



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANODİSK İÇEREN FİLAMAN SARIM KARBON ELYAF TAKVİYELİ NANOKOMPOZİT BORULARIN YORULMA DAVRANIŞI

Tugay ÜSTÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

Ekim-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANODİSK İÇEREN FİLAMAN SARIM KARBON ELYAF TAKVİYELİ NANOKOMPOZİT BORULARIN YORULMA DAVRANIŞI

Tugay ÜSTÜN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI
2. Danışman: Yrd. Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

2015, 99 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA

Filaman sarım ile üretilmiş kompozit borular ve tanklar kimyasal madde içeren akışkanların depolanmasında, petrol, doğalgaz iletim hatlarında ve askeri alanlarda kullanılmaktadır. Farklı alanlarda kullanılan borular zamanla büyüklüğü ve yönü değişen gerilmeler altında yorulma etkisine maruz kalmakta ve belli bir kullanım ömürleri olmaktadır. Kompozit borular farklı gerilmeler altında çalışmasından dolayı infilak ya da yarılma şeklinde hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarları geciktirmek ve kompozit boruların kullanım ömürlerini artırmak için matriks malzemesine son yıllarda gelişen nanodolgular ilave edilmektedir.

Bu çalışmada filaman sarım yöntemi ile karbon elyaf/epoksi nanokompozit borular ±55° sarım açısında üretilirken epoksi reçine içerisine nanodolgu olarak çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) ve bor nitrür nanodiskler (BNND) katılmıştır. Nanodolgu kullanılarak üretilen boruların mekanik testler neticesinde nanomalzemelerin hasar oluşumu, gelişimi ve sonuç hasarı üzerindeki etkisi araştırılmış ve nanokompozit borularda oluşan sonuç hasarın analizi yapılmıştır. Nanokompozit borular ASTM standardına göre iç basınç altında patlatma testine tabii tutulmuş ve bu teste göre 0,7, 0,6 ve 0,5σ_{statik} gerilme oranlarında iç basınç yorulma testi uygulanmıştır. Yorulma testi sonucunda S-N eğrileri elde edilmiş ve nanokompozit boruların kullanım ömürleri bulunmuştur. Hasar başlangıçları ve son hasarların analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop ile görüntüler alınarak bu hasarlı yüzeylerin incelenmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: BBND, ÇCKNT, Filaman sarım, Nanokompozit, Yorulma

ABSTRACT

MS THESIS

FATIGUE BEHAVIOR OF FILAMENT WOUND CARBON FIBER REINFORCED NANOCOMPOSITE PIPES CONTAINING CARBON NANOTUBE AND BORON NITRIDE NANODISK

Tugay ÜSTÜN

The Graduate School of Natural and Applied Science of Selcuk University
The Degree of Master of Science in Mechanical Engineering

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI
Co-Advisor: Assist. Prof. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

2015, 99 Pages

Jury
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Assist. Prof. Dr. Memduh KARA

Composite pipes and tanks, which produced by filament winding, are used in storage of fluids containing chemicals both oil and natural gas transmission lines and military field. Pipes used in different areas, are exposed to fatigue effects under stresses of which magnitude and direction change by time and this causes limited by lifetime. Because of varying stress conduces explosion or splitting damage occurs in composite pipes. In order to retard this damages and increase the lifetime of composite pipes nanofillers are introduced to matrix material in recent years.

In this study, carbon fiber/epoxy nanocomposite pipes were produced by filament winding method with ±55° winding angle. As a nanofiller multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and boron nitride nanoplate (BNNP) were introduce to epoxy resin. Via mechanical tests of produced pipes the effect of nanomaterials an damage formation, development and final damage were investigated. Nanocomposite pipes were subjected to internal pressure blasting test according to ASTM standards. Based on internal pressure blasting tests, internal pressure fatigue tests were conducted at 0,7, 0,6 and $0{,}5\sigma_{static}$ stress ratios. S-N curves were obtained according to fatigue test and lifetime of nanocomposite pipes were evoluted. To analyse damage initiation and final damage scanning electron microscope (SEM) and optical microscope images were taken and damaged surfaces were investigated.

Keywords: BNNP, Fatigue, Filament wound, Nanocomposite, MWCNT

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmamda her konuda bilgi ve tecrübelerini aktaran, desteği ile hep yanımda bulunan danışmanım Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya teşekkür eder, kendisi ile çalışmaktan ve öğrencisi olmaktan onur duyduğumu ifade etmek isterim.

İkinci danışmanım Yrd. Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübeleri ile yol gösterici olmasından, değerli öngörüleri ve desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmada paylaştıkları değerli yorumlar ve TÜBİTAK projesinin gerçekleştirilmesinde destek olan Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e ve proje arkadaşım Öğr. Grv. Hasan ULUS'a katkılarından dolayı minnettarım.

Bu çalışma, proje no 112M145 ile Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırmalar Kurumu'na (TÜBİTAK) ve 14201043 numaralı tez projesi ile Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne finansal desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde en büyük emeği olan, sabır ve desteklerinden dolayı sevgili aileme teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tugay ÜSTÜN
KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

2.1. Kompozit Malzemeler 5
2.1.1. Polimer Reçineler 6
2.1.2. Takviye Malzemeleri 8
2.1.3. Filaman Sarım Yöntemi ile Kompozit Boru Üretimi 10
2.2. Nanoteknoloji 12
2.2.1. Karbon Nanotüpler 13
2.2.1.1. Karbon Nanotüplerin Polimer İçerisinde Dağıtılması 16
2.2.1.1.1. Fiziksel dağıtma yöntemleri 17
2.2.1.1.2. Kimyasal dağıtma yöntemleri 18
2.2.2. Bor Nitrür Nanodiskler 19
2.3. Nanokompozitler 21
2.3.1. Nanokompozitlerin Özellikleri 22
2.3.1.1. Termal Özellikler 22
2.3.1.2. Elektriksel Özellikler 23
2.3.1.3. Mekanik Özellikler 23
2.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma 24
2.5. Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları 27
2.5.1. Matriks Hasarı 29
2.5.2. Delaminasyon 30
2.5.3. Elyaf Hasarı 31
2.5.4. Tabaka İçinde Oluşan Hasarlar 32

3. MATERYAL VE METOT **33**

3.1. Kompozit Boru Üretimi 33
3.2. Elyaf-Hacim Oranının Belirlenmesi 36
3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi 37
3.3.1. Statik İç Basınç Patlatma Deneyleri 37
3.3.2. İç Basınç Altında Yorulma Deneyleri 40
3.4. Karakterizasyon Yöntemleri 41
3.4.1. Fourier Dönüşümlü İnfrared (FT-IR) Spektroskopi Ölçümü 41
3.4.2. Termal Gravimetrik (TGA) Analizi 42
3.4.3. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntü Analizi 43
3.4.4. Optik Mikroskop Görüntü Analizi 43

4. ARAŞTIRMA VERİLERİ VE TARTIŞMA 45

4.1. Nanomalzeme-Epoksi Polimerik Kompoziti 45
4.1.1. SEM Görüntü Analizi 45
4.1.2. TGA Analizi 46
4.2. Kompozit Borulara ait FT-IR Spektroskopi Ölçümü 48
4.3. Kompozit Boruların Elyaf-Hacim Oranı 49
4.4. Kompozit Boruların Mekanik Özellikleri 50
4.4.1. Statik İç Basınç Patlatma Deneyi 50
4.4.2. İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Deneyi 52
4.4.2.1. Gerilmenin Kompozit Boruların Çapları Üzerine Etkisi 58
4.5. Kompozit Boruların Hasar Analizi 59
4.5.1. Patlatma Hasar Analizi 59
4.5.2. Yorulma Hasar Analizi 64
4.5.2.1. $0,7\sigma_{statik}$ Gerilme Oranında İç Basınç Altında Hasar Analizi 68
4.5.2.2. $0,6\sigma_{statik}$ Gerilme Oranında İç Basınç Altında Hasar Analizi 69
4.5.2.3. $0,5\sigma_{statik}$ Gerilme Oranında İç Basınç Altında Hasar Analizi 71

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 74

5.1. Sonuçlar 74
5.2. Öneriler 76

KAYNAKLAR 77

ÖZGEÇMİŞ 89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε_i	:	-	i'inci yer değiştirme noktasındaki şekil değişimi
ϱ	:	g/cm^3	Numunenin yoğunluğu
σ_i	:	Pa	i'inci kuvvet anındaki gerilme
σ_m	:	mm	Ortalama gerilme
σ_{max}	:	Pa	Maksimum gerilme
D	:	mm	Numune kalınlığı
t	:	mm	Numunenin cidar kalınlığı
E_f	:	Pa	Elastisite modülü
V	:	cm^3	Hacim
R	:	-	Yorulma oranı
W	:	g	Numunenin ağırlığı
P	:	N	Uygulanan yük
P_i	:	N	i'inci kuvvet
P_{max}	:	N	Maksimum yük

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials
BNND : Bor nitrür nanodisk
ÇCKNT : Çok cidarlı karbon nanotüp
FT-IR : Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi
KNT : Karbon nanotüp
SEM : Taramalı elektron mikroskobu
TCKNT : Tek cidarlı karbon nanotüp

1. GİRİŞ

Günümüzde havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere otomotiv ve birçok sektörde kompozit malzeme kullanımı artış göstermekte ve her geçen gün metal malzemelerin yerini almaktadır. Kompozit malzemeler hafiflik, yüksek rijitlik ve mukavemet, yüksek enerji absorbsiyon davranışını, mükemmel bir yorulma performansı ve yüksek korozyon dayanımı gibi diğer malzemelere oranla rekabetçi birçok özelliğinden dolayı kullanımı gittikçe yaygınlaşmıştır (Ulus, 2014). Birçok üretim yöntemi bulunan kompozit malzemelerin el yatırması, filaman sarım, reçine transfer yöntemleri en yaygın olanlarıdır.

Filaman sarım yöntemi ile özellikle tüp, boru gibi dairesel kesitli parçaların yapımı kolay olduğundan bu üretim yöntemi tercih edilmektedir. Filaman sarım yöntemi ile yapılan kompozit malzemeler, yüksek basıncın olduğu ortamlarda, kimyasal depolamada, uzay, nükleer, savunma sektörlerinde, gaz, petrol tankları ve transferleri gibi kullanım alanları mevcuttur (Perreux, 1997).

Yüksek iç basınça dayanıklı filaman sarım borular ve tanklar genellikle büyüklüğü ve yönü zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler, eğilme ve burulma momentlerden dolayı yorulma etkisine maruz kalırlar (Parton, 1978; Fuchs, 1980). Bu etkiler altındaki malzemeler düşük bir gerilmede beklenmedik bir anda kırılabilir (Dieter, 1976). Filaman sarım ile üretilmiş kompozit borularda yorulma deneyleri üç farklı yöntemle yapılmaktadır. Bu üç yöntem sırasıyla, kapalı uçlu, açık uçlu ve tek ucu açık olacak şekilde deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Kompozit boruda açık uçlu yapılan deneylerde, eksen boyunca gerilme sıfırdır ve yüksek gerilmede sonuç hasarı eksen boyunca yarılma şeklinde olmaktadır (Hull, 1978). Kompozit borularda hasarın yarılma şeklinde olmasından dolayı farklı sarım açıları ile üretilen cam elyaf takviyeli kompozit borularda en ideal sarım açısı belirlenmeye çalışılarak sonuç hasarında oluşan yarılmalar engellenmeye çalışılmıştır. Sarım açısının artması ile hasar başlangıçları matriksten elyaf hasarına doğru ilerlemiştir. Filaman sarım yöntemi ile üretilmiş kompozit borular için gerilme/uzama oranı en yüksek değer dikkate alındığında en ideal sarım açısı olarak 54,44° kabul edilmiştir (Gemi, 2004; Hull, 1978). Basınçlı tanklar ve borular genellikle infilak ve yırtılma şeklinde hasarlar meydana gelmektedir. Oluşan bu hasarları engellemek ve yorulma ömrünü artırmak için sarım açısının haricinde farklı elyaf ve matriks modifikasyonları üzerinde çalışmalar devam etmektedir (Demirci, 2015).

Filaman sarım yöntemi ile yapılan üretimler de genellikle takviye malzemesi olarak cam elyaf tercih edilirken son zamanlarda karbon elyaflar kullanılmaya başlanılmıştır. Karbon elyafların kullanılmasının sebebi kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması, mekanik özellikleri, yoğunluğu ve yorulmaya karşı direnci diğer elyaflara göre yüksek olmasıdır (Jia, 2015). Bu elyaflar özelliklerinden dolayı kullanım alanları yüksek mühendislik uygulamaları gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. Karbon elyaflar, uzay, havacılık, askeri alanlar, spor sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gemi, 2014).

Polimer kompozitlerde matriks malzemesi olarak en yaygın epoksi reçine kullanılmaktadır. Fakat bu reçine gevrek yapıda olması, düşük uzama miktarı ve yorulma ömründen dolayı iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Bu doğrultuda günümüzde büyük önem kazanan nanoteknoloji alanındaki gelişmeler ve bu araştırmalar neticesinde nanoboyuttaki malzemelerin, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. 20. yüzyılın başından beri gelişmekte olan ve her alanda, bilgi işlemden akıllı malzemelere ve mikro elektroniğe kadar çok gelişmiş teknolojileri kullanan otomotiv endüstrisi, tıp, uzay çalışmaları, tekstil sanayisi gibi her alan nanomalzemeler kullanmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda nanomalzemeler, kompozit malzemelerde kullanılmasıyla üstün özellikli nanokompozit malzemelerin ortaya çıkmasına neden olmuşlardır (Ulus, 2014).

Takviyeli kompozit malzemelerde nano boyutta dolgu takviyesi ile bu malzemeler daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi endüstriyel uygulamalarda maliyet ve dizayn açısından büyük önem arz etmektedir (Menceloğlu, 2008). Son zamanlarda, nanoparçacık takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi, malzeme biliminde yeni ve ilgi çekici bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Nanoparçacıklar, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek en uygun dolgu malzemeleri olarak görülmektedir. Bu dolgu malzemesi ile üretilen nanokompozit malzemelerin elektriksel ve ısıl özellikleri de iyileştirilebilinir (Eskizeybek, 2012). Matriks özellikleri nanodolgular yardımıyla ile azaltılıp arttırılabilirken, kompozit malzemelerin yorulma ömürleri de bu şekilde arttırılabilir. Nanodolgular için genellikle silika, karbon nanotüp (KNT), nanokil tercih edilmektedir (Böger, 2010).

KNT'ler dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ve boy/çap oranları büyük olan bir boyutlu nanomalzemelerdir. KNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yüzeysel özelliklerine bağlıdır (Fan, 2007). KNT'ler yüksek rijitliğe ve

dayanıma (Thostenson, 2003; Yu, 2000[a]; Yu, 2000[b]; Li, 2003), 1300 m^2/g kadar ulaşabilen yüzey alanı (Peigney, 2001) ile polimer kompozitlerin takviyesi için kullanılabilecek en önemli dolgu malzemeleridir. KNT'ler, sahip oldukları grafit tabanlı yapıları sayesinde aynı zamanda yüksek ısıl iletkenliğe, yarı-metal veya metal gibi davranabilen elektriksel iletkenliğe sahiptirler (Eskizeybek, 2012).

Grafit tabanlı olan KNT'e benzer özellikler sergileyen seramik malzemelerden en hafifi olan hegzagonal bor nitrür, fiziksel ve kimyasal yapısı grafite benzerliğinden dolayı beyaz grafit olarak bilinmektedir (Ulus, 2014). Hegzagonal bor nitrür, yüksek sıcaklıklardaki yapışmama özelliği, kimyasal inertlik, yüksek ısıl iletkenliği, mükemmel ısıl direnci, elektriksel yalıtkanlık, işlenebilirlik ve yağlayıcılık özellikleri sayesinde kimya ve elektronik sektöründe çok geniş kullanım alanlarına sahiptir (Kempfer, 1990; Lipp, 1989; Kimura, 1999; Saito, 2000; Osborne, 1999; Lelonis, 2003). İki boyutlu nanoparçacıklar genel olarak termal ve elektrik iletkenliği alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İki boyutlu yapıya sahip olan bor nitrür nanodiskler (BNND) termal iletkenlik bakımından birçok malzemeden çok iyi özellik sergilemektedirler. Özellikle yalıtım malzemelerinde bu seramik tabanlı malzeme tercih edilmektedir (Tahakasi, 2007; Zhao, 2006; Du, 2004; Golberg, 2001; Ma, 2001; Cho, 2011). Günümüzde BNND ile yapılan çalışmalar yeni olmakla birlikte kompozit malzemeler içindeki bu nanodolgunun mekanik özellikleri ve yorulma ömürlerini etkilemesi ile ilgili çalışmalar yeni yapılmaktadır. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde KNT takviyesi ile yüksek gerilme oranlarında yapılan yorulma deneylerinde, çevrim sayılarında %250 ve üzeri artış sağlanmıştır (Grimmer, 2008). Epoksi reçine içerisinde, dolgu malzemesi olarak kullanılan KNT'ler ağırlıkça %0,3 katılmasıyla mekanik özellikleri en iyi şekilde iyileştirdiği ortaya çıkmış ve nanokompozit boruların yorulma ömürlerinde iyileşme meydana getirmiştir (Böger, 2010). Aynı şekilde ağırlıkça %0,5 BNND katılması ile oluşan nanokompozitlerde mekanik özellikleri en iyi şekilde iyileştirdiği ortaya çıkmıştır (Ulus, 2014). Aglomer olmuş nanoparçacıklar mikro çatlak oluşumunu kolaylaştırdığı ve yorulma çatlakların hızlı ilerlemesini neden olmaktadır. Matriks içerisinde homojen olarak dağılmış olan nanoparçacıklar matriks çatlaklarını durdurma ve yönlendirme görevi görmektedir (Borrego, 2014; Jia, 2015; Zhang, 2008).

Bu çalışmanın amacı, matriks malzemesinin içerisine nanodolgular kullanılarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirilmesi ve iç basınç altında yorulma deneyleri ile nanokompozit boruların yorulma ömürlerindeki artışı sağlanmaktır. Birinci çalışma olarak ağırlıkça en iyi mekanik özellikler sergileyen BNND ve ÇCKNT katkılı

polimerik nanokompozitler üretilmiştir. Bu kompozitlerin SEM görüntüleri alınarak nanomalzemelerin homojen bir şekilde epoksi reçine içerisinde dağıtılması sağlanmıştır. Epoksi reçine içerisinde nanodolguların homojen dağıtılması için öncelikle mekanik karıştırıcı ile daha sonra da problu ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmış ve karışım sırasında sıcaklıktan dolayı epoksi reçinenin bozulmaması için soğutma banyosu kullanılmıştır. Bu iki farklı nanomalzeme kullanılması, BNND'lerin iki boyutlu yapısı ve ÇCKNT'lerin bir boyutlu bir yapısı olmasından ve benzer özellikler sergilemesinden dolayıdır. Polimerik nanokompozitlerin daha sonra TGA analizi ile nanomalzemelerin termal kararlılıklarına bakılmıştır. BNND'ler ÇCKNT'ye oranla daha iyi yalıtkan ve seramik bir malzeme özelliği sergilemişlerdir. İkinci aşama olarak epoksi reçine içerisinde nanomalzemelerin homojen karışım süreleri bulunduğundan dolayı filaman sarım yöntemi ile nanokompozit boruların üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretim sırasında karbon elyaf takviyeli, ±55° sarım açılı ve 8 tabakalı kompozit borular üretilmiştir. Nanomalzemelerin testlerde etkilerini belirleyebilmek için dört farklı grupta boru üretilmiştir. Deneylerde referans olarak alınması için nanomalzeme katkısız boru, nanomalzeme katkılı BNND, ÇCKNT ve her iki nanomalzemenin, BNND ve ÇCKNT'nin birlikte kullanıldığı hibrit olan borular üretilmiştir. Üretilen bu nanokompozit borular üç farklı gerilme oranı altında yorulma ömürlerine, daha sonra FT-IR ile karbon elyaf epoksi reçine arasındaki kimyasal bağlanmaya bakılmış olup, SEM ve optik mikroskop ile hasar analizleri yapılmıştır. Bu farklı yapıların kullanılmasıyla, bir ve iki boyutlu yapılar, yorulma hasar mekanizmasında farklılıklar meydana getirmişlerdir. Bunu da sonuç hasarından sonra SEM ve optik mikroskop fotoğrafları ile gösterilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1.Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, değişik yapı ve özelliğe sahip iki malzemenin makro veya mikro ölçekte dağıtılması ile elde edilen, yeni özelliklere sahip malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Kompozit, malzemelerin değişik tür ve fazlardan her birinin tek başına sahip olmadığı özelliklerin veya birbirlerinin zayıf yönlerini iyileştirmesini mümkün kılarak üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilmesine olanak sağlanmaktadır.

Kompozit malzemeler kullanım yerlerine göre istenilen özelliklerinde değişiklik gösterebilir. Kompozit malzemelerin özelliklerini belirleyen dört temel faktör vardır. Bunlar; matriks özellikleri, takviye malzemesinin özellikleri, ara yüzey ve mikro yapı özellikleridir. Kompozit malzemelerin,

Yüksek Mukavemet, kullanım yerine ve istenilen özelliklere göre ve gerektiğinde metallerden yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir.

Hafiflik, metallere oranla daha hafiftirler.

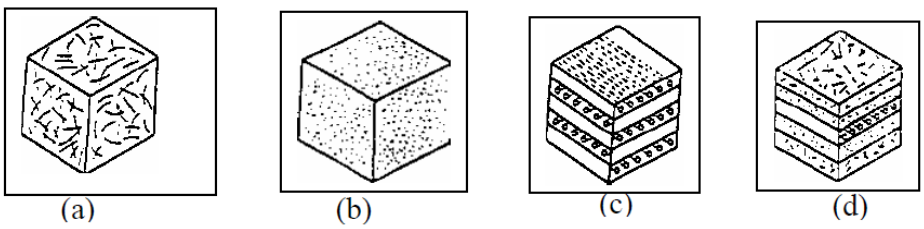
Korozyon Dayanımı, korozif maddelerden, hava koşullarından ve kimyasal etkilerden zarar görmezler.

Elektriksel Özellikler, uygun malzemeler seçimiyle üstün elektriksel özelliklere sahip veya yalıtım gerektiği durumlarda yalıtkan kompozitler elde edilebilir.

Üretim Maliyeti, kompozit malzemelerin kalitesi üretim yöntemine ve kullanılan malzemelere bağlıdır. İmalat, hassas işlem gerektirmektedir. Bu nedenlerden dolayı kompozit malzemeler metallere göre daha pahalıdır.

Geri Dönüşüm, kompozitlerde matriks yapıda kullanılan termoset polimerlerin geri dönüşümü olmamaktadır.

Kompozit malzemelerin sınıflandırma yönteminden biri olan yapısındaki malzemelerin formuna göredir. Yapı bileşenlerinin şekillerine göre dört grupta incelenir(Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Çetin, 2007)
a)Elyaflı kompozitler b)Parçacıklı kompozitler c)Tabakalı kompozitler d)Hibrit kompozitler

Elyaflı kompozitler, düşük yoğunlukları en önemli özellikleri olması yanı sıra yüksek elastik modülüne ve sertliğe sahiptirler. Elyafların hatasız olmaları, matriks içerisinde homojen dağılmaları kompozit yapıyı önemli şekilde etkiler ve mukavemetini artıran ve azaltan unsurlardan biridir. Elyafların matriks içerisinde birbirine paralel şekilde olmaları elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlarken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilmesine sebep olur. Cam elyaflar, kompozit malzemeler kullanılan en eski elyaf tipidir. Günümüzde ise karbon, bor, bazalt gibi elyaflar da kompozit yapıda kullanılmaktadır.

Parçacıklı kompozitler, matriks yapının içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilir. Parçacık boyutu, rijitlik, mukavemet gibi malzemenin özelliklerini etkileyen parametredir. Yaygın olarak polimer matriks içerisine metal parçacıklar eklenerek kompozit yapının ısıl ve elektriksel iletkenliği sağlanmış olur.

Tabakalı kompozitler, en az iki tabakanın bir araya gelmesi ile oluşur. Tabakalı kompozit yapı en eski ve yaygın kullanım alanına sahiptir. Havacılık sanayisinde kullanılmakta olan farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakalı kompozitler ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilmektedir.

Hibrit kompozitler, farklı yapıdaki kompozitleri bir araya getirilmesi ile oluşan yapıdır. Uçak ve uzay sektöründe bor, kevlar ve karbon gibi farklı özelliklere sahip elyafların bir araya getirilmesi ile birlikte üstün özelliklere sahip kompozit yapı elde edilmektedir (Çetin, 2007).

2.1.1. Polimer Reçineler

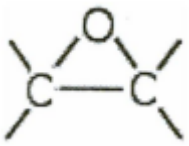
Kompozit malzemelerde matriksin temel yapısı olan reçineler, elyafların yapısal bütünlüğü oluşturmasını, uygulanan yükün elyaflar arasında dağılmasını, elyafların aşınma gibi mekanik hasarlar ve kimyasal etkilerden korunmasını sağlar. Fiber ile uyumlu matriks malzemesi seçilmesiyle reçinenin özelliklerine bağlı olarak, kompozit malzemenin süneklik, darbe direnci gibi mekanik karakteristikleri de belirlenebilir. Ayrıca kullanılan polimer reçinenin özellikleri ve elyafla uyumluluğu, meydana gelen hasar mekanizmalarını önemli ölçüde etkiler (Eskizeybek, 2012).

Polimer reçineler, polimer zincirleri arasında kimyasal bağdaki farklılıklardan dolayı termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılırlar. Uzun hidrokarbon moleküllerinden oluşan polimer reçineleri, monomerleri birbirlerine oldukça zayıf Van der Waals bağı ve mekanik kilitlenmeler ile bağlı olan termoplastikler, sıcaklığın

artmasıyla viskoziteleri kolaylıkla azaltılabilir ve zayıf bağ yapıları sıcaklığın etkisiye koparak tekrar şekillendirilmelerine olanak sağlar. Aynı şekilde uzun hidrokarbon zincirlerinden oluşmuş termoset plastiklerin monomerler birbirlerine kovalent bağlar ile bağlı olduklarından sıcaklık etkisiyle bu bağların koparak tekrar şekillendirilmesine olanak sağlamamaktadır. Termosetler üç boyutlu karmaşık katı yapıya sahip olup, termoplastiklere göre daha rijit, dayanıklı ve daha az süneklik özelliği gösteren yapılardır (Ahmad, 2009).

Termoplastiklerin matriks malzemesi olarak kullanımları az olmasına rağmen üstün süneklilik özelliği, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi önemli avantajları bulunmaktadır. Matriks malzemesi olarak en çok tercih edilen termoset reçineler ise kimyasal etkiler altında çözülmez iken olağandışı hava koşullarında dahi uzun ömürlü olmaktadırlar (Şahin, 2000). En çok kullanılan termosetler epoksi, polyester ve fenolik reçinelerdir (Sinha, 2006). Bu çalışmada, üstün mekanik, elektriksel ve kimyasal direnç özellikleri yanı sıra daha dayanıklı ve daha rijit olmalarından dolayı termoset reçine çeşitlerinden biri olan epoksi reçine kullanılmıştır.

Epoksi reçineler kür katkısına bağlı olarak, 5 ile 200 °C arasındaki sıcaklıklarda kolay ve hızlı bir biçimde kür edilebilmektedir (Memiş, 2009). Epoksi reçineler kürleme esnasında düşük çekme eğiliminde olduklarından iç gerilmeden oluşabilecek hasarlar minimize edilebilir (Biron, 2004). Epoksi reçine adını, yapısında bulunan Şekil 2.2'de gösterilen epoksi fonksiyonel gruplarından almaktadır. Epoksi reçinelerinin herbir molekülünde bir veya daha fazla epoksi grubu vardır ve oksijen bağlarına sahip eteri yapısında bulundurur (Ulus, 2014).



Şekil 2. 2. Epoksi fonksiyonel grubu

Epoksi reçinesi ilk olarak 1930 yılında sentezlenmiş ve birçok endüstriyel uygulamalar için kullanılmaktadır. Eopksi reçinenin uygulama alanları olarak, yapı malzemeleri, kaplamalar, havacılık, uzay ve yapıştırıcılardır (Joseph, 1996). Bu alanlarda yaygın olarak kullanılması, epoksi reçinelerin mekanik özellikler ve çevresel

bozulmaya karşı dirençleri yüksek olmasından dolayı tercih edilmektedir. Yüksek yapışma özellikleri ve suya karşı direnci, bu reçinenin gemi inşaatında kullanılmasında yaygın hale getirmiştir. Epoksiler yapıştırıcı, döküm bileşeni, cila, boya ve birçok endüstriyel uygulama için lamine edici reçine olarak kullanım bulmaktadır (Memiş, 2009).

Epoksi diğer polimer matrikslere göre pahalı olmasına rağmen, kompozitler için en çok tercih edilen polimer matriks malzemesidir. Epoksilerin en çok tercih edilen polimer matriks malzemesi olmasının başlıca sebepleri (Kaw, 1997),

- Çekme ve darbe dayanımları oldukça yüksektir.
- Aşınmaya karsı çok dayanıklıdır.
- Yüksek sıcaklıkta iyi mekaniksel performans
- Oda sıcaklığında katılaşabilmeleri
- Düşük viskozite ve düşük akış hızı
- Kürleşme süresince uçuculuğunun düşük olmasıdır.
- Yüksek elektriksel direnç
- Yüksek kimyasal dirençtir.

Epoksilerin kürleşme esnasında uçucu madde oluşmaz ve çapraz bağlanmaları sonrası büzülme oranları da (%1-5) düşüktür. Ancak fiyatları yüksek ve kürleme süreleri uzundur. Kür süresini azaltmak amacıyla hızlandırıcılar kullanılarak çapraz bağlanmaları hızlandırılır. Kullanım sıcaklıkları epoksi reçinenin çeşidine ve özelliklerine bağlı olarak 150 °C'ye kadar çıkar (Velde, 1992).

2.1.2. Takviye Malzemeleri

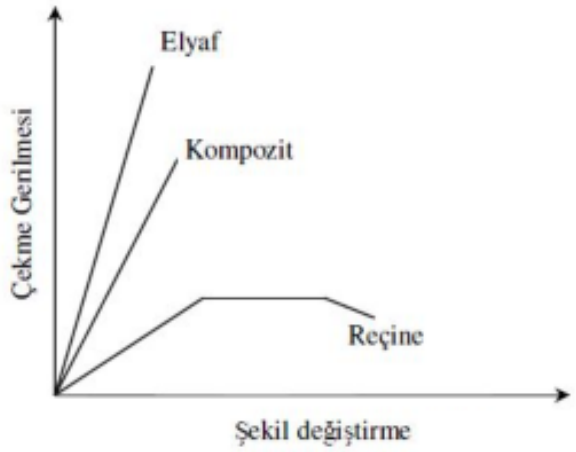
Kompozit malzemelerde elyaf takviyesinin temel amacı, uygulanan yükü taşımak, mukavemet, termal stabilite ve kullanılan takviyeye bağlı olarak elektrik iletkenliği sağlamaktır (Chang, 2001). Elyaflar genellikle bir çözelti veya eriyiğin eğrilmesi yöntemi ile üretilmektedirler.

Cam, kevlar, karbon gibi çok sayıda ve farklı özelliklere sahip elyaf malzemesi bulunmaktadır(Çizelge 2.1). Havacılık ve uzay sektöründe gerilmeye maruz kalan uçak parçalarında en yaygın kullanılan elyaf malzemesi karbon elyaflardır (Baker, 2004). Karbon ve grafit elyaflar genellikle birbirinin yerine kullanılan terimler olmalarına rağmen grafit elyaflar, 1600 °C üzerinde bir ısıl işlem sonucunda, %99'dan fazla karbon içermekle beraber 345 GPa'dan yüksek elastik modülene sahiptirler. Karbon elyaflar ise

daha düşük sıcaklıklarda ısıl isleme tabi tutulmakta, %93-95 karbon içermekte ve 345 GPa'dan küçük elastik modüle sahiptir(Campbell 2004).

Ticari olarak satılan karbon elyaflar, poliakrilinitril (PAN) ve zift (petrol veya kömür) tabanlı hammaddelerden üretilmektedir (Middleton, 1990). Karbon elyaf üretim basamakları sırasıyla, termal oksidasyon, karbonlaştırma, grafitleştirme ve yüzey işlemlerini içermektedir. Yüzey işlemleri, elyaf bütünlüğü ve elyaf-matriks arasında iyi bağ oluşması için yapılmaktadır. Yaklasık 7-8 μm çapında üretilen karbon elyafların en önemli özelliği düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve rijitlik değerleridir (Campbell, 2004).

Kompozit malzemeye gelen yükü taşıyan elyaflar, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi matriksin mukavemet ve rijitligini artırmaktadır. Elyaflarda aranan temel özellikler, yüksek elastik modül ve mukavemet, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk ve üretim kolaylığıdır. Kompozit malzeme üretilirken elyaf seçimi, üretim tekniği, matriksin elyafları ıslatılabilmesi ve elyaf hacmi kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerinde etkilidir (Şahin, 2000).



Şekil 2.3. Reçine, elyaf ve kompozitin çekme gerilmesi-şekil degişimi şematik gösterimi (Şahin, 2000)

Karbon elyaf takviyeli yapılmış kompozitler, 1020 çelik konstruksiyonlardan 5 kat daha dayanıklı ve 1/5'i ağırlığında, 6061 alüminyum konstruksiyonlardan da 7 kat daha dayanıklı, 2 kat daha sert ve 1,5 kat daha hafiftirler. Ayrıca karbon elyafların yorulma davranışı bilinen tüm metallerden daha iyidir. Uygun reçine ile kaplandığı zaman korozyona karşı iyi bir kompozit malzeme olmaktadırlar (Walsh, 2001).

Çizelge 2.1. Çeşitli elyafların özellikleri (Bai, 2014)

Özellikler	Cam elyaf	Karbon elyaf	Aramid elyaf
Çekme dayanımı (MPa)	3500	2600-3600	2800-3600
Young modülü (GPa)	73	200-400	80-190
Yoğunluk (g/cm^3)	2,6	1,7-1,9	1,4
Elyaf çapı (µm)	3-13	6-7	12

Karbon elyafların özellikleri, mikroyapıdaki kristal yapılarının dikey ve yatay yerleşiminden etkilenmektedir. Bu kristallerin uzunluğu ve düzlüğü (eksene paralelliği) liflerin elastik modülünü ve mukavemetini etkilemektedir. Çoklu tabakalardan oluşmuş kristalin her bir tabakası grafen denilen hegzagonal karbon atomlarından meydana gelmekle birlikte tabaka içerisindeki güçlü C-C bağları elyafa yüksek dayanım ve sertlik verirken, tabakalar arasındaki zayıf Van der Waals bağları da kayma direncinin artmasına sebep olarak iyi ısı ve elektrik iletkenliği sergilemesine neden olmaktadır. Kristallerin kalınlığı ve uzunluğu karbon elyafların elektriksel, ısıl özelliklerini ve modülünü etkilemektedir. Karbon liflerinin en önemli özelliklerinden birisi de çok iyi yorulma direncine sahip olmasıdır. 2200 °C altındaki sıcaklıklarda karbon liflerinde büzülme davranışı gözlenmemektedir. Karbon lifleri nem, açık hava, bazlar ve zayıf asitlerden oda sıcaklığında etkilenmemekte fakat yüksek sıcaklıklarda oksidasyondan oldukça fazla etkilenmektedirler (Eskizeybek, 2012).

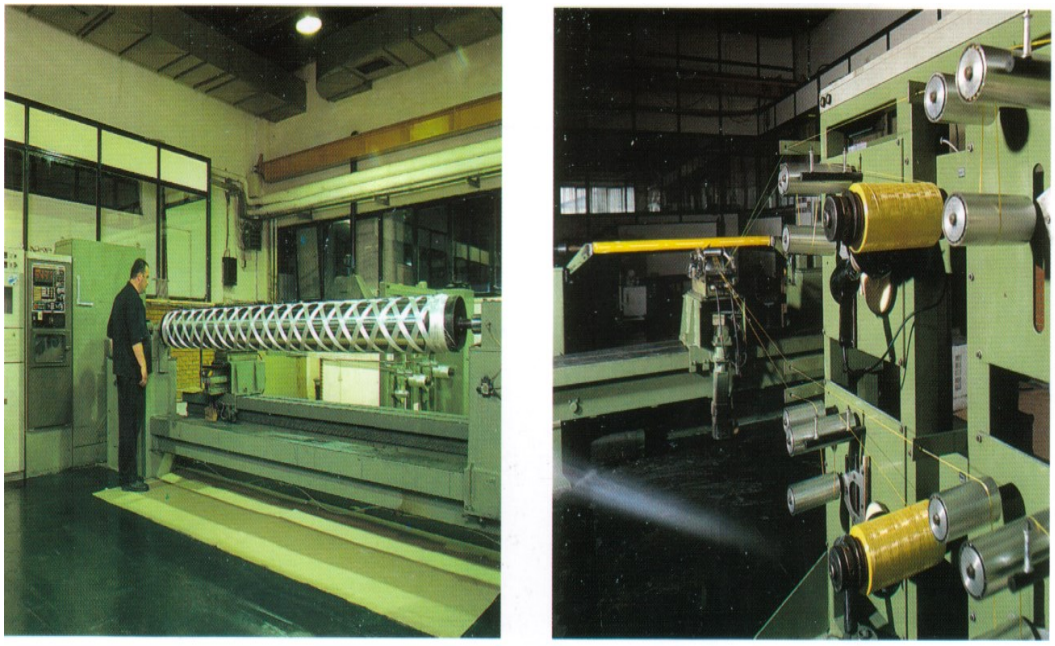
2.1.3. Filaman Sarım Yöntemi ile Kompozit Boru Üretimi

Kompozit malzeme üretim yöntemi, üretilecek olan parçanın biçimine, boyutuna ve detaylarına bağlı olarak değişim gösterir. Kompozit malzemeler günümüzde pek çok alanda kullanıldığından dolayı farklı üretim teknikleri geliştirilmiştir. Örneğin, üretimde kullanılacak matriks tipleri, üretim yönteminin seçiminde önemli rol oynar. Üretim yönteminin ve matriks malzemesinin aynı olmasına rağmen üretim parametreleri değişiklik gösterebilir (Sinha, 2006).

Filaman sarım yöntemi, dönel bir kalıp üzerine takviye malzemesinin sarılması ile kompozit malzemenin üretiminin gerçekleştiği bir yöntemdir. Bu yöntem ile istenilen sarım açılarında, kalınlıkta ve boyutlarda üretim gerçekleştirmek mümkün olmaktadır. Filaman sarım yöntemi ile üretilen parçalar genel olarak dönme yüzeyleri yani basınçlı tanklar, borular şeklindedir, bazı özel durumlarda ise bir takım sınırlamalarla asimetrik şekiller de üretilebilir. Ürünler, birkaç santimetreden metre boyutuna kadar değişebilen şekillerde olabilirler. Parçalar, kullanılacakları alanlara ve

maruz kalacakları yüklere göre özel olarak tasarlanır ve üretimi gerçekleştirilirken gerekli hallerde ise kombinasyonlu üretimler de yapılabilir. Bunlara örnek olarak termoplastik boru üzerine, ince metal basınçlı kap üzerine sarım verilebilir (Gemi, 2004).

Şekil 2.4'de filaman sarım yöntemi ile sürekli takviye malzemesi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmekte olan kompozit boru ve sarım açıları görülmektedir. Sarım açıları düşük açılardan başlayarak kalıp eksenine dik açıya kadar uygulanabilir. Yaygın olarak kullanılan ıslak sarımda reçine, sarım esnasında takviye malzemesine emdirilmesiyle uygulanır. Alternatif metot olan kuru sarımda ise, önceden reçine emdirilmiş, prepeg kumaşlar kullanılır ve sarım işlemlerinden sonra parçalar yüksek sıcaklıklara maruz bırakılır.



Şekil 2.4. CNC kontrollü filaman sarım makinesi (Gemi, 2004)

Filaman sarım yönteminde hemen her tip sürekli elyaf kullanılabilmesine rağmen, genel olarak cam elyaflar tercih edilmektedir. Karbon, aramit ve kevlar gibi elyaflar da kullanılmaktadır. Bu elyaflar ve filaman sarım yöntemi ile üretilen parçalar ise yüksek özgül dayanım ve elastisite modülü gerektiren havacılık ve uzay alanlarında kullanılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan başlıca matriks malzemeleri ise epoksi, polyester ve vinilester olarak genellenebilir.

Filaman sarım yöntemi ile üretilen kompozit boruların üretim parametreleri mukavemet özelliklerini büyük oranda etkiler. Özellikle, elyaf gerginliği, elyafların

homojen dağılmaması ve reçinenin homojen olarak sertleşmemesi temel faktörler olarak sayılabilir. Örneğin, gerilmeli korozyon olayında, elyaf hasarının temel sebebi elyaf üzerine gelen gerilmenin büyüklüğüdür. Üretim sırasında elyaf gerginliğinin fazla olması korozyonu hızlandırırken, reçine fazlalığı ise korozif ortamın elyafa ulaşmasını engellemesi bakımından önemlidir. Reçinenin homojen sertleşememesi ise matriks malzemenin bazı bölgelerinin daha tok davranmasına ve çatlak hızının yavaşlatılması hatta durdurulmasına sebep olabilir (Şahin, 2004).

2.2.Nanoteknoloji

"Nano" Yunancadan "nannos" kelimesinden türetilmiş ve "cüce" anlamında kullanılmaktadır (Çetin, 2007). Nano ise herhangi bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri (10^{-9}) anlamında ve nanoyapılar uzunluk olarak bakıldığında yaklaşık 10-100 atom büyüklüğüne karşılık gelmektedir. Bu boyutlardaki sistemlerin fiziksel davranışlarında normal sistemlere kıyasla farklı özellikler gözlenmektedir (Tübitak, 1994). Nanoyapıların temelini karbon yapıları oluşturmaktadır. Günümüzde bu yapıların en çok araştırılması karbon nanotüpler ve grafen üzerinedir.

Bilgisayarlarda, arabalarda, uçaklarda, uzay araçlarında kullanılan malzemeler gün geçtikçe iyileşmekte olup daha üstün özellikleri ile karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin bu kadar iyileşmesi nanoteknolojinin gelişmesi ile olmaktadır (Mnyusiwalla, 2003). Bu sayede çok hafif, yüksek mukavemetli, daha ucuz, daha küçük cihazlar geliştirilmektedir. Nanoteknoloji için üretim mekanizmalarını, doğal ortamda veya kontrolsüz çevrede kendini tekrarlaması ile mümkün olmayacaktır. Bu mekanizmanın işlemesi için mutlaka dışarıdan enerji ihtiyacı temin edilmesi gerekmektedir.

Nanoteknoloji farklı çalışma alanları ile günümüzde karşımıza çıkmaktadır. Uzay çalışmaları çok pahalı olmasından dolayı bilim insanları bunu azaltmaya çalışmaktadır. Uzay çalışmalarında yakıt olarak, hidrojen enerjisinin kullanımında en büyük engellerden biri depolanmasıdır. Karbon nanotüpler ve farklı nanoparçacıklar sayesinde hidrojen depolanmaya çalışılmaktadır. Tıp sektöründe ise, nanoteknoloji canlı sistemlere moleküler seviyede müdahale etme imkânı sunmaktadır. Kanser tedavisinde kullanılan yöntemlerin yerine nanoparçacıklar yardımı ile hastalığın bulunduğu veya yayıldığı bölgelere etki ederek tedavi amaçlanmaktadır. Yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi sonucu nanoparçacıklar ile ilaç taşıması yapılmak istenmektedir.

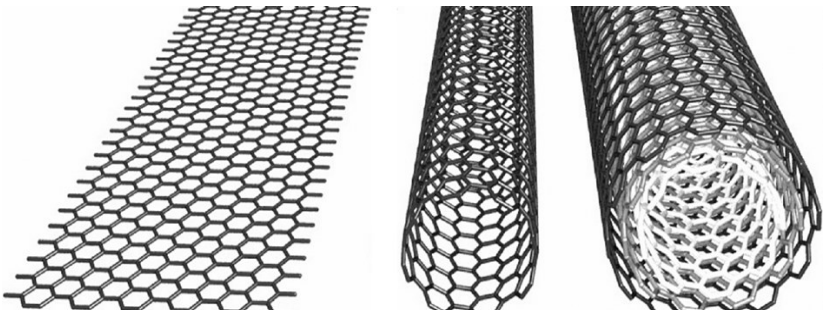
En büyük sorun nanoparçacıkların insan sağlığı için uygun olup olmadığının kesin sonuçları bilinmemektedir.

Çizelge 2.2. Nanometre ölçeğinde malzeme özelliklerinde ve fiziksel olgularında önemli değişiklikler (Çetin, 2007)

Makro ölçekli teknolojiler	Nano ölçekli teknolojiler
Klasik sürekli fizik	Kuantum fiziği
Egemen kütlesel özellikler	Egemen yüzeysel özellikler
Geleneksel malzemeler/karışımlar	Yeni bileşikler ve karışımlar
Klasik yukarıdan aşağıya yaklaşımı	Kendiliğinden düzenlerek birleşme
İstatistiki topluluklar	Tek tek parçacıklar
Elverişli yüksek enerji aralıkları	Termal dalgalanmalı enerji aralıkları
Orta derecede alan kuvveti	Aşırı derecede yüksek alan kuvveti
Katı faz özellikleri	Bağlanma özellikleri

2.2.1. Karbon Nanotüpler

KNT'lerin yapısı, tüp haline gelecek şekilde yuvarlatılmış altı karbon atomundan oluşan bir grafen levha olarak düşünülebilinir(Şekil 2.9). Literatürde cidar sayılarına göre üç çeşit karbon nanotüp tanımlanmıştır (Eskizeybek, 2012). Tek cidarlı karbon nanotüp (TCKNT), iki cidarlı karbon nanotüpler ve çok cidarlı karbon nanotüpler(ÇCKNT). TCKNT'ler, ÇCKNT'lere göre daha dayanıklıdırlar çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması ile oluşur (Fan, 2007). ÇCKNT'ler ise iç içe geçmiş tüpler olup bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme ihtimalleri dayanımlarını düşürür (Lordi, 1999).



Şekil 2.9. Grafit tabakanın yuvarlanması ile oluşan TCKNT ve ÇCKNT yapısı (Graham, 2005)

KNT'ler hafif, yüksek termal, elektriksel iletkenliğe, dayanıma sahip ve boy/çap oranları büyük olan nanomalzemelerdir(Çizelge 2.3). KNT'lerin özellikleri çaplarına, yönlenmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır (Fan, 2007). KNT'lerin büyük miktarlardaki üretimi için ark-deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar yoğuşturma (CVD) gibi yöntemler tercih edilmektedir. Bu yöntemler genellikle vakum altında veya

çeşitli gaz ortamlarında gerçekleştirilmektedir. İlk büyük miktarda KNT üretimi ark deşarj yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Ebbesen, 1992). Grafit elektrotlar arasında gerçekleşen ark ile açığa çıkan yüksek sıcaklıklar nedeniyle grafit elektrot buharlaşır ve ortamın etkisiyle ani olarak tekrardan katılaşır. Yeniden oluşan bu yapılarda KNT içeriği ağırlıkça %30 civarındadır (Collins, 2000). Lazer buharlaştırma yönteminde, yüksek sıcaklara ısıtılan ve asal gaz ile doldurulmuş bir reaktör içerisine yerleştirilen grafit kaynağı lazer ile buharlaştırılır. KNT'lerin toplanabilmesi için reaktör cidarlarının su ile soğutulması gerekir (Eskizeybek, 2012). Kobalt ve nikel gibi katalizörler kullanılarak TCKNT üretimi gerçekleştirilir (Guo, 1995). CVD günümüzde ticari amaçlı KNT üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Kobalt, nikel ve demir gibi katalizörler ile kaplanmış yüzeyler kuartz bir tüp fırın içerisinde ön ısıtma ile yaklaşık 700 °C civarına ısıtılır. Tüp fırın içerisinden amonyak, azot veya hidrojen gibi taşıyıcı gazlar ile birlikte karbon kaynağı içeren asetilen, etanol, etilen ve metilen gibi gazlar geçirilir. Nanotüpler metal katalizler üzerinde karbon içeren gazın bozunması ile büyütülürler (Pinilla, 2007).

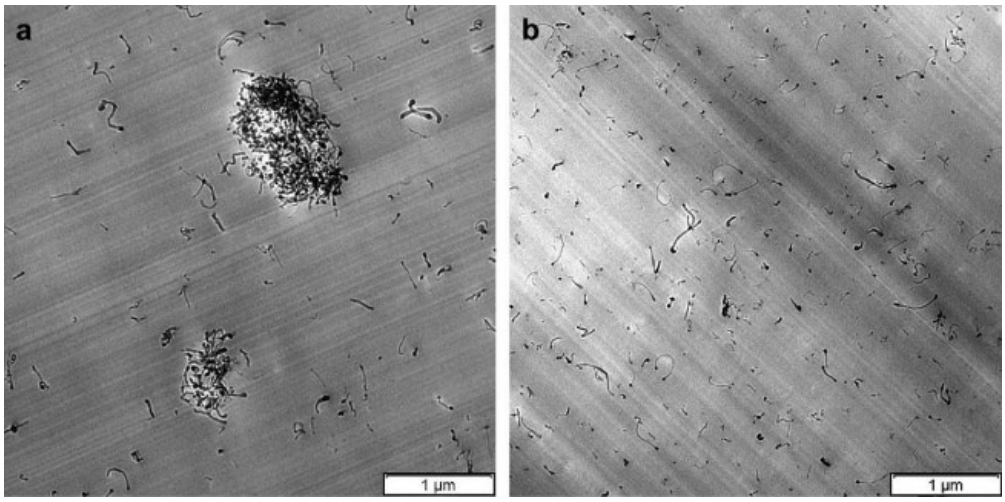
KNT'lerin mekanik özellikleri iyi olsada, bu özelliklerinden kompozit malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanabilmek için bazı zorlukların üstesinden gelmek gerekir. KNT'lerin polimer matriks içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matriks tarafından ıslatılabilmesi, adezyon kuvvet gibi etkenler, karbon nanotüplerin dolgu malzemesi olarak malzemelerde göstereceği performansı etkileyen en önemli konulardır (Njuguna, 2007).

Çizelge 2.3. Karbon nanotüplerin önemli özellikleri (Chandresekaran, 2011)

Özellikler	Karbon nanotüpler	Yorumlar
Elastisite modülü	270 GPa^{-1} (Krishnan, 1998)	En güçlü çelikten 10-100 kat daha büyüktür.
Çekme dayanımı	11-63 GPa (Yu, 2000)	Yüksek dayanımlı çelikten 150-900 kat daha büyüktür.
Termal iletkenlik	2000 W/m.K (Kim, 2001)	Elmasın iki katıdır.
Maksimum akım yoğunluğu	10 A/m^2 (Frank, 1998)	Bakır tellerden 1000 kat daha büyüktür.
Boy/Çap oranı	2000	

KNT'lerin matriks içerinde homojen bir şekilde dağıtılması, matriks ile karbon nanotüp arasında etkin olarak yük aktarımının yapılabilmesi, gerilmenin homojen dağılması ve gerilme yoğunluğu olan bölgelerin azaltılmasını sağlar (Coleman, 2006). KNT'ler matriks içerisinde homojen olarak dağıtmanın zorluğu, büyük yüzey

alanlarından kaynaklanan Van der Waals kuvvetlerinden ileri gelmektedir. KNT'ler matriks içerisinde kümelenmesi ve yetersiz dağılım, karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesi neden olmaktadır (Andrews, 2004; Song, 2005). KNT dağılım problemini çözmek için fiziksel ve kimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Ultrasonikasyon (Shaffer, 1999), kayma etkisi ile karıştırma, yüzey aktifleştiren madde (surfactant) kullanma (Gong, 2000), karbon nanotüp yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi (Olek, 2005), plazma polimerizasyon (Shi, 2005) olarak örnek verilebilir. KNT'lerin polimerin içinde dağıtılmasında kullanılacak yöntem kullanılan polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır.



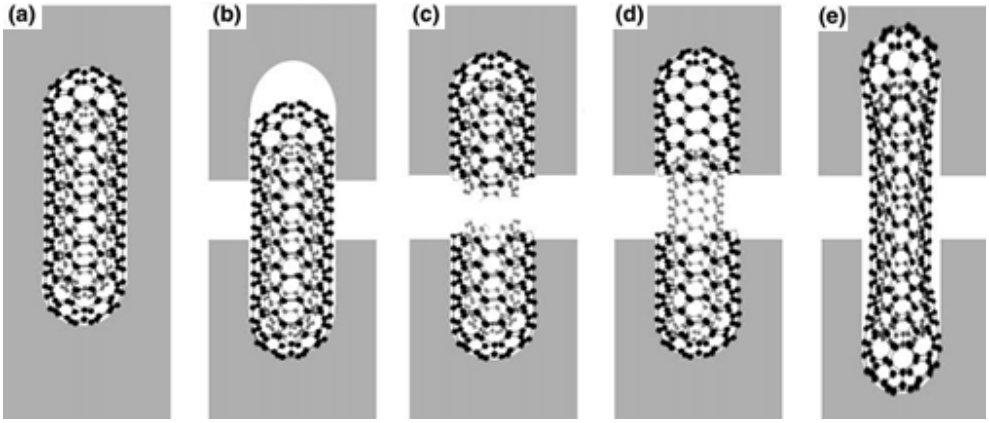
Şekil 2.10. Polikarbonat matriks içerisinde ağırlıkça %1 ÇCKNT'ler a)ÇCKNT kümelenmeleri b)homojen dağılım (Pegel, 2008)

Matriks ile KNT'ler arasındaki yük aktarımının etkinliği, matriks ve KNT'ler arasındaki ara yüzey bağlanmasının sonucudur. Birçok araştırmacı KNT'lerin ilavesi ile matriksin dayanımının beklenin altında kalmasını ara yüzey bağlantısının yeteri kadar etkin olmamasından kaynaklandığının belirlemişlerdir (Weisenberger, 2003; Nan, 2003). KNT'lerin matriks ile etkileşebilmesinin için üç yolu vardır.

- Van der Waals kuvvetleri
- Yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı mekanik kilitlenme
- Kimyasal bağlanma.

Van der Waals kuvvetleri, kimyasal bağlanma ve mekanik kilitlenme ile kıyas edildiğinde oldukça zayıf kuvvetler olup diğer iki bağlanma çeşidi KNT'ler ile matriks arasındaki yapışmada önemli bir rol oynarlar. KNT'ler ile matriks arasındaki

bağlantı, KNT'lerin yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi ile arttırılabilinir. KNT'lerin yüzeylerinin matriks ile etkileşecek şekilde uygun fonksiyonel gruplar ile fonksiyonelleşmesi matriks ile KNT'ler arasında güçlü kimyasal bağların oluşmasını sağlar (Weisenberger, 2003; Nan, 2003; Khare, 2005; Jia, 1999; Zhu, 2003;Zhu, 2004). Bu fonksiyonel gruplar matriksten KNT'lere yükün aktarılmasında köprü görevi görürler. Fonksiyonelleştirme ayrıca KNT'lerin matriks içerisinde de kolay dağılmasını sağlar (Eskizeybek, 2012).



Şekil 2.11. KNT'lerin matriks içerisindeki hasar şekillerinin şematik gösterimi a)İlk hali, b)KNT'lerin zayıf ara yüzey yapışması nedeniyle sıyrılması, c)Güçlü ara yüzey yapışması ile yüksek ve hızlı şekil değişikliği nedeniyle KNT'lerin kırılması, d)Teleskopik sıyrılma, KNT'lerin dış yüzeyinin yüksek ara yüzey yapışması sonucu kırılması ile iç çeperlerin sıyrılması e)KNT'lerin çeperlerinin bir kısmının matriksten ayrılması ancak kalan yüzeylerin mükemmel ara yüzey yapışması ile yük dağılımını etkin bir şekilde gerçekleşmesi (Gojny, 2005)

2.2.1.1.Karbon Nanotüplerin Polimer İçerisinde Dağıtılması

KNT'lerin dağıtımının amacı birbirinden ayrılmış şekilde reçine içerisinde homojen bir şekilde bulunmasını sağlamaktır. KNT'ler reçine içerisinde kümelenmeler oluşturması gerilme yığılmalarına neden olabilir ve bu durumdan kaçınılması gereklidir. Polimer reçine içerisinde KNT'lerin dağıtılması için kullanılan yöntemler genel olarak iki kategoriye ayrılabilir(Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Nanomalzemelerin polimer matriks içerisinde dağıtılmasında kullanılan fiziksel ve kimyasal yöntemler (Ulus, 2014)

2.2.1.1.1. Fiziksel dağıtma yöntemleri

Karbon nanotüpleri düşük veya orta düzey viskoziteye sahip reçinelerde karıştırmak için ultrasonikasyon yöntemi kullanılmaktadır. Ultrasonikasyon sırasında, basınç dalgaları çözelti ortamda yayılır. Bu yayılım esnasında yüksek ve alçak basınç bölgeleri oluşma sıklığı ses frekansına bağlıdır. Düşük basınç bölgelerinde, yüksek şiddetli ses dalgaları küçük boşluklarının oluşmasına neden olabilir. Bu baloncuklar kritik hacime ulaştıklarında daha fazla enerji yutamazlar ve yüksek basınç bölgesinde sesli bir şekilde patlarlar. Bu olaya ultrasonik kavitasyon adı verilir. Bu patlama ile yüksek sıcaklık ve basınç açığa çıkar. Ayrıca bu baloncuklar patladığında yüksek hızlı sıvı jetlerinin oluşmasına neden olur (Suslick, 1990). Oluşan sıvı jet akımları yeteri kadar enerjiye sahip olabilirse karbon nanotüpleri bir arada tutan kuvvetleri yenebilir ve sıvı içerisinde homojen dağılmasını sağlayabilir (Eskizeybek, 2012).

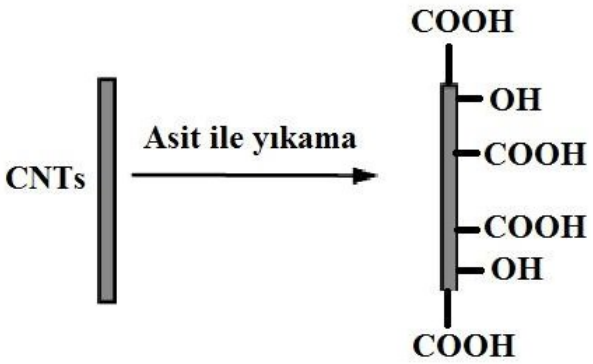
Yapılan çalışmalarda epoksi içerisine KNT'lerin uçlu sonikasyon ile dağıtılması ile elastisite modülünün %50 arttırıldığı ifade edilmiştir (Liao, 2004). KNT'ler, polistiren (Safadi, 2002), poliamid (Park, 2002) reçineler içerisinde uçlu sonikasyon ile dağıtıldıktan sonra mekanik özelliklerinin sonuçları iyileşmiş olduğu gözlenmiştir. Uçlu sonikasyon yüksek enerjili bir karıştırma tekniği olduğu için, uzun süre karıştırma işlemi karbon nanotüplerin hasar görmesine neden olabilir. KNT'lerin dağılımı ise uçlu

sonikasyon ve çözücü olarak polimerin çeşidine bağlı olarak etil alkolün, asetonun kullanılması ile iyileştirilmiştir.

2.2.1.1.2. Kimyasal dağıtma yöntemleri

Günümüzde mekanik yöntemler ile KNT'lerin homojen bir şekilde dağıtılmadığı yönündeki tartışmalar devam etmekte olup kimyasal yöntemlerde geliştirilmiştir. KNT'lerin kimyasal yöntemler ile dağıtılması kovalent ve kovalent olmayan yöntemler olarak ayrılabilir.

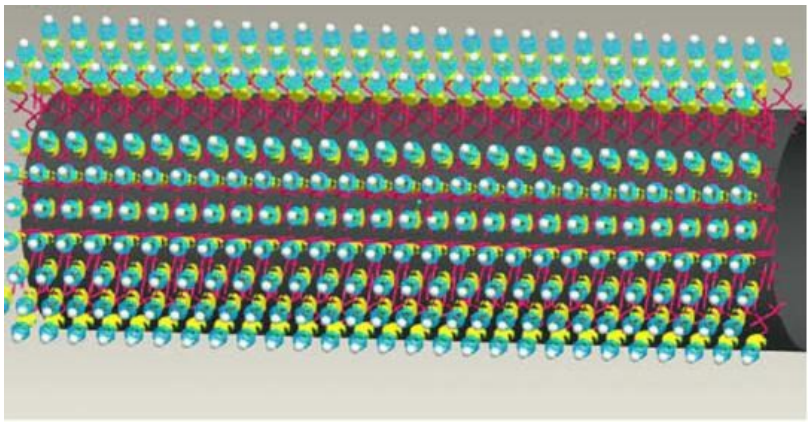
Kovalent yöntemde, çeşitli kimyasal gruplar KNT'lerin yüzeyine kovalent bağlar ile bağlanır ve bu grupların birbirlerini itmesi ile dağılım iyileştirilir. KNT'lerin yüzeylerine farklı kimyasal gruplar bağlanabilir (Zhang, 2004; Chen, 1998; Tagmatarchis, 2004; Kim, 2002; Unger, 2002; Holzinger, 2004; Hu, 2003; Stevens, 2003; Touhara, 2002). En iyi bilinen fonksiyonelleştirme yöntemi KNT'lerin güçlü asitler içinde yıkanması ile elde edilir. Bunun için sülfürik asit, nitrik asit veya bunların karışımları kullanılabilir. Asit ile yıkama işleminde KNT'lerin uçları açılır ve karboksilik ($COOH^-$) gibi gruplar bağlanır(Şekil 2.10). Karboksilik gruplar KNT'lerin su, aseton ve polimerler içerisinde dağılımını kolaylaştırır. Negatif yüklü gruplar Van der Waals bağlarına karşı koyarak KNT'lerin kümelenmesini engeller. Ancak asit ile yıkama işleme yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilirse KNT'lerin hasar görmesine ve boy/çap oranlarının azalmasına neden olabilir (Ulus, 2014).



Şekil 2.13. Asit ile yıkanan KNT'lerin yüzeylerinde oluşan fonksiyonel grupların şematik gösterimi (Ulus, 2014)

Kovalent olmayan yöntem, kimyasal gruplar KNT'lerin yüzeylerine tutunur. Bunun içinde π-π etkileşimleri veya kulomb çekiminden yararlanılır (Rastogi, 2008). Yüzey aktifleyici maddeler KNT'lerin yüzeylerine adsorbe olur ve yüzey gerilimini

düşürerek KNT'lerin sıvı içerisinde daha kolay dağıtılmasına yardımcı olurlar (Ma, 2010). Yüzey aktifleyici maddelerin avantajı, kolay uygulanması ve dağılma kararlılığını arttırmasıdır. Ancak, yüzey aktifleyici madde kullanıldığında KNT ile matriks arasındaki ara yüzey bağları oluşmayabilir (Eskizeybek, 2012).



Şekil 2.14. Yüzey aktifleyici madde ile kaplanmış KNT'ye ait şematik gösterim (Geng, 2008)

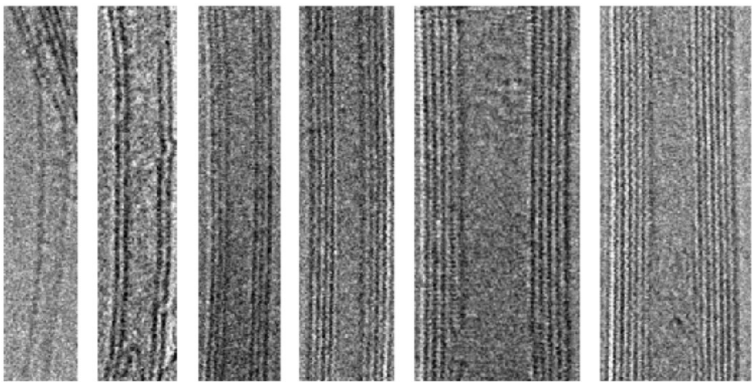
2.2.2. Bor Nitrür Nanodiskler

Karbon nanotüpler, yüksek çözünürlüklü geçirgen elektron mikroskobunun (HRTEM) geliştiriltiğinden bu yana bilinmektedir. Karbon nanotüpler, eşmerkezli hegzagonal tabakaların silindir haline gelmesi ile oluşmuş çapları nano boyutunda olan yapılardır. Tüp uzunlukları çaplara göre makro boyutta olup boy/çap oranı 10^5'e kadar çıkabilir (Loiseau, 2001).

Bor nitrür nanotüpler de (BNNT) aynı KNT'ler gibi, hegzagonal bor nitrür tabakalarının tabaka ekseni etrafında dönmesi ile ortaya çıkan tüp şeklindeki yapılardır. Hekzagonal yapıların silindir üzerinde sürekliliğinin devam etmesi ile oluşan sarmal şekilli nanotüpler, katman sayısına göre tek cidarlı, çift cidarlı veya çok cidarlı olarak sınıflandırlabilirler (Loiseau, 2001). Çok cidarlı nanotüpler, tek bir nanotüpün kendi içerisinde birden fazla katlanmasıyla çok cidarlı nanotüp oluşturabileceği gibi, farklı çap değerine sahip nanotüplerin iç içe geçmesiylede oluşabilmektedirler. Çok cidarlı nanotüplerin tek cidarlı nanotüplere göre avantajı kimyasal etkilere dayanımlarının daha fazla olması ve kafes yapısında oluşabilecek hasarlardan daha az etkilenmeleridir (Karabulut, 2009).

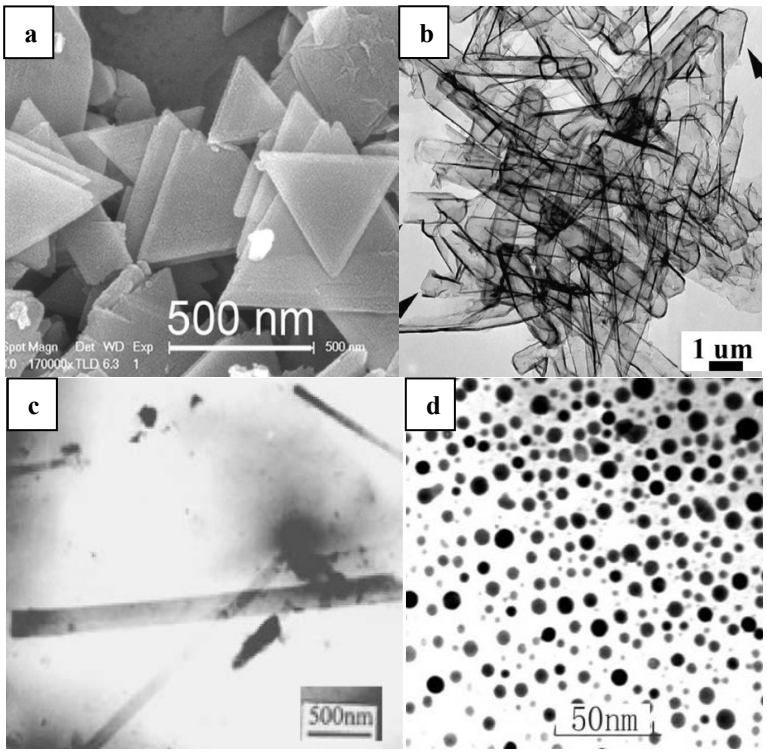
Karbon nanotüpler sahip olduğu özellikler bakımından (elektronik, mekanik ve termal) araştırmacıların oldukça ilgisini çekmektedir. KNT ile yaklaşık özelliklere sahip başka malzemelerde günümüzde yaygın olarak araştırılmaktadır. BNNT bu

bakımdan ilgi çekici olup yarı iletken bant boşluklarının ve üretim saflığı yüksek olduğundan tercih edilmektedir. Şekil 2.5'de geçirgen elektron mikroskobu ile görüntüleri elde edilmiş tek cidarlıdan (TCBNNT), 6 cidarlıya (ÇCBNNT) kadar olan BNNT' ler görülmektedir (Loiseau, 2001).



Şekil 2.15. Tek cidarlıdan başlayarak 6 cidarlıya kadar artan BNNT TEM görüntüleri (Loiseau, 2001)

Bor nitrüre ait farklı nano yapıları da mevcuttur. Bunlar nanoçubuk, nanolevha, nanokoza ve nanobezelye, nanokristal şeklindedir. Şekil 2.4'de bazılarına ait SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 2.16. Bor nitrür nano yapılar (Bao[a], 2009; Dai[b], 2007; Hao[c], 2002; Hao[d], 2002)

Farklı yapılara bağlı olarak iletken ve yarı iletken özelliklere sahip karbon nanotüplerden farklı olarak BNNT'ler, 4 eV band boşluğuna sahip olması nedeniyle yarı iletkendirler. KNT ve BNNT'nin özelliklerini karşılaştırılacak olursak, iki malzeme için de elastisite modulü, yakınlık göstermekte olup, BNNT'lerin karbon nanotüpler gibi oldukça yüksek young modülü (1.22 TPa) olduğu tahmin edilmektedir (Chopra, 1998). KNT için ölçülen ve oldukça yüksek bir değer olan termal iletkenlik BNNT için de (600 W /m.K) yüksek bir değerdedir (Ishigami, 2003). Termal gravimetrik analizi (TGA), BNNT'lerin yaklaşık olarak 800 °C'de, KNT'lerin ise yaklaşık olarak 400 °C'de oksidasyona başladığını ve dolayısıyla BNNT'lerin oksidasyon direncinin daha yüksek olduğunu göstermektedir (Chen, 2004). BN bu kimyasal kararlılığından dolayı özellikle yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda KNT'nin yerine tercih edilmektedir.

2.3.Nanokompozitler

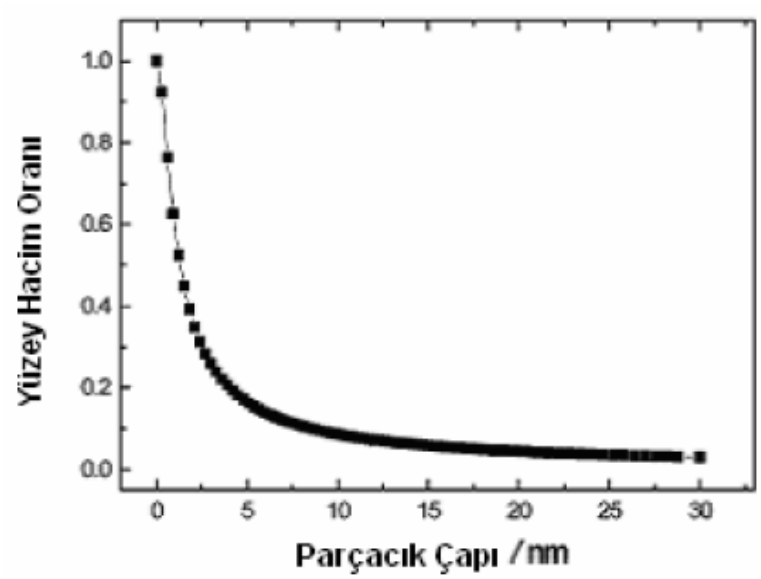
Kompozit malzemelerin yeni bir çeşidi olan nanokompozitler, en az biri nanometre (10^{-9} m) boyutlarına sahip farklı yapıdaki malzemelerin birleşimidir (Ishida, 2006). Polimer, seramik ve metal tabanlı kompozit malzeme gruplarının nanokompozitleri hazırlanmakta olup, bu malzeme grubunun üretimi ve özelliklerinin incelenmesi ile ilgili çalışmaları günümüzde büyük ilgi çekmektedir.

Polimer nanokompozitler, polimer içerisine dağıtılmış nano boyutlu organik, inorganik, doğal, sentetik, ikinci bir faz veya dolgu maddesi içeren kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır. İlk çalışmalar 1980'li yıllarda Toyota Araştırma Grubu tarafından başlatılmış olup nylon-6/kil nanokompoziti geliştirilmiştir. Bu nanokompozit, poliamid (PA) kompozitine göre %50-70 oranlarında daha üstün mekanik ve ısıl özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Polimer nanokompozitlerin sahip oldukları üstün özelliklerin mekanizması açıklanamadığından, çalışma sonuçları deneysel verilerle sınırlı kalmakta olup ve endüstriyel ürünler olarak kullanılma süreçleri çok yavaş ilerlemektedir (Durmuş, 2006). Polimer nanokompozitler iki ana bileşenden oluşmaktadır.

- Malzeme matriksini oluşturan polimer
- Nano boyutlu dolgu veya katkı maddesi

Polimer nanokompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanılan nanoparçacıklar türü, geometrisi, boyutu, dağılımı, yüzey özellikleri ve miktarı elde edilen

nanokompozitin özelliklerini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Nano dolgu olarak kullanılan malzemeler doğal ve sentetik killer, karbon malzemeler, nano boyutlu çeşitli metaller olarak sıralanabilirler (Alexandre, 2000). Nanoparçacıkların büyük yüzey alanına sahip olmalarından dolayı kompozit malzemelerde ara yüzey etkileşimini artırmak ve üstün fiziksel özelliklere sahip yapılar elde edilmesini mümkün kılmaktadır(Şekil 2.17). Yüksek boy/çap oranına sahip nano dolgular ile gaz geçirgenliği saf polimere ve diğer kompozit yapılarına göre daha düşük olan polimer nanokompozit malzemeler hazırlanabilmektedir (Liang, 2004). Ayrıca kritik ışık dalga boyunun altında boyuta sahip nanoparçacıklar saydam olup, saydamlığın önemli olduğu malzemelerin hazırlanmasında dolgu maddesi olarak kullanılabilmektedir (Holister, 2003).



Şekil 2.17. Parçacık büyüklüğüne bağlı Yüzey/Hacim oranının değişimi (Wang, 2000)

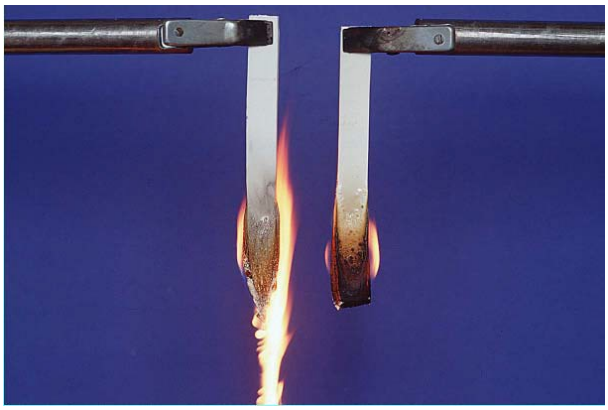
Nano dolgunun polimer matriks içerisindeki dağılımı, elde edilecek nanokompozitin özelliklerini etkileyecek en önemli parametrelerden biridir ve nanokompozitin hazırlanma yöntemine ve nano dolgunun yüzey modifikasyonuna önemli derecede bağlıdır (Hussain, 2006; Tian, 2005).

2.3.1. Nanokompozitlerin Özellikleri

2.3.1.1.Termal Özellikler

Termal özellikler polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini, dayanıklılığını, kullanım ömrünü etkileyen başlıca özelliktir. Polimerik malzemelerin metal ve seramik

malzemelere göre daha zayıf olan termal özellikleri, inorganik nano dolguların polimer matriksine katılması ile artış sağlanabilmektedir. Polimer nanokompozitler saf polimerlere göre daha yüksek sıcaklıkta bozunurlar ve bozunma hızında düşme gösterirler (Lin, 2001). Nano dolgular ısıl deformasyon sıcaklığını artırma, yanmazlık ya da yanmayı geciktirme, termal genleşme katsayısının düşümünde önemli rol oynarlar (Porter, 2000).



Şekil 2.20. Nanokompozitte yanma gecikmesi (Porter, 2000)

2.3.1.2.Elektriksel Özellikler

Polimer nanokompozitlerin elektriksel özellikleri kullanım amaçlarına bağlı olarak, iki ayrı grupta değerlendirilebilir. Elektriksel iletkenlik istenen ürünlerin hazırlanmasında kullanılan ve iletken nano dolgular (karbon nanotüp ve metal bileşikleri gibi) içeren nanokompozitler ve üründe yalıtkanlık istenen ya da dielektrik özelliklerinde (silika, titanyumdioksit, alümina) iyileşme sağlanması amaçlanan nanokompozitler olarak sınıflandırılabilir (Chen, 2006).

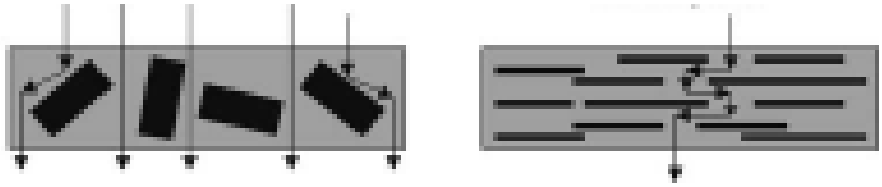
2.3.1.3.Mekanik Özellikler

Nano boyutlu dolgu maddelerin ağırlıkça % 1-10 oranında polimer matrikse katılması sonucunda mekanik özelliklerde iyileşmeler sağlanırken mikro boyutlu dolgu maddelerinde bu oran % 20-50 arasında olmaktadır (Qian, 2004). Mikro boyutlu dolgu maddelerin miktarındaki artış kompozit malzemelerde esneklik ve işlenebilme özelliklerinde kayıplara neden olurken, malzemenin sünekliliği ve darbe dayanımı düşer. Nanokompozitlerde bu özelliklerde belirgin kayıplar olmaz.

Dayanım ve tokluk en önemli mekanik özelliklerdir. Nanoparçacıkların sahip oldukları yüksek boy/çap oranı ile polimer matriksin dayanım ve modül değerlerinde

önemli iyileşmeler sağlayabilmektedir. Boy/çap oranı bire yakın olan, büyük yüzey alanı ve yüksek yüzey enerjisine sahip küresel nano dolgular, polimer matriks ile dolgu malzemesi arasında kuvvetli ara yüzey etkileşimi sağlayarak dayanım ve tokluğun iyileşmesini sağlar (Cho, 2006; Chen, 2004).

Boy/çap oranı yüksek olan nanoparçacıkların polimer matriks içerisinde dağılmış yapı oluşturması sonucunda kompozitte meydana gelebilecek hasarların dolambaçlı bir yol oluşturacak şekilde ilerlemesi sağlayarak hasarın geçmesinde önemli rol oynar(Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Dolambaçlı yol oluşumu (Ray, 2003)

2.4.Kompozit Malzemelerde Yorulma

Malzemelerin yorulmadan dolayı hasar görmesi ve neticede kopması bugün hala mühendislerin güncel problemi olarak önem arz etmektedir. Bu problem özellikle değişen tekrarlı yüklerin uygulandığı durumlarda ve konstrüksiyon malzemesinin önemli derecede yüzey düzgünsüzlüğü olduğu durumlarda çok önemli olmaktadır (Eldeniz, 1992). Yorulma anlam itibariyle, malzemelerin tekrarlı gerilme veya uzamaların söz konusu olduğu durumlardaki davranışlarını belirlemek için kullanılmaktadır (Fuchs, 1980). Yorulma dört önemli aşamada oluşmaktadır.

- Olayın sürekli gelişmesi
- Lokalize olması
- Çatlakların büyümesi
- Malzemede kırılmanın ortaya çıkmasıdır.

Makinelere ve elemanlarına genellikle büyüklüğü ve yönü zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler, eğilme ve burulma momentleri etki eder (Parton, 1978). Bu etkiler altındaki makine elemanı düşük bir gerilmede beklenmedik bir tarzda kırılabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir (Dieter, 1976). Yorulma zorlanması sırasında yük istenildiği kadar tekrarlanabilir ve zorlanmalarda zaman aralıkları bulunabilir (Sarıtaş, 1987).

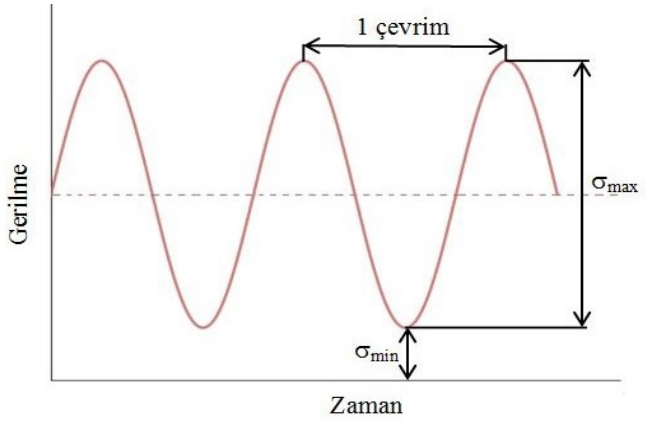
Yorulma hasarı herhangi bir uyarıcı belirti vermeden ve aniden kırılmanın ortaya çıkmasından tehlikeli ve metallerin yüzeyleri gevrek kırılma yüzeyine benzer (Dieter, 1976). Metallerde yorulma kırığı ilerledikçe, açılan kesit birbiri ile sürtünerek yüzeyin parlak bir görünüm almasını sağlar. Kesit uygulanan yükü taşıyamayacak bir duruma geldiğinde ani kırılma sonucu, kaba bir görüntü oluşur (Gemi, 2004).

Kırılma mekaniği açısından makine veya makine elemanının ömrü üç adımda incelenir. İmalattan kaynaklanan kusur ya da yorulma etkisiyle bir mikro çatlağın oluşumu olan çatlak başlangıcı safhası, kırılma tokluğu ve gerilme şiddeti ile kararlı çatlak ilerleme safhası ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın meydana geldiği kırılma safhasıdır (Gemi, 2004).

Kompozit malzemelerdeki elyaf kırılması, delaminasyon, matriks çatlaması gibi yorulma hasarları metallerdeki çatlak gibi hasarlardan daha rahat görülebilir. Ancak, bir metaldeki hasar gelişimi daha beklenmediktir. Bu nedenle metaller, kompozit malzemelerden daha tehlikelidir (Jones, 1975).

Malzemelerin yorulma testi sinüzoidal dalgalı gerilmeler uygulayan cihazlarda gerçekleştirilir. Bu sinüzoidal dalgada gerilme artarak maksimum ve azalarak minimum değer arasında periyodik olarak devamlı uygulanır. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler parçanın iç bünyesinde yıpranmalara ve ayrılmalara sebep olduğu için kopma olayı, statik sınırların çok altında olur. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç bünyesindeki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye ise yorulma ömrü denir (Gemi, 2014).

Sinüzoidal yüklemede, maksimum ve minimum gerilmenin hariçinde gerilme aralığı σ_r, gerilme genliği σ_a, ortalama gerilme σ_m ve yorulma gerilme oranı R gibi parametrelerde kullanılmaktadır.



Şekil 2.22. Sinüzoidal yükleme parametreleri

Şekil 2.22'de gösterilen bu parametreler

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.4)$$

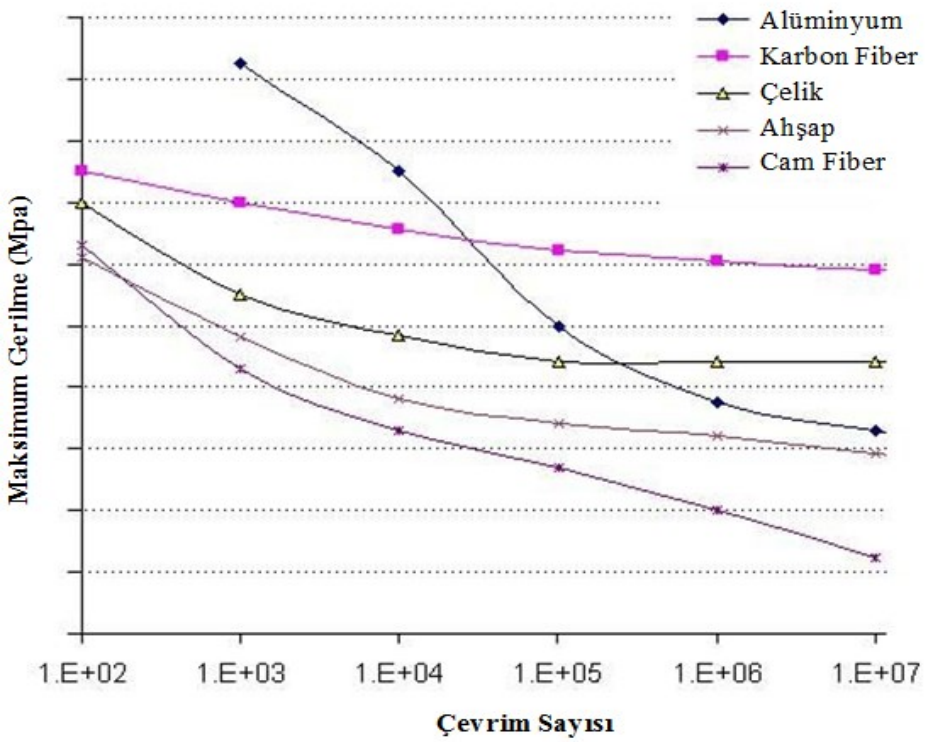
R değeri, yorulma yükleme biçiminin bir göstergesidir. Bu değer için önemli yükleme biçimleri çizelge 2.4'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.4. Gerilme oranı değerleri için yorulma yük biçimleri(Gemi 2004)

Yorulma Oranı	**Yorulma Yük Biçimi**
R=1	Statik Yük
R=0	Çekme-Yükü boşaltma
0<R<1	Çekme-Çekme
-1<R<0	Çekme-Basma

Yorulma deneyleri genelde 10 Hz'den daha düşük frekanslarda yapılır. Bunun iki sebebi vardır. Birincisi yüksek frekanslarda ısı birikimi daha fazla olmaktadır. İkincisi ise yorulma olayı genellikle düşük frekanslarda daha etkilidir (Gemi, 2004).

Yorulma ömrü, maksimum gerilme seviyesinde malzemede hasarın meydana geldiği çevrim sayısı olarak ifade edilir. Yorulma ömrünü için ortalama gerilme veya yorulma gerilme oranına (R) ihtiyaç duyulur. Logaritmik ölçekte hasarın meydana geldiği çevrime karşılık, maksimum yorulma gerilmesi olarak grafiklenir. Bu grafik gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi olarak tanımlanmaktadır. S-N eğrisi malzemenin yorulmasını temsil etmektedir(Şekil 2.23). S-N eğrisinin eğimi ise malzemenin yorulma direncinin bir ölçüsüdür ve malzemeden malzemeye değişiklik gösterir (Hull, 1981).



Şekil 2.23. Farklı malzemeler için S-N diyagramı (Talreja, 1985)

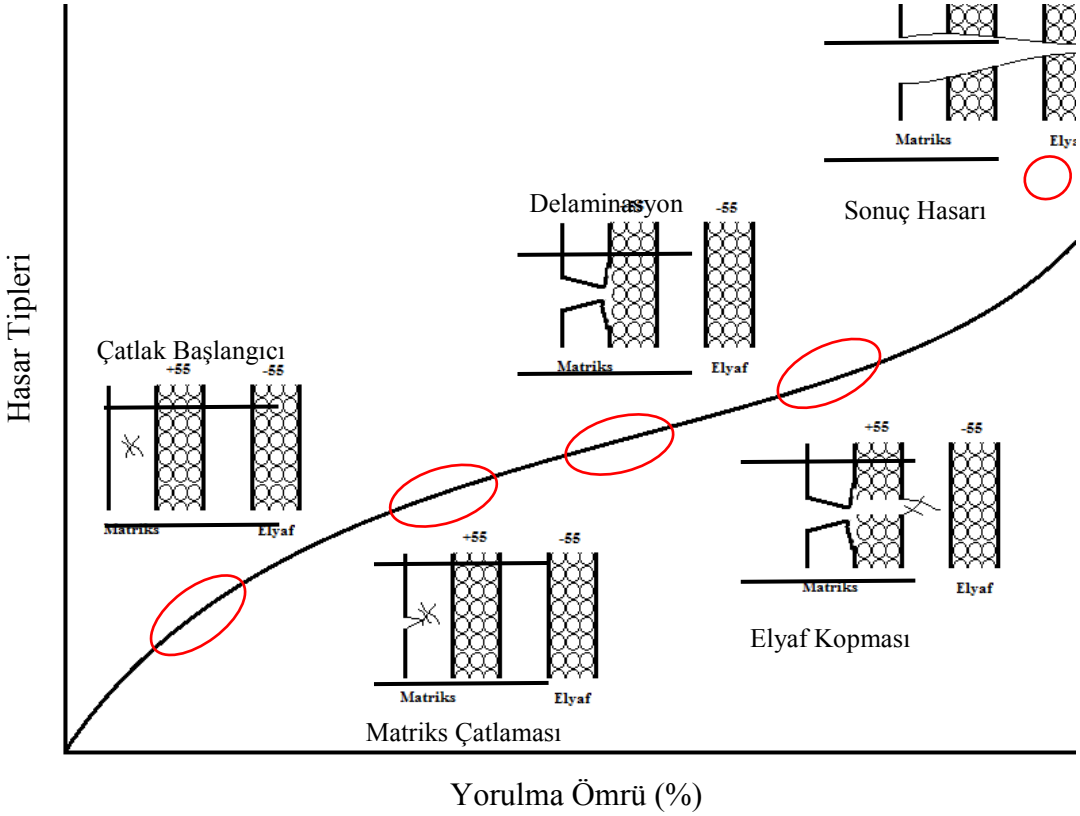
Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzeme ya da makine parçasına çekme gerilmesinin uygulanması, gerilmede değişimlerin ya da dalgalanmaların olması ve plastik şekil değişiminin gözlenmesi gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri olmazsa yorulma çatlağı başlamaz ve ilerleyemez (Gemi, 2004).

2.5.Kompozit Malzemelerde Hasar Mekanizmaları

Kompozit malzemeler uygulanan gerilmelerden dolayı farklı hasar tipleri oluşmaktadır. Genel olarak kompozit malzemelerde dört tip hasar davranışları görülebilir. Bunlar tabaka ayrılması (delaminasyon), elyaf kırılması, matriks kırılması ve elyaf matriks ayrılması (debonding) şeklindedirler. Elyaflar yüksek rijitliğe sahip ise şekil değiştirmeyi sınırladıklarından dolayı matriks kırılması daha az önem arz eder. Eğer elyaf matriks ara yüzey dayanımı yeterli değilse matriks çatlaması ve elyaf sıyrılması gözlenebilir. Elyaf kırılması olmadığı müddetçe kompozit malzemenin dayanımı fazla düşmez.

Kompozit malzemelerin yorulmasında farklı hasar mekanizmaları ortaya çıkabilir. Hasar mekanizmaları bir gerilme çevrim (S-N) grafiğinde gösterildiğinde gerilmenin etkisine bağlı olarak farklı hasarlar oluşabilir. Elyaf kırılması olmadığı halde

tabaka dayanımında önemli bir azalma meydana gelmez. Fakat kompozit malzemede, kompozit hasar biçimlerinden en az birisi oluşabilir (Günaydın, 2003).



Şekil 2.5. Kompozit Malzemelerde yorulma hasar biçimleri (Talreja, 1985)

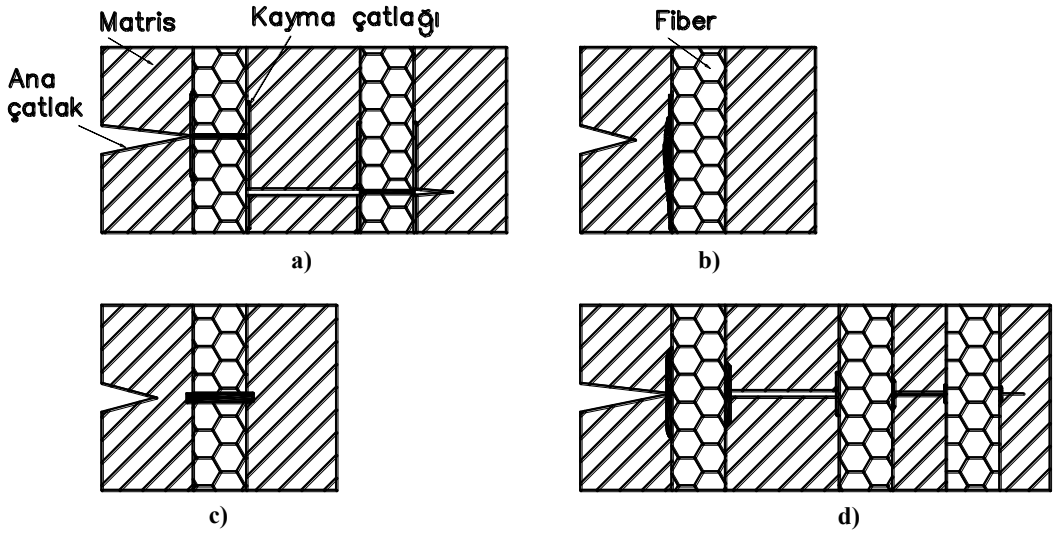
Yorulma ömrü çatlak başlangıcı ve ilerlemesi şeklinde iki ayrı bölgede incelenir. Yüksek gerilme değerlerindeki çalışmalarda genellikle düşük çevrim sayısı elde edilir. Düşük çevrim sayısı yorulmada çatlak çabuk oluşur ve yorulma ömrünün büyük bir kısmı çatlak ilerlemesiyle geçer. Çatlak genellikle malzeme hatalarının olduğu bölgelerde yani boşluk ve gerilme konsantrasyonunun fazla olan yüzey bölgesinde başlar.

Gerilme çevrim sayısı (S-N) grafiğinde yorulma ömrünü gösterir. Uygulanan değişken gerilmenin değeri arttıkça yorulma ömrü kısalır ve böylece çatlağın daha kısa sürede başlamasına neden olur. Malzemelerin yüzey kısımlarında çatlaklar, düzensizlikler varsa yorulma ömründeki çatlak başlaması için geçen süre ortadan kalkar ve bu şekilde toplam yorulma ömrü kısalır (Eldeniz, 1992).

Kayma gerilmesi sonucu oluşan çatlaklar kırılma yüzeyini ve çekilen enerjiyi azalttıklarından dolayı yorulma ömrü üzerine pozitif bir etkiye sahiptirler. Ayrıca bu çatlaklar çatlağın körleşmesine de sebep olurlar. Elyafların şekil değiştirmesi

matriksinkinden az ise elyaflar çatlak doğrultusunda hasara uğrayabilirken, sünek elyafların gevrek matriks şeklinde oluşan malzemelerde ise matriks daha önce hasara uğrayabilir (Gemi, 2004). Kayma çatlakları, tek başlarına çekme yükü ile yırtılmaya, matriks çatlaması olmaksızın çatlak önü elyaf kırılmasına veya elyaf kırılması olmaksızın matriks çatlamasına sebep olurlar (Günaydın, 2003).

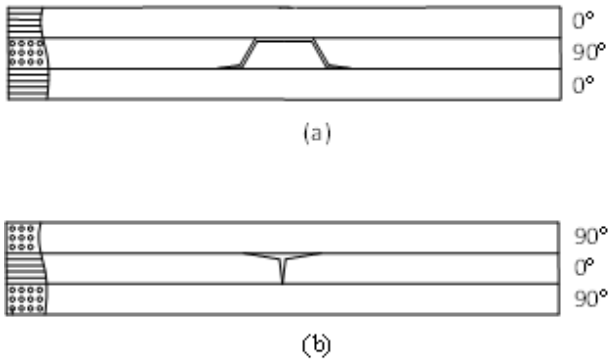
Elyaf açısının çatlak ilerlemesi üzerine etkisi büyüktür. Çatlak ilerlerken elyafa paralel doğrultuda bir engelle karşılaşmazlar. Dolayısıyla çapraz katlı tabakalı kompozitlerde 0 ve 90 derecelik tabakalar hem statik hem de değişken yüklemelerde ilk hasara uğrayan bölgelerdir. Enine tabakalardaki çatlaklar tabakalar arası bölgede kayma çatlakları ve çatlak körleştirmesi sonucu durdurulabilir (Gemi, 2014).



Şekil 2.6. Kompozitlerin yorulması boyunca çatlak ilerleme biçimleri a)Kayma çatlakları sonucunda fiber kırılması ve matriks çatlağı b)Matrikste meydana gelen kayma çatlakları c)Fiber kırılması d)Fiber kırılması olmaksızın matris çatlaması (Günaydın, 2003)

2.5.1. Matriks Hasarı

Matriks hasarı, yorulma çalışmalarında düşük gerilmeler, yüksek çevrim sayılarında kompozit malzemelerde görülen hasardır ve matriksin çatlaması şeklinde meydana gelir. Kompozit malzemelerde yorulma ömrü boyunca hasar matriks çatlakları ile başlar ve bu çatlaklar tabaka ara yüzlerinde tabaka ayrılmasına (delaminasyon) neden olur. Çekme ve kayma olmak üzere iki çeşit matriks çatlağı bulunmaktadır. Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakanın enine kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını bilinmektedir (Gemi, 2004).



Şekil 2.7. Matriks çatlakları (a)Çekme çatlağı (b)Kayma çatlağı (Abrate, 1998)

Genel olarak polimer esaslı kompozitler üzerine yapılan çalışmalarda, kompozitlerde gerilmeninin homojen olarak dağılmasını reçine sisteminin tokluk özelliğinin geliştirilmesiyle oluşabilir. Yapılan çalışmalarda termoplastik matriks bulunan kompozitlerin daha yüksek tokluk sergiledikleri belirtilmiştir (Dorey, 1985). Genel olarak termoplastik kompozitler daha az matriks çatlağı meydana getirirler ve bu kompozitlerde hasar daha az yayılma eğilimi göstermektedir. Bunun yanı sıra, kırılmada daha yüksek şekil değiştirmeye sahip bu reçineler yüksek gerilme yüklerine karşı direnç gösterirler (Sierakowski, 1997).

2.5.2. Delaminasyon

Delaminasyonlar, iki tabakalar arasındaki yapışmanın gerilmeden dolayı azalmasıyla meydana gelen ve kompozitin mukavemetini düşüren hasarlardır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı elyaf açılarına sahip tabakalar arasında meydana geldiğini bilinmekte olup, eğer iki tabaka aynı elyaf açısına sahip ise bu iki tabaka ara yüzeyinde delaminasyon oluşmamaktadır. Tabakalı kompozit malzemede tabakalar arasındaki farklı elyaf yönlenmelerinden dolayı katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı kayma gerilmeleridir. Bu konudaki deneyler ve analizler, eğilmenin enine doğrultuda dış bükey olduğu ve elyaf doğrultusu boyunca tabakanın iç bükey eğilmeye eğilimli olduğunu göstermektedir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyuşmazlık ne kadar büyük olursa, 0°/90° en kötü elyaf yönlenme doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu, takviye

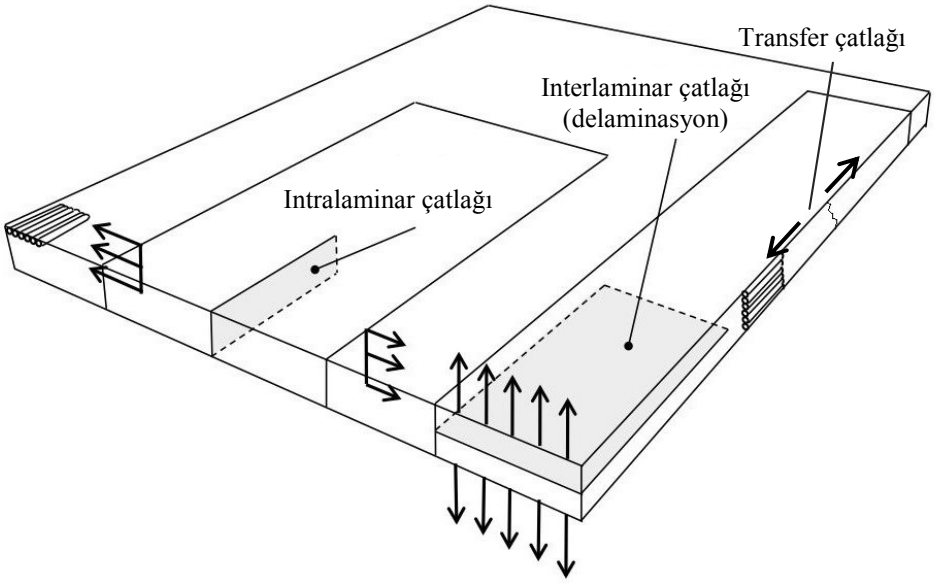
matriks uyumu, sıralanma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer faktörler de etkilemektedir (Kara, 2006).

Matriks çatlaması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matriks çatlaması ve delaminasyon arasında bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arasındaki ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Enine yüklemeye maruz 0°/90°/0° tabakaları için delaminasyon ve matriks çatlaması etkileşmesi göz önüne alındığında, üst katmanlardaki eğimlenmiş çatlaklar ara yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler. Oluşan çatlakların ara yüzeye ulaşınca durdurulması, elyaf yönlenmelerindeki değişimden dolayıdır. Bu delaminasyon, ortadaki enine çatlama tarafından zorlanır düşey eğilme çatlağı büyümesi, zorlanmayan en alt ara yüzey delaminasyonunu başlatır. Delaminasyona önderlik eden matriks çatlamaları, kritik matriks çatlamalarıdır. Delaminasyon, matriks çatlamalarından dolayı meydana gelen yüksek mertebedeki düzlem dışı gerilmeler ve ara yüzey boyunca tabakalar arasındaki kesme gerilmelerinden dolayı Mod I ayrılma olarak başlamaktadır (Gemi, 2014).

2.5.3. Elyaf Hasarı

Kompozit malzemede elyaf kopması, düşük gerilmelerde genellikle matriks çatlaması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Elyaf hasarı, yüksek gerilmelere maruz kalan yüzeyler de oluşur. Yapılan çalışmalarda elyaf tipinin matriks çatlağı ve delaminasyonların başlamasına bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

2.5.4. Tabaka İçinde Oluşan Hasarlar



Şekil 2.8. Kompozit malzeme tabaka içinde oluşan hasar çeşitleri (Czabaj, 2012)

Kompozit malzemelerde çatlakların ilerleme davranışını belirleyen önemli iki husus vardır. Bunlar uygulanan yük ve ortam etkisidir. Uygulanan yükün çatlak düzleminde ayrılma, kayma ve yırtılma şeklinde üç değişik hasar tipi görülebilir(Şekil 2.8). Çatlak ilerlemesi ise malzemenin çalıştığı ortama, sıcaklığa ve gerilme durumuna bağlı olarak farklılıklar gösterir (Nishioka, 1995). Tek tabakalı kompozit yapıda üç farklı yorulma hasar tipi görülebilir. Bunlar elyaf ayrılması (Interlaminar çatlağı), matriks çatlaması (Intralaminar çatlağı) ve elyaf kopmasıdır (Transfer çatlağı). Tabakalı kompozitler görülen delaminasyon şeklinde olan hasar, tek tabakada oluşan hasar ise elyaf demetinin kendi içinde ayrılması şeklindedir. Interlaminar çatlağı olarak bilinen bu hasar kompozitler genellikle ayrılma modunda görülmektedir (Robinson, 2012). Kayma çatlakları matriks ve elyaflar arasındaki düzensizliklerden dolayı oluşabilmektedir. Tek tabakalı kompozit malzemelerde oluşan kayma çatlakları elyaf doğrultusunda çok az bir engelle karşılaştığından dolayı bu doğrultuda ilerler. Bu hasar intralaminar çatlağı olarak adlandırılırken, genellikle kayma gerilmelerin olduğu bölgelerde ve kayma modunda görülmektedir (Greenhalgh, 2009). Elyaf kopması olmadığı sürece kompozit malzemenin dayanımı düşmezken transfer çatlağı oluşan kompozit malzemelerde elyaf kopmaları sonucunda malzemenin dayanımı düşer.

3. MATERYAL VE METOT

3.1.Kompozit Boru Üretimi

Filaman sarım yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen kompozit borularında kullanılan matriks ve takviye malzemesi sırasıyla Vantico firmasından MY740 bisphonel A epoksi reçine, Dowaksa firmasından 800 teks karbon elyaf temin edilmiş olup bu malzemelerin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan elyaf ve matriksin özellikleri

	E (GPa)	σ_{cekme} (MPa)	ρ (g/cm^3)	ε_{kopma} (%)
Karbon Elyaf	240	4200	1,78	1,8
Epoksi Reçine	3,6	61	1,16	2

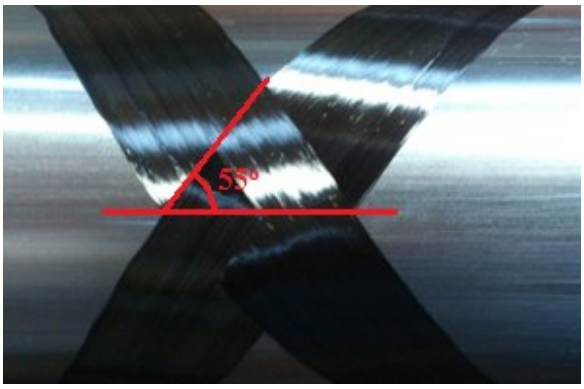
Nanokompozit boru üretiminde, epoksi reçine içerisine katılan nanoparçacıklar dört grubun oluşmasında etkin bir rol oynamışlardır. Bu gruplar sırasıyla nanoparçacık katkısız (1), BNND katkılı (2), ÇCKNT katkılı (3) ve hibrit (4) olan hem BNND hemde ÇCKNT katkılarıyla nanokompozit boruların üretimi gerçekleştirilmiştir(Çizelge 3.2). BNND'ler ortalama 300 nm genişliğinde 50 nm kalınlığında olup Bortek firmasından, ÇCKNT ise ortalama 25 nm çapında 20 μm uzunluğa sahip olup Times Nano firmasından alınmıştır.

Çizelge 3.2. Kompozit borulardaki kompozisyonlar

Gruplar	*%ag* BNND	*%ag* ÇCKNT	Epoksi
1	0	0	100
2	0,5	0	99,5
3	0	0,3	99,7
4	0,5	0,3	99,2

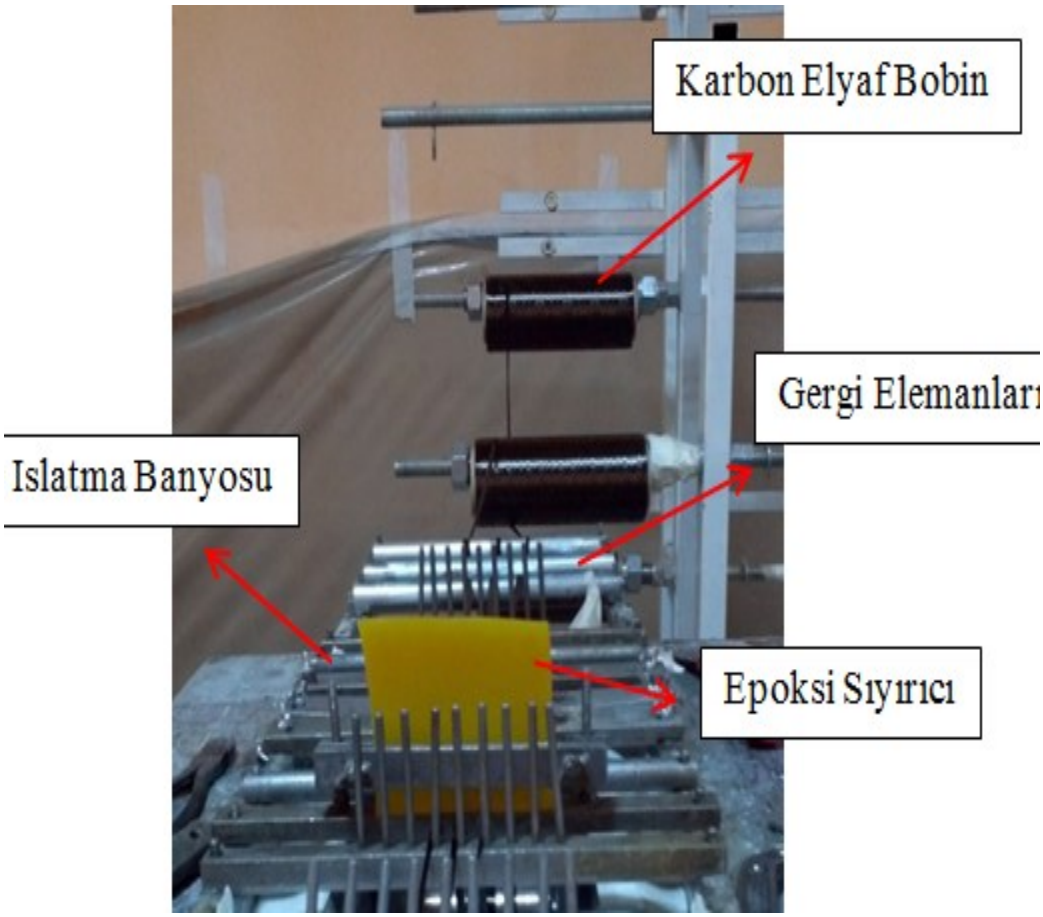
Nanokompozit boru üretiminde filaman sarım tekniği kullanılarak üretim gerçekleşmiştir. Nanokompozit boruların iç çapı mevcut test cihazlarına uygun olacak şekilde 72 mm olarak belirlenmiş, bu çap değerine sahip boru imalatı için gerekli kalıplar (mandrel) hazırlanmış, yüzeyleri taşlanmış ve krom ile kaplama yapılmıştır. Sarımda bant genişliğini oluşturan iplik sayısı, karbon elyaf ipliklerin tiftiklenme yatkınlığı, tam ıslanmama gibi oluşabilecek sorunlar ve muhtemel diğer aksaklıklardan dolayı üç iplikten oluşmaktadır. Sarım sırasında kullanılacak epoksi üreticinin teknik bilgi föyünde belirlediği sıcaklıklar arasında (35-45 °C) olması için ıslatma banyosu içerisinde termostatlı ısıtıcı ile sıcaklığı korunmuştur. Mandrellerin sarım öncesi sıcaklıkları da yine epoksi üreticisinin belirtmiş olduğu değer aralığına (40-60 °C) ön

ısıtma ile sıcaklığı sabit bir değere getirilmiştir. Kompozit borular için en yüksek dayanım olan ±55° sarım açısı epoksi kullanılmadan kuru sarım ile bantlar arası boşluk kontrolü yapılmıştır. Şekil 3.1'de kuru sarım yapılırken sarım açısının 55° olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1. Bantlar arasındaki sarım açısı

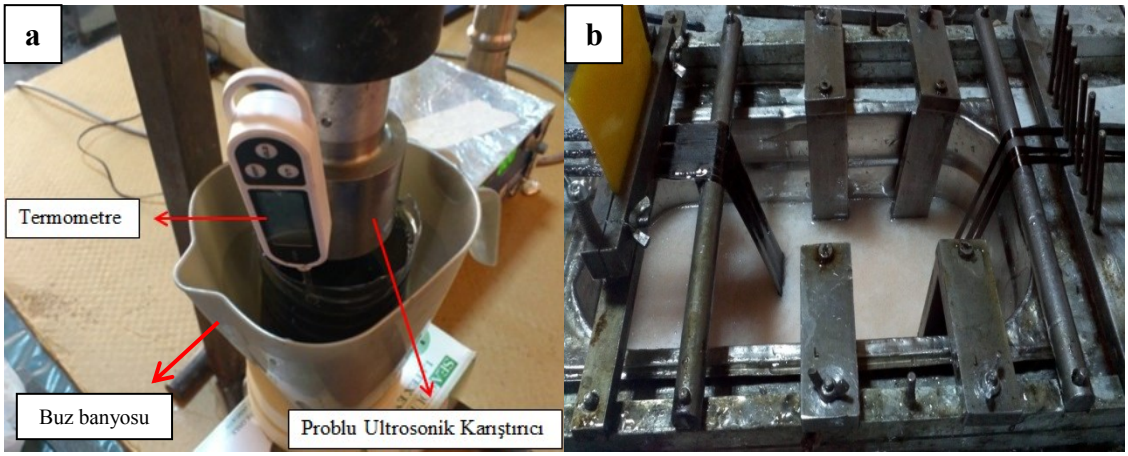
Kuru sarım sonundaki kontrollerin yapılmasından sonra ıslak metodu dediğimiz elyafların reçine banyosunda geçirilmesiyle kompozit boruların üretimi gerçekleştirilmiştir. Elyafların sarım sırasında, yönlendiriciler çevresinde biriken tiftiklenmeleri yığıntı oluşturmadan ve sarımı etkilemeden toplanarak işlem hattından uzaklaştırılmıştır. Şekil 3.2'de reçine banyosundan geçen elyaflar, üzerinde biriken fazla epoksi, sıyırıcı ile sıyrılmış sarım üzerinde biriken fazla epoksi de belirli aralıklarla elle sıyrılarak alınmıştır. Epoksi ile ıslanan elyaflar mandrel üzerine 8 tabakalı olacak şekilde sarımı yapılmış olup sarımın tamamlanmasından sonra mandrel, filaman sarım makinesinden sökülerek kürlenme fırınına yerleştirilmiştir. Kür işlemi için önce 2 saat 80 °C'de ve daha sonra 4 saat 120 °C'de fırında bekletilmiştir. Kür işleminden sonra kalıptan çıkarılan kompozit borular 1 m uzunluğunda ve 75 mm çapındadırlar.



Şekil 3.2. Elyaf ıslatma banyosu ve elyaf gergi elemanları

Herbir grup için üretim parametreleri aynı olup bu grupların farklılaşmasına epoksi içerisine katılmış nanoparçacıklardan dolayıdır. Karbon elyaf takviyeli kompozit levhalarda epoksi içerisine katılan nanoparçacıkların mekanik özellikler bakımından en iyi sonuçları BNND'de ağırlıkça %0,5 ÇCKNT için ağırlıkça %0,3 ve hibrit içinse ağırlıkça %0,5 BNND ve %0,3 ÇCKNT olduğu anlaşılmıştır (Ulus, 2014).

Nanokompozit boru üretimine öncelikle epoksi içerisine nanoparçacıkların karışımların yapılmasıyla başlanmıştır. Karışımlarda öncelikle nanoparçacıkların, kolay dağıtılmasında mekanik karıştırıcı kullanılmış ve nanoparçacık katkılı epoksi 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Mekanik karışım yapıldıktan sonra ultrasonikasyon yöntemi ile nanoparçacıkların tamamen homojen karışması hedeflenilmiştir. Problu ultrasonik karıştırıcı ile epoksi 15 dk daha karıştırılmış, bu karışımlar yapılırken epoksi sıcaklığının belirli değerler içerisinde kalması için sürekli sıcaklık ölçümü yapılmış ve buz banyosu içinde karışım gerçekleştirilmiştir(Şekil 3.3). Böylelikle epoksinin üreticisi tarafından belirlenen sarım sıcaklık değerinin aşılmaması sağlanmıştır.



Şekil 3.3. a)Epoksi-ÇCKNT karışımının sıcaklığı ölçümü b)Islatma banyosunda bulunan BNND katkılı epoksi karışımı

Homojen bir şekilde epoksi nanoparçacık karışımı hazırlandıktan sonra hemen sarım işlemine geçilmiştir. Şekil 3.4'de BNND katkılı nanokompozit borunun sarımı görülmektedir. Karışım işleminden sonra hemen sarım yapılmadığı takdirde epoksi içerisinde bulunan nanoparçacıkların ıslatma banyosunda çökerek karışımın homojenliği bozulmakta ve nanokompozit boruda üretim hataları meydana gelmektedir.



Şekil 3.4. Nanokompozit borunun sarım aşaması

3.2.Elyaf-Hacim Oranının Belirlenmesi

Üretilen kompozit boru numunelerine ait elyaf ve matriks oranlarının belirlenmesi amacıyla literatürde farklı 2 yöntem mevcuttur. ASTM D2584-11 standardına göre yakma deneyleri gerçekleştirilmekte olup bu standart cam elyaf içindir. Bu standart kullanılarak karbon elyaf takviyeli kompozitlerin elyaf hacim oranının belirlenmesi için yakma deneyleri yapılmıştır (Gemi, 2014; Ulus, 2014). Standarda göre

yakma numuneleri sıcaklığı 565±28 °C olan fırında reçine tamamen yanıncaya kadar bekletilmesi gerekmektedir. ASTM D2584 standardına göre yakma numunelerine ait elyaf hacim oranı denklem3.1 ile belirlenir.

$$V_f = (W_f / \rho_f)/(W_k / \rho_k) \tag{3.1}$$

Burada W_f elyafın, W_k kompozitin kütlesi ve ρ_f elyafın, ρ_k kompozitin yoğunluğudur.

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf hacim oranının belirlenmesi için diğer bir yöntem Arşimet Prensibidir (Abdalla, 2008). Bu yöntemde sıvının kaldırma kuvvetinden yararlanılarak elyaf hacim oranı denklem 3.3 ile belirlenir.

$$\rho_k = (W_k \rho_{alkol})/(W_k - W_{alkol}) \tag{3.2}$$

$$V_f = (\rho_k - \rho_m)/(\rho_f - \rho_m) \tag{3.3}$$

Burada W_k kompozitin, W_{alkol} kompozitin etil alkolde kütlesi ve ρ_f elyafın, ρ_m reçinenin ve ρ_k kompozitin yoğunluğudur.

ASTM D4018-11 standardı sürekli karbon elyaflar kullanılarak üretimi yapılmış kompozitler için elyaf hacim oranının belirlenmesinde Arşimet Prensibi kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Bu standart doğrultusunda Arşimet yöntemi çok hassas ölçüm gerektiğinden dolayı deney üç kez tekrarlandı. Hassas terazi kullanılarak kompozit borunun ağırlığı tartıldıktan sonra etil alkol içinde iken tekrar ağırlığı tartılarak kompozitin yoğunluğu bulundu ve buradan elyaf hacim oranı hesaplandı.

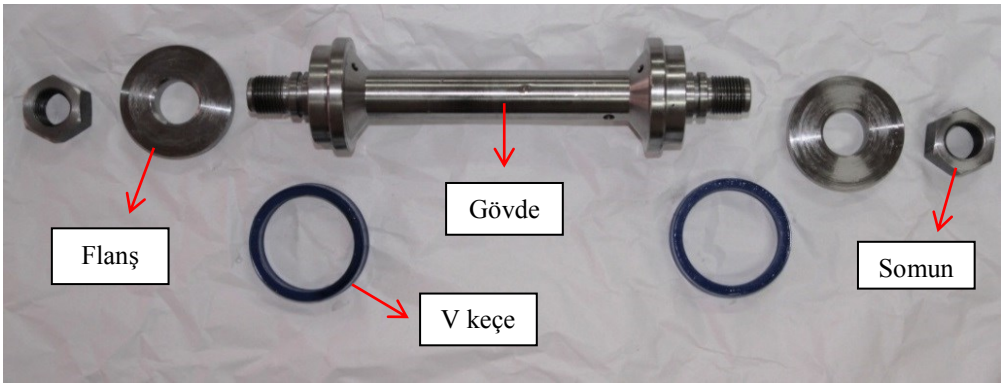
3.3.Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

3.3.1. Statik İç Basınç Patlatma Deneyleri

Statik iç basınç patlatma deneyleri, malzemenin mekanik değerlerinin, patlama sonrasında oluşabilecek hasar ve hasar mekanizmasının belirlenmesi için yapılan bir deneydir. Özellikle patlama gerilmesi sonucunda yorulma deneylerinde kullanılacak olan gerilme oranları belirlenebilecektir.

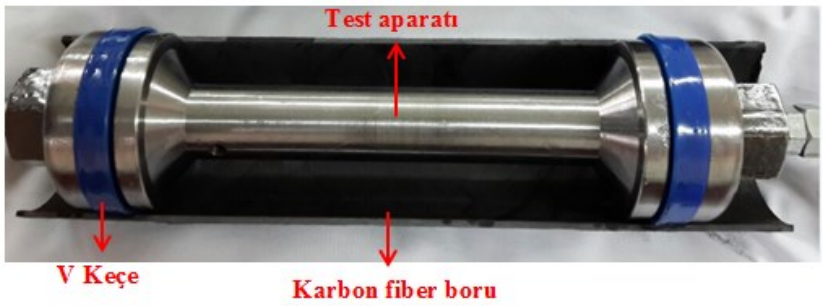
Statik iç basınç patlama deneylerinde basıncın oluşması için Şekil 3.5'de görülen çelikten imal edilmiş test aparatı hazırlanmış ve montaj edilmemiş hali görülmektedir. Yapılan deneyler serbest uçlu olduğundan dolayı her iki kenarına sızdırmazlığı önlemek

için keçe yatağı açılmış ve bu keçe yataklarını desteklemek için çelik flanş kullanılmıştır.



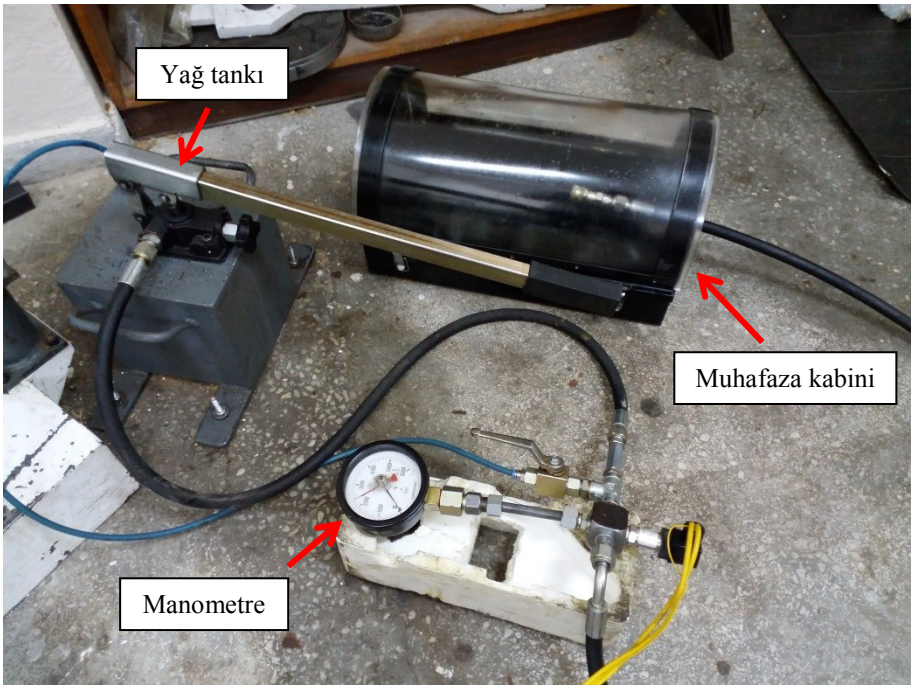
Şekil 3.5. Test aparatının parçaları

Test aparatı Şekil 3.6'da görüldüğü gibi kompozit borunun içerisine yerleştirilmiş, montaj sırasında kompozit borunun içerisine akışkan olarak hidrolik yağ doldurulmuş ve her iki ucundan da yağ sızdırmayacak şekilde montaj tamamlanmıştır. Aparatın hidrolik yağ sızdırmazlığı keçeler ile sağlanması ve boru aparat içerisinde hareket edebilmesi nedeniyle kompozit boruya iç basınç uygulandığında borunun çapı artarken boyu kısalabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı serbest uçlu iç basınç deneyi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.6. Kompozit boru içerisine yerleştirilmiş testi aparatı

Deneylerde kullanılan karbon elyaf takviyeli kompozit borular yüksek basınçlarda son hasara ulaşmakta ve bu hasar patlama şeklinde gerçekleşmektedir. Borunun patlamasından dolayı oluşabilecek tehlikeleri ortadan kaldırmak amacıyla patlatma deneyleri Şekil 3.7'de görülen muhafaza kabini içerisinde gerçekleştirilmektedir. Kabinin üzeri şeffaf olduğu için deney boyunca boruda meydana gelen hasarlar gözlenebilmektedir.



Şekil 3.7. Patlatma deney düzeneği ve muhafaza kabini

Statik iç basınç patlatma deneylerinde kompozit boru hidrolik pompa yardımıyla basınç yüklemesi yapılmıştır. Deney numunelerine pompa ile yağ basılırken numunede meydana gelecek patlama hasarının 60-70 saniye arasında gerçekleştirilmiş ve yüklemenin lineer olması sağlanmıştır. Deney esnasında basınç artışı ve patlama basıncı manometreden takip edilmiştir.

Statik iç basınç patlatma testleri için kompozit borular ASTM D1599-99 standardın da belirtilen numune uzunluklarına uygun olarak dairesel testereli boru kesme tezgâhı ile 300 mm uzunluğunda kesildi. Dört farklı grup bulunan kompozit borular standart çerçevesinde 60-70 saniyede deney gerçekleştirilmiş olup her bir grup için üç tekrar yapıldı. Maksimum teğetsel gerilme ASTM D1599-99 standardına göre denklem 3.4'e göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{statik} = P\,(D - t) / 2t \qquad (3.4)$$

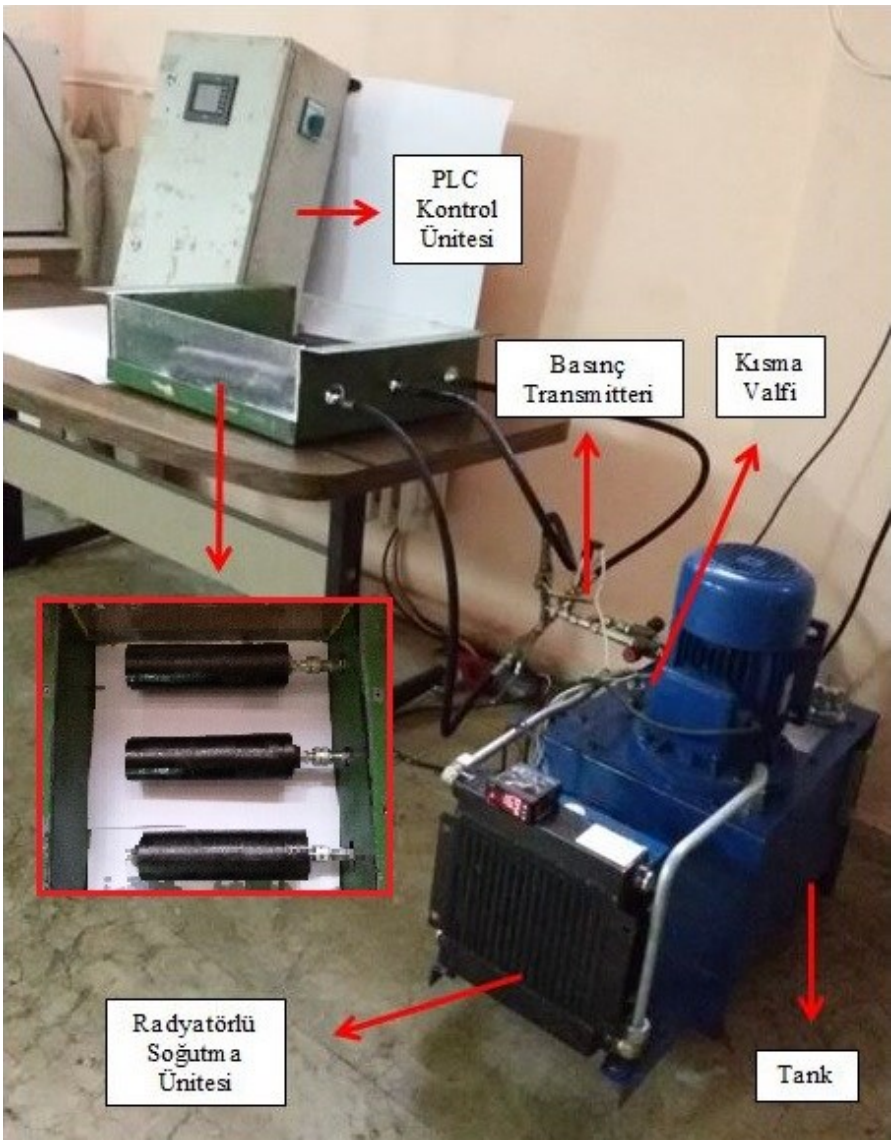
Burada, σ_{statik} iç basınç altında maksimum teğetsel gerilme (MPa), D ortalama takviyeli dış çap (mm), P iç basınç (MPa), t takviyeli cidar kalınlığı (mm)' dır.

3.3.2. İç Basınç Altında Yorulma Deneyleri

İç basınç etkisi altında yorulma deneyleri PLC kontrollü yorulma deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Serbest uçlu iç basınç temin edilmesini sağlayan aparat kompozit boru içerisine tamamen hidrolik yağ ile doldurulmuş şekilde sabitlendikten sonra numuneler kabininin içerisine yerleştirilmiştir. Kompozit borular hidrolik güç ünitesi ile bağlantısı yapıldıktan sonra, PLC ünitesinden üst ve alt basınç değerleri girilerek sistem çalıştırılmıştır.

Yorulma deneyleri için Şekil 3.8'de gösterilen PLC kontrollü iç basınç temin eden yorulma deney cihazında yapılmıştır. Bu çalışmada; p = 250 Bar basınç ve Q = 8 L/dak'lık debi kapasiteli dişli pompası bulunan, tank hacmi V = 50 litrelik bir hidrolik güç ünitesi bulunan cihaz kullanılmıştır. Bu cihazda pompa çıkışına alt ve üst basınçları mekanik olarak ayarlayabileceğimiz birer adet basınç emniyet valfi ve PLC ünitesinden uyarı alan, selenoid kumandalı bir yön kontrol valfi bulunmaktadır. Valf çıkışına devredeki yağ basıncını algılayan anolog bir basınç transmitteri ile ekrandan basınç değerleri okunabilmektedir. Hidrolik sistem aynı anda 3 adet deney numunesi ile birlikte çalışmaya müsaade edecek kapasitede olup test aparatlarını hidrolik devreye bağlamak için çok çabuk ve kolay sökülüp takılabilen, 3 adet quick kaplin takılı birer metre uzunluğunda esnek hidrolik hortumlar kullanılmıştır. Ayrıca sinuzoidal bir gerilme değişimi elde etmek amacıyla, ayrı ayrı ayarlanabilen gidiş ve dönüş hatlarına birer kısma valfi bulunmaktadır. Hidrolik akışkan olarak Shell Tellus S2M46 hidrolik yağ kullanılmıştır. 879 kg/m^3 yoğunluğa sahip olan bu yağ 40°C'de 0,000046 m^2/s viskoziteye sahiptir. Uzun süreli çalışmak zorunda kalan test cihazına, yükselen yağ sıcaklığını düşürmek amacıyla sıcaklık kontrollü bir soğutma ünitesi bulunmaktadır (Gemi, 2014).

PLC kontrol ünitesi; anolog/dijital çevirici, merkezi işlem ünitesi ve dijital ekrandan oluşmaktadır. Dijital ekran, hattaki yağ basıncını ve çevrim sayısını sürekli olarak göstermekte ve kaydetmektedir. Dijital ekrandan okunan basınç değerleri ile devreye takılı hassas bir anolog manometreden okunan değerler karşılaştırılabilmektedir. Test cihazının çalışma prensibi, basınç ayarlanan üst basınç değerine ulaştığını basınç sensöründen alınan sinyal ile kontrol ünitesi, selenoid valfi kumanda ederek basınçlı yağın tanka tahliyesini sağlamakta ve ayarlanan frekans değerini sağlayacak süre sonunda, valfi tekrar eski konumuna almaktadır. Bu işlem boru hasara uğrayıncaya kadar devam etmektedir (Şahin, 2011).



Şeki 3.8. PLC kontrollü yorulma deney cihazı

İç basınç altında yorulma deneyleri ASTM D2992 standardına göre yapıldı. Standarda göre deney boyunca yorulma yük oranı R=0,05 ve frekans değeri f=0,42 Hz olacak şekilde (dakikada 25±2 çevrim) sabit tutuldu. Her bir grup için üç deney tekrarı yapılmıştır. Statik iç basınç patlama deneylerinden elde edilen maksimum teğetsel gerilme değerinin %50, %60 ve %70'i olmak üzere üç farklı basınç değerinde kompozit borulara iç basınç altında yorulma deneyleri yapıldı.

3.4. Karakterizasyon Yöntemleri

3.4.1. Fourier Dönüşümlü İnfrared (FT-IR) Spektroskopi Ölçümü

Fourier Transform Infrared spektroskopi (FT-IR) tekniğinde IR ışının soğurulması ile birlikte atomlar arası bağların titreşim, dönme ve bunun sonucu olarak

da belirli frekans değerlerinde karakteristik sinyallerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle moleküler yapıların karakter tayininde çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Dalga boyu 0,75 μm ile 1000 μm arasında kalan bölgeye infrared bölgesi adı verilir. İnfrared bölgesini, yakın (0,75 μm-2,5 μm), orta (2,5 μm-15 μm) ve uzak (15 μm-1000 μm) infrared olarak üçe ayırılır.

Kızılötesi (IR) Spektroskopisi temel olarak kızılötesi ışığın incelenen malzeme tarafından soğurulmasına esasına dayanır. Soğurulma, moleküldeki bağların titreşimi ve dönüşleri için gerekli miktarda enerjisinin, cihaz tarafından elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinden gönderilmesiyle gerçekleşir. Bu yöntemde amaç herhangi bir bileşiğin yapısı hakkında ve bileşikten alınan IR spektrumu ile yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri hakkında bilgi sahibi olabiliriz. IR spekturumunda 3600-1200 cm^{-1} arasını kapsayan bölge foksiyonel grup bölgesi, 1200-600 cm^{-1} arasını kapsayan bölge ise küçük yapısal değişiklikleri veren parmak izi bölgesi olarak adlandırılır (Ulus, 2014).

FT-IR analizlerinde Bruker-Vertex 70 FT-IR spektrofotometresi kullanılarak ölçüm alındı. Numunelere ait FT-IR spektrumları azaltılmış toplam reflektans (ATR) tekniği ile kaydedildi. Dört farklı numune gurubu 500-4000 cm^{-1} aralığında ve 2 cm^{-1} çözünürlükte incelendi. ATR yüzeyi numune ölçümü alınmadan önce etil alkol ile temizleme işleminden sonra ölçüm için kullanıldı.

3.4.2. Termal Gravimetrik (TGA) Analizi

Bu analiz tekniği ile sıcaklığın değişimine bağlı olarak malzemelerin yapısında meydana gelen ağırlık değişimlerini verir. Böylece bir malzemenin (özellikle polimerlerde) bozunması sırasındaki ağırlık değişimlerini zaman veya sıcaklığa bağlı olarak gözleme olanağı sağlar. Ağırlık değişimi yüksek sıcaklıklarda kimyasal bağların kopması veya oluşumu sonucunda meydana gelir. Bu esnada ortaya çıkacak olan farklı yapılar ortamdan uzaklaşacağı için ağırlıkta azalma meydana gelir (Ulus, 2014).

Termogravimetrik analizde, kontrollü bir hızla, uygun atmosfer ortamında ısıtılan malzemenin kütlesindeki değişimler çok hassas bir terazi ile ölçülür. Granür ya da toz haline getirilmiş numune (5-20mg), kroze içerisine konularak TGA cihazının terazisine konulur ve numunenin özelliğine göre, uygun gaz (inert veya reaktif gaz) seçilerek, numune belli bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Numunenin kütlesindeki değişim miktarı, zaman ya da sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kaydedilir.

Termal gravimetrik analizde epoksi içerisinde bulunan nanoparçacıkların, epoksinin termal bozunma etkisini incelemek için çalışıldı. TGA ölçümleri için Mettler Toledo TGA/DSC 3+ cihazinda polimerik nanokompozit granürleri 10 °C/dak. ısıtma hızı ile 650 °C'ye azot ortamında ısıtıldı ve ağırlık kaybı hesaplandı.

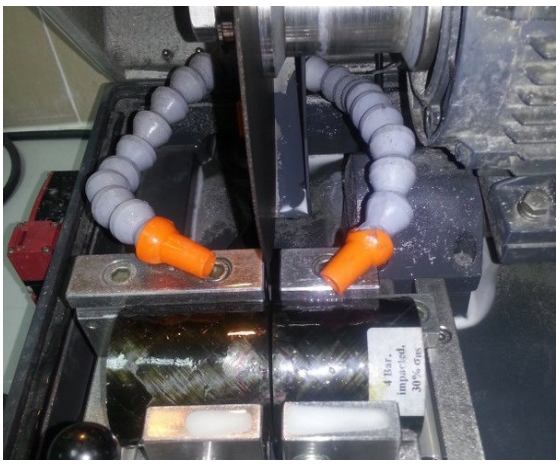
3.4.3. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntü Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplayıp, bu algılayıcılardan gelen sinyal dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar monitörüne verilmesi ile oluşmaktadır.

Yapılan çalışmalarda kompozit malzemelerin yüzeyleri, nanomalzemelerin boyutları ve yapısı için ZEISS Evo LS10 cihazi ile SEM resimleri alındı. Numunelerin yüzeyleri, görüntülemeden önce altın ile 5-8 nm kalınlığında (Cressington Auto108) kaplandı.

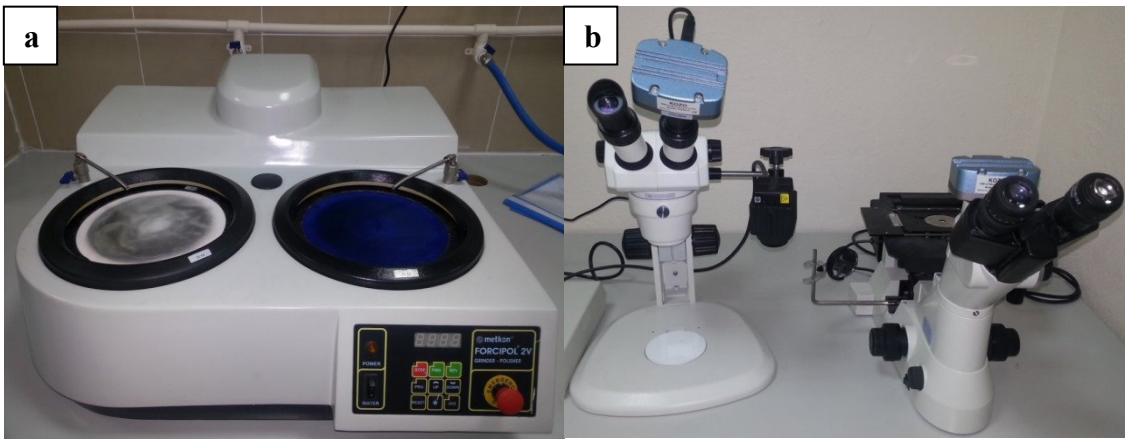
3.4.4. Optik Mikroskop Görüntü Analizi

Deneyler sonucunda numunelerin önce makro ölçekte hasar incelenmesi yapılmış olup daha sonra mikro hasar incelemesi yapıldı. Makro ölçekte hasar incelemesi için kompozit boruların dış görünüş genel fotoğraflaması yapılmış olup sonra hasar bölgeleri numunelerinden kesilerek alındı. Mikro hasar incelemeleri için hasarlı bölgeler radyal ve eksenel yönlerde kesildi(Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Numunelerin kesme işleminde kullanılan METKON marka kesme cihazı (Gemi, 2014)

Kesilen numunelerin hasar bölgelerinin incelenebilmesi için hasar yüzeyi Şekil 3.10a'da görülen METKON marka zımparalama cihazında farklı zımparalama işlemlerinden geçirildi. Zımparalama işleminden sonra hasar yüzeylerine aynı cihazda parlatma işlemi yapıldı. Parlatılan numuneler etil alkol ile yıkanarak hasar bölgesinde bulunan zımpara ve su kalıntıları temizlendi.



Şekil 3.10. a)Mikro yapının hazırlanmasında ve incelemede kullanılan METKON marka zımparalama ve parlatılma cihazı b) Mikro hasarın incelenmesinde kullanılan KOZO marka mikroskoplar

Numunelerin mikro hasar incelemesi için Şekil 3.10b'da görülen KOZO marka mikroskop kullanıldı ve hasarlı bölgenin radyal ve matriks çatlakların görüntülenebilmesi için 20X büyütme yapıldı.

4. ARAŞTIRMA VERİLERİ VE TARTIŞMA

4.1.Nanomalzeme-Epoksi Polimerik Kompoziti

Nanokompozit boru üretimde kullanılan nanoparçacıkların epoksi içerisindeki dağılımları, matriks malzemesi olan epoksi reçineyi nasıl modifiye ettiği bu bölümde incelenmiştir. Bu doğrultuda filaman sarım üretimi sırasında epoksi ile karıştırılan nanoparçacıklardan örnek alınmış ve epoksi ile olan morfolojik ve kristeografik yapısı SEM ve TGA analizleri yapılarak karakterize edilmiştir.

4.1.1. SEM Görüntü Analizi

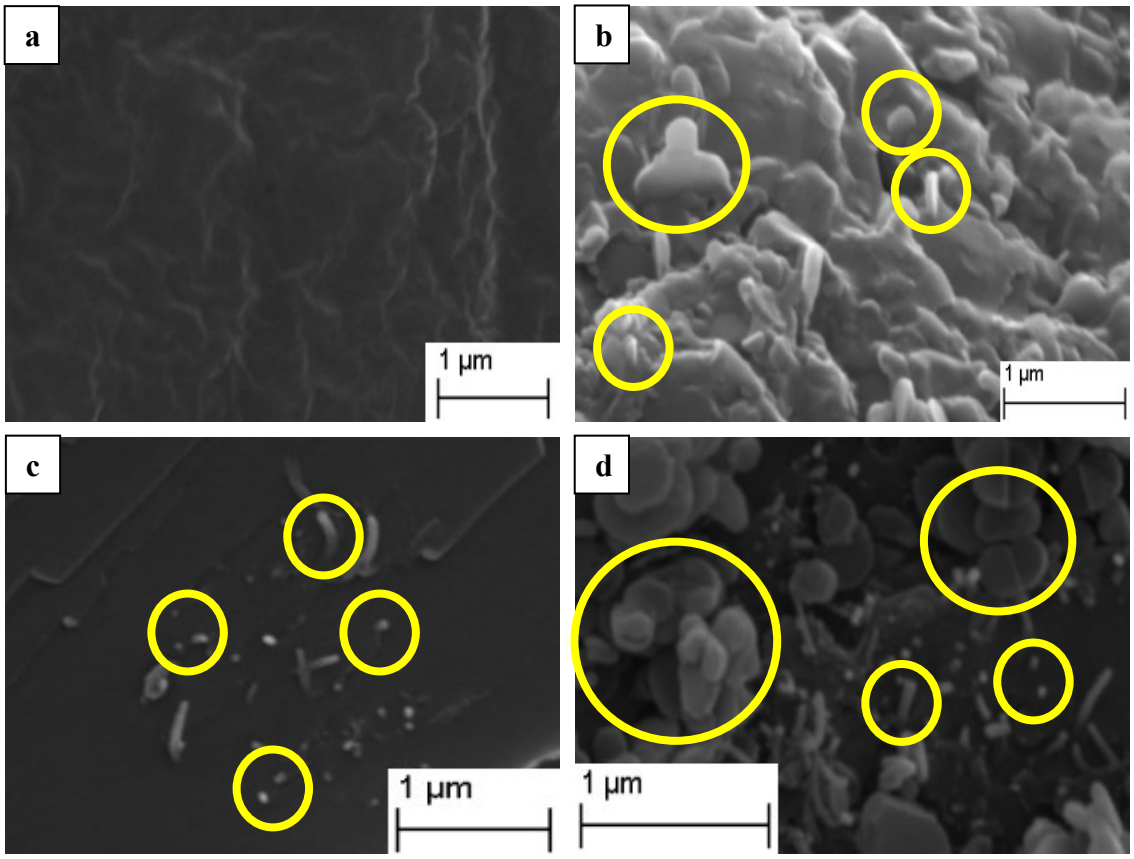
Nanokompozit boru üretim sırasında kullanılan ve nanoparçacık karışımı yapılmış epoksiden alınan SEM fotoğrafları Şekil 4.1'de verilmiştir. Elyaf takviyesi olmaksızın alınan SEM fotoğraflarından epoksi içersinde bulunan nanoparçacıklar çok rahat bir şekilde görülebilmektedir.

Şekil 4.1a'da epoksi yüzeyinden alınan görüntüde herhangi bir nanoparçacık katkısı olmadığından dolayı yüzeyinde herhangi bir farklı bir yapı görülmemekte iken yüzeyler düzgün bir şekildedir.

Ağırlıkça %0,5 oranında epoksi içerisine katılan BNND'lerin görüntüleri Şekil 4.1b'de verilmiştir. Epoksi içerisine gömülen BNND'lerin hem kalınlıkları hemde genişliklerinin ölçümleride yapılabilmektedir. BNND'ler epoksi içerisinde homojen olarak dağıldığı ve aglomer oluşumları az seviyede olduğu bu da kullanılan karıştırma tekniğin iyi olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.1c'de ağırlıkça %0,3 katılan ÇCKNT'ler epoksi içerisinde dağıldığını ve boylarının (10-30 μm) uzun olmasından dolayı çok rahat bir şekilde görülmektedirler.

Şekil 4.1d'de hem BNND hemde ÇCKNT'ler katılarak yapılan epoksi karışımında kullanılan nanoparçacıklar, miktarın artmasından dolayı karışımın yeteri kadar iyi yapılamadığı ve tam anlamıyla nanoparçacıkların homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Karışımda ÇCKNT'ler homojen olarak karışmış olsa bile epoksi içerisine gömülmüşlerdir. Fakat BNND'ler tam olarak karışmamış ve kendi aralarında topaklanmalar meydana getirmişlerdir. BNND'ler yapının içerisine karışmaması ÇCKNT'den farklı bölgelerde bulunmasına neden olmaktadır. Bu da hibrit nanokompozit boru üretimde en büyük dezavantaj olarak karşımıza çıkacaktır.



Şekil 4.1. Polimerik nanokompozitlerine ait SEM fotoğrafları a)Nanoparçacık katkısız epoksi b)BNND katkılı epoksi c)ÇCKNT katkılı epoksi d)BNND ve ÇCKNT katkılı epoksi

4.1.2. TGA Analizi

Malzemelerin sıcaklık değişimi ile bozunması sırasındaki meydana gelen ağırlık değişimlerini sıcaklığa bağlı olarak gözleme prensibine dayalı TGA analizi ile epoksi içerisinde yer alan nanoparçacıkların termal bozunma etkisi araştırılmıştır. Üretim sırasında alınan numunelerden TGA analizi için granürler halinde TGA cihazında 10 °C/dak. ısıtma hızı ile 600 °C'ye ısıtılmıştır.

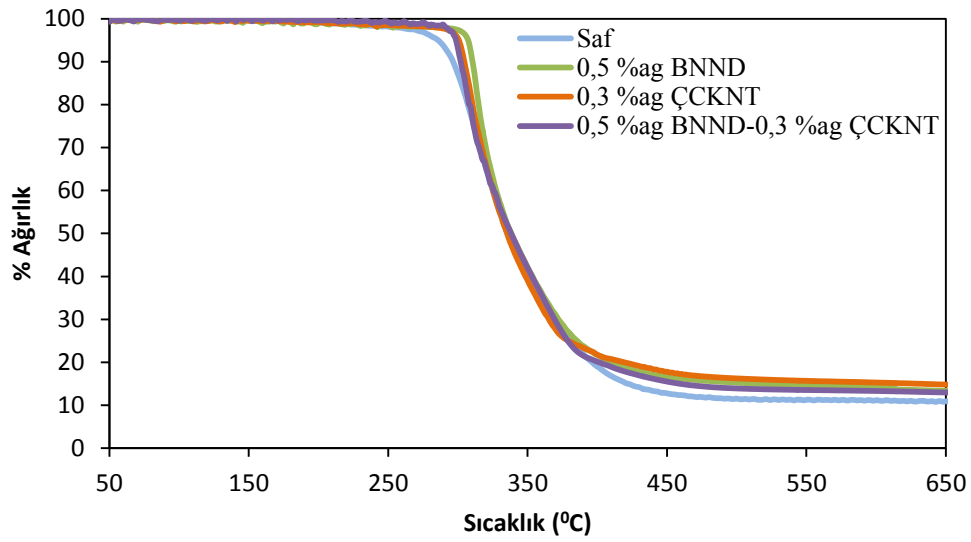
Şekil 4.2'de ağırlıkça %0,5 BNND, %0,3 ÇCKNT, %0,5-%0,3 BNND-ÇCKNT içeren nanokompozitlerin ve saf epoksinin sıcaklığa bağlı kütle kaybı (TGA) sonuçları verilmiştir. TGA termoramlarından bu polimerlerin iki aşamada bozunduğu gözlemlenmiştir. Son bozunma sıcaklığı ile epoksi tamamen yanmış olup ortamda kalmamıştır. Bu yüzden son bozunma sıcaklıkları bütün numuneler için aynıdır. TGA eğrisine göre polimerik nanokompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve ilk bozunma sıcaklıkları (T_i) çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Polimerik Nanokompozit TGA bozunma sıcaklıkları

	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	İlk Bozunma Sıcaklığı (°C)
Saf Epoksi	82,65	285
%0,5 BNND katkılı epoksi	86,93	307
%0,3 ÇCKNT katkılı epoksi	86,70	298
%0,5 BNND ve %0,3 ÇCKNT katkılı epoksi	86,88	300

Saf epoksi polimerin ilk bozunma sıcaklıgı 292 °C olarak, %0,5 BNND katkılı epoksi numunenin içinse ilk bozunma sıcaklığı değeri 305 °C olarak tespit edilmiştir. BNND ilavesinin ilk bozunma sıcaklığı değerinde 13 °C artış ile bir iyileşme sağladığı ve termal kararlılığı arttırdığı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca bor nitrür seramik tabanlı bir malzeme olduğundan yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Fakat BNND'ler ağırlıkça çok az miktarda kullanılmasına rağmen nano boyutun mikro boyuta göre önemli bir avantaj sağladığını görmekteyiz.

ÇCKNT katkılı epoksininde ilk bozunma sıcaklığında önemli bir artış meydana gelmesine rağmen BNND'ye kıyasla daha düşük bir termal kararlılık göstermiştir. Fakat BNND ve ÇCKNT ayrı ayrı epoksinin bozunmaya başladığı sıcaklığı artırken iki nanoparçacığın beraber kullanıldığı polimerik kompozitte, nanoparçacıkları tek başlarına kullandığımız kompozitlere göre daha düşük bir bozunma sıcaklığı elde edilmiştir. Daha düşük ilk bozunma sıcaklığı elde etmemizin sebebi epoksi içerisinde her iki nanoparçacığın homojen bir şekilde karışmadığı, aglomerlerin olduğu ve farklı bölgelerde nanoparçacıkların ağırlıkça oranlarında farklı olduğu anlaşılmakadır. Ayrıca bu sonuç SEM analizi ile doğrulanmıştır.



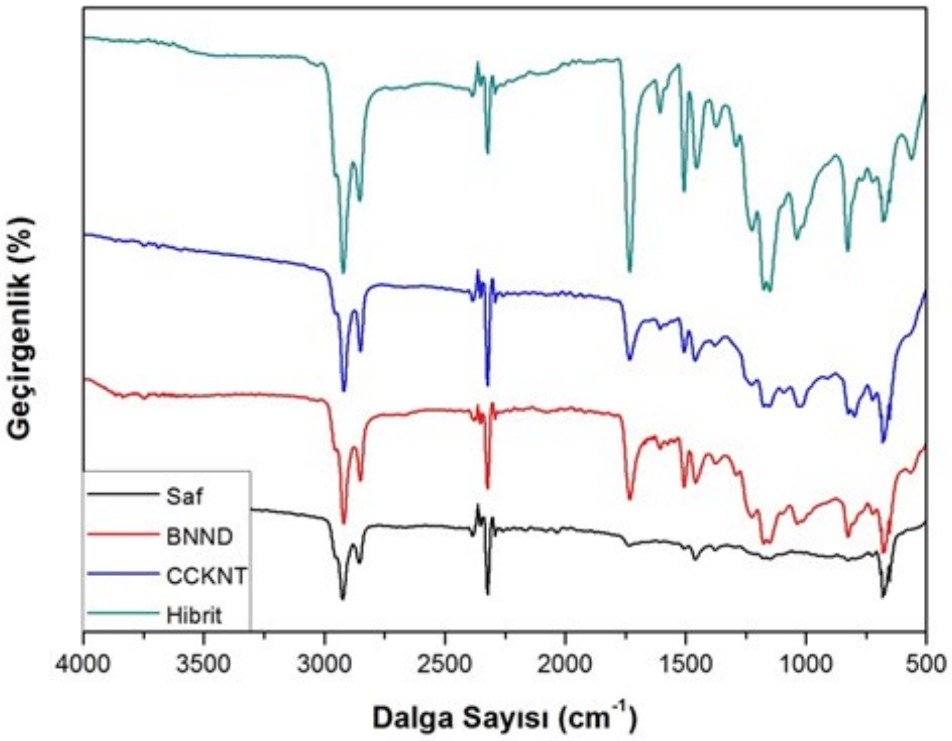
Şekil 4.2. Polimerik nanokompozitlere ait TGA eğrisi

4.2.Kompozit Borulara ait FT-IR Spektroskopi Ölçümü

Nanokompozit borulara ait nanoparçacık katkılı ve katkısız numunelerden FT-IR spektroskopi ile ölçümler alınarak, epoksi içerisinde bulunan nanoparçacıkların elyaflar ile yapmış olduğu bağlantılar açıklanmıştır. Nanokompozit boru numunelerinden alınan spektrum Şekil 4.3'de verilmiştir.

Spektruma ait şekil 4.3'de, 3344 cm^{-1}'deki geniş pik fenol halkasının O-H gerilme titreşimlerini, 2850 cm^{-1} ve 2925 cm^{-1}'deki pikler metilen halkasının C-H gerilmesini, 1608 cm^{-1}, 1509 cm^{-1} ve 1459 cm^{-1}'deki pikler aromatik halkadaki C-C bağlarını, 1150 cm^{-1} ve 1035 cm^{-1}'deki pik eter fonksiyonel grubunun C-O-C gerilmelerini, 828 cm ve 739 cm^{-1}'deki pik aromatik gruba ait C-H eğilme titreşimlerine ait gerilmelerdir. Bu pikler epoksi için karakteristik bantlar olup literatür verileriyle uyuşmaktadır(González 2012). İlave olarak 1230 $cm^{-1'}$de görülen geniş pik C-O fenol gerilme titreşimlerini ve 2320 cm^{-1}'de bulunan pik ise -C≡C- titreşimlerine ait gerilmeleri göstermektedir (Eskizeybek, 2012).

Literatürde bor nitrür ile yapılan çalışmalarda 1380 cm^{-1}'deki pikin B-N gerilme titreşimini, 783 cm'de sırasıyla, B-N-B enine ve B-N-B boyuna eğilme titreşimini, 1400-1500 cm^{-1}'de B-O titreşimleri ve 3435 cm^{-1}'de N-H gerilme titreşimlerine ait olduğu belirtilmektedir (Franz, 2000; Gomez, 1996; Loiseau, 1998; Mirkarimi, 1997). BNND katkılı borunun FT-IR spektrumunda ortaya çıkan titreşim bantlarında ÇCKNT katkılı nanokompozit boru numunesine kıyasla ciddi bir bant kayması olmadığı ve ÇCKNT katkılı boruya göre benzer frekanslarda ortaya çıktığı görülmektedir. Literatürde 1230 cm^{-1} fenol gerilme titreşimi olan pik ÇCKNT'e ait olduğu belirtilmiştir (Eskizeybek, 2012). Burada her iki numuneye ait karakteristik bantlar görülmekle birlikte yeni bir bant oluşumu olarak B-N gerilme titreşimi olan 1380 cm^{-1}'deki pikin farklılığı gözlenmektedir. Bunun sebebi olarak, literatürde bor nitrür spektrumları için belirtilen pikler aynı zamanda epoksiye ait fonksiyonel gruplarla çakışmasından kaynaklanmaktadır. Hibrit nanokompozit boruya ait FT-IR spektrumunda ise hem BNND hemde ÇCKNT katkılı kompozitlerinden alınan FT-IR spektrumda gözlenen pikler, hibrit numunede de görülmekle birlikte tek farklılık olarak frekansın artmasıdır. Bunun sebebi ise her iki nanoparçacığında ortamda aynı anda bulunmasından kaynaklandığını belirtebiliriz. Spektrumdan da anlaşılacağı üzere elyaf matriks ara yüzey bağlantısının iyi olduğunu ve epoksi reçine içerisine katılan nanoparçacıkaların bu bağlantıda rol aldığını söylebiliriz.



Şekil 4.3. Nanokompozit borulara ait FT-IR Spekturumu

4.3.Kompozit Boruların Elyaf-Hacim Oranı

Filaman sarım yöntemi ile üretilmiş ±55° sarım açılı ve 8 tabakalı kompozit borularında elyaf hacim oranını belirlemek için iki farklı yöntem kulanılmıştır. Karbon elyaf takviyeli üretilmiş kompozit malzemelerin elyaf hacim oranı belirlemek için yapılan çalışmalarda ASTM D2584-11 standardı referans alınarak yakma deneyleri yapılmıştır (Ulus, 2014; Gemi, 2014). Bu çalışmalar göz önüne alınarak 550 °C'de karbon elyaf takviyeli boruların yakma deneyi gerçekleştirilmiş olup Şekil 4.4'de yanma sonrasına ait deney numunesi görülmektedir. Ayrıca yakma deney sonucunda kompozit borunun sarım açısı, tabakalar ve bant genişliği görülebilmektedir. Yakma deneyi sonucunda kompozit boruya ait elyaf hacim oranı 0,53 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.4. Karbon elyaf takviyeli kompozit borunun yanma sonrasına ait görüntüsü

İkinci bir yöntem olarak Arşimed Prensibi kullanılmış ve kompozit borunun elyaf hacim oranı tekrardan hesaplanılmıştır. Bu ikinci yöntem kullanılmasının temel amacı ASTM D4018-11 standardıdır. Bu standart da ise karbon elyaflar için elyaf hacim oranının hesaplanmasında en iyi yöntemin Arşimed Prensibi olduğu vurgulanmıştır. Bu yöntem kullanılarak elyaf hacim oranı hesaplanıldığında 0,55 olarak bulunmuştur.

Elyaf hacim oranının belirlenmesi yönünde yapılan çalışmalarda en iyi sonucun karbon elyaflar için 0,54-0,55 olduğu belirlenmiştir (Abdalla, 2008). Aynı kompozit boruya ait deney numunelerinde iki farklı elyaf hacim değerinin bulunması yakma deneyinin hatalı olduğunu göstermektedir. Yakma deneyi sonucunda değerin bu kadar düşük çıkmasını organik elyaf olan karbon elyafların bu sıcaklıklarda oksitlenmesinden kaynaklı olduğunu göstermektedir. Karbon elyaf takviyeli kompozitler için elyaf hacim oranının en iyi sonucunu, Arşimed Prensibi ile ölçülmesinden sonra bulunabileceğini göstermektedir. Elyaf hacim oranının literatürdeki yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar elde edilmesinde üretim sırasında oluşan fazla epoksinin sıyrılma işleminin yeteri kadar iyi yapıldığını göstermektedir.

4.4.Kompozit Boruların Mekanik Özellikleri

4.4.1. Statik İç Basınç Patlatma Deneyi

Statik iç basınç ASTM D1599-99 standardına uygun olarak lineer basınç artışı sağlanmak için 60-70 sn içerisinde gerçekleştirilmiştir. Statik patlatma deneylerinde maksimum gerilme değerine ulaştığında boruların tamamında patlama meydana gelmiştir. Maksimum gerilme değerine ulaşan boru Şekil 4.5'de görüldüğü gibi patlamış ve test aparatının bir kısmı patlamanın etkisiyle dışarı çıkmıştır.

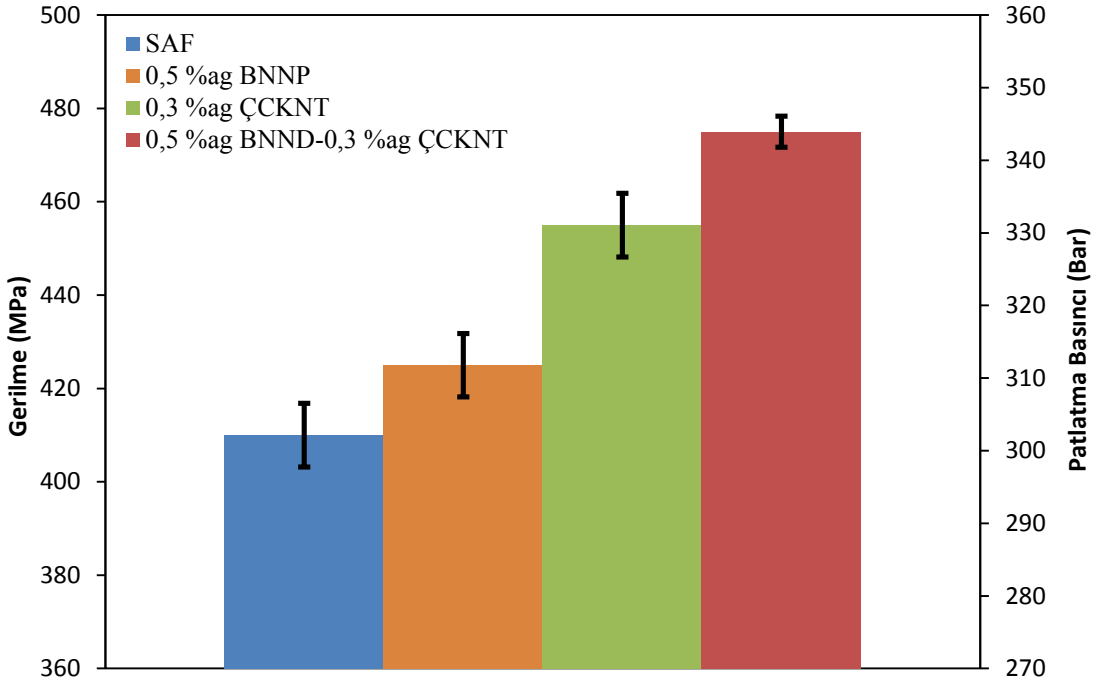


Şekil 4.5. Kompozit boruya ait statik iç basınç patlatma sonrası meydana gelen hasar

İç basınç testlerine göre elde edilen patlama basınçları ve gerilmeler Şekil 4.6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en düşük patlama basıncı 300 Bar değerinde nanoparçacık katkısı olmayan (saf epoksiden üretilen) numuneden elde edildiği görülmektedir. Ağırlıkça belirli oranlarda epoksi reçine içerisine katılan nanoparçacıklar nanokompozit boruların patlama basıncının artmasında önemli rol oynamışlardır. Statik patlama basınçlarının, BNND'in ağırlıkça %0,5 oranında epoksiye eklenmesiyle 310 Bar, ÇCKNT'ün ağırlıkça %0,3 oranında eklenmesiyle 330 Bar, ağırlıkça %0,5 BNND ve %0,3 ÇCKNT eklenmesi durumunda ise 350 Bar değerine kadar artış sağlanmıştır. Hibrit nanokompozit borular, saf borulara göre %16,67'lik bir patlama basıncı artışı nanoparçacıkların etkisiyle sağlanmıştır.

Statik iç basınç testlerinde patlama basınçlarının yanında boruların patlama gerilmeleri de ASTM D1599-99 standardı uygun olarak hesaplanmıştır. Yapılan gerilme analizleri sonucunda minimum gerilme değeri nanoparçacık katkısız borularda meydana geldiği, diğer sonuçların ise patlama basıncı değerlerinde ölçülen sıraya uygun olarak etkilendiği görülmektedir.

Deneylerin standarda uygun olarak üç tekrar sonucunda, numunelerde üretimden kaynaklanabilecek hava boşluğu, nanoparçacıkların dağılımları, takviye elemanları arasında düzensiz yerleştirme gibi mikro hasar ve duyarlı bölgelerin kabul edilebilir derece de az olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. Nanokompozit boruların gerilme ve patlama basınçları

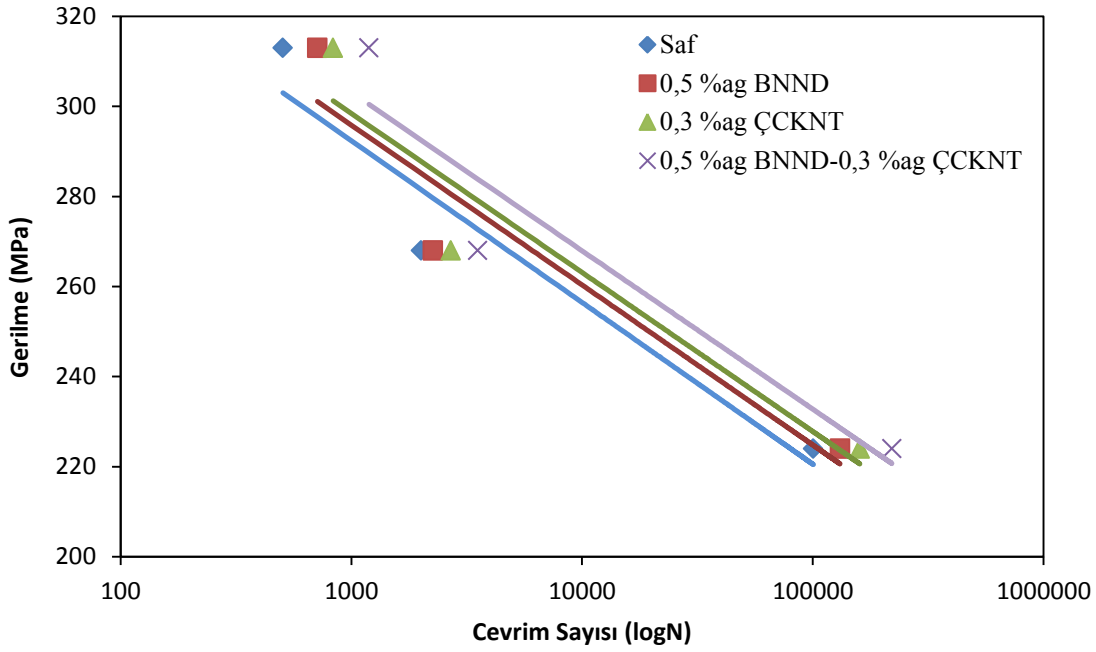
4.4.2. İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Deneyi

±55° sarım açısı ve 8 tabakalı karbon elyaf takviyeli nanokompozit boruların yorulma ömrünü belirlemek amacıyla bu deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yorulma yük oranı R=0,05 ve gerilme değeri ise açık uçlu iç basınç patlatma deneylerinde elde edilen patlatma basınç değerlerinin %50, %60 ve %70 olacak şekilde tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Yorulma deneyleri esnasında karbon elyaftan dolayı hasar aşamaları gözlenmemiştir. Oluşan hasar sonucunda numunede yoğun sızıntının (su jeti) başlaması ve deneyin sonlandırılması şeklindedir.

4 farklı gruptaki nanokompozit borular için S-N diyagramı Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Üç farklı gerilmede yorulma deneyleri gerçekleştirilmiş olup nanoparçacıkların yorulma üzerindeki farkları da araştırılmıştır. Yüksek ve orta gerilme olarak nitelendirilen %70 ve %60 gerilmelerde düşük çevrim sayıları elde edilirken, düşük gerilme olarak sayılan %50 gerilmede ise yüksek çevrim sayıları elde edilmiştir. Gerilme oranı arttıkça kompozit malzemelerin yorulma ömründe azalma meydana gelmektedir. Bu da tabakalarda uniform olmayan dağılımlar meydana getirirken çatlak oluşumunu ve gelişimini hızlandırmakta, hasarların hızla gelişimi kompozit boruların rijitiğinin düşmesine sebep olmaktadır ve boruda eğilmenin meydana gelmesine yol açmaktadır (Ellyin, 2001). Literatürde iç basınç altında yapılan yorulma deneylerinde cam elyaflar kullanılmıştır. Filaman sarım yöntemi ile üretilen borular 4 tabakalı olup,

%50, %60 ve %70 tekrarlı gerilmelerle yapılan yorulma deneylerinde daha düşük çevrim sayıları oluşmuştur(Gemi 2004). Düşük çevrim sayılarının oluşmasını tabaka sayılarının düşük olması ve cam elyafın karbon elyaf kadar rijit bir malzeme olmamasından kaynaklanmaktadır. Nanokompozit levhalarda ise farklı nanoparçacık katılarak yapılan yorulma deneylerinde nanoparçacıkların etkisi incelenmiştir. Epoksi reçine içerisine SiO_2 nanodolgusu kullanılarak üretilmiş levhaların düşük gerilme altında yapılan yorulma deneylerinde çevrim sayısında 10 kat artış sağlarken, yüksek gerilme oranında ise 3 katlık bir artış sağlamıştır (Espinoza, 2014). ÇCKNT katılarak üretilen levhalarda da düşük gerilmelerde 15 katlık bir artış sağlayarak nanoparçacıkların yorulma üzerindeki etkileri incelenmiştir (Loos, 2012).

Nanoparçacık ilavesi ile bütün gerilmelerde yapılan deneylerde yorulma ömürlerinde belirgin artış olduğu Şekil 4.7'de görülmektedir. Naonoparçacıklar ile epoksi reçine modifiye edilmesinden dolayı kontrol numunesi olan saf boruya göre daha yüksek çevrim sonuçları elde edilirken bunun nedenini ilk hasar başlangıcı olan matriks çatlatmasını nanoparçacıkların geciktirdiğini, matrikste oluşan hasarın yönlendirmesi ve delaminasyonların oluşumu azalması sonucunda oluştuğunu söyleyebiliriz.



Şekil 4.7. Nanokompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarının gerilme-çevrim grafiği

İç basınç altında yapılan yorulma deneyleri ASTM D2992 standardına göre herbir grup için üç deney tekrarı yapılmıştır. $0{,}7\sigma_{statik}$ gerilme oranına sahip

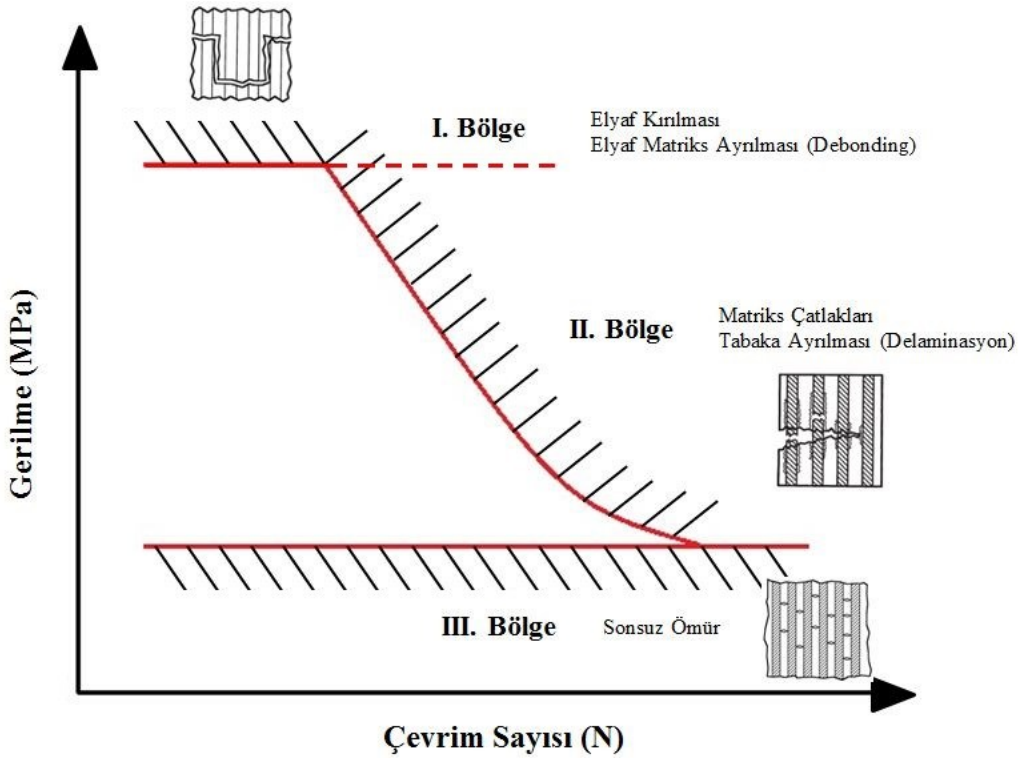
nanoparçacık katkılı ve katkısız nanokompozit boruların yüksek gerilmeden dolayı çevrim sayıları düşük çıkmıştır. Fakat kontrol grubu olan saf boruya göre nanoparçacıklar ilave edilmesi ile çevrim sayılarında önemli artışlar sağlanmıştır. BNND ilavesi ile %41,18, ÇCKNT ilavesi ile %61, her iki nanoparçacığa sahip hibrit boruda %136,04 oranında saf borunun çevrim sayısına göre artış olmuştur.

$0{,}6\sigma_{statik}$ gerilme oranında altında yapılan yorulma deneylerinde elde edilen çevrim sayıları, kontrol grubu olan saf boruya göre sırasıyla %12,62, %34,78 ve %76 oranlarında artış meydana gelmiştir. Gerilmenin yüksek olmasına rağmen çevrim sayıları yüksek çıkmış olup, bunu karbon elyafın yorulma direncinin çok iyi olmasından kaynaklandığını söylebiliriz.

İç basınç altında yorulma deneylerinde düşük gerilme kabul edilen %50 gerilme oranında yapılan yorulma deney sonucunda çevrim sayıları diğer gerilme oranlarına göre daha yüksek çıkmış olup bunun nedenini düşük gerilmeden ve karbon elyaftan kaynaklı olduğunu söyleyebiliriz. Cam elyaf ile yapılan çalışmalarda aynı gerilme oranındaki çevrim sayılarına göre çok büyük bir oranda artış meydana geldiğini görmekteyiz (Gemi, 2004). Saf boruya göre elde edilen sonuçlar sırasıyla %30,64, %59,28 ve %119,14 bir artış nanoparçacıkların etkisiyle olmuştur. Düşük gerilme oranlarında uygulanan tekrarlı yüklemeler, tabakalardaki gerilme yığılmalarının az olması, nanoparçacıkların elyaf matriks arayüzey bağlantısını arttırması ve çatlakların yönlenmesi sonucunda çevrim sayılarında artış olmaktadır (Loos, 2012; Espinoza, 2014).

S-N eğrilerinde gerilme düştükçe çevrim sayılarında artış meydana gelmektedir. S-N eğrisi incelendiği takdirde üç ayrı bölgeden oluşabileceğini belirlenmiştir (Talreja, 1985). Şekil 4.8'de S-N eğrisindeki bölgeler gösterilmiş olup kompozit malzemelerde oluşabilecek sonuç hasarları belirlenmiştir. Birinci bölgedeki gerilme altında tekrarlı yüklemeler yapıldığı takdirde kompozit malzemede oluşan sonuç hasarları genellikle elyaf kırılmaları şeklindedir. Bu bölgede yorulma ömürleri kısa olmakla beraber malzemede büyük hasarlar oluşmakta (Wolodko, 1999), kompozit malzemeye gelen yükler ise elyaflar tarafından karşılanmaktadır (Majid, 2012). Bu bölgede kompozit borulara yapılan iç basınç altındaki yorulma deneyleri borularda patlama şeklinde son hasar oluşturmaktadır. S-N eğrisinde yer alan ikinci bölgede ise delaminasyon, matriks çatlakları ve kısmi elyaf kırılmaları yer alır. Bu bölge genellikle düşük gerilmelerden dolayı çevrim sayıları artmakta ve oluşan hasarlar yavaş bir gelişim göstermektedir. Matriks çatlakları ile başlayan hasarlar elyaf matriks arayüzey ayrılması (debonding) ve

bu hasarların elyaf doğrultusunda ilerlemesi neticesinde rijitlik kayıpları oluşmasına neden olur. Bu rijitlik kayıpları sonucunda kompozit borularda tabakalar arası dengesizlikler ortaya çıkmasıyla eğilmeler meydana gelir (Ellyin, 2001; Majid, 2012; Kaynak, 2001). Oluşan tabakalar arası dengesizlikler kayma gerilmelerini oluşturması sonucu delaminasyonlar başlar. Cam elyaf takviyeli kompozit borularda rijitlik kaybından dolayı meydana gelen eğilme esnasında basma bölgesinde kalan tabakalarda delaminasyonun ve borudaki rijitlik kaybının hızla ilerlediği belirlenmiştir (Wolodko, 1999). İkinci bölgede oluşan matriks hasarları ve delaminasyonun kompozit borularda iç basınç altında yapılan deneylerde akışkanın yol bularak sızıntı şeklinde sonuç hasarı meydana getirmektedir (Demirci, 2015). Elyaf takviyeli kompozitler, üçüncü bölgede gerilmenin düşük olmasından dolayı çevrim sayıları çok yüksek çıkmakta iken malzemede şekil değişimi çok küçük olup hasarın gelişimi ve ilerlemesi meydana gelmemektedir.

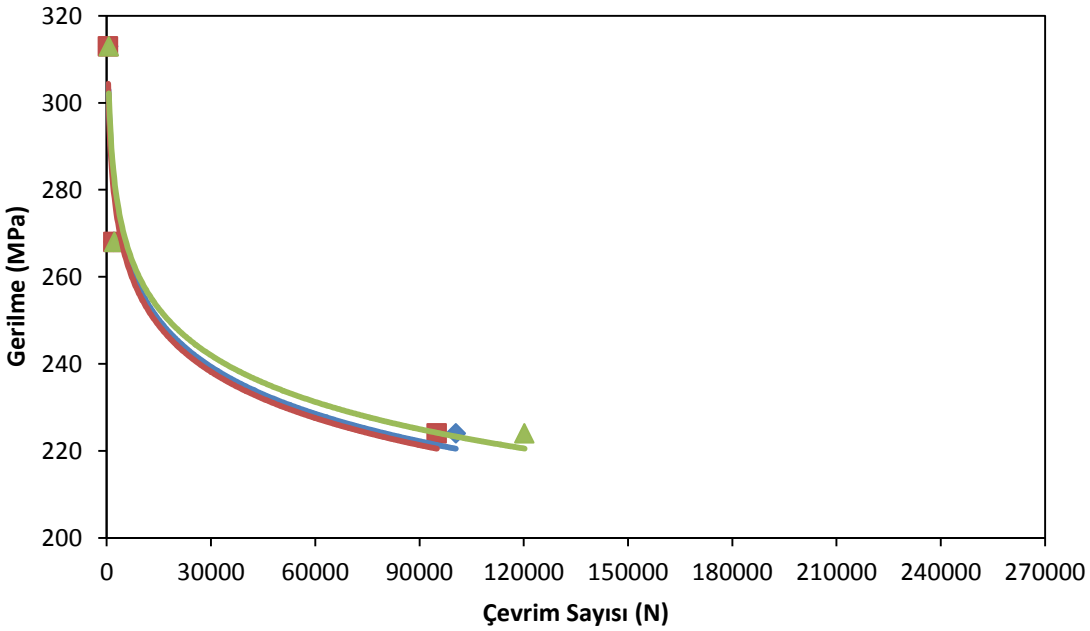


Şekil 4.8. Elyaf takviyeli kompozitlerde S-N eğrisinde meydana gelen hasar tipleri (Talreja, 1985)

Karbon elyafların yorulmaya karşı dirençleri yüksek olduğundan dolayı $0{,}7\sigma_{statik}$ yüksek gerilme oranında yapılan deneyler sonucunda nanokompozit boruda sonuç hasarı elyaf kopması şeklinde olmadığı ve oluşan hasarların ağırlıklı olarak delaminasyon şeklinde olduğu berlirlenmiştir. Bu yüzden akışkan sızıntısı ile

nanokompozit borularda son hasar oluşmaktadır. Bu da yapılan deneylerin birinci bölgenin altında olduğu anlaşılmıştır. Farklı elyaflarda bu gerilme oranında yapılan yorulma deneylerinde sonuç hasarın patlama şeklinde olduğu, $0{,}7\sigma_{statik}$ ve $0{,}6\sigma_{statik}$ gerilme oranlarının birinci bölgede olduğu belirlenmiştir (Demirci, 2015). Karbon elyafın diğer elyaflara göre yorulma direnci daha yüksek bir elyaf olduğunu göstermektedir. Yapılan diğer gerilme oranlarındaki yorulma deneyleri de ikinci bölgede yer almıştır.

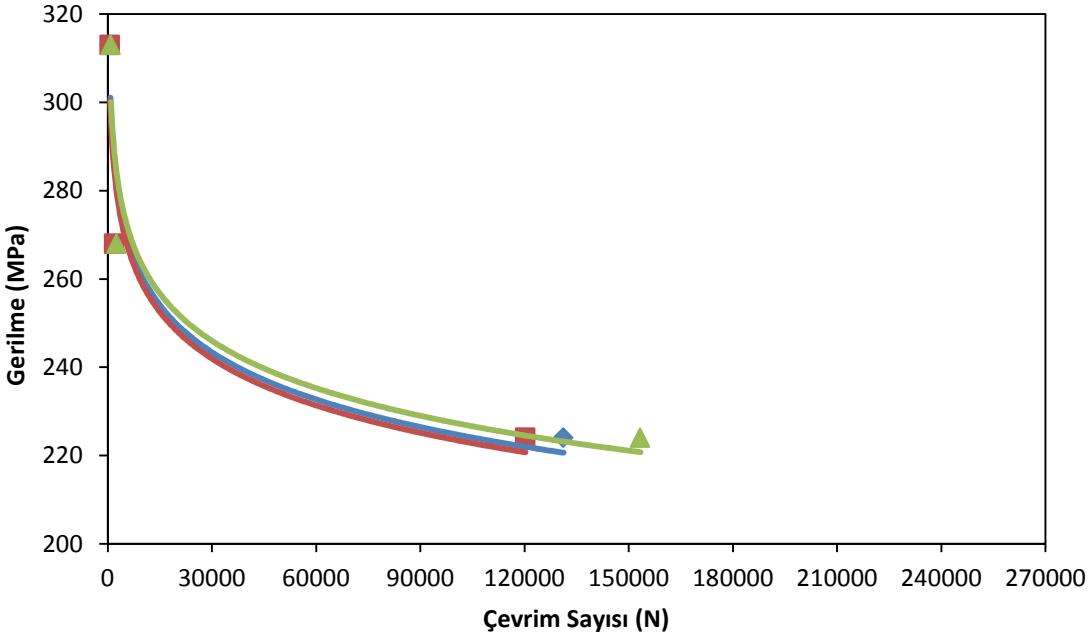
Şekil 4.9'de kontrol grubu olan ve nanoparçacık katkısız kompozit boruya ait S-N diyagramı verilmiştir. Herbir gerilme için yapılan deneyler sonucunda çevrim sayıları birbirine yakın olup üretimden kaynaklı olabilecek hataların kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermekle birlikte deney sonuçları da kendi içerisinde uyumluluk göstermiştir.



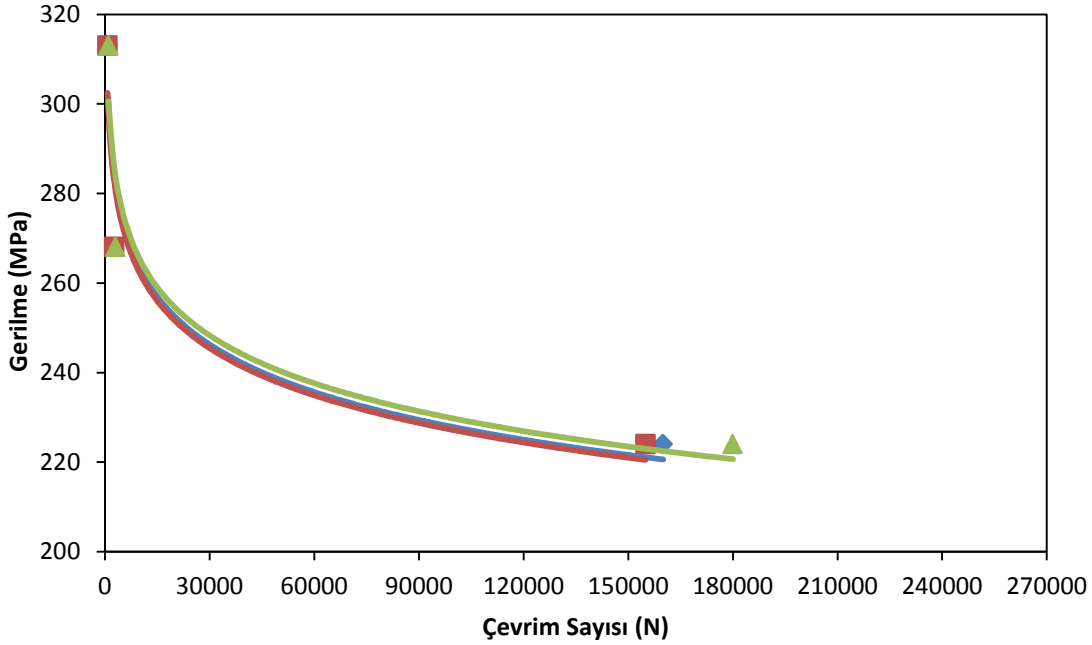
Şekil 4.9. Nanoparçacık katkısız kompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarının gerilme-çevrim grafiği

Şekil 4.10'da BNND katkılı nanokompozit boruların S-N diyagramı verilmiş olup deney tekrarlarını sonucunda çevrim sayıları herbir gerilme için üretimden ve özellikle nanoparçacıkların epoksi içerisinde dağılmamasında kaynaklı hataların en az düzeyde olduğu deney sonuçlarından anlaşılmaktadır. Şekil 4.11'da ÇCKNT katkılı nanokompozit boruların ve Şekil 4.12'de hibrit nanokompozit boruların S-N diyagramları sonucunda, BNND katkılı nanokompozit borularda elde edilen benzer

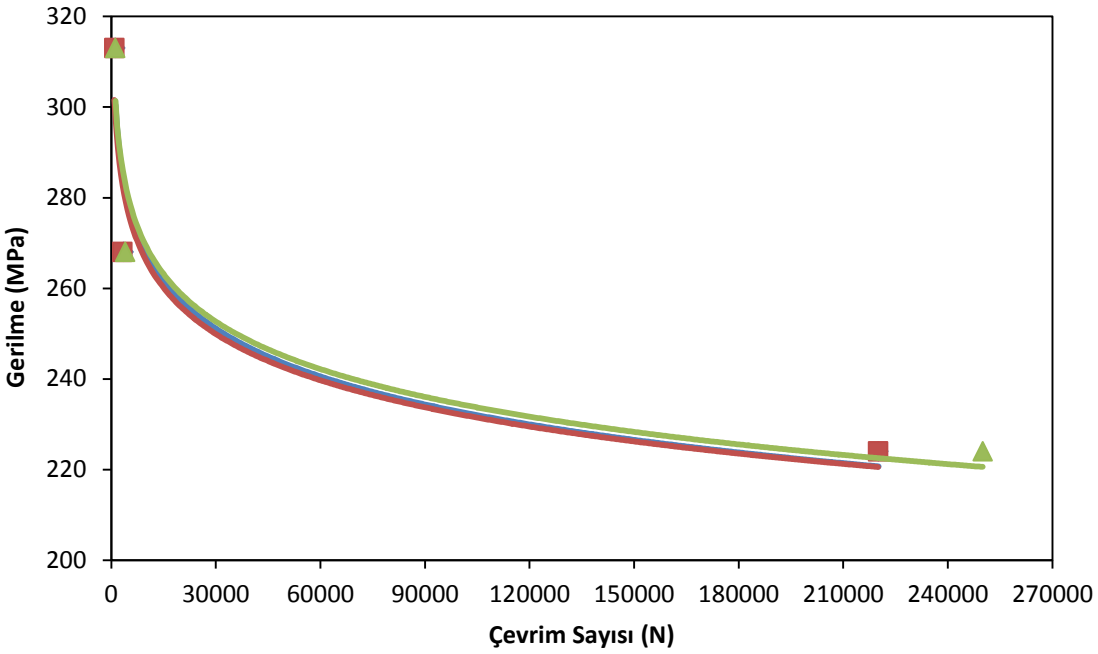
sonuçlar neticesinde hataların en az düzeyde olduğu anlaşılmıştır. Nanoparçacıkların yorulma ömrünü etkilediğinden dolayı epoksi reçine içerisinde homojen dağılması önemlidir. Aglomer olmuş nanoparçacıklar iç basınç altında yapılan yorulma deneylerinde malzemede çatlak etkisi yaratarak malzemenin beklenilenden daha çabuk yorulmasına ve sonuç hasarı oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.10. BNND katkılı nanokompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarının gerilme-çevrim grafiği



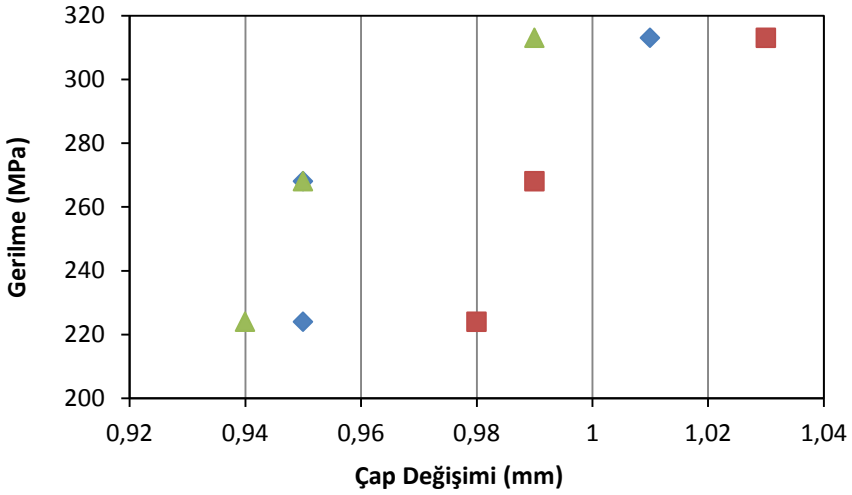
Şekil 4.11. ÇCKNT katkılı nanokompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarının gerilme-çevrim grafiği



Şekil 4.12. Hibrit nanokompozit boruların yorulma deney numunelerine ait sonuç hasarının gerilme-çevrim grafiği

4.4.2.1.Gerilmenin Kompozit Boruların Çapları Üzerine Etkisi

Nanoparçacık katkısız kompozit boruya üç farklı gerilme değerinde çap artışları Şekil 4.13'de verilmiştir. Herbir gerilme değerinde üç farklı katkısız kompozit borudan alınan ölçüm sonuçlarına göre en büyük gerilme değeri olan 313 MPa'da borularda yaklaşık olarak 1 mm artış gözlenirken, en düşük gerilme değeri olan 224 MPa'da 0,95 mm artış olduğu görülmüştür. Ölçümler, yorulma deney cihazında üst basınç değerlerinde borular çap ölçümü alınana kadar sabit tutularak yapılmıştır. Yorulma deneylerinde nanokompozit borularda boyca kısalma meydana gelirken çapında önemli derecede artış olmaktadır. Gerçekleştirilen deneylerde boru önemli ölçüde şekil değiştirmesini açık uçlu olarak deneylerin yapılması ve nanokompozit borunun test aparatı içerisinde rahatça hareket etmesinde kaynaklanmaktadır.

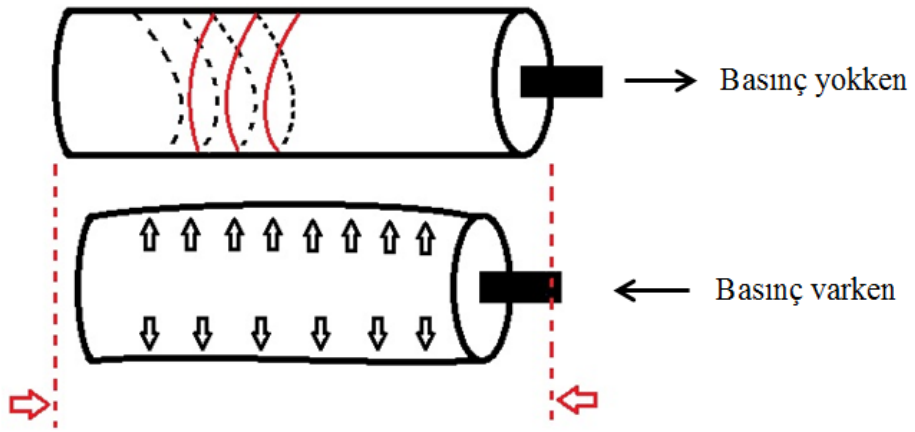


Şekil 4.13. Nanoparçacık katkısız kompozit borunun iç basınç altında yorulma deneyinde gerilme çap artış grafiği

4.5.Kompozit Boruların Hasar Analizi

4.5.1. Patlatma Hasar Analizi

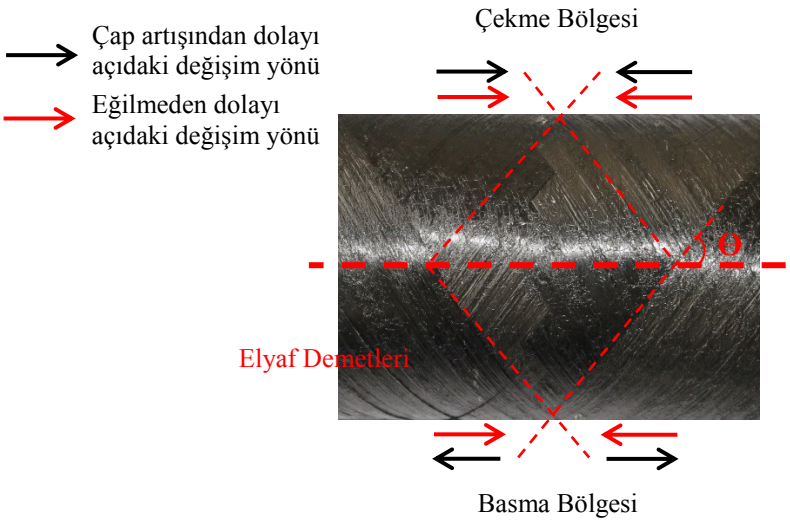
İç basınç altında kompozit borularda yapılan açık uçlu deneyler sonucunda kompozit boruların boyunda azalma, çapında artış meydana gelmektedir. Bu da kompozit borunun eğilmesine ve şişmesine sebep olmaktadır(Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Nanokompozit borunun iç basınç altındayken şekil değişiminin şematik görünümü

Borunun basınç altında çapının artması sonucunda ±55° elyaf sarım açısında artışlar meydana gelmektedir. Ayrıca boruda meydana gelen eğilmeden dolayı bir yüzeyinde çekme diğer yüzeyinde ise basma bölgesi oluşmaktadır(Şekil 4.15). Kompozit borunun eğilmesinde kaynaklı, çekme bölgesindeki borunun, çapının artması ve elyaflar arasındaki açının artması sonucunda elyaflar arasındaki kayma hareketi

sınırlanacağından dolayı hasar başlangıcı ve gelişimi geçikecektir. Basma bölgesinde ise elyaflar arasındaki açılarda küçülme ve çapın artışından dolayı açıların büyüme isteği elyafların hareketini artıracağından hasarlar bu bölgelerde başlayacak ve gelişecektir. İlk hasarın başlaması ve iç basınçın artması ile kompozit boru bu yüksek gerilmeye dayanamayıp patlama ile sonuç hasarı oluşmaktadır. Sonuç hasarı elyaf kırılması şeklinde görülmektedir.



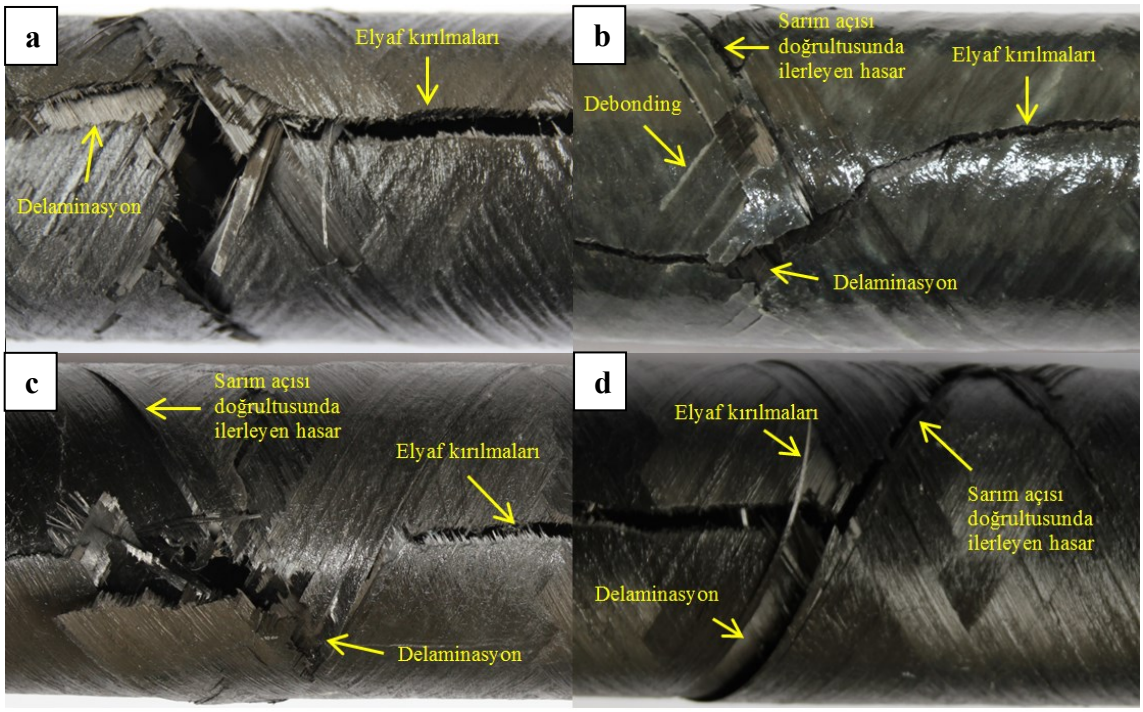
Şekil 4.15. Basınç altındaki nanokompozit borunun elyaf açısındaki değişimleri

Nanomalzeme eklenmemiş ve ilave edilmiş boruların statik patlatma testleri sonucunda hasarlanan boruların görüntüleri Şekil 4.16'de verilmiştir. Saf kompozit borularda sonuç hasarı sızıntının başladığı yerde büyüyerek oldukça büyük hasar bölgesi oluşturacak şekilde elyaf sarım açısı doğrultusunda ve eksenel yönde boruyu yararak devam etmiştir. Elyaf sarım açısı yönünde çatlağın veya hasarın gitmesinin sebebi elyaf-matriks ara yüzey açılmasının etkin olmasından dolayıdır. Hasarın eksenel yönde yarık şeklinde devam etmesinin sebebi ise teğetsel yöndeki gerilmenin büyüklüğünden dolayı olmuştur. Sonuç hasarı oluşmadan önce kompozit borunun çapı büyümüş aynı zamanda boruda eğilme olmuştur.

Nanoparçacık katkılı borularda epoksi içerisine katılan nanoparçacıklar matriksin mekanik özelliklerinde önemli derecede iyileştirmeler sağlar (Ulus, 2014). KNT'ler özellikle kompozitlerin kayma gerilmesini etkilidirler. Matriks içerisine katılan ÇCKNT'ler kompozitin kayma gerilmelerini artıracağından, borularda oluşan kayma deformasyonlarına karşı direnci artırır. Bundan dolayı ÇCKNT katkılı boruların patlama mukavemeti artmıştır. Hasar oluşumu, gelişimi ve sonucu saf boruya göre, ÇCKNT

katkılı borularda hasar, elyaf kırılma hasarları daha az iken nanoparçacık katkısız borularda elyaf kırılmaları dallanarak büyüdüğü görülmüştür.

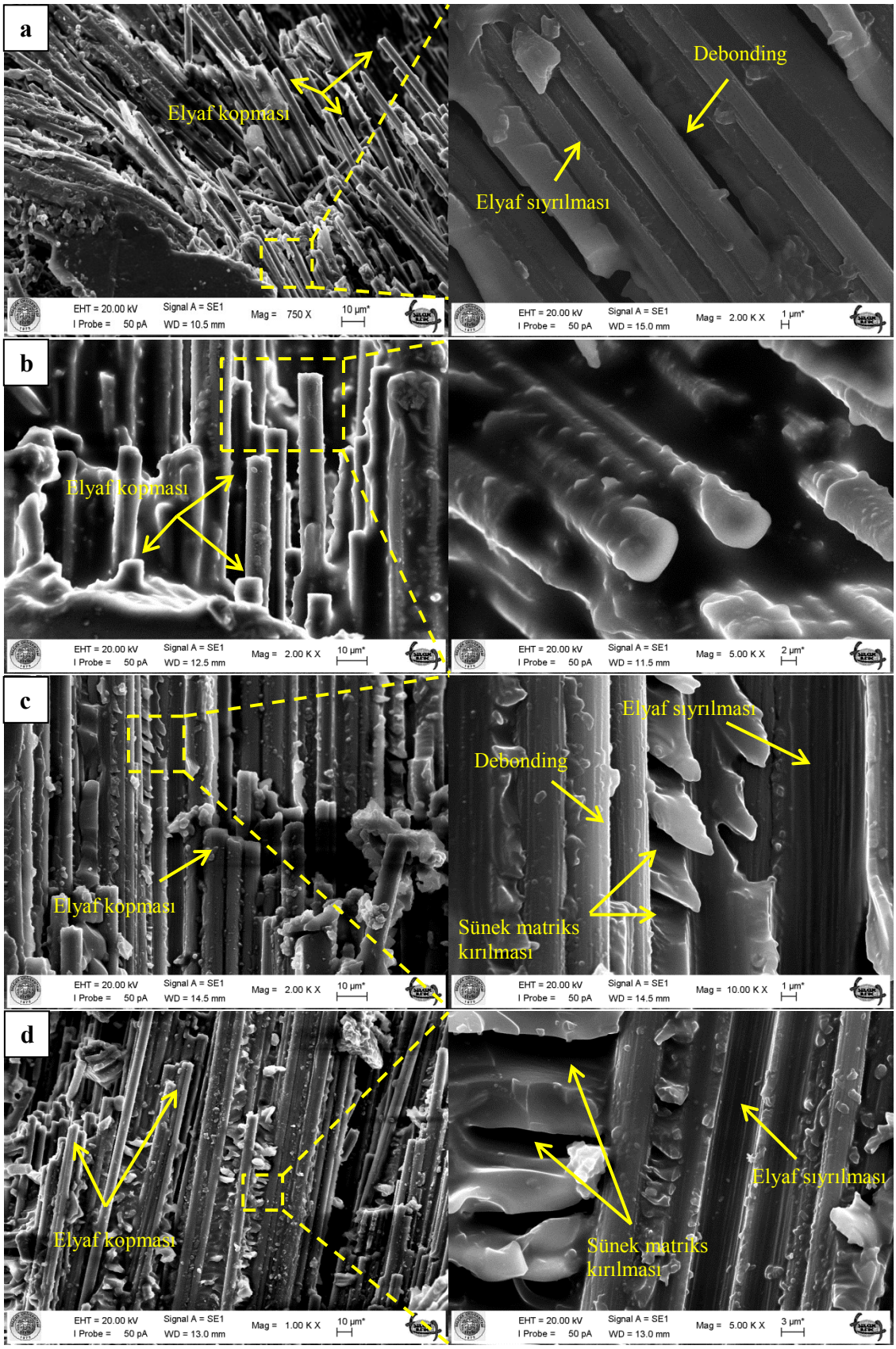
Teğetsel gerilmeler, ilk hasarla birlikte çatlak başlangıcı oluşmaktadır. Daha sonra çatlak elyaf sarım açısı ve boru ekseni doğrultusuna yönelir. Çünkü elyaflar arasında boşluk oluşacağından bu yönde çatlağın dönmesi normaldir. Diğer taraftan teğetsel gerilmede boruyu uzunluğu boyunca ikiye ayırmaya çalışır. Bu yönde büyük bir kuvvet oluşur. Ilk hasar çatlağının boru boyunca yönlenmesini sağlar. Böylece boru ekseni boyunca devam eder ve yönlenir. Elyaf takviyesi yönünde devam etmesinin sebebi ise teğetsel yönündeki kuvvetlerle elyafların kopma mukavemeti geçmesinden dolayıdır. Hibrit kompozitte nanoparçacık katkısıyla teğetsel yöndeki borunun direnci elyaf takviyesi yönündeki kayma gerilmesinden büyük olduğundan çatlak ilerlemesi elyaf takviyesi doğrultusunda olmuştur.



Şekil 4.16. Nanokompozit boruların iç basınç altında patlatma sonucu hasar görüntüleri a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ÇCKNT ve d)Hibrit

Şekil 4.17 incelendiğinde katkısız ve nanoparçacık katılmış numunelerin patlatıldıktan sonraki hasarlı yüzeyin SEM fotoğrafları görülmektedir. Katkısız kompozit boruda karbon elyafların kopmadan önce elyafların bazıları sıyrılarak koptuğu görülmektedir Kırılma hasarları daha saçaksı görüntü halinde iken katkılarda daha az olduğu görülmektedir. Bu görüntülerde elyafları katkısız boruların kırılma hasarında

matriks malzemeden sıyrılarak saçaksı görüntü aldığı katkılı borularda elyaf kırılmaları matriks ile beraber meydana geldiği ve saçaksı görüntünün azaldığı gözlenmiştir. Buradan nanoparçacık matriks ve elyaf arasında iyi bir ara yüzey sağladığı, adezyonu artırdığı ve kırılmanın daha sünek ve matriks ile gerçekleştiği statik patlatma sonuçlarındanda görülmüştür. Patlatma sonrası yüzey incelendiğinde ara ara tabaka ayrılması olduğu görülmektedir. Benzer hasarların BNND takviyeli numunelerde de görülmekte ve tabaka ayrılmasının yani sıra elyaf kopmaları olmuştur. Epoksi reçine içerisine ÇCKNT katılmış boru numunelerin hasar analizine bakıldığında hasar elyaf-matriks ara yüzey ayrılması, tabaka ayrılması, elyaf sıyrılması ve kopması özelliklerini görmekteyiz. Kompozitte tipik hasar özelliği bütün numunelerde gözlenmiştir. Hibrit nanokopozit boru numunesi incelendiğinde benzer hasar analizi burada da görülmektedir. Ara ara karbon elyfaların her iki uçtanda koptuğuna rastanılmıştır ve bir kırpılmış elyaf şekline dönüşmüştür. Bunun sebebi matriks ile elyafın aralarında iyi bir bağ oluşturmasındandır. Katkılı nanokompozit borularda elyaf yüzeylerinin pürüzlü olması matriks malzeme ile arayüzeylerde mekanik kitlitlenmelerin olmasından dolayıdır. Bu mekanik kilitlenmeler, saf borudaki elyaflara kıyasla arayüzeyde daha iyi bir adezyon sağlamakta ve adezyon dayanımını artırmaktadır (Wei, 2011). Özgül yüzey alanı yüksek olan nanoparçacıklar elyaf ile matriks arayüzeylerinde alanı artırarak daha pürüzlü hale getirmekle birlikte mekanik kilitlenmeler çoğalmakta ve iyi bir arayüzey bağlantısı sağlayarak hem matriks hasarlarının oluşumunu geciktirmekte hemde oluşan teğetsel gerilmeleri artırmaktadır.



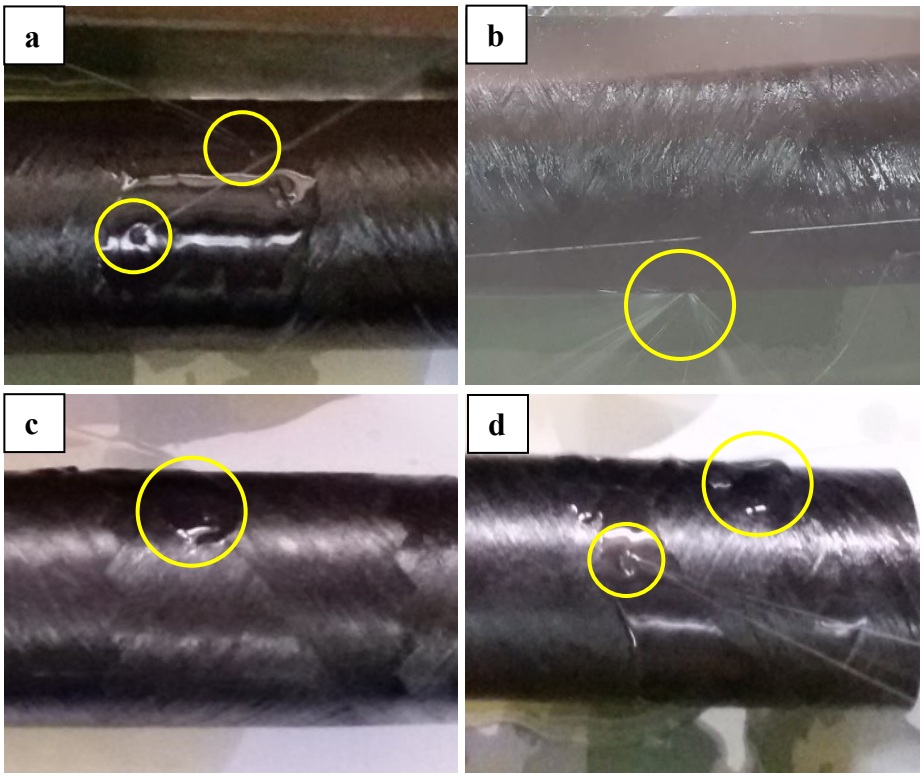
Şekil 4.17. Statik patlatma sonucunda oluşan hasar yüzeylerin SEM fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit

4.5.2. Yorulma Hasar Analizi

Nanokompozit borularda iç basınç altında yapılan yorulma deneylerinde statik patlatmada yapılan benzer hasar analizleri bu deneyler sonucunda da görmekteyiz. Özellikle kompozit borularda yorulma hasarının başalangıçı matriks çatlakları ile oluşmaktadır. Bu mikro çatlaklar zaman içerisinde makro çatlaklar ve elyaf kırılmalarına doğru ilerlemektedir. Nanomalzemelerin epoksi matriks içerisine ilavesi, çatlak önünde tutma, çatlak ucunda körelme, çatlak doğrultusunda sapmalar ve dallanmalar kırılma tokluğunu artırmada en önemli mekanizmalar olduğu düşünülmektedir. SiO_2 nanoparçacığın epoksi içerisine katılması ile oluşan çatlakları tutmuşlardır (Zhang, 2006; Deng, 2007). Nanoparçacığın önünde tutulan bu çatlakların yönlenmesine veya ikincil bir çatlak oluşturarak ilerlemesine sebep olmaktadırlar (Hsieh, 2010; Wetzel, 2006). SiO_2 nanoparçacığın çatlaklardaki bu etkiler sonucunda matrikse yük transferi, kırılma tokluğunda artış sağlandığı ve oluşan kırılmaların sünek gerçekleştiğini bilinmektedir (Deng, 2007; Han, 2006). Aynı benzer sonuçlar KNT takviyeli kompozit borularda, KNT'ler oluşan hasarın geciktirilmesinde ve yorulma sonucunda oluşan hasar, malzemenin sünek bir biçimde kırılması ile sonuçlandığını göstermektedir (Jia, 2014; Knoll, 2014). Bu da kompozit boruların yorulma ömürlerinde artış sağlayarak malzemenin daha geç çevrim sayılarında hasarlanmasına sebep olmaktadır. Bu da bize nanomalzeme ile takviye edilmiş matrikste, çatlak başlangıçları ile mikro ve nano boyutta olan matriks çatlak oluşumunu geciktirmekte ve oluşan çatlakların yönlenmesi sağlanmaktadır. Nanomalzeme katkılı ve katkısız iki benzer malzemenin yorulma ömürlerindeki farklar belirgin bir şekilde görülmektedir. Matrikste oluşan çatlakların nanoparçacıkların etkisi ile yönlendiği, tutulduğu ve oluşan matriks hasarı bu etkiler ile geciktirilmektedir. Matriks hasarının gecikmesi sonucunda malzemenin yorulma ömründe artış olmakta, oluşan sonuç hasarında ise sünek kırılmalar belirginleşmektedir. Nanodolgu ile tokluğu arttırılmış matriks, matriks çatlak oluşumunu ve gelişimini geciktirerek kayma ve matriks elyaf arayüzey dayanımını ve delaminasyon hasar oluşum direncini artırmada en önemli faktörlerden biridir (Wolodko, 1999).

Şekil 4.18'da nanokompozit boruların yorulma sonucunda oluşan hasarlar görülmektedir. Epoksi reçine ile yapılan çalışmalarda BBND ve ÇCKNT katkısı ile polimerik kompozitler daha yüksek şekil değişimler elde edilirken malzeme daha sünek bir davranış sergilemektedir (Ulus, 2014). Yorulma sonrasında nanokompozit borularda oluşan hasar sızıntı şeklindedir. Saf boruda yorulma sonrasında 2 farklı noktadan sonuç

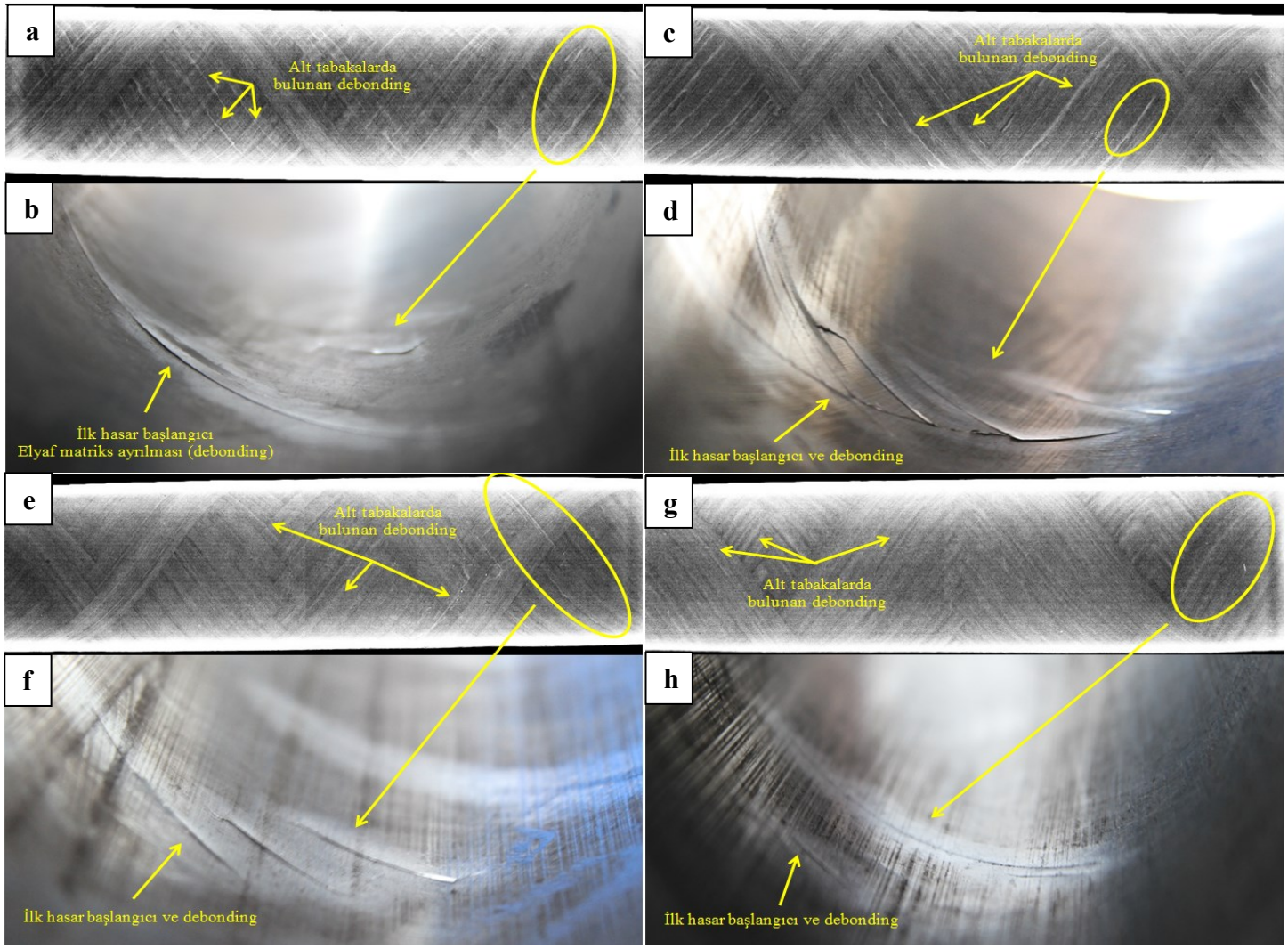
hasarına rastlanılmıştır. Son hasarda sızıntı miktarı fazla olduğundan dolayı malzeme nanoparçacık katkısızlara göre gevrek bir özellik segilemiştir. BNND katkılı borularda son hasar saf borudaki gibi sızıntı şeklindedir. Sızıntı şeklinde olmasını BNND'lerin iki boyutlu yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yapının iki boyutlu olması elyaf matriks arayüzey bağlantısını artırırken diğer yandan disk şeklinde olmaları ÇCKNT'e göre çatlak etkisi hızlandırmaktadır. Bir boyutlu olan ÇCKNT'ler nanokompozit borulara ilave edildiğinde son hasar terleme şeklinde olup tek bir noktada oluşmaktadır. Epoksi reçine modifiye edildiğinden dolayı elyaf matriks ayrılmaları en az düzeyde ve daha sünek bir özellik sergileyerek sızıntı oluşumu en az düzeyde kalmıştır. Fakat nanokompozit boruya hem BNND hemde ÇCKNT ilave edildiği zaman sızıntı ve terleme aynı anda görülmektedir. Bunun sebebi ise nanoparçacıkların farklı yapılarda olmaları sonucunda, malzeme içerisinde farklı hasarlar oluşturmalarıdır.



Şekil 4.18. Nanokompozit borularda yorulma sonrasında oluşan sızıntı a)Saf b) %0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit

Nanokompozit borulara iç yüzeyinden çekilen fotoğraflar ile bu borulara ait X-Ray görüntüleri Şekil 4.19'de verilmiştir. Boruların iç yüzeyinden çekilen fotoğraflarda tekrarlı gerilmeler altında son hasarın başlangıcı görülmektedir. Bu hasar başlangıçları elyaf doğrultusunda olup elyaf matriks arayüzey ayrılmaları sonucunda meydana

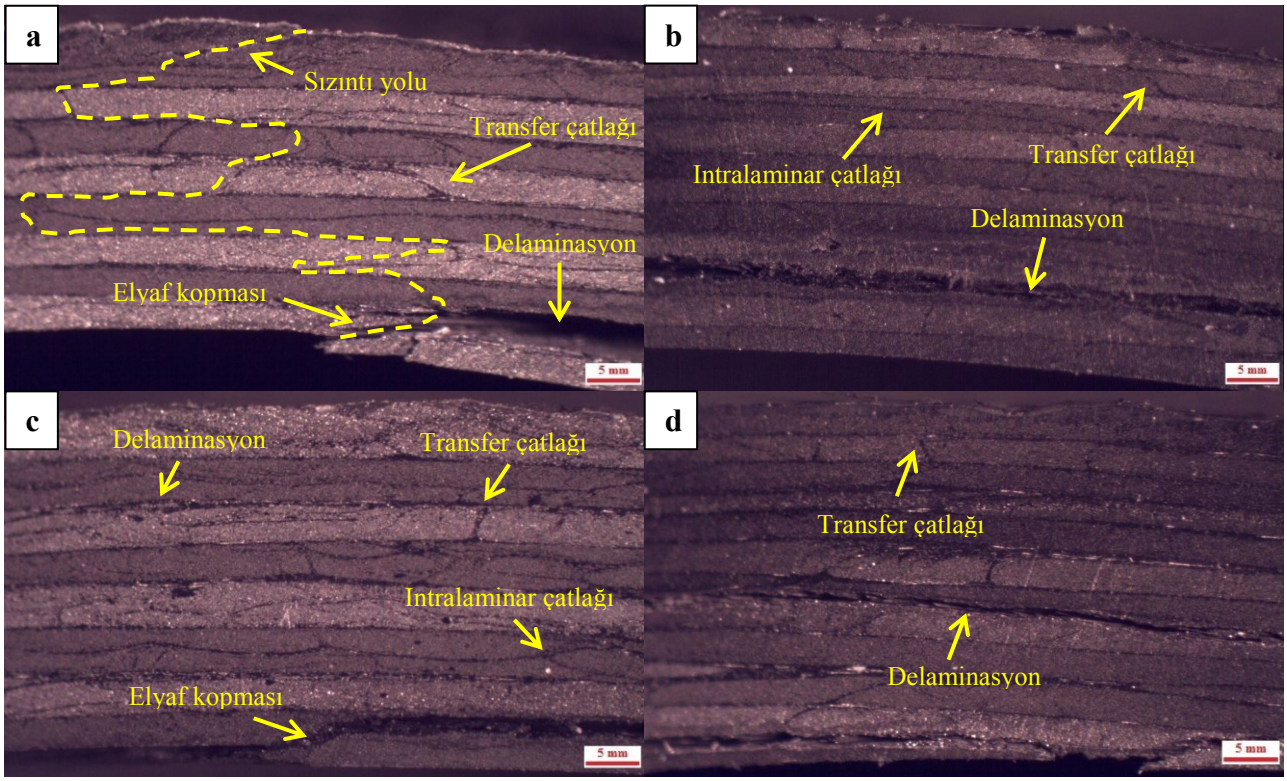
gelmiştir. X-Ray görüntülerinde hasarın başlangıç noktaları kılcal şekilde beyaz görüntü oluşmuştur. Bunun sebebi de çatlaklar olan bölgelerde boşluklar oluştuğundan dolayıdır. Farklı tabaka katmanlarında oluşan debondingler X-Ray görüntülerinde belirligin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi ise x-ışınlarının nanokompozit boru içerisinden geçmesi ve bu şekilde görüntü almamızdır. Elyaf yönünde oluşan debondingler bütün nanokompozit borularda görülmekte iken saf ve BNND katkılı borularda daha fazla görülmüştür. Bunun nedenini saf boruda elyaf matriks arayüzey bağlantısının zayıflığından kaynaklanmaktadır. ÇCKNT nanodolgusu ile elyaf matriks arayüzey bağlantısının arttığını ve sünek bir yapı sergilediğini göstermektedir. Hibrit boruda debondinglerin iyice azalmış olup diğer tabakalarda da hasar miktarının daha az olduğu görülmektedir.



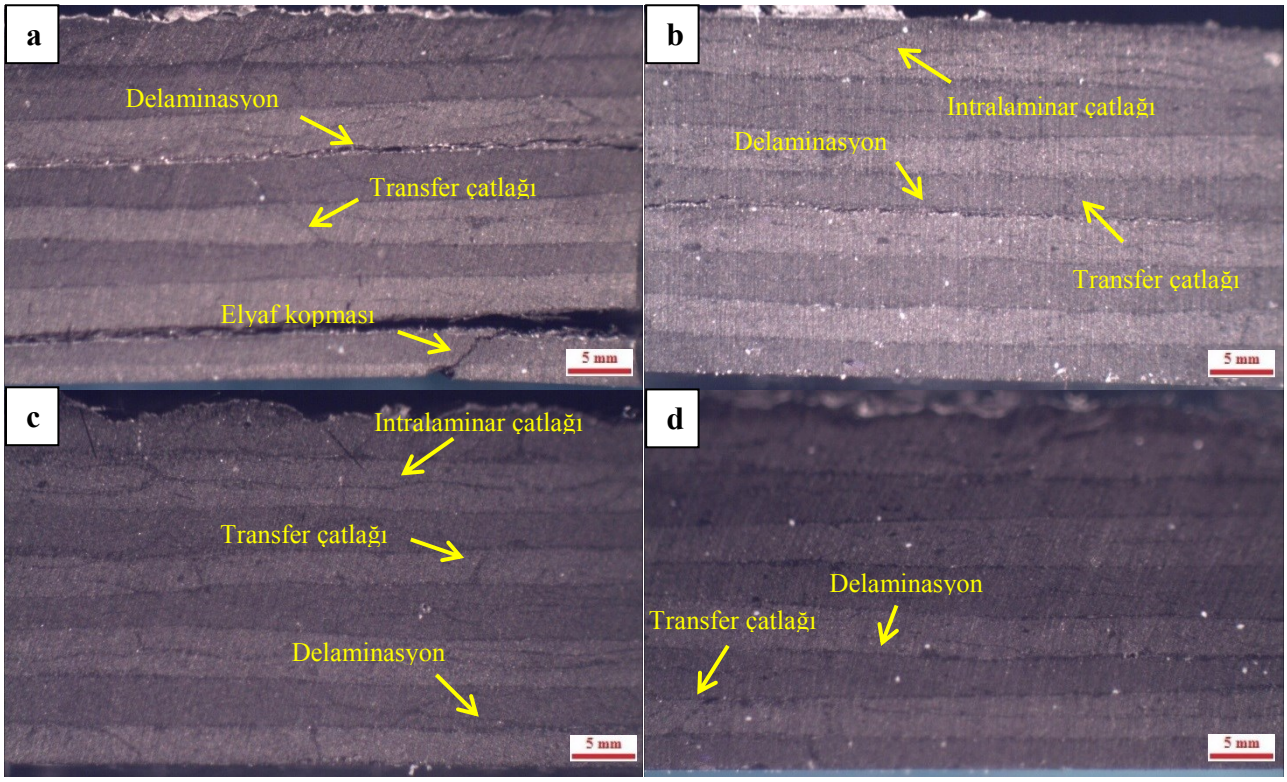
Şekil 4.19. Kompozit boruların iç yüzey fotoğrafları[b,d,f,h] ve X-Ray görüntüleri[a,c,e,g], Saf[a,b], %0,5 ag BNND[c,d], %0,3 ÇCKNT[e,f] ve Hibrit[g,h]

4.5.2.1. $0,7\sigma_{statik}$ Gerilme Oranında İç Basınç Altında Hasar Analizi

313 MPa iç basınç altında yapılan yorulma deneylerinden sonra oluşan hasar görüntüleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir. Optik mikroskopta numunelerin enine ve yan kesitinden 20X büyütme yapılarak alınan görüntülerde tabakalar ve sonuç hasarları görülmektedir. Tabakalar ±55° sarım açısına sahip olduğundan herbir tabaka birbirinden kolay bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Yüksek gerilmede yapılan deneyler sonucunda 4 farklı grup içinde elyaf matriks ayrılması ile ilk hasar başlamaktadır. Dört farklı grupta da yüksek gerilmeden dolayı benzer hasar şekilleri görülmektedir. İlk hasar başlangıcı olarak elyaf matriks ayrılmasını ve tabaka ayrılması daha sonra sırasıyla elyaf-matriks ara yüzey ayrılması, delaminasyon ve eksene dik elyaf kırılmaları şeklinde oluşmuştur. Nanomalzeme katkısı ile Şekil 4.20 b, c ve d'de elyaf-matriks ara yüzey çatlaklarında yönlemeler, çatlakların dallanması mevcuttur. Buradan nanoparçacık ilave edilmesi yorulma hasar mekanizmasının değiştiğini ve yorulma ömrünü etkilediği ortaya çıkmaktadır. Sonuç hasarın elyaf-matriks ara yüzey çatlakları neticesinde yağ sızıntısı şeklinde olması Şekil4.20 a ve c'de görülmektedir.



Şekil 4.20. Nanokompozit boru numunelerinin 313 MPa gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan enine kesit hasar bölgelerin optik mikroskop fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit



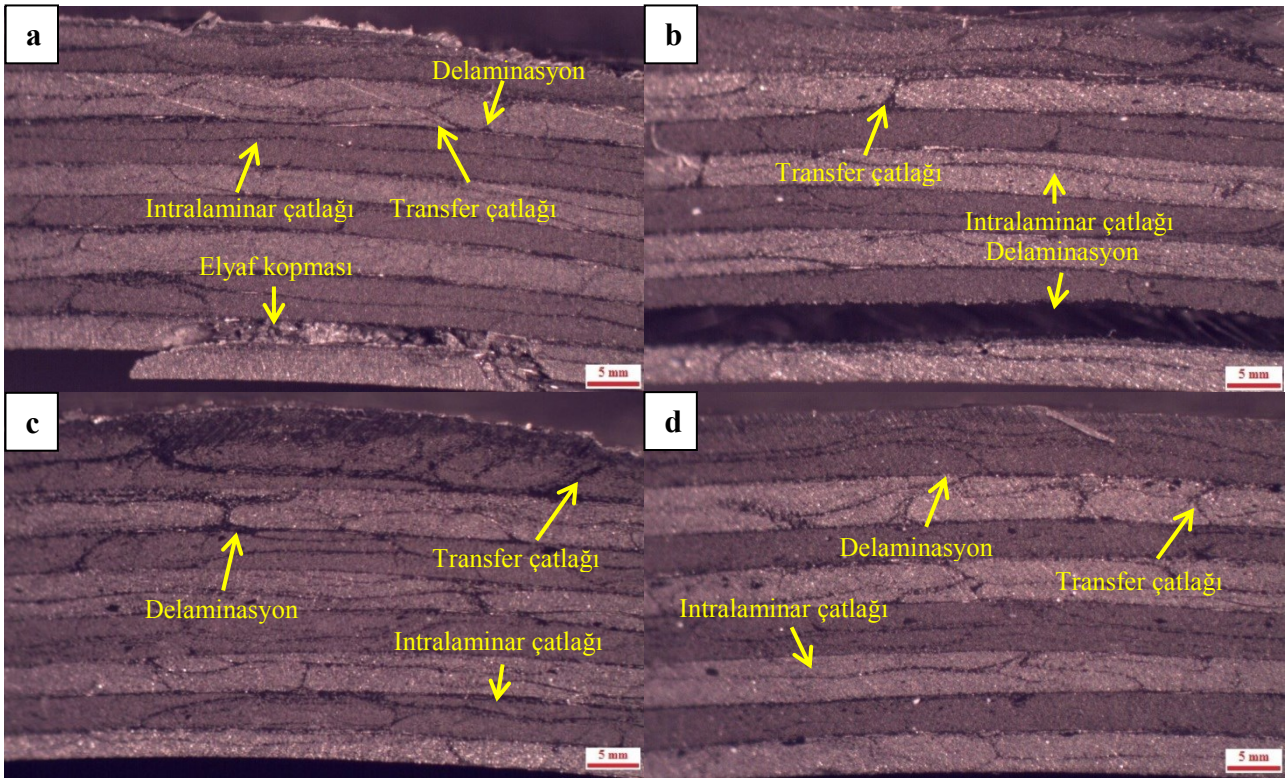
Şekil 4.21. Nanokompozit boru numunelerinin 313 MPa gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan yan kesit hasar bölgelerin optik mikroskop fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit

4.5.2.2. 0,6σ_{statik} Gerilme Oranında İç Basınç Altında Hasar Analizi

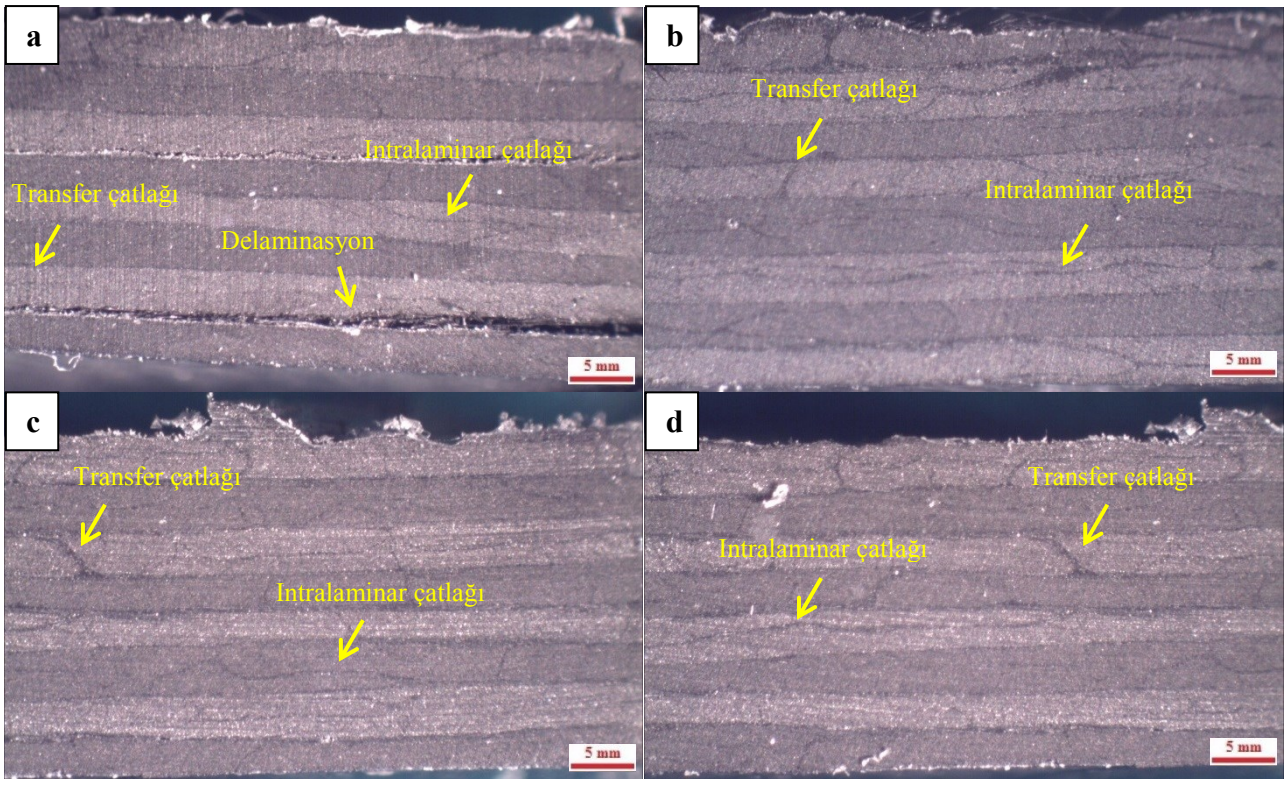
Diğer yüksek bir gerilme olan 268 MPa'lık iç basınç altında yorulma deneyi sonuç hasarının mikroskop görünüleri Şekil 4.22'de verilmiştir. 313 MPa'lık basınç altında yapılan yorulma deneylerine benzer sonuç hasarları burada da oluşmuştur. Şekil 4.22 a ve b'de katkısız ve BNND katkılı kompozit borularda benzer hasar şekileri oluşmuştur ve ilk hasar başlangıcı elyaf kırılmaları sonucunda tabaka ayrılmaları şeklinde olup sırasıyla üst tabakalara ilerlemiştir. Çatlaklar üst tabakalara ilerlerken elyaf-matriks ara yüzey, delaminasyon ve eksene dik elyaf kırılmalarını meydana getirmiştir.

ÇCKNT katkılı nanokompozit boruda, BNND katkılı boruya göre ilk hasar başlangıcı farklı olup eksene dik şekilde elyaf kırılması ile başlamakta olup tabaka ayrılması görülmemektedir. Bunun sebebi ise epoksi reçineyi ÇCKNT ile modifiye edip tabakalar arası bağlantının daha kuvvetli olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde hibrit kompozitte de tabaka ayrılması görülmemekte iken elyaf-matriks ara yüzey çatlakların dallanması, yön değiştirmesi ve delaminasyonlar da mevcuttur. Bu iki nanokompozit boruda tabaka ayrılmasının olmaması tek boyutlu yapısı ile ÇCKNT'den

kaynaklandığı ve iki boyutlu BNND yapısının tabakalar arası bağlantı da yeteri kadar kuvvetli olmamasından dolayıdır.



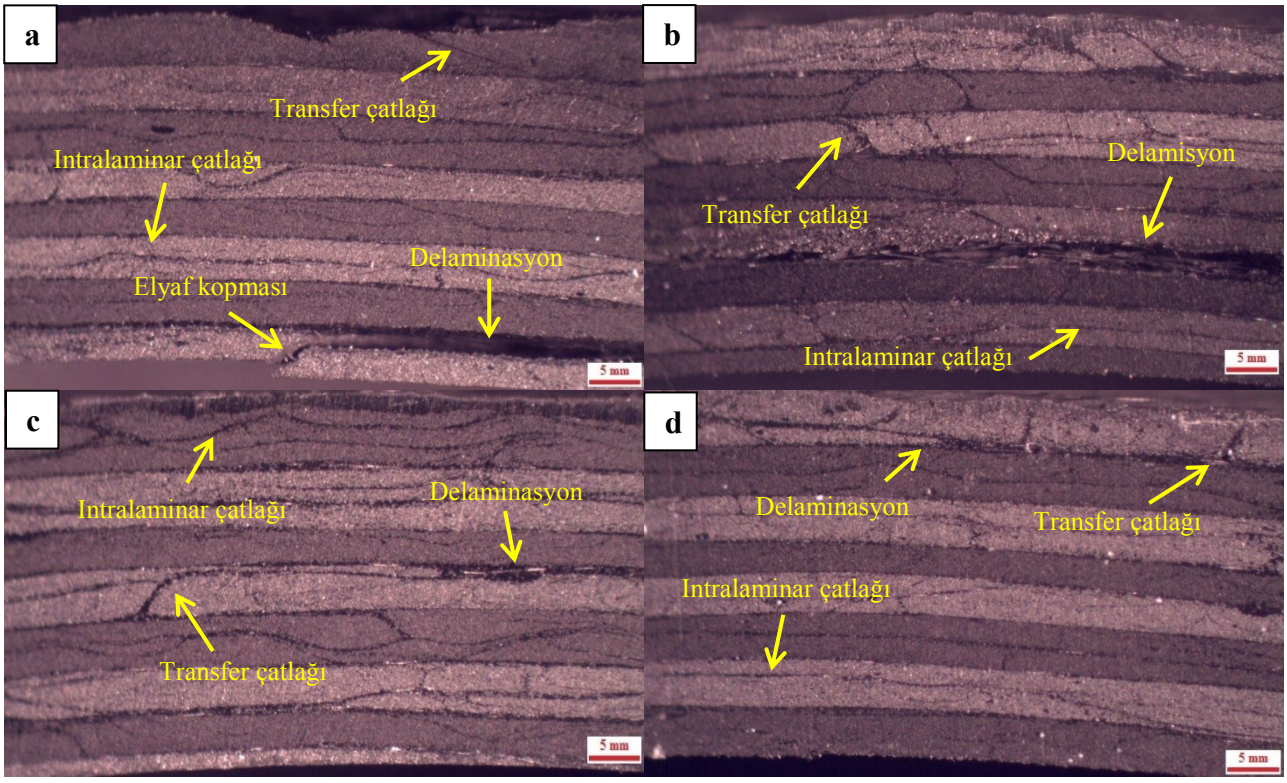
Şekil 4.22. Nanokompozit boru numunelerinin 268 MPa gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan enine kesit hasar bölgelerin optik mikroskop fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit



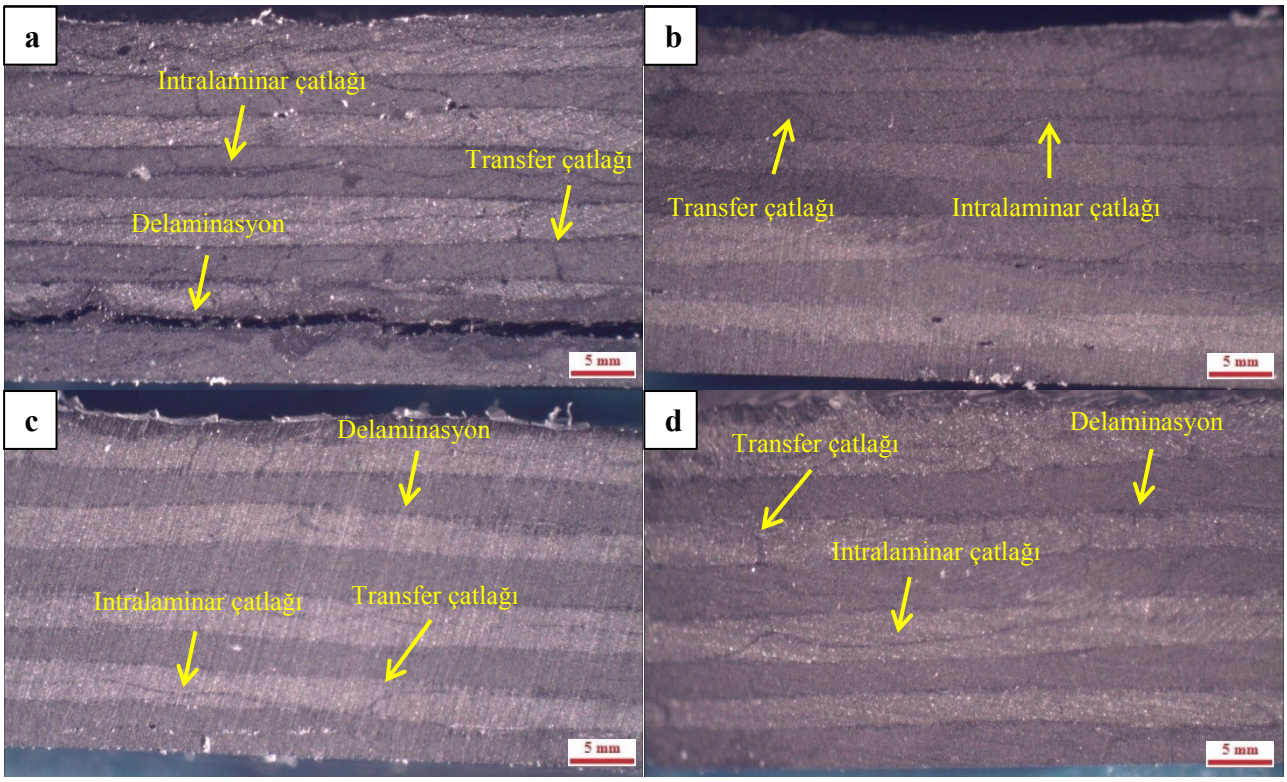
Şekil 4.23. Nanokompozit boru numunelerinin 268 MPa gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan yan kesit hasar bölgelerin optik mikroskop fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit

4.5.2.3. $0{,}5\sigma_{statik}$ Gerilme Oranında İç Basınç Altında Hasar Analizi

İç basınç altında yapılan yorulma deneylerinde düşük gerilme olarak sayılan yorulma deney numunelerinin mikroskop görüntüleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Aynı basınç altında yapılan deneylerde verilen görüntüler sırasıyla, katkısız, BNND katkılı, ÇCKNT katkılı ve hibrit boruya aittirler. Katkısız ve BNND katkılı boruda tabakalar arası ayrılma mevcut iken ÇCKNT ve hibrit boru bu hasar çeşidi görülmemektedir. Fakat diğer yorulma hasar çeşitleri mevcuttur. Şekil 4.24c'de ÇCKNT katkılı nanokompozit boruda özellikle elyaf-matriks ara yüzey çatlakları yoğun bir biçimde yönlenmeleri ve dallanmaları ÇCKNT'nın etkisi ile meydana gelmiştir. Çatlak ilerlerken, çatlağın ÇCKNT ile karşılaşması çatlağın yön değiştirmesine sebep olurken, BNND ilavesi çatlakların bu kadar fazla yön değiştirmesine ve dallanmasına etki etmemektedir. Bunun sebebi olarak da ÇCKNT ve BNND'lerin farklı yapılarda ve mukavemet özelliklerin farklı olmasından dolayıdır.

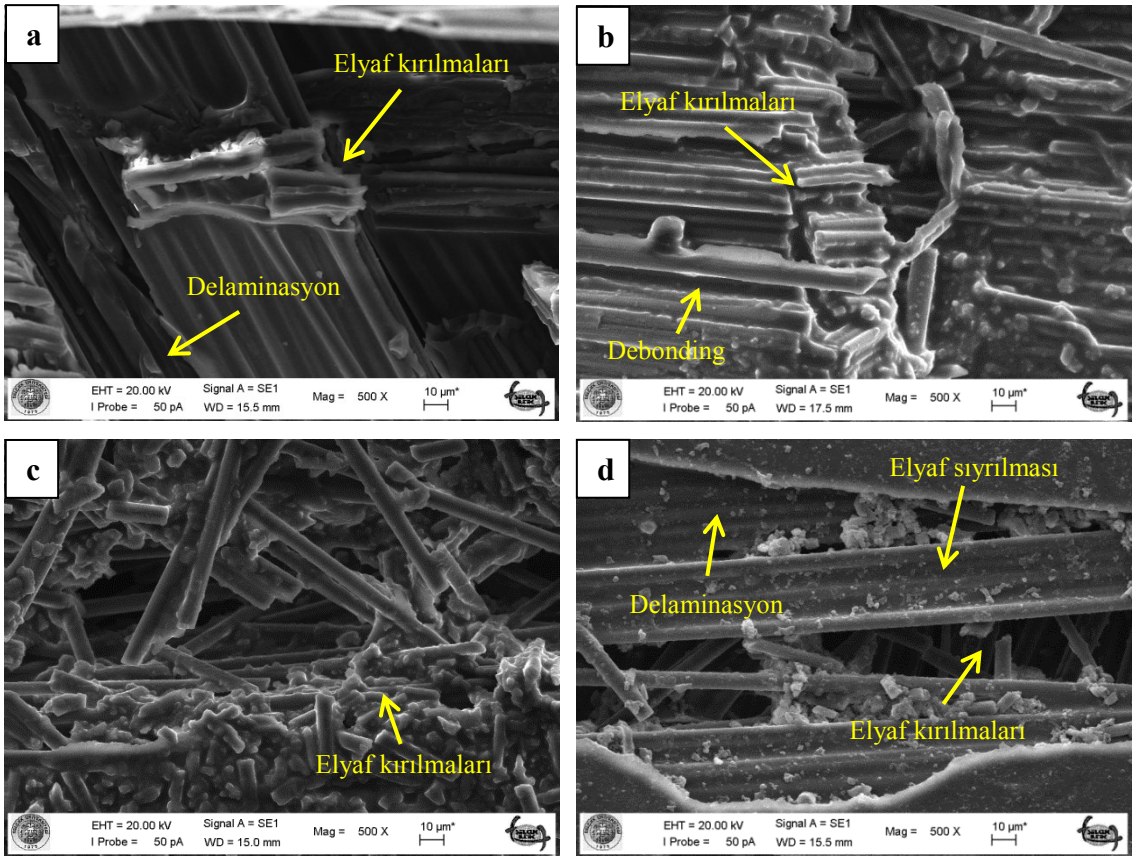


Şekil 4.24. Nanokompozit boru numunelerinin 224 MPa gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan enine kesit hasar bölgelerin optik mikroskop fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit



Şekil 4.25. Nanokompozit boru numunelerinin 224 MPa gerilme değerinde yorulma sonrası oluşan yan kesit hasar bölgelerin optik mikroskop fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit

Şekil 4.26'da nanokompozit boruların iç yüzeylerinden, hasar başlangıç noktalarından alınan SEM fotoğrafları mevcuttur. Hasar başlangıcına ait 500X büyütmeli fotoğraflarda gerilmenin etkisi ile elyaf kırılmaları ve delaminasyonlar görülmektedir. Gerilme tekrarlı olması elyafların yoğun bir biçimde kırılmasına sebep olmaktadır. Çünkü yorulma deneylerinde borularda ilk hasar başlangıcı tek bir noktadan olup tabakalar arasından ilerleyip farklı iki üç noktadan sonuç hasarı ile bitmektedir. Saf kompozit boruda elyaf sıyrılmaları olup Şekil 4.26'da bu noktalarda elyaf boşlukları olduğu görülmektedir. Nanoparçacık katkılı borularda ise sıyrılmanın olmadığı elyaflar üzerinde yoğun bir biçimde epoksi reçinenin bulunduğu SEM fotoğraflarından görülmektedir. Bu da nanoparçacık katkısıyla elyaf matriks ara yüzey bağlantısının arttığının bir göstergesidir.



Şekil 4.26. Nanokompozit boru numunelerin hasar başlangıç bölgelerine ait SEM fotoğrafları a)Saf b)%0,5 ag BNND c)%0,3 ag ÇCKNT d)Hibrit

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1.Sonuçlar

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada öncelikle epoksi reçine içerisindeki nanoparçacıkların karakterizasyonu yapılmıştır. Bu karakterizasyon için SEM ve TGA analiz teknikleri kullanılmıştır.

- Epoksi içerisine katılan nanoparçacıkların SEM fotoğraflarından BNND ve ÇCKNT'nin yapıları ve boyutların görülebilmektedir.
- Epoksi reçine içerisine nanoparçacıkların katılması ile yapılan karışım sürelerinin yeteri kadar olduğu ve epoksi içerisinde homojen olarak dağıldığı sonucuna varılmıştır. Fakat karışım süresinin biraz daha arttılması gerekmektedir.
- TGA analizi ile nanoparçacıklar epoksi reçinenin bozulma sıcaklığını arttırdığı ortaya çıkmıştır. Yorulma sırasında oluşan sıcaklığın matriksi daha az düzeyde etkilediği sonucuna varabiliriz.

Yapılan bu çalışmanın ikinci aşmasında ise filaman sarım yöntemi ile nanokompozit boruların üretimi ve mekanik testlerin yapılmasıdır. Mekanik testler iç basınç altında yapılıp, statik patlatma ve yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda oluşan hasarların yorumlanabilmesi için optik mikroskop ve SEM görütüleri alınıp hasar mekanizmaları incelenmiştir.

- Kompozit boruda elyaf hacim oranı belirlenmiş, Arşimed Metodu kullanılarak %55 olarak bulunmuştur.
- Dört farklı grupta üretilen nanokompozit boruların iç basınç altında patlatma deneyleri gerçekleştirilmiş olup nanomalzemelerin etkisi ile statik patlatma gerilmelerinde artış sağlanmıştır.
- Nanoparçacık katkısız boruda 410 MPa'lık bir gerilme sonucunda hasarlanmasına karşın nanoparçacıkların etkisiyle %5 ile %17 arasında bir artış sağlanmıştır.
- İç basınç etkisi altındayken kompozit borunun çap artış değeri ölçülmüş ve yaklaşık olarak 1 mm'lik bir çap artışı olmuş ve boyca kısalma meydana gelmiştir.
- İç basınç altında yapılan patlatma deneyleri sonucunda tipik kompozit malzeme hasarları görülürken nanoparçacıkların katılmasıyla epoksiden

sıyrılan elyaflarda azalmalar olmuştur. Bu da elyaf matriks ara yüzey bağlantısının arttığını göstermektedir.

- İç basınç altında yapılan yorulma deneylerinde gerilme oranlarının belirlemek için statik patlatma sonucundan yararlanılmış ve üç farklı gerilme değeri seçilmiştir. Bu iki gerilme değeri yüksek olup, bir tanesi düşük seçilmiştir. (%70, %60 ve %50)
- Farklı gerilme değerlerinde yapılan yorulma deneylerinde, üç gerilme oranında herbir grup için istikrarlı bir sonuç çıkmış olup, düşük gerilmede yapılan deneyde yorulma ömrü diğer gerilmelerdeki yorulma ömürlerine göre ortalama %150 bir artış görülmüştür. Bu artışın sebebi hem gerilmenin düşmesi hemde karbon elyaf gibi mukavemet değerleri yüksek ve rijit bir malzemenin kullanılmasından kaynaklanmaktadır.
- BNND, ÇCKNT ve hibrit borularda katkısız borulara göre yorulma ömürlerinde sırasıyla ortalama %25, %50 ve %110'luk bir artış sağlanmıştır.
- Yorulma deneyleri sonucunda herbir gerilme için hasar analizi yapılmış ve nanoparçacığın etkisine bakılmıştır. Kompozit malzemeler için genel olan yorulma hasarlarına rastlanılmış ve ÇCKNT etkisiyle hasarlar da farklılıklar oluşmuştur. Tabaka ayrılması olmamakla birlikte bunu da elyaf matriks ara yüzey bağlantısının artması neticesindedir.
- Nanokompozit boruların iç yüzeyinde ilk başlangıç hasarı tek bir noktadan olup SEM analizi ile incelenmiştir. Burada epoksi reçine içerisine katılan nanoparçacıklar elyaf matriks bağlantısını güçlendirdiğinden elyaf sıyrılmaları azalmış ve elyaflar üzerinde modifiye edilmiş epoksi kalıntıları mevcuttur. Katkısız olan borularda elyaf sıyrılmalarına rastlanırken, elyaf üzerinde epoksi reçine kalıntıları bulunmamaktadır.

5.2.Öneriler

Bu çalışmada filaman sarım yöntemi ile epoksi reçine içerisinde nanodolgular kullanılarak karbon elyaf takviyeli nanokompozit borular üretilmiştir. Epoksi içerisine katılan naonodolgu, ÇCKNT ve BNND seçilmiştir. Bu nanomalzemeler dışında başka nanomalzemeler seçilerek yeni çalışmalar yapılabilir. Epoksi reçine içerisine katılan nanomalzemelerin homojen olarak dağılması mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğinden karışım süreleri artılarak daha iyi bir homojen yapı elde edilebilinir. Ayrıca üç farklı gerilme değerinde yapılan yorulma deneyleri daha düşük gerilmelerde yapılarak yeni bir çalışma elde edilir ve sonsuz ömrün hangi gerilme altında oluştuğu bulunabilinir.

KAYNAKLAR

Abdalla FH, Megat MH, Sapuan MS, Sahari BB. 2008, Determination of Volume Fraction Values of Filament Wound Glass and Carbon Fiber Reinforced Composites, ARPN Journal of Eng. And Appl Sci.

Abrate S., 1998, Impact on composite structures, Cambridge, Cambridge University Press, p.135-160.

Alexandre M., Dubois P., 2000, Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, Materials Science and Engineering R:Reports A Rewiev Journal, vol.28, p.1-63.

Andrews R., Weisenberger M., 2004, Carbon nanotube polymer composites, Current Opinion In Solid State and Materials Science, vol.8, p.31-37.

ASTM Standard D1599, 2005, "Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings" ASTM International, www.astm.org.

ASTM Standard D2992, 2012, "Standard Practice for Obtaining Hydrostatic or Pressure Design Basis for “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe and Fittings" ASTM International, www.astm.org.

ASTM Standard D2584, 2008, "Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins" ASTM International, www.astm.org.

ASTM Standard D4018, 2008, "Standard Test Method for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows" ASTM International, www.astm.org.

Bai Y., Keller T., 2014, High temperature performance of polymer composite, Wiley-VCH, Weinheim Germany.

Baker A., 2004, Composite materials for aircraft structures, American Inst itute of Aeronautics and Astronautics, Virginia.

Bao K., 2009, Synthesis of highly crystalline rhombohedral BN triangular nanoplates via a convenient solid state reaction, Journal of Solid State Chem., vol.182, p.925–931.

Biron M. 2004, Thermosets and composites: technical information for plastics users, Elsevier Science, Amsterdam Netherlands.

Borrego L.P., Costa J.D.M., Ferreira J.A.M., Silva H., 2014, Fatigue behaviour of glass fibre reinforced epoxy composite enhanced with nanoparticles, Composite: Part B, vol.62, p.65-72.

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

Cantwell W.J., 1988, The influence of target geometry on tyhe high velocity response of CFRP, Composite Structures, vol.10, p.247-265.

Campbell F.C., 2004, Manufacturing processes for advanced composites, Elsevier, New York.

Ceyhun V., Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. Mühendis ve Makine, vol.516, p.35-41.

Chandresekaran V.C.S., Santare M.H., Krishnan P., Advani S.G., 2011, Amino functionalization of MWNTs and their effect on ILSS of hybrid nanocomposites, Composite Interphases, vol.18, p.339-355.

Chang K., 2001, ASM Handbook: Composites-Aramid Fibers, 21, ASM International,107.

Chen B.K., Su C.T., Tseng M.C., Tsay S.Y., 2006, Preparation of Polyetherimide Nanocomposites with Improved Thermal, Mechanical and Dielectric Properties, Polymer Bulletin, vol.57, p.671-681.

Chen J., 1998, Solution Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes, Science, vol.282, p.95-98.

Chen N., Wan C., Zhang Y., Zhang Y., 2004, Effect of nano-CaCO3 on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend, Polymer Testing, vol. 23, p.169-174

Chen Y., 2004, Boron nitride nanotubes: pronounced resistance to oxidation, Appl.Phys.Lett, vol.84, p.2430-2432.

Cho H., Tu N. C., Fujihara T., Endo S., Suzuki T., Tanaka S., Jiang W., Suematsu H., Niihara K., Nakayama T., 2011, Epoxy resin based nanocomposite films with highly oriented BN nanosheets prepared using a nanosecond-pulse electric field, Materials Letters, vol.65, p.2426-2428.

Cho J.W., Joshi M.S., Sun C.T., 2006, Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles, Composites Science and Technology, vol.66, p.1941-1952.

Chopra N.G., 1995, Boron nitride nanotubes, Science, vol.269, p.966-967.

Collins P.G., 2000, Nanotubes for electronics, Scientific American, vol.283, p.67-69

Czabaj M.W., Ratcliffe J.G., 2012, Comparison of Intralaminar and Interlaminar Mode-I Fracture Toughness of Unidirectional IM7/8552 Graphite/Epoxy Composite, In Proceedings of the American Society for Composites–Twenty-Seventh Technical Conference.

Çetin E., 2007, Anilin ve Poli(Etilen Teraftalat) Kullanılarak Kimyasal Polimerizasyon yöntemi ile İletken Kompozit Lif Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Dai J., 2007, A convenient catalyt ic approach to synthesize straight boron nitride nanotubes using synergic nitrogen source, Chemical Physics Letters vol.440, p.253-58.

Demirci T., 2015, SiO2 nanopartikül takviyeli filaman sarım BTP boruların kırılma davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitiüsü, Konya.

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

Dieter G.E., 1976, Mechanical Metalurgy, 2nd Ed; Mc Graw Hill Co. Tokyo, 403-447.

Dorey G., Bishop S., Curtis P., 1985, On the impact performance of carbon fibre laminates with epoxy and PEEK matrices, Composites Science and Technology, vol.23, p.221-237.

Du X.S., Xiao M., Meng Y.Z., Hay A.S., 2004, Polymer, vol.45, p.6713.

Durmuş A., 2006, Poliolefin Nanokompozitlerin Hazırlanması, Doktora Tezi (PhD), İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ebbesen T.W., Ajayan P.M., 1992, Largscale synthesis of carbon nanotubes, Nature, vol.358, p.220-222.

Eldeniz İ., 1992, Yüzey Çatlaklı Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak Büyümesi ve Tabaka Ayrılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Ellyin F., Martens M., 2001, Biaxial fatigue behaviour of a multidirectional filament-wound glass fiber/epoxy pipe, Composite Science and Technology, vol.61, p.491-502.

Eskizeybek V., 2012, Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Espinoza S.L., Akinola A.T., Tate J.S., 2014, Tension-tension fatigue behaviour of nanosilica modified epoxy/glass nanocomposites for wind türbine blades, Sample Seattle, 2014 June 2-5.

Fan Z., 2007, Flow and rheology of multiwalled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, University Delaware, NJ USA.

Frank S., 1998, Carbon Nanotube Quantum Resistors, Science, vol.280, p.1744-1746.

Frankland S.J.V., Caglar A., Brenner D.W., Griebel M., 2002, Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces, J. Phys. Chem. B vol.106, p.3046-3048.

Franz D., Hollenstein M., Hollenstein C.H., 2000, Diborane nitrogen/ammonia plasma chemistry investigated by infrared absorption spectroscopy, Thin Solid Films, vol.379, p.37–44.

Fuchs HO., Stephens, KI., 1980, Metal Fatigue in Engineering, J. Wiley Sons Inc, N. York, p.1-35.

Gemi L., 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 88s.

Gemi L., 2014, Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı, Doktara Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitiüsü, Konya.

Geng Y., Liu M.Y., Li J., Shi X.M., Kim J.K., 2008, Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy composites, Composites: Part A, vol.39, p.1876-1883.

Gibson R.F., Ayorinde E.O. and Wen Y.F., 2007, Vibrations of carbon nanotubes and their composites: a review, Composites Science and Technology, vol.67, p.1–28.

Gong X., Liu J., Baskaran S., Voise R.D., Young J.S., 2000, Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites, Chemistry Of Materials, vol.12, p.1049-1052.

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

Gojny F.H., Whichmann M.H.G., Fiedler B., Bauhofer W., Schulte K., 2005b, Influnce of nanomaodification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, Composites: Part A, vol.36, p.1525-1535.

Golberg D., Bando Y., Kurashima K., Soto T., 2001, J. Nanosci. Nanotechnol., vol.1, p.49.

Gómez-Aleixandre C., Essafti A., Fernández M., Fierro J.L.G., Albella J.M., Influence of Diborane Flow Rate on the Structure and Stability of CVD Boron Nitride Films, 1996, J. Phys. Chem., vol.100, p.2148–2153.

González, M.G., Baselga J., Cabanelas J.C., 2012, Applications of FTIR on epoxy resins-identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake, INTECH Open Access Publisher.

Graham A.P., Duesberg G.S., Hoenlein W., Kreupl F., Liebau M., Martin R., Rajasekharan B., Pamler W., Seidel R., Steinhoegl W. and Unger E., Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process., 2005, vol.80, p.1141–1151.

Greenhalgh E., 2009, Failure analysis and fractography of polymer composites, Woodhead Publishing, Oxford, England.

Griffin C.F., 1987, Damage tolerance of toughned resin graphite composites. ASTM STP, 937: 23-33.

Grimmer C., Dharan C., 2008, High cycle fatigue of hyrid carbon nanotube/glass fiber/polymer composites, J. Mater. Sci., vol.43, p.4487-92.

Guo T., Nikolaev P., Thess A., Colbert D., Smalley R., 1995, Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization, Chem. Phys. Lett., vol.243, p.49–54.

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

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

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

Hao X.P., 2002, A novel synt het ic route to prepare cubic BN nanorods, Materials Research Bullet in, 27 October 2002, Pages 2085–2091

Holister P., Weener J.W., Vas C.R., Harper T., 2003, Nanoparticles, Cientifica Ltd., Technology White Papers.

Holzinger M., Steinmetz J., Samaille D., Glerup M., Paillet M., Bernier P., Hu H., Zhao B., Hamon M.A., Kamaras K., Itkis M.E and Haddon R.C., 2003, Sidewall functionalization of single-walled carbon nanotubes by addition of dichlorocarbene, Journal Of the American Chemical Society, vol.125.

Hull D., Legg M.J., Spencer B., 1978, Failure of glass/polyester filament wound pipe, Composite.

Hull D., 1981, An Introduction of Composite Materials

Hussain F., 2006, Review article: polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing and application: an overview, Journal of Composite Materials, Vol.40, p.1511-1576.

Ishida H., Campbell S., Blackwell J., 2000, General approach to nanocomposite preparation, Chemistry of Materials, 12, 1260-1267.

Ishigami M., 2003, Properties of boron nitride nanotubes, Scanning tunneling microscopy /spectroscopy and related techniques: 12thinternational conf., edited by Koenraad P.M., Kemerink M., pp. 94–99.

Islam M.F., Rojas E., Bergey D.M., Johnson A.T.and Yodh A.G., 2003, High weight fraction surfactant solubilization of single-wall carbon nanotubes in water, Nano Letters, vol.3, p.269-273.

Jia X., Zhu J., Li W., Chen X., Yang X., 2015, Compressive and tensile reponse of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes, Composite Science and Technology, vol.110, p.35-44.

Jia Z., Wang Z., Xu C., Liang J., Wie B. and Wu D., 1999, Study on poly(methyl methacrylate)/carbon nanotube composites, Materials Science and Engineering A, vol.271, p.395-400.

Joseph C., 1996, Polymeric Materials Encylopedia, CRC Press Inc., USA, 3-7.

Kara M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 93s.

Karabulut E., 2009, Bor Karbür Nanopartiküllerin ve Karbon Nanotüplerin Sentezlenmesi Ve Karakterizasyonu Yüksek lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitiüsü, Konya.

Karcı A., 2009, Uçak Yapısal Parçalarında Kullanılan Karbon/Epoksi kompozit Malzemelerin Yorulma Davranışı Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaynak C., Mat O., 2001, Uniaxial fatigue behaviour of filament-wound glass fiber/epoxy composite tubes, Comğposite Science and Technology, vol.61, p.1833-1840.

Kaw A., 1997, Mechanics of Composite Materials, CRC Pres Inc., USA 4-17.

Kempfer L., 1990, The Many Faces of Boron Nitride, Industrial Ceramics, vol.3, p.41-44.

Khare R., Bose S., 2005, Carbon nanotube based composites–a review, Journal Of Minerals & Materials Characterization & Engineering, vol.4, p.31–46.

Kim J.K., Sham M.L., Wu J., 2001, Nanoscale characterization of interphase in silane treated glass fibre composites, Composites Part A, vol.32, p.607-618.

Kim K., Bae D., Kim J., Park K., Lim S., Kim J.J., 2002, Modification of electronic structures of a carbon nanotube by hydrogen functionalization, Advanced Materials, vol.14, p.1818-1821.

Kimura Y., 1999. Boron Nitride as a Lubricant Additive, Wear, vol.232, p.199- 206.

Knoll J.B., Riecken B.T., Kosmann N., Chandrasekaran S., Schulte K., Fiedler B., 2014, The effect of carbon nanoparticles on the fatigue performance of carbon fibre reinforced epoxy, Composite: Part A, vol.67, p.233-240.

Krishnan A., Dujardin E., Ebbesen T., Yianilos P., Treacy M., 1998, Young's modulus of single-walled nanotubes, Physical Review B, vol.58, p.14013-14019.

Lelonis D.A., 2003, Boron Nitride Powder- A High Performance Alternative for Solid Lubricants, GE Advanced Ceramics Teknik Notları.

Li C., Chou T.W., 2003, Elastic moduli of multi-walled carbon nanotubes and the effect of van der Waals forces, Compos. Sci. Technol., vol.263, p.1517–1524.

Liang Z.M., Wan C.Y., Zhang Y., Wei P., Yin J., 2004, PVC/montmorillonite nanocomposites based on a thermally stable, rigid-rod aromatic amine modifier, Journal of Applied Polymer Science, Vol.92, p.567-575.

Liao Y., Mariettatondin O., Liang Z., Zhang C. and Wang B., 2004, Investigation of the dispersion process of SWNTs/SC-15 epoxy resin nanocomposites, Materials Science and Engineering A, vol.385, p.175-181.

Lin J., Wu, J., Yang Z., Pu M., 2001, Synthesis and properties of poly(acrylic acid)-mica superabsorbent nanocomposite, Macromolecular Rapid Communicaiton, Vol.22, p.422-424.

Lipp A., 1989. Hegzagonal Boron Nitride: Fabrication, Properties and Applications, Journal of European Ceramic Societ., vol.5, p.3-9.

Loiseau A., 1998, Boron nitride nanotubes, Carbon, vol.36, p.743-752.

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

Lordi V., Yao N., 1999, Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube polymer composites, Journal of Materials Research, vol.15, p.2770-2779.

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: Applied Science and Manufacturing, vol.41, p.1345-1367.

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

Malvern, L.E., Sun, C.T., Liu, D., 1987, Damage in composite laminates from central impacts at subperforation speeds, in Recent Trends in Aeroelasticity, Structures and Dynamics, University of Florida Press, Gainesville, FL, 298-312.

Memiş Ö., 2009, Balistik Amaçlı Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitler, Yüksek lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli

Menceloğlu, Y.Z., 2008, Uluslararası Rekabet Stratejileri: Nanoteknoloji ve Türkiye, TÜSİAD Rekabet Stratejileri Dizisi-11, (Yayın No. TÜSİAD-T/2008 11/474), İstanbul.

Middleton D.H., 1990, Composite materials in aircraft structures, Longman Group,UK.

Mirkarimi P.B., McCarty K.F., Medlin D.L., 1997, Review of advances in cubic boron nitride film synthesis, Materials Science and Engineering: R: Reports, vol.21, p.47–100.

Mnyusiwalla, A., Daar, A.S. and Singer, P.A., 2003, Nanotechnological Contribution to Drug Delivery System: A Reappraisal, Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology, Vol.5 No.3.

Nan C., 2003, A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites, Chemical Physics Letters, vol.375, p.666-669

Nishioka K., Senda, T., 1995, A study of Saint-Venant's principle for composite materials by means of internal stress fields. Journal of applied mechanics, 62(1), 53-58.

Njuguna B.J., Pielichowski K. and Alcock,J.R., 2007, Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites, Advanced Engineering Materials, vol.9, p.835-847.

Olek M., Kempa K., Jurga S., Giersig M., 2005, Nanomechanical properties of silica-coated multiwall carbon nanotubes-poly(methyl methacrylate) composites, Langmuir The ACS Journal Of Surfaces and Colloids, vol.21, 31463197.

Osborne T.W., 1999, New Applicat ion for Boron Nitride Coatings, Ceramic Industry, vol.09, p.55- 57.

Park C., Ounaies Z., Watson K.A., Crooks R.E., Smith J., 2002, Dispersion of single wall carbon nanotubes by in situ polymerization under sonication, Chemical Physics Letters., vol.364, p.303–308.

Park R., Jang J., 2001, Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: Effect of stacking sequences. Polymer Composites, vol.22, p.80-89.

Parton VZ., Morozov, EM., 1978, Elastic-Plastic Fracture Mechanics, Mir Publishers, Moskow, p.30-37.

Peigney A., Laurent C.H., Flahaut E., Bacsa R.R., Rousset A., 2001, Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes, Carbon, vol.39, p.507–514.

Pegel S., Potschke P., Petzold G., Alig I., Dudkin S.M., Lellinger D., 2008, Dispersion, agglomeration, and network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate melts, Polymer, vol.49, p.974-984.

Pinilla J.L., Moliner R., Suelves I., Lazaro M., Echegoyen Y., Palacios J., 2007, Production of hydrogen and carbon nanofibers by thermal decomposition of methane using metal catalysts in a fluidized bed reactor, International Journal of Hydrogen Energy, vol.32, p.4821-4829.

Porter D., Metcalfe E., Thomas M.J.K., 2000, Nanocomposite Fire Retardants : A Review, Fire and Materials, vol.24, p.45-52.

Ramasetty A., 2005, Proceedings of the American Society for Composites: Twentieth Technical Conference, in: G.R.P. Frank K. Ko Yury Gogotsi, Albert S. d.

Rastogi R., Kaushal R., Tripathi S.K., Sharma A.L., Kaur I. and Bharadwaj L.M., 2008, Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants, Journal Of Colloid and Interface Science, vol.328, p.421-428.

Ray S.S., Okamoto M., 2003, Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing, Progress in Polymer Science, vol.28, p.1539-1641.

Robinson P., Greenhalgh E., Pinho S., 2012, Failue mechanisms in polymer matrix composites, Woodhead Publishing, Oxford, England.

Ryabenko A., 2004, UV-VIS-NIR spectroscopy study of sensitivity of single-wall carbon nanotubes to chemical processing and Van-der-Waals SWNT/SWNT interaction. Verification of the SWNT content measurements by absorption spectroscopy, Carbon, vol.42, p.1523-1535.

Safadi B., Andrews R., Grulke E., 2002, Multiwalled carbon nanotube polymer composites: Synthesis and characterization of thin films, Journal Of Applied Polymer Science, vol.84, p.2660-2669.

Saito T., Honda F., 2000, Chemical Contribution to Frict ion Behaviour of Sintered Hexagonal Boron Nitride in Water, Wear, vol.237, p.253 -260

Sandler J., Shaffer M.S.P., Prasse T., Bauhafer W., Schulte K., Windle A.H., 1999, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in epoxy matrix and the resulting electrical properties, Polymer, Vol. 40, p.5967-5971.

Sarıtaş S., 1987, Yorulmuş Kırık Yüzeylerin Mikroskopla İncelenmesi, İkinci Ulusal Kırılma Konferansı, Trabzon, 189-196.

Shaffer M.S.P., Windle A.H., 1999, Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Poly(vinyl alcohol) Composites, Advanced Materials, vol.11, p.937-941.

Sheikh-Ahmad J.Y., 2009, Machining of polymer composites. Newyork springer Science business media, NY USA.

Shen J., 2006, Application of nanoparticles in polymeric foams, Doktora Tezi (PhD), Ohio State University.

Shi D., He P., Lian J., Chaud X., Bud'ko S.L., Beaugnon E., Wang L.M., Ewing R.C, and Tournier R., 2005, Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties, Journal Of Applied Physics, vol.97, 064312/1-064312/1.

Sierakowski R.L., Chaturvedi S.K., 1997, Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites, John Wiley & Sons, Inc., United Satates of America, 252 s.

Sinha P.K., 2006, Composite materials and structures, Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering I.I.T., Kharagpur.

Song Y.S., Youn J.R., 2005, Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites, Carbon, vol.43, p.1378–1385.

Stevens J.L., Huang A.Y., Peng H., Chiang I.W., Khabashesku V.N., Margrave J.L., 2003, Sidewall amino-functionalization of single-walled carbon nanotubes through fluorination and subsequent reactions with terminal diamines, Nano Letters, vol.3, p.331-336.

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

Şahin A., 2011, Düşük hızlı darbe görmüş filaman sarım e-camı/epoksi boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 100s.

Şahin Ö.S., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 150s.

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

Tae Y.A., J.W.L. Y., Hwang Kim, H.J., 2010, Influence of twin screw extrusion processing condition on the properties of polypropylene/multi-walled carbon nanotube nanocomposites, Korea-Australia Rheology Journal, vol.22, p.141-148.

Tagmatarchis N., Prato M., 2004, Functionalization of carbon nanotubes via 1,3 dipolar cycloadditions, Journal Of Materials Chemistry, vol.14, p.437-439.

Tahakasi T., Suzuki K., Awano H., Yonetake K., 2007, Chem. Phys. Lett., p.436-378.

Talreja R., 1985, Fatigue of Composite Materials, Technomic Publishing Company.

Terrones M., 2007, Pure and doped boron nitride nanotubes, Materials Today, vol.10, p.30–38.

Thostenson E.T., Chou T.W., 2003, On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modeling and characterization, J Phys D: Appl Phys, vol.36, p.573–582.

Tian M., Chen G., Guo S., 2005, Effect of high-energy vibromilling on interfacial interaction and mechanical properties of PVC/CaCO3 composites, Macromolecular Materials and Engineering, Vol.290, p.927-932.

Touhara H., Inahara J., Mizuno T., Yokoyama Y., Okanao S., Yanagiuch K., 2002, Property control of new forms of carbon materials by fluorination, Journal Of Fluorine Chemistry, vol.114, p.181-188.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), 1994.

Ulus, H., 2014, Ark Deşarj Yöntemi ile Bor nitrür Nanolevha Üretimi Karakterizasyonu ve Karbon Kumaş/Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Katkısının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitiüsü, Konya.

Ulus H., Ustun T., Eskizeybek V., Sahin O.S., Avci A., Ekrem M., 2014, Boron Nitride-Mwcnt/Epoxy Hybrid Nanocomposites: Preparation And Mechanical Properties, Applied Surface Science, vol.318, p.37-42.

Unger E., Graham A., Kreupl F., Liebau M., Hoenlein W., 2002, Electrochemical functionalization of multi-walled carbon nanotubes for solvation and purification, Current Applied Physics, vol.2, p.107-111.

Velde B., 1992, Introduction to Clay Minerals, Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significane, 1 th Edition , Chapman & Hall Inc., London, Great Britain, 10-15.

Ying Z., Du J.H., Bai S., Li F., Liu C., Cheng H.M., 2002, Mechanical properties of surfactant-coating carbon nanofiber/epoxy composite, Journal of Nanoscience, Vol.1, p.425-430.

Yu M.F., 2000, Strength and breaking mechanism of multi walled carbon nanotubes under tensile load, Science, vol.287, p.637-676.

Yu M.F., Files B.S., Arepalli S., Ruoff R.S., 2000, Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties, Phys Rev Lett, vol.84, p.5552–5555.

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

Zhang W., Picu R.C., Koratkar N., 2008, The efferct of carbon nanotube dimensions and dispersion on the fatigue behavior of epoxy nanocomposite, Nanotechnology, vol.19.

Zhu J., Kim J., Peng H., Margrave J.L., Khabashesku V.N. and Barrera E.V., 2003, Improving the Dispersion and Integration of Single-Walled Carbon Nanotubes in Epoxy Composites through Functionalization, Nano Letters, vol.3, p.1107-1113.

Zhu J., Peng H., Rodriguez-Macias F., Margrave J.L., Khabashesku V.N., Imam A.M., 2004, Reinforcing epoxy polymer composites through covalent integration of functionalized nanotubes, vol.14, p.643–648.

Zhao W., Wang H., Tang H., Chen G., 2006, Polymer, vol.47, p.8401.

Qian J., He P., Nie K., 2004, Nonisothermal crystallization of PP/nano-SiO_2 composites, Journal of Applied Polymer Science, vol.91, p.1013-1019.

Walsh P.J., 2001, Carbon Fibers, ASM Handbook, vol.21, p.35-40.

Wang, Proceedings Of the American Society For Composites: Twentieth Technical Conference, Lancaster, DEStech Publications Inc, 1-154.

Wang H., Zhou W., Ho D.L., Winey K.I., Fischer J.E., Glinka C.J., 2004, Dispersing single-walled carbon nanotubes with surfactants: A small angle neutron scattering study, Nano Letters, vol.4, p.1789-1793.

Wang L. Z., Liu Y., Zhang Z., 2000, Handbook of Nanophase and Nanostructrued Materials Volume I, Kluwer Academic Plenum, New York.

Wei B., Cao H., Song S., 2011, Surface modification and characterization of basalt fibers with hyrid sizings, Composite Part A, 22-29

Weisenberger M.C., Grulke E.A.,. Jacques D, Rantell T. and Andrews R., 2003, Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers, Journal Of Nanoscience and Nanotechnology, vol.3, p.535-543.

Wetzel B., Rosso P.,Friedrich K., 2006, Epoxy nanocomposite toughnening mechanisms, Engineering Fracture Mechanics 73, 2375-2398.

Whitsitt E.A., Barron A.R., 2003, Silica Coated Single Walled Carbon Nanotubes, Nano Letters, vol.3, p.775-778.

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

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Tugay ÜSTÜN
Uyruğu : TC
Doğum Yeri ve Tarihi : Yenimahalle 1990
Telefon : 0555 478 76 24
e-mail : ustun.tugay@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Kalaba Süper Lisesi, Keçiören, Ankara	2008
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2012

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2015	Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi	Proje Asistanı

UZMANLIK ALANI

Nanokompozitler

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

SCI İNDEKSLERİNE GİREN DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

Avcı A., Ulus H., Karabulut E.S., Sahin O.S., Eskizeybek V., Ustun T., "Low-Velocity Impact Behavior Of Carbon Fiber/Epoxy Multiscale Hybrid Nanocomposites Reinforced With Multiwalled Carbon Nanotubes And Boron Nitride Nanoplates ", Journal of Composite Materials, vol.1, no.1, pp.1-10, 2015

Ulus H., Ustun T., Eskizeybek V., Sahin O.S., Avci A., Ekrem M., "Boron Nitride-Mwcnt/Epoxy Hybrid Nanocomposites: Preparation And Mechanical Properties", APPLIED SURFACE SCIENCE, vol.318, pp.37-42, 2014

HAKEMLİ KONGRE/SEMPOZYUMLARIN BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR

Ulus H., Ustun T., Sahin O.S., Avcı A., "SYNERGISTIC EFFECT OF BNNP-CNT HYBRIDISATION ON FRACTURE TOUGHNESS OF CARBON FIBER REINFORCED EPOXY LAMINATES" 8th

ANKARA INTERNATIONAL AEROSPACE CONFERENCE 10-12 September 2015 - METU, Ankara TURKEY

Ulus H., Ustun T., Sahin O.S., Avcı A., "Characterization of thermal and tensile properties enhancement with low concentration nanoparticle fillers for epoxy resin" The International Conference On Science, Ecology and Technology I, 2015, Vienna

Ustun T., Eskizeybek V., Avcı A., "Bor Nitrür Nanodisk (BNND) Katkılı Karbon Elyaf/Epoksi Nanokompozit Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışları" Uluslararası Katılımlı 1. Savunma Sanayi Sempozyumu, Kırıkkkale, 9-10 Nisan 2015

Ulus H., Ustun T., Demir O., Eskizeybek V., Sahin O.S., Avcı A. , "Flexural And Shear Properties Of Superior Bnnp-Mwcnt/Epoxy Hybrid Nanocomposites", 10. Ulusal Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı, İSTANBUL, TÜRKIYE, 17-21 Haziran 2014

Ustun T., Yar A., Haspulat B. , Eskizeybek V., Avcı A. , Gülce H. , "The Fabrication And Characterization Of Pan/Tio2-Zno Nanofiber And Their Photocatalytic Properties", 10. Ulusal Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı, İSTANBUL, TÜRKIYE, 17-21 Haziran 2014

Ustun T., Yar A., Haspulat B. , Eskizeybek V., Avcı A. , Gülce H. , "Catalytic Activity Of Pan/Mwcnt Nanoofiber", 10. Ulusal Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı, İSTANBUL, TÜRKIYE, 17-21 Haziran 2014

Ustun T., Ulus H., Haspulat B. , Karabulut E.S., Avcı A., Gülce H., "A Facile and Large Scale Synthesis of Tungsten Oxide Nanocubes Structure and Catalytic Activity of Rhodamine B" 10. Ulusal Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı, İSTANBUL, TÜRKIYE, 17-21 Haziran 2014

Ustun T., Karabulut E.S., Eskizeybek V., Avcı A., "Facile And Templete-Free Synthesis Of Cuo Nanostructures", 9th Nanoscience and Nanotechnology Conference, ERZURUM, TÜRKIYE, 24-28 Haziran 2013

Yar A., Ustun T., Parlayıcı Ş., Avcı A., Pehlivan E., "Excellent nano hybrid dispersed fibers for the adsorption of chromium from aqueous solution" 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARBON NANOPARTICLE BASED COMPOSITES, Dresden, ALMANYA, 22-25 Eylül 2013

Ulus H., Ustun T., Eskizeybek V., Sahin O.S., Avcı A. , "Low velocity impact behavior of carbon nano tube and boron nitride nanoplate modified epoxy/carbon fiber composites" 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CARBON NANOPARTICLE BASED COMPOSITES, Dresden, ALMANYA, 22-25 Eylül 2013

Ustun T., Karabulut E.S., Eskizeybek V., Avcı A., "Preparation Of Rutile TiO_2 Nanospheres Via Arc Discharge Method Submerged In Water", 14th International Materials Symposium (IMSP'2012), DENİZLİ, TÜRKIYE, 10-12 Ekim 2012

Ustun T., Eskizeybek V., Gülce H. , Gülce A. , Avci A., "Synthesis Of The Polyaniline/TiO_2 Nanocomposite", 7.th International ECNP Conference, Prag, CEK CUM., 24-27 Nisan 2012