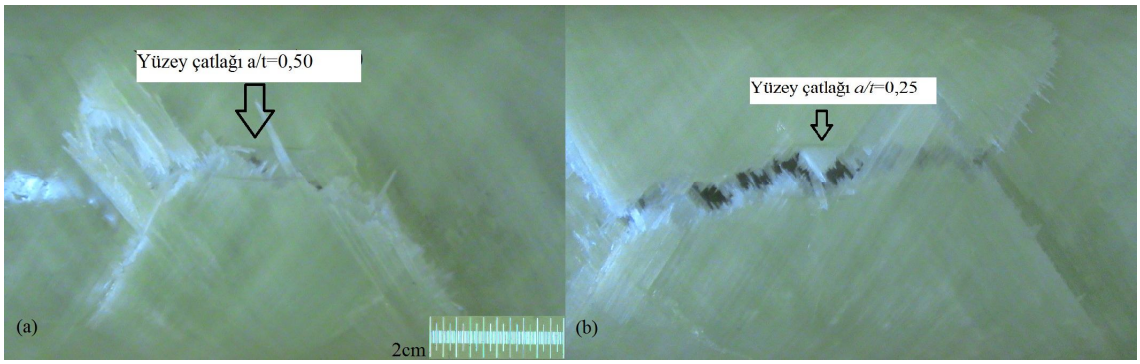
Şekil 4.58. Nano takviyesiz derin yüzey çatlaklı CTP borularda tabaka ayrılmaları

Bu sonuçlar altında nano takviyesiz imal edilmiş kompozit borularda *a/t*= 0,25 ve *a/t*= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne etkileri belirlenmiş oldu. Buna göre yüzey çatlağı açılmamış olan numunelere göre yorulma ömürleri *a/t*= 0,25 oranında yüzey çatlağı açılan numunelerde % 14.46, *a/t*= 0,50 yüzey çatlağına sahip numunelerde ise % 60.34 oranında azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.59.'da yüzey çatlaksız Şekil 4.60. (a) ve (b)'de ise *a/t*= 0,50 ve *a/t*=0,25 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumu görülmektedir. Şekil 4.61 (a) ve (b)'de her iki yüzey çatlağının sonuç hasarı bölgesindeki durumu görülmektedir. Yüzey çatlaksız boru şişe boynu oluşumunun etkisiyle eğilme gerilmesine maruz kalarak boru uç kısmından hasar görmüş, yüzey çatlaklı borular ise yüzey çatlağının etkisiyle çatlak bölgesinden sonuç hasarına ulaşmışlardır.



Şekil 4.59. Nano takviyesiz ve yüzey çatlaksız CTP numune sonuç hasarı



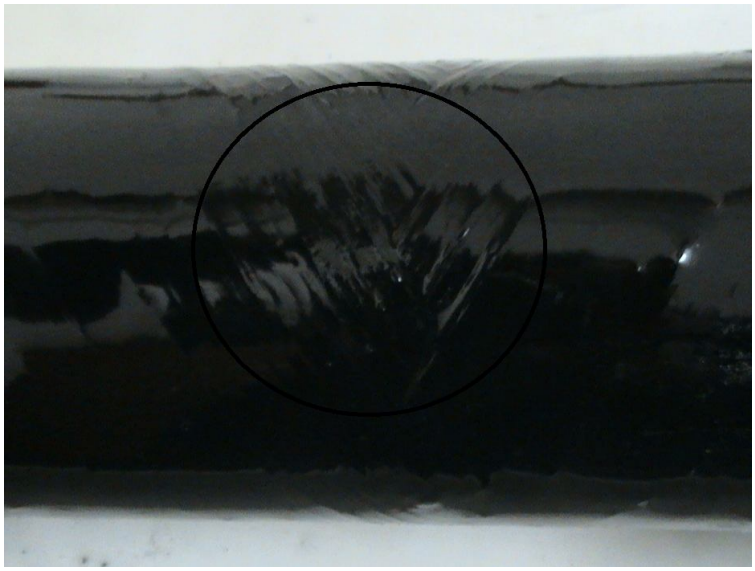
Şekil 4.60. Nano takviyesiz CTP numuneleri sonuç hasarları

(a) *a/t*= 0,25 (b) *a/t*= 0,50

4.10,5. % 0,5 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° sarım açılı % 0,5 karbon nanotüp takviyeli CTP borular yüksek gerilme oranı diye adlandırılan 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında hasara uğrayana kadar test edilmişlerdir. Bu tür borular 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde eliptik yüzey çatlağına duyarsız davranmışlardır.

Hasar aşamalarındaki ilk bölüm tüm deney numunelerinde olduğu gibi elyaf matriks ayrılmasıdır. Gerilme değerinin yaklaşık olarak 250 MPa bu hasar aşamasının 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerine göre daha düşük çevrim sayılarında gerçekleşmesine sebep olmuştur. Fakat çevrim sayıları aynı gerilme oranındaki nano takviyesiz numunelere kıyasla beklenildiği gibi daha fazladır. Fakat elyaf matriks ayrılması karbon nanotüp takviyesi yapılmamış olan numunelerdeki gibi beyazlaşma ile belli olmamıştır. Karbon nanotüplerin boyar özellikte olması bu durumda etkili olmuştur. CNT takviye edilen numunelerin şeffaf olmadıkları için hasar aşamalarının işaretlerinin benzer şekilde nano takviyesiz numunelerdeki gibi belli olamadıkları Böger (2010) tarafından da belirtilmiştir. Şekil 4.61.'de görüldüğü gibi beyazlaşma yerine numune üzerinde çok hassas şekilde elyaf sarım doğrultusuna paralel çıkıntılar gözlemlenmiştir. Bu çıkıntılar, takviyesiz borularda da gözlenmiş fakat beyazlaşma çok belirgin olduğundan dolayı elyaf matriks ayrılmasının işareti olarak alınmıştır.



Şekil 4.61. % 0,5 CNT Takviyeli CTP numunedeki elyaf matriks ayrılması işareti

Daha sonraki hasar aşaması olarak kabul edilen matriks çatlaması nanokompozit borularda tespit edilememiştir. Bunun nedeni nanokompozit numunelerin renklerinden

dolayı test esnasında oluşan muhtemel matriks çatlaklarının fark edilmesine imkan vermemesidir.

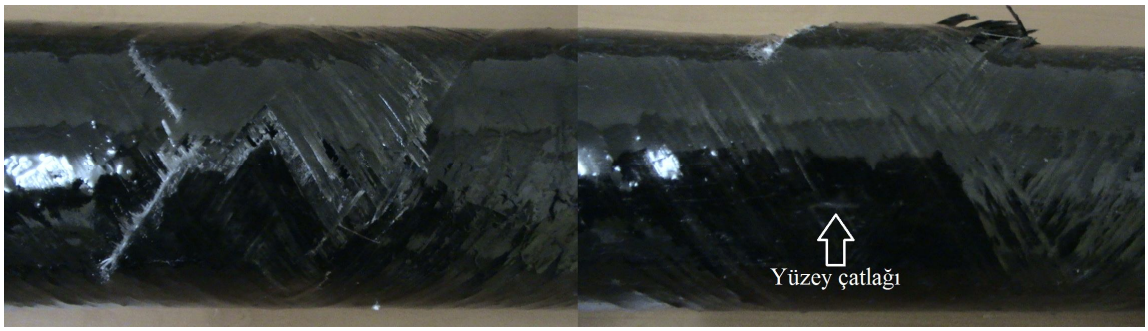
% 0,5 karbon nanotüp takviye edilmiş nanokompozit borular her iki çatlak derinlik oranında da yüzey çatlağına duyarsız kalmışlardır. Sığ (a/t=0,25) yüzey çatlağında son hasar çevrim sayısı yüzey çatlağı açılmamış olan numune ile benzer özellik göstermiştir. Her iki çeşit nanokompozit boru da derin yüzey çatlaklı boruya göre daha iyi yorulma ömrü göstermiştir. Derin (a/t= 0,50) yüzey çatlaklı nanokompozit boruda test esnasında borunun birden fazla yerinde hasar belirtileri gözlenmiş fakat çatlak bölgesi yerine başka bir kısımdan patlama ile son hasara ulaşılmıştır.

Elde edilen yorulma ömrü sonuçlarına göre ağırlıkça % 0,5 CNT takviye edildiği durumlarda a/t= 0,25 ve a/t= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne bir etkisi olup olmadığı tespit edilmiş oldu. a/t= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranı yorulma ömrünü düşürmezken, a/t= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranı % 20,55 oranında düşürmüştür.

Şekil 4.62., Şekil 4.63. (a) ve (b)'de ve Şekil 4.64.'te % 0,5CNT takviyeli yüzey çatlaksız, a/t= 0,25 yüzey çatlaklı nbumunenin patlama kısmı ve yüzey çatlağı kısmı ile a/t=0,50 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumu görülmektedir.



Şekil 4.62. % 0,5 CNT'li CTP numune sonuç hasarı



(a) (b)

Şekil 4.63. % 0,5 CNT'li *a/t*= 0,25 yüzey çatlaklı CTP numune sonuç hasarı



Şekil 4.64. % 0,5 CNT'li a/t= 0,50 yüzey çatlaklı CTP numune sonuç hasarı

4.10.6. % 1 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° sarım açılı % 1 karbon nanotüp takviyeli CTP borular 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde hasara uğrayana kadar test edilmişlerdir. Bu tür borular bu gerilme değerinde eliptik yüzey çatlağına sığ yüzey çatlağında duyarsız davranmışlardır.

Hasar aşamalarındaki ilk aşama diğer takviye oranlarında olduğu gibi elyaf matriks ayrılmasıdır. Teğetsel gerilmenin 250 MPa olması sebebiyle sonuç hasarının oluşması 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerindeki numunelerinkine göre daha düşük çevrim sayılarında meydana gelmiştir. Fakat yorulma çevrim sayıları borular 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde test edilen tüm numuneler içerisinde değerlendirildiğinde en yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Yüksek sonuçların elde edilmesi tüm yüzey çatlağı durumu için geçerlidir.

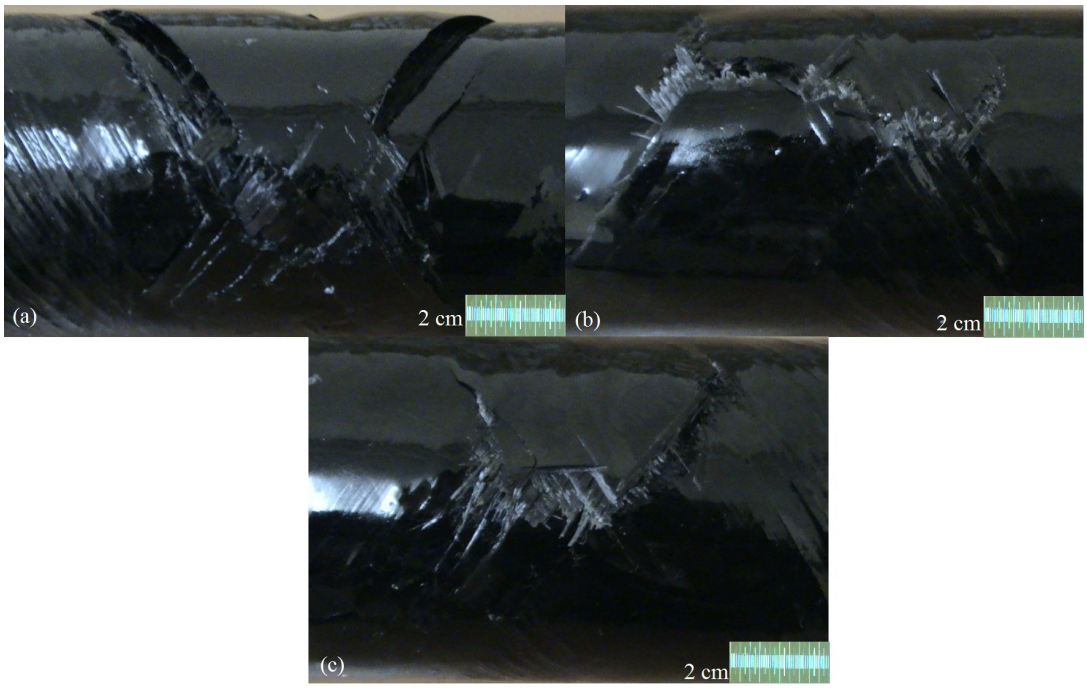
Numune dış yüzeylerinde beliren çıkıntılar karbon nanotüplerin epoksi matriks içerisine ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılması ile başlamıştır. Karbon nanotüplerin matriks malzeme içerisine karıştırılması esnasında viskozitede meydana gelen düşüş numune malzeme sarım sıcaklığına getirildikten sonra artış göstermemiştir. Sarım işlemi bu halde gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple numune dış yüzeyinde elyaf sarım doğrultusu belli olmaktadır.

Daha sonraki hasar aşaması olarak kabul edilen matriks çatlaması diğer nanokompozit numunelerde olduğu deney süresi içerisinde gibi fark edilememiştir.

% 1 karbon nanotüp takviye edilmiş nanokompozit borulardan sığ yüzey çatlağı (a/t=0,25) açılmış olan nanokompozit numune eğilme gerilmesine maruz kalan bölgeden patlama ile sonuç hasarına uğrayarak yüzey çatlağına duyarsız kalmıştır. Fakat derin yüzey çatlaklı nanokompozit boru yüzey çatlağı bölgesinden son hasara uğraması sebebiyle yüzey çatlağına karşı duyarlı olduğunu göstermiştir. Hem yüzey çatlağı açılmamış hem de a/t=0,25 oranında açılmış olan nanokompozit boru da derin yüzey çatlaklı (a/t= 0,50) boruya göre daha yüksek yorulma ömürleri göstermişlerdir. Bunda derin yüzey çatlağının açılmış olması ve derin yüzey çatlaklı numunelerin çatlak bölgesinden hasara uğraması etkili olmuştur.

Elde edilen yorulma ömrü sonuçları % 1 karbon nanotüp takviyeli nanokompozit numuneler içerisinde de yüzdesel içeriğinden dolayı takviyesiz numunelere ve % 0,5 CNT takviyeli numunelere göre oldukça yüksektir. Bu sonuçlara göre ağırlıkça % 1 CNT takviye edildiği durumlarda a/t= 0,25 ve a/t= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne bir etkisi olup olmadığı tespit edilmiş oldu. Yüzey çatlaksız nanokompozit borulara nazaran a/t= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranı yorulma ömrünü % 65.18, a/t= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranı ise % 40.00 oranında azaltmıştır.

Şekil 4.65. (a), (b) ve (c)'de sırasıyla %1 CNT takviyeli yüzey çatlaksız, a/t= 0,25 ve a/t=0,50 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumu görülmektedir.

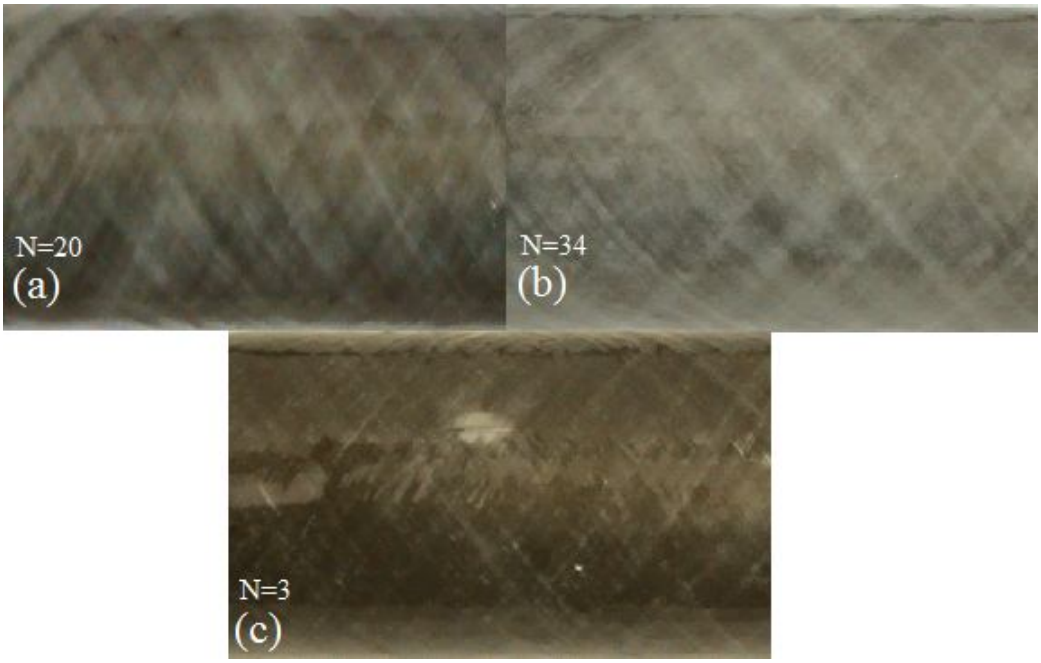


Şekil 4.65. % 1 CNT'li CTP numunelerin sonuç hasarları (a) yüzey çatlaksız (b) *a/t*= 0,25 (c) *a/t*= 0,50

4.10.7. Nano Takviyesiz CTP borularda 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

Eliptik yüzey çatlaklı ve çatlaksız ±55° elyaf sarım açılı nano takviyesiz kompozit boruların yorulma testleri 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde yüzey çatlağı sonuç hasarında etkili olmuştur ve yorulma ömürleri yüzey çatlağına göre değişiklik göstermiştir. Hasar mekanizmasının nasıl gerçekleştiği ve aşamaları aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir.

İlk hasar aşaması sayılan elyaf matriks ayrılması, gerilme değerinin 300 MPa gibi yüksek bir değerde olması sonucu çok erken çevrim sayılarında gerçekleşmiştir. Diğer gerilme oranlarına göre oldukça çabuk görülen bu aşama derin (*a/t*=0,50) yüzey çatlağı durumunda ilk çevrimlerden itibaren meydana gelmeye başlamıştır ve yine elyaf sarım doğrultusunda oluşan beyazlaşmalar ile fark edilmektedir. Bu beyazlıklar numune geneline yayılmıştır. Yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış numunelerin bu aşamadaki durumları Şekil 4.66. (a), (b) ve (c)'de görülmektedir.



Şekil 4.66. İlk beyazlaşma belirtileri (a) yüzey çatlaksız numune, (b) *a/t*= 0,25 yüzey çatlaklı numune, (c) *a/t*= 0,50 yüzey çatlaklı numune

Uygulanan iç basıncın artması ile birlikte numunelerdeki çap ve boy değişimi diğer gerilme oranlarındakinden daha fazla gerçekleşmiştir. Dolayısıyla elyaf sarım demetlerinin birbiri üzerinde açısal hareket yaparak meydana getirdiği kayma daha fazla olmuştur. Bu sebeple elyaf matriks arasındaki bağ kuvveti daha düşük çevrim sayılarında yenilmiştir. Ayrıca bu olay hem yüksek gerilme oranı hem de derin yüzey çatlağı durumu aynı numune teste tabi tutulması şartı altında değişiklik göstermiştir ve elyaf – matriks ayrılması yaşanırken aynı anda yüzey çatlağı bölgesinde tabaka ayrılması da başlamıştır. Özellikle beyazlaşma yoğunlaştığı bölgelerde boru iç yüzeyinde delaminasyonun etkisiyle ince kılcal deliklerin oluştuğu ve iç yüzeyden dış yüzeye doğru bir veya daha çok yol izlediğini, her çevrimle birlikte basınçlı akışkan altında açılıp kapandığı ve hasar başlangıçlarına neden oldukları Tarakçıoğlu ve ark. (2004) tarafından bildirilmiştir. Aynı zamanda yorulma gerilmesi değeri de epoksinin çekme mukavemeti değerinden daha yüksek olduğu için matriks malzemesinin çatlama şeklinde ayrılmasına neden olmuştur.

Tabaka ayrılması alanı artan çevrim sayısı ile birlikte artış göstermektedir. Bu ayrılma sonucu numune iç yüzeyinden gelen basınçlı akışkan en zayıf bölgeden ya da bölgelerden oluşan mikro delikleri kullanarak dış yüzeye çıkmaya çalışmaktadır. Bu durum genel olarak derin yüzey çatlaklı numunelerde daha kısa sürede yani daha az

çevrim sayılarında oluşmaktadır ve çatlak bölgesinde görülmektedir. Çatlak bölgesinde çatlak boyuna paralel olacak yönde çatlak boyunu aşmazken yüzey çatlağına dik doğrultuda patlama hasarı meydana gelene kadar gelişme göstermiştir.

Nano takviyesiz imal edilen kompozit borularda hem derin yüzey çatlaklı numunede hem de sığ yüzey çatlaklı numunede tabaka ayrılması sonucu numune sonuç hasarı yüzey çatlağı bölgesinde meydana gelmiştir. Sonuç hasarına kadar hasar aşamalarından çok az miktarda terleme şeklinde görülmektedir. Damlacık oluşumu ve su jeti gerilme oranının yüksek olmasından dolayı derin yüzey çatlaklı numune haricinde meydana gelmemiştir. Derin yüzey çatlağı yüksek gerilme oranında çok fazla etkili olmuştur. Burada çatlak ağzında Şekil 4.67.'deki gibi gözle görülür şekilde açılma meydana gelmiştir. Tabakalar arası ayrılmanın hızlı bir şekilde oluşumu ve çatlak ağzının Mod I durumundaki şekil değiştirmesi sonuç hasarında patlama şeklinde değil su jeti şeklinde görülmesine neden olmuştur.



Şekil 4.67. Nano takviyesiz CTP borularda derin yüzey çatlağı

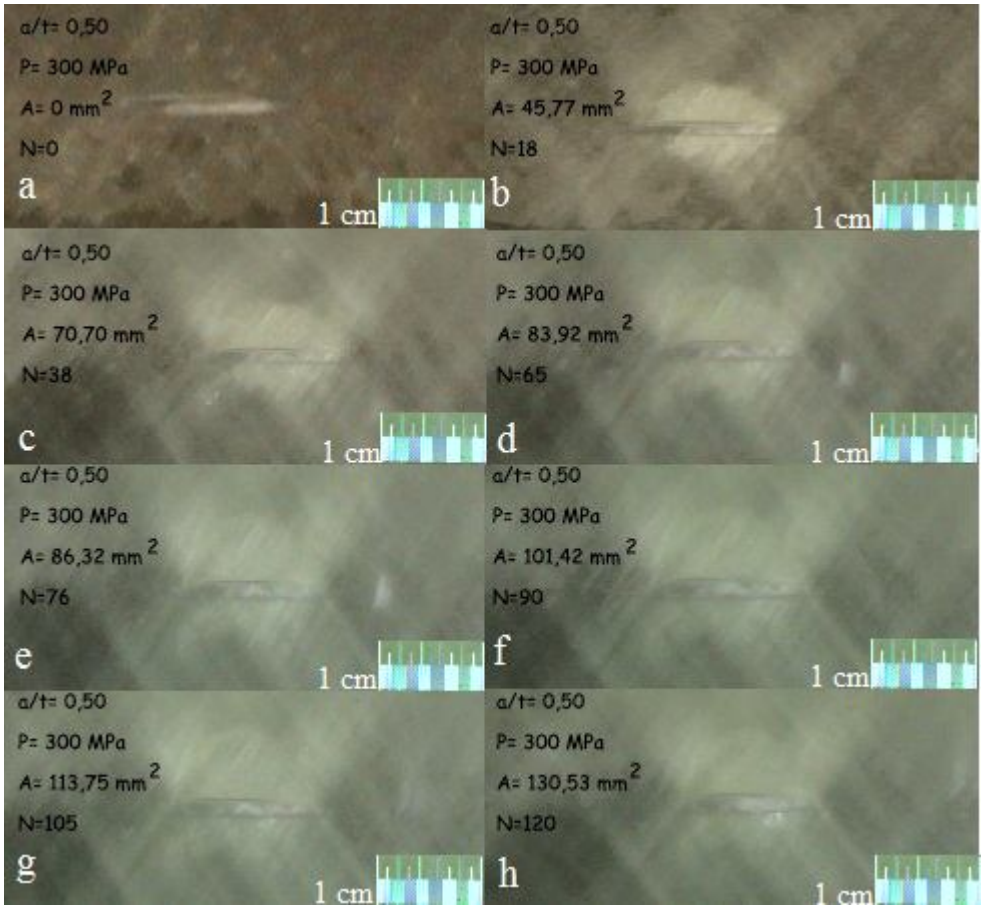
Elyaf kopmaları her iki yöndeki elyaf sarım açıları doğrultusunda gerçekleşmiştir. Sonuç hasarı a/t=0,25 çatlak derinlik oranı olan numunede üçgen şeklinde meydana gelmek yerine son çevrim sayısındaki iç basınç gerilmesiyle yan yana sarılan birkaç elyaf demetinin aynı anda kopması sonucu elyaf sarım açısına paralel yırtılma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Her çevrim ile gerçekleşen basınç artışı sonucu boru çapının artışı birbiri üzerine sarılan elyaf tabakalarının ve eliptik yüzey çatlağının açılma modunda (Mod I) durumunda kırılmaya maruz kaldığı söylenebilirken, sarılan elyaf demetlerinin sarım açısını arttıracak şekilde birbiri üzerinde kayması Mod II durumunda kırılmaya maruz

kaldığı söylenebilir. Bu durumların yanı sıra gerçekleşen elyaf gerilmesinin eksenel bileşeni de Mod III kırılma tipi ile yırtılma etkisi ile yaşanmaktadır. Samancı'nın (2004) belirttiği gibi; tüm bu kırılma tiplerinin numune üzerine eşzamanlı olarak yaptığı etkiyi Mix Mod olarak adlandırabiliriz.

Nano takviyesiz numunelerde düşük yorulma gerilmesi oranlarında olduğu gibi benzer şekilde tabakalar arası ayrılmanın verdiği alanların görülmesiyle yüzey çatlağının kestiği tabakalar ile alt tarafında kalan kesilmeyen tabakalarıun birbirinden bağımsız hareketettikleri, birbirleri üzerinde kayma yaparak Mod II hasarı oluşturdukları ve bu tür numunelerde de Newman-Raju bağıntısından bağımsız olarak davranış gösterdikleri söylenebilir. Bu da tabakalar arası kırılma ile sonuç hasarına ulaştıklarının göstergesidir.

Şekil 4.68.'de nano takviyesiz *a/t*= 0,50 oranında yüzey çatlaklı CTP boruların çevrim sayılarına göre tabaka ayrılması durumu görülmektedir.

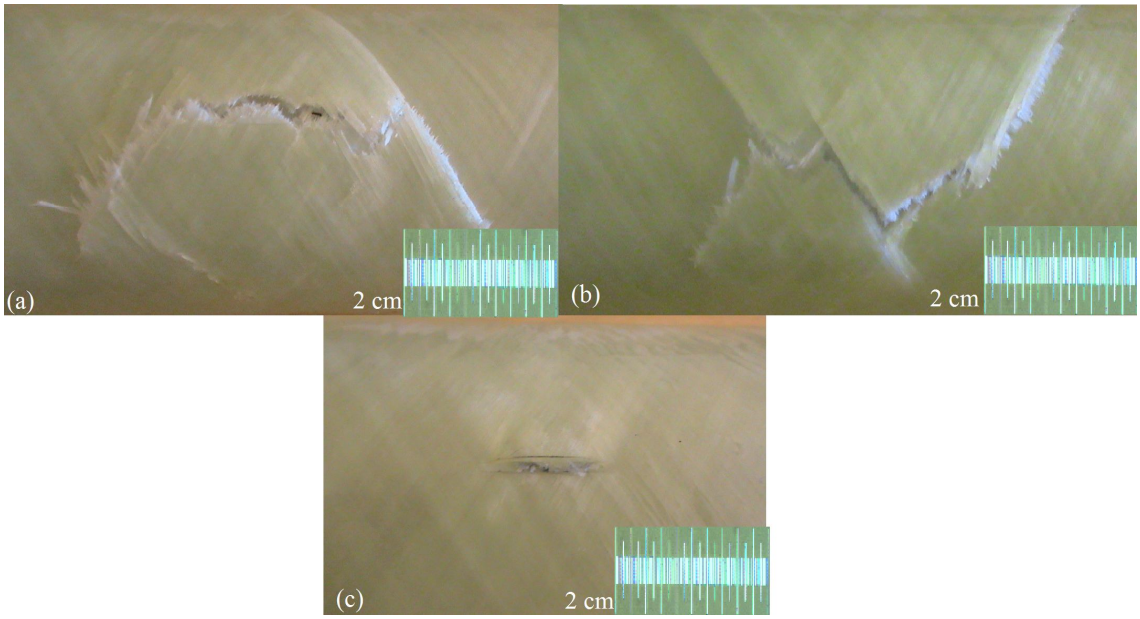


Şekil 4.68. Nano takviyesiz CTP boruarın derin yüzey çatlağı tabaka ayrılmaları

Bu sonuçlar altında CNT takviyesi yapılmadan imal edilmiş kompozit borularda *a/t*= 0,25 ve *a/t*= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne etkisi olduğu

belirlenmiştir. Buna göre yorulma ömürleri *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranında % 29.60, *a/t*= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranında ise % 78.31 oranında azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.69. (a), (b) ve (c)'de nano takviyesiz yüzey çatlaksız *a/t*= 0,25 ve *a/t*=0,50 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumu görülmektedir.



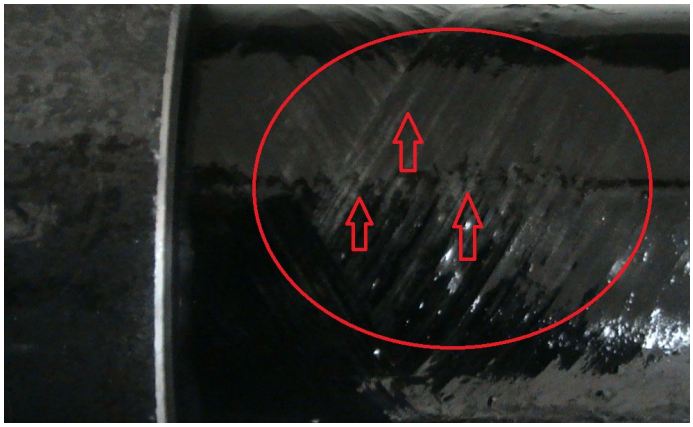
Şekil 4.69. CTP boruların sonuç hasarı (a) yüzey çatlaksız numune, (b) *a/t*= 0,25 yüzey çatlaklı numune, (c) *a/t*= 0,50 yüzey çatlaklı numune

4.10.8. % 0,5 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° sarım açılı % 0,5 karbon nanotüp takviyeli CTP borular yüksek gerilme oranı diye adlandırılan 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde hasara uğrayana kadar test edilmişlerdir. Bu tür borularda yüzey çatlakları numunelerin sonuç hasarlarının oluşumuna son derece etkili olmuşlardır.

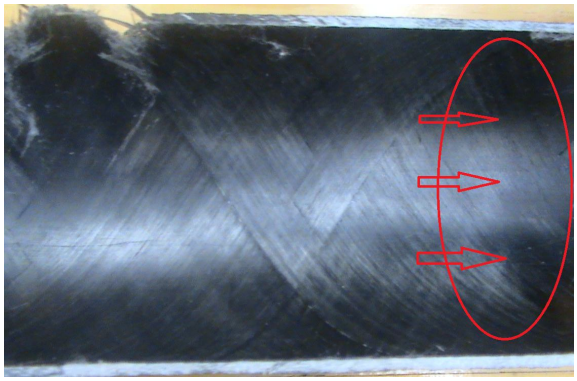
Hasar aşamalarındaki ilk bölüm tüm deney numunelerinde olduğu gibi elyaf matriks ayrılmasıdır. Sistemdeki maksimum gerilme değerinin oldukça yüksek olması tüm hasar aşamalarının diğer gerilme değerlerinde test edilen numunelerinkine göre çok daha erken çevrim sayılarında gerçekleşmesine neden olmuştur. Elyaf matriks ayrılması % 0,5 oranında karbon nanotüp ilave edilen numunelerde yer yer fark edilebilen beyazlaşmalar ile belli olmuştur. Yüksek gerilme değeri baskın bir rol oynayarak bu süreçte etkisini göstermiştir. Yüzey çatlağı açılmamış olan nanokompozit borular 500

çevrim sayısından sonra beyazlaşma çizgileri göstermeye başlamış yaklaşık olarak 550 çevrim sayısında daha net olarak belli etmişlerdir. Bu beyazlaşma bölgesi ileride sonuç hasar bölgesi olarak karşımıza çıkacaktır. Şekil 4.70.'de yüzey çatlaksız numunelerineğilme gerilmesine maruz kalan uç kısımdaki beyazlaşma ile kendini gösteren elyaf – matriks ayrılması verilmiştir.



Şekil 4.70. Elyaf – matriks ayrılması bölgesi

Beyazlaşma çizgilerinin varlığı dış yüzeylere nazaran iç yüzeylerde daha kolay anlaşılabilir. Fakat test esnasındaki çalışmalar borunun iç yüzeyinin incelenmesine izin vermediğinden dolayı görüntüleme işlemi ancak son hasarın gerçekleşmesinden sonra numunelerin kesiti alınarak yapılabilmiştir. % 0,5 CNT takviyesinin yüksek gerilme oranlarındaki bu iç yüzey çizgileri ve kelepçe - keçe hizasındaki renk farklılığından Şekil 4.71.'deki görüldüğü gibi anlaşılabilmektedir.



Şekil 4.71. 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde % 0,5 CNT takviyesindeki elyaf – matriks ayrılması

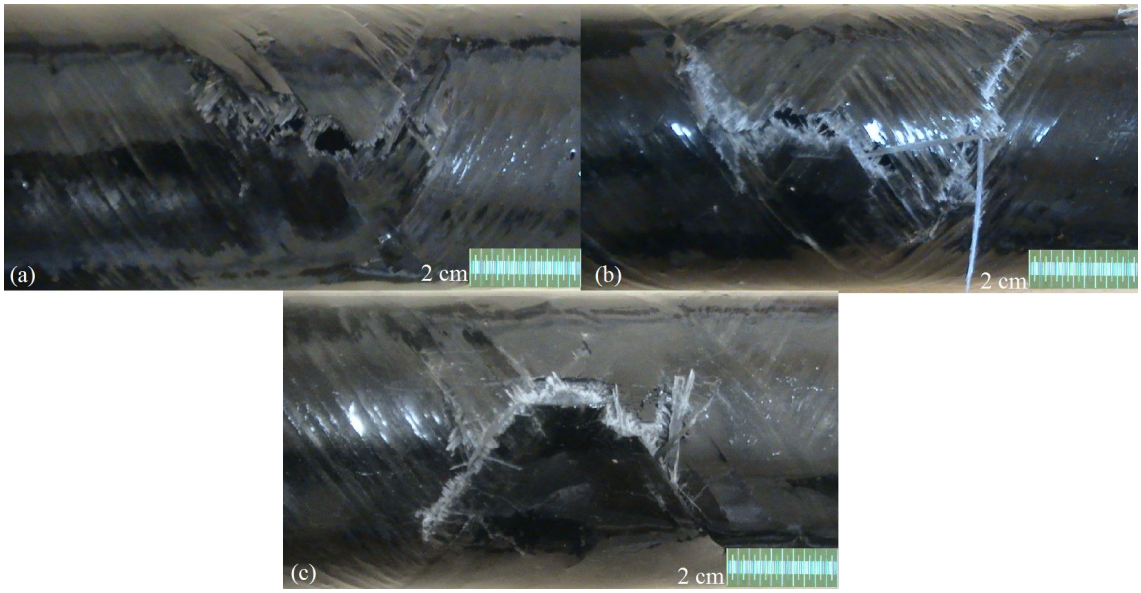
Derin yüzey çatlağı oranında 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde 100 çevrimden itibaren yüzey çatlağının fiziksel olarak değişimi gözlemlenmiştir. Test esnasında artan basınçla birlikte çatlak ağzının Mod I şeklinde açılıp kapandığı görülmüştür. Çatlak ağzı

patlama hasarına yakın çevrim sayılarında orta kısmından şişme göstermiştir. Bu kısım sonuç hasarının şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Daha sonraki hasar aşaması olan matriks çatlaması nanokompozit borularda yine tespit edilememiştir. Her iki çeşit nanokompozit boru da derin yüzey çatlaklı boruya göre daha iyi yorulma ömür sonuçları vermişlerdir. Fakat nano kompozit numunelerin takviyesiz olarak ile imal edilmiş olan numunelere kıyasla yorulma ömrü sonuçları değişiklik göstermiştir. Yüzey çatlağı açılmış olan numuneler yüksek yorulma ömrü artışı gösterirken yüzey çatlaksız numunede bu artış görülememiştir.

CNT takviyeli numuneler takviyrsiz numunelerin aksine tabakalar arası kırılma değil ara yüzey kırılması göstermişlerdir.

% 0,5 oranında CNT takviyesi yapılmış olan nano kompozit numuneler yüzey çatlağına karşı hassasiyet göstermişlerdir. Şekil 4.72.'de % 0,5 CNT takviyeli yüzey çatlaksız, *a/t*= 0,50 ve *a/t*=0,25 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumu görülmektedir.



Şekil 4.72. % 0,5 CNT Takviyeli CTP numunelerin sonuç hasarları (a) yüzey çatlaksız (b) *a/t*= 0,25 (c) *a/t*= 0,50

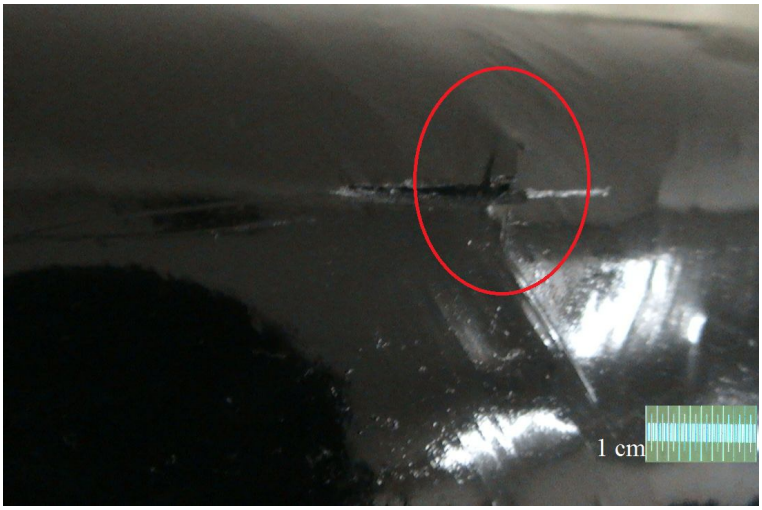
Bu sonuçlar ışığında % 0,5 oranında CNT takviyesi yapılan nanokompozit borularda *a/t*= 0,25 ve *a/t*= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne etkisi olduğu tespit edilmiş oldu. *a/t*= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranı yorulma ömrünü % 53.25 oranında azaltırken *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranı ise % 13,35 oranında azaltmıştır.

4.10.9. % 1 CNT Takviyeli CTP Borularda 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ Yorulma Gerilmesi Değerinde İç Basınç Yorulma Hasar Davranışları

±55° sarım açılı % 1 karbon nanotüp takviyeli CTP borular yüksek gerilme oranı diye adlandırılan 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde hasara uğrayana kadar test edilmişlerdir. Bu tür borular 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde eliptik yüzey çatlağına derin yüzey çatlağında duyarlı olmasına rağmen sığ yüzey çatlağında duyarsız davranmışlardır.

Teğetsel gerilmenin 300 MPa'a yakın bir değerde olması sonucu tüm hasar aşamaları diğer gerilme değerlerinden daha erken çevrim sayılarında oluşmuştur. Fakat % 1 oranında CNT takviyesi yapmak takviyesiz numunelere ve % 0,5 CNT takviyesine göre hasar aşamalarının gerçekleştiği çevrim sayılarını arttırmıştır. Elyaf matriks ayrılması yine karbon nanotüp takviyesi yapılmamış olan numunelerdeki gibi beyazlaşma ile belli olmamış numune dış yüzeyinde çıkıntılar ile anlaşılmıştır. Bu belirtiler % 0,5 CNT'li nanokompozit numunelerdeki kadar net değildir. Karbon nanotüplerin boyar özellikte olması ağırlıkça % 1 oranında ilavede de oldukça etkili olmuştur. Bu etkinin ağırlıkça % 0,5 oranında CNT ilave edilen nanokompozit numunelere kıyasla gözle görülmemesine rağmen daha çok olduğu söylenebilir.

Düşük yorulma gerilmesi oranlarında test edilen derin yüzey çatlaklı numunelerdeki gibi 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerindeki numunelerde de çevrim sayısının artmasıyla birlikte yüksek iç basınç nedeniyle yüzey çatlağında fiziksel olarak açılmalar meydana gelmiştir. Benzer şekilde çatlak ucunda maksimum gerilmenin oluşumuyla birlikte Mod I'in etkin rol oynamasıyla çatlak ucunda yaşanan değişiklikler öncelikle elyaf doğrultusunda yüzey çatlağını kesen çizgiler halinde başlamıştır. Çevrim sayısının daha çok artmasıyla da en dış tabakaların yüzey çatlağının kenarından açılma gösterdiği bu açılma ile de sonuç hasarının şekilleneceği durumun başlangıcı belli olmuştur. Bu değişiklikler sadece derin yüzey çatlağı üzerinde gözlemlenmiş sığ yüzey çatlağında bu gibi değişikliklere rastlanmamıştır. Çatlak üzerinde yaşanan söz konusu değişiklikler Şekil 4.73.'te görülmektedir.

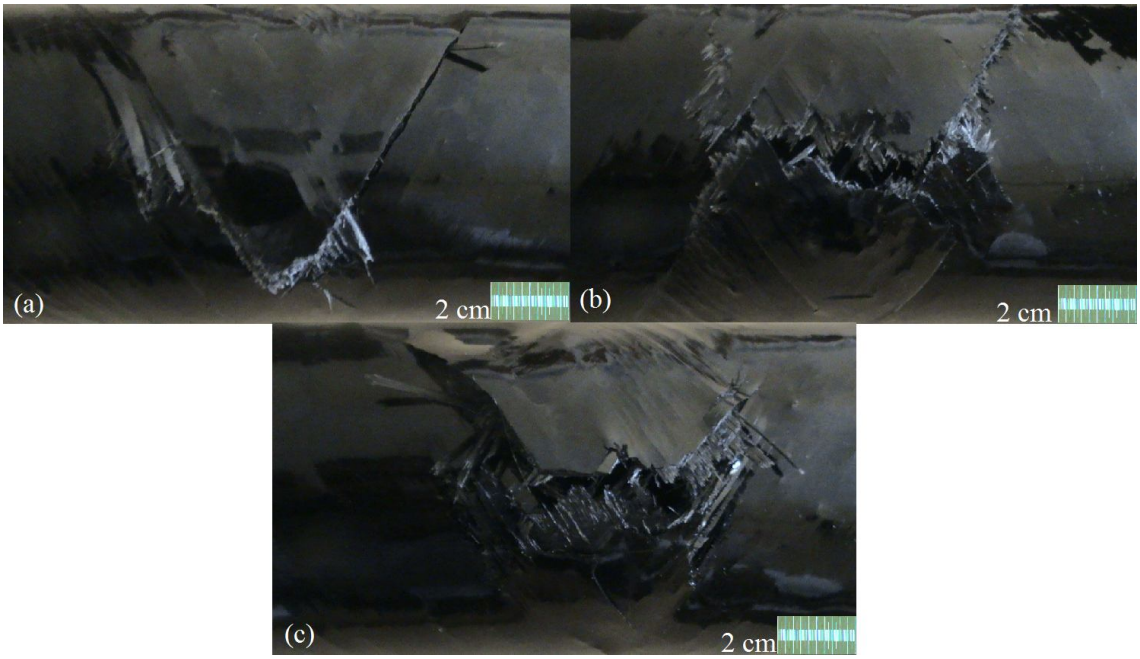


Şekil 4.73 Derin yüzey çatlak ağzının açılması (N=600)

Daha sonraki hasar aşaması olarak kabul edilen matriks çatlaması nanokompozit borularda tespit edilememiştir. Yorulma ömrü 1350'ye ulaştığında numune üzerinde eğilme gözlemlenmiştir. Bu eğilme ile numune eğilme bölgesinden patlayarak sonuç hasarına ulaşmıştır. Eğilme durumu ve sonuç hasarı durumu Şekil 4.80. (a)'da görülmektedir.

% 1 karbon nanotüp takviye edilmiş nanokompozit borulardan sığ yüzey çatlağı (a/t=0,25) açılmış olan nanokompozit numune boru eksenine dik olacak şekilde yüzey çatlağı açılan bölgenin hizasından patlama ile son hasara uğrayarak yüzey çatlağına kısmen duyarsız kalmıştır. Fakat derin yüzey çatlağı (a/t=0,50) açılmış olan nanokompozit numune beklenildiği gibi çatlak bölgesinden patlama ile sonuç hasarına ulaşmıştır. Hem yüzey çatlaksız numune hem de a/t=0,25 oranındaki yüzey çatlaklı numune derin yüzey çatlaklı (a/t= 0,50) boruya göre beklenildiği gibi daha iyi yorulma ömrü göstermiştir. Buna göre CNT takviyesinin numuneleri tabakalar arası kırılma yerine ara yüzey kırılmasına yönelttiği söylenebilir.

Şekil 4.74.'te %1 CNT takviyeli sırasıyla yüzey çatlağı açılmamış, a/t= 0,25 ve a/t=0,50 oranlarındaki eliptik yüzey çatlaklı CTP boruların sonuç hasarı durumları görülmektedir.



Şekil 4.74. % 1 CNT takviyeli CTP numunelerin patlama sonuç hasarları (a) yüzey çatlaksız, (b) *a/t*= 0,25 (c) *a/t*= 0,50

Bu sonuçlar değerlendirildiğinde söylenebilir ki; ağırlıkça % 1 çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi altında imal edilmiş nanokompozit borularda *a/t*= 0,25 ve *a/t*= 0,50 çatlak derinliği oranlarının yorulma ömrüne yaptığı etki belirlenmiş oldu. Bu sonuçlara göre *a/t*= 0,25 yüzey çatlağı derinlik oranı yorulma ömrünü % 7,83 oranında azaltırken *a/t*= 0,50 yüzey çatlağı derinlik oranı ise % 36,19 oranında azaltmıştır. Söz konusu artış yüzdeleri bu gerilme değeri göz önünde tutulduğunda hem nano takviye yapılmayan numunelere hem de diğer orandaki nanokompozit numunelere kıyasla daha üstün sonuçlar vermiştir.

4.11. Tabaka Ayrılması

Yorulma deneyi esnasında sonuç hasarına ulaşana kadar gerçekleşen hasar aşamalarından birisi de tabakalı kompozitlerde görülen tabaka ayrılmasıdır. Tabaka ayrılmasının belirlenmesinde öncelikle deneyin yürütülmesi esnasında belirli çevrim sayılarına ulaşıldığında test düzeneği durdurularak belirli bir ışık altında iken yaklaşık birkaç cm mesafeden numunelerin fotoğrafları çekilmiştir. Daha sonra Paint programında dikdörtgen biçimli seçim ve serbest biçimli seçim özelliği kullanılarak beyazlaşma şeklinde ayırt edilebilen tabaka ayrılması durumu ve yüzey çatlağı seçilerek karşılaştırma yoluna geçilmiştir. Bu durum Sigma Scan Pro 5 programında gerçekleştirildi. Nano takviyesiz numunelerdeki tabaka ayrılması durumları için elde edilen görüntüler Şekil 4.48, Şekil 4.58. ve Şekil 4.68.'te verilmiştir.

Çalışmada kullanılan numunelerin çevrim sayılarına göre meydana gelen tabaka ayrılması alanları izdüşüm alanı olarak dikkate alınmıştır. Bu sebeple çevrim sayısı – tabaka ayrılması grafikleri tabaka ayrılması izdüşüm alanları esas alınarak oluşturulmuştur.

0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde ve 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerinde uygulanan iç basıncın yüksek olması ve hasar aşamalarının kısa sürede gerçekleşmiş ama 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme değerindeki deneylerde tabakalar arası ayrılma alanı daha yüksek çevrim sayılarında daha geniş alanlara ulaşmıştır.

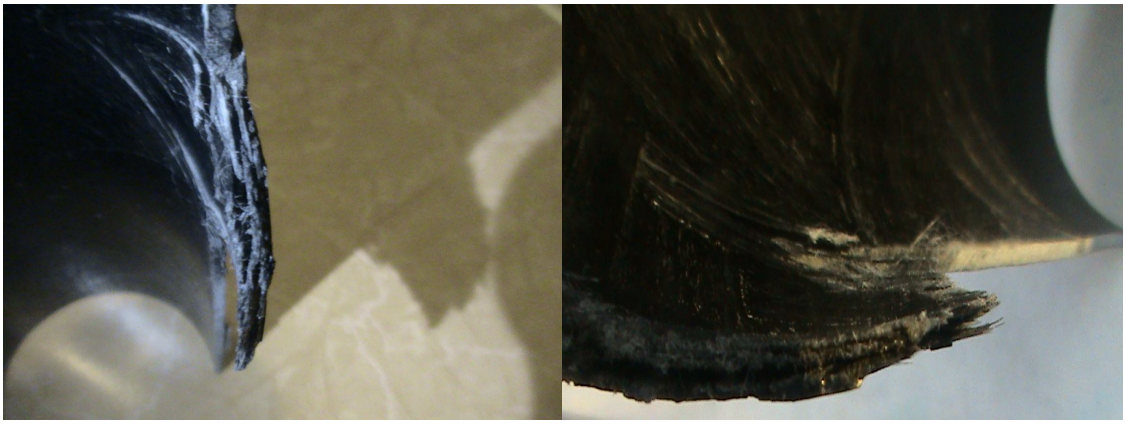
Karbon nanotüp takviyesi çeşitli nedenlerden dolayı mevcut olduğu düşünülen tabaka ayrılması ile oluşan alanlar görüntülenemediğinden yorulma deneylerinin yürütülmesi esnasında hesap edilememiştir. Bu nedenler arasında;

- üretim aşamasından itibaren karbon nanotüplerin epoksi matriks içerisinde homojen olarak dağıtılabilmesi,
- karışımın viskozitesinin sarım işlemi esnasında uygun değerlere getirilmesi,
- seçilen nano malzemenin orijinal renginin görüntüleme işlemine uygun olmaması,
- hacimsel yoğunluk değerlerinin yüksek olması sayılabilir.

Bu durum herhangi bir yüzdedeki nano malzeme takviyesi için geçerlidir. Ayrıca gerilme oranının değişimi ve yüzey çatlağındaki farklılık bu durumu değiştirmemiştir. Fakat tabaka ayrılmasının nanokompozit numunelerdeki varlığı makro çekim özelliği olan kamera ile çekilerek tespit edilmiştir. Numuneler boru ekseni boyunca kesilerek patlama hasarının meydana geldiği bölgedeki durum görüntülenmiştir. Fotoğraflar her yorulma gerilmesi değerindeki tüm karbon nanotüp takviye şartı için Şekil 4.75., Şekil 4.76., Şekil 4.77., şekil 4.78., Şekil 4.79. ve Şekil 4.80'de verilmiştir.



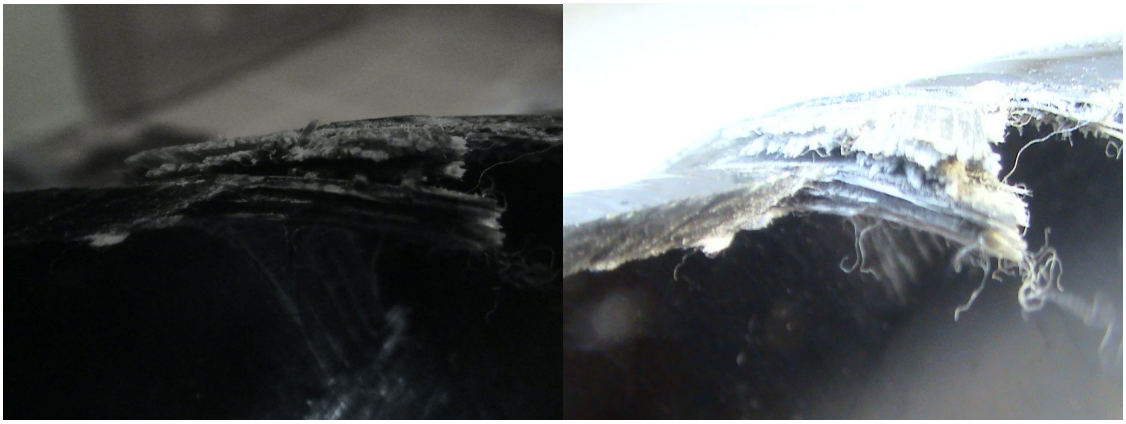
Şekil 4.75. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde % 1 CNT takviyeli CTP tabaka ayrılması durumu



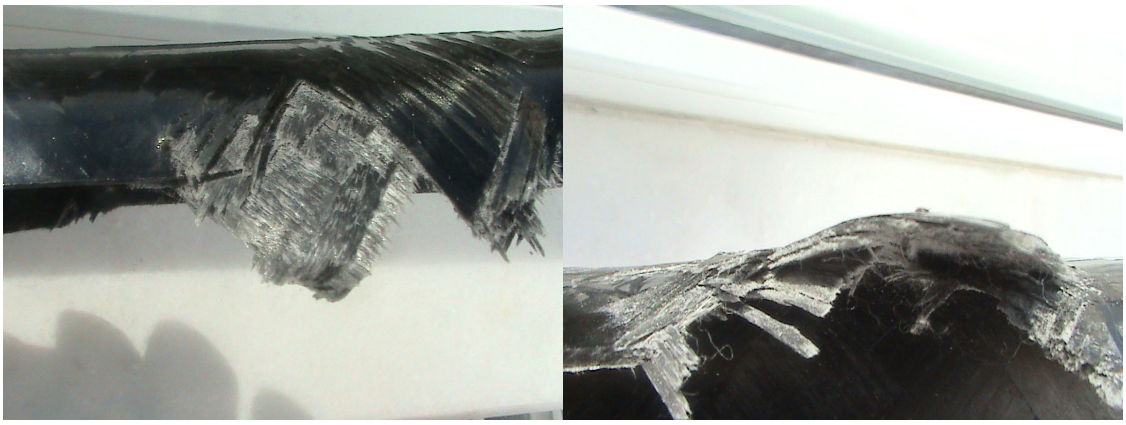
Şekil 4.76. 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde % 1 CNT takviyeli CTP tabaka ayrılması durumu



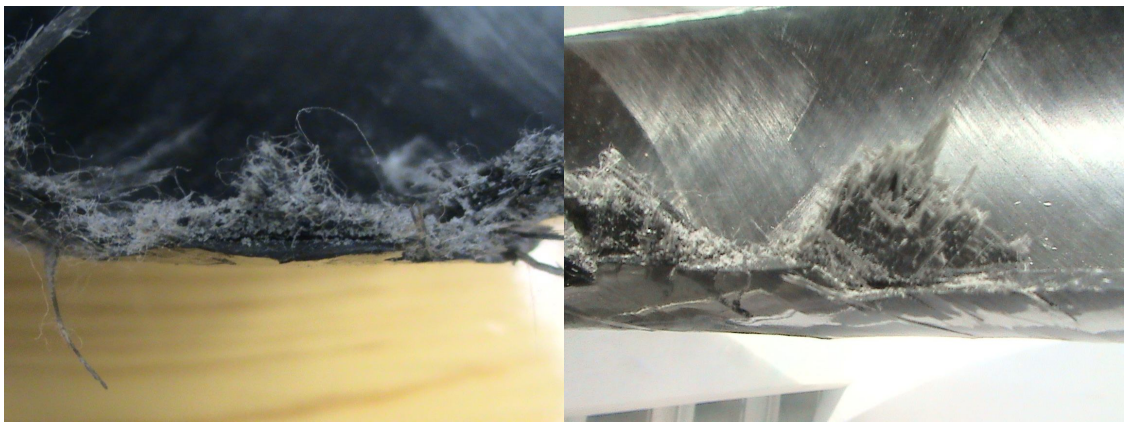
Şekil 4.77. 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde % 1 CNT takviyeli CTP tabaka ayrılması durumu



Şekil 4.78. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde % 0,5 CNT takviyeli CTP tabaka ayrılması durumu



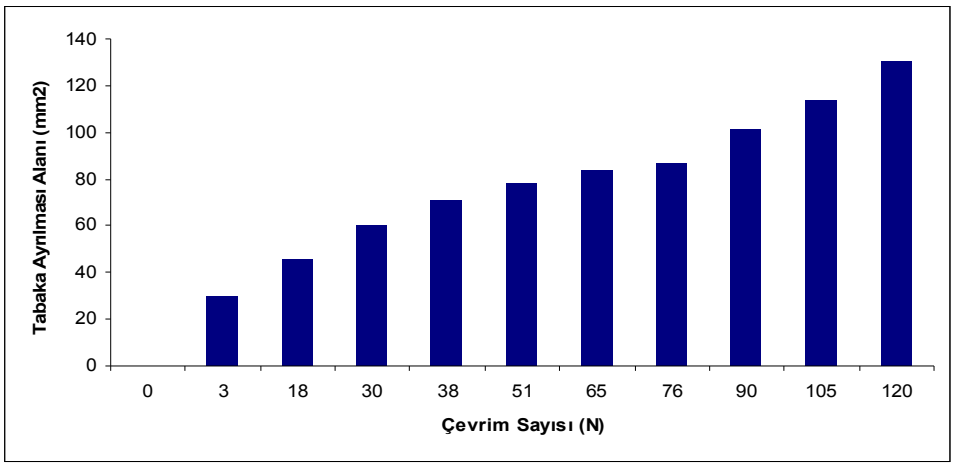
Şekil 4.79. 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ yorulma gerilmesi değerinde % 0,5 CNT takviyeli CTP tabaka ayrılması durumu



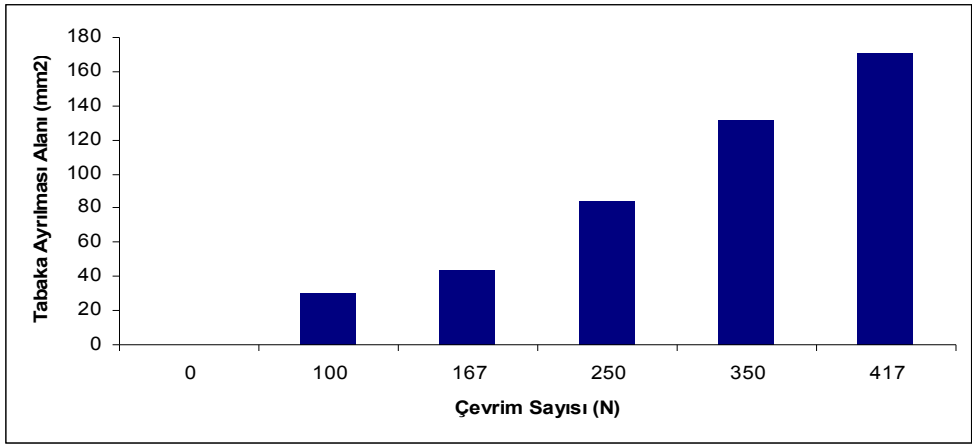
Şekil 4.80. 0,6 yorulma gerilmesi değerinde % 0,5 CNT takviyeli CTP tabaka ayrılması durumu

Şekil 4.81. ve Şekil 4.82.'de derin yüzey çatlaklı (a/t=0,50) nano takviyesiz numunelerin 0,5 ve 0,6 gerilme oranında iç basınç altındaki yorulma deneylerinde oluşan tabaka ayrılması alanları ile çevrim sayıları ilişkisi görülmektedir.

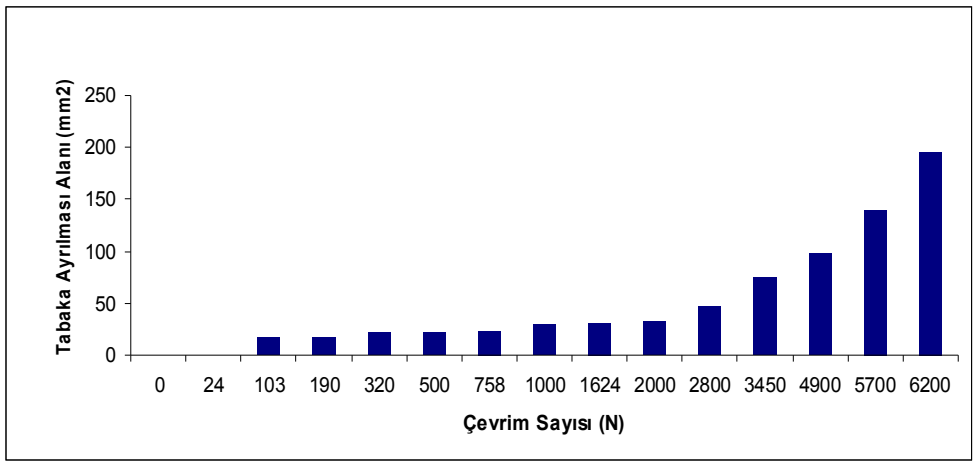
Şekil 4.83.'te 0,4 gerilme oranında iç basınç altında yorulma deneyindeki gerçekleşen tabaka ayrılmasıın çevrim sayılarına göre değişimi görülmektedir. Gerilme oranının düşük olması diğer gerilme oranlarına göre hem çevrim sayılarında hem de tabaka ayrılma alanlarında artış yaşanmasına neden olmuştur. Grafiğe göre derin yüzey çatlaklı (a/t=0,50) nano takviyesiz numunelerin tabaka ayrılması alanları çevrim sayısı ile birlikte artış göstermiştir. Artış düşük çevrim sayılarında bir önceki çevrimde ölçülen alana göre fazla artış göstermezken daha yüksek çevrim sayılarına gelindiğinde bir önceki ölçülen alana göre bir hayli yüksek değerler göstermiştir. Tabakalar arasında meydana gelen en büyük artışlar sonuç hasarına yakın çevrim sayılarında gerçekleşmiştir. Yorulma testleri süresince çap artışına bağlı olarak şekil değiştirme oranı arttığı için tabaka ayrılması alanında da artış meydana gelmektedir.



Şekil 4.81. 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranı nano takviyesiz CTP numunelerin tabaka ayrılması-çevrim sayısı grafiği



Şekil 4.82. 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranı nano takviyesiz CTP numunelerin tabaka ayrılması-çevrim sayısı grafiği



Şekil 4.83. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranı nano takviyesiz CTP numunelerin tabaka ayrılması-çevrim sayısı grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, ±55° sarım açısında üretilen CTP ve çok duvarlı karbon nanotüp ilaveli CTP boruların serbest uçlu iç basınç deneyleri yapılarak malzeme sabitleri tespit edilmiştir. İç basınç deneylerine dayandırılarak eliptik yüzey çatlağı açılmış ve açılmamış kompozit ve nanokompozit borulara uygulanan serbest uçlu iç basınç yorulma deneyleri uygulanmıştır. Her bir yüzey çatlaksız boru numunesinin yanı sıra *a/c*=0.2 oranında sabit olmak üzere *a/t*=0,25 ve *a/t*=0,50 derinlik oranında yüzey çatlaklı olarak R= 0,05 gerilme oranında ve dakikada 0,42 Hz frekansta yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yorulma gerilmesi değeri her bir numune için 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ değeri seçilmiştir.

Yorulma hasar mekanizmasının gelişimine ve yorulma ömrüne çatlak derinlik oranının (*a/t*) ve çok duvarlı karbon nanotüp ilave oranının etkisi incelenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

1. ±55° sarım açılı CTP ve nano takviyeli CTP boruların serbest uçlu statik iç basınç deneyi sonucunda elde edilen değerlere göre azami taşıyabildiği teğetsel gerilme değerleri, nano takviyesiz CTP borularda 489 MPa, % 0,5 karbon nanotüp takviyeli CTP borularda 517 MPa ve % 1 çok duvarlı karbon nanotüp takviyeli CTP borularda 534 MPa olarak bulunmuştur.

2. CTP numunelerin serbest uçlu statik iç basınç deneylerinde literatürde belirtilen elyaf – matriks ayrılması (fiber debonding), matriks çatlaması (matrix cracking), yoğun beyazlaşma (intensive whitening), tabaka ayrılması (delamination) ve elyaf kopması (fiber fractures) hasar aşamaları gözlemlenmiştir.

3. Tüm CTP ve CNT takviyeli CTP borularda çatlak derinliği (a/t) arttıkça çatlaklı mukavemet değerleri azalmaktadır.

4. Aynı çatlak derinlik oranına sahip numunelerin yorulma ömürleri değişik oranlarda takviye edilen karbon nanotüplerin etkisiyle artmıştır. Karbon nanotüp takviyesi ile üretilen numuneler kendi aralarında da ilave yüzdesiyle paralel bir artış göstermişlerdir.

5. Deneysel çalışma sınırları içerisinde 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ değerinden daha düşük değerlerde yorulma testi yapılmadığı için kompozit ve nanokompozit malzemelere ait sürekli mukavemet sınırı tespit edilememiştir.

6. Serbest uçlu iç basınç etkisindeki borularda çok duvarlı karbon nanotüp takviyesinin yapılmasıyla ve arttırılmasıyla birlikte elastisite modülü artarken şekil değiştirme oranı azalmaktadır. Dolayısıyla CTP kompozit borulara karbon nanotüp takviyesi ile birlikte borular daha rijit davranmaktadır. Yapılan deneylere göre elastisite modülü nano takviyesiz olarak üretilen kompozit borularda 10,21 GPa, % 0,5 MWCNT takviyesiyle üretilen nanokompozit CTP numunelerde 10,24 GPa ve % 1 MWCNT takviyesiyle üretilen nanokompozit numunelerde ise 11,80 GPa olarak tespit edilmiştir. Aynı deneylerde Poisson oranı nano takviyesiz olarak üretilen CTP borularda 0,89 olarak bulunurken, % 0,5 MWCNT takviyeli nanokompozit CTP borularda 0,90 ve % 1 MWCNT takviyeli nanokompozit CTP borularda 0,88 olarak belirlenmiştir.

7. Halka çekme deneylerinde çok duvarlı karbon nanotüp takviyesinin yapılmasıyla ve arttırılmasıyla birlikte boru eksenine dik doğrultudaki mukavemet artmaktadır. Nano takviyesiz CTP halka numunelerinde 347,6 N/mm^2 olarak bulunurken, % 0,5 oranında MWCNT takviyeli CTP numunelerde 470,0 N/mm^2 ve % 1 oranında MWCNT takviyeli CTP numunelerde 501,8 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Buna göre çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi yapılarak üretilen filaman sarım boru numuneleri çekme esnasında hem daha çok yüzde uzama değerine hem de daha yüksek mukavemet değerine ulaşmışlardır.

8. Halka çekme testi uygulanarak K_Q değerleri tespit edilmiştir. Buna göre 55° sarım açılı nano takviyesiz CTP numunelerde 31,98 MPa $m^{1/2}$, % 0,5 CNT ilaveli nanokompozit numunelerde 43,24 MPa $m^{1/2}$ ve % 1 CNT ilaveli nanokompozit numunelerde 46,16 MPa $m^{1/2}$ olarak tespit edilmiştir.

9. Newman-Raju bağıntılarından hesaplanan teorik yaklaşım ile deneysel olarak tespit edilen çatlaklı mukavemet değerleri karşılaştırıldığında tüm kompozit ve nanokompozit numunelerde a/t=0,25 ve a/t=0,50 çatlak derinlik oranlarındaki değerlerde kısmi bir yakınlık gözlensede bu bağıntının filaman sarım CTP ve CNT takviyeli CTP borular için uyarlanamayacağı görülmüştür .

10. Yorulma çevriminin başlamasından itibaren ilk başlarda plastik şekil değişimi oluşmadığından hasar aşamaları gözlenememiştir. Fakat yorulmanın verdiği etkiyle hasar aşamaları baş göstermeye ve gözlenebilmeye başlanmıştır. Karbon nanotüp takviyesi yapılmamış olan kompozit borularda hem sığ yüzey çatlağında hem de derin yüzey çatlağında yüzey çatlağı etkisini göstermiş ve patlama ile gerçekleşen sonuç hasarı çatlak bölgesinde meydana gelmiştir. Çatlaksız olan kompozit boru numunelerinde sonuç hasarı en çok şişmenin oluştuğu boru merkezinde değil merkez ile

eğilme gerilmesinin meydana geldiği yorulmanın oluştuğu son kısım arasında meydana gelmiştir. Bu hasar kelepçe ve keçe ile sınırlanan hatta kadar elyaf sarım açısı doğrultusunda ilerlemiştir.

11. % 0,5 çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi yapılmış olan nanokompozit boru numunelerinde yüzey çatlağı açılmış olan % 0,5 CNT takviyeli nanokompozit borulardan sığ yüzey çatlağı olan numunelerde 0,4 ve 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında yüzey çatlağı harici bölgelerden, 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında yüzey çatlaklı bölgeden sonuç hasarı görülmüştür. Derin yüzey çatlağı açılmış olan numunelerde de sonuç hasarları gerilme oranına göre aynı sonuçları göstermiştir. % 0,5 CNT takviyesi yorulma ömrünü geliştirmesine rağmen % 1 CNT takviyesindeki gibi her durum altında nano takviyesiz numunelere göre yüksek oranda bir yorulma ömrü artışı getirmemiştir.

12. % 1 çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi yapılmış yüzey çatlaksız numunelerin sonuç hasarı 0,4 ve 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında numunenin orta kısmından her iki elyaf sarım açısı doğruştusunda yırtılarak meydana gelirken 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında ise boru uç kısmında oluşmuştur. Yorulma testleri sonucu yüzey çatlağı açılmamış olan diğer numunelere göre oldukça yüksek değer göstermiştir. Sığ yüzey çatlağı açılan numunelerde 0,4 ve 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında yüzey çatlağı harici bölgelerden, 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında yüzey çatlaklı bölgeden sonuç hasarı görülmüştür. Derin yüzey çatlağı açılan numunelerde tüm gerilme oranlarında yüzey çatlağı bölgesinden yırtılarak sonuç hasarına ulaşılmıştır.

13. % 1 CNT takviyesi yapılan numuneler 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında değerlendirildiğinde; yüzey çatlaksız nano takviyesiz numunelerin yorulma ömrü sonuçlarına göre % 630 oranında, % 0,5 CNT takviyesi yapılan CTP borulara nazaran % 237 oranında artış görülmektedir. Bu artış 0,5 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında nano takviyesiz numunelere göre % 225, % 0,5 CNT takviyesi yapılan CTP borulara göre % 163 oranındadır. 0,6 $\sigma_{\theta\theta statik}$ gerilme oranında değerlendirildiğinde ise nano takviyesiz numunelere göre % 148, % 0,5 CNT takviyesi yapılan CTP borulara göre % 147 oranındadır. Bu durumda söylenebilir ki; ağırlıkça belirli bir yüzdede çok duvarlı karbon nanotüp takviyesinin yorulma olayı üzerine dikkate değer bir etkisi vardır.

14. Nano takviyesiz CTP numuneler tabakalar arası kırılma ile CNT takviyeli CTP numuneler ise ara yüzey kırılması ile sonuç hasarına ulaşmışlardır.

5.2. Öneriler

1. Çalışmalarda kullanılan nanokompozit malzemelerdeki karbon nanotüp yüzdeleri çeşitlendirilerek deneyler tekrar edilebilir. Bu şekilde nanokompozit numunelerin iç basınç mukavemet değerlerinin ve iç basınç altındaki yorulma ömürlerinin grafiklerindeki dönüm noktaları belirlenebilir.

2. Nanokompozit numunelerinin deneyler sonucunda oluşan tabaka ayrılması hasarları, çok sayıda üretilen aynı numunenin belli ömürler altında yorulma deneyleri sonlandırılıp numunelerin kesitleri alınarak tespit edilmeye çalışılabilir.

3. Çok tabakalı olarak imal edilen kompozit ve nanokompozit numunelerin deneyler sonucunda oluşan tabaka ayrılması hasar durumları tüm gerilme oranları ve tüm yüzey çatlağı oranları için belirlenebilir.

4. Benzer özellikteki nano kompozit numuneler hasarlandırılıp yama yapılarak iç basınç altında yorulma testlerine tabi tutulabilir.

5. 0,4 $\sigma_{\theta\theta statik}$ değerinden daha düşük değerlerde yorulma testi uygulanarak mukavemet sınırı tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

Akdemir, A., 1992, Yüzey Çatlaklı Cam Takviyeli Plastiklerde Gerilmeli Korozyon, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Akdemir, A., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., Stress corrosion crack growth in glass/polyester composites with surface crack, Composites: Part B 32 (2000) 123–129

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

Aktaş, M., Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri, http://www.deu.edu.tr/userweb/mehmet.aktas/Kompozit%20Malzemeler/Ders%20%203/3.pdf [Ziyaret Tarihi: 04 Kasım 2012].

Allaoui, A., Bai, S., Cheng, H., M., Bai, J., B., 2002, Mechanical and electricsel properties of a MWNT/epoxy composite, Composite Science and Technology 62, 1993-1998.

Alnak, Y., 2007, Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerde İnterlaminar Kayma Gerilmelerinin Nümerik Analizi ve Dört Noktadan Eğme Testi ile İnterlaminar Kayma Mukavemetinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Sivas.

Anonim, http://www.camelyaf.com.tr, [Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2012].

Anonim, http://www.vakumpompasi.tr.gg/Kompozit-Malzemeler-Hakkinda.htm [Ziyaret Tarihi: 01 Kasım 2012].

Anonim, http://www.zinisan.com.tr/html/kompozit.pdf [Ziyaret Tarihi: 01 Kasım 2012].

Anonymous, ASM metals handbook- Volume 19 Fatigue and Fracture, ISBN 0-87170-385-8.

Anonymous, ASM metals handbook, Volume 21, Composites, ISBN: 0-87170-703-9.

Anonymous, Engineered interfaces in fiber reinforced composites, Chapter 3 Measurements of Interface/Interlaminar Properties.

Anonymous, Fiberglass Reinforced Plastics, Chapter 5 Engineering Plastics.

Anonymous, http://www.advancedcomposites.com, [Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2012].

Anonymous, http://www.cheaptubesinc.com, [Ziyaret Tarihi: 01 Eylül 2012].

Anonymous, http://www.compositesworld.com/ [Ziyaret Tarihi: 06 Aralık 2012].

Anonymous, http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/composites/comp_FRC_intro.cfm, [Ziyaret Tarihi: 01 Ekim 2012].

Anonymous, ME 3701 Materials of Engineering Laboratory, Louisiana State University, http://imechanica.org/files/handout8.pdf.

Anonymous, Reactive Polymers Fundamentals and Applications, Chapter 3 Epoxy Resins.

Anonymous, Reinforced Plastics Handbook, Chapter 7 Designs.

Anonymous, Surface Coatings, Plasticisers and Rubbers, 25 Polyesters.

Ansari, R., Alisafaei, F., Ghaedi, P., 2010, Dynamic analysis of multi-layered filament-wound composite pipes subjected to cyclic internal pressure and cyclic temperature, Composite Structures 92, 1100–1109.

Aran, A., 2008, Malzeme Bilgisi ders notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, İstanbul.

Arıcasoy, O., 2006, İstanbul Ticaret Odası Kompozit Sektör Raporu.

Arıkan, H., 2007, Filaman Sarım Kompozit Boruların Mix Moda Göre Statik İç Basınç Altındaki Hasar Davranmışı, Prooceedings of 8th International Fracture Conference, 7-9 Kasım 2007, İstanbul.

Arıkan, H., 2010, Failure analysis of $(\pm 55°)^3$ filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure, Composite Structures 92, 182–187.

Askeland, D., R., 1998, Çeviri: Erdoğan, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri 2. Cilt, 3. Baskı, ISBN: 975-591-106-5.

Ateş, E., Aztekin, K., 2011, Parçacık Ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yoğunluk Ve Basma Dayanımı Özellikleri, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 26, No 2, 479-486.

Avcı, A., Arıkan, H., Akdemir, A., 2003, Fracture behaviour of glass fiber reinforced polymer composite, Cement and Concrete Research 34, 429-434.

Avcı, A., Ekrem, M., Erkendirci, Ö., F., 2007, Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 7 – 9 Kasım.

Avcı, A., Şahin, Ö., S., Tarakçıoğlu, N., 2007, Fatigue behavior of surface cracked filament wound pipes with high tangential strength in corrosive environment, Composites: Part A 38, 1192–1199.

Ayatollahi, M., R., Shadlou, S., Shokrieh, M., M., 2011, Fracture toughness of epoxy/multi-walled carbon nanotube nano-composites under bending and shear loading conditions, Materials and Design 32, 2115–2124.

Bai, J., Hu, G., Bombard, P., 1997, Mechanical Behaviour of ±55° Filament Wound Glass Fibre/Resin Tubes: II. Micromechanical Model Of Damage Initiation And The Competition Between Different Mechanisms, Composites Science and Technology 51, 155-164.

Balakrishnan, A., Saha, M., C., 2010, Tensile fracture and thermal conductivity characterization of toughened epoxy/CNT nanocomposites, Materials Science and Engineering A 528, 906–913.

Bonsor, K., Strickland. J., Nanowires and Carbon Nanotubes, http://science.howstuffworks.com/nanotechnology2.htm [Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2012].

Bortz, D., R., Merino, C., Gullon, I., M., 2011, Carbon nanofibers enhance the fracture toughness and fatigue performance of a structural epoxy system, Composites Science and Technology 71, 31–38.

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

Breton, Y., Desarmot G., Salvetat, J., P., Delpeux, S., Sinturel, C., Beguin, F., Bonnamy, S., 2004, Mechanical properties of multiwall carbon nanotubes/epoxy composites: influence of network morphology, Carbon 42, 1027–1030.

Chandesekaran, V., C., S., Advani, S., G., Santare, M., H., 2010, Role of processing on interlaminar shear strength enhancement of epoxy/glass fiber/multi-walled carbon nanotube hybrid composites, Carbon 48, 3692-3699

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.

Cheng, Q., F., Wang, J., P., Liu, C., H., Jiang, K., L., Li, Q., Q., Fan, S., S., 2009, Carbon nanotube/epoxy composites fabricated by resin transfer molding, Carbon 48, 260-266.

De Greef, N., Gorbatikh, L., Godara, A., Mezzo, L., Lomov, S., V., Verpoest, I., 2011, The effect of carbon nanotubes on the damage development in carbon fiber/epoxy composites, Carbon 49, 4650-4664.

Demirci, H., 1984, Plastik Malzeme Teknolojisi I Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi.

Demirci, H., 1984, Plastik Teknolojisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi, MM/MAK 84 EY 079.

Deniz, M., E., 2005, Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşlemle Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Eker, A., A., 2008, Plastik Matrisli Kompozitler, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Ellyin, F., Carroll, M., Kujawski, D., Chiu, A., S., 1997, The behaviour of multidirectional filament wound fibreglass/epoxy tubulars under biaxial loading, Composites Part A 28A , 78l-790.

Ellyin, F., Martens, M, 2001, Biaxial fatigue behaviour of a multidirectional filamen wound glass fiber-epoxy pipe, Composites Science and Technology 61, 491-502.

Er, M., 2006, Yüksek Frekanslı, Genlik Ayarlı Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı Ve 1100-H14 Alüminyum Levhasının Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.

Erdiller, E., S., 2004, Experimental Investigation For Mechanical Properties Of Filament Wound Composite Tubes, Middle East Technical University, In Partial Fulfillment Of The Requirements, For The Degree Of Master Of Science In Mechanical Engineering, Ankara.

Erkendirci, Ö., F., 2006, Tel Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Eserci, D., 2007, Alümina, Zirkonya Ve Alümina-Zirkonya Kompozit Malzeme Üretimi, Karakterizasyonu Ve Etkin Difüzyon Sabitinin Bulunması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Eskizeybek, V., 2006, Yüksek Lisans Tezi, Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Eskizeybek, V, 2012, Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi Ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konya.

Fan, Z., Santare, M., H., Advani, S., G., 2008, Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes, Composites: Part A 39, 540-554

Gemi, L., 2004, Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konya.

Gemi, L., Tarakçioğlu, N., Akdemir, A., Şahin, Ö., S., 2009, Progressive Fatigue Failure Behavior of Glass/Epoxy $(\pm 75)_2$ Filament-Wound Pipes Under Pure Internal Pressure, Materials and Design 30, 4293–4298.

Genç, Ç., 2006, Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi, Kocaeli.

Gkikkas, G., Barkoula, N., M., Paipetis, A., S., 2012, Effect of dispersion conditions on the thermo-mechanical and toughness properties of multi walled carbon nanotubes-reinforced epoxy, Composites: Part B 43, 2697-2705

Godara, A., Gorbatikh, L., Kalinka G.,, Warrier, A., Rochez, O., Mezzo, L., Luizi, F., Van Vuure, A., W., Lomov, S., V., Verpoest, I., 2010, Interfacial shear strength of a glass fiber/epoxy bonding in composites modified with carbon nanotubes, Composites Science and Technology 70, 1346–1352.

Godara, A., Mezzo, L., Luizi, F., Warrier, A., Lomov, S., V., Van Vuure, A., W., Gorbatikh, L., Moldenaers, P., Verpoest, I., 2009, Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy composites, Carbon 47, 2914–2923.

Gojny, F., H., Nastalczyk, J., Roslaniec, Z., Schulte, K., 2003, Surface modified multi-walled carbon nanotubes in CNT/epoxy-composites, Chemical Physics Letters 370, 820-824.

Gojny, F., H., Schulte, K., 2004, Functionalisation effect on the thermo-mechanical behaviour of multi-wall carbon nanotube/epoxy composites, Composites Science and Technology 64, 2303-2308.

Gojny, F., H., Wichmann, M., H., G., Fiedler, B., Schulte, K., 2005, Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study, Composites Science and Technology 65, 2300–2313.

Gojny, F.,H., Wichmann, M., H., G., Köpke, U., Fiedler, B., Schulte, K., 2004, Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, Composites Science and Technology 64, 2363–2371.

Grimmer, C., S., Dharan, C., K., H., 2010, Enhancement of delamination fatigue resistance in carbon nanotube reinforced glass fiber/polymer composites, Composites Science and Technology 70, 901-908

Guo, P., Chen, X., Gao, X., Song, H., Shen, H., 2007, Fabrication and mechanical properties of well-dispersed multiwalled carbon nanotubes/epoxy composites, Composites Science and Technology 67, 3331–3337.

Günaydın, B., 2003, Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Güvensoy, S., 2010, Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Hashim, A., 2011, Material Nanocomposites, Advances In Nanocomposıte Technology, Part 2, ISBN 978-953-307-347-7.

Hayashi, T., Endo, M., 2011, Carbon nanotubes as structural material and their application in composites, Composites: Part B 42, 2151–2157.

http://fog.ccsf.cc.ca.us/~wkaufmyn/ENGN45/Course%20Handouts/14_CompositeMaterials/03_Fiber-reinforcedComposites.html

http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/4_%20%C3%9Cretim%20prosesleri(2).pdf

http://www.robaid.com/tech/nanotechnologies-carbon-nanotubes.htm [Ziyaret Tarihi: 14 Kasım 2012].

Hu, G., Bai, J., B., Demianouchko, E., Bombard, P., 1998, Mechanical Behaviour of ±55° Filament-Wound Glass Fibre/Epoxy-Resin Tubes-III. Macromechanical Model of the Macroscopic Behaviour of Tubular Structures With Damage and Failure Envelope Prediction, Composites Science and Technology 58, 19-29

Irwin, G., R., 1962, Crack-Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate, Journal of Applied Mechanics, Volume 29, Issue 4, 651 – 654.

ISO 17281:2002, Plastics -- Determination of fracture toughness (GIC and KIC) at moderately high loading rates (1 m/s).

Johnson, T., Composites / Plastics Guide, http://composite.about.com/od/equipment/a/Filament-Winding-The-Basics.htm [Ziyaret Tarihi: 11 Kasım 2012].

Johnson, T., Composites / Plastics Guide, http://composite.about.com/od/fibers/a/Fiberglass-What-Is-Fiberglass.htm [Ziyaret Tarihi: 11 Kasım 2012].

Johnson, T., Composites / Plastics Guide, http://composite.about.com/od/Resins/a/Epoxy-Resin.htm [Ziyaret Tarihi: 11 Kasım 2012].

Kaneto, K., Tsuruta, M., Sakai, G., Cho, W., Y., Ando, Y., 1999, Electrical conductivities of multi-wall carbon nano tubes Synthetic Metals 103, 2543-2546.

Kang, M., H., Choi, J., H., Kweon, J., H., 2014, Fatigu life evaluation and crack detection of the adhesive joint with carbon nanotubes, Composite Structures 108, 417-422

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.

Karacaer, Y., 2009, Cam Kumaş Takviyeli Delikli SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Karadeniz, E., 1989, Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Karagöz, S., 2008, Malzeme Bilgisi, AYMYO Yayınları, Aydın Menderes Üniversitesi, Aydın Meslek Yüksek Okulu, http://tr.scribd.com/doc/76005982/100/Tanecik-Takviyeli-Kompozitler.

Karcı, A., 2009, Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi Kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Eskişehir.

Koç, M., B., 2003, Bitirme Tezi, Nanotüpler, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ankara.

Küçükyıldırım, B., O., Eker, A., A., 2012, Karbon Nanotüpler, Sentezleme Yöntemleri ve Kullanım Alanları, Mühendis ve Makine, Cilt: 53, Sayı: 630, s: 34-44.

Liu, L., Wagner, H., D., 2005, Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes, Composites Science and Technology 65, 1861–1868.

Loos, M., R., Yang, J., Feke, D., L., Manas-Zloczower, I., Unal, S., Younes, U., 2013, Enhancement of fatigue life of polyurethane composites containing carbon nanotubes, Compozites: Part B 44, 740-744.

Ma, P., C., Siddiqui, N., A., Marom, G., Kim, J., K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review, Composites: Part A 41, 1345–1367.

Martins, L., A., L., Bastian, F., L., Netto, T., A., 2013, The effect of stres on the fracture morphology of filament wound composite tubes, Materials and Design 49, 471-484

Martone, A., Formicola, C., Giordano, M., Zarrelli, M., 2010, Reinforcement efficiency of multi-walled carbon nanotube/epoxy nano composites, Composites Science and Technology 70, 1154-1160.

Mirik, M., 2010, Karbon Nanotüp Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Nanokompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Moczo, J., Pukanszky, B., 2008, Polymer micro and nanocomposites: Structure, interactions, properties, Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14, 535–563.

Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A., Mohajeri, A., 2010, Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites, Materials and Design 31, 4202–4208.

Montazeri, A., Montazeri, N., 2011, Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content, Materials and Design 32, 2301–2307.

Monteiro, P., Polymers: Classification, The University of California Berkeley, http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/CE60New/review_final.pdf [Ziyaret Tarihi: 25 Ekim 2012].

Mora, R., J., Vilatela, J., J., Windle, A., H., 2009, Properties of composites of carbon nanotube fibres, Composites Science and Technology 69, 1558–1563.

Newman, J, C., Raju, I., S., 1983, Stress-Intensity Factor Equations For Cracks In Three-Dimensional Bodies, Fracture Mechanics, Fourteenth Symposıum, Volume I Theory and Analysis, 238-265.

Önder, A., Sayman, O, Dogan, T., Tarakçıoğlu, N., 2008, Burst failure load of composite pressure vessels, Composite Structures 89, 159–166.

Polatlı, A., 2008 http://www.makaleler.com/teknoloji-makaleleri/malzeme-yorulmasi.htm [Ziyaret Tarihi: 05 Aralık 2012].

Pyo, S., Nam, J., Kim, Y., Choi, S., 2011, Utilization of notched ring test for larger diameter pipes and fittings, Polymer Testing 30, 324-326.

Rizov, V., Ernst, L., J., 2001, On the analysis of the interlaminar strain-energy release rates in ring-fracture-test specimens, Composite Structure 54, 331-334.

Sahoo, N., G., Rana, S., Chob, J., W., Li, L., Chan, S., H., 2010, Polymer nanocomposites based on functionalized carbon nanotubes, Progress in Polymer Science 35, 837–867.

Samancı, A., 2004, Yüzey Çatlaklı Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Savaşkan, T., 2004, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, 3. Baskı, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimleri Ana Bilim Dalı, Trabzon.

Shen, J., Huang, W., Wu, L., Hu, Y., Ye, M., 2007, The reinforcement role of different amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes in epoxy nanocomposites, Composites Science and Technology 67, 3041-3050.

Siddiqui, N., A., Li, E., L., Sham, M., L., Tang, B., Z., Gao, S., L., Mäder, E., Kim, J., K., 2010, Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube–epoxy nanocomposite coating: Effects of CNT morphology and dispersion state, Composites: Part A 41, 539–548.

Siddiqui, N., A., Sham, M., L., Tang, B., Z., Munir, A., Kim, J., K., 2009, Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube–epoxy nanocomposite coating, Composites: Part A 40, 1606–1614.

Smith, C., W., Kirby, G., C., 1983, Stress-Intensity Distributions for Natural Cracks Approaching Benchmark Crack Depths in Remote Uniform Tension, Fracture Mechanics, Fourteenth Symposıum, Volume I Theory and Analysis, 269-280.

Song, Y., S., Youn, J., R., 2005, Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites, Carbon 43, Issue 7, Pages: 1378-1385.

Sorucu, A., 2007, Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı, İzmir.

Spitalskya, Z., Tasis, D., Papagelis, K., Galiotis, C., 2010, Carbon nanotube–polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties, Progress in Polymer Science 35, 357–401.

Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method: ASTM D 2290.

Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, Designation: ASTM D 2584 – 11.

Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness *KIc* of Metallic Materials, Designation: ASTM E 399 – 09.

Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, Designation: ASTM D 5045 – 99.

Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics ASTM D 2734-09.

Suresh, S., 2004, Fatigue of Materials, Massachusetts Institute of Technology.

Şahin, A., 2011, Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, ISBN: 975-7313-73-4.

Şen, F., Palancıoğlu, H., Aldaş, K., 2010, Polimerik Nanokompozitler ve Kullanım Alanları, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 7, No: 1, 111-118.

Tan, P., W., Raju, I., S., Shivakumar, K., N., Newman Jr, J., C., 1990, Evaluation of Finite-Models and Stress-Intensity Factors for Surface Cracks Emanating from Stress Concentrations, Surface-Crack Growth: Models, Experiments and Structures, 34-48.

Tang, L., C., Zhang, H., Han, J., H., Wu, X., P., Zhang, Z., 2011, Fracture mechanism of epoxy filled with ozone functionalized multi-wall carbon nanotubes, Composites Science and Technology 72, 7-13

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.

Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., Avcı, A., 2000, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, Composites: Part B 32, 131–138.

Tarakçıoğlu, N., Gemi, L., Yapıcı, A., 2004, Fatigue failure behavior of glass/epoxy ± 55° filament wound pipes under internal pressure, Composites Science and Technology 65, 703–708 .

Tarakçıoğlu, N., Nanoteknoloji, 2012, Selçuk Bakış Dergisi, 22.sayı, Sayfa: 68-71, ISSN: 1306-4649.

Tarakçıoğlu, N., Samancı, A., Arıkan, H., Akdemir A., 2007, The fatigue behavior of $(\pm 55°)_3$ filament wound GRP pipes with a surface crack under internal pressure, Composite Structures 80, 207–211.

Taşyürek, M., Sepet, H., 2012, Mechanical Properties of Functionalized Carbon Nanotubes/Epoxy Composites, 14th International Materials Symposium (IMSP'2012), Denizli.

Taşyürek, T.,2012, MWCNT-Epoksi Nanokompozit İmalat Sürecinde Karıştırma Süresinin Malzeme Dayanımına Etkisinin Araştırılması, 14th International Materials Symposium (IMSP'2012), Denizli.

Tepe, A., 2007, Nanoteknolojide nano ölçekli yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Timings, R., L., Çeviri: Gürbüz, R., 1995, Malzeme Teknolojisi Seviye 3, Longman London ve New York.

Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., Ceylan, M., Vakum Torbalama Yöntemi İle Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması Mühendis ve Makine, Cilt: 48, Sayı: 566, 14-21, http://www.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/b70e8fe62e40c57_ek.pdf?dergi=96 [Ziyaret Tarihi: 28 Ekim 2012].

Uğuz, A., 1996, Kırılma Mekaniğine Giriş, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bursa.

Vatangül, E., 2008, Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Ansys 10 Programı İle Isıl Gerilme Analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bitirme Projesi, İzmir.

Vineet V. Mokashi, Dong Qian, Yijun Liu, 2007, A study on the tensile response and fracture in carbon nanotube-based composites using molecular mechanics, Composites Science and Technology 67, 530–540.

Wang, S., Liang, R., Wang, B., Zhang, C., 2009, Dispersion and thermal conductivity of carbon nanotube composites, Carbon 47, 53–57.

Warrier, A., Godara, A., Rochez, O., Mezzo, L., Luizi, F., Gorbatikh, L., Lomov, S., V., VanVuure, A., W., Verpoest, I., 2010, The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix, Composites: Part A 41, 532–538.

Xia, M., Kemmochi, K., Takayanagi, H., 2001, Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading, Composite Structures 51, 273-283.

Yaşar, H., 2001, Plastikler Dünyası, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, ISBN : 975-395-443-3.

Yeh, M., K., Hsieh, T., H., Tai, N., H., 2008, Fabrication and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes/epoxy nanocomposites, Materials Science and Engineering A 483–484, 289–292.

Yılmaz, M., İ., 2005, Kompozit Basınçlı Tüpte Gerilme Analizi, Araştırma Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İzmir.

Yingzhi, L., 1990, Fracture Analysis for Three-Dimensional Bodies with Surface Cracks, Surface-Crack Growth: Models, Experiments and Structures, 63-76.

Yöney, H., 2007, El Yatırma Yöntemi İle Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

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

Yüksel, M., 2003, Malzeme Bilgisi Cilt 1, TMMOB Makina Müh.Odası Y. ISBN: 975-395-458-1.

Zhang, J., Ju, S., Jiang, D., Peng, H., X., 2013, Reducing Dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes, Composites: Part B, 371-376

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa TAŞYÜREK
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : İnsuyu 12.01.1982
Telefon : 05055323623
Faks :
e-mail : mtasyurek@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Meram Teknik Lise, Meram, KONYA	1999
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Otomotiv Öğretmenliği Bölümü, Selçuklu, KONYA	2003
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü, Selçuklu, KONYA	2005
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Bölümü, Selçuklu, KONYA	----

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2005-2011	Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü	Araştırma Görevlisi
2011-	Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

İçten Yanmalı Motorlar, Alternatif Yakıtlar, Biyodizel, Nano malzemeler

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

1. The Effects of Storage Conditions on Viscosity of Biodiesel (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)
2. Otomobillerde Yeni Direksiyon Sistemi: Elektro Hidrolik Direksiyon Sistemi
3. Aspir biyomotorininde Depolama Süresi ve Şartlarının Yakıt Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

4. Gelişen Mekatronik Teknolojisinin Benzin Motorları Yakıt Sistemine ve Egzoz Emisyonuna Etkisi

5. MWCNT-Epoksi Nanokompozit İmalat Sürecinde Karıştırma Süresinin Malzeme Dayanımına Etkisinin Araştırılması

6. Mechanical Properties of Functionalized Multiwall Carbon Nanotubes/Epoxy Composites

7. Türkiye'de Enerji Bitkileri Potansiyeli ve Alternatif Kullanım Alanlarının Değerlendirilmesi

8. Effects of Difference in Production of Cotton Biodiesel at Low Speeds at Some Exhaust Emissions in Diesel Engines

9. Functionalization of Multiwall Carbon Nanotubes With Acids Mixtures

10. Karbon Nanotüp Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) Nanokompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

11. Biyoetanol-Küresel Isınmaya ve Emisyonlara Etkileri

12. Biyomotorin Yakıt Özelliklerine Yıkama Fazının Etkisi

13. Biyomotorin Üretiminde Üretim Aşamalarının Yakıt Özelliklerine Etkisinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma

14. Biyoyakıtlarda (Biyomotorinde) Emisyon Azatlımı ve Küresel Isınmaya Etkisi

15. Aspir biyomotorininde Depolama Süresi ve Şartlarının Yakıt Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

16. Farklı Depolama Süresi ve şartlarının Biyodizellerde Yakıt Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

17. Biyodizel Yakıt Özelliklerinin İyileştirilmesi Üzerine Bir Araştırma

18. Biyomotorin Yakıtının Soğuk Akış Özellikleri Üzerine Bir İnceleme

19. TiC/TiN TiAlN Kaplanmış ve Nitrürlenmiş AISI H13 Çeliğinin Aşınma Mekanizmasının Deneysel Olarak Belirlenmesi

20. Determining the Impact Resistance Composite Materials

21. Biyomotorin Üretiminde Üretim Aşamalarının Yakıt Özelliklerine Etkisinin Belirlenmesi

22. Examination of Changing of Physical Characteristic of Soybean Methyl Ester Which Directly Exposed to Sunlight

23. Investigation of the Mechanical Properties of E-Glass Fabric Reinforced SMC Around Hole on Fiberglass Reinforced Composites Materials