



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANO  
PARTİKÜLLERİ İLAVELİ KARBON FİBER-  
EPOKSİ KOMPOZİT BORULARININ  
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE  
HİDROTERMAL YAŞLANDIRMANIN ETKİSİ**

**SAFA AK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran 2019  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Safa AK tarafından hazırlanan “Karbon Nanotüp ve Bor Nitrür Nanopartikülleri İlaveli Karbon Fiber-Epoksi Kompozit Borularının Mekanik Özelliklerine Hidrotermal Yaşlandırmanın Etkisi ” adlı tez çalışması .....tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Prof.Dr. Mesut UYANER

.....

#### Danışman

Doç.Dr. Memduh KARA

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURAN  
FBE Müdürü

## TEZ BİLDİRİMİ

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

## DECLARATION PAGE

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

İmza

Safa AK

**ÖZET****YÜKSEK LİSANS TEZİ****KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANO PARTİKÜLLERİ İLAVELİ  
KARBON FİBER-EPOKSİ KOMPOZİT BORULARININ MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE HİDROTERMAL YAŞLANDIRMANIN ETKİSİ****Safa AK****Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Doktor Öğretim Üyesi Memduh KARA****2019, 102 Sayfa****Jüri****Doç.Dr. Memduh KARA****Prof. Dr. Mesut UYANER****Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ**

Filaman sarma tekniği ile üretilmiş kompozit borular diğer borulara göre düşük ağırlıklı yüksek mukavemetli, kimyasal maddelerin oluşturacağı korozyona, olumsuz hava koşullarına ve ultraviyole ışınlarına karşı dirençli ve uzun ömürlüdürler. Tüm bu üstün mekanik, kimyasal ve termal özellikleri sayesinde metal ve diğer malzemelerin yerini almakta olan filaman sarma tekniği ile üretilmiş kompozit boruların petrol-doğalgaz iletim hatları, kimyasal akışkanların iletim hatları, şehir şebeke su tesisatları, termal tesisler ve basınçlı kaplar gibi yaygın kullanım alanları mevcuttur.

Operasyon alanının koşul ve şartları kompozit malzemelerin çalışma ömrü ve performansı üzerinde çok etkilidir. Bu sebepte çalışmada daha önceden hazırlanmış  $[\pm 55^\circ]_4$  sarma açısına ve 8 katmana sahip Karbon fiber/epoksi saf, Bor Nitür Nanopartikül (BNNP), Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) ve hem BNNP hem de ÇCKNT katkılı hibrit borular 1, 2 ve 3 haftalık sürelerde saf su içerisinde 80 °C sıcaklık etkisinde hidrotermal yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Her boru grubunda yaşlandırılmayan kontrol grubu bulunmaktadır.

Mekanik özelliklerin belirlenmesi aşamasında ise numunelere ASTM D 2290-16 prosedür A standartlarında halka çekme deneyi ve 5, 10, 15 J, enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarının grafikleri çizilerek değerlendirilmiştir. Hidrotermal yaşlandırmanın saf epoksi kompozit ve farklı nanopartikül ilaveli epoksi kompozit malzemeler üzerindeki etkisi yaşlandırma süreleri göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Düşük hızlı darbe, Halka çekme, Hidrotermal yaşlandırma, Karbon fiber / epoksi kompozit boru, Nanopartikül.

**ABSTRACT****MS THESIS****THE EFFECT OF HYDROTHERMAL AGING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER-EPOXY COMPOSITE PIPES WITH CARBON NANOTUBE AND BORON NITRIDE NANO PARTICLES****Safa AK****THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN MECHANICAL ENGINEERING****Advisor: Asst. Prof. Dr. Memduh KARA****2019, 102 Pages****Jury****Assoc. Prof. Dr. Memduh KARA****Prof. Dr. Mesut UYANER****Asst. Prof. Mehmet Turan DEMİRCİ**

Composite pipes produced by filament winding technique are resistant to adverse weather conditions, ultraviolet rays and they have long life. All these superior mechanical, chemical and thermal properties of the composite materials produced by the filament winding technique, which replaces metal and other materials. Composite pipes also available in petroleum natural gas transmission lines, in the transmission line of chemical fluids, in urban water supply systems, thermal facilities and pressure vessels.

The situation and conditions of the operation area are very effective on the working life and performance of the composite materials. Therefore, Carbon fiber / epoxy Pure, Boron Nitride Nanoparticle (BNNP), Multi walled Carbon Nanotube (MWCNT) and both BNPP and MWCNT mixed hybrid pipes prepared  $[\pm 55^\circ]_4$  winding angle and 8 layers. In the study composite pipes were exposed to hydrothermal aging by exposure to 80°C in pure water for 1, 2 and 3 weeks, and there is a control group from each pipe samples which does not aging.

In the determination of mechanical properties, the samples were subjected to ASTM D 2290-16 procedure A standard ring tensile test and low speed impact test at 5, 10, 15J, energy levels. The graphs of the test results were drawn and evaluated. The effect of hydrothermal aging on the epoxy composite materials with pure epoxy composites and nanoparticles was investigated by taking into consideration the aging times.

**Key Words:** Carbon fiber / epoxy composite pipe, Hydrothermal aging, Low speed impact, Ring drawing.

## ÖNSÖZ

Lisans Eğitimimden başlayarak üzerimde çok emeği olan, Necmettin Erbakan Üniversitesi'nde yüksek lisans yapmamı öneren ve danışmanım Memduh KARA ile birlikte tez konumu belirlememde yardımcı olan Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e

Çalışmada maddi ve manevi olarak hiçbir desteğini esirgemeyen, doğru kaynak ve bilgiye ulaşma konusunda her zaman yardımcı olan danışmanım Doç. Dr. Memduh KARA hocama,

Darbe ve çekme deneylerinde grafik oluşturma ve değerlendirme noktalarında tecrübelerinden faydalandığımız Prof. Dr. Mesut UYANER'e

Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'ne ait çekme cihazını ve çekme deneyine ait aparatları kullanmak üzere yardımcı olan Dr. Öğretim Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ'ye

Süreç içerisinde geçirdiğim kazadan dolayı kaybolan motivasyonumu toparlamamı sağlayan aileme

TEŞEKKÜRLERİMİ SUNARIM.

Safa AK  
KONYA-2019

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ .....</b>	<b>x</b>
<b>ÇİZELGELER LİSTESİ .....</b>	<b>xiii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>4</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>8</b>
3.1. Kompozit Malzeme.....	8
3.1.1. Takviye Elemanları .....	9
3.1.2. Karbon Fiber .....	9
3.1.3. Matris Yapı .....	10
3.1.4. Termoset Matrisler .....	11
3.2. Tabakalı Kompozitler .....	11
3.2.1. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozitler .....	12
3.3. Kompozit Üretim Yöntemleri .....	12
3.3.1 Filaman Sarım Metodu.....	12
3.4. Nanoteknoloji.....	14
3.4.1. Karbon Nanotüpler.....	14
3.4.2. Bor Nitrür .....	15
3.5. Nanokompozitler.....	16
3.6. Hidrotermal Yaşlanma .....	16
3.7. Mekanik Testler .....	18
3.8. Çekme Testi .....	18
3.8.1. Çekme Grafiği ve Tanımlar .....	19
3.8.2 Halka Çekme Testi.....	22
3.9. Darbe Testi .....	23
3.9.1. Düşük Hızlı Darbe .....	24

3.9.2 Yüksek Hızlı Darbe.....	27
3.10 Darbe Sonucu oluşan Hasar Modları .....	28
3.10.1. Matris Hasarı.....	29
3.10.2 Delaminasyon.....	30
3.10.3 Elyaf Hasarı.....	31
3.10.4. Nüfuziyet.....	31
<b>4. DENEYSEL YÖNTEM.....</b>	<b>32</b>
4.1. Giriş.....	32
4.2. Kompozit Boru Üretimi ve Özellikleri .....	32
4.3. Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi.....	35
4.4. Halka Çekme Testi Uygulaması .....	37
4.5 Düşük Hızlı Darbe Deneyi Uygulaması.....	39
4.6. Kompozit Boruların Darbe Karakteristiği.....	40
4.6.1. Kuvvet-zaman eğrileri ( $F-t$ ) .....	41
4.6.2. Kuvvet-Yer Değiştirme ( $F-d$ ) .....	41
4.6.3. Hız-zaman eğrileri ( $V-t$ ) .....	43
4.6.4. Enerji-zaman eğrileri ( $Ea-t$ ) .....	43
<b>5. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>45</b>
5.1. Halka Çekme Deneyi .....	45
5.1.1 Yaşlandırılmamış Borularda Teğetsel Gerilmeler .....	45
5.1.2 Bir Hafta Yaşlandırılmış Borular .....	47
5.1.3 İki hafta Yaşlandırılmış Borular .....	48
5.1.4 Üç hafta Yaşlandırılmış Borular .....	50
5.2 Düşük Hızlı Darbe Deneyi .....	52
5.2.1 Yaşlandırılmamış Numunelerde Darbe Deneyi .....	53
5.2.2 Nanopartikül İlavesi veya yaşlanmanın Darbe Üzerine Etkisi .....	54
5.2.3 Hidrotermal Yaşlandırmanın Hasar Mekanizmasına Etkisi.....	59
5.3 Düşük Hızlı Darbe Hasar Analizi .....	65
5.3.1 5 J Darbe Enerjisi .....	66
5.3.2 10 J Darbe Enerjisi .....	71
5.3.3 15 J Darbe Enerjisi .....	75
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>81</b>
6.1 Sonuçlar .....	81

6.2 Öneriler .....	83
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>84</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>88</b>



## ŞEKİLLER LİSTESİ

<b>Şekil 3.1</b> Karbon fiber üretim şeması (Torayca) .....	9
<b>Şekil 3.2</b> CNC kontrollü filaman sarım (Şahin, 2004) .....	13
<b>Şekil 3.3</b> a) Tek duvarlı KNT b) Çok duvarlı KNT .....	15
<b>Şekil 3.4</b> Standartlara uygun dairesel kesitli bir çekme numunesi (web.harran.edu.tr) .	19
<b>Şekil 3.5</b> Düşük karbonlu bir çeliğin çekme diyagramı (www.harran.edu.tr).....	19
<b>Şekil 3.6</b> Prosedür A, B, C halka çekme aparatı.....	22
<b>Şekil 3.7</b> Prosedür A halka çekme numune standart ölçüleri (Kara ve Uyaner, 2017) ..	23
<b>Şekil 3.8</b> Charpy ve Izod darbe numune desteklenme şekli (Ceyhun ve Turan 2003)...	25
<b>Şekil 3.9</b> Düşük hızlı darbe testi kütle düşürme cihazı (Ceyhun ve Turan 2003) .....	26
<b>Şekil 3.10</b> Vurucu geometrileri a) yarım daire, b) ogival, c) konik (Mirevski ve ark. 2004) .....	26
<b>Şekil 3.11</b> Yüksek hızlı darbe cihazı. (Villanueva ve ark., 2003) .....	27
<b>Şekil 3.12</b> Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006).....	28
<b>Şekil 3.13</b> Darbe testi sonrasında tipik bir yük-zaman eğrisi (Shyr & Pan, 2003).....	29
<b>Şekil 3.14</b> İki tip matris çatlama; (a) kayma çatlağı, (b) çekme çatlağı (Abrate, 1998) .....	29
<b>Şekil 3.15</b> (a) Ters çevrilmiş çam ağacı (b) çam ağacı şeklindeki hasar görüntüleri (Abrate 1998) .....	30
<b>Şekil 3.16</b> Delaminasyon, kayma çatlağı ve elyaf hasarı (Thierry, 2018).....	31
<b>Şekil 4.1</b> BNNP sem görüntüsü (Karabulut, 2017) .....	34
<b>Şekil 4.2</b> Filaman sarım makinesi ve üretime hazırlık (Karabulut, 2017).....	35
<b>Şekil 4.3</b> Hidrotermal yaşlandırma ünitesi .....	36
<b>Şekil 4.4</b> EMKO 3710 ısı kontrol ünitesi .....	36
<b>Şekil 4.5</b> Hidrotermal ünitesinin şematik gösterimi (Akın, 2018) .....	37
<b>Şekil 4.6</b> Prosedür A'ya göre hazırlanıp çekme testi uygulanmış numune.....	38
<b>Şekil 4.7</b> Çekme aparatı ve çekme işlemi.....	39

<b>Şekil 4.8</b> Düşük hızlı darbe sistemi (Kara, 2012).....	39
<b>Şekil 4.9</b> Düşük hızlı darbe a) Kontrol ünitesi b) Vurucu ve kuvvet algılayıcı (Akın, 2018) .....	40
<b>Şekil 4.10</b> Kuvvet - Zaman (F- t) eğrileri. (Sayer, 2009) .....	41
<b>Şekil 4.11</b> Kuvvet-yer değiştirme eğrileri (Sayer, 2009).....	42
<b>Şekil 4.12</b> Hız-zaman (v-t) eğrisi (Sayer, 2009).....	43
<b>Şekil 4.13</b> Enerji-zaman (Ea-t) eğrileri (Sayer, 2009).....	44
<b>Şekil 5.1</b> Yaşlandırılmamış numune.....	<b>46</b>
<b>Şekil 5.2</b> Yaşlandırılmamış numunelerde teğetsel gerilmeler .....	46
<b>Şekil 5.3</b> Bir hafta yaşlandırılmış numuneler.....	47
<b>Şekil 5.4</b> Bir hafta yaşlandırılmış numunelerde teğetsel gerilmeler.....	48
<b>Şekil 5.5</b> İki hafta yaşlandırılmış numuneler.....	49
<b>Şekil 5.6</b> İki hafta yaşlandırılmış numunelerde teğetsel gerilmeler .....	50
<b>Şekil 5.7</b> Üç hafta yaşlandırılmış numuneler .....	51
<b>Şekil 5.8</b> Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde teğetsel gerilmeler .....	51
<b>Şekil 5.9</b> Saf ve farklı nanopartikül içeren numunelerin yaşlanma sürelerinde teğetsel gerilmeleri.....	52
<b>Şekil 5.10</b> Yaşlandırılmamış numunelerde kuvvet zaman (f-t) grafikleri .....	53
<b>Şekil 5.11</b> Yaşlandırılmamış numunelerde kuvvet-deplasman (f-d) grafikleri .....	54
<b>Şekil 5.12</b> Yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe sonucu kuvvet-zaman grafiği .....	55
<b>Şekil 5.13</b> Yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe sonucu kuvvet-deplasman grafiği....	56
<b>Şekil 5.14</b> Yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe sonucu kuvvet-zaman grafiği .....	56
<b>Şekil 5.15</b> Yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe sonucu kuvvet-deplasman grafiği..	57
<b>Şekil 5.16</b> Yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe sonucu kuvvet-zaman grafiği .....	58
<b>Şekil 5.17</b> Yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe sonucu kuvvet-deplasman grafiği..	59
<b>Şekil 5.18</b> Saf numunelerde yaşlandırma kuvvet-zaman grafiği.....	60
<b>Şekil 5.19</b> Saf numunelerde yaşlandırma kuvvet-deplasman grafiği .....	60
<b>Şekil 5.20</b> BN ilaveli numunelerde yaşlandırma kuvvet-zaman grafiği.....	61

<b>Şekil 5.21</b> BNNP ilaveli numunelerde yaşlandırma kuvvet-deplasman grafiği.....	62
<b>Şekil 5.22</b> ÇCKNT ilaveli numunelerde yaşlandırma kuvvet-zaman grafiği.....	63
<b>Şekil 5.23</b> ÇCKNT ilaveli numunelerde yaşlandırma kuvvet-deplasman grafiği .....	63
<b>Şekil 5.24</b> Hibrit numunelerde yaşlandırma kuvvet-zaman grafiği .....	64
<b>Şekil 5.25</b> Hibrit numunelerde yaşlandırma kuvvet-deplasman grafiği.....	65
<b>Şekil 5.26</b> Yaşlandırılmamış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri .....	67
<b>Şekil 5.27</b> Bir Hafta yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri...	68
<b>Şekil 5.28</b> İki hafta yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri ....	70
<b>Şekil 5.29</b> Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri ...	71
<b>Şekil 5.30</b> Yaşlandırılmamış numunelerde 10 J darbe enerjisi kesit görüntüleri .....	72
<b>Şekil 5.31</b> Bir hafta yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe enerjisi kesit görüntüleri..	73
<b>Şekil 5.32</b> İki hafta yaşlandırılmış numunelerde 10J darbe enerjisi kesit görüntüleri ..	74
<b>Şekil 5.33</b> Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde 10J darbe enerjisi kesit görüntüleri ..	75
<b>Şekil 5.34</b> Nanopartikül ilaveli ve saf matrisli numunelerde deformasyon .....	76
<b>Şekil 5.35</b> Yaşlandırılmamış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri .....	77
<b>Şekil 5.36</b> Bir hafta yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri.	78
<b>Şekil 5.37</b> İki hafta yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri..	79
<b>Şekil 5.38</b> Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri..	80

**ÇİZELGELER LİSTESİ**

<b>Çizelge 3.1</b> Karbon ve diğer mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri. ....	10
<b>Çizelge 3.2</b> Yaygın olarak kullanılan termosetler (Mallick, 2008) .....	11
<b>Çizelge 4.1</b> Kullanılan nanopartiküller ve oranları .....	32
<b>Çizelge 4.2</b> Epoksi reçine mekanik özellikleri .....	33
<b>Çizelge 4.3</b> 12K A-42 Karbon elyafın mekanik özellikleri .....	33
<b>Çizelge 4.4</b> ÇCKNT'lerin mekanik özellikleri .....	34
<b>Çizelge 4.5</b> Kompozit borular veya yaşlandırma süreleri .....	36
<b>Çizelge 5.1</b> Yaşlandırılmamış numunelerin yüzde kopma uzamaları .....	47
<b>Çizelge 5.2</b> Bir hafta yaşlandırılmış numunelerin kopma uzamaları .....	48
<b>Çizelge 5.3</b> İki hafta yaşlandırılmış numunelerin yüzde kopma uzamaları .....	50
<b>Çizelge 5.4</b> Üç hafta yaşlandırılmış numunelerin yüzde kopma uzamaları .....	52

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\sigma$ : Gerilme

$\sigma_a$ : Eksenel gerilme

$\sigma_{\zeta}$ : Çekme gerilmesi

$\sigma_T$ : Teğetsel gerilme

$\sigma_K$ : Kopma gerilmesi

$E$ : Elastisite modülü

$\varepsilon$ : Birim şekil değiştirme

$\rho$ : Özgül Ağırlık

$KU$ : Yüzde kopma uzaması

$V$ : Hız

$t$ : Zaman

$d$ : Deplasman, yer değiştirme

$Ea$ : Absorbe edilen enerji

$F$ : Kuvvet

### Kısaltmalar

ASTM: American Society for Testing and Materials

BN: Bor Nitrür

BNNP: Bor Nitrür Nanopartikül

C-BN: Kübik Bor Nitrür

CTP: Cam Elyaf Takviyeli Polimer

ÇCKNT: Çok Cidarlı Karbon Nanotüp

H-BN: Hegzogonal Bor Nitrür

KTP: Karbon Fiber Takviyeli Polimer

L-ÇCKNT: Uzunluğu 30 $\mu$ m - 50 $\mu$ m Arası ÇCKNT

SEM: Taramalı Elektron Mikroskop

UV: Ultraviyole

PAN: Poliakrilanitril

## 1. GİRİŞ

Mühendislik hesaplamalarının mükemmelleşmesi, mühendislik alanlarında bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla daha kusursuz tasarlanan mekanik sistemlerin güç, verimlilik gibi performans kriterlerinde büyük oranlarda artışlar sağlanmıştır. Bir çok ürünün, mekanik tasarımın, maksimum performansını; tasarımında kullanılan malzeme belirlemede ve birçok uygulamada kullanılan malzemenin mekanik özellikleri sistemin limitlerini oluşturmaktadır. Yeni geliştirilen malzemeler fiziksel ve kimyasal özellikleri ile mevcut üretim teknikleri haricinde yeni tekniklerin gelişmesine olanak sağlamakta, üretimde maliyeti düşürmekte ve operasyon verimliliğini artırmaktadır. Bu sebepten ötürü, günümüz mühendislik alanının en önemli konularından birisi, malzeme teknolojisi olmuştur. Yapılan çalışmalar malzeme özelliklerini geliştirmek ve benzersiz yeni malzemeler oluşturmak üzerine yoğunlaşmaktadır.

Tasarımda aranan kriterleri sağlması amacıyla farklı üstün özellikleri olan ve birbirlerinin zayıf noktalarını iyleştirecek şekilde birbiri içerisinde çözünmeyen çeşitli malzemelerin, makro boyutta birleştirilmesi ile bileşenlerini oluşturanlardan farklı ve çoğunlukla daha iyi mekanik ve kimyasal özellikler sergileyen yeni malzemeye ‘‘kompozit’’ denmektedir. Üstün mukavemet özellikleri, düşük yoğunlukları, korozyon direnci, yeni tasarım ve üretim tekniklerine olanak vermesinden dolayı kompozit malzemeler, üzerinde yapılan araştırmalarda oldukça önemli bir yer edinmektedir. Yine bu üstün mekanik özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler uzay, uçak, gemi ve yat inşası, inşaat, savunma sanayi, altyapı, tesisat ve aksesuar alanlarında yaygın şekilde kullanılmakta ve kullanımı her geçen gün artmaktadır.

Kompozit boruların üstün kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı tesisatlarda kullanımı büyük avantajlar sağlamaktadır. Termoset reçine ile üretilmiş kompozit borular yüksek ısıya dayanıklıdır. Bu sebeple çalışma şartlarında genleşme ve yamulma görülmez. Bakır, çelik ve galvanizli borularda görülen oksitlenme, terleme ve korozyon gibi malzemenin ömrünü kısaltan durumlar kompozit borularda görülmemektedir. Cam Elyav Takviyeli (CTP) boruların tesisatlarda kullanımı oldukça yaygınlaşmaktadır.

Filaman sarımı ile üretilmiş borularda sarım açısı, mekanik özellikleri oldukça etkilemektedir. Yaklaşım yöntemi (aproxiamation methods) ile yapılan çalışmalarda Karbon Fiber / Epoksi borular için optimum sarım açısı  $53.829^\circ$  olarak belirtilmiş, buna rağmen üretim esnasında hataların minimum seviyede tutulması ve sarım temasının düzenli olması için  $55^\circ$  sarım açısı daha akıllıca bulunmuştur. (Stellou ve ark., 2015).

Epoksi reçine içerisine karıştırılan nanopartiküller, kompozit borularda mekanik özellikleri iyileştirmenin en önemli yöntemidir. Parçaların boyutları küçüldükçe, yüzey alanları büyümektedir; dolayısıyla nanometre boyutundaki partiküllerin spesifik yüzey alanları oldukça büyüktür. Bu yüksek spesifik yüzey alanları nedeni ile yükün matristen nano parçacığa transferi kolaylaşmakta, yük matris içerisinde dağılmaktadır. Sonuç olarak nanopartikül ilavesi ile matrisin yük taşıma mukavemeti artmış ve mekanik özellikleri iyileşmiş olacaktır. Bu yük transferini sağlamada kullanılan nanopartiküllerin en uygun adaylarından birisi karbon nanotüplerdir (Sanchez ve ark., 2012)

Polimer içerisine ilave edilen Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT), fark edilebilir seviyede mekanik özellikleri iyileştirmektedir. (Coleman ve ark., 2006). Bor Nitrür (BN), düşük elektrik iletkenliğine sahip olmasına rağmen, yüksek termal iletkenliği olan düşük yoğunluklu ve kimyasal reaksiyonlara karşı dirençli seramik bir malzemedir. Ayrıca epoksi reçine içerisine ilave edilen Bor Nitrür Nanotüp (BNNT) çekme dayanımını artırmaktadır. (Ulus ve ark., 2014).

Termal tesisler ve ısı iletim hatları, kompozit borular için yüksek kullanım potansiyeline sahip alanlardır. Fakat nem ve sıcaklık, kompozit malzemelerin ömrünü ve çalışma performansını kısıtlayan en önemli faktörlerdendir. Nem, matris yapıda moleküler bağların içerisine difüzyon yoluyla geçer ve matris ve fiber arası bağları olumsuz etkiler. Bundan dolayı malzemenin elastisite modülünü ve camsı geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Kompozit yapı içerisindeki malzemelerin, termal genleşme katsayısı farklılıklarından; sıcaklığa maruz bırakılan kompozitlerde kalıcı gerilmeler oluşmakta, fiber matris bağlarını zayıflatmakta ve yapısal bozukluklara sebep olmaktadır (Zhong ve ark., 2018). Bu sebeple kompozit boruların termal özelliklerini iyileştirmek ve nemli ortama karşı izolasyonunu artırmak çok önemlidir.

Bu çalışmada, filaman sarım yöntemi ile üretilmiş CTP borulara göre daha iyi mukavemet özelliği gösteren Karbon elyaf/epoksi matris borular kullanılmıştır. Kullanılan borular filaman sarım tekniği ile üretilmiş  $[\pm 55^\circ]_4$  sarma açısıyla, aynı anda üç fiber demeti ile her bir yönde 4 sarım olacak şekilde ve 72 mm iç çapında üretilip toplam 8 katmandan oluşmaktadır. Saf epoksi, % 0.3 Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT), % 0.5 Bor Nitrür Nanopartikül (BNNP) ve % 0.3 ÇCKNT + % 0.5 BNNP ilaveli hibrit borular olmak üzere, dört farklı numune grubu ile 16 adet boru bulunmaktadır. Hidrotermal yaşlandırmanın mekanik özellikler üzerinde etkisini belirlemek için borulara 1, 2, 3 hafta süresince, 80 °C'de ve saf su ortamında yaşlandırma uygulanmıştır. Sıcaklığın 80 °C olarak belirlenmesi epoksi reçine ile üretilmiş kompozit

malzemelerin maksimum servis sıcaklığının bu sıcaklık değerine yakın oluşudur.(Zhong ve ark., 2018). Yaşlandırılmış borular ve yaşlandırılmamış kontrol grubu borulardan ASTM D 2290-16 prosedür A standartlarına göre belirlenmiş numune geometrileri kesilerek elde edilip bu standarta göre halka çekme deneyi yapılmıştır. Borulardan kalan 15 cm'lik kısma ise bağlantı elemanları yataklanarak sabitlenmiş ardından 6.35kg kütleyle 24 mm çapında yarı küresel yüzeye sahip vurucu ile 5, 10 ve 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi uygulanmıştır. Halka çekme deney verileri ve numunelerin darbe karakterizasyonu grafiklerle değerlendirilmiş, düşük hızlı darbe deneyi verileri ile kuvvet-zaman (f-t), kuvvet-deplasman (f-d) ve halka çekme deneyi verilerinin maksimum teğetsel gerilme mukavemeti grafikleri çizilmiştir. Düşük hızlı darbe deneyi sonucu oluşan mekanik hasarlar, optik mikroskop ile görüntülenmiştir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Birden çok malzemenin birleştirilmesi ile oluşturulan kompozitler kuvvet ve darbe etkilerinin yönüne göre farklı mekaniksel cevaplar veren anizotropik malzeme gruplarındandır. Bu durum üstün mukavemet, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra kompozit malzemelerde lameller arası ayrışma, çatlak ilerlemesine karşı düşük direnç, sertlik ve düşük kırılma tokluğu gibi olumsuz özellikleri de getirmektedir. Bu özellikler kompozit malzemelerin kullanım alanlarında karşılaşılabilecekleri fiziksel ve kimyasal etkilere göre tasarlanmasının önemini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla kompozit malzemelerle yapılan deneysel çalışmalarda, malzemenin endüstri içerisinde çalışma şartlarının özelliklerini oluşturmak önem arz etmektedir.

Filaman sarma metodu ile oluşturulmuş karbon fiber/epoksi boruların mekanik özelliklerini, kullanılan elyaf dışında sarım açısı, sarım gerginliği ve matris yapı belirlemektedir. Matris yapı çeşitleri, matris içerisine ilave edilen farklı ve değişken oranlarda nanopartiküller ile kompozit malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri büyük değişiklikler göstermekte, ayrıca karbon fiberlerin pürüzsüz ve inert yüzeylerinden dolayı oluşan fiber-matris arasındaki zayıf arayüz yapışmasına olumlu katkı sağlamaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmaların önemli kısmı matris özelliklerini iyileştirme yönünde olmuştur. Son dönemlerde benzersiz atom yapısı, yüksek hacimi, düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemeti (Thostenson ve ark. 2001) ile KNT, kompozit alanındaki çalışmalarda önemli bir nanopartiküldür.

İlave edilen KNT'ler, matris içerisinde düzenli dağılmak yerine "van der waals" bağ kuvvetinin etkisi ile toparlanma eğilimi gösterirler ve nanopartikül yüzeyi ile matris arası temas azalır. Lau ve ark. (2002) matris yapısı içerisine ilave edilen ticari KNT'lerin mukavemeti çok az artırdığını veya düşürdüğünü rapor etmişlerdir.

Zang ve ark. (Zang ve ark., 2016) yaptıkları çalışmada T1000G-12k karbon fiber ile sarım gerginliği 25 N olarak üretilmiş filaman sarım boruların halka çekme gerilmesini ve lameller arası kesme mukavemetini incelemiştir. Saf epoksi reçine, kütlece % 3 ve % 6 NH<sub>2</sub> ve % 3 butil glisidil eter ile fonksiyonlaştırılmış,  $\geq$ % 95 saflıkta ve 10-20 nm boyutunda L-ÇCKNT ilaveli epoksi reçine kullanmıştır. L-ÇCKNT reçine içerisinde dağılması için oda sıcaklığında 400 d/dk 10 saat, ardından kürleştirme elemanın ilavesi ile 800 d/dk hızda 30 dk mekanik olarak karıştırılmıştır. Bu sayede nanopartiküllerin reçine içerisinde homojen dağılmasını sağlanmış ve boru numunelerinin imalatı sırasında

reçinelerin viskozitesini uygun değerde sabit tutulması başarılmıştır. Üretilen halka çekme numunelerin çapı 150 mm, genişliği 6 mm olmuştur. Yapılan çekme deneyi ve hesaplamalar sonucunda T1000 karbon fiber/saf epoksi çekme kuvveti 2700 Mpa iken, lameller arası kesme kuvveti 70 Mpa olmuştur. % 3 L-ÇCKNT ilavesi ile çekme gerilme mukavemeti % 14 artmış, 3100 Mpa değerine yükselmiş, % 6 L-ÇCKNT ilavesi ile değer % 15 artarak 3140 Mpa olmuştur. Aynı zamanda lameller arası kesme mukavemeti artışı % 23 ve % 26 oranında olmuştur. % 3 butil glisidil eter ile fonksiyonlaştırılmış numunelerde butil glisidilin çekme mukavemetini ve lameller arası kayma gerilmesini olumsuz yönde etkilemiştir.

Mujika ve ark. (Mujika ve ark., 2011), karbon fiber (T300) ve epoksi reçine (F-593) ile üretilmiş plakalar arasına püskürtme yöntemiyle ilave ettikleri epoksi reçineye kütlece % 0.1 fonksiyonlaştırılmamış ve kütlece % 0.1 fonksiyonlaştırılmış ÇCKNT numuneler üzerinde çatlak oluşumunu ve çatlak ilerleyişini incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda fonksiyonlaştırılmamış ÇCKNT lerin, saf epoksi reçinelere göre çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesi üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Fonksiyonlaştırılmış numunelerde ise çatlak oluşumu başlangıç tokluğu % 22 oranında artmış, çatlak ilerlemesine karşı dirençte ise % 14 oranında iyileşme olduğu belirtilmiştir.

Zhong ve ark. (Zhong ve ark., 2018), cam elyaf (CTP) ve karbon fiber (KTP) kumaşlarından aynı epoksi reçine (DGBA) kullanılarak ürettikleri 8 tabakalı kompozit levhalarda hidrotermal yaşlandırma üzerinde kapsamlı çalışma yapmışlardır. Üç aydan kısa süre 80°C sıcaklıkta saf su içerisinde daldırılarak yaşlandırılmış CTP ve KTP numuneler, yaşlandırma işlemi ardından 45°C sıcaklıkta fırınlanarak içerisindeki nem tamamen yok edilmiştir. Yaşlandırılmış numuneler ve yaşlandırmaya maruz bırakılmamış kontrol grubu numuneleri üzerinde ASTM D7130 standartında düşük hızlı darbe, ASTM D3039 standartında çekme deneyi uygulanmış, taramalı elektronik mikroskopu ile numunelerin mikro yapısındaki değişimler gözlemlenmiş ve son olarak nemin ve sıcaklığın cam fiber yapıya etkisini belirlemek için tek fibere 2.45 N kuvvetinde çekme testi yapılmıştır.

Çalışmada sonuç olarak aynı epoksi kullanılarak üretilmiş CTP ve KTP kompozit levhaların, hidrotermal yaşlandırmaya çok farklı reaksiyon gösterdikleri belirtilmektedir. Nemden arındırılarak yapılan mikro yapı incelemesinde, KTP levhaların yapılarında herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir, CTP levhalarda yapılan incelemede ise, farklı yönde elyaflar arasında mikro çatlakların oluştuğu ve matris-elyaf arasındaki bağlanmanın yazıfladığı görülmüştür. Düşünülenin aksine hidrotermal yaşlandırma ile

kütlece % 3.149 oranında nem hapseden KTP levhaları, düşük hızlı darbe deneyinde darbe karşılama mukavemeti artmıştır. KTP levhalarda en yüksek temas kuvvetinin % 20.60 oranında arttığı, buna ters olarak 80°C'de 912 saat yaşlandırmaya bırakılan CTP levhalarda, en yüksek temas kuvvetinin % 33.44 azalma olduğu belirtilmektedir. Yaşlandırılma işlemi sonucu kompozit levhalar mukavemet kaybetmişlerdir. Yaşlandırma işlemi ardından kurutma ile nemden arındırılan KTP levhalar için mukavemet ve elastisite modülü değerlerinde kayıp sırasıyla % 4.25 ve % 5.59 olmuştur. CTP levhada mukavemet kaybı % 28.53, tek cam fiberde ise çekme mukavemeti % 29.72 azalmıştır. Cam fiberin ve CTP plastikteki çekme mukavemeti oldukça düşmesine rağmen elastisite modülleri kontrol numunelere göre neredeyse değişmeden kalmıştır. Aynı epoksi içermelerine rağmen KTP ve CTP levhaların hidrotermal yaşlandırmaya bu denli farklı reaksiyon göstermelerinin muhtemel iki sebep gösterilmektedir. Bunlardan birincisi KTP levhaların takviyeye göre reçine oranının % 41.67 iken CTP levhalarda % 33.1 olması, ikinci muhtemel sebep ise levhaların dokuma şeklinin nem transfer davranışlarına etkisi olarak belirtilmiştir. Deney sonuçları KTP levhaların CTP levhalara göre çevresel şartlara çok daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Açık denizlerde petrol sondaj gemilerinde CTP borular kullanılmaktadır. Çalışma esnasında borular çok yüksek ve düşük sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar. Bu sıcaklık farklılığı sebebi ile kompozit borularda fiber ve matris yapıda genleşme katsayılarının farklılığından dolayı farklı oranla genleşme olmaktadır. Farklı oranda genleşme sonucu kalıcı gerilmeler oluşmakta, matris ve fiber bağlantıları zayıflama ve kopma meydana gelebilmektedir.

Benyahia ve ark. (Benyahia ve ark., 2018) filaman sarım yöntemi ile  $\pm 55^\circ$  sarım açısı 24 sarım sayılı CTP borularda termal koşulların etkisini incelemiştir. ASTM D 2290 standartlarına göre hazırlanan numunelere -40, -20, -10, 0, 20, 40, 60, 80°C sabit sıcaklıklarda halka çekme deneyi yapmış ve her bir sıcaklıkta numunelerin kopma mukavemeti, kopma uzaması, elastisite modülü ve deformasyon mekanizmasını incelemiştir. Her parametrede üç'er kez tekrarlanan deneyde -40°C de ortalama kopma kuvveti 84.31 kN şekil değiştirmeye karşı direncin 65.22 kN/mm, kopma uzamasını 1.45 mm olarak belirlenmiştir. 80°C de yapılan halka çekme deneyinde ise bu değerler sırasıyla 31.45 kN, 6.54 kN/mm, 5.63 mm olmuştur. Kuvvet ve şekil değiştirme grafikeleri incelendiğinde maksimum tokluk 40°C sıcaklıkta numunelere yapılan çekme deneyinde olmuştur. Kompozit boruların yüksek ve düşük sıcaklıklarda çok farklı sonuç göstermesi şu şekilde açıklanmaktadır, Fiber ve matris yapıyı oluşturan malzeme

bileşenlerinin termal genleşme katsayısı birbirinden farklıdır. Yüksek sıcaklıklarda genleşme sonucu matris ve fiber bağ zayıflaması ve ayrışma gözükmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise matris ve fiber yapı bağlanma kuvveti artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda matris yapısının sünekliliği artmaktadır, bu sebeple yüksek sıcaklıkta çekme deneyi sonucunda malzemelerin kopma uzaması artmıştır. Düşük sıcaklıklarda matris yapısının sertleşmesi ile kopma uzaması azalmakta, malzeme gevrekleşmekte ve malzemenin mukavemet değeri artış göstermektedir. Tüm numunelerde maksimum mukavemeti belirleyen hasar mekanizması matris çatlaması, delaminasyon ve fiber kopması şeklinde olmuştur. Düşük sıcaklık ve statik yükler altında kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklağa göre çok daha iyi üstün mekanik özellik sergilemektedir ve çalışma ortam koşulları kompozit malzemelerin performansını belirlemektedir.

Kara ve ark. (Kara ve ark, 2018) kriyojenik ortamda, 0 °C sıcaklıkta ve oda sıcaklığında kütlece % 0.3 ve saf epoksili [ $\pm 55^\circ$ ]<sub>4</sub> filaman sarım tekniği ile üretilmiş karbon fiber/epoksi kompozit borularda düşük hızlı darbe deneyi uygulamışlardır. Deney verileri kullanılarak kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman grafiklerini çizmiş ve deney numunelerinin SEM görüntülerini incelemiştirlerdir. Oda sıcaklığı ve 0 °C de yapılan düşük hızlı darbe deneyinde ÇCKNT ilaveli numunelerde nanopartiküllerin kompozit yapının rijitliğini artırması sebebiyle daha yüksek maksimum darbe teması kuvveti değeri oluşmuştur. Beklenen aksine kriyojenik ortamda (-196, -100, -50°C) yapılan düşük hızlı darbe deneyinde numunelerin maksimum darbe teması kuvveti sıcaklığın düşmesi ile orantılı olarak azalmaktadır. Bu durum kriyojenik ortamda yapılan darbe deneyi sonucu kompozit yapılarda hasar oluştuğunu göstermektedir. ÇCKNT ilaveli numunelerde maksimum darbe teması kuvvetinin sıcaklık düşüşüne orantılı olarak saf epoksili numunelere yaklaştığı belirtilmiş ve kriyojenik ortamın matris yapıda mikro çatlaklar oluşturduğu gözlemlenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kompozit malzemeler ve üretim teknikleri, takviye malzeme olan cam elyaf ve karbon fiber çeşitlerinin özellikleri, matris yapı ve nanopartiküller hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

#### 3.1.Kompozit Malzeme

Kompozit malzemeler, birbirlerinden farklı özellikte ve birbiri içerisinde çözünmeyen en az iki malzemenin makro boyutta birleştirilmesi ile oluşturulan yeni malzemelerdir. Kompozit malzeme oluşturulmasında amaç birleştirilen malzemelerin birlikte kullanılması ile zayıf yanlarının giderilmesi ve malzemelerin zayıf özelliklerinden dolayı faydalanılmayan üstün özelliklerini kullanılabilir hale getirmektir.

Polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli olarak üç ana gruba ayrılan kompozit malzemeler, yüksek mukavemeti düşük ağırlığı, üstün korozyon da ve termal dayanımı, iyi seviyede elektrik ve akustik iletkenliği, estetik görünümü, yeni üretim teknolojilerine olanak sağlaması ve sürekli düşen maliyeti ile gelecekte birçok endüstriyel malzemenin yerini alacaktır.

Kompozit malzemeler matris ve takviye yapı olmak üzere birbirini tamamlayan iki ana bileşenden oluşmaktadır. Kompozit içerisinde bağlayıcı ve destekleyici yapı matris yapısıdır. Matris yapının görevleri takviye elemanlarını bir arada tutmak ve malzeme üzerinde oluşacak gerilmeleri takviye yapıya homojen şekilde aktarmaktır. Malzemeye bir yük uygulandığında, düşük mukavemetli matris yapının şekli bozulur ve gerilmeyi yüksek mukavemetli takviye yapıya dağıtır. Dolayısıyla kompozit yapının mukavemet özelliklerine etki etmesi ve yük taşıması beklenen yapı takviye elemanlarıdır. Takviye elemanları yüzeylerine yapışan matris yapı sayesinde bir bütün halinde bulunarak rijit kompozit malzemeyi oluşturmaktadırlar.

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri takviye ve matris yapılarının birbirine bağlanması ile oluştuğu için bu bağ oluşumunun güçlendirilmesi kompozit yapının performansını etkileyen en önemli kriterdir. Matris ve fiber arasındaki bağ gücünün artması kompozit yapının delaminasyon hasarına uğrama direncini artırmaktadır (Hsieh ve ark., 2018).

### 3.1.1. Takviye Elemanları

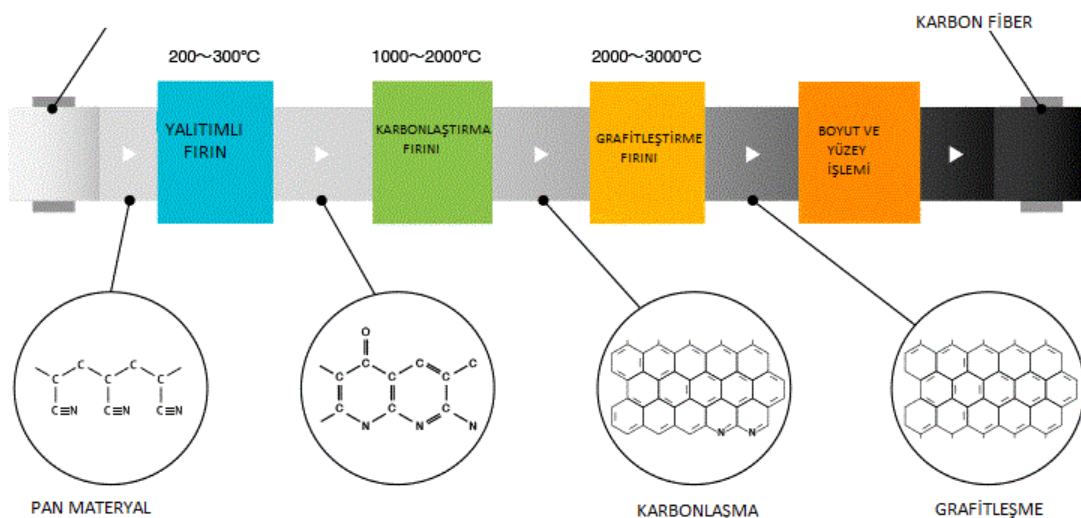
Kompozit yapının temel mukavemet elemanı olan takviye malzemeleri yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemeti ve sertliği olan düşük yoğunluklu malzemelerden seçilir. Takviye elemanın geometrisi kompozit malzemelerin mukavemetini oldukça etkiler. Takviye elemanları matris yapı içerisinde farklı şekilde yönlendirilerek anizotropik özelliği değiştirilebilir. Bu sayede kompozit yapının değişken yönlerde gerilmelere karşı mukavemet özelliklerini iyileştirmek mümkündür.

Polimer matris yapılarda en çok kullanılan takviye malzemesi sürekli elyaftır. Sürekli elyaflara filaman adı verilmektedir. Çoğunlukla filamanlar cam, karbon ve aramid malzemelerinin sürekli formundan oluşurlar.

### 3.1.2. Karbon Fiber

Sert, mukavemetli, düşük yoğunluklu, düşük termal genleşme katdayısına sahip ve kimyasal reaksiyonlara karşı dirençli lifli bir malzeme olan karbon fiber üretimi ilk defa 1950 yılında sunni selilozik elyaf olan rayonun ısıtılarak karbonlaştırılmasıyla başlamıştır. İlk üretilen fiber sadece % 20 oranında karbon atomu içermekte ve düşük mekanik özellikli sergilemektedir. 1960'lar da hammadde olarak PAN (poliakrilanitril), 1970'li yıllarda ise petrol zifti kullanılmıştır.

Günümüzde ise karbon fiberler üretiminin büyük kısmı PAN kullanılarak yapılmaktadır. Üretilen karbon lifleri en az % 90 oranında karbon atomu içermektedir. Karbon atomu içermeyen kısımda ise azot atomları bulunmaktadır. Şekil 3.1 de karbon fiber üretim şeması görülmektedir.



Şekil 3.1 Karbon fiber üretim şeması (Torayca)

Karbon fiberleri diğer malzemelerden ayıran temel özelliği mükemmel mukavemeti ve hafif olmasıdır. Karbon fiber yoğunluğu  $1.8 \text{ g/cm}^3$  iken çeliklerin yoğunluğu  $7.8 \text{ g/cm}^3$ , cam fiberlerin ve alüminyumun yoğunluğu ise sırası ile  $2.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.7 \text{ g/cm}^3$  olmaktadır. Düşük yoğunluğuna rağmen karbon fiber çeliklere göre 10 kata kadar çekme mukavemetine ve 7 kat daha fazla elastisite modülüne sahip olabilirler. Ayrıca karbon fiberler yorulmaya karşı çok dirençli, kimyasal ve termal etkilere karşı çok kararlı yapıdadırlar. Karbon fiber ve diğer malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Tüm bu üstün özelliklerinde dolayı karbon fiberler geleceğin malzemesi olarak görülmektedir.

**Çizelge 3.1** Karbon ve diğer mühendislik malzemelerinin mekanik özellikleri.

Fiber Malzemesi	Yoğunluk $\text{g/cm}^3$	Elastisite modülü (Tpa)	Mukavemet (Gpa)	Kopma uzaması (%)
Yüksek Mukavemetli Çelik	7.8	0.2	4.1	< 10
Karbon Fiber (PAN)	1.7	0.2 - 0.6	1.7 - 7	$0.3 < 2.4$
Karbon Fiber (Zift)	2 - 2.2	0.4 - 0.96	2.2 - 3.3	0.27 - 0.6
E/S Cam Elyaf	2.5	0.07/0.08	2.4/4.5	4.8
KNT	1.3 - 2	1	10 - 60	10
Kevlar 49	1.4	0.13	3.6 - 4.1	2.8

### 3.1.3. Matris Yapı

Matris yapının görevi kompozit içerisinde takviye elamanları bir arada tutmak, takviye elamanlarına gelen yükün bir kısmını karşılamak ve takviye elemanlarını çevrenin olumsuz etkilerine karşı korumaktır. Matris yapı takviye yapıya göre daha zayıf, sünek ve esnektir. Kullanılan matris yapı özelliklerine bağlı olarak kompozitin kimyasal ve fiziksel özellikleri etkilenmektedir.

Kompozit malzemelerde seramik, metal ve plastik (polimer) matrisler kullanılmaktadır. Polimer kelimesi Yunanca çok anlamına gelen poly ve parçalı anlamına gelen meros kelimelerinden oluşmaktadır. Polimer matrisler termoset matris ve termoplastik matris olarak ikiye ayrılırlar.

### 3.1.4. Termoset Matrisler

Plastik türevlerinde olan termosetler, epoksi reçine, fenolik reçine ve silikon çeşitleri ile termoset matris olarak kompozit malzeme üretiminde kullanılırlar. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, kritik bir sıcaklığın üzerinde ise çapraz şekilde üç boyutlu kovalent bağlar oluşturarak polimerleşir, kalıcı olarak sertleşir ve sağlamlaşırlar. Kalıcı olarak sertleşen termosetlerin termoplastiklerin aksine geri dönüşümü yoktur. Yüksek sıcaklıklara mağruz bırakıldıklarında küçülür ve yanarlar. Termosetlerin elastisite modülü termoplastiklere göre 2, 3 kat daha fazladır. Termoplastiklere göre yüksek sıcaklığı daha dayanıklı ve daha az süneklik özelliği gösterirler. Yaygın olarak kullanılan termoset matrislerin özellikleri Çizelge 3.2 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Yaygın olarak kullanılan termosetler (Mallick, 2008)

Özellikler	Vinil Ester	Epoksi	Fenolik
Özgül Ağırlık, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.2	1.2-1.3	1.3
Elastisite Modülü, E (GPa)	3.3	4.5	3.0
Çekme Dayanımı, $\sigma$ (MPa)	75	130	70
Kopma Uzaması (%)	4	2-6	2.5
Maksimum Çalışma Sıcaklığı, T <sub>ç</sub> (°C)	100	90-200	120-200

Plastik içerisine elyaf takviyesi ile üretilen kompozit malzemelerde yaygın olarak epoksi reçine kullanılır. Epoksi reçineler takviye elemanlarına polyester reçinelere göre yaklaşık 4 kat daha fazla kuvvetle bağlanırlar, çatlak oluşumuna deformasyona ve neme karşı polyester reçinelere göre oldukça dirençlidirler. Dolayısı ile epoksi reçine ile hazırlanmış kompozitlerin kullanım ömrü çok daha uzun, mekanik özellikleri çok daha iyi olmaktadır. Epoksi reçinenin polyesterlere göre tek dezavantajı çok daha pahalı olmalarıdır.

### 3.2. Tabakalı Kompozitler

Farklı elyaf yönelmeleriyle oluşturulan levhaların bir bağlayıcı ile yapıştırılarak birleştirilmesi sonucu en az iki tabakadan oluşturulan yapıya tabakalı kompozit denmektedir. Tek kompozit levha çoğu zaman yeterince mukavemet sağlamamaktadır. Bu sebeple malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile yapılan tabakalı kompozitler her tabakada birbirinin özelliklerini olumlu etkileyecek aynı türden farklı yönlendirilmiş veya farklı tür kompozit levhalaradan oluşurlar. Burada amaç tabakaların birbirini destekleyerek birbirlerinin zayıf yönlerini örtmesi ve farklı

çevresel koşullara karşı malzemenin özelliklerinin iyileşmesidir. Farklı tip tabakalardan oluşan kompozitlere karma (hibrit) tabakalı kompozitler denmektedir. Oluşturulan tabaka sayısı artırılarak kompozit malzemenin özellikleri iyileştirilebilir.

Tabakalı kompozitler metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

### **3.2.1. Polimer Esaslı Tabakalı Kompozitler**

Çeşitli polimer esaslı malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla farklı kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumalara silikon emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir. Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar halinde birleştirilerek, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya benzer etkilere dirençli, çok hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler çeşitli zırh kalkan ve benzeri elemanların yapımında da kullanılmaktadır. Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemelerin çok değişik türleri mevcuttur ve farklı alanlarda kullanılmaktadır.

## **3.3. Kompozit Üretim Yöntemleri**

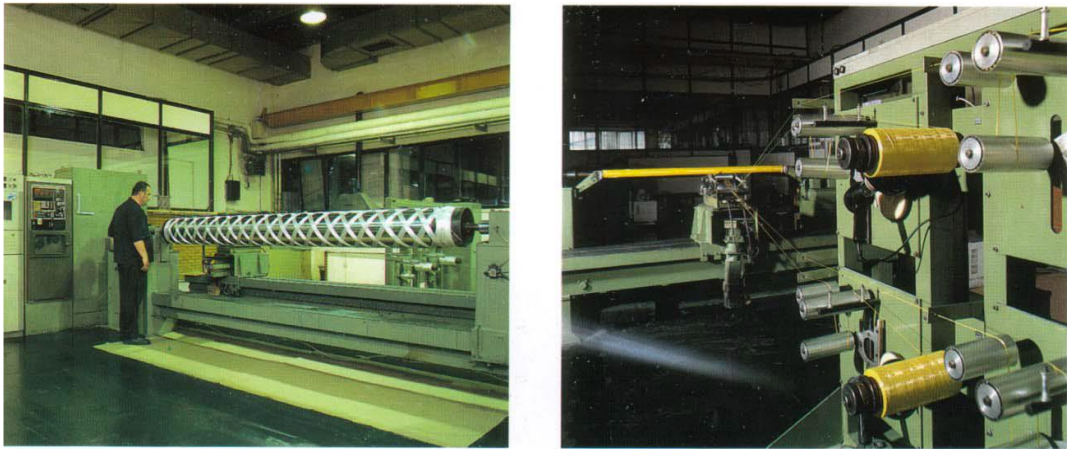
Kendisini oluşturan bileşenlere göre birçok endüstriyel üretim şekli olan kompozit malzemeler havacılık, deniz taşıtları, yapı, otomotiv ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin üretim şekli malzemenin kullanım amacına yönelik sağlanmak istenen özelliklere göre değişmektedir. Başlıca kompozit malzeme üretim teknikleri; el yatırma yöntemi, püskürtme yöntemi, sürekli kalıplama, filaman sarma, santrifüj kalıplama ve torba ile kalıplama (otoklav) yöntemleridir.

### **3.3.1 Filaman Sarım Metodu**

Sürekli elyafların, reçine ile ıslatılarak veya daha önce reçine emdirilmiş formunun, belirli bir hızda dönen mandrala gerilme ile birlikte iki ya da daha fazla eksenle hareketle sarılması ile yapılan üretim tekniğine filaman sarma yöntemi denmektedir. Mandral üzerine reçine ile ıslatılarak ya da önceden reçine emdirilmiş şekilde sarılan fiberler, kullanılan reçine türüne bağlı olarak belirli sıcaklıkta kürlenir, kullanılacakları alana göre mandralden çıkarılır veya mandral ile kullanılırlar.

Daha önce reçine emdirilmiş elyafların sarılması işlemine kuru sarım denmektedir. Kuru sarım sırasında elyafların deformasyona uğrama ihtimali vardır. Islak sarım yönteminde ise termoset reçinenin sabit kalabilmesi için sıcaklık parametresinin sabit tutulması ve sürekli olarak proses kontrolü yapılması gerekmektedir.

Islak filaman sarım yönteminde, sıcaklıkla birlikte dikkat edilmesi gereken diğer parametre ise takviye malzemesinin gerginliğidir. Elyaf gerginliği, elyaf/matris oranına ve kompozit yapıdaki gözenek yoğunluğuna doğrudan etki etmektedir. Gerginliğin yüksek olduğu sarımlarda takviye malzemesi oranı fazla olacaktır. Ayrıca gerginlik sebebiyle, takviye elemanları matris tarafından yeterince ıslatılamayacaktır. Takviye elemanlarının yeterince ıslatılmaması ve gergin bir şekilde mandral üzerine sarılması sonucu kompozit yapının sertliği artmış olsada yeterince fiber-matris arayüzü oluşmamakta ve birbiri üzerinde sürtünen fiberler neticesinde aşınmalar oluşmakta, matris fiber arasında kuvvet aktarımı yeterince olmamaktadır. Gerginliğin düşük tutularak yapılan sarma işleminde ise matris yapı kompozit içerisinde homojen olarak dağılmamakta, sarılan takviye malzemelerinde düzensizlik oluşmakta, fiber/matris oranı düşmekte ve kompozit yapının mekanik özellikleri bozulmaktadır. Sarma gerilimi fazla olursa aşırı sıkışmadan dolayı iç ve dış tabakalarda elyaf ile reçine arasında önemli farklılıklar olur. Mandralin dönme hızı oluşturduğu merkezkaç kuvveti nedeniyle fiber matris oranını etkileyen diğer bir etkidir. Fazla gergin sarma ayrıca elyafa bir ön gerilme etkisi yapacağından yük taşıma kabiliyetini azaltır ve mandrelde çökmelere sebep olabilir. Sarma gerilimi düşük olursa boşluk miktarı artar. Bu da tabakalar arası kayma mukavemetini azaltır (Akdemir, 1992)



Şekil 3.2 CNC kontrollü filaman sarım (Şahin, 2004)

Filaman sarım yöntemi diğer kompozit üretim yöntemlerine kıyasla düşük maliyetlidir ve bilgisayar kontrolüyle yapılan üretim ile çok düşük toleranslara ulaşmak mümkündür. Bilgisayar kontrollü filaman sarımı şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu yöntemle üretilen malzemelerde herhangi boyut kısıtlaması yoktur. Büyük mandral kullanılarak büyük geometriler oluşturulabilirken, mandrale istenilen sayıda fiber sarımı yapılabilmektedir. Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına göre farklı açılarda ve yönlerde filaman sarım yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerin başlıcaları helisel, aksenel ve kutupsal sarma yöntemidir. Bu sayede istenilen boyutlarda boru, basınçlı kap üretiminde ve roket-füze gövdelerinin üretiminde kullanılmaktadır.

### 3.4. Nanoteknoloji

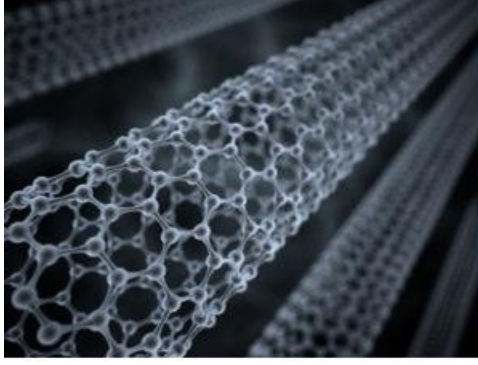
Modern çağın, bilimin gelişmesi ile ortaya çıkan gereksinimler gittikçe artmaktadır. Nanopartikül fikri ilk olarak 1959 yılında fizikçi Richard Feynman tarafından ortaya atılmıştır.

Boyutları 1 ile 100 nm ( $m \times 10^{-9}$ ) olan her büyüklük nanoteknoloji kapsamına girmektedir. Malzemeler nano boyutta incelendiğinde, küçük boyutlarda yapısal kusurların daha az görüldüğü ve nano boyuttaki yapıların ilgi çekici özellikler sergilediği görülmektedir. Nano boyuttaki yapılar, kendisini oluşturma atomlarından ve kendisinin makro ölçekteki yapısından oldukça farklı özellik sergilemektedir. Birim miktarda çok büyük yüzey alanı sergilemelerinden dolayı nanopartiküller çok hızlı kimyasal etkileşime girmekte ve bu sayede birçok kimyasal işlemde katalizör olarak kullanılmaktadır. Malzemedeki nano boyutunda yapılan değişiklikler, yapı içerisine nanopartikül ilavesi makro ölçekte özellik değişimine sebep olur.

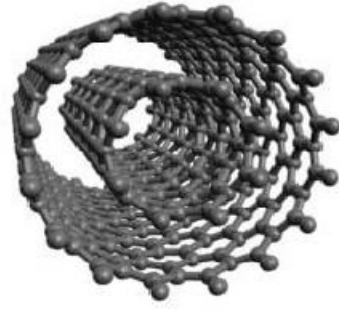
2020 yılına kadar dünya ekonomisinde 3 trilyon dolar pay edinmesi öngörülen nanoteknoloji elektronik, sağlık, malzeme, kimya ve tarım endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 3.4.1. Karbon Nanotüpler

Her bir karbon atomunun, kendisine komşu üç karbon atomu ile kovalent bağ yaparak beşgen geometrik şekilde birleşmesiyle bal peteği şekli grafen levha oluşur. Grafen levhanın kıvrılarak katlanması ile uzunlukları çaplarına göre oldukça büyük karbon nanotüp (KNT)’ler oluşmaktadır. Tek duvarlı ve iç içe geçmiş sarmallardan oluşan formu ile çok duvarlı olarak ayrılan KNT’ler şekil 3.3 te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 a) Tek duvarlı KNT



b) Çok duvarlı KNT

(<https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4843&azosrc=downloadpdfcopyemail>)

C-C bağlarından oluşan KNT'lere dışarıdan bir kuvvet uygulandığında bu bağlar şekil değiştirirler. Kuvvet ortadan kaldırıldığı zaman bağlar hemen eski pozisyonuna döner. Bu özelliği ile KNT'ler, çok yüksek elastisite modülen sahip olmalarına rağmen üst düzeyde elastiklik sergilemektedirler.

Yüksek mukavemet ve tokluk değerlerine karşın çok hafif olmaları nedeni ile KNT'ler, kompozit malzemelerin değerli bir parçası haline gelmişlerdir. Kütlece çok az miktarda eklenerek homojen olarak karıştırıldıkları matris yapıda, yaklaşık  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  yüksek yüzey hacim oranlarıyla, kompozit malzemelerin termal özelliklerine, malzemeye etki eden kuvvet dağılımına ve transferine, takviye ve matris yapılarının bağ kuvvetinin artmasına olumlu etki etmektedir.

Karbon bağlarının oluşturduğu yüksek titreşim mükemmel seviyede termal ve elektriksel iletkenlik oluşturmaktadır. Bu özellikleri sebebi ile KNT'ler, moleküler elektronik, iletken plastik, termal materyal alanlarında yaygın şekilde kullanılmakta ve KNT üzerlerinde araştırma faaliyetleri yoğun şekilde devam etmektedir.

### 3.4.2. Bor Nitrür

Hidrojen ve Azot atomlarının birleşmesiyle oluşan BN'ler, kristal yapıda bulunup hegzagonal (H-BN) ve kübik (C-BN) olmak üzere ikiye ayrılırlar. BN'ler, bilinen en sert malzemelerdendir. BN'ler, katı yağlayıcı özellik sergilerler ve ısıya, korozyona ve kimyasal reaksiyonlara karşı dirençleri yüksektir. Bu özelliklerinde dolayı hızlı kesim ve metal işlenmesinde, yüzey kaplamalarında ve polimer malzemelerin içerisinde kullanılırlar. Yüksek ısı iletkenliği göstermelerine rağmen elektrik iletkenliği çok düşük olan BN'ler, izolasyon malzemesi olarak kullanılmaktadırlar.

### 3.5. Nanokompozitler

Nanokompozit; bir tanıma göre, kompozit yapıyı oluşturan fazlardan birinin bir, iki veya üç boyutundan biri veya birkaçının 100 nanometre'den (nm) küçük olduğu ya da kompozit malzemeyi oluşturan fazlar arası nano ölçekli mesafelere sahip, çok fazlı katı yapılarıdır. En geniş anlamda bu tanım gözenekli ortam, kolloidler, jeller ve kopolimerler için kullanılabilir. Fakat genel olarak asıl matris kütlesinde nano boyutlu yapısal ve kimyasal farklı fazların birleşimi ile açıklanır. Nano kompozitlerde mekanik, elektriksel, termal, optik ve elektrokimyasal özellikler, bileşen materyallerinden belirgin farklılıklar göstermektedir (Kamigaito, 1991; Aktaran: Karabulut, 2017).

Commarata (Commarata, 2006; Aktaran: Okpala, 2013), nanokompozitlerle alakalı olarak şu sınıflandırmayı yapmıştır. Nanokompozitler iki ana fazla ifade edilirler. Bunlar takviye yapı ve takviye edilen matris yapısıdır. Nanokompozitler mikro yapısal olarak sınıflandırıldığında üç ana gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar; a) takviye lamellerin nano boyutta olduğu nanokompozitler, b) çapı nano boyutta olan filamanın sarılması yöntemi ile üretilen nanokompozitler, c) matris içerisine nanopartikül ilavesi ile üretilen nanokompozitleridir.

Nanokompozitlerin özellikleri, kendisini oluşturan yapıların morfolojileri ve birbirleri ile olan etkileşimleri sonucu değişmektedirler. Örneğin matris yapı içerisine az oranda eklenen karbon nanotüpler, çok yüksek yüzey hacim oranlarından dolayı kompozit yapıyı oluşturan fazların birbiri ile olan etkileşimini artırmakta ve kompozit yapıya mukavemet kazandırmaktadır. Ayrıca KNT'lerin yüksek ısı iletkenliği sayesinde kompozit malzemenin ısı iletkenliği değişmekte ve malzeme termal çarpımalara karşı direnç kazanmaktadır. Metal matris, seramik matris ve polimer matris olarak katagorize edilen nanokompozitlerin kattığı üstün özellikler şu şekilde olabilir;

- Malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesi; mukavemetinin ve elastisite modülünün yükselmesi.
- Elektriksel ve termal iletkenliğinde artma.
- Gaz, nem ve hidrokarbon geçirgenliğinde azalma.
- Alev, tutuşmaya karşı koruma.
- Kimyasallara karşı direnç.

### 3.6. Hidrotermal Yaşlanma

Korozif ortamlara karşı dirençleri sebebi ve yüksek mukavemet düşük ağırlıklarıyla malzemelerin yoğun olarak nem ve ısıya maruziyetinin bulunduğu, alt yapı su ve kanilazyon şebekelerinde, açık deniz sondaj gemilerinde, yat ve tekne yapımında

kompozit malzemeler tercih edilmektedirler. Her ne kadar üstün özelliklere sahip olsalarda, kompozit malzemelerin deformasyonu, malzeme fonksiyonunu yitirinceye dek geleneksel metal malzemeler kadar belirgin olmamaktadır. Gaz ve yağ endüstrisinde kullanılan kompozit malzemeler, sektörde olası malzeme kusurundan kaynaklanacak aksaklıkların felakete dönüşebilme potansiyeli sebebi ile malzeme üreticileri tarafından sıklıkla kontrol edilmektedirler. (Krishnan ve ark., 2016).

Kompozit borular, çalışma ortamlarında neme, yüksek sıcaklığa, saldırgan korozif ortama, malzemede sürünmeye sebep olabilecek sürekli yüke veya yorulmaya sebep olabilecek tekrarlı yüke maruz kalabilirler. Tüm bu etkenler tek başına olabileceği gibi etkenlerden birkaçı ya da hepsi aynı anda görülebilmektedir. Su, nem, sıcaklık ve korozif ortam malzemenin mekanik dayanımını olumsuz olarak etkilemektedir. Neme ve suya uzun süreli etkileşimleri sonucunda kompozit malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri değişime uğrar. Bu olaya genel olarak yaşlanma denilir. Birçok yaşlanma türü olmakla birlikte bunlardan en önemlilerinde birisi hidrotermal yaşlanmadır. (Akın, 2018).

Nemli ortama maruz kalan polimer matrisli kompozitlerde, su molekülleri polimer matris tarafından absorbe edilir. Absorbe edilen su molekülü osmoz ile fiber matris arayüzeyine yerleşir, bu durum fiber matris arayüzey bağlanmasını zayıflatır, fiber doğrultusunu bozar, hatta ileri safhalarda elyaf kopmasına sebep olabilir. Nem etkisi ortadan kalkıp malzeme kurusa dahi su moleküllerinin bulunduğu yerlerde mikro seviyede boşluklar kalmaktadır.

Kompozit malzemenin maksimum çalışma sıcaklığını matris yapı belirlemektedir. Yüksek sıcaklıklarda matris yapı özelliğini kaybetmektedir. Isı etkisi ile kimyasal özelliğini kaybeden matris yapıda polimerleşme görülebilmektedir. Matris ve elyaf yapının, ısıl genişleme katsayısı birbirinden farklıdır ve sıcaklığa maruz kaldıklarında farklı oranlarda genişleme göstermektedirler. Çok yüksek ve çok düşük sıcaklıklara maruziyet kompozitlerde gerilmelere, matris çatlamasına, fiber matris arayüzey ayrışmasına ve fiber kopmasına sebep olabilmektedir.

Sıcaklık, nem ve korozif ortamın birlikte etkili olduğu durumlarda, tüm bu deformasyon mekanizmaları hızlanmaktadır. Sıcaklık ve nem etkisi altında matris yapı osmatik basıncın etkisi ile şişer. Malzemenin şişmesi yapının su moleküllerini absorbe ettiğini göstermektedir. Fakat deneysel çalışmalarda su absorbe eden malzemelerin, kurtulduklarında başlangıç kütlelerinden daha hafif oldukları belirtilmektedir. Bu durum hidrotermal yaşlanma sırasında matris reçinenin nem ve sıcaklık ile kısmen çözünerek dış

ortama karıştığını göstermektedir. Nanopartiküller sulu ortamlarda difüzyon yolu ile matris yapıyı terk edebilmektedir.

### 3.7. Mekanik Testler

Hiçbir malzeme kusursuz ve mutlak rijit değildir. Bu sayede malzemeler işlenilebilir ve kullanılabilirler. Kuvvet etkisi ya da çevresel koşullarla gerilmeye maruz kalan malzemenin şekil değiştirmesine, malzemenin gerilmeye karşı verdiği tepkiye, mekanik özellik denmektedir. Mekanik özellikler, malzemenin atomlar arası bağ kuvvetlerinden, malzemenin mikro yapısından, imalat yöntemlerinden, yapısal kusurlardan ve çevresel koşullardan etkilenmektedir.

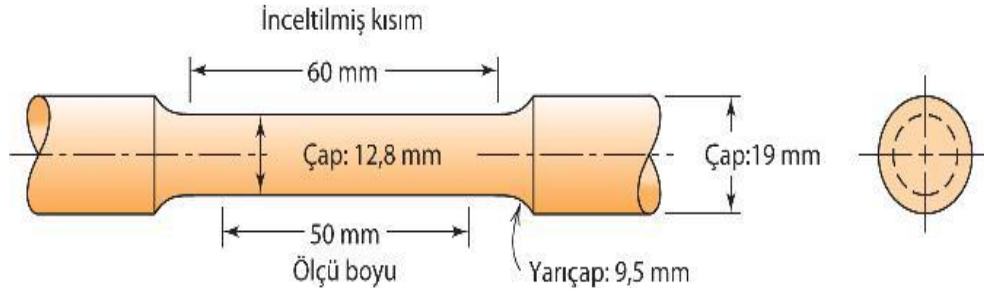
Malzemelerin mekanik ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi, uygulama esnasında malzemedeki beklenen performansın sağlanmasının ön koşuludur. Bu sebeple belirli standartlarda malzemeler için mekanik testler geliştirilmiştir. Temel olarak statik ve dinamik test olmak üzere ikiye ayrılan mekanik testlerden statik testler, çekme/basma, sertlik ve sürtünme, dinamik testler ise darbe ve yorulma testinden oluşmaktadır.

### 3.8. Çekme Testi

Malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan mekanik test çekme testidir. Malzemelerde, çekme testi ile elde edilen tek eksenli gerilmeden malzemenin başka yükleme biçimleri altındaki davranışı tahmin edilir. Bu testte statik yük altında malzemelerin dayanabileceği maksimum gerilme, malzemenin deforme olmadan çalışacağı elastik şekil değiştirme gerilmesi, malzemenin plastik şekil değiştirme gerilmesi belirlenmektedir. Ayrıca malzemenin gerilme esnasında kompmadan gösterdiği şekil değişikliğinin, yani tokluğunun bilinmesi mühendislik tasarımı açısından önemli bir parametredir. Çekme deneyi ile elde edilen mekanik özellikler, tasarım esnasında bir güvenlik katsayısı ile birlikte kullanılır.

Standartlara uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri, çekme cihazlarının çenelerine bağlanırlar. Çekme cihazı çeneleri birbirlerine zıt yönde sabit hızla ve değişken kuvvetle hareket etmektedir. Çekme işlemi sırasında şekil değiştirme ve kuvvet parametreleri sürekli kaydedilmektedir. Çekme deneyi numune şekli ve boyutu olarak birçok standarta sahiptir. Tipik çekme numunesi şekil 3.4' te gösterilmiştir. Çekme numunelerinden sağlıklı sonuç alınabilmesi için, gerilmenin belli bir alanda yoğunlaşması istenmektedir. Bu yüzden deforme olmasını istediğimiz alanda çap

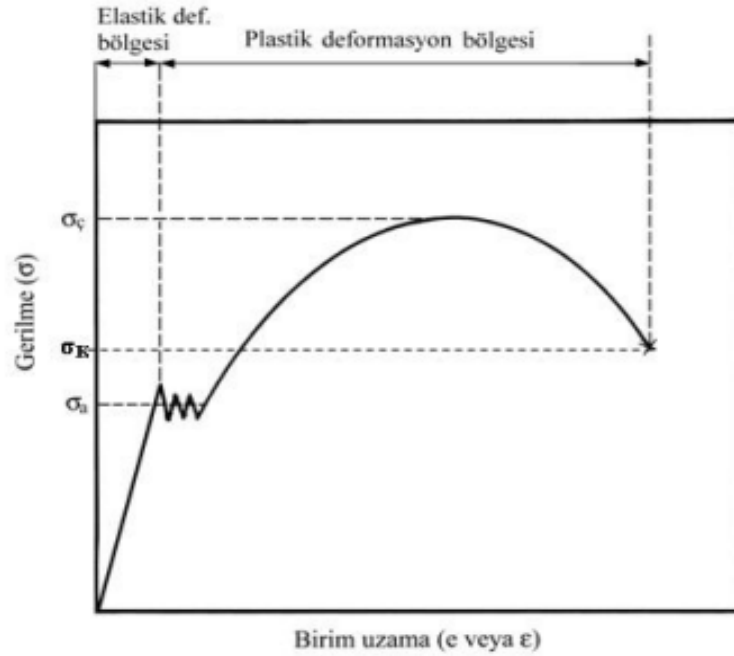
daraltılması işlemi yapılır. Daraltılmış yüzey uzunluğu, düşürülmüş çap değerinin en az dört katı büyüklüğünde olmalıdır.



Şekil 3.4 Standartlara uygun dairesel kesitli bir çekme numunesi (web.harran.edu.tr)

### 3.8.1. Çekme Grafiği ve Tanımlar

Malzemelerin birbirleri ile kıyaslanması ve sınıflandırılması amacı doğrultusunda çekme testi sonucu hesaplanan veriler ile gerilme ve şekil değiştirme grafiği çizilir (şekil 3.5). Malzemelerde gerilme altında oluşan fiziksel değişimler, gerilme ve şekil değiştirme grafiğinde gözlenebilmektedir. Malzemelerin üst-alt akma sınırları, plastik defermasyona geçiş noktası, maksimum kopma gerilmesi, elastisite modülü, tokluk ve rezilyans gibi mekanik özellikleri gerilme ve şekil değiştirme diyagramında belirtilir.



Şekil 3.5 Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı (www.harran.edu.tr)

*Gerilme ( $\sigma$ ):* Çekme testinde gerilme, birim yüzey alanına gelen, bu yüzey alanına dik ve parçayı uzamaya zorlayan kuvvet olarak tanımlanır. Normal gerilme olarak adlandırılan bu gerilme aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

Çekme gerilmesi sırasında boyuna uzayan malzemede enine kesit alanı daralacaktır. Bu durumda malzeme üzerindeki gerilme değişecektir. Fakat mühendislik uygulamalarında malzemenin kesit kalınlığının değişmediği kabul edilir. Bu kabul ile yapılan hesaplama mühendislik gerilmesi ya da klasik gerilme denmektedir.

*Birim Şekil Değiştirme ( $\varepsilon$ ):* Yüzey alanına dik olarak etkiyen kuvvet neticesinde malzemenin boyunda uzama olmaktadır. Malzemenin boyca uzamasının ilk halindeki boyuna oranı, birim şekil değiştirmeyi vermektedir.

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (3.2)$$

*Elastisite Modülü ( $E$ ):* Malzemede, birim uzamaya karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir. Bir değişik ifadeyle, malzemenin şekil değiştirme direncinin ölçüsüdür. Elastisite modülü, malzemeler için ayırt edici bir özelliktir. Malzemelerde normal gerilme ve şekil değişime arasında doğrusal bir ilişki vardır. Doğrusallık malzemenin elastik şekil değiştirme bölgesi için geçerlidir. Bu doğrusal ilişkiyi veren ifadeye "Hook kanunu" denmektedir.

$$E = \varepsilon \times \sigma \quad (3.3)$$

*Akma dayanımı ( $\sigma_y$ ):* Çekme diyagramında düzgünsüzlüğün başladığı bölgeye karşılık gelen gerilme değeridir. Akma dayanımının altında malzeme elastik özellik gösterirken, akma dayanımında kalıcı deformasyon mekanizmaları oluşmaya başlamaktadır. Malzeme içerisindeki mikro yapı farklılıkları ve küçük homojensizliklerden dolayı alt akma sınırı ve üst akma sınırı oluşmaktadır. Tasarımda, malzemelerin maksimum mukavemeti olarak alt akma değerleri güvenlik katsayısı ile değerlendirilerek kullanılır.

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A} \quad (3.4)$$

*Çekme dayanımı* ( $\sigma_c$ ): Çekme testi sırasında gözlenen en yüksek gerilme değeridir. Bu değere ulaşması ile malzeme ciddi deformasyona uğrar, çapında büyük oranda daralma olur ve mukavemet değeri hızlı bir şekilde düşer.

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (3.5)$$

*Kopma Dayanımı* ( $\sigma_k$ ): Çekme numunesinin koptuğu ve tamamen iki parçaya ayrıldığı gerilme değeridir.

$$\sigma_k = \frac{P_k}{A_0} \quad (3.6)$$

Kopan numunelerin, kopma yüzey şekilleri malzemenin sünekliği ve gevrekliği konusunda bilgi vermektedir. Sünek malzemelerde, kopma yüzeylerinde sünme, belirgin şekilde boyun verme ve şekil değişikliği görünürken, sert gevrek malzemelerde kopma yüzeyi pürüzsüz, düzgün ve parlak yapıdadır.

*Kopma Uzaması* ( $KU$ ): Eksenel yönde çekilen numunelerin boylarında uzama meydana gelmektedir. Test numunesinin ilk boyu ile son boyu arasındaki uzunluk farkı kopma uzamasını verir.

$$KU = \Delta L = L_1 - L_0 \quad (3.7)$$

Kopma uzamasının numunenin boyuna bağlılığından kurtulması ve değerlendirilmesi için yüzde kopma uzamasının hesaplanması gerekir. Bu hesaplama aşağıdaki gibi yapılır.

$$KU (\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (3.8)$$

*Kesit Daralması* ( $KD$ ): Numune hacminin sabit kalmasından dolayı, çekme testi sırasında boyca uzayan numunelerde kesit daralması oluşmaktadır. Yüzde kesit daralması ve yüzde boyca uzama, malzemelerde sünekliğinin bir ölçüsüdür.

$$KD (\%) = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100 \quad (3.9)$$

Hacmin sabit kalmasından dolayı kesit daralması ve boyca uzama ifadeleri arasındaki bağıntı denklem 3.10 ile ifade edilebilir.

$$V_0 = V_K \rightarrow A_0 L_0 = A_K L_K \rightarrow A_K = A_0 \frac{L_0}{L_K} \quad (3.10)$$

### 3.8.2 Halka Çekme Testi

Termoset reçine ile üretilmiş boruların teğetsel gerilme mukavemetinin belirlenmesi için, ASTM D2290-16 standartında halka çekme testi uygulanır. Deney, ekstrüzyon ile üretilmiş termoplastik borular için de uygulanabilir. Geleneksel çekme testinde, çekilen boru numunelerinde eğilme momenti oluşmaktadır. Bu sebeple boruların çalışma koşullarına uygun olarak, borunun tüm yüzeyine yayılı yük oluşturan halka çekme deneyi en uygun metottur.

Halka çekme deneyi, çekme numunelerine uygun çapta yarım diskler vasıtası ile yapılır. Testte, geçerli sonuçlar alınabilmesi için standartlara tam uyum sağlamak önemlidir. Standartlara uygun olmayan numune ve disk kullanılması, özellikle disklerin numune iç çapından küçük olması, eğilme momentine sebep olacağı için deney sonuçlarını olumsuz etkileyecektir. Deney, numune bileşenlerine, büyüklüklerine göre, Prosedür A, B ,C, D ve E olmak üzere ayrılmaktadır.

Prosedür A: Termoset reçine ile üretilmiş kompozit malzemelerde uygulanır.

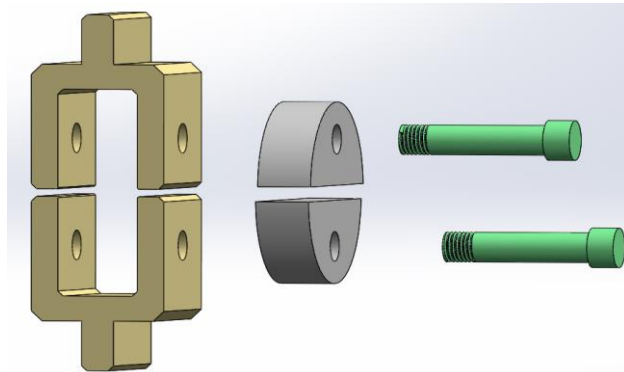
Prosedür B: Her boyutta termoplastik borularda uygulanır.

Prosedür C: İç çapı 110 mm'den büyük termoplastik borularda uygulanır.

Prosedür D: İç çapı 350 mm'den büyük ve et kalınlığı 25 mm'den büyük polietilen borularda uygulanır.

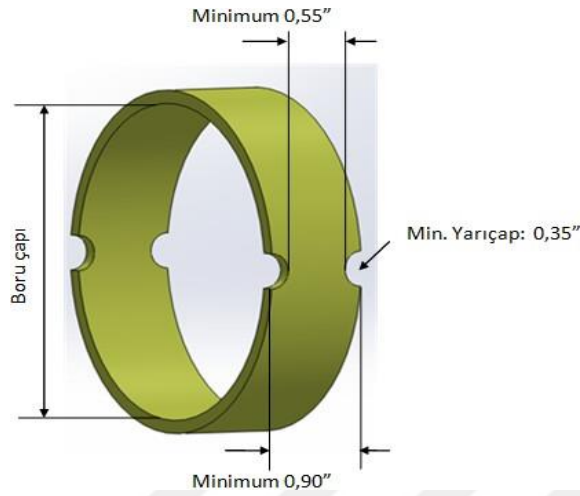
Prosedür E: İç çapı 350 mm'den ve et kalınlığı 25mm'den büyük polivinil klorür (PVC) borularda uygulanır (ASTM D2290-16, 2012).

Halka çekme testinde prosedür A, B ve C'de kullanılan çekme aparatı aynıdır. (Şekil 3.6). Prosedür A, B, C de numunelerin istenilen bölgeden deformasyon sergilemesi amacı ile yapılan kesit inceltme işlemi ve geometrisi farklılık göstermektedir.



Şekil 3.6 Prosedür A, B, C halka çekme aparatı

Prosedür A'ya göre, halka çekme numunelerinin minimum genişliği 22.86 mm olmalıdır. Daraltma işlemi 8.9 mm yarı çapında radyuslar ile yapılır. Radyuslar karşılıklı olmalıdırlar. Prosedür A halka çekme numunesi şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Prosedür A halka çekme numunesi standart ölçüleri (Kara ve Uyaner, 2017)

Prosedür A testinde numune ve ortam sıcaklığı  $23\pm 2$  °C, bağıl nem ise  $\% 50\pm 5$  olmalıdır. Çekme işlemi 2.5 mm/dk minimum, 12.7mm/dk maksimum hızlarında yapılmalıdır.

### 3.9. Darbe Testi

Darbe, malzeme yüzeyine çeşitli hızlarda çarpan herhangi bir ikinci cismin oluşturduğu çok kısa süre etkileyen kuvvettir. Hedef kütle ve vurucu yüzeyinde oluşan nüfuziyetin neticesinde, birbirine ters yönlü kuvvet, karşılıklı yüzeylerde basınç noktası oluşturur. Oluşan bu basıncın büyüklüğü ve malzemenin cevap verme kapasitesi nispetince malzemede deformasyon oluşmaktadır.

Darbelere karşı direnç ve darbeye maruziyetlerinde, darbe etkisine cevapları kompozit malzemeler için çok önemli bir kriterdir. Düşük ağırlıklarına rağmen yüksek mukavemet, yüksek yorulma ve korozyon direnci gösteren kompozit yapıların en zayıf noktalarından birisi darbe maruziyeti ve darbe maruziyetinden sonra gelişen hasar mekanizmalarıdır. Bunun sebebi kompozit malzemelerin, metal ve metal alaşımı malzemelerinde olduğu gibi plastik şekil değiştirme yeteneklerinin olmamasıdır. Metal malzemeler darbeye maruz kaldıklarında darbenin şiddetine, darbeye maruz kalan malzeme özelliğine bağlı olarak elastik ve genellikle plastik şekil değiştirerek darbe enerjisini sönmürl. Metallerin, darbe hasarları gözle görülebilir ve bu malzemeler darbe hasarı sonrası çoğu durumda görevlerini yerine getirmeye devam edebilirler. Sert ve kırılma yapıda olan kompozit malzemelerde durum farklıdır. Kompozit malzemelerde

plastik şekil değiştirme görülmez. Bunun yerine sırası ile matris yapıda mikro çatlak oluşumu, fiber matris arayüz ayrışması, delaminasyon ve fiber kopması gibi hasar mekanizmaları meydana gelir. Bu özelliklerinden dolayı uzay, havacılık ve balistik alanında yaygın olarak kullanılan, deformasyonları felakete sebep olabilecek kompozit malzemelerin, darbe özelliklerinin ve darbe mekanizmasının bilinmesi, darbeye karşı dirençlerinin artırılması, kontrolü ve tamiri yönünde yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır. Kompozit malzemelerin hasar toleransı ve hasar oluşumuna karşı dirençleri darbe deneyleri ile ölçülmektedir.

Kütle düşürmek, gaz tabancası ile hafif helyum ve hidrojen gazlarının basınçlandırılması, toz tabancası ile yüksek hızda küçük kütleli parçacık fırlatılması ile oluşan kompozit darbe testleri, test uygulama hızlarına göre kendi arasında ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma düşük hızlı darbe 10 m/s ve altı, orta dereceli darbe testlerinde 10 m/sn ve 50m/sn hızları arası, yüksek hızlı, balistik darbe testleri 50 m/sn ve 1000 m/s arası, hiper hızlı darbe desti ise 2 km/sn ve 5 km/sn hızları arasında yapılmaktadır. (Naik ve Shrirao, 2004). Bu değerlerin aksine literatürde bazı kaynaklarda hız limitleri farklı kabul edilirken, bir çok çalışmada düşük hızlı ve yüksek hızlı darbeler arasında belirli bir geçiş noktasının olmadığı kabul edilmiştir. Darbe testi, düşük hızlı, yüksek hızlı ve aşırı hız etkisi gibi üç ana kategoriye kolayca ayrılabilir. Fakat bu kategorilerin sınırları net olmamaktadır (Shivakumar ve ark., 1985; aktaran Akın, 2018).

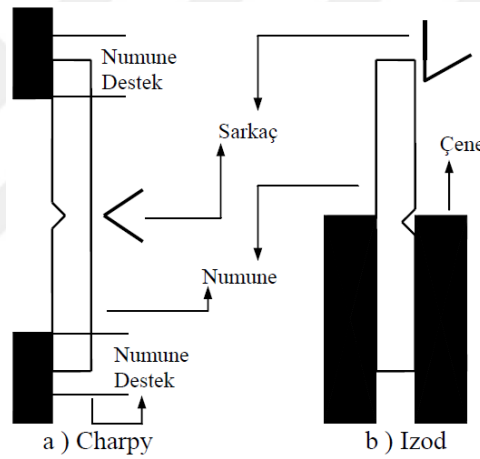
Abrate (1991) bir makalesinde çarpma hızının 100 m/sn.' den az olması nedeniyle düşük hız etkisini tespit etmiştir. Düşük hızlı etki, delaminasyon ve matris çatlaması ile karakterizedir, yüksek hızlı etki ise penetrasyon kaynaklı elyaf kırılmasıdır.

### **3.9.1. Düşük Hızlı Darbe**

Üretimlerinden itibaren bir çok küçük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemelerin, düşük hızlı hasar davranışlarının bilinmesi çok önemlidir. Kompozit malzemelerde, düşük hızlı darbeler sonucu genellikle matris hasarı oluşmaktadır. Çıplak gözle görülmeyen bu hasar, çalışma esnasında çevresel etkilerle birlikte malzeme performansını ve ömrünü oldukça düşürecektir. Kompozit malzemelerde tabakalar arası mukavemet zayıftır. Dolayısıyla düşük hızlı darbe sonucunda numune yüzeyinde hiçbir belirti olmamasına rağmen özellik enine yüklemelerde tabaka ayrışması (delaminasyon) oluşabilir.

Düşük hızlı darbe testleri temel olarak ağırlık düşürme testi ve sarkaç testi olarak iki gruba ayrılmaktadır. Sarkaç testleri Charpy ve Izod testidir. Bu testlerde temel farklılık, darbe numunesinin desteklenme şekli ve vurucuya göre konumlandırılmasıdır. Şekil 3.8’de numune konumlandırılma şekli gösterilmiştir. Sarkaç testinde vurucunun numuneye temasından sonraki geri sekme hızı ölçülebilir. Bu sayede numunenin kırılma esnasındaki absorbe ettiği enerji hesaplanır.

Charpy ve Izod testi çoğunlukla izotropik malzemelerin darbe davranışını belirlemek için kullanılır (Hufenbach ve akr. 2008). Birden fazla malzemeden oluşan ve anizotropik yapıya sahip olan kompozit malzemelerden Charpy ve Izod testi standartlarına göre numuneler elde edilmesi uygun değildir. Bu sebeple, kompozit malzemede düşük hızlı darbe testi, ağırlığı bilinen vurucu kütlenin belli bir yükseklikten serbest düşürülmesi şeklinde yapılır.



Şekil 3.8 Charpy ve Izod darbe numune desteklenme şekli (Ceyhun ve Turan 2003)

Yüksek hızlı darbe deneylerinde, vurucu kütle hızı gaz tabancasının oluşturduğu basınca bağlı iken düşük hızlı darbelerde hız, vurucu kütlelerinin serbest düşmeye bırakıldığı yüksekliğe bağlıdır. (Safri ve ark. 2014). Ağırlık düşürme testi ile yer değiştirme ve/veya ivmeyi ölçerek yük, yer değiştirme ve ivmenin, temas sırasındaki etkisi belirlenir. Test sonucunda elde edilen veriler, temas kuvveti-zaman ve darbe enerjisi-zaman grafiklerine dönüştürülür. Bu grafiklerin incelenmesiyle temas noktasındaki kuvvet ve absorbe edilen enerji gibi özellikler, oluşan hasarla karakterize edilebilir. (Akın, 2018). Şekil 3.9’ de ağırlık düşürme test cihazı görülmektedir.

Düşük hızlı darbe testi deney düzeneğinde ve yüksek hızlara ulaşılmadığı için hesaplamalarda hava sürtünmesinden kaynaklanan mekanik kayıplar, göz ardı edilir. Vurucunun darbe hızı ( $v$ ) zamansız hız formülü ile hesaplanır.

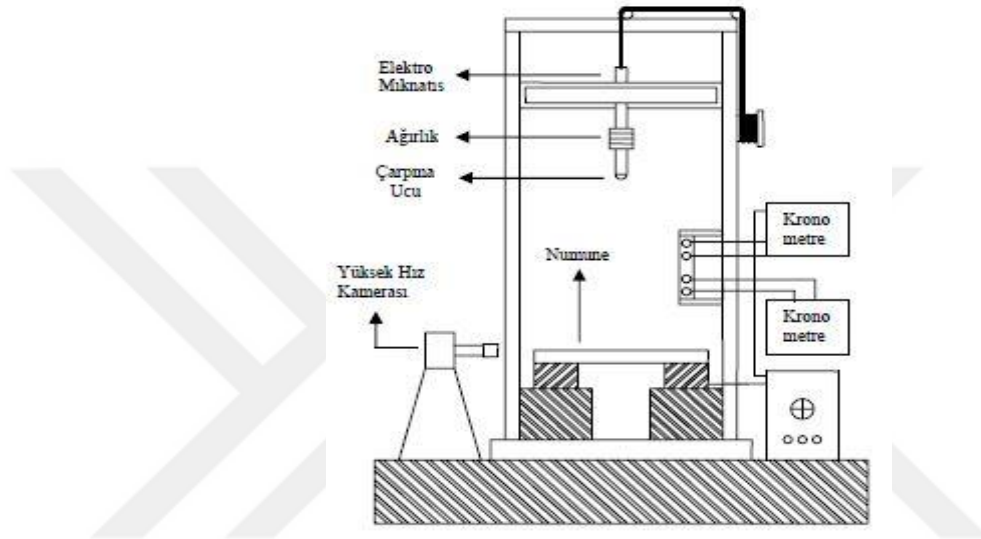
$$v^2 = v_0^2 - 2g(h - h_0) \quad (3.11)$$

serbest bırakılan vurucuda ilk hız sıfır ve vurucunun numuneye temas anındaki yüksekliği sıfır kabul edildiği için aşağıdaki gibi olur.

$$v = (2gh)^{1/2} \quad (3.12)$$

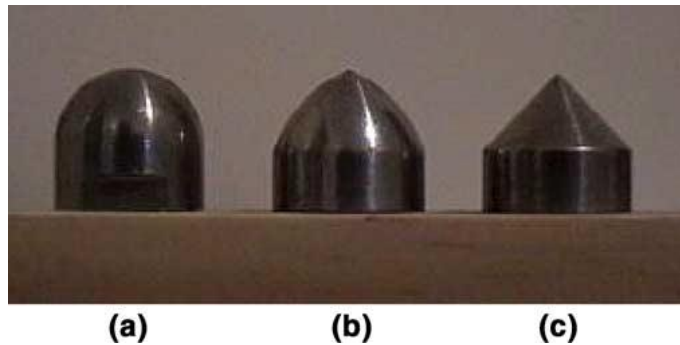
Vurma enerjisi ( $E$ ), vurucunun serbest bırakıldığı noktanın yüksekliği ile orantılıdır. Bu noktadaki potansiyel enerji, çarpışma enerjisini verir.

$$E = m \times g \times h \quad (3.13)$$



Şekil 3.9 Düşük hızlı darbe testi kütle düşürme cihazı (Ceyhun ve Turan 2003)

Kütle düşürme testinde deformasyon şekli, vurucu, numune ve vurma kondisyonuna bağlıdır. Vurucuda; geometri ve sertlik, numunede; sertlik, mukavemet, süneklik, mikro yapı ve kalınlık, vurma kondisyonunda ise vurucu hızı, vurucu açısı ve vurucu yüksekliği belirleyici olmaktadır. Vurucu geometrileri; yarım daire, konik, ogival şeklinde olmaktadır ve bu geometriler test numunesi deformasyonu üzerinde çok etkilidir. Şekil 3.10' da ağırlık düşürme testinde sık kullanılan vurucu şekilleri gösterilmiştir.



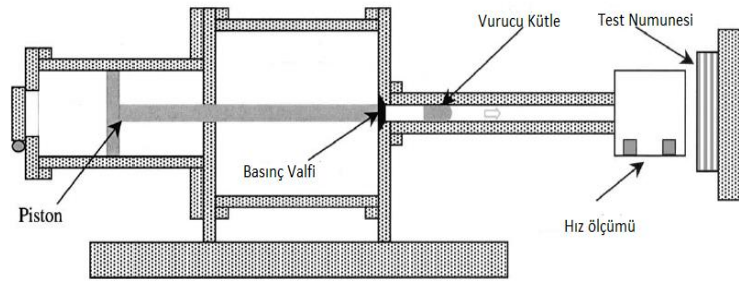
Şekil 3.10 Vurucu geometrileri a) yarım daire, b) ogival, c) konik (Mirevski ve ark. 2004)

Mitrevski ve ark. (2004) tabakalı karbon/epoksi üzerinde düşük hızlı darbe deneyinde vurucu geometrisinin etkisini incelemiştir. İnceleme sonucu konik vurucu kullanımında, numunelerin daha çok enerji absorbe ettiğini, yarım küre vurucu kullanıldığında ise malzeme ile vurucu arasında en yüksek temas kuvvetinin ve en düşük temas zamanının oluştuğunu belirtmiştir.

### 3.9.2 Yüksek Hızlı Darbe

Ağırlık düşürme ve parçacık fırlatma darbe testlerinin uygulama hızları ile ilgili belirli bir standart olmadığı için testlerin sınıflandırılması konusunda farklı çalışmalarda farklı değerler belirtilmiştir. Yüksek hızlı darbe, yüksek hızlı darbenin malzeme üzerine etkisi uzay ve havacılık alanları için çok önemli bir kriterdir. İnsanlı uzay görevleri için kullanılan uzay araçlarında çevresel etkilere ve mikrometeoroid çarpmalarına karşı koruma sağlanması gerekmektedir.(NASA, 1971). Ayrıca uçakların ve uzay araçlarının atmosferde buz parçacıkları ile çarpışması yüksek hızlı darbeye örnek olmaktadır.

Yüksek hızlı darbe testi için iki farklı çeşit tek kademeli gaz tabancası kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi tozların itici ile basınçlandırılması, ikincisi ise hafif olan hidrojen veya helyum gazlarının itici ile basınçlandırılması ile oluşur.(Bernier, 2005). Yüksek hızlı darbe cihazı şekil 3.11’de gösterilmiştir.

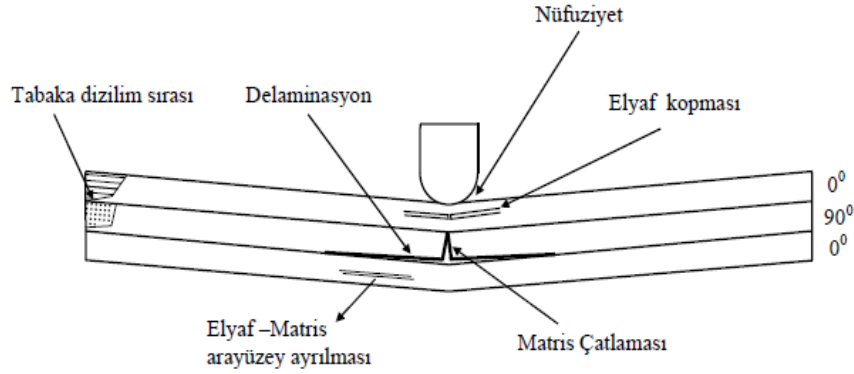


Şekil 3.11 Yüksek hızlı darbe cihazı. (Villanueva ve ark., 2003)

Pereira ve ark. (2006), çok yüksek hızlarda (900m–2400m/sn) aynı geometriye ve hacme sahip, değişken olarak düşük ve yüksek olmak üzere iki farklı yoğunlukta olan buz kütlelerinin darbe sırasındaki mekanik özelliklerini, buz kütlelerinin deformasyon hızını ve maksimum darbe enerjilerini incelemiştir. Yüksek hızlarda ilk temas anında tüm buz numunelerinde deformasyon hızının darbe testi hızından daha yüksek olduğu ve bu hızlarda kullanılan buz vurucularının yoğunluklarının maksimum darbe enerjisi üzerinde etkisi olmadığı sonucuna ulaşmışlardır.

### 3.10 Darbe Sonucu oluşan Hasar Modları

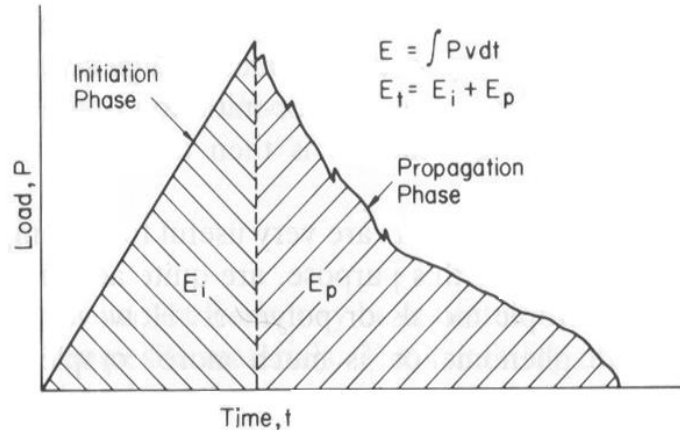
Darbe sonucunda malzeme üzerinde mikro ve makro ölçekte hasar modları meydana gelir. Mikroskopik hasar durumu genel olarak matris yapıda çatlak oluşumu şeklinde görülmektedir. Mikroskopik hasarlar gözle görülmezler fakat malzemenin ortam şartlarına karşı göstereceği direnci önemli ölçüde azaltırlar. Makro ölçekli hasarlar ise delinme, saplanma bükülme sonucu oluşan kırılma olarak tanımlanabilir. Makro ölçekli deformasyonlar sonucunda kompozit yapı işlevini yerine getimez duruma gelir.



Şekil 3.12 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006)

Kompozit malzemelerde darbeye karşı hasar başlangıcı matris yapıda, yapının mikro veya makro ölçekte çatlaması ile görülür. Uygulanan darbe şiddetinin artması sonucu hasar mekanizması fiber yapıya taşınır. sırası ile tabakalar arası ayrışma (delaminasyon), fiber matris arayüz bağlarının zayıflaması ve ayrışması, fiber kopması ve vurucunun malzemeyi delmesi meydana gelir. Oluşan bu hasar mekanizmaları Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

Darbe testi yük-zaman grafiği incelenerek malzeme de deformasyon başlangıcı, malzemenin darbe cevabı ve deformasyon sonrası malzemenin yük karşısında gösterdiği tepki incelenir. Darbe testi sonucu oluşan yük-zaman grafiği örneği şekil 3.13'te gösterilmiştir. Yük zaman grafiği iki kademedir oluşmaktadır. Birinci kademe malzemenin yüke maruz kaldıktan sonra deformasyon başlangıcına kadar olan darbe yükü cevabını verir, ikinci kademe ise malzemenin deformasyon başlangıcından yük ortadan kalıncaya kadar yük karşısında gösterdiği tepkiyi vermektedir.



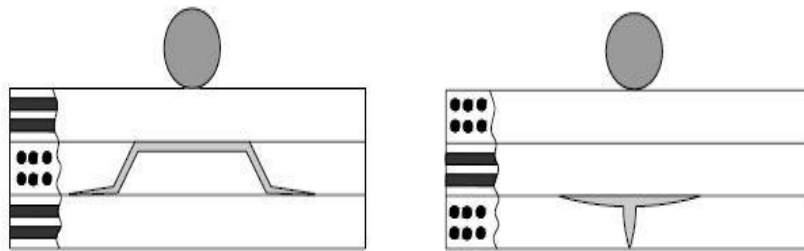
Şekil 3.13 Darbe testi sonrasında tipik bir yük-zaman eğrisi (Shyr & Pan, 2003)

Darbe testinde kompozit malzemelerin iç kısmı kesme kuvvetine maruz kalırken dış kısımlar darbe sonucu oluşan eğilme momenti etkisi ve çekme kuvvetinin etkisinde kalmaktadır. Bu durumda hasar başlangıcı vurucunun temas ettiği yüzeyde veya malzeme içerisinde kesme kuvveti etkisi ile çatlak oluşumu şeklinde ya da darbe testinin uygulandığı yüzeyin tersinde çatlak oluşumu şeklinde gözlenir.

### 3.10.1. Matris Hasarı

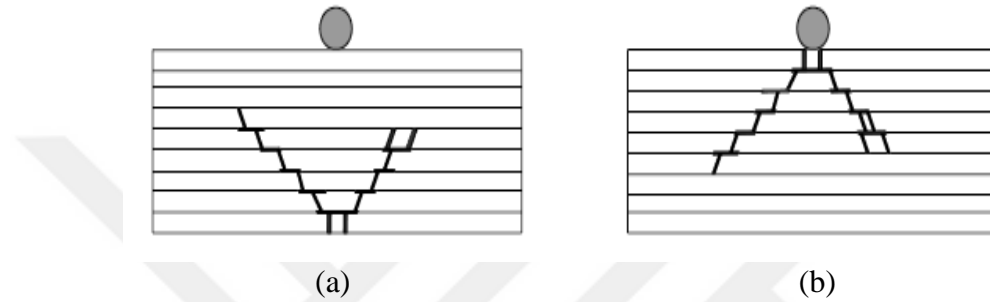
Epoksi matris kompozit malzemelerde, epoksi yapının deformasyon direnci elyaf yapıdan çok daha düşüktür. Darbe yüküne maruz kalan kompozitlerde hasar mekanizması çatlak oluşum formu ile epoksi yapıda başlar. Tek yönlü elyaf tabakarından oluşmuş kompozitlerde matris çatlağı elyaf yönelim doğrultusuna paralel olmaktadır. Matris hasarını tabakaların ara yüzeyden ayrışması (delaminasyon) mekanizması izlemektedir.

Darbe enerjisi sebebi ile matris yapıda çekme ve kayma gerilmesine bağlı olarak çatlamlar oluşur. Tabakanın enine gerilme mukavemetini aşan normal gerilmeler neticesinde çekme çatlakları oluşmaktadır. Vurucunun matris yapı üzerinde oluşturduğu kesme kuvvetinin etkisi ise oluşan kayma gerilmeleri sonucu matris yapıda farklı açılarda kayma gerilmelerinin oluşturduğu kayma çatlakları gözlemlenmektedir.



Şekil 3.14 İki tip matris çatlama şekli; (a) kayma çatlağı, (b) çekme çatlağı (Abrate, 1998)

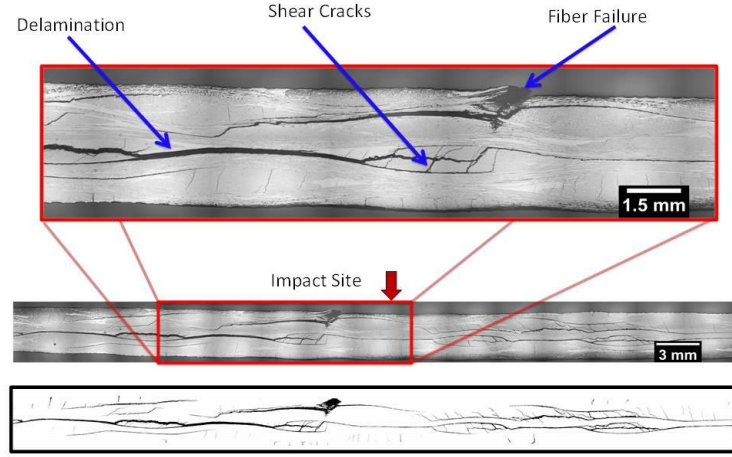
Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler. İnce tabakalı kompozitlerde ise vurma enerjisinin oluşturduğu eğilme momenti sebebi ile matris deformasyonu matris çatlakları ve delaminasyon en alt tabakada başlamaktadır. Bu durumda hasar ters çam ağacı şeklinde malzeme üzerinde ilerlemektedir (Abrate, 1998). İnce tabakalı kompozit yapılarında darbe hasar davranışı şekil 14a'da, kalın tabakalı kompozitlerde şekil 14b'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15 (a) Ters çevrilmiş çam ağacı (b) çam ağacı şeklindeki hasar görüntüleri (Abrate 1998)

### 3.10.2 Delaminasyon

Bitişik tabakalar arasında bağ kuvvetinin azalması ve bitişik tabakaların birbirlerinden ayrışması sonucu delaminasyon meydana gelmektedir. Elyaf doğrultusunda ilerleyen matris çatlakları tabakalar arasında durmakta ve hasar mekanizması tabakaların ayrışması şeklinde devam etmektedir. Tabakalar arasındaki ayrışma malzemenin mukavemetini oldukça azaltmaktadır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı elyaf yönlendirme açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir, eğer tabakalar arasında elyaf yönelimi aynı ise delaminasyon görülmemektedir. Aynı doğrultuda yönlendirilmiş elyafların eğilme rijitliği aynıdır. Eğer iki bitişik tabaka aynı elyaf yönlendirme açısına sahip ise bu iki tabaka ara yüzeyinde delaminasyon meydana gelmemektedir (Kara, 2012). Delaminasyonun oluşum miktarı kompozit malzemeyi oluşturan tabakaların eğilme rijitlik değeri farklılığı ile doğru orantılıdır. Tabakaların eğilme rijitliği ne kadar fazla ise oluşacak delaminasyon boyutu o kadar fazla olmaktadır. Delaminasyon diğer mekanik hasarlarla birlikte görülebilmektedir (şekil 3.15). Malzeme kalınlığı ve kompozit oluşturan malzeme çeşitinde delaminasyon oluşumunu etkilemektedir. Bu durumda farklı tabakalardan oluşan hibrit kompozitlerde delaminasyon oluşumu ihtimali artmaktadır.



Şekil 3.16 Delaminasyon, kayma çatlakları ve elyaf hasarı (Thierry, 2018)

### 3.10.3 Elyaf Hasarı

Matris hasarı ve delaminasyondan sonra gelen hasar tipi elyaf hasarıdır. Matris çatlama ve delaminasyonun elyaf hasarı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Kompozit malzemenin maruz kaldığı darbe enerjisi sonucu oluşan gerilmeler elyaf mukavemetinin üstünde bir gerilmeye sebep olursa malzemede fiber çatlama ve fiber kopması sonucu delinme meydana gelmektedir (Şekil 3.16). Ayrıca darbe sonrası oluşan eğilme momenti etkisi ile darbenin uygulanmadığı bölgelerde elyaf hasarı meydana gelebilmektedir.

Elyaf matris arayüz bağlantısı kompozit malzemelerin mukavemeti açısından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemeti yapıyı bir arada tutan matris ile malzemeye mukavemet veren elyaf yapı arasındaki arayüz bağlantısı kadardır. Arayüz bağlantısının zayıflaması neticesinde kompozit yapı mukavemetini kaybeder.

### 3.10.4. Nüfuziyet

Malzeme hasarının makroskopik bir modu olan nüfuziyet, vurucu ucun malzemedeki dalma miktarını veya delme miktarını temsil etmektedir. Farklı boyutlardaki malzemelerde aynı elyaf hacim oranlarında vurucunun nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır (Kara 2012). Nüfuziyet oranı darbe enerjisine ve vurucu ucun geometrisine göre farklılık göstermektedir.

## 4. DENEYSEL YÖNTEM

### 4.1. Giriş

Bu bölümde genel olarak tezle ilgili yapılan çalışmalar, mekanik testler ve bu testlerle ilgili hazırlıklar detaylı olarak verilmiştir. Yapılan deneysel çalışma boruların üretim aşaması ve mekanik özellikleri, hidrotermal yaşlandırma işleminin amacı, prosedürleri, yaşlandırma ünitesinin kurulumu, yaşlandırma işleminin yapılma şekli, test numunelerinin hazırlanması, düşük hızlı darbe, halka çekme deneylerinin uygulanması ve test verilerinin değerlendirilmesi detaylı olarak açıklanmıştır.

### 4.2. Kompozit Boru Üretimi ve Özellikleri

Çalışmada filaman sarım yöntemi ile üretilmiş saf boru, BNNP, ÇCKNT, ÇCKNT+BNNP ilaveli karbon fiber nano kompozit borular kullanılmıştır. Epoksi matris içerisine eklenen nanopartikül kütlece matrise oranları çizelge 4.1’de verilen boruların her biri halka çekme testi cihazına uygun olarak 72 mm iç çapında üretilmiştir. Boyları ise 30 cm’dir.

**Çizelge 4.1** Kullanılan nanopartiküller ve oranları

	Eklenen Nanopartikül	Matris kütle sine oranla %
Saf Epoksili	-	-
BN Katkılı Epoksi	BNNP	%0.5
ÇCKNT Katkılı Epoksi	ÇCKNT	%0.3
ÇCKNT+BNNP (Hibrit) Epoksi	ÇCKNT+BNNP	%0.5 + %0.3

Bu çalışmada matris malzemesi olarak diglisidil eter bisfenol A bazlı Araldite MY 740 epoksi malzemesi, Aradur HY918 kürleştirici ve DY062 hızlandırıcı içeren üç fazlı filaman sarım reçine sistemi kullanılmıştır. Kullanılan matris malzemeleri Huntsmandan tedarik edilmiştir. Kullanılan epoksi reçinenin mekanik özellikleri çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Epoksi içerisine nanopartikül ilavesi oda sıcaklığı altında sırasıyla mekanik ve ultrasonik karıştırma ile yapılmıştır. 30 dk boyunca mekanik olarak karıştırılan nanopartikül ilaveli epoksi reçine 10 dk boyunca ultrasonik olarak karıştırılmıştır. Tüm bu karıştırma işlemi sırasında sıcaklık sabit tutulmaya çalışılmıştır. Ultrasonik karıştırmanın uzun tutulması epoksinin fazla ısınmasına, dolayısı ile viskozitenin artmasına ve KNT’lerin boylarının kısalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple

10 dakika süreli ve iki kez tekrarlanan ultrasonik karıştırma nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen karışması için yeterli olmuştur.

**Çizelge 4.2** Epoksi reçine mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	ISO Standartı	Değer
Çekme Mukavemeti [ $\sigma$ ]	ISO 527	75-80 MPa
Yüzde Kopma Uzaması	ISO 527	% 3 - % 4
Elastisite Modülü [E]	ISO 527	3200-3800 Mpa

Çalışmada kullanılan karbon elyaflar Dowaksa firmasından temin edilmiştir. Kullanılan karbon elyaf özellikleri çizelge 4.3 te gösterilmektedir. Kullanılan karbon elyaf ipliklerinin ürün numarası 12K A-42' dir.

**Çizelge 4.3** 12K A-42 Karbon elyafların mekanik özellikleri

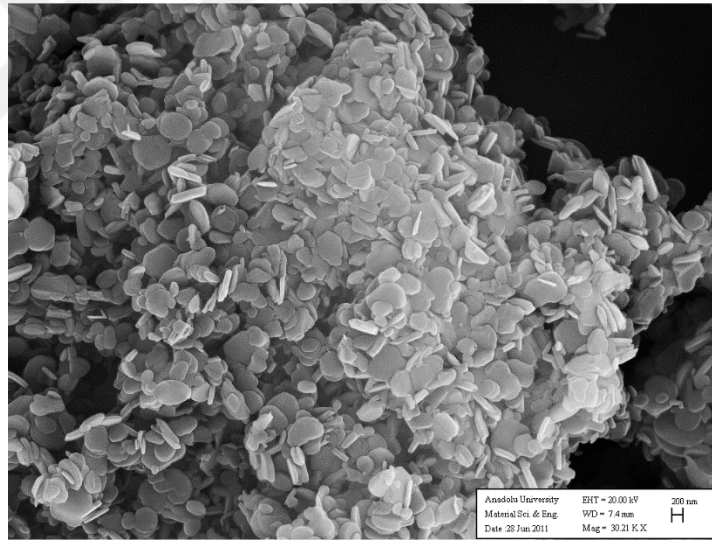
Mekanik Özellikler	ISO Standartı	Değer
Çekme Mukavemeti [ $\sigma$ ]	ISO 10618	4200 MPa
Çekme Modülü	ISO 10618	240 MPa
Akma	ISO 1889	8000 g/1000m
Yoğunluk	ISO 10119	1.8g/cm <sup>3</sup>
Uzama	ISO 10618	% 1.8
Bükülme	Bükülmesiz	-
Boyut miktarı ve tipi	ISO 10548	1.0-1.5

Yüksek hacim yoğunluk oranlarından ve epoksi içerisinde homojen dağılıma özelliklerinden dolayı KNT'ler kompozit malzemelerde kullanılan en önemli nanopartiküllerdendir. Bu sayede herhangi bir darbeye ve kuvvete maruz kalan kompozit yapıda kuvvet dağılımı daha homojen olmakta, kuvvet malzeme içerisinde daha düzenli aktarılmakta ve malzemenin mukavemeti artmaktadır. Karbon bağlarının oluşturduğu titreşimler matris içerisinde ısı transferini artırmaktadır. ÇCKNT'ler, TCKNT'lere göre oldukça ucuzdurlar. Bu sebeple çalışmada NANOCLY firmasından tedarik edilmiş ÇCKNT'ler ve özellikleri çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 ÇCKNT'lerin mekanik özellikleri

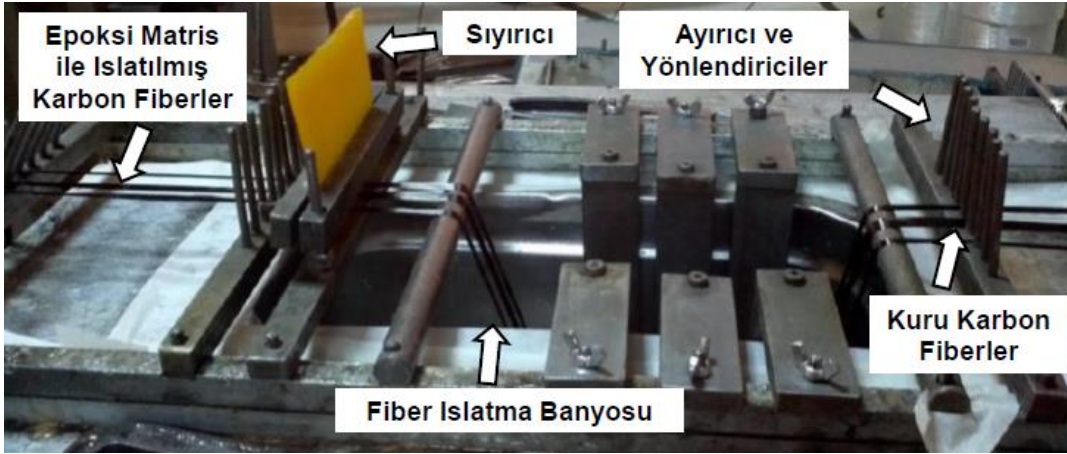
Mekanik Özellikler	Değer
Çekme Mukavemeti [ $\sigma$ ]	10 – 60 GPa
Elastisite Modülü	1 Tpa
Uzama	% 10
Yoğunluk	1.3- 2 g/cm <sup>3</sup>
Çap	5-50 nm
Uzunluk	10-30 $\mu$ m
Elektrik İletkenliği	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>8</sup> s/m

BNNP'lerin boyutları, ÇCKNT'lere göre farklıdır. Bu sayede yapı içerisinde farklı mekanik özellikler kazandıracağı düşünülmektedir. Ayrıca bor nitrürlerin çok sert yapıda olması ve termal iletkenliklerinin çok yüksek olması gibi nitelikleri matris yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Çalışmada kullanılan bor nitrürün boyutları 350 nm X 225 nm X 65 nm olup, SEM görüntüsü Şekil 4.1 ' de verilmiştir.



Şekil 4.1 BNNP sem görüntüsü (Karabulut, 2017)

Önceden belirtildiği gibi nanopartiküllerin epoksi içerisinde homojen olarak dağıtılma işleminden sonra epoksi reçine fiber ıslatma banyosuna dökülmüş ve burada fiber sarımı için uygun sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Uygulamada kullanılan sarım makinası, mandral ve sarım esnasında fiberlerin gerginliğini sağlayan bobinler (Şekil 4.2) tiner ile temizlenerek kurutulmuştur.



Şekil 4.2 Filaman sarım makinesi ve üretime hazırlık (Karabulut, 2017)

Filaman sarım işlemi, aynı anda dört boru sarımı yapabilme kapasitesi olan CNC filaman sarım makinesinde yapılmıştır. Fakat hassas üretimin sağlanması için her seferde tek bir boru sarılmıştır. Sarım işlemi sabit gerginlikte, bant genişliğini oluşturan fiber sayısı 3 olacak şekilde ve sarım açısı  $[\pm 55^\circ]_s$  olarak ıslak filaman sarım tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Önceden ısıtılarak hazır hale getirilen mandrallere sarım esnasında ıslatma banyosundan çıkan elyafların üzerindeki fazla epoksiler sıyırıcı ile temizlenerek sarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra mandral fırına alınarak 2 saat  $180^\circ\text{C}$  ve 12 saat  $120^\circ\text{C}$  de döndürülerek kürlenmiştir. Kürlenme işleminin ardından numunelerin göz ile kontrolü yapılmış ve mandralden ayrılmışlardır.

### 4.3. Hidrotermal Yaşlandırma İşlemi

Bu çalışmada hidrotermal yaşlandırmanın, epoksi içerisine kütlece % 0.3 ÇCKNT, % 0.5 BNNT, % 0.3 ÇCKNT + % 0.5 BNNT ilaveli ve saf karbon elyaf/epoksi kompozitleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Hidrotermal yaşlandırma için  $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$  boyutlarında 64 litre hacimde temperli camdan kazan üretilmiştir.  $300^\circ\text{C}$  ısıya kadar dayanmaları, herhangi bir kaza durumunda daha tehlikesiz formda deforme olmaları ve krom-nikel kazanlara göre ucuz maliyetleri sebebi ile temperli cam tercih edilmiştir. Cam önce istenilen boyutlarda kestirilmiş ardından temperlenmiş ve ısıya dayanıklı silikon ile birleştirilerek kazan haline getirilmiştir. Cam kazanın üst kısmına kapak şeklinde galvanizli sac kestirilmiş ve sac üzerine önceden bükürülmüş 2 adet 300 W'lık fişek rezistansların montajı için gerekli delikler açtırılmıştır. Oluşturalan kazanın etrafı ısı yalıtımı ve termal dengenin sürekli sabit kalması için strafor köpük ile izole edilmiştir. Kazan Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Hidrotermal yaşlandırma ünitesi

Yaşlandırma ünitesinde kontrolcü üçlü priz yardımı ile sisteme dahil edilmiştir. Bu sayede su sıcaklığı 80°C ye ulaşmasının ardından suyun ısıtılması tek bir rezistans ile sağlanmıştır. Hidrotermal yaşlandırma 4 farklı boruda 1, 2, 3 hafta sürelerde yapılmıştır. Yaşlandırma süreleri ve borularla ilgili ayrıntılar Çizelge 4.5’ te gösterilmektedir. Yaşlandırma ortamı olarak 80°C’lik saf su kullanılmıştır. Isı kontrolü için 0.1°C hassasiyeti olan EMKO 3710 sıvı problu kontrolcü ünitesi kullanılmıştır (Şekil 4.4). Fakat kontrolcü rolesinin çok sık aç kapa yapmaması için hassasiyet  $\pm 0.5$  °C olarak ayarlanmıştır. Güvenlik tedbiri açısından şebeke ile kontrolcü arasına 16 A değerinde sigorta bağlanmıştır.

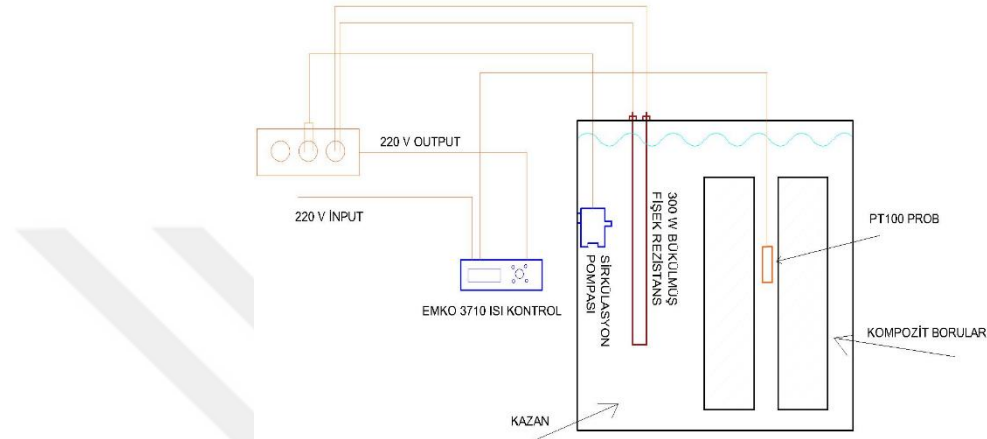


Şekil 4. 4 EMKO 3710 ısı kontrol ünitesi

Çizelge 4.5 Kompozit borular veya yaşlandırma süreleri

Yaşlandırma Süresi (Hafta)	Farklı nanopartikül ilavesi boru için numune adeti				Numune Sayısı (Ad.)
	Saf	BNNP	ÇCKNT	BNNP+ÇCKNT	
0	1	1	1	1	4
1	1	1	1	1	4
2	1	1	1	1	4
3	1	1	1	1	4
Genel Toplam					16

Hidrotermal yaşlandırma işlemi sırasında en büyük problem kazan içerisinde homojen sıcaklığın sağlanamaması olmuştur. Numunelerin yaşlandırılması işleminden önce yapılan ısı kontrolü ile bu sorun saptanmış ve 2.2 W gücü olan küçük bir sirkülasyon pompası ile sorun çözülmüştür. Hidrotermal yaşlandırma ünitesi şematik olarak Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Isı kaybını önlemek amacı ile etrafı yalıtım malzemesi ile çevrilen kazanda buharlaşma ile sıvı kaybını minimize etmek amacı ile yüzey kısmına pingpong topaları bırakılmıştır.



Şekil 4.5 Hidrotermal ünitesinin şematik gösterimi (Akın, 2018)

#### 4.4. Halka Çekme Testi Uygulaması

Halka çekme testi termoset ile üretilmiş kompozit ve ekstrüzyon ile üretilmiş termoplastik borularda teğetsel gerilmeyi belirlemek için yaygın olarak kullanılan mekanik testlerdendir. Test ASTM D2290-16 standartlarına göre yapılır. Çekme testi uygulaması için boruların geometrileri ilgili prosedürlere göre ayarlanmakta ve iki ucu zıt şekilde hareket eden çekme cihazına aparat yardımı ile yerleştirilip sürekli artan bir kuvvetle kopana kadar çekilmektedirler. Çekme numunelerinin iç kısmına tam olarak oturacak şekilde ayarlanmış iki yarım disk aparat sayesinde numune üzerinde yayılı yük oluşturulur ve çekme sonucu eğilme momenti oluşumu engellenir. Çekme testi ile uygulanan kuvvete karşın numunenin uzama miktarı ölçülür, kuvvet uzama değerlerinden yararlanarak gerilme-şekil değiştirme değerleri hesaplanarak çekme diyagramı oluşturulur. Halka çekme testi sonucunda malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması gibi malzemenin ayırt edici özellikleri belirlenebilir.

Çalışmamızda halka çekme deneyi ASTM D2290-16 prosedür A standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Bunun için yaşlandırma işlemi uygulanmış ve kontrol grubu olarak yaşlandırılmamış borulardan prosedür A esaslarına göre numuneler kesilmiştir

(Şekil 4.6). Kesilen borulardan uygun çekme numunelerinin elde edilmesinin ardından numunelerin kesilen yüzeylerinde herhangi çentik etkisi oluşturabilecek pürüz kalmaması için kalından inceye doğru polisaj makinesinde su zımparası kullanılarak işleme tabi tutulmuştur.

Test Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesin laboratuvarında  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta  $\%55\pm 5$  bağıl nem ortam şartlarında ve 0.1inc (2.54 mm)/dk hızında Kalites marka üniversal çekme cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7). Cihaz farklı geometrilerdeki numunelerin de çekme testini yapabilmekte ve uygun yazılımlar yüklendiği takdirde test raporlarını dijital ortamda verebilmektedir.

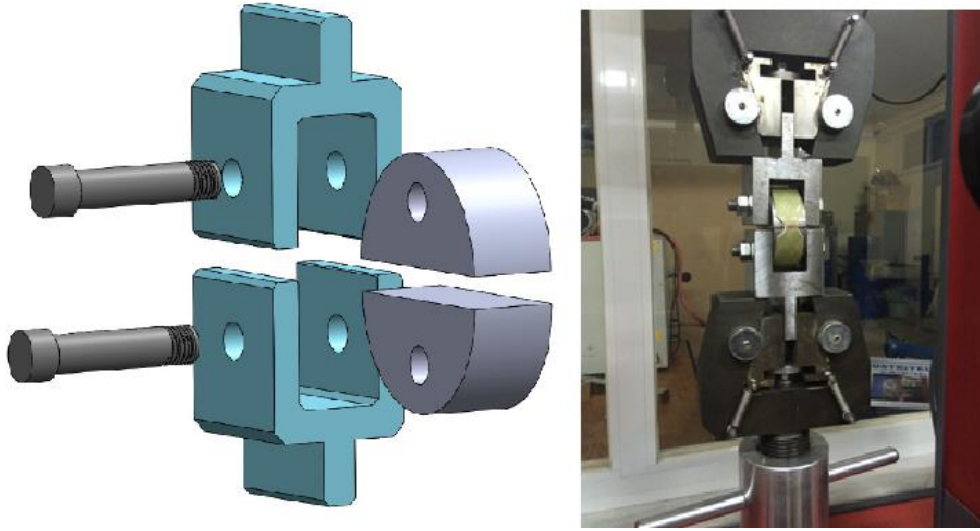


Şekil 4.6 Prosedür A'ya göre hazırlanıp çekme testi uygulanmış numune

Test numuneleri cihaza yerleştirildikten sonra, çok küçük çekme gerilmesi uygulanarak numune ve aparat arasında boşluk alınmaktadır. Ardından test uygulanmadan önce her bir numune için tekrar hassas ölçüm yapıp bu ölçüm numune özellikleri ile birlikte test cihazının bağlı olduğu bilgisayara girilmektedir. Cihazın teğetsel gerilme hesabı yapabilmesi için program ara yüzüne numune tanımlayıcı bilgilerle birlikte Eşitlik 4.1'deki ifade girilmektedir.

$$\sigma_T = P_b / 2A_m \quad (4.1)$$

Burada  $P_b$  numunenin kopma kuvvetini,  $A_m$  daraltılmış kesit alanını,  $\sigma_T$  ise kopma mukavemetini ifade etmektedir.



Şekil 4.7 Çekme aparatı ve çekme işlemi

#### 4.5 Düşük Hızlı Darbe Deneyi Uygulaması

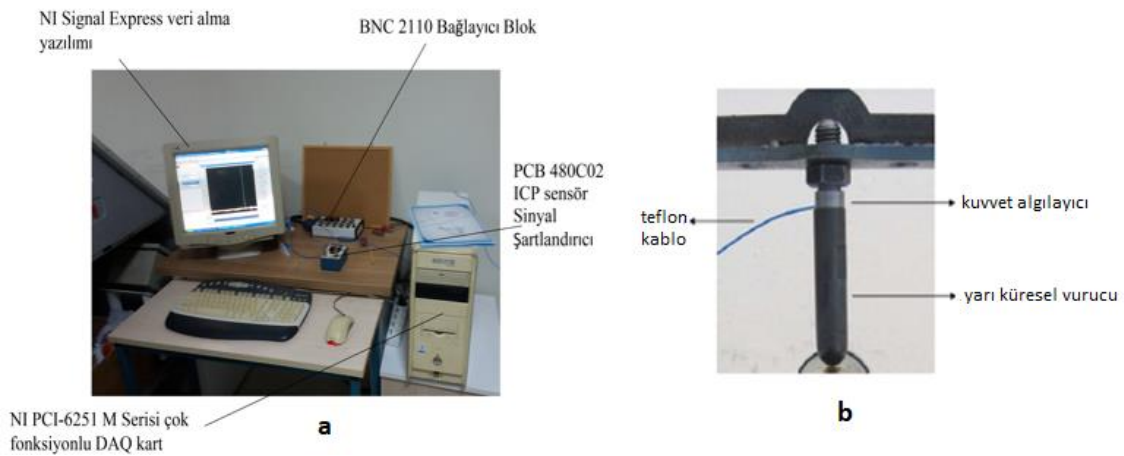
Kompozit boruların darbeye karşı dirençlerini ve darbe tepkilerini belirlemek amacı ile bilgisayar bağlantılı düşük hızlı darbe test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihazda krom kaplı miller üzerine yerleştirilmiş lineer yataklar sayesinde sürtünme etkisi sıfıra yakın, ihmal edilebilir seviyede tutulmuştur (Şekil 4.8). Düşük hızlı darbe cihazı değiştirilebilir darbe kütlesi ve kütlelinin serbest bırakılma yüksekliğinin değiştirilebilir olması sayesinde farklı enerji seviyelerinde testin yapılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.8 Düşük hızlı darbe sistemi (Kara, 2012)

Çalışmamız 5, 10 ve 15j enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Bağlı olduğu kütle ile birlikte 6.35 kg ağırlığa sahip olan vurucu uç 24mm çapı olan yarım küre şeklindedir. Vurucu uç ve kütle arasında kuvvet algılayıcı olarak PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) kullanılmıştır. Sensör 22.6 kN değerine kadar doğru bir şekilde veri toplayabilmektedir (Şekil 4.9).

Deneyde numulardan sağlıklı verilerin toplanması için test numunelerinin sıkı bir şekilde sabitlenmeleri gerekir, aksi durumda darbe etkisi ile numunenin hareket etmesi ve titremesi deney verilerimizde sapmalara ve parazitlere sebep olacaktır. Bunun önlenmesi için darbe testi uygulanacak numuneler sıkı bir şekilde V yatağına sabitlenmiştir. Darbe testinde numunelerde deformasyon mekanizmasını etkileyen bir diğer husus ise geri tepme sonrası vurucunun numunelere tekrar nüfuziyetidir. Tekrar nüfuziyet darbe testi sonucunu etkilememesine rağmen ikinci kez darbeye maruz kalan numunelerde deformasyon artacak ve darbe testinin ardından numunelerden alınacak hasar görüntüleri test sonucu oluşan deformasyonlarla ilgili doğru bilgileri vermeyecektir. Test sırasında tekrar istenmeyen ikinci darbenin engellenmesi amacı ile ilk darbeye ile oluşan rebound ile eş zamanlı olarak numuneye etkiyecek ikinci darbe aparat yardımı ile engellenmiştir.



Şekil 4.9 Düşük hızlı darbe a) Kontrol ünitesi b) Vurucu ve kuvvet algılayıcı (Akın, 2018)

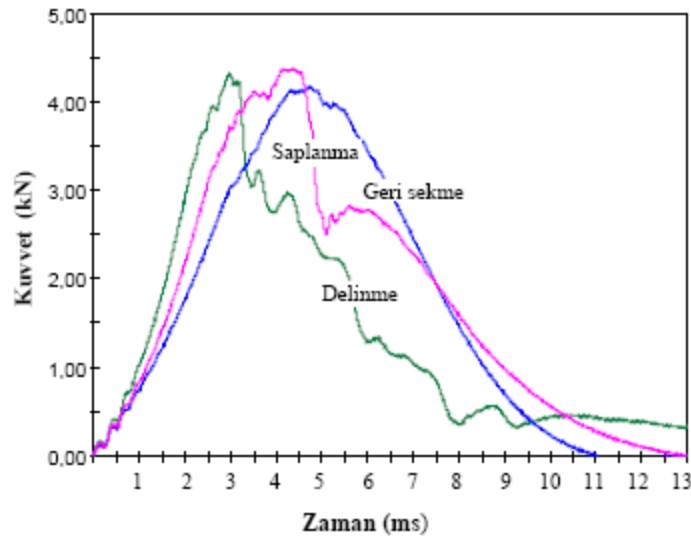
#### 4.6. Kompozit Boruların Darbe Karakteristiği

Farklı enerji seviyelerinde yapılan ağırlık düşürme testlerinin sonucunda kompozit borunun darbe karakteristiğini ortaya koyan temas kuvveti-yer değiştirme, temas kuvveti-zaman darbe enerjisi-zaman ve darbe hızı- zaman eğrilerini oluşturmak

mümkündür. Bu eğriler, vurucu cismin geri sekmesi, saplanması ve delmesi gibi durumların incelenmesine olanak sağlamaktadır (Kara, 2012).

#### 4.6.1. Kuvvet-zaman eğrileri ( $F-t$ )

Düşük hızlı darbe esnasında vurucu ile numuneler arasında numunenin delinmesi, vurucunun numuneye saplanması ve vurucunun geri sekmesi olmak üzere üç temel durum oluşmaktadır. Üç temel durumun oluşması ile ilgili davranışları gösteren kuvvet - zaman grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Düşük enerji seviyelerinde geri sekme eğrisinin olduğu görülmektedir, enerji seviyesinin artması ile sırası ile vurucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delerek ilerlemesi durumlarında oluşan eğriler görülmektedir.



Şekil 4.10 Kuvvet - Zaman (F-t) eğrileri. (Sayer, 2009)

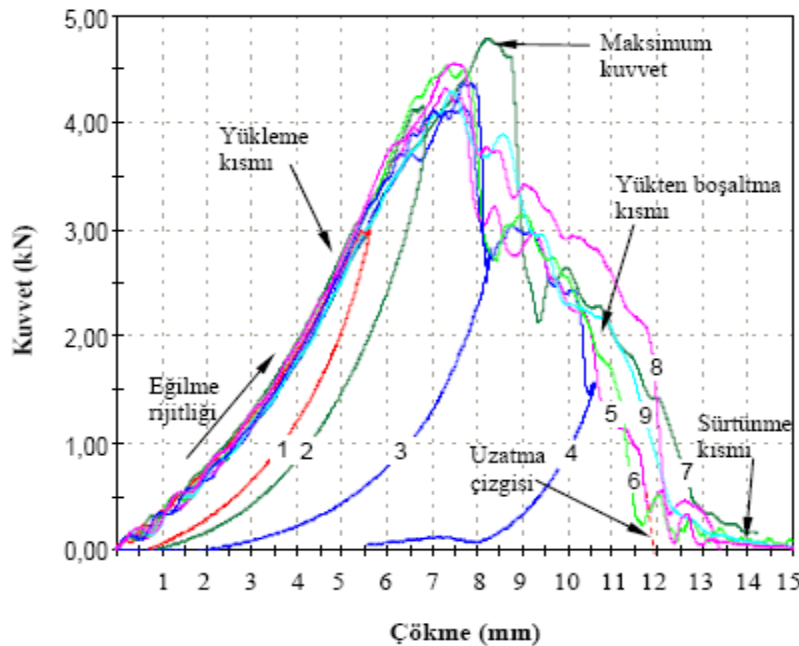
Grafikte görüleceği gibi malzemenin karşılayacağı maksimum kuvvet değeri neredeyse sabit olmuştur. Bunun üzerindeki kuvvet değerlerinde saplanma ve delinme meydana gelmiştir. Delinme durumunda vurucu numune içerisinde hareketine devam etmektedir. Bunun sonucu olarak malzeme ile vurucu arasında oluşan sürtünme kuvveti oluşmakta. Sürtünme sebebiyle delinme oluşan numunelerde kuvvet-zaman eğrisinin yatay olarak devam ettiği görülmektedir.

#### 4.6.2. Kuvvet-Yer Değiştirme ( $F-d$ )

F-d grafikleri, kompozit malzemelerin darbe karakteristiğinin analizi amacı ile kullanılan eğrilerden oluşan, malzemenin darbe kuvvetiyle etkileşiminden kaynaklanan

kuvvet-yer değiştirme (deplasman) grafikleridir. Şekil 4.11’de artan darbe enerjisi ve buna karşılık malzemede gerçekleşen Şekil değişimini ifade eden grafik gösterilmektedir. Bu grafikler malzemelerin eğilme rijitliği hakkında da bilgi vermektedir.

Kuvvet-yer değiştirme (kme)(deplasman), grafiklerinde eğriler kapalı eğriler ve açık eğriler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Her eğride kuvvette artma kısmı, kuvvetin maksimumuna ulaşması ve kuvvetin azaldığı kısım görülmektedir. Kapalı eğriler vurucunun test numunesine çarpmasını fakat enerji seviyesinin vurucunun numuneye saplanması veya numuneyi delmesi için gerekli olan seviyenin altında olduğunu göstermektedir. Bunlar grafik üzerinde eğri 1, 2, 3, 4 olarak temsil edilmiştir. Vurucunun numuneye nüfuziyeti, numunenin bir kısım darbe enerjisini absorbe etmesi ve kalan darbe enerjisinin vurucunun geri tepmesi olarak oluşan bu eğriler düşük enerji seviyelerindeki darbelerde görülmektedir. Şekil 11’de 4. eğri incelendiğinde bu eğrinin kritik bir enerji seviyesinde olduğu görülmektedir. Bu enerji seviyesini üstündeki değerlerde 5, 6, 7, 8 ve 9 eğrileri oluşmuştur. Bu eğrilerin oluşmasında saplanma ya da delinme mekanizması etkindir.



Şekil 4.11 Kuvvet-yer değiştirme eğrileri (Sayer, 2009)

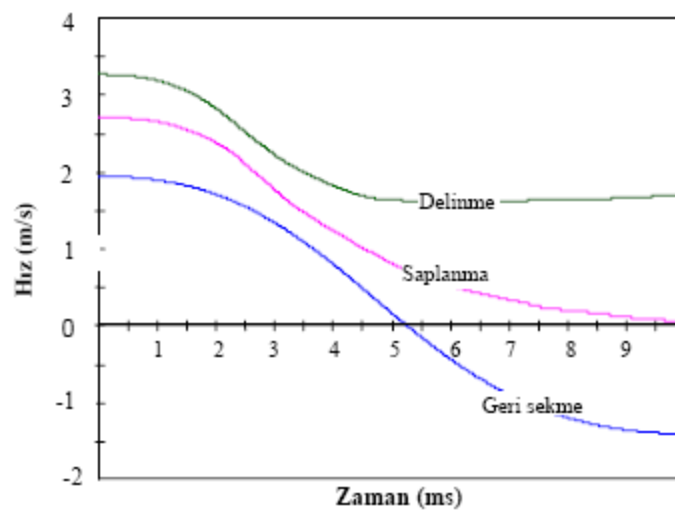
Vurucu uç numuneye saplanmış veya numuneyi delmiş ise kuvvet-çökme grafiğindeki eğriler açık tip eğriye dönüşmektedir. Bu durumda vurucunun geri sekme olayı görülmez. Delinme olayında vurucunun malzemeyi delmesi ve malzeme içerisinde ilerleyerek malzemenin diğer ucundan çıkması aşamaları meydana gelir. 6 ve 9 numaralı

eğriler delinme durumuna birer örnektir. Numunenin delinmesi ile vurucu uç ile numune arasındaki sürtünme neticesinde eğriler yatay şekilde hareket etmektedirler.

#### 4.6.3. Hız-zaman eğrileri (V-t)

Düşük hızlı darbe testinde malzemenin makro ölçekte uğradığı delinme veya vurucunun malzemeye saplanması gözle görünür, deformasyonların basitçe anlaşıldığı grafik türü Şekil 4.12’de gösterilen hız-zaman (V-t) grafiğidir.

Delinme ve saplanmanın olmadığı durumlarda düşme hareketi ile hız kazanan vurucu numuneye nüfuziyetinin ardından hız kaybeder, anlık olarak sıfır hıza ulaşan vurucu temastan sonra numunenin tamamını absorbe edemediği darbe enerjisinden dolayı azalan ivme ile negatif yönde hızlanama yaşamaktadır.



Şekil 4.12 Hız-zaman (v-t) eğrisi (Sayer, 2009)

Delinme durumunda maksimum hızla numuneye saplanan vurucu malzeme içerisinde yavaşlayan hızla pozitif doğrultuda ilerlemektedir. Vurucunun malzeme içerisinde yavaşlaması, vurucu ile malzeme arasındaki sürtünme kuvvetinin etkisinden kaynaklanmaktadır.

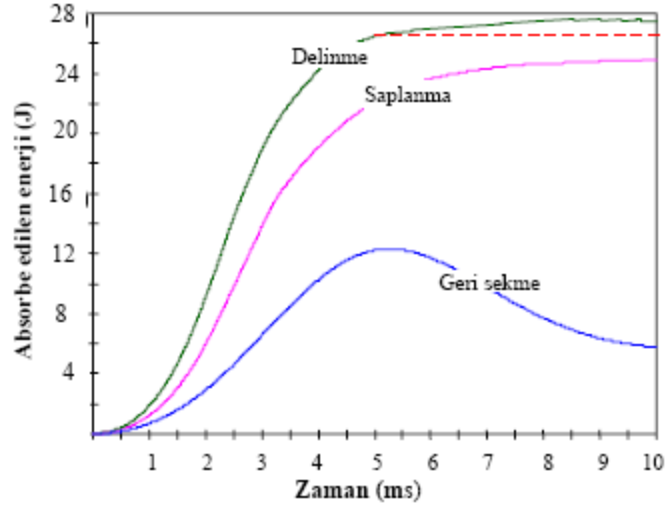
Saplanma durumunda vurucu malzemenin içerisinde hareket edemediği için kısa zamanda vurucunun hızı sıfıra inmektedir.

#### 4.6.4. Enerji-zaman eğrileri(Ea-t)

Enerji-zaman (Ea-t) eğrileri (Şekil 4.13), kuvvet-yer değiştirme (F-d) eğrilerinin altında kalan alan ile hesaplanmaktadır. Uygulanan darbe enerjisinin tümü numune tarafından absorbe edilemez. Tüm darbe enerjisinin numune tarafından absorbe edildiği

durumlarda, vurucuda geri sekmesi için gerekli enerjinin olmaması sebebiyle vurucunun numuneye saplandığı görülmektedir.

Delinme ve saplanma olayının olmadığı durumlarda grafik üzerinde eğrinin maksimum enerjisi seviyesi ile eğrinin son anda ki enerji seviyesi arasındaki fark geri sekme enerjisini vermektedir.



Şekil 4.13 Enerji-zaman (Ea-t) eğrileri (Sayer, 2009)

Vurucu cismin numuneyi delip geçmesi durumunda ise, sürtünme kısmının altında kalan alanın hesaplanan enerji miktarına katılmasından dolayı eğri belli bir değerde sabitlenmemektedir. Toplam enerji miktarından sürtünme kısmının altında kalan alan çıkarıldıktan sonra malzemenin emdiği enerji ise şekilden de görüldüğü üzere kesikli çizgiye karşılık gelen enerji seviyesidir (Kara 2012).

## 5. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Filaman sarım metodu ile üretilmiş nonopartikül ilaveli karbon-elyaf borular, yüksek mukavemetleri ve korozyon dirençlerinden dolayı endüstride kullanım potansiyeli olan malzemelerdir. Bu malzemelerin mekanik özelliklerinin, avantajlarının ve dezavantajlarının bilinmesi, çalışma koşullarında performanslarının ve çalışma esnasında maruz kalacakları çevresel etkilere karşı dirençlerinin bilinmesi uygun malzeme seçimi için çok önemlidir. Bu amaç doğrultusunda çalışmamızda farklı oranlarda nanopartikül içeren borulara, farklı sürelerde hidrotermal yaşlandırma işlemi yapılmış, yaşlandırılmış borularda halka çekme testi ve düşük hızlı darbe deneyi uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemi sonucunda oluşan malzemenin mekanik özelliklerindeki ve hasar mekanizmalarındaki değişimlere ait verilerden grafik oluşturularak değerlendirilmiştir.

Daha önce üretilmiş, matris yapıda kütlece % 0.3 ÇCKNT, % 0.5 BNNP, % 0.3 ÇCKNT + % 0.5 BNNP içeren ve saf matrisli karbon/elyaf borulara 0, 1, 2, 3 hafta süre ile özel olarak hazırlanmış ünite içerisinde 80°C sıcaklıkta, saf su ortamında yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemin ardından işlemin malzeme üzerindeki teğetsel gerilmelere etkisini ölçmek için borularda ASTM D 2290-16 Prosedür A'ya göre halka çekme deneyi ve yaşlandırmanın malzemelerdeki darbe dayanımını ölçmek için 5, 10, 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi uygulanmıştır.

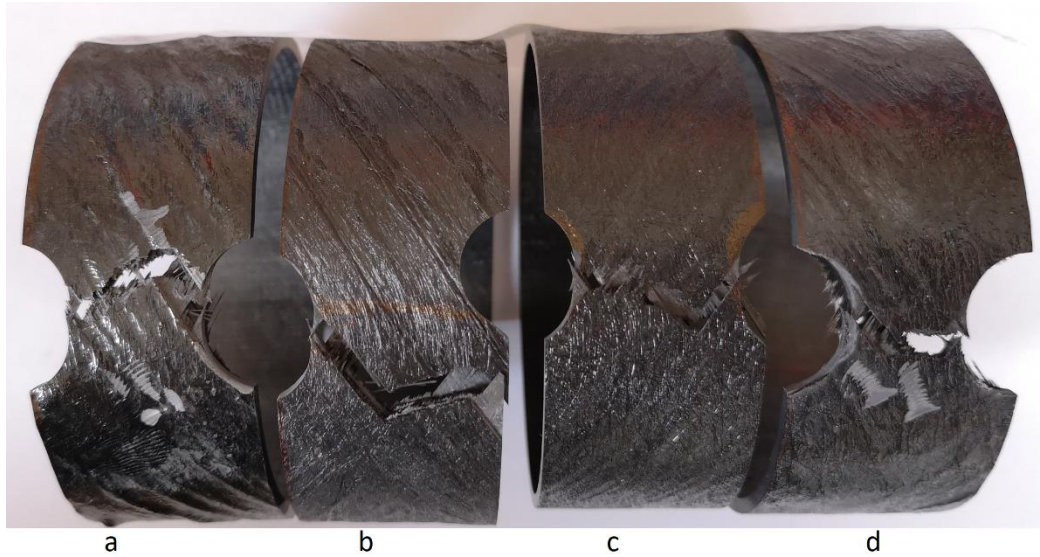
### 5.1. Halka Çekme Deneyi

Yaşlandırma işleminin ardından borular kesilerek ölçüleri Şekil 3.7'de gösterilen ASTM D 2290-16 prosedür A'ya göre halka çekme deneyi numuneleri oluşturulmuştur. Halka çekme deneyi ile aynı süre ile yaşlandırılmış, farklı nanopartikül ilave edilmiş Karbon-elyaf borularda nanopartikül çeşidinin yaşlanma üzerindeki etkisi birbirlerinden ve nanopartikül ilave edilmemiş saf numuneden referans alınarak kıyaslanmıştır.

4 farklı boru, 4 farklı yaşlandırma süresi olmak üzere 32 adet çekme numunesi ile yapılan halka çekme testi, yaklaşık 23°C±2 laboratuvar sıcaklığında, %50±5 nem oranında ve 0,1 inç (2.54mm) /dk çekme hızı ile yapılmıştır.

#### 5.1.1 Yaşlandırılmamış Borularda Teğetsel Gerilmeler

Bu bölümde, yaşlandırılmamış referans numunelerin halka çekme deneyi sonuçları incelenmiştir. Deney sonrası numunelerin hasar görüntüleri şekil 5.1'de gösterilmiştir.

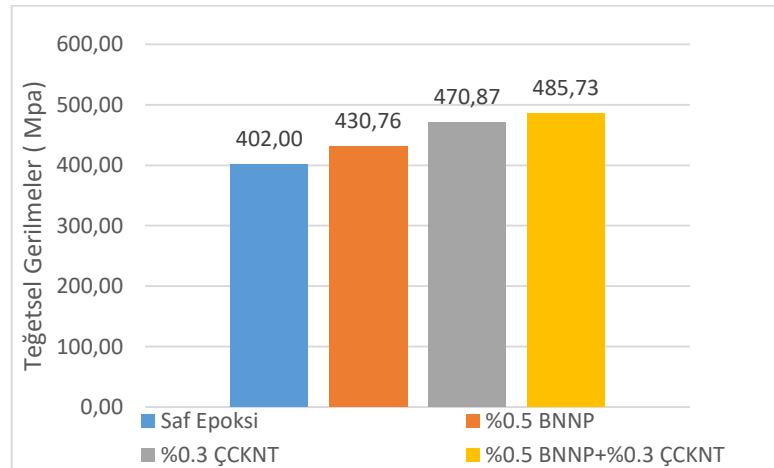


**Şekil 5.1** Yaşlandırılmamış numuneler a) Saf, b) BNNP, c) ÇCKNT, d) BNNP+ÇCKNT

Tüm numuneler daraltılmış alanda deformasyona uğramıştır. Deformasyon şekilleri incelendiğinde, ağırlıklı olarak fiber doğrultusuna paralel olduğu görülmektedir.

Yaşlandırılmamış borularda saf epoksili borunun maksimum teğetsel gerilmeler şekil 5.2' de gösterilmektedir.

Maksimum mukavemeti 402 Mpa olan saf yaşlandırılmamış numunenin kopma uzaması %14.66 olmuştur.



**Şekil 5. 2** Yaşlandırılmamış numunelerde teğetsel gerilmeler

Yaşlandırılmamış borular için nanopartikül değerlendirildiğinde, nanopartikül ilavesinin malzemenin mukavemetini artırdığı görülmektedir. BNNP ilavesi malzemenin mukavemetini % 6.9 oranında arttırmıştır. ÇCKNT ilavesinde bu artış oranı daha % 17. ÇCKNT ve BNNT birlikte etkin olduğu hibrit borularda ise artış oranı % 20.6

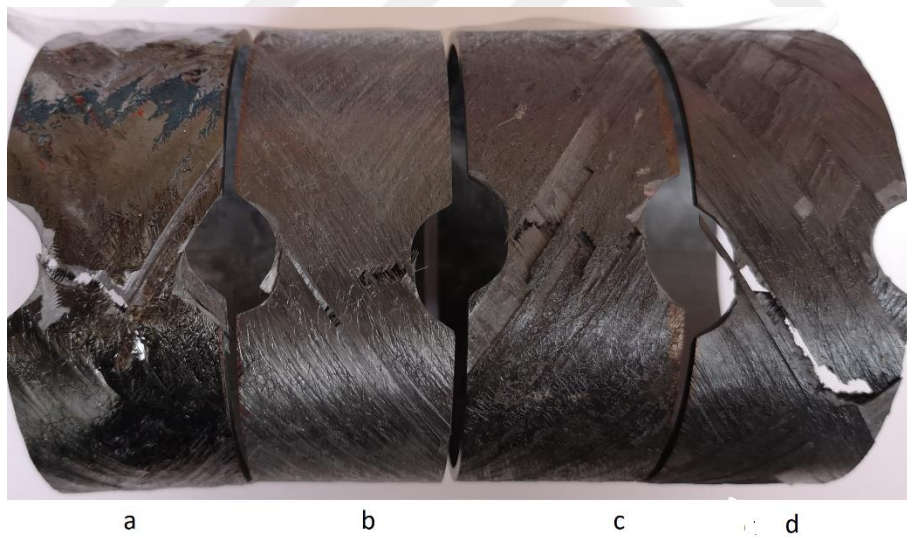
seviyesinde olmuştur. Yaşlandırılmamış numunelere ait kopma uzamaları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Numuneler arasında kopma uzamaları değerlendirildiği zaman en düşük kopma uzaması değeri % 10.04 ile hibrit borularda gözlemlenmiştir. En yüksek kopma uzaması değeri ise % 15.53 ile saf epoksili borularda görülmektedir.

**Çizelge 5.1** Yaşlandırılmamış numunelerin yüzde kopma uzamaları

Numune Özellikleri	Kopma Uzaması (mm)	% kopma uzaması
Saf Epoksi	9,52	15,53
%0.5 BNNP	8,88	14,81
%0.3 ÇCKNT	8,07	14,305
%0.5 BNNP+%0.3 ÇCKNT	6,02	10,04

### 5.1.2 Bir Hafta Yaşlandırılmış Borular

1 hafta süreyle 80°C sıcaklıkta hidrotermal yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin hasar görüntüleri şekil 5.3’te gösterilmiştir. Yaşlandırma ile birlikte numunelerin teğetsel gerilme mukavemetlerinde azalma görülmektedir.

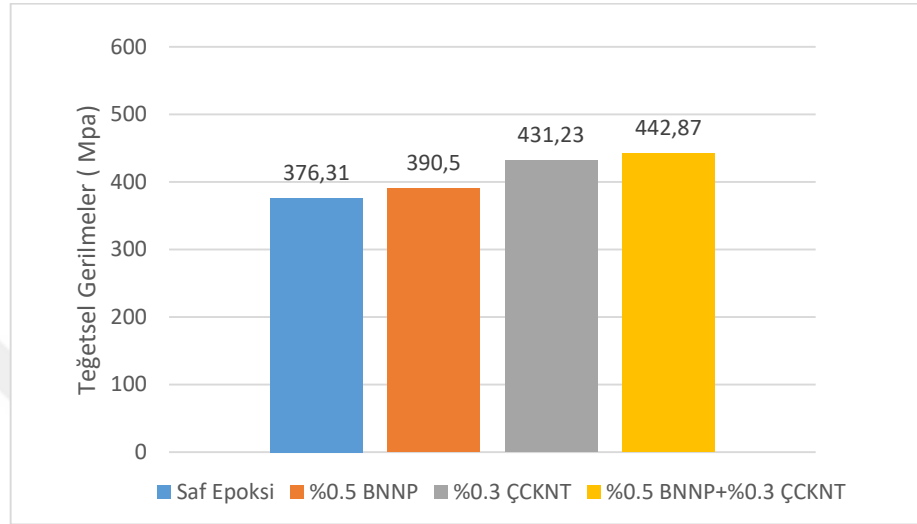


**Şekil 5.3** Bir hafta yaşlandırılmış numuneler a) Saf, b) BNNP, c) ÇCKNT, d) BNNP+ÇCKNT

Yaşlandırılmamış numunelerde olduğu gibi bir hafta yaşlandırma neticesinde, elyaf yönelimi doğrultusunda oluşan deformasyonlar artarak devam etmiştir.

Bir hafta yaşlandırılmış numunelerin maksimum teğetsel gerilmeleri şekil 5.4’te gösterilmiştir. Kontrol grubu (yaşlandırılmamış numuneler) referans alınarak inceleme yapıldığında, saf epoksi teğetsel gerilme mukavemeti 402 Mpa değerinden 376 Mpa değerine düşerek % 6 oranında mukavemet kaybetmiştir. BNNP ilaveli epoksi

kompozitte teğetsel mukavemet 430 Mpa değerinden 390 Mpa değerine düşerek yaşlandırılmamış kontrol grubuna göre % 9 mukavemet kaybı olmuştur. ÇCKNT ilaveli epoksilerde mukavemet 470 Mpa değerinden 431 Mpa değerine düşmüş, yüzdesel olarak % 8.3 azalma olmuştur. Yaşlandırılmamış hibrit boruda 485.73 Mpa olan maksimum çekme mukavemeti ise % 8.8 azalarak 442.87 Mpa değerine düşmüştür.



Şekil 5.4 Bir hafta yaşlandırılmış numunelerde teğetsel gerilmeler

Yaşlandırma işlemi genel olarak numunelerin kopma uzamalarını azaltmıştır (Çizelge 5.2). Bir hafta yaşlandırılmamış numunelerde olduğu gibi en düşük kopma uzaması % 10.84 ile hibrit borulardır olmuştur. En yüksek kopma uzaması % 13.56 oranı ile saf epoksili numunelerde görülmüştür.

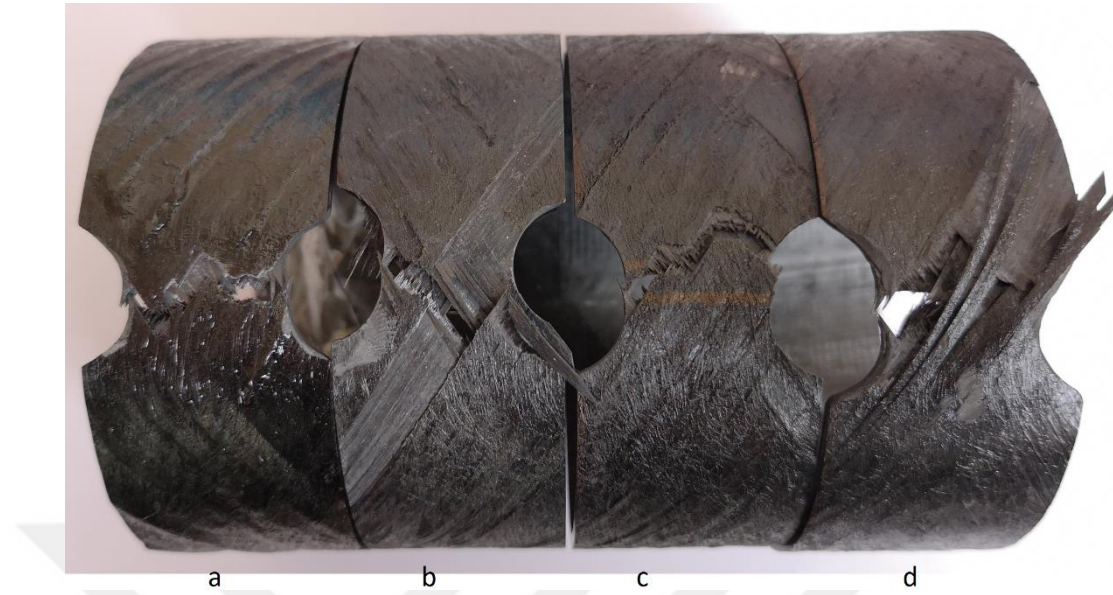
Çizelge 5.2 Bir hafta yaşlandırılmış numunelerin kopma uzamaları

Numune Özellikleri	Kopma Uzaması (mm)	% kopma uzaması
Saf Epoksi	8.13	13.56
% 0.5 BNNP	7.83	13.05
% 0.3 ÇCKNT	7.9	13.17
% 0.5 BNNP+%0.3 ÇCKNT	6.57	10.85

### 5.1.3 İki hafta Yaşlandırılmış Borular

İki hafta süreyle 80 °C sıcaklıkta hidrotermal yaşlandırmaya bırakılmış numunelerin hasar görüntüleri şekil 5.5'te gösterilmiştir. Yaşlandırma süresinin uzamasıyla

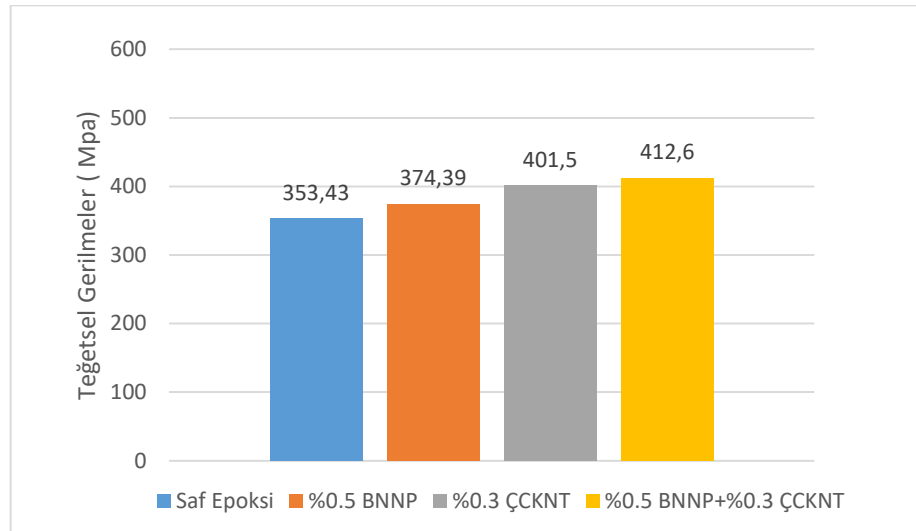
birlikte, numunelerin teğetsel gerilme mukavemetlerinde oluşan azalmanın arttığı görülmektedir.



Şekil 5.5 İki hafta yaşlandırılmış numuneler a) Saf, b) BNNP, c) ÇCKNT, d) BNNP+ÇCKNT

İki hafta yaşlandırılmış numunelerde kopma şekli elyaf sarım açısı doğrultusunda,  $\pm 55^\circ$  'de olmuştur. Bu süreyle yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerde kontrol grubu olan yaşlandırılmamış numunelere göre teğetsel gerilme mukavemet kaybı, saf numuneler için % 12, BNNP ilaveli epoksi numuneler için % 12.9, ÇCKNT ilaveli numuneler için % 14.6, hibrit borular için % 14.92 olmuştur. Bir hafta yaşlandırılmış numunelerin mukavemet değerleri referans alınarak yapılan hesaplamalarda, iki hafta yaşlandırılmış numunelerin mukavemet kaybı, saf numune için % 6, BN ilaveli numuneler için % 4, KNT ilaveli numuneler için % 6.8, hibrit numuneler için ise % 6.45 olmuştur.

İki hafta yaşlandırılmış numunelere ait maksimum teğetsel gerilmeler Şekil 5.6'da gösterilmiştir. İki hafta yaşlandırılmış numunelerde en yüksek mukavemet hibrit epoksili boru numunelerinde gözlemlenmiş olmasına rağmen oransal olarak hesaplandığında, en yüksek mukavemet kaybı da hibrit epoksi borularda görülmektedir. Genel olarak numunelerde mukavemet kayıp oranları incelendip değerlendirildiğinde nanopartikül ilaveli numunelerde hidrotermal yaşlanmaya bağlı mukavemet kaybının daha çok olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.6** İki hafta yaşlandırılmış numunelerde teğetsel gerilmeler

Numunelerin kopma uzamaları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir. En düşük kopma uzaması ÇCKNT epoksi kompozitlerde, en yüksek kopma uzaması ise saf epoksi numunesinde görülmüştür. Bir hafta yaşlandırılmış numunelerin kopma uzamaları referans alındığında herhangi bir sonuç çıkarılamamıştır.

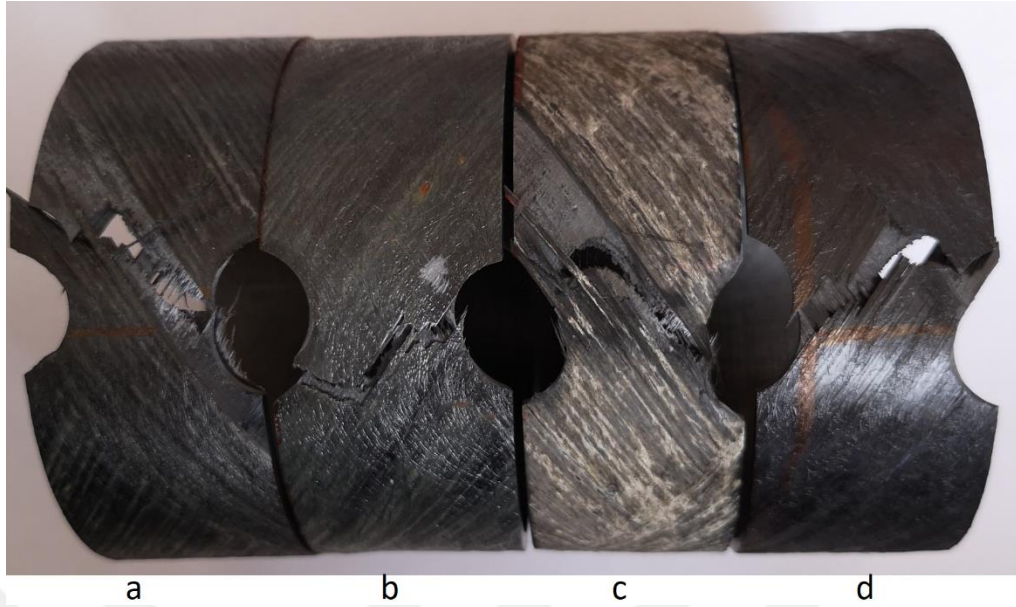
**Çizelge 5.3** İki hafta yaşlandırılmış numunelerin yüzde kopma uzamaları

Numune Özellikleri	Kopma Uzaması (mm)	% kopma uzaması
Saf Epoksi	9	15.02
%0.5 BNNP	6.72	11.2
%0.3 ÇCKNT	6.35	10.58
%0.5 BNNP+%0.3 ÇCKNT	7.51	12.51

#### 5.1.4 Üç hafta Yaşlandırılmış Borular

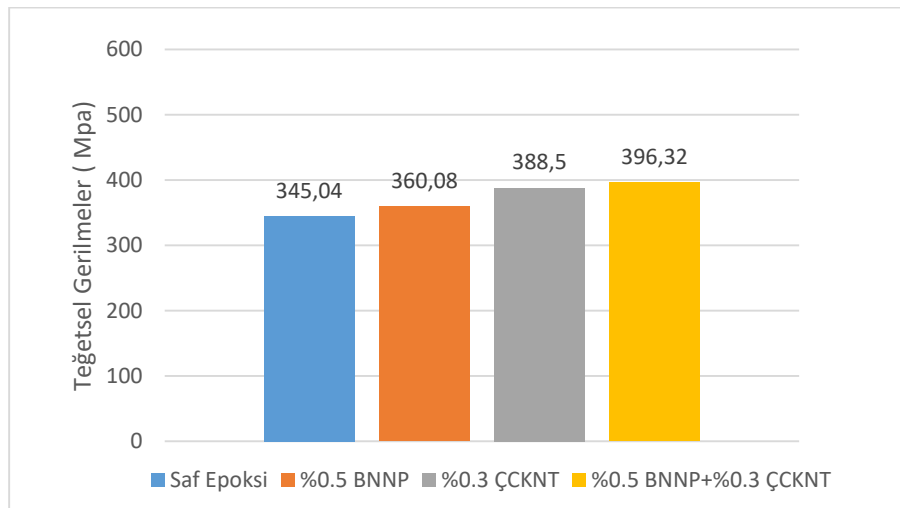
Üç hafta yaşlandırılmış numunelerin hasar görüntüleri şekil 5.7'de gösterilmiştir. Çalışmadaki maksimum yaşlandırma süresi olan üç hafta sonunda numunelerin reçinelerinde akmaların olduğu görülmektedir. Numuneler elyaf sarma açısı olan 55° açıda, elyaflara paralel şekilde deformasyona uğramıştır.

Numunelerde kontrol grubu olan yaşlandırılmamış numunelere göre teğetsel gerilme mukavemeti kaybı (Şekil 5.8) saf numuneler için % 14.2, BNNP ilaveli numuneler için % 16, ÇCKNT ilaveli numuneler için % 17, hibrit borular için % 18.28 olmuştur. 2 hafta yaşlandırılmış numuneler referans alındığında 3 haftalık yaşlandırma işlemi ardından mukavemet kaybı ise saf numunelerde % 2.4, BNNP ilaveli numunelerde % 3.8, ÇCKNT ilaveli numunelerde % 3.2 ve hibrit numunelerde ise % 3.95 olmuştur.



Şekil 5.7 Üç hafta yaşlandırılmış numuneler a) Saf, b) BNNP, c) ÇCKNT, d) BNNP+ÇCKNT

Numunelere ait fotoğraflar incelendiğinde, üç hafta süre sonunda bazı numunelerde reçine akmasının daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum nanopartiküllerin difüzyon yolu ile dış ortama geçmesi ve yapı içerisinde oluşan porozitenin, epoksi reçinenin akmasını kolaylaştırmasından kaynaklanabileceği gibi imalat sırasında epoksinin homojen dağıtılmamasından oluşabilmektedir.



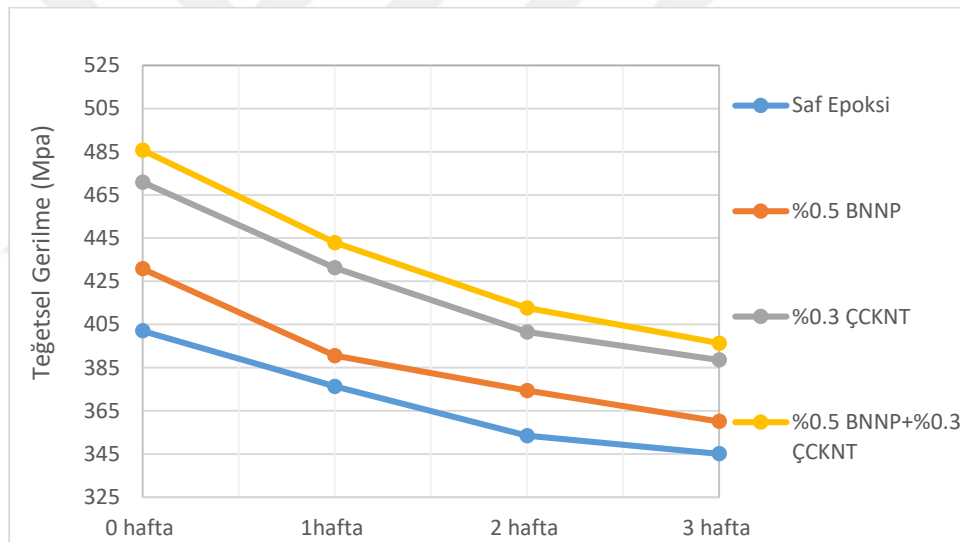
Şekil 5.8 Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde teğetsel gerilmeler

Üç hafta yaşlandırma süresi sonunda en yüksek kopma uzaması % 13.12 saf epoksi, en düşük kopma uzaması % 10.74 BNNP ilaveli epoksi numunede görülmektedir (Çizelge 5.4).

**Çizelge 5.4** Üç hafta yaşlandırılmış numunelerin yüzde kopma uzamaları

Numune Özellikleri	Kopma Uzaması (mm)	% kopma uzaması
Saf Epoksi	7.87	13.12
%0.5 BNNP	6.44	10.74
%0.3 ÇCKNT	6.47	10.78
%0.5 BNNP+%0.3 ÇCKNT	6.8	11.65

Maksimum teğetsel gerilmeler tüm yaşlandırma süreleri için BNNP+ÇCKNT epoksili hibrit borularda olmuştur. Fakat yaşlanma süresi uzadıkça nanopartikül ilaveli numunelerde, mukavemet azalma oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Matris yapı içerisindeki kütlece nanopartikül oranının artması ve yaşlandırma süresine bağlı olarak maksimum teğetsel gerilmede düşüşler olmaktadır. Şekil 5.9’da tüm numuneler için yaşlandırma süreleri ve maksimum teğetsel gerilmeler gösterilmiştir.



**Şekil 5.9** Saf ve farklı nanopartikül içeren numunelerin yaşlanma sürelerinde teğetsel gerilmeleri

## 5.2 Düşük Hızlı Darbe Deneyi

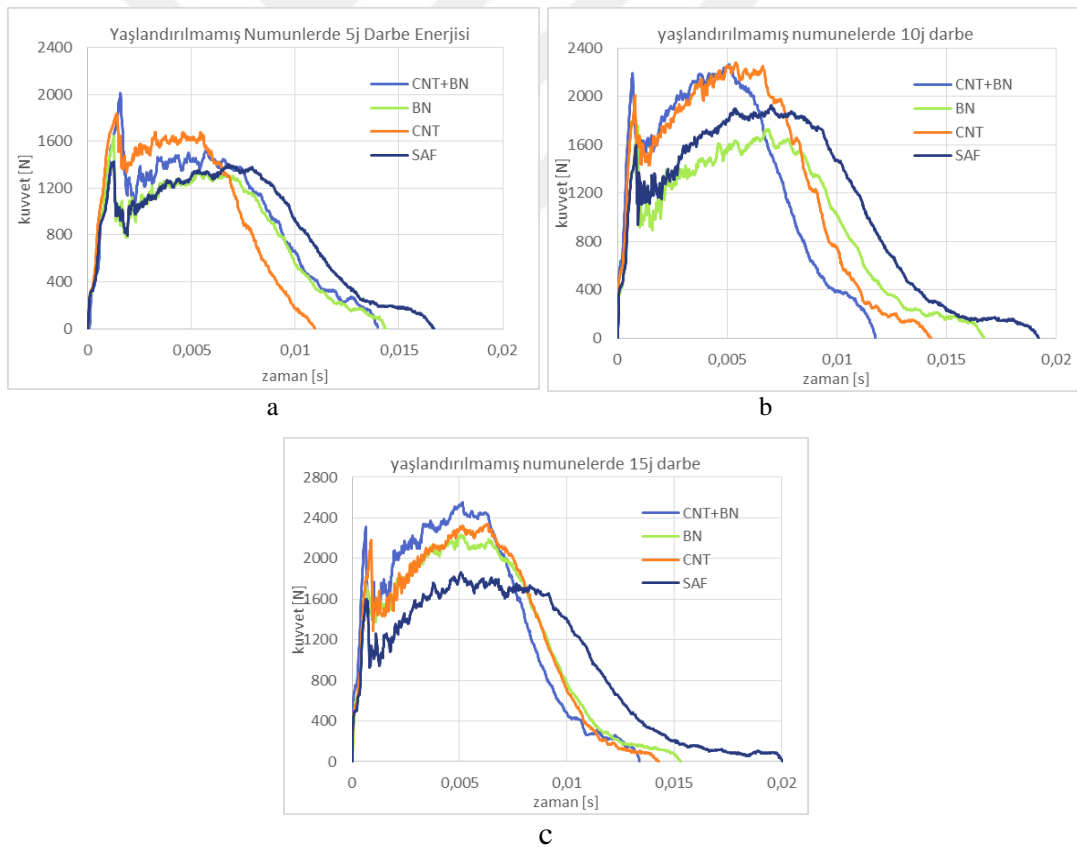
Hidrotermal yaşlandırma ünitesi içerisinde 1, 2, 3 hafta süre ile yaşlandırılan saf epoksili, epoksiye kütlece % 0.5 BNNP, % 0.3 ÇCKNT ve % 0.5 BNNP + % 0.3 ÇCKNT ilaveli hibrit borularda, 5, 10, 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testi gerçekleştirilmiştir. Her bir boru çeşidinden yaşlandırılmamış kontrol grubu bulunmaktadır. Düşük hızlı darbe deneyi, tüm darbe enerji seviyesinde, her bir numune için iki kez tekrarlanmıştır. Deney sonucunda toplanan verilerden bilgisayar ortamında kuvvet-zaman (f-t) ve kuvvet-yer değiştirme (f-d) grafikleri çizilmiş, yaşlandırma

sürelerinin ve nanopartikül ilavesinin kompozit borularda darbe dayanımı ve darbe hasarı üzerinde etkisi incelenmiştir. Darbe testi sonrasında numunede oluşan hasar ve deformasyon mekanizmaları optik mikroskop ile görüntülenmiş, oluşan hasar mekanizmaları gruplandırılarak kompozit malzeme üzerinde etkileri açıklanmıştır

### 5.2.1 Yaşlandırılmamış Numunelerde Darbe Deneyi

Bu bölümde, tüm kontrol grubu numunelerinin darbe cavabını belirlemek amacı ve nanopartikül ilavesinin yaşlandırma işlemi yapılmamış borular üzerindeki etkisini tespit için, tüm boru çeşitlerinde 5, 10, 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi uygulanmıştır. Her darbe enerji seviyesi için numunelere ait  $f-t$  ve  $f-d$  grafikleri çizilerek değerlendirme yapılmıştır.

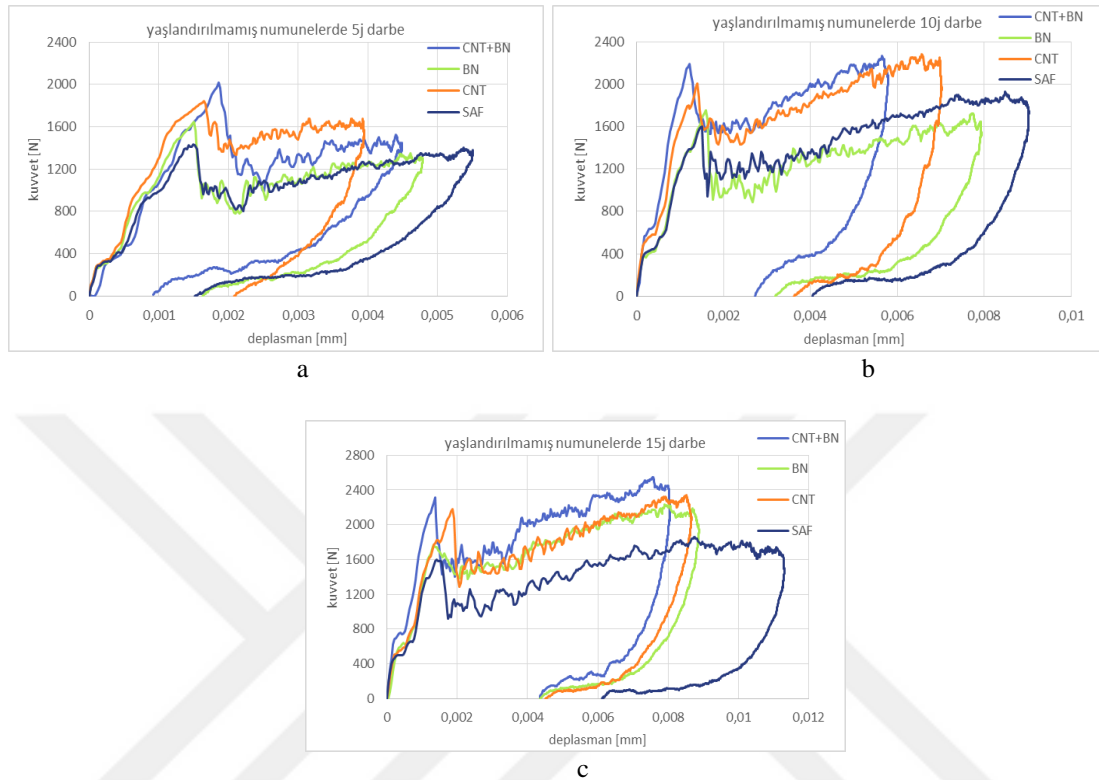
Yaşlandırılmamış numunelere ait 5, 10, 15 J darbe enerji seviyelerine ait kuvvet-zaman grafikleri şekil 5.10, kuvvet-deplasman grafikleri ise şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.10 Yaşlandırılmamış numunelerde kuvvet-zaman ( $f-t$ ) grafikleri a) 5 J, b)10 J, c)15 J

Yaşlandırılmamış numunelere ait grafikler incelendiğinde darbe enerjisi arttıkça  $f_1$  kuvveti olarak tanımlanan, darbenin ilk teması sonucu oluşan maksimum kuvvet de artmaktadır ve bütün darbe enerji seviyelerinde en büyük temas kuvvetinin hibrit epoksili

numunelerde olduğu görülmektedir. KNT ilaveli epoksili numuneler hibrit numunelere çok yakın ilk temas kuvveti değeri göstermişlerdir. BNNP ilaveli numunelerde maksimum temas kuvveti saf epoksili numunelere yakın olmuştur.



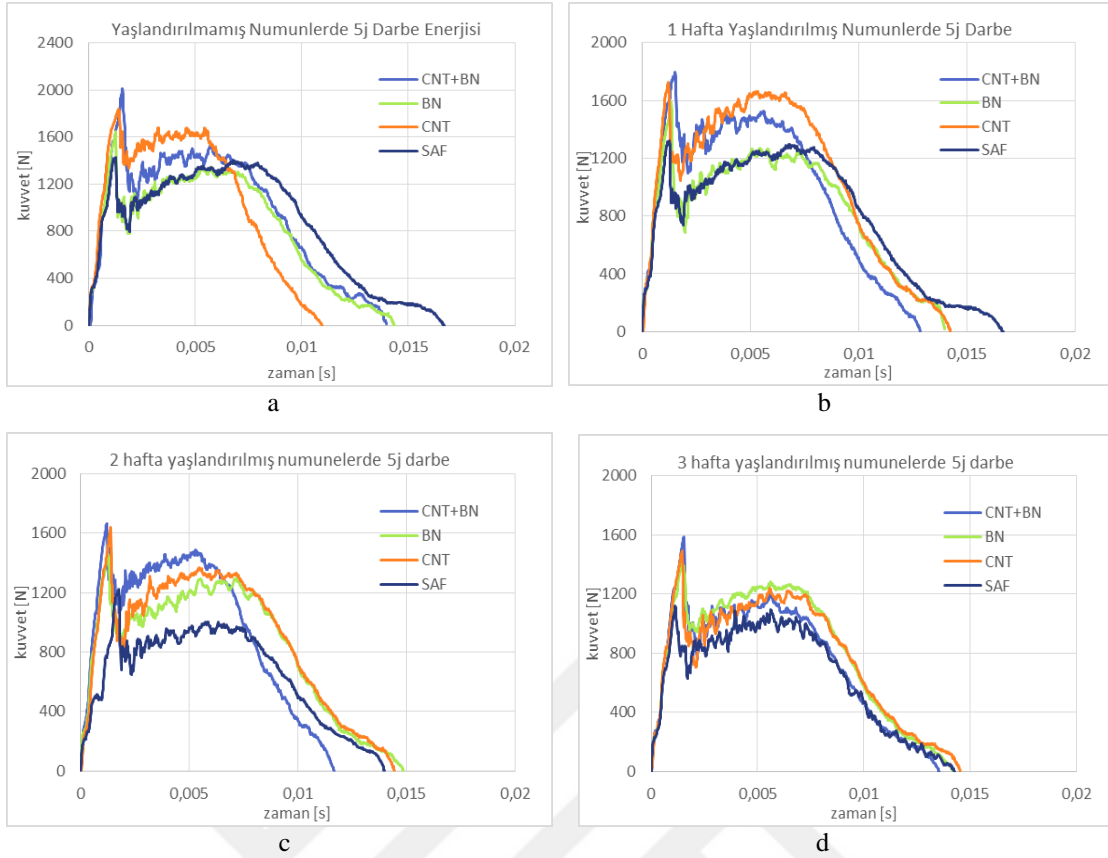
Şekil 5.11 Yaşlandırılmamış numunelerde kuvvet-deplasman (f-t) grafikleri a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

Darbe enerji seviyesinin artmasıyla tüm numunelerde şekil değiştirme miktarında artmaktadır. Nanopartikül ilavesi, borulardaki rijitliği artırmış ve en büyük deplasman saf epoksili numunelerde görülmüştür. KNT ilaveli ve hibrit numunelerde 5 ve 15 J enerji seviyelerinde şekil değiştirme miktarları birbirlerine yakın olmuştur.

### 5.2.2 Nanopartikül İlavesi ve Yaşlanmanın Darbe Üzerine Etkisi

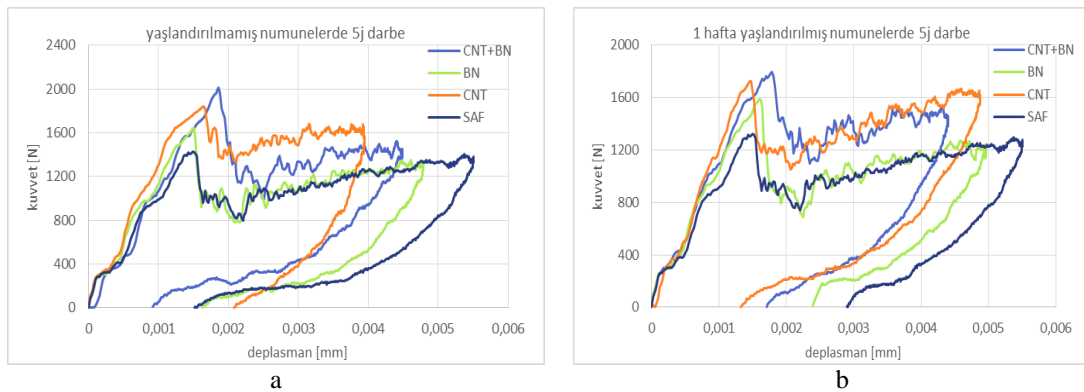
Bu bölümde eş darbe enerjisi uygulanmış tüm numunelerin darbe karakteristikleri, kendi aralarında kıyaslanarak, kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman grafikleriyle gösterilmiştir.

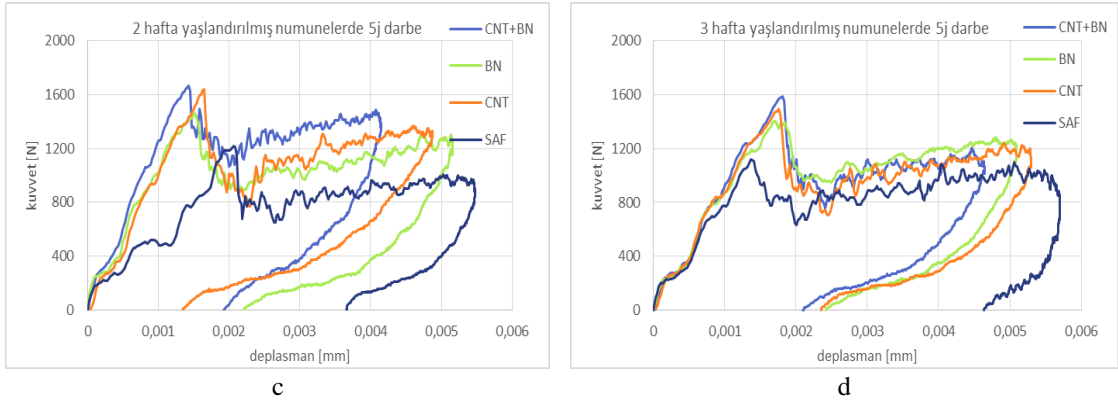
Şekil 5.12 ve 5.13'te 5 J darbe enerjisi uygulanmış, yaşlandırılmamış ve 1, 2, 3 hafta yaşlandırılmış numunelerin kuvvet-zaman ve kuvvet-şekil değiştirme grafikleri gösterilmektedir.



**Şekil 5.12** Yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe sonucu kuvvet- zaman grafiği a) 0 hafta, b)1 hafta, c) 2 hafta, d) 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma

Yaşlandırma işlemi sonucu numuneler mukavemet kaybına uğramışlardır. 5 J darbe enerji seviyesinde en büyük mukavemet kayıpları ilk hafta sonunda gerçekleşmiştir. Yüzdesel olarak en düşük mukavemet kaybı, saf numunelerde gerçekleşirken; BN ve CNT'nin birlikte kullanıldığı, yüksek oranda nanopartikül içeren hibrit numunelerde mukavemet kaybı daha fazla olmuştur.

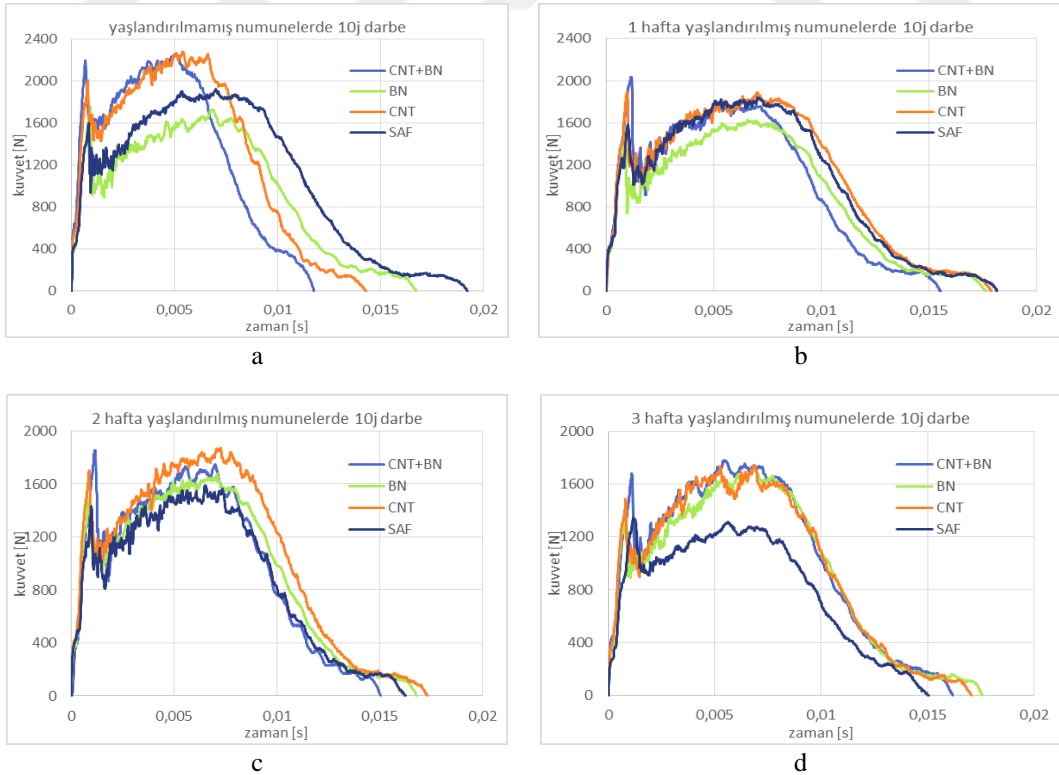




**Şekil 5.13** Yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe sonucu kuvvet-deplasman grafiği a) 0 hafta, b)1 hafta, c) 2 hafta, d) 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma

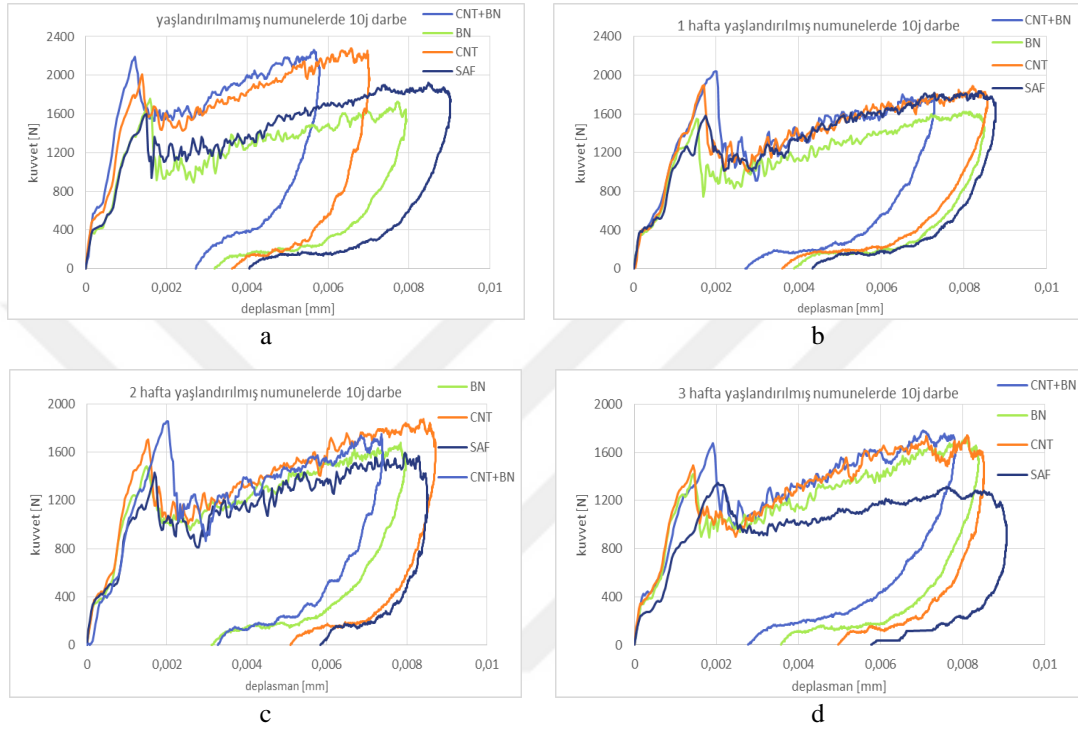
Yaşlandırmadan bağımsız olarak darbeye karşı en az rijitliği saf numuneler gösterirken; yaşlandırma süresinin artması ile numuneler belirgin şekilde rijitlik kaybetmişlerdir.

1, 2 ,3 hafta hidrotermal yaşlandırma uygulanmış ve 10 J enerji seviyesinde darbe testi uygulanmış numunelere ait kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri sırası ile Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



**Şekil 5.14** Yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe sonucu kuvvet-zaman grafiği a) 0 hafta, b)1 hafta, c) 2 hafta, d) 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma

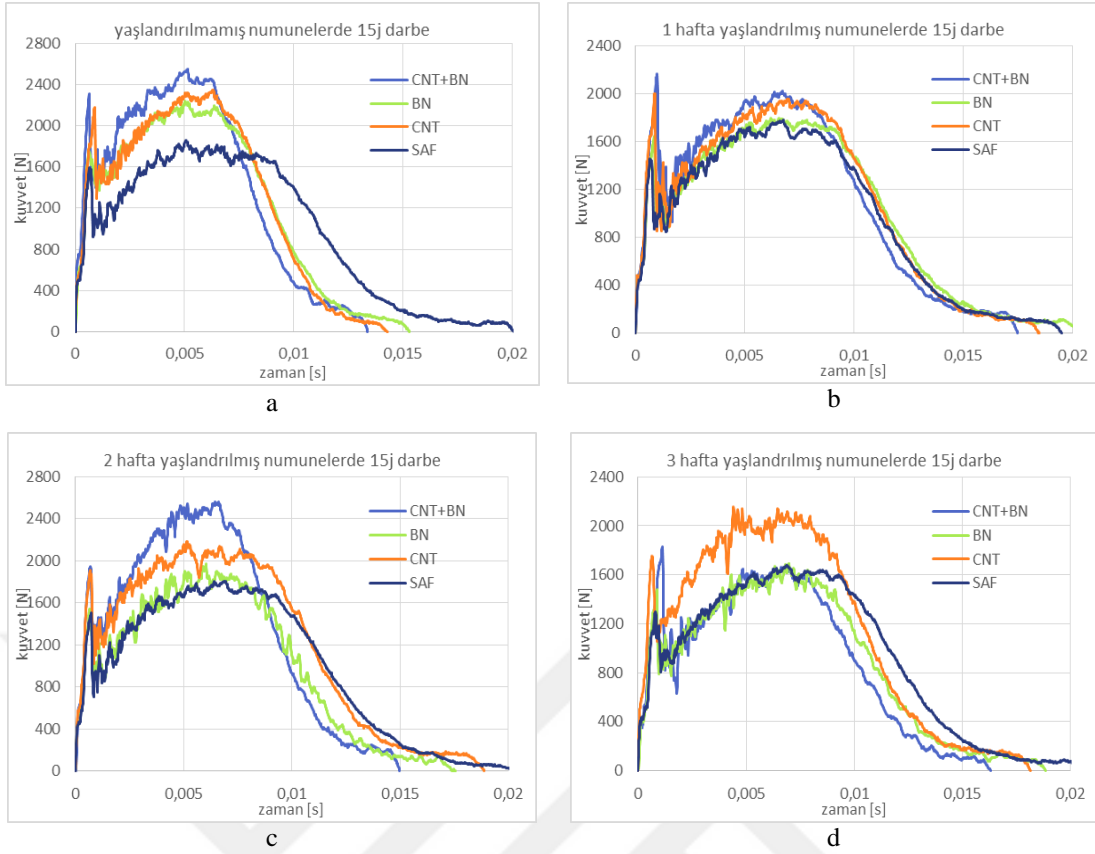
10 J darbe enerjisinde vurucu ucun hedef malzemeye temas süresi, 5j darbe enerjisine göre bir miktar artmıştır. En yüksek ilk temas kuvveti hibrit epoksili borularda oluşmuştur. Yaşlandırma süresi uzadıkça maksimum ilk temas kuvvetinde düşüşler gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.15** Yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe sonucu kuvvet-deplasman grafiği a) 0 hafta, b) 1 hafta, c) 2 hafta, d) 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma

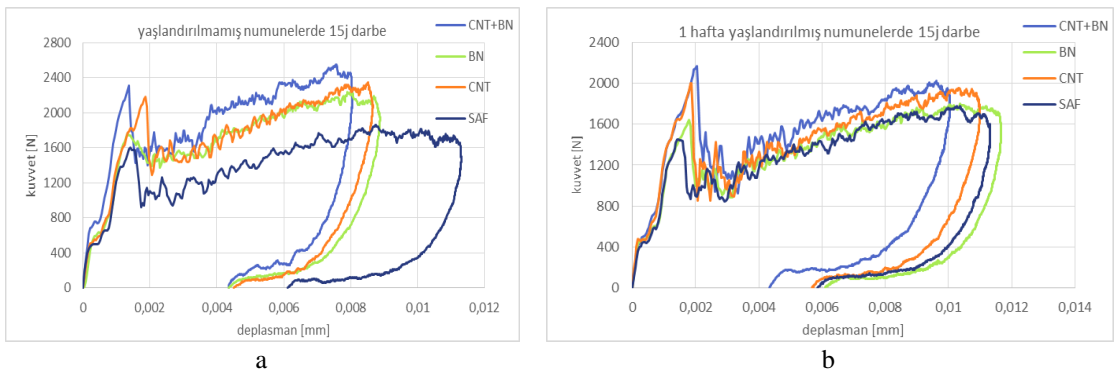
10 J düşük hızlı darbe grafikleri incelendiğinde yaşlandırma işlemi sonrası rijitlik kaybı tüm numunelerde görülmektedir. Her yaşlandırma süresinde en rijit numune, hibrit epoksili numuneler olmuştur. Yine en az rijitlik gösteren numune, saf numune olmaktadır.

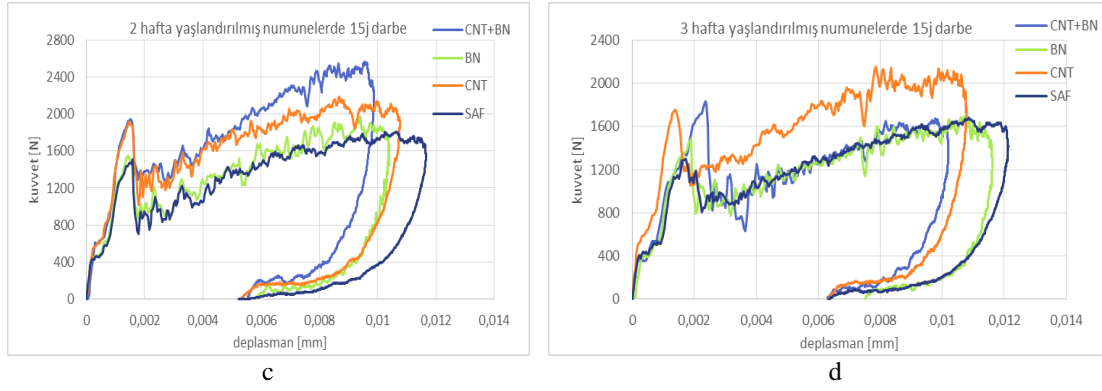
15 J darbe enerjisine ait deformasyon grafikleri Şekil 5.16’da kuvvet-zaman, Şekil 5.17’de kuvvet-deplasman olarak gösterilmiştir.



**Şekil 5.16** Yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe sonucu kuvvet-zaman grafiği a) 0 hafta, b)1 hafta, c) 2 hafta, d) 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma

15 J darbe enerji seviyesinde BNNP katkılı epoksili numunelerde maksimum temas kuvveti, saf numunelerinkine çok yaklaşmıştır. Bununla birlikte KNT ilaveli numunelerdeki maksimum temas kuvveti, hibrit numunelerin maksimum temas kuvvetine yaklaşmıştır. Fakat en büyük mukavemet, hibrit numunelerde görülmektedir .





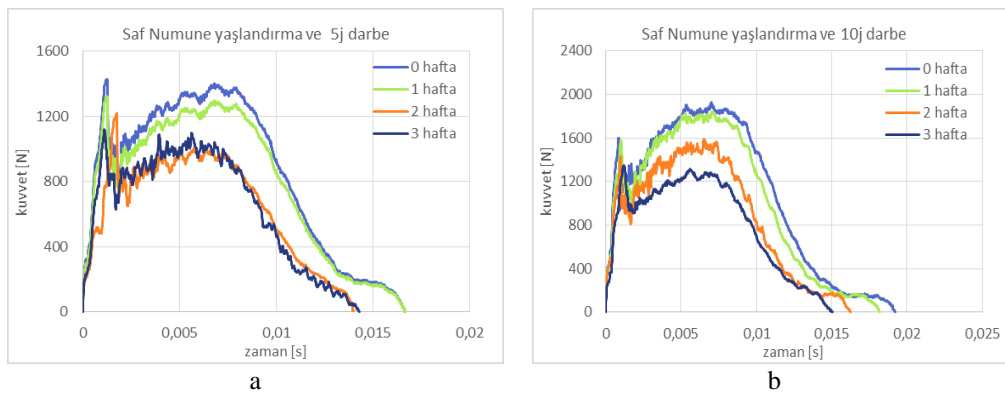
**Şekil 5.17** Yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe sonucu kuvvet-deplasman grafiği a) 0 hafta, b) 1 hafta, c) 2 hafta, d) 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma

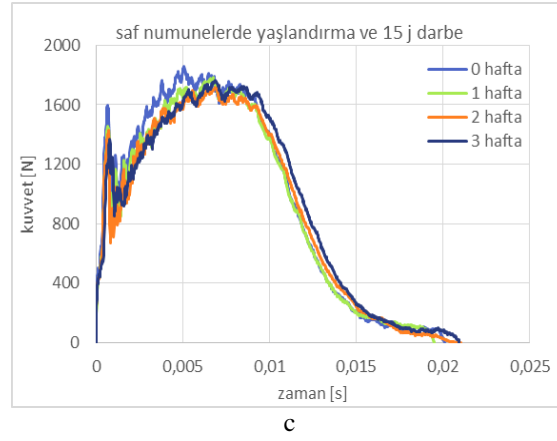
Tüm grafikler göz önüne alınarak değerlendirme yapıldığında, kullanılan nanopartiküller arasında KNT'nin en iyi katkı partikülü olduğu görülmektedir. Matriste kütlece % 0.3 oranında bulunan KNT'ler, borunun rijitliğine çok büyük oranlarda katkı sağlamışlardır. BNNP ilavesi, boru mekanik özelliklerine olumlu anlamda büyük katkılar sağlamamakla birlikte, BNNP ve KNT'nin birlikte ilave edildiği numunelerde en büyük darbe maksimum temas kuvveti ve en büyük rijitliğin sağlanması, bu iki partikülün birbirlerinin özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Fakat tek başına KNT ilaveli numuneler hibrit numunelere yakın özellikler göstermektedir.

### 5.2.3 Hidrotermal Yaşlandırmanın Hasar Mekanizmasına Etkisi

Bu kısımda her bir boru çeşidi için aynı darbe enerjisi altında yaşlandırma etkisi, ayrı ayrı incelenmiştir. İnceleme, tüm enerji seviyelerinde uygulanan darbe testi için ayrı şekilde grafiklendirilmiştir (Şekil 5.18, 5.19).

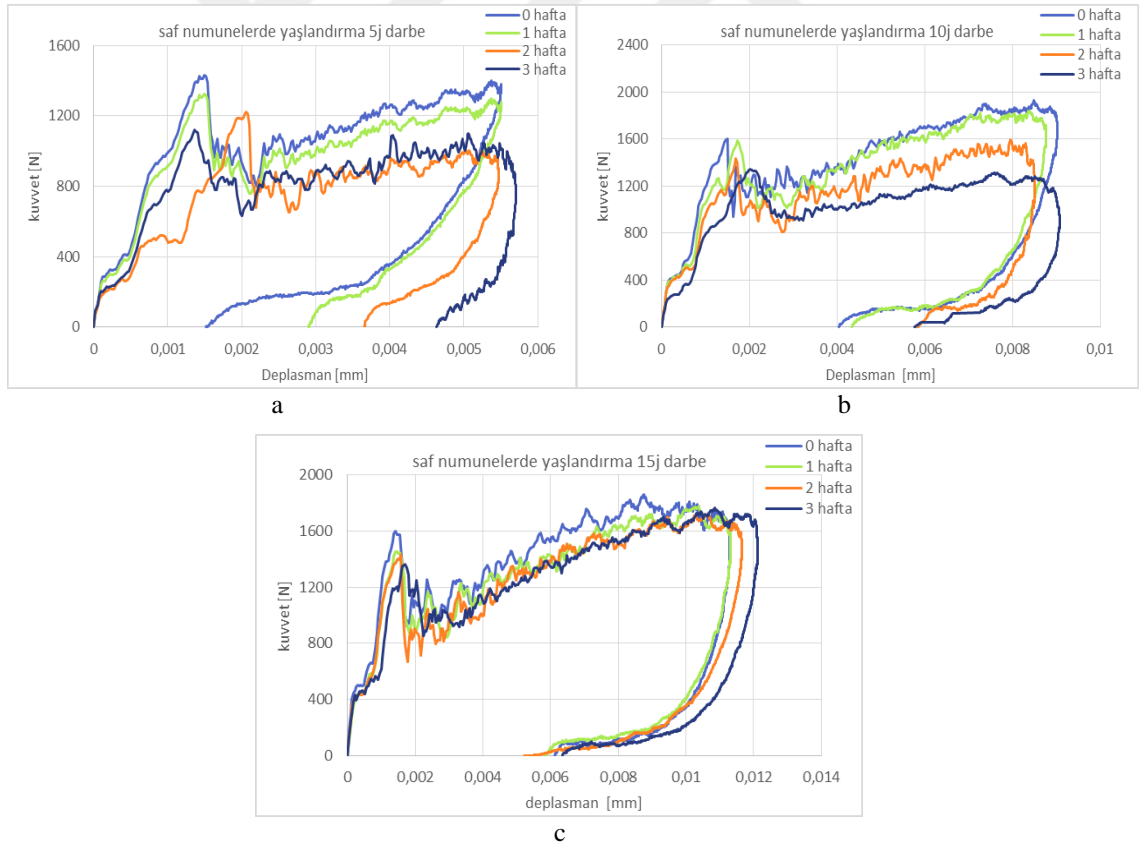
Saf numunelere ait 5, 10, 15 J darbe testi kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman grafikleri sırası ile Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de gösterilmiştir.





Şekil 5.18 Saf numunelerde yaşlandırma (kuvvet-zaman) f-t grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

Saf numunelerde 3 hafta yaşlandırma sonunda maksimum temas kuvveti  $f_1$  düşmüştür. 15j darbe testinde maksimum temas kuvvetinin ardından gerçekleşen temas sürecinde numunenin darbe karşı tepkisinin her bir yaşlandırma süresi için ciddi birçimde arttığı görülmektedir.

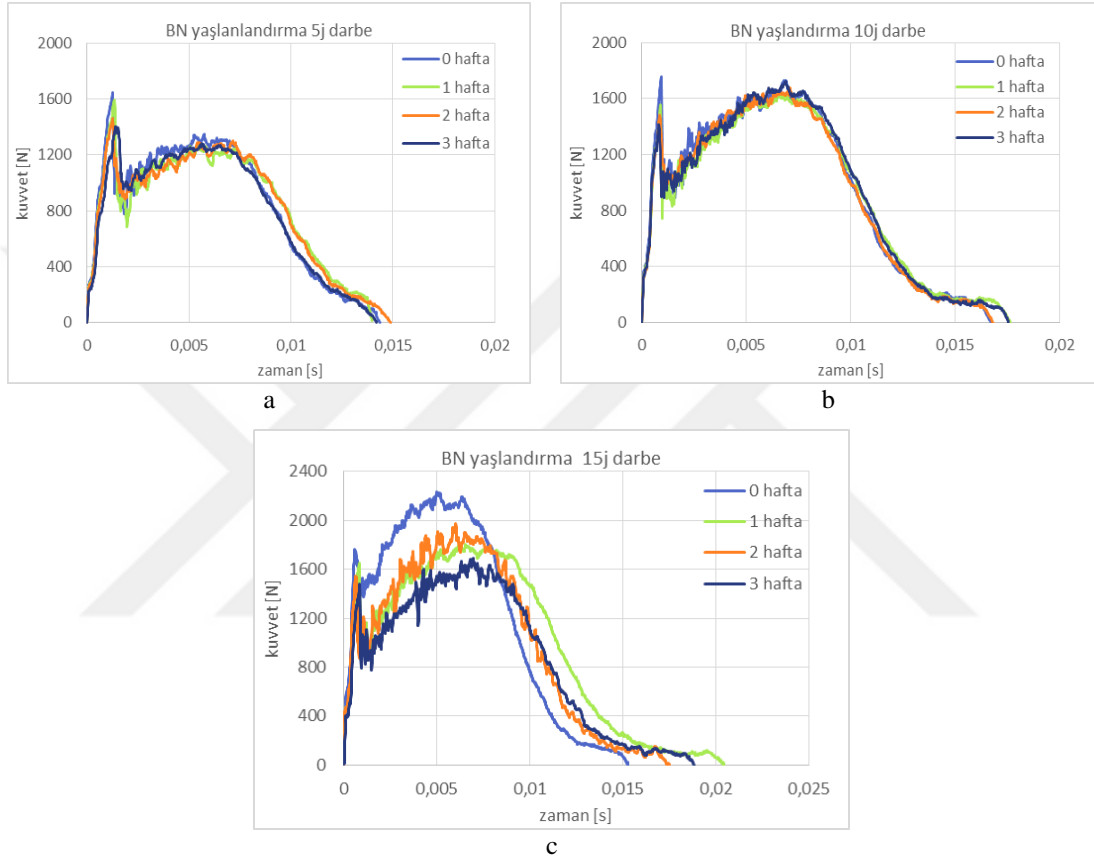


Şekil 5.19 Saf numunelerde yaşlandırma (kuvvet-deplasman) f-d grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

Beklentilerin ve diğer tüm darbe verilerinin aksine, 15 J darbe testi için saf numunelerin hidrotermal yaşlandırma sonucu deplasman değerlerinin çok değişmediği

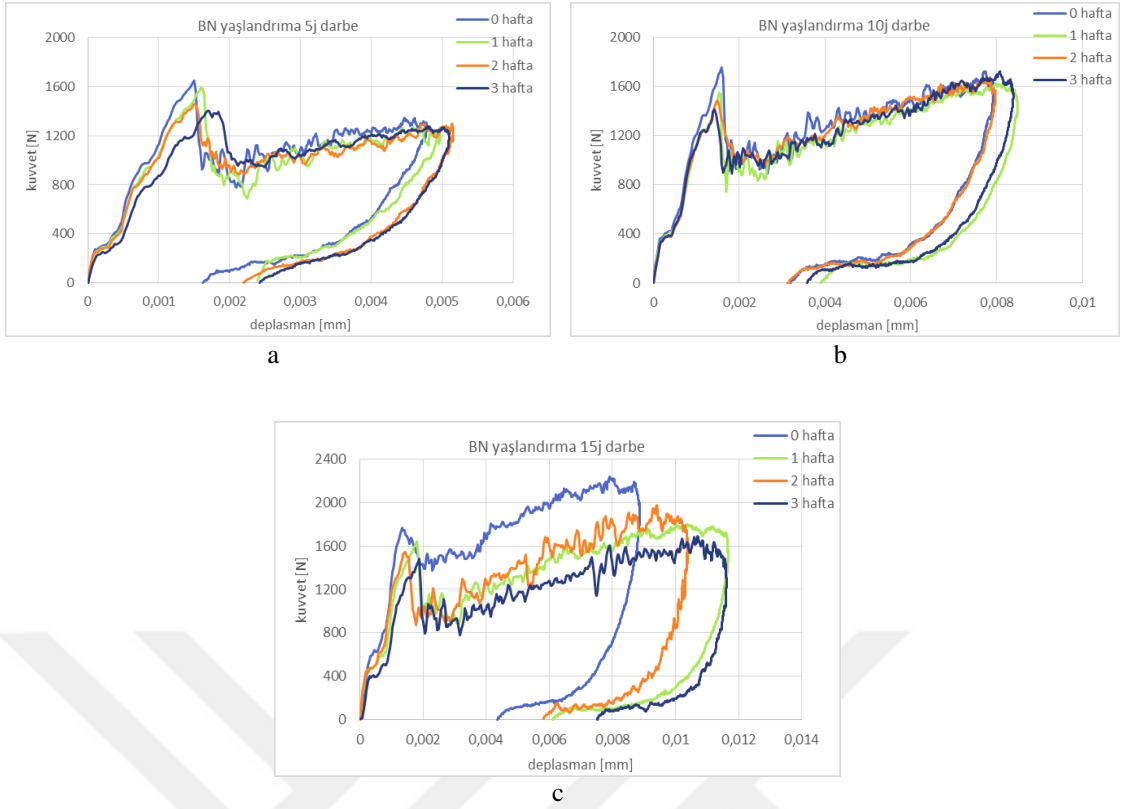
görülmektedir. Fakat bununla birlikte yaşlandırma süresinin artmasıyla ilk temas kuvvetleri azalmıştır. 5 ve 10 J darbe grafikleri incelendiğinde ise saf numunelerin yaşlandırma süresine bağlı olarak rijitlikleri azalmış ve kuvvet karşısında en büyük şekil değişikliği 3 hafta süre ile yaşlandırılmış saf numunelerde görülmüştür.

BNNP ilaveli numunelerde 5, 10, 15 J darbe enerji seviyelerinde yaşlanmanın etkisi Şekil 5.20 ve 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20 BN ilaveli numunelerde yaşlandırma f-t (kuvvet-zaman) grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

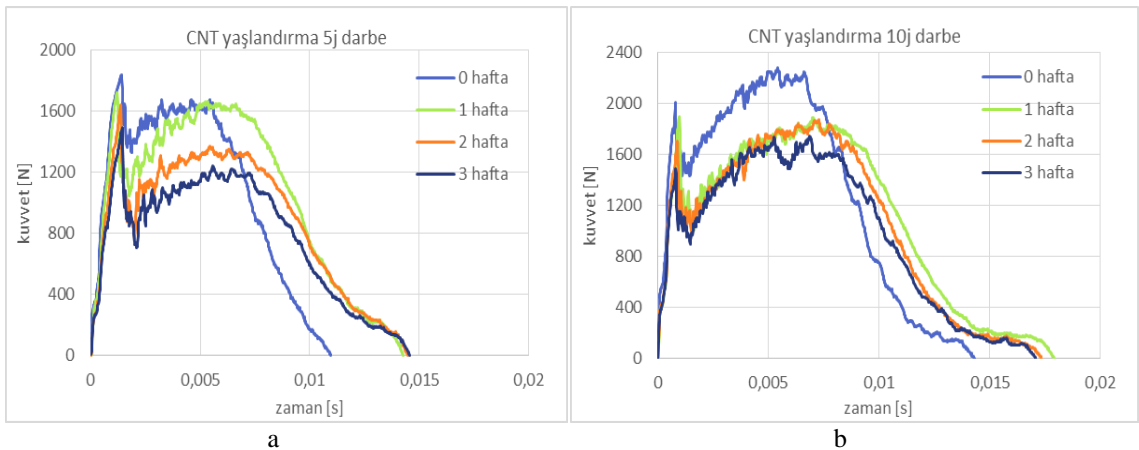
BNNP ilaveli numunelerde darbe şiddetinin artmasına karşın, maksimum temas kuvveti çok fazla artış göstermemiştir. Bu numuneler için maksimum temas kuvveti, yaşlandırılmamış numunelerde ölçülen maksimum temas kuvvetleri referans alındığında üç hafta yaşlandırılmış numunelerde % 24 oranında düşmüştür.

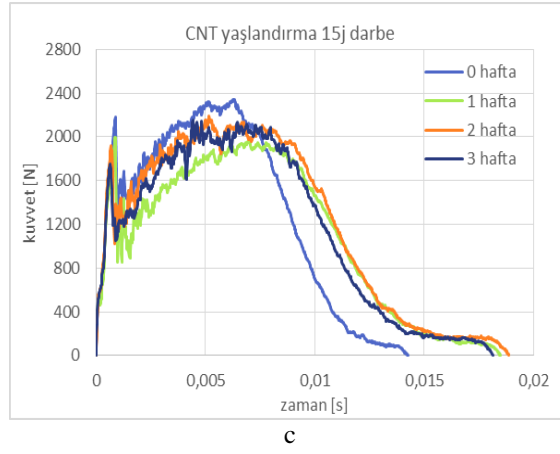


Şekil 5.21 BN ilaveli numunelerde yaşlandırma f-d (kuvvet-deplasman) grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

Yaşlandırma işleminin rijitliğe etkisi en belirgin 15 J darbe enerji seviyesinde anlaşılmaktadır. 15 J enerji seviyesinde yaşlandırılmamış numunelerde deplasman, 3 hafta yaşlandırılmış numunelerin deplasmanının yarısı kadar olmuştur. Daha düşük enerji seviyelerinde yapılan deneylerde de yaşlandırılmamış numuneler en rijit özelliği sergilemiştir.

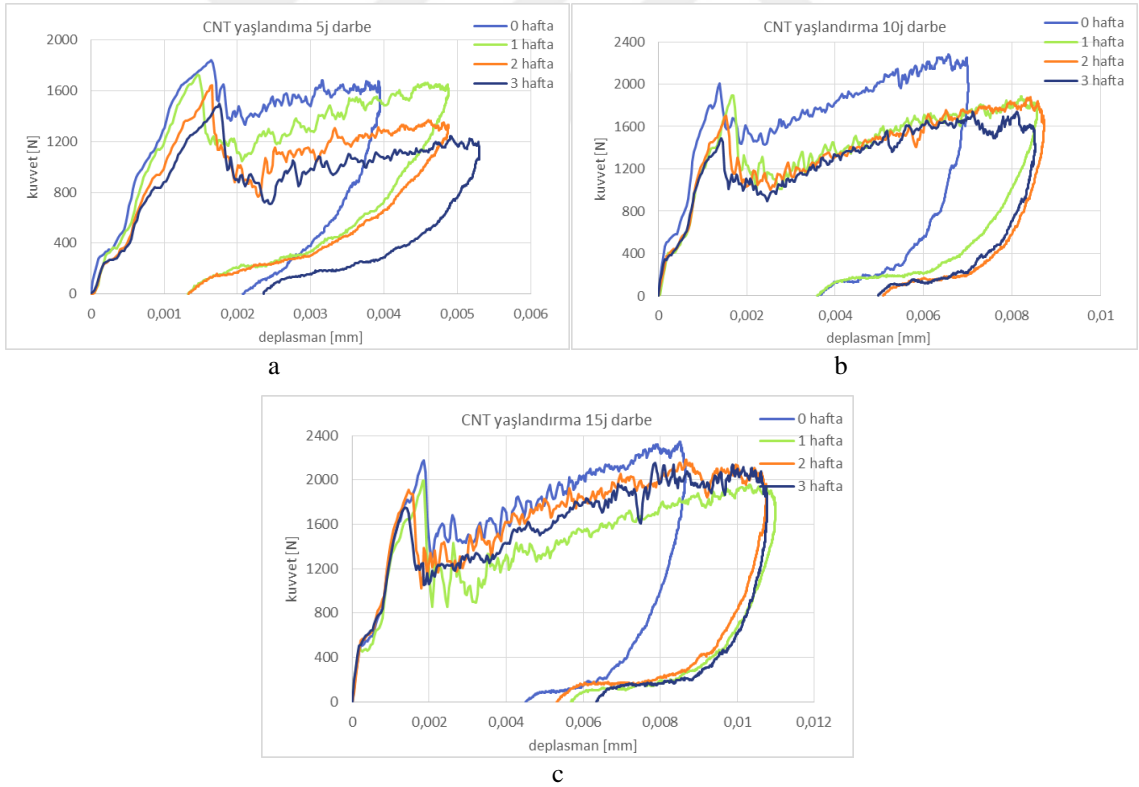
KNT ilaveli epoksili numuneler üzerinde hidrotermal yaşlandırmanın etkisi Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te sırası ile kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman 5, 10, 15 J darbe grafikleri ile gösterilmiştir.





Şekil 5.22 KNT ilaveli numunelerde yaşlandırma f-t (kuvvet-zaman) grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

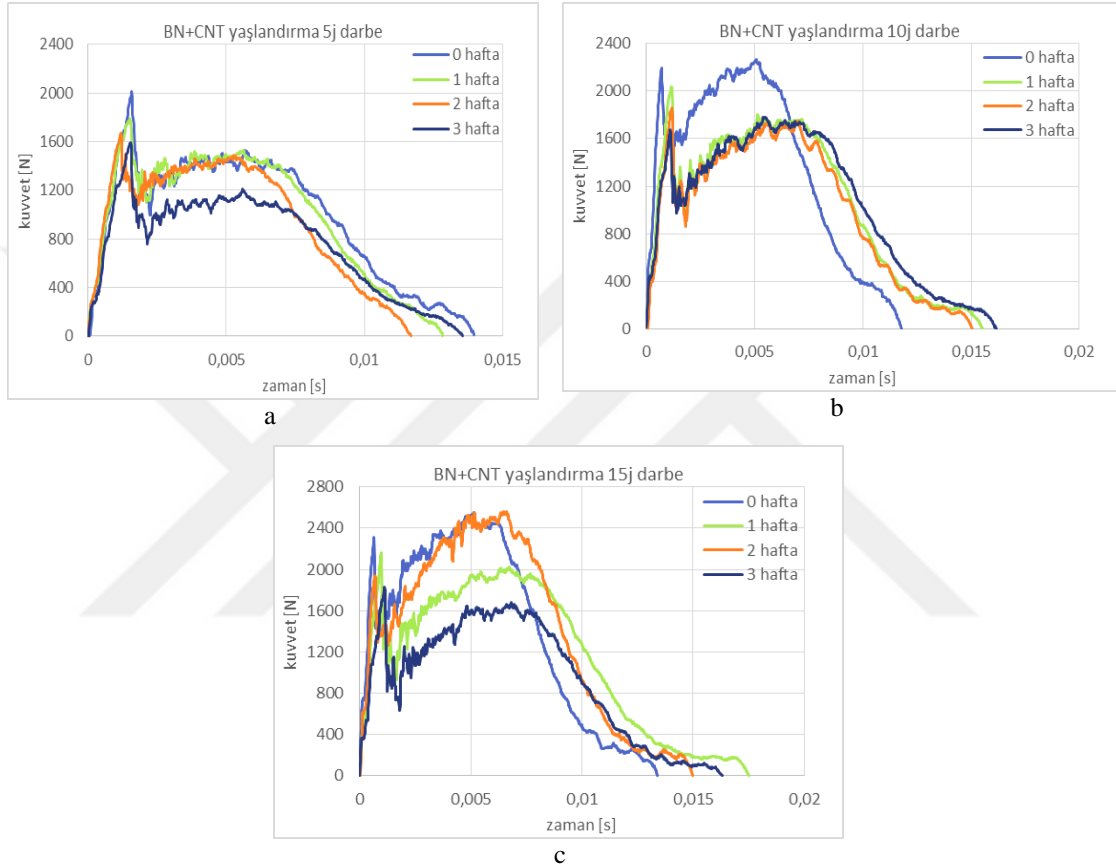
Saf ve BNNP ilaveli numunelerin aksine, darbe enerjisinin artması ile KNT ilaveli numunelerde gözlenen maksimum temas kuvveti değeri artmıştır. KNT ilaveli numunelerde bu temas kuvveti, 3 hafta hidrotermal yaşlandırma sonunda % 30 oranında düşüş göstermiştir.



Şekil 5.23 KNT ilaveli numunelerde yaşlandırma f-d (kuvvet-deplasman) grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

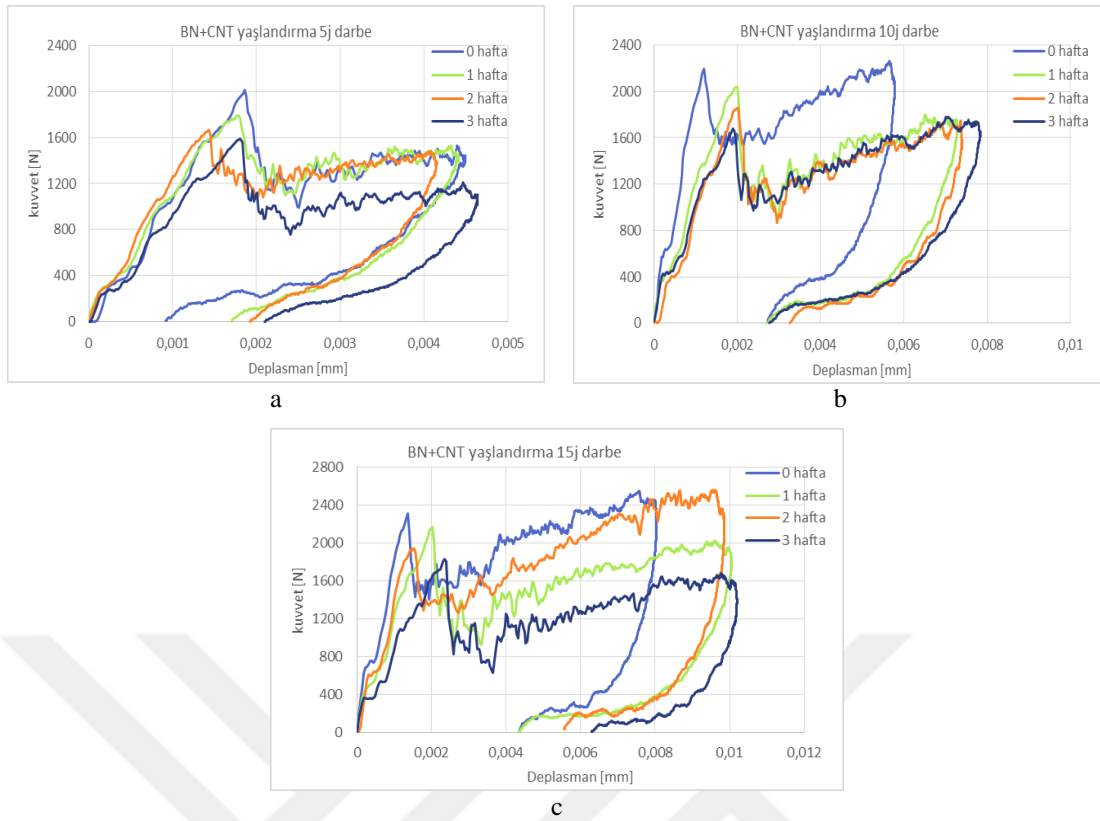
Hidrotermal yaşlanmanın, darbe numunelerinin rijitliğini olumsuz etkilediği görülmektedir. Yaşlandırılmış KNT ilaveli numuneler daha düşük kuvvet etkisi altında şekil değişikliğine uğramışlardır.

% 0.3 oranında KNT ve % 0.5 oranında BNNP ilaveli numunelere hidrotermal yaşlandırmanın etkisi Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te sırasıyla kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman grafiği olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.24 Hibrit numunelerde yaşlandırma f-t (kuvvet-zaman) grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

Hibrit numunelerde 3 hafta yaşlandırma süresi sonunda maksimum temas kuvvetindeki azalma % 30'un üzerinde olmaktadır. Buna rağmen 3 hafta yaşlandırma süresinin sonunda en rijit darbe cevabı KNT ilaveli numunelerle birlikte hibrit numunelerde görülmüştür.



Şekil 5.25 Hibrit numunelerde yaşlandırma f-d (kuvvet-deplasman) grafiği a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J

### 5.3 Düşük Hızlı Darbe Hasar Analizi

5, 10, 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testi uygulanan numunelerin hasar mekanizmaları optik mikroskop ile incelenmiştir. İncelemenin yapılması için darbe testi uygulanan numuneler, vurucu ucun temas bölgelerinden kesilmiş ve kesit bölgelerinden hasar mekanizmaları görüntülenmiştir.

Tüm darbe enerjisi seviyelerinde, numunelerde hasar oluşumu gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi darbe enerjisinin artması ile numunelerde hasarlı bölgenin alanı artmakta ve deformasyon mekanizması belirgin şekilde görülmektedir. Tüm darbe enerji seviyelerinde hasar, ağırlıklı olarak çatlak oluşumu ve delaminasyon şeklinde olmuştur. 10, 15 J enerji seviyelerinde ise bu hasar oluşumunda belirginleşme ve hasarlı tabaka sayısında artma oluşmuştur.

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde nanopartiküllerin oluşan darbe enerjisini malzeme içerisinde homojen olarak yayılmasını sağladığı görülmüştür. Bu sayede nanopartiküller yapı içerisinde lokal alanda büyük deformasyonlar oluşmasını önlemişlerdir. Nanopartikül ilavesi ile darbe enerjisinin tüm yapı içerisine eşit aktarılması ve artan elyaf-matris arayüz bağlarının kuvvetlenmesi sayesinde, saf numunelerde ağırlıklı hasar mekanizması olan delaminasyon, nanopartikül ilaveli numunelerde yerini

tüm tabakalarda görülebilen matris çatlaklarına bırakmıştır. Bu sayede nanopartikül ilaveli numuneler daha fazla darbe enerjisi absorbe etmiş, darbelere karşı daha dirençli özellik göstermişlerdir.

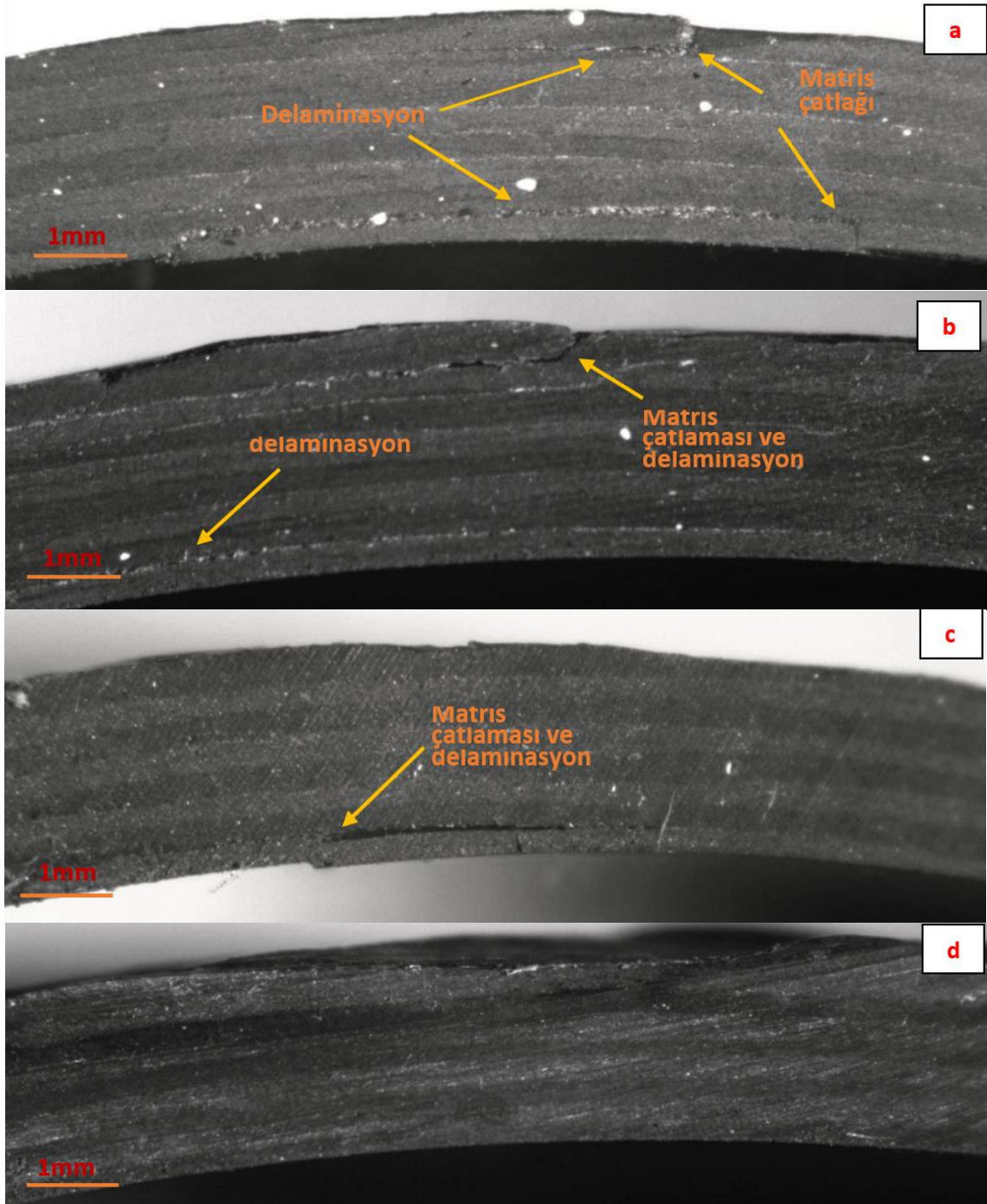
Yaşlandırma işlemi, malzemenin rijitlik kaybına sebep olmuştur. Rijitliğini kaybeden numuneler darbelere karşı daha fazla elastik özellik göstermişlerdir. Yaşlandırılmamış halde kırılğan ve rijit olan kompozit yapıda, yaşlandırma sonucu oluşan yumuşama ve şekil değiştirme kabiliyeti yapı içerisindeki hasar mekanizmasını değiştirmiştir. Rijitlik kaybı sebebi ve darbe sonucu oluşan eğilme momenti her tabakada farklı olmuş ve tabakalar arasında oluşan gerilme uyumsuzluğu yapıyı delaminasyona ve kayma çatlaklarının oluşumuna zorlamıştır. Dolayısıyla yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerde kesme kuvvetinin etkisi sebebi ile oluşacak matris çatlamlarından çok, delaminasyon görülmekte ve yaşlandırma süresi arttıkça malzemenin darbe mukavemeti azalmaktadır.

### 5.3.1 5 J Darbe Enerjisi

Yaşlandırılmamış ve 5 J ağırlık düşürme testi uygulanmış saf ve nano parikül ilaveli epoksi numunelerin hasar görüntüleri Şekil 5.26' gösterilmiştir. Şekil 5.26a'da gösterilen saf numunede, vurucunun temas noktasında matris çatlama ve çatlak bölgesinde delaminasyon başlamıştır. Vurma noktasının tersinde oluşan eğilme momenti etkisi ile en alt tabakada delaminasyon görülmektedir.

BNNP ilaveli epoksi numune incelendiğinde deformasyon mekanizması saf numuneye benzemektedir. vurucu nüfuziyetinin bulunduğu noktada matris yapıda çatlak meydana gelmiştir. (Şekil 5.26 b). Meydana gelen bu çatlak aynı tabaka üzerinde delaminasyona sebep olmuştur. Yine vurucunun oluşturduğu eğilme etkisi ile en alt tabakada delaminasyon görülmektedir.

ÇCKNT ilaveli numunede nüfuziyet yüzeyinde herhangi deformasyon olmamasına karşın, darbe etkisi ile oluşan eğilme momenti neticesinde temas yüzeyinin arkasında delaminasyona ve matris çatlama olmuştur. (Şekil 5.26 c).



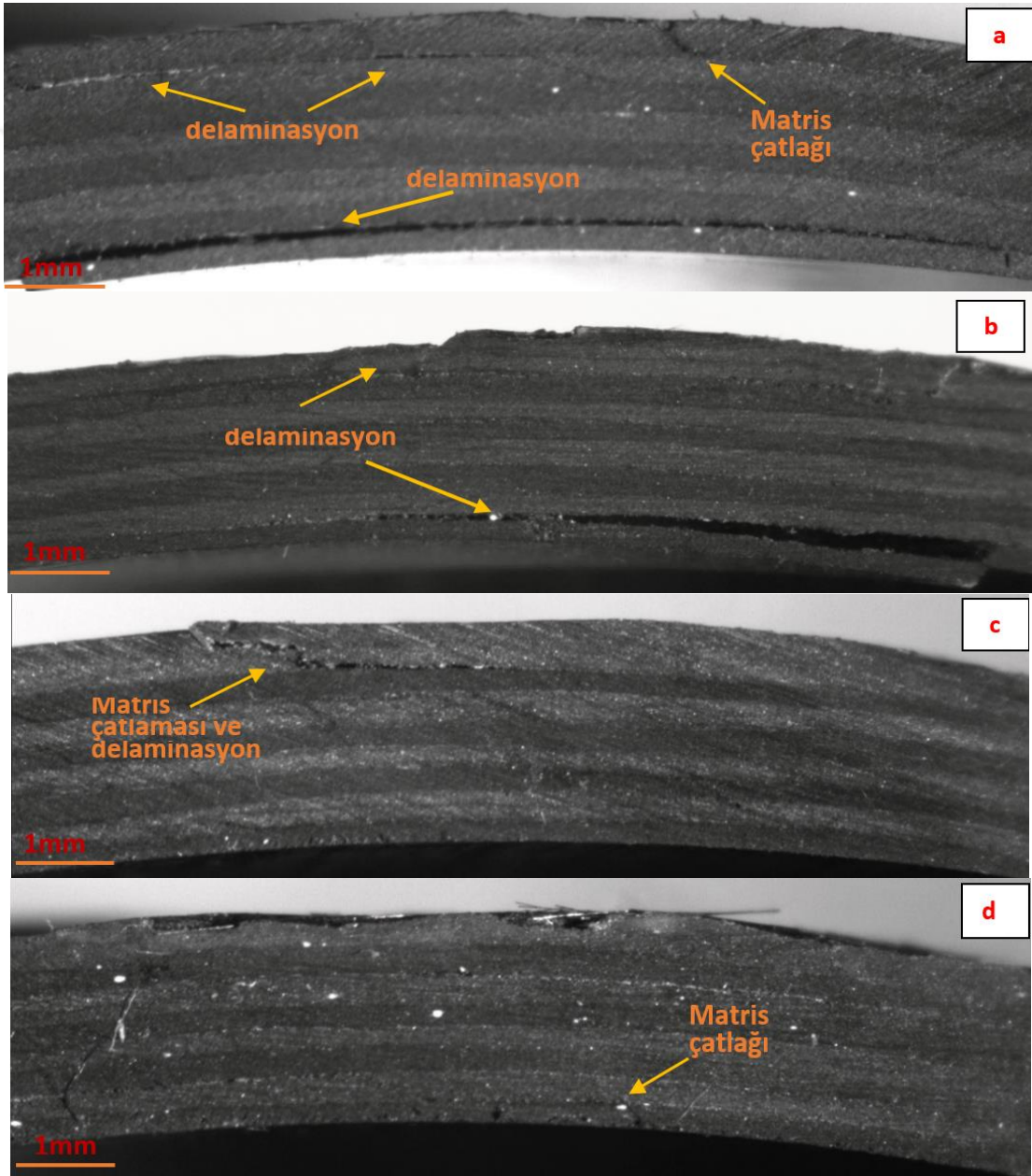
**Şekil 5.26** Yaşlandırılmamış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT

Şekil 5.26d ile gösterilen, BNNP+ÇCKNT ilaveli yaşlandırılmamış hibrit numunelerde herhangi bir deformasyon oluşmamıştır.

1 Hafta süre ile yaşlandırılmış numunelerin deformasyonu Şekil 5.27'de gösterilmiş ve Şekil 5.26'da gösterilen yaşlandırılmamış numunelere göre daha belirgin olmuştur. Şekil 5.27 a'da gösterilen bir hafta yaşlandırılmış saf epoksili numunede vurucu temas yüzeyinde matris çatlamağı ve buna bağlı olarak delaminasyon görülmektedir.

Şekil 5.27 b’de gösterilen BNNP ilaveli epoksili numunede vurucu temas yüzeyindeki tabakada delaminasyon görülmektedir. Ayrıca darbenin oluşturduğu kuvvet etkisi ve darbe yüzeyinin tersinde eğilme momenti sonucu oluşan çekme kuvvetinin etkisi ile alt tabakada delaminasyon görülmektedir.

Şekil 5.27 c’de ÇVKNT ilaveli epoksi kompozite ait deformasyon görünmektedir. Temas noktasında matris çatlakları oluşmuş ve oluşan çatlak, yapı içerisinde delaminasyon şeklinde devam etmiştir. Şekil 5.27d’de gösterilen bir hafta yaşlandırılmış hibrit numunede son tabakada çatlak oluşmuştur.



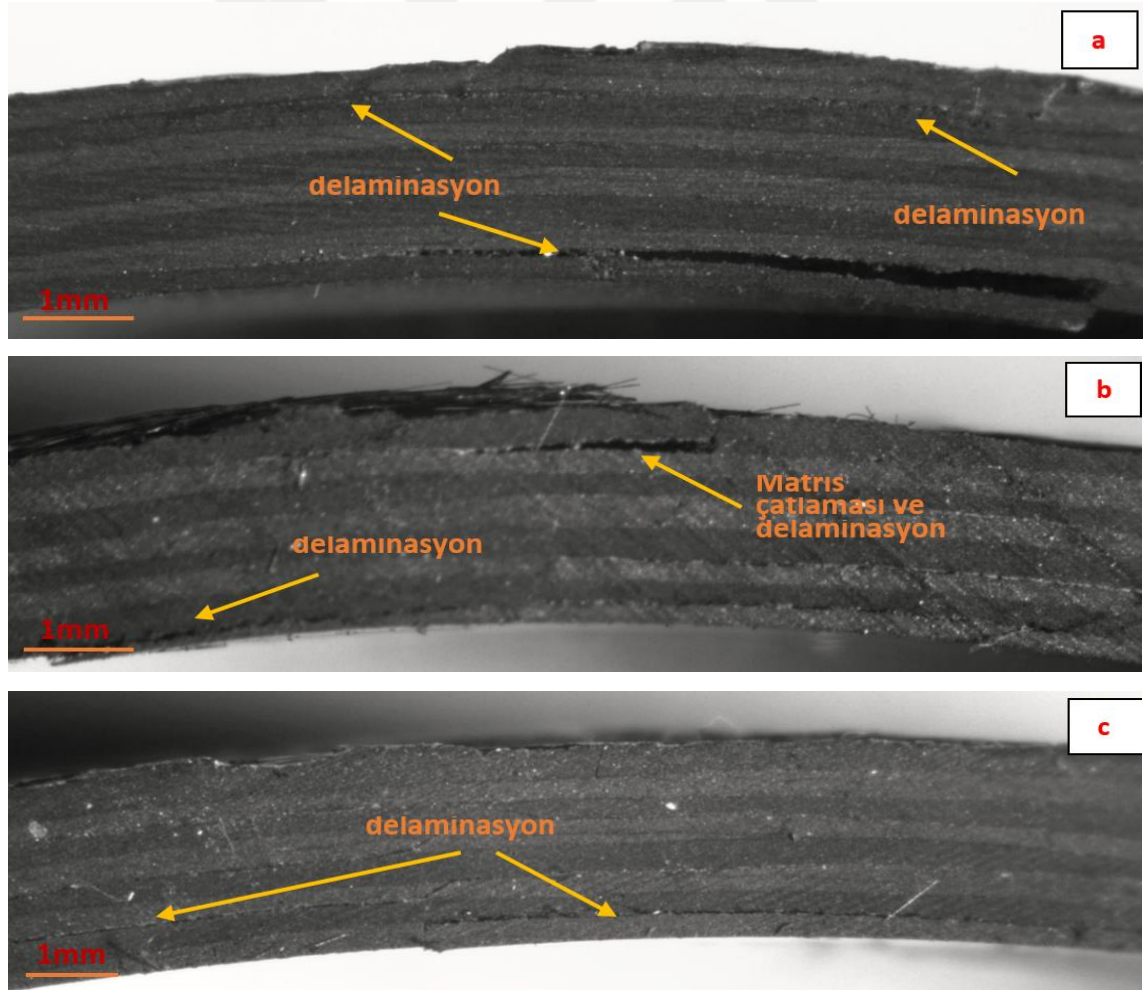
Şekil 5.27 Bir Hafta yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇVKNT, d) 0.5 BNNP+ 0.3 ÇVKNT

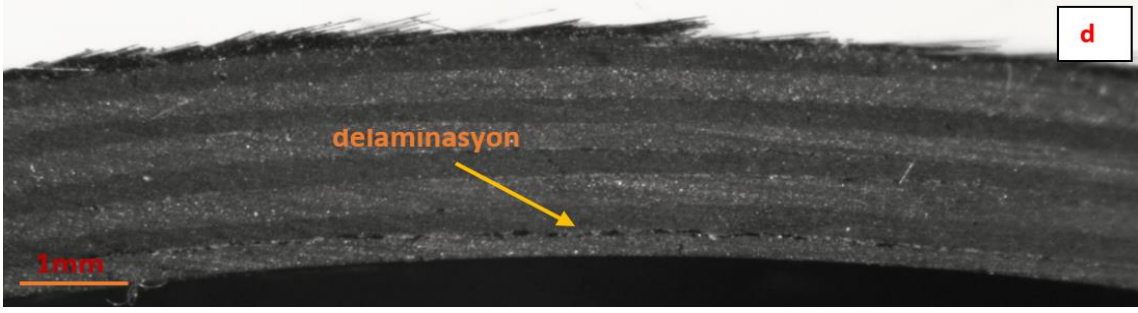
5 J darbe enerjisi sonucunda iki hafta yaşlandırılmış numunelerde oluşan deformasyon görüntüleri şekil 5.28'de gösterilmiştir. Bir hafta yaşlandırılmış numuneler referans alınarak inceleme yapıldığında numunelerde oluşan deformasyonda kısmen artış görülmektedir.

Şekil 5.28a'da gösterilen saf numunede darbe temasının olduğu bölgede hafif tabaka ayrışması görülmektedir. Darbe temas yüzeyinin tersinde ise büyük ölçekte delaminasyon gözlenmektedir. Bazı numunelerin darbe bölgesinden kesimi esnasında kesici taşın yüzeye uyguladığı sürtünme etkisi ile fiber kopması oluşmuştur. Oluşan fiber kopmasının darbe etkisiyle ilişkisi yoktur.

Şekil 5.28c'de gösterilen ÇCKNT ilaveli numunenin son iki tabakadasında, eğilme momentinin oluşturduğu çekme kuvveti sebebiyle delaminasyon oluşmuştur.

Şekil 5.28d'de gösterilen BNNP ve ÇCKNT ilaveli epoksi reçineli numunede son tabakada küçük delaminasyon bölgesi oluşmuştur. 5 J darbe enerjisine maruz kalan hibrit borular için iki hafta yaşlandırma süresi, ilk deformasyona uğradıkları yaşlandırma süresi olmuştur.



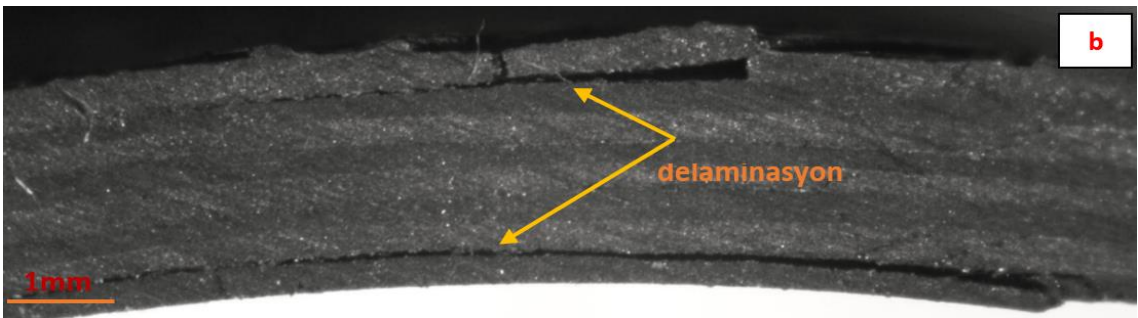
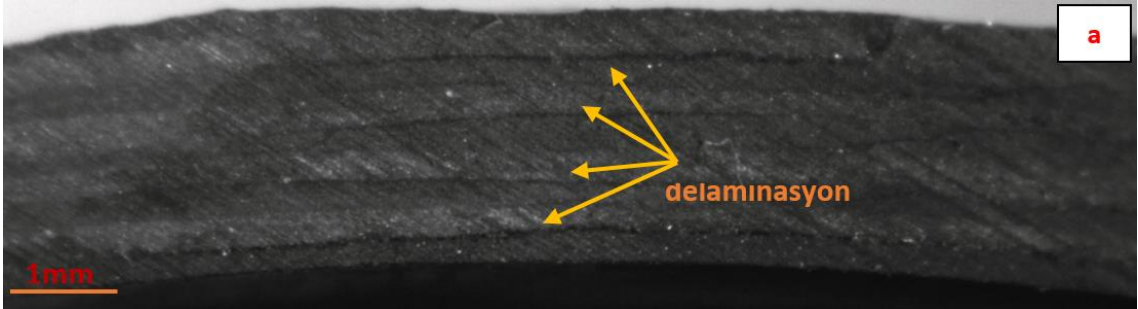


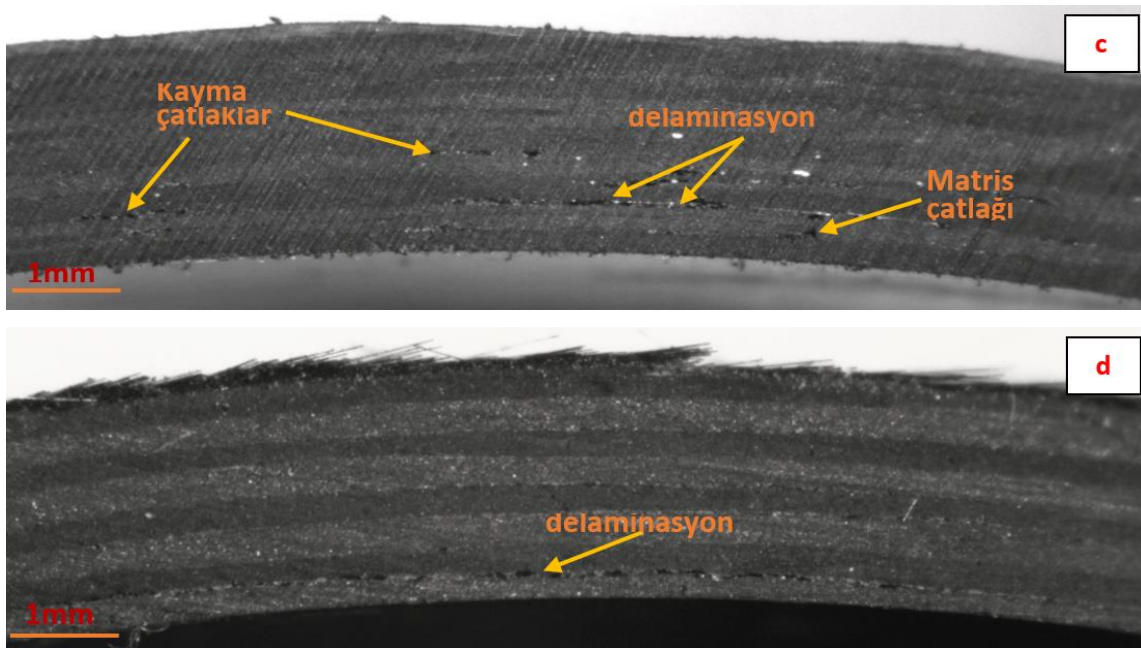
**Şekil 5.28** İki hafta yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT

Üç hafta yaşlandırılmış numuneler Şekil 5.29'da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, yaşlanma süresinin artmasıyla delaminasyon hasarının arttığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.29a'da gösterilen saf numunenin her tabakasında delaminasyon oluşmuştur. 29b'de matris yapısında BNNP bulunan numunede ilk tabakada matris çatlamasıyla birlikte delaminasyon, son tabakada delaminasyon meydana gelmiştir. Şekil 5.29 c'de gösterilen ÇCKNT katkılı numuneye göre daha fazla deformasyona uğramıştır.

Şekil 5.29 d'de gösterilen hibrit kompozitte, eğilme momentinin etkisi ile son tabakada delaminasyon oluşmuştur. BNNP ve ÇCKNT nanopartiküllerin sinerjik etkisi sebebi ile en az deformasyon hibrit numunede görülmektedir.



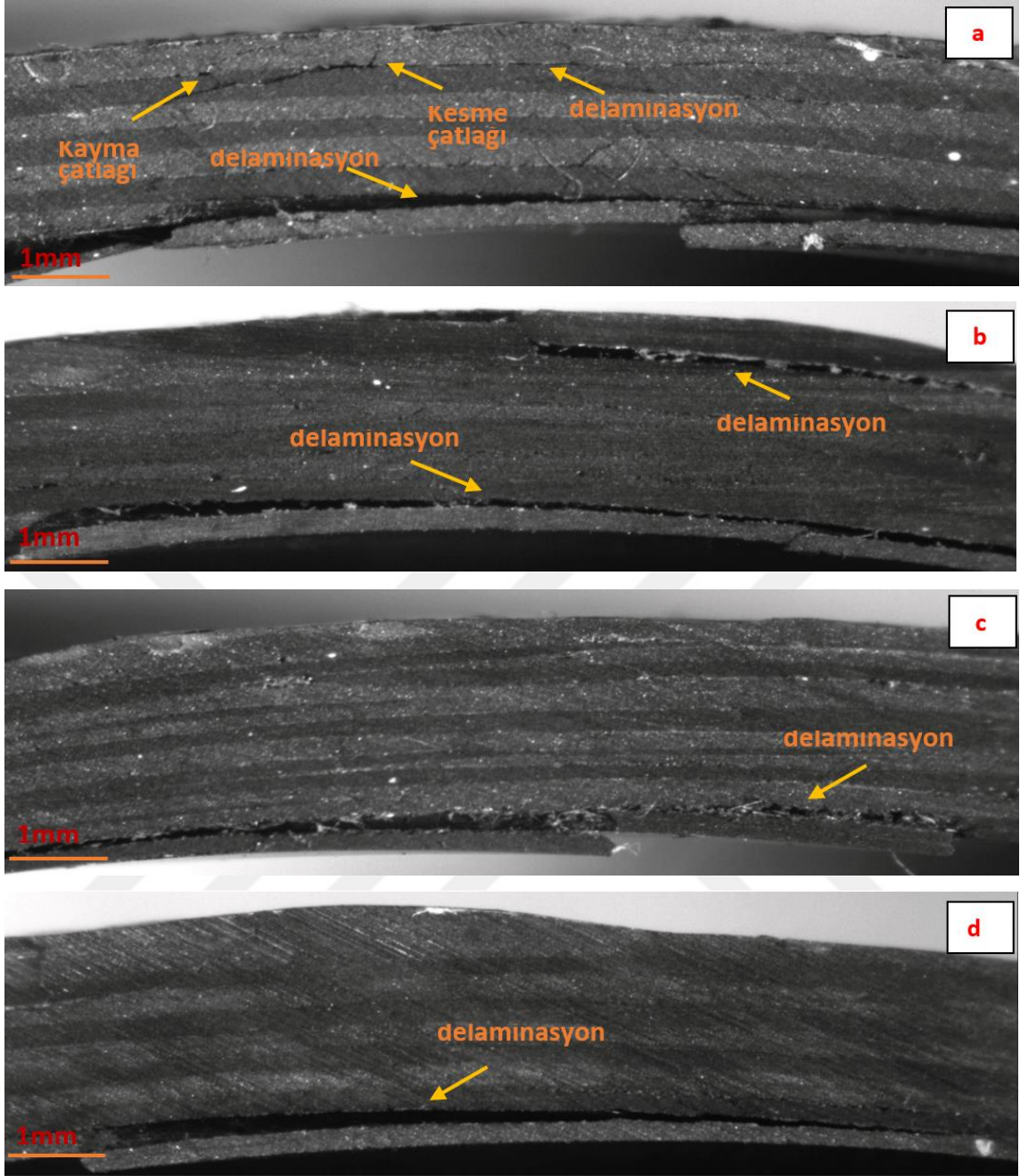


Şekil 5.29 Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde 5 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT

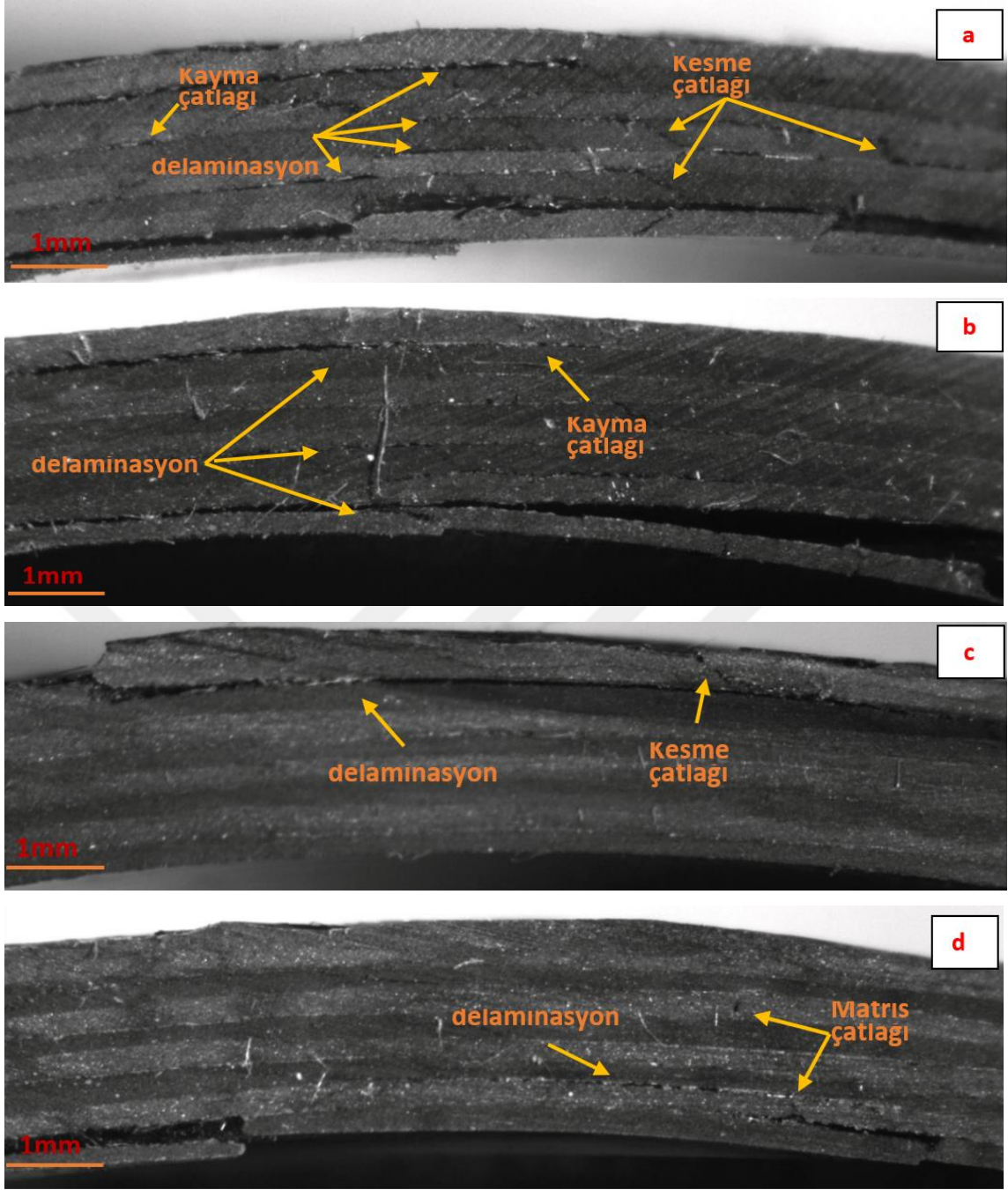
### 5.3.2 10 J Darbe Enerjisi

10 J düşük hızlı darbe deneyi uygulanan numuneler, beklenildiği gibi 5 J enerji seviyesinde darbe uygulanan numunelerden daha fazla deformasyona uğramışlardır. Bu enerji seviyesinde yapılan deneylerde deformasyon çok sayıda matris çatlama ve büyük delaminasyonlar şeklinde oluşmuştur. 10 J darbe enerjisi uygulanan numunelerin deformasyon görüntüleri yaşlandırma sürelerine göre Şekil 5.30, 31, 32 ve 33'te gösterilmektedir.

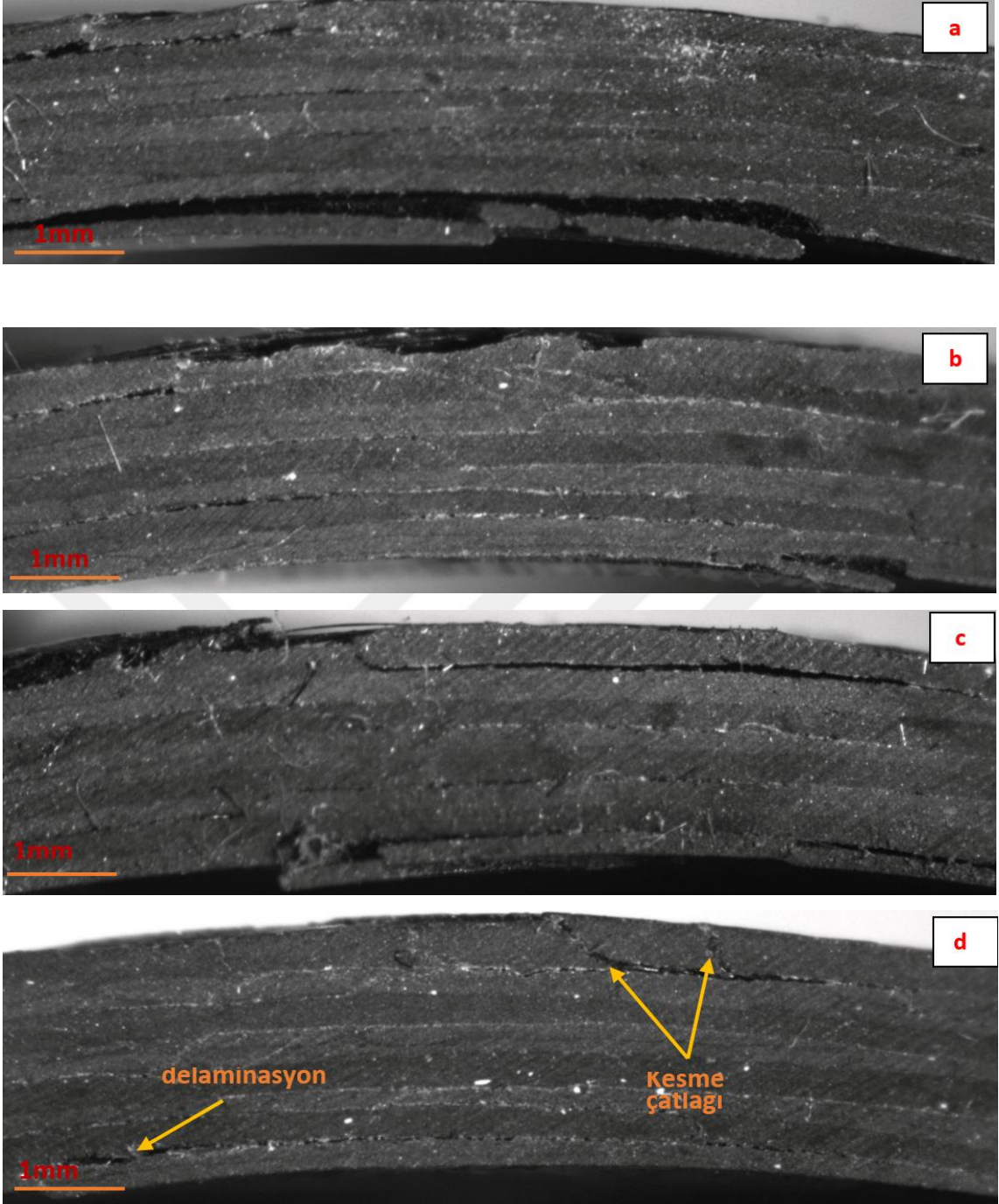
5 ve 10 J darbe enerji seviyeleri için vurucunun temas ettiği noktada malzeme, delaminasyon ya da matris çatlama gibi ciddi bir deformasyona uğramamış ise hasar mekanizması alt tabakalarda; genellikle eğilme momentinin oluşturduğu çekme kuvvetinin etkisi ile son tabakada oluşmaktadır. Bunun sebebi, nüfuziyet noktasında oluşan kuvveti diğer tabakalara aktaramayan malzeme, ilk tabakada deformasyona uğrayarak darbe kuvvetinin büyük kısmını absorbe etmekte ve alt tabakalarda küçük çatlak oluşumu ya da lokal delaminasyonlar gibi daha düşük ölçekte hasara uğramaktadır. Darbe esnasında vurucunun temas ettiği tabaka, kuvveti alt tabakalara aktarırken temas yüzeyinde küçük hasarlar oluşmakta; iç tabakalarda ve özellikle son tabakada hacimce büyük delaminasyonlar görülebilmektedir.



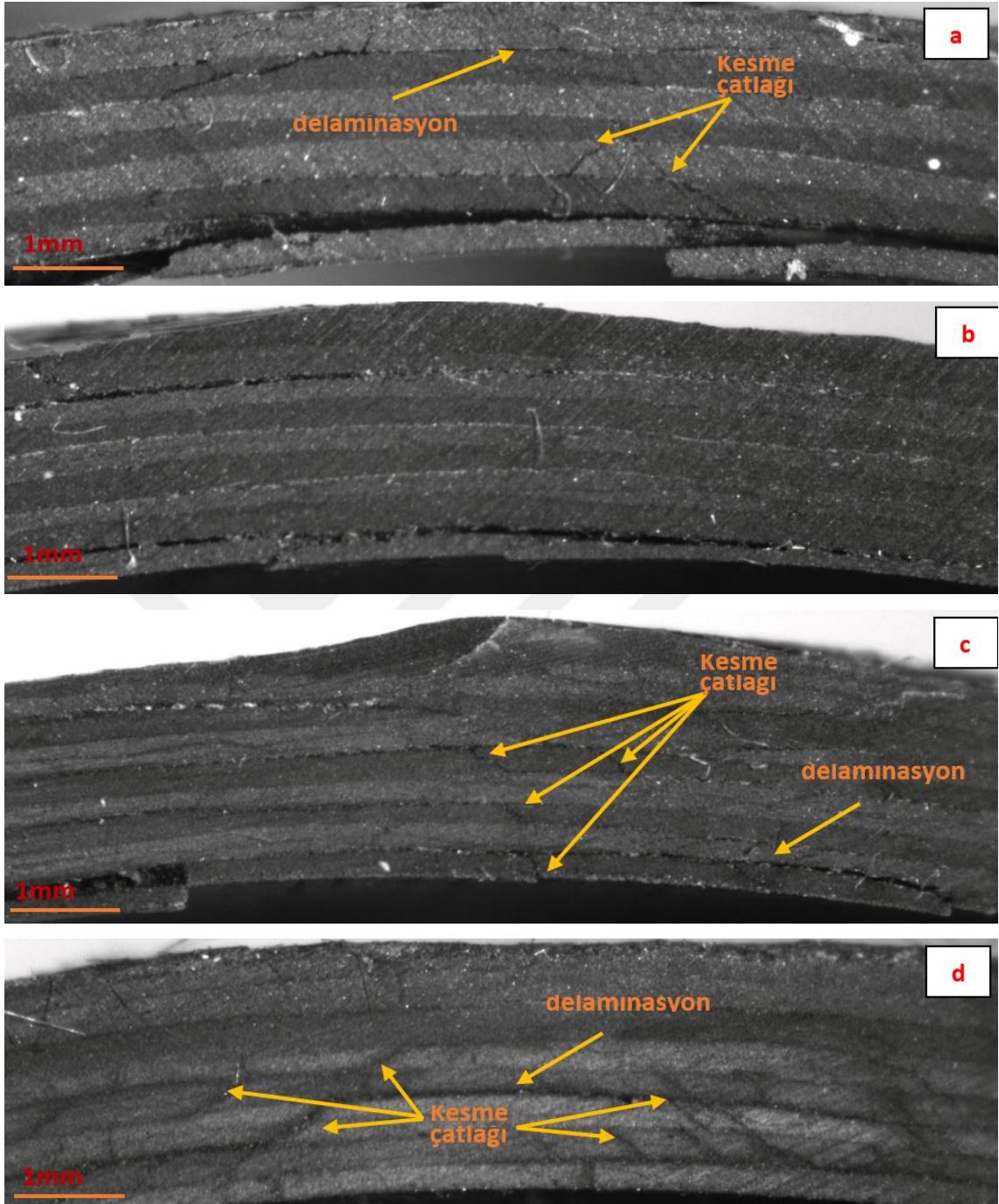
**Şekil 5.30** Yaşlandırılmamış numunelerde 10 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) %0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT



**Şekil 5.31** Bir hafta yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) %0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT



Şekil 5.32 7 İki hafta yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) %0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT

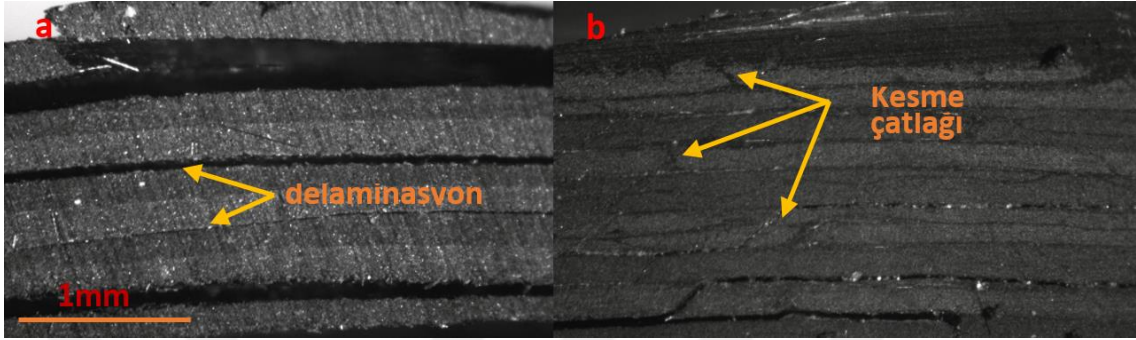


Şekil 5.33 Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde 10 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT

### 5.3.3 15 J Darbe Enerjisi

En büyük deformasyonlar 15 J darbe enerjisi uygulanmış numunelerde görülmektedir. Bu numunelerin hemen hemen her tabakasında büyük ölçekte deformasyonlar oluşmuştur.

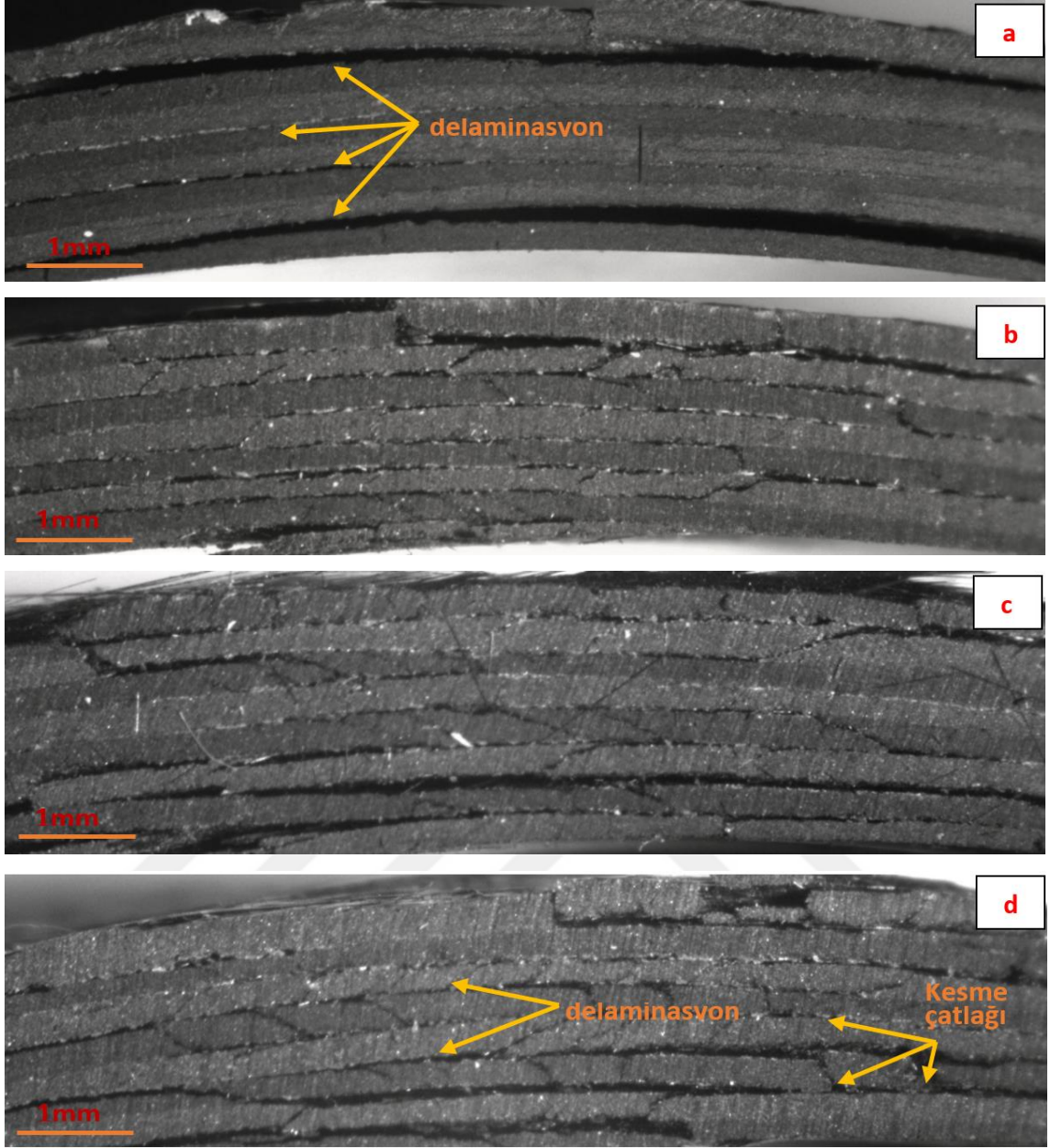
15 J darbe testi uygulanmış numuneler Şekil 5.35, 36, 37, 38’de gösterilmiştir. 15 J darbe enerjisi uygulanan numuneler için istisnaları olmakla birlikte nanopartikül ilave edilen numunelerde deformasyon mekanizmasının çeşitlendiği görülmektedir. Özellikle matris yapıda kütlece % 0.3 KNT ile birlikte % 0.5 BNNP içeren hibrit numune örneklerinde bu durum daha net olarak gözlemlenmiştir.



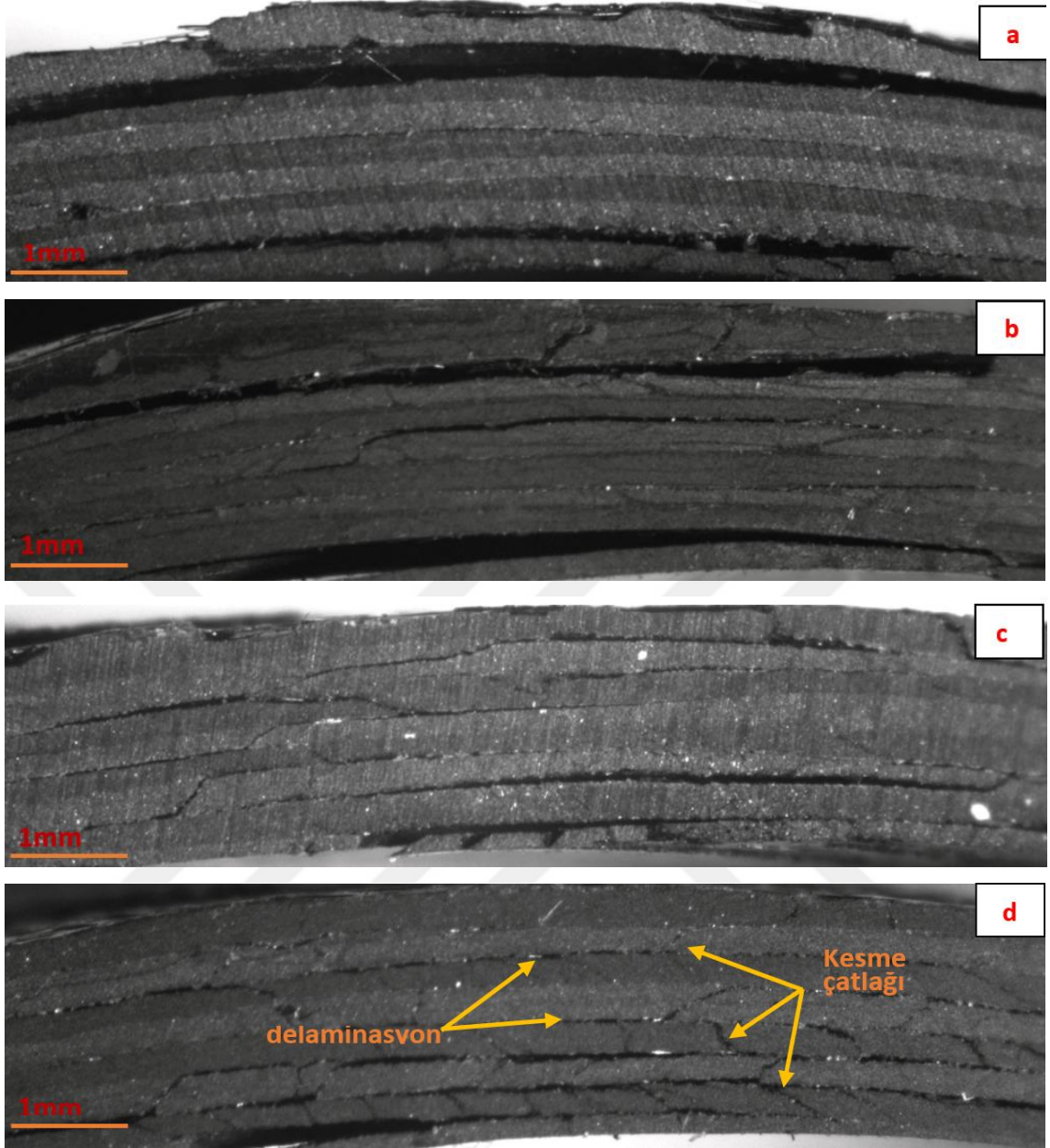
Şekil 5.34 Nanopartikül ilaveli ve saf matrisli numunelerde deformasyon a) Saf epoksi, b) %0.3 ÇCKNT+ % 0.5 BNNP

Şekil 5.34’te nanopartikül ilavesi ile 15 J enerji seviyesinde hasar mekanizmasının çeşitlendiği görülmektedir. Kuvvet, yapı içerisinde aktarılırken nanopartiküle temas ettiği noktada gerilme birikmesi olmakta, belli bir değerden sonra bu kuvvet yön değiştirmekte ve dolayısı ile tabakalar arasında matris yapıda oluşan deformasyon kesme çatlağı gibi farklı deformasyon şekilleriyle elyaf yapıya ve diğer tabakalara aktarılmaktadır. Bu sayede nanopartikül ilaveli numuneler, saf numunelere nazaran daha çok enerji absorbe etmiş ve daha üstün darbe karakteristiği sergilemiştir.

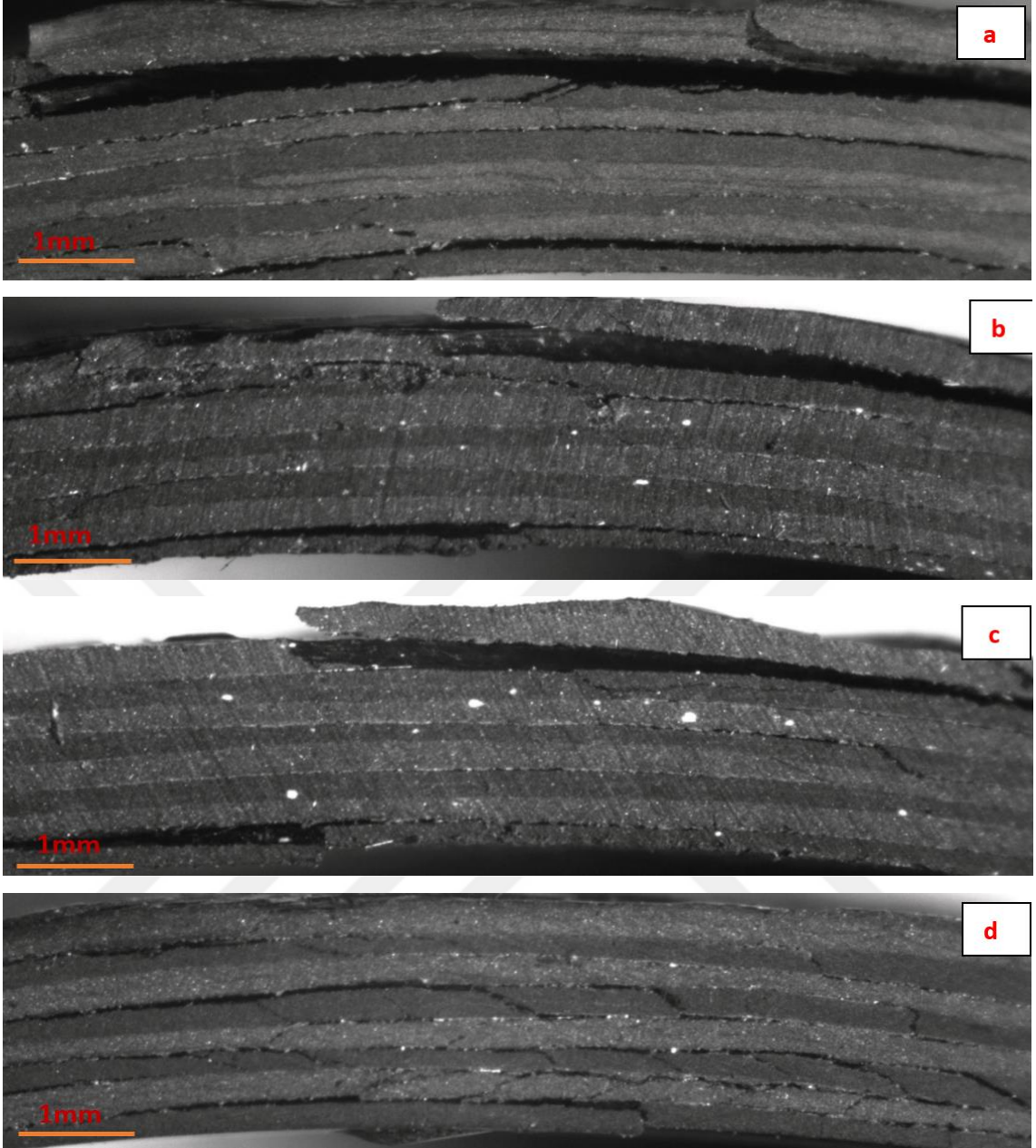
Bazı nanopartikül ilave edilen numunelerde yoğun çatlak oluşumu gözlemlendiği halde delaminasyon mekanizması da belirgin olmuştur. Bunun sebebi matris yapıda çok fazla nanopartikül bulunmasıdır. Fazla nanopartikül neticesinde epoksi reçine hazırlama aşamasında ve imalat sırasında nanopartiküller toplanma eğilimi göstermişlerdir. Bu durum matris-elyaf arasındaki bağı zayıflatabilir. Malzemenin mekanik özelliklerini artırması beklenen nanopartiküller, belirli oranın üzerinde oldukları zaman özellikle dinamik kuvvetlerin etkisi altında kaldıkları durumlarda malzemenin mekanik özelliğini olumsuz etkileyebilirler.



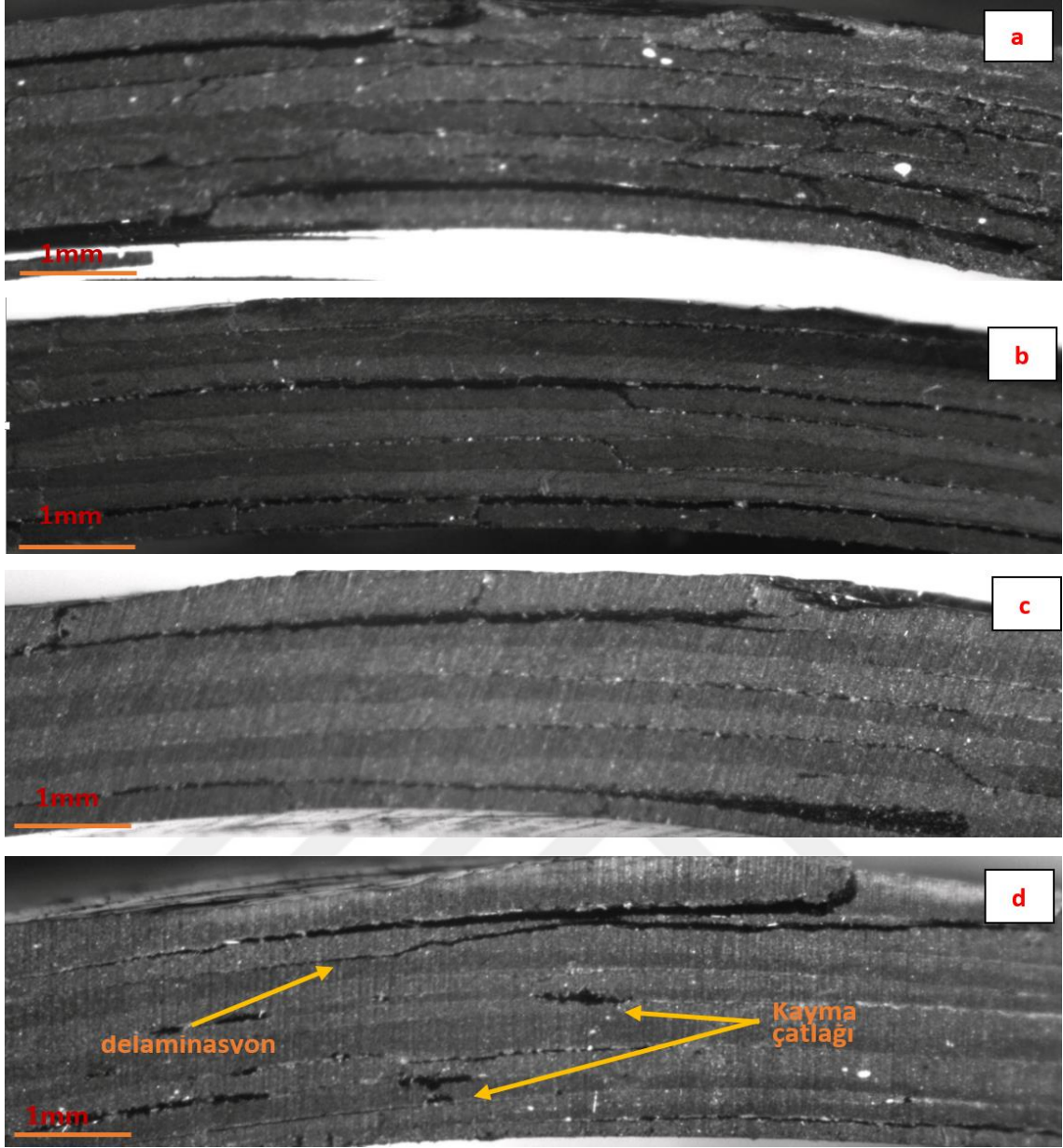
**Şekil 5.35** Yaşlandırılmamış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT



Şekil 5.36 Bir hafta yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT



Şekil 5.37 İki hafta yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT



**Şekil 5.38** Üç hafta yaşlandırılmış numunelerde 15 J darbe enerjisi kesit görüntüleri a) saf, b) % 0.5 BNNP, c) % 0.3 ÇCKNT, d) 0.5 BNNP+0.3 ÇCKNT

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Bu çalışmanın temel amacı hidrotermal yaşlandırmanın, filaman sarım yöntemi ile üretilmiş  $[\pm 55^\circ]_4$  sarım açılı karbon/elyaf epoksi tabakalı kompozit borular üzerinde etkisini ve nanopartikül ilavesinin hidrotermal yaşlandırmaya karşı kompozit malzemeye kazandırdığı mekanik özelliklerin belirlenmesi olmuştur. Çalışma, saf epoksi, % 0.5 BNNP, % 0.3 KNT, % 0.5 BNNP ile birlikte % 0.3 KNT ilaveli hibrit epoksili kompozit boruların yaşlandırılma işlemi uygulanmamış formu ile, 1, 2, 3 hafta süre ile yaşlandırılmış formu olmak üzere toplamda 16 farklı çeşit boru kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borularda teğetsel gerilmenin belirlenmesi için ASTM D2290-16 Prosedür A standartlarında halka çekme deneyi ve darbe karakteristiği için 5, 10, 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonuçları ve deformasyon görüntüleri değerlendirilerek aşağıdaki sonuçlar saptanmıştır.

- Borularda teğetsel gerilmelerin belirlenmesi için yapılan halka çekme deneyinde, tüm numuneler sarım açısı doğrultusunda deformasyona uğramıştır. Matris-elyaf arayüz bağlantısı filaman sarım yönetimi ile üretilmiş kompozit boruların en zayıf noktasıdır.
- Halka çekme deneyi sonucu en yüksek teğetsel gerilmeler hibrit epoksili yaşlandırılmamış numunede oluşmuştur. En düşük teğetsel gerilme mukavemeti 3 hafta süre ile yaşlandırılmış saf numunede oluşmuştur. Bu iki numune arasında % 30 teğetsel gerilme mukavemet farkı hesaplanmıştır.
- Nanopartikül ilavesi matris-elyaf arayüz bağlantılarını güçlendirmektedir. Bu sebeple nanopartikül ilaveli numunelerin çekme dayanımı, saf numunelere göre daha fazladır.
- Yaşlandırılmamış BNNP ilaveli epoksili numen çekme deneyinde 426 Mpa, KNT ilaveli epoksili numune 467 Mpa, BNNP ve KNT ilaveli hibrit numune ise 485 Mpa maksimum teğetsel gerilme mukavemetine ulaşmıştır. Bu değerler KNT'nin BNNP'ye göre daha iyi bir katkı elamanı olduğunu gösterirken, yapı içerisinde her ikisinin kullanımı sinerjik etki oluşturarak mukavemeti artırmıştır.

- Yaşlandırma işlemi tüm numunelerde mukavemet kaybına sebep olmaktadır. Fakat hidrotermal yaşlandırma sonucunda nanopartiküller, difüzyon ile reçine içerisinde suya geçmekte ve yapı içerisinde çıkan nanopartiküllerin oluşturduğu boşluklar neticesinde matris içerisinde porozite oluşmaktadır. Bu sebeple 3 hafta yaşlandırma sonrası en fazla teğetsel gerilme mukavemeti kaybı % 17 ile hibrit epoksili numunede olmuştur. En az mukavemet kaybı ise % 13 ile saf numunede kaydedilmiştir. BNNP ve KNT ilaveli numunelerde mukavemet kaybı bu iki değer arasında olmuştur.
- 80 °C'de yapılan hidrotermal yaşlandırma süresinin uzmasıyla epoksi reçinenin dış ortama aktığı gözlemlenmiştir.
- Nanopartikül ilavesi, malzemenin çekme mukavemetini arttırdığı gibi darbeye karşı direncini de artırmaktadır. Darbeye karşı en iyi cevabı veren numuneler hibrit numuneler olmuştur. Bunun sebebi nanopartiküllerin matris-elyaf arayüz bağlantılarını güçlendirmesi ve malzeme içerisinde yüksek yüzey alanları ile kuvvetin homojen yayılımını sağlamalarıdır. Yaşlandırılmamış hibrit numune 5 J darbe enerjisine karşın hemen hemen hiç deformasyona uğramamıştır.
- Nanopartiküllerin, oluşan darbe enerjisini malzeme içerisinde homojen olarak yayılmasını sağladığı görülmüştür. Bu sayede nanopartiküller yapı içerisinde lokal alanda büyük deformasyonlar oluşmasını önlemiştir. Nanopartikül ilavesi yapılarak darbe enerjisinin tüm yapı içerisine eşit aktarılması ve elyaf-matris arayüz bağlarının kuvvetlendirilmesi sonucu saf numunelerde ağırlıklı hasar mekanizması olan delaminasyonun yerini, nanopartikül ilaveli numunelerde tüm tabakalarda görülebilen matris çalıkları almıştır. Bu sayede nanopartikül ilaveli numuneler daha fazla darbe enerjisi absorbe etmiş, darbelere karşı daha dirençli özellik göstermişlerdir.
- Yaşlandırma işlemi sonucunda numuneler rijitliklerini kaybetmişlerdir. Rijitliğini kaybeden numunelerde kesme çatlakları oluşumundan daha çok, eğilme momentinin etkisi ile kayma çatlakları ve delaminasyon görülmektedir. Dolayısıyla yaşlandırılmış

numunelerde darbeye karşı oluşan ilk temas cevabı düşmüş fakat darbe temas süresi artmıştır. Yaşlandırılmış numunelerin darbeye karşı dirençleri azalmaktadır.

## 6.2 Öneriler

- 3 hafta süre ile hidrotermal yaşlandırılmış numunelerde reçinenin dış ortama aktığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla daha uzun hidrotermal yaşlandırma süreleri uygulanarak borularda ki mukavemet kaybı değerlendirilebilir. Saf su yerine seyreltik asit ve seyreltik bazik ortamlar kullanılarak hidrotermal yaşlandırma çeşitlendirilebilir.
- Yaşlandırma işleminden önce boruları ön deformasyona uğratmak veya yaşlandırma işlemi esnasında borulara gerilme vermek suretiyle yapılacak gerilmeli korozyona nanopartikül ilavesinin etkisini araştırmak, hasarlı boruların çalışma performansı için ön bilgiye sahip olmak açısından önemlidir.
- Petrol sondajı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan kompozit borularda, içerisinde yağ veya ham petrol sirkülasyonu yapılarak değişken ortam şartlarında yaşlandırma işlemi uygulanarak, boruların mekanik özelliklerinin değişimi üzerinde inceleme yapılabilir.
- Nanopartiküllerin hidrotermal yaşlandırma üzerinde etkisi olduğu gibi UV ışınlarına karşı etkisi de incelenebilir.
- Daha önceki benzer çalışmalarda ve bu çalışmada yapıldığı gibi boruların saf su veya çözeltili su içerisine daldırma usulü yerine, borular içerisinde belirli bir basınç altında akışkan sirkülasyonu sağlanarak hidrotermal yaşlandırma işlemi yapılabilir.
- Nanopartikül ihtiva eden çalışmalarda numune çeşidi ve deneysel parametreler kısıtlı tutularak, örneklem sayısını artırmak, çalışmanın hızlanması ve daha hassas çalışmanın mümkün olması açısından tarafıma tavsiye edilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1991, Impact on Laminated Composite Materials, *Applied Mechanics Reviews* 44(4)
- Abrate, S., 1998, Impact on Composite Structures. Cambridge, *Cambridge University Press*. 135-160.
- Akdemir, A., 1992, Yüzey Çatlaklı Cam Takviyeli Kompozitlerde Gerilmeli Korozyon, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Konya, 113s
- ASTM Standard D2290-16, 2012, " Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe" *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2012
- Akın, Y., ( 2018), Cam elyaf takviyeli kompozit boruların mekanik özelliklerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 77s
- Benyahia, H., El Moumen, M. A., Ouinas, D., Hassoon, O.H., 2018, Mechanical properties of offshore polymer composite pipes at various temperatures, *Composites Part B* 152 (2018) 231–240
- Bernier, H., 2005, Scaling and Designing Large-Bore Two-Stage High Velocity Guns, *The Science and Technology of High Velocity Impact*, ISBN 3-540-22866-7 Springer Berlin Heidelberg New York, P 37-83.
- Ceyhun, V., Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41
- Coleman JN, Khan U, Blau WJ, Gun'ko YK., 2006 Small But Strong: A Review Of The Mechanical Properties Of Carbon Nanotube–Polymer *Composites. Carbon*;44(9):1624–52.

- Emami Stellou, AA., T. Hamzehpour, 2015 The Effects of Fibre Winding Angle At Carbon Epoxy FW Pipes in Natural Gas Transmission Pipelines and Calculating the Optimum Winding Angle with Genetic Algorithm. *ScienceDirect* 130 48 – 56
- Faustino Mujika, Gustavo Vargas, Julen Ibarretxe, Juan De Gracia, Ainhoa Arrese, 2011, Influence of the modification with MWCNT on the interlaminar fracture properties of long carbon fiber composites *Composites: Part B* 43. 1336–1340
- Hsieh, T.H., Chen, W.J., Chiang, C.L., Shen, M.Y., 2018, Environmental aging effect on interlaminar properties of graphene nanoplatelets reinforced epoxy/carbon fiber composite laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2018, Vol. 37(19) 1177–1190
- Hufenbach, W., Marques Ibrahim, F., Langkamp, A., Röhm, R., Horning, A., 2008, Charpy impact tests on composite structures – An experimental and numerical investigation, *Composites Science and Technology* 68 (2008) 2391–2400
- Kara, M., 2006, Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı, Yüksek Lisan Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 85s.
- Kara, M., Kırıcı M., Tatar, A. C., Avcı, A., 2018, Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite tubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes at cryogenic environment *Composites Part B* 145 (2018) 145–154
- Karabulut, S.E., 2017, Karbon Nanotüplerin ve Bor Nitrür Nanopartiküllerin Filaman Sarım karbon Elyaf Takviyeli- Epoksi Nano Kompozit Borularda Düşük Hızlı Darbe Yüğü Altında Enerji Absorbsiyon Kapasitesine Etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 107s
- Krishnan, P., Abdul Majid, M.S., Afendi, M., Yaacob, S., Gibson, A.G., 2016 Effects of hydrothermal ageing on the behaviour of composite tubes under multiaxial stress ratios. *Composite Structures*, 148 (2016) 1–11.

- Mallick, P. K., 2008, Fiber-Reinforced Composite, 3rd edn. *CRC press*, Boca Raton, FL, p. 61
- Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B., 2004, The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates, *Composite Structures* 67 (2005) 139–148.
- Naik, N.K., Shriraro, P., 2004, Composite structures under ballistic impact, *Composite Structures* 66 (2004) 579–590
- Okpala, C. C., Nanocomposites – An Overview, *International Journal of Engineering Research and Development*, Volume 8, Issue 11, P.P 17 -23 October 2013
- Pereira, J.M., Paula, S.A., Revilock, M.D., Melis, M.E., 2006, Forces Generated by High Velocity Impact of Ice on a Rigid Structure, *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, Glenn Research Center Cleveland, Ohio 44135
- Safri, S.N.A., Sultan, M.T.H., Yidris, N., Mustapha, F., 2014 Low Velocity and High Velocity Impact Test on Composite Materials – A review, *The International Journal Of Engineering And Science*, Vol 3, Issue 9, Pages 60-60
- Sanchez, M., Campo, M., Jimenez-Suarez, A. and Urena, A., 2012, Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM, *Compos Part B-Eng*, 45, 1, 1613-1619.
- Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 134s.
- Shyr, T. W., Pan, Y. H., 2003, Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite Structures*, 62, 193-203.

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

Thierry, V., 2018, The need for Structural Health Monitoring (SHM) for composite structures, University of Nottingham, <http://blogs.nottingham.ac.uk/aerospace/2018/05/24/victor-thierry-need-structural-health-monitoring-shm-composite-structures/>

Thostenson, E.T., Ren, Z., Chou, T.W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotube and their composites: a review, *Compos. Sci. Technol.* 61, 1899 -1912

Ulus, H., Ustun, T., Sahin, O. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V. and Avci, A., 2016, Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates, *J Composite Materials*, 50, 6, 761-70.

Qingjie Zhang, Xiaochao Li, Shengbiao Liang, Xinfu Zhao, Gang Sui, Xiaoping Yang, 2016, kind of liquid-like MWCNT reinforcements for T1000 carbon fibre filament winding composites, *Compos. Sci. Technol.* 131, 89-97

Zhong, Y., Cheng, M., Zhang, X., Hu, H., Cao, D., Li, S., Hygrothermal durability of glass and carbon fiber reinforced composites – a comparative study, *Composite Structures* (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.034>

## ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Konya'nın Selçuklu ilçesinde doğdu. İlköğretimini Mustafa Bülbül İlkokulu, Lise öğrenimini Selçuklu Anadolu Lisesinde tamamladıktan sonra, 2010 yılında Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliğinin'de yüksek öğrenimine başladı. 2015 yılında, Makine mühendisliği lisans programından 2.73 ortalama ile mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İş sağlığı ve güvenliği programında tezsiz, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisansa başladı. Yüksek lisans ders dönemini tamamlaması ve İSG sertifikasını almasının ardından Bedeloğlu Alüminyum Ltd. Şt.'de ekstrüzyon hattı imalatı proje sorumlusu olarak işe başladı. Projenin bitiminden sonra zorunlu askerlik görevini Milli Savunma Üniversitesi Deniz Harp Okulu Dekanlığın'da öğretim elemanı olarak yaptı. Şu an aktif olarak iş aramaktadır.

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Safa AK  
**Uyruğu** : T.C  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Konya / Selçuklu 16.01.1991  
**Telefon** : 538 351 78 17  
**e-mail** : ak.safaak@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	Selçuklu Anadolu Lisesi	2009
Üniversite	Selçuk Üniversitesi	2015
Yüksek Lisans	Necmettin Erbakan Üniversitesi	2019
Yüksek Lisans (Tezsiz)	Selçuk Üniversitesi	2017

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016-2017	Bedeloğlu Alüminyum Ltd.	Makina Mühendisi
2017-2018	Deniz Harp Okulu	Öğretim Elemanı (Yedek Subay)

**YABANCI DİLLER**

İngilizce ( 2019 Yük Dil-1 : 80)

**YAYINLAR****Uluslararası Kongre Bildirileri:**

Kara, M., AK, S., 2017, Effect of Hydrothermal Ageing On The Mechanical Properties Of Carbon Fiber Reinforced Nanocomposite Pipes Containing Carbon Nanotube And Boron Nitride Nanodisc, *International Advantage Tegnologies Symposium*, Bölüm 18, Sy. 4237-4243, Elazığ/Turkey

