



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**TUZLU SU YAŞLANDIRMASININ CIVATA  
BAĞLANTILI HALLOYSİT NANOTÜP-  
EPOKSİ/BAZALT FİBER  
NANOKOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI  
DARBE DAVRANIŞLARINA ETKİSİ**

**Halil Burak KAYBAL**

**DOKTORA TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Mayıs-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Halil Burak KAYBAL tarafından hazırlanan “Tuzlu Su Yaşlandırmasının Cıvata Bağlantılı Halloysit Nanotüp–Epoksi/Bazalt Fiber Nanokompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışlarına Etkisi” adlı tez çalışması 09/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Mesut UYANER

#### Danışman

Prof. Dr. Ahmet AVCI

#### Üye

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

#### Üye

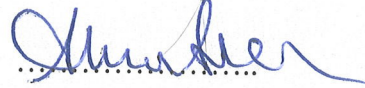
Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

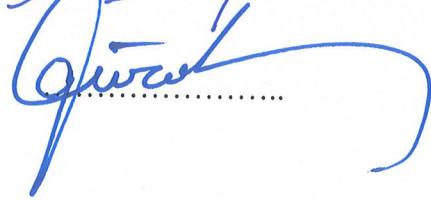
### İmza











Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA  
Enstitü 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.



Halil Burak KAYBAL

Tarih: 09/05/2019

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### TUZLU SU YAŞLANDIRMASININ CIVATA BAĞLANTILI HALLOYSİT NANOTÜP-EPOKSİ/BAZALT FİBER NANOKOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

**Halil Burak KAYBAL**

**Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI**

**2019, 161 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Ahmet AVCI  
Prof. Dr. Mesut UYANER  
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Doç. Dr. Mehmet BAĞCI  
Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL**

Bu tez çalışmasında, bazalt fiber takviyeli epoksi matris (epoksi/BF) kompozit ve halloysit nanotüp (HNT) katkılı bazalt fiber takviyeli epoksi matris (HNT-epoksi/BF) nanokompozit malzeme üretimi hem el yatırması hem de vakum infüzyon yönteminin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca epoksi matris içinde kullanılan HNT 'nin en verimli oranı, epoksi nanokompozit numunelerin çekme testi sonucunda ağırlıkça % 2 oranında bulunmuştur. ASTM standartlarına göre malzemelerin uygun civata bağlı montajları yapılmıştır. Civata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemeler, 2, 4 ve 6 ay tuzlu suya maruz kalacak şekilde yaşlandırmaya bırakılmıştır. Yaşlandırma sonrasında numunelerin yük altındaki davranışlarını incelemek, meydana gelen hasar türlerini görmek ve yük taşıma kapasitelerini bulmak için çekme testi uygulanmış ve yaşlandırılmamış numuneler ile kıyaslanmıştır. Numunelere 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde vurucunun civata bağlı numuneler üzerine iki farklı bölgeye düşürülmesiyle düşük hızlı darbe testi oda sıcaklığında yapılmış ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Kompozit ve nanokompozit numunelerin çekme ve darbe testleri sonrası tuzlu suyun etkisi numuneler üzerinde araştırılmıştır. Numunelerin yüzeylerinde ve kırılma bölgelerinde oluşan hasarlar optik ve SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir.

HNT 'nin epoksi polimer içerisine takviye edilmesiyle, epoksi nanokompozit malzemenin çekme dayanımı, elastiklik modülü ve tokluk özelliklerinde artış olmuştur. Bu durum, bazalt fiberlerin HNT takviyeli epoksinin, bazalt fiberlere matris olarak taşınması ile devam etmiştir. Civata bağlantılı HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemeler gerçekleştirilen çekme ve darbe testi sonrasında epoksi/BF kompozit malzemeye göre daha üstün bir performans göstermiştir. HNT takviyesi ile HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin yaşlandırma sonrasında tuzlu sudan etkilenmesi epoksi/BF kompozit malzemeye nispeten daha az olmuştur. Bu durum, HNT 'nin tuzlu suya karşı tampon vazifesi gördüğünü ön plana çıkarmıştır. Ayrıca optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde epoksi/BF kompozit numunelerde aynı şartlar altında daha fazla hasar yoğunluğu meydana gelmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** bazalt fiber, halloysit nanotüp, nanokompozit, civata bağlantısı, düşük hızlı darbe, yaşlandırma, tuzlu su



## ABSTRACT

### PhD THESIS

# THE EFFECT OF SALTY WATER AGING ON LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIORS OF BOLTED HALLOYSITE NANOTUBE-EPOXY/BASALT FIBER NANOCOMPOSITES

**Halil Burak KAYBAL**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI**

**2019, 161 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Ahmet AVCI  
Prof. Dr. Mesut UYANER  
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI  
Asst. Prof. Dr. Gürol ÖNAL**

In this thesis, production of basalt fiber reinforced epoxy matrix (epoxy/BF) composite and halloysite nanotube (HNT) addition basalt fiber reinforced epoxy matrix (HNT-epoxy/BF) nanocomposite material were performed by using both hand laying and vacuum infusion method. In addition, the most efficient ratio of HNT used in epoxy matrix was found to be 2 % by weight as a result of tensile test of epoxy nanocomposite specimens. According to ASTM standards, the appropriate bolt connection system of the materials was made. Bolted epoxy/BF composite and HNT-epoxy/BF nanocomposite materials were left to aging in salty water for 2, 4 and 6 months. After the aging, the tensile test was carried out to examine the behaviors of the specimens under load, to observe the types of damage occurring and to find their load bearing capacities and also compared with non-aged specimens. Moreover, the low velocity impact test at room temperature was performed to for two different zones on the bolted composites and nanocomposites. The tests were applied at the energy levels of 15 J, 20 J and 25 J and the results compared to each other. The effects of salty water were investigated after the tensile and impact tests of composite and nanocomposite materials. The damages on the surface and fracture areas of the specimens were examined with optical microscopy and SEM images.

It is observed that by reinforcing the HNT into the epoxy polymer, the tensile strength, elastic modulus and toughness properties of the epoxy nanocomposite material were increased. This was continued with basalt fiber introduced to the HNT reinforced epoxy. The bolted HNT-epoxy/BF nanocomposite materials showed superior performance compared to epoxy/BF composite material after tensile and impact test. Furthermore, after ageing, HNT-epoxy/BF nanocomposite materials were affected from salty water relatively less than epoxy/BF composite materials. This situation was came into prominence the fact that HNT serves as a buffer against salty water. Lastly, the epoxy/BF composite specimens had more damage density under the same conditions, when the optical and SEM images were viewed.

**Keywords:** basalt fiber, halloysite nanotube, nanocomposite, bolted joint, low velocity impact, ageing, salty water

## ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinden tezin son aşamasına kadar bana yol gösteren, yoğun iş temposu arasında, çok değerli vakitlerini ayırarak bana destek ve yardımlarını esirgemeyen, akademik kariyerime başladığım günden beri tecrübeleriyle bana ışık tutan Tez Danışmanı saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya teşekkür ederim. Olumlu ve yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren, tecrübe ve bilgi birikimleriyle her zaman kendilerinden çok şey öğrendiğim tez izleme komitesi üyeleri, çok değerli hocalarım Prof. Dr. Mesut UYANER ve Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL hocama, laboratuvar imkânlarının sağlanmasında destek sağlayan Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN hocama, görüş ve önerileri için Dr. Öğr. Üyesi Volkan ESKİZEYBEK hocama teşekkürlerimi sunarım. Tez ile ilgili çalışmalarım, en başından sonuna kadar beraber çalıştığımız ve malzeme üretiminde yardımcı olan Öğr. Gör. Hasan ULUS 'a, malzeme temininde ve test aşamalarında yardımlarına ve fikirlerine danıştığım Arş. Gör. Dr. Okan DEMİR 'e, Arş. Gör. Ahmet Caner TATAR 'a, Arş. Gör. Emine Feyza ŞÜKÜR 'e, SEM ve Optik görüntüler için Öğr. Gör. Dr. Fatih ÖZCAN ve Arş. Gör. Kutay AYDIN 'a, Konya 'da geçirdiğim günlerde desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Abdullah ÇAKAN 'a ve Arş. Gör. İlker GÖKTEPELİ 'ye, eğitim hayatıma desteklerinden dolayı ablam Akile Kübra KAYBAL 'a ve Kimya Mühendisi Gülşen KAYBAL 'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın sanayideki uygulamalarını yakından görme fırsatı sunan Yüksel Kompozit Teknolojileri A.Ş. yöneticileri Sn. Oğuz ÇAĞLAYIK ve Sn. Ali İŞCANOĞLU 'na, kapılarını bize açan Konya Kahveci Otomotiv yetkililerine, nano malzeme temininde yardımlarından dolayı Eczacıbaşı Esan A.Ş. 'ye ve desteklerinden ötürü Amasya Üniversitesi ve Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sürecince, yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Makine Mühendisi Ömür GÜMÜŞSOY'a, Çevre Mühendisi Oğuzhan ÖZEV'e, Elektrik Elektronik Mühendisi Muhammed Kasım ACIGÜL 'e ve Yusuf UÇAKAN 'a ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, eğitim hayatımda bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve maddi, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili anneme, babama, dualarını her zaman hissettiğim merhum dedeme ve babaanneme sonsuz teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Halil Burak KAYBAL  
KONYA-2019

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>4</b>
2.1. Kompozit Malzemeler .....	4
2.1.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler .....	5
2.1.1.1. Bazalt fiberler .....	9
2.1.2. Polimer matrisler.....	12
2.1.2.1. Termosetler ve termoplastikler .....	14
2.1.2.1.1. Epoksi matris .....	15
2.2. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Uygulama Alanları .....	19
2.2.1. Elle yatırma yöntemi.....	20
2.2.2. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi .....	20
2.3. Polimer Nanokompozit Malzemeler .....	21
2.3.1. Halloysit nanotüp (HNT) takviyeli nanokompozitler .....	22
2.4. Kompozit Malzemelerde Bağlantı Tasarımı.....	24
2.4.1. Kompozit malzemelerde mekanik bağlantılar .....	25
2.5. Cıvata Bağlı Kompozit Malzemelerin Tasarımında Dikkat Edilecek Hususlar ..	27
2.6. Kompozit Malzemelerin Düşük Hızlı Darbe Davranışı .....	29
2.6.1. Düşük hızlı darbeye hasar başlangıcı.....	30
2.6.2. Düşük hızlı darbenin hasar modları .....	31
2.6.2.1. Matris hasarı .....	31
2.6.2.2. Delaminasyon .....	32
2.6.2.3. Fiber hasarı .....	33
2.6.2.4. Penetrasyon.....	34
2.7. Çevresel Koşulların Kompozit Malzemeye Etkisi.....	34
2.7.1. Bazalt fiberin bozulması .....	35
2.7.2. Epoksi polimerin bozulması .....	37
2.8. Literatürde Yapılan Çalışmalar.....	39
2.8.1. Tez konusunun literatürdeki yeri .....	52
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>54</b>
3.1. Malzeme Üretiminde Kullanılan Ürünler .....	54
3.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi.....	55
3.2.1. HNT/Epoksi nanokompozit ve epoksi polimer kompozit çekme numunesi üretimi.....	55
3.2.2. Bazalt fiber takviyeli HNT/epoksi nanokompozit malzemenin üretimi .....	56

3.3. Nanokompozit Malzemelerin Mekanik Testlere Hazırlanışı ve Yaşlandırılması	58
3.4. Kompozit Malzemelerin Çekme ve Yatak Mukavemeti Testleri	60
3.5. Kompozit Malzemelerin Düşük Hızlı Darbe Testleri	62
3.6. Hasar Görüntülerinin Alınması	64
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b>	<b>65</b>
4.1. Epoksi Kompozit ve HNT-Epoksi Nanokompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları	65
4.2. Epoksi/BF Kompozit ve HNT-Epoksi/BF Nanokompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları	68
4.3. Tek Bindirmeli Cıvata Bağlı Epoksi/BF Kompozit ve HNT-Epoksi/BF Nanokompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları	70
4.3.1. Hasar bölgesinin makro görüntüleri	75
4.4. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları	77
4.4.1. Cıvata üstü darbe (CÜD) testi sonuçları	77
4.4.1.1. Cıvata üstü darbe (CÜD) kuvvet-zaman grafikleri	77
4.4.1.2. Cıvata üstü darbe (CÜD) kuvvet-yer değiştirme grafikleri	85
4.4.1.3. Cıvata üstü darbe (CÜD) enerji-zaman grafikleri	92
4.4.1.4. Cıvata üstü darbe (CÜD) sonucu hasar görüntüleri	98
4.4.2. Kompozit üstü darbe (KÜD) testi sonuçları	102
4.4.2.1. Kompozit üstü darbe (KÜD) kuvvet-zaman grafikleri	102
4.4.2.2. Kompozit üstü darbe (KÜD) kuvvet-yer değiştirme grafikleri	110
4.4.2.3. Kompozit üstü darbe (KÜD) enerji-zaman grafikleri	117
4.4.2.4. Kompozit üstü darbe (KÜD) sonucu hasar görüntüleri	124
4.4.3. Tartışma	127
4.5. Hasar Bölgelerinin Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile İncelenmesi	130
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	<b>144</b>
5.1 Sonuçlar	144
5.2 Öneriler	148
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>149</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>161</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A	: Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )
D, d	: Delik çapı (mm)
E, e	: Delik çapının kenar mesafelere uzaklığı (mm)
h, t	: Levha kalınlığı (mm)
P	: Kuvvet, yük (N)
P <sub>kritik</sub>	: Kritik yük (N)
P <sub>maks</sub>	: Maksimum taşınan yük (N)
T <sub>g</sub>	: Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
W, w	: Levha genişliği (mm)
σ	: Gerilme (MPa)
σ <sub>maks</sub>	: Maksimum gerilme (MPa, N/mm <sup>2</sup> )

### Kısaltmalar

ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CNG	: Sıkıştırılmış doğalgaz
CNT	: Karbon nanotüp
CÜD	: Cıvata üstü darbe
DETA	: Dietilen triamin
DGEBA	: Diglisidil eter bisfenol A
DMA	: Dinamik mekanik analiz
DOD	: Amerika savunma departmanı
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
HNT	: Halloysit nanotüp
KÜD	: Kompozit üstü darbe
NASA	: Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi
PLC	: Programlanabilir mantıksal denetleyici
RTM	: Reçine transfer kalıplama
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
UV	: Ultraviyole
VARTM	: Vakum destekli reçine transfer kalıplama

## 1. GİRİŞ

Karbon, cam ve aramid vs. fiber takviyeli polimerik matristen meydana gelmiş kompozit malzemeler birçok mühendislik alanında yüksek mekanik özelliklerinden dolayı standart bir yapısal malzeme haline gelmiştir (Sarasini ve ark., 2013b). Fakat son yıllarda, doğal fiber takviyeli kompozit malzemelerin gelişimi ve kullanımı hem endüstriyel hem de akademik dünyada artan bir ilgi odağı haline gelmiştir (Fiore ve ark., 2015). Özellikle hayvansal, bitkisel ve mineral kaynaklı fiberler takviye malzemesi olarak kullanılır olmuştur. Bununla birlikte, çok yüksek sıcaklıklarda (1500 °C - 1700 °C) volkanik taşların eritilmesiyle elde edilen, doğal bir malzeme olan bazaltta, kompozit malzemeler için takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır (Militky ve Kovacic, 1996; Militký ve ark., 2002; Fiore ve ark., 2015). Bazalt fiber çevreye karşı duyarlı, zararsız bir malzeme olup, kanserojen maddeleri ve herhangi bir sağlığı tehdit edici riskleri bulunmamaktadır (Lee ve ark., 2010). Bazaltın sahip olduğu, düşük maliyet, yüksek mekanik mukavemet, yüksek termal özellik, yüksek korozyon direnci gibi üstün kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı cam ve karbon fiberlerin yerine iyi bir alternatif olması mümkün hale gelmiştir (Czigány ve ark., 2005; Czigány, 2007; Deák ve Czigány, 2009; Lee ve ark., 2010; Sarasini ve ark., 2013b). Bu sebeple bazalt fiber, literatür araştırmalarında ve endüstriyel uygulamalarda hızlı bir şekilde yer almaya başlamıştır. Akademik alanda genelde bazalt fiberin mekanik ve termal özellikleri üzerine çalışmalar göze çarpmaktadır. Bazalt fiberin farklı matris ve farklı dolgularla modifiye edilmiş kompozit yapılarının, eğme-çekme gerilmeleri, darbe mukavemeti, çekme-basma testi davranışları tahlil edilmiştir (Botev ve ark., 1999; Liu ve ark., 2006a; 2006b; Ronkay ve Czigány, 2006; Lee ve ark., 2010). Yapılan çalışmalar doğrultusunda bazalt fiberin cam ve karbon fiber için iyi bir alternatif oluşturduğu kanısına varılmıştır. Bazalt fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmaların diğer bir yönünü ise, matris fazını nano ve mikro boyutta parçacıklar ile takviye edilmesi oluşturmaktadır. Matris fazının parçacıklar ile modifiye edilmesi, bazalt takviyeli kompozit malzemelerin mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklerini çoğunlukla iyileştirmesinin yanında özelliklerin kötüleşmesine de sebep olduğu durumlar meydana gelmiştir.

Cıvatalı bağlantılar, havacılık ve denizcilik gibi alanların başlangıcından beri uçaklarda ve gemilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapıların uygulanabilirliklerinin bu çalışma alanları içerisine uzanması da cıvatalı bağlantıların bu alanlardaki önemini kaybettirmemiş aksine daha da önemli bir hale getirmiştir. Yapıda

yüksek rijitlik ve mukavemet katmasının yanında, yapının bakım ve tamiratının yapılması için sökülmesine veya yapıların gizli, ortada olmaması gereken kısımlarına erişmeye de imkân sağlar. Bununla beraber, endüstride artan kompozit malzeme kullanımı cıvatalı bağlantılar için yeni zorluklar getirmiş ve bilimsel olarak keşfedilmeyi bekleyen yeni araştırma alanları sunmuştur. Kompozit malzemelerin hasar davranışlarının incelenmesi ve simüle edilmesi metallere göre anlaşılması zor ve karışıktır. Fakat kompozitlerin mekanik performanslarının, bilhassa yorulma davranışlarının metallere iyi olması kullanımlarını cazibeli hale getirmektedir. Bağlantıların performansını arttırmak için bağlantı davranışını daha derinlemesine anlamak gerekir. Cıvata bağlantılı kompozitlerin mekanik performansının incelenmesi, kompozit malzemenin doğasından gelen, bağlantı tipi, türü ve geometrisinden gelen, bağlantı elemanı ve çevreseller koşullardan ötürü gelen fazla sayıdaki parametreler sebebiyle karmaşık olabilir. Bu durumların çoğu bazen zaman alıcı bazen de çok pahalı olabilen çok sayıda deneysel test veya hassas analizler ile daha verimli bir şekilde tespit edilebilir.

Kompozit malzemelerin üstün mukavemet ve rijitlik özellikleri, malzemelere uygulanan tekrarlı yük altında, darbe yükleri altında ve çeşitli çevresel faktörlerin etkisinde örneğin su, su buharı, deniz suyuna maruz kalma ve diğer korozif ortamlarda bulunma, sıcaklık değişimleri, uzun vadeli fiziksel ve kimyasal kararlılık gibi malzeme davranışlarının belirsizliğine neden olmakta ve kullanımlarını tehlikeye sokmaktadır. Bu alanda kompozit malzemeler için güvenilir teori ve deneysel verilerin pratik olarak sınırlı olması, kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen güvenlik problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Bundan dolayı, kompozit malzemelerin mühendislik malzemeleri olarak sert çevresel koşullar altındaki kullanımı, yeni bir üretim ve tasarım farkıyla güvenilirliklerine bağlı olarak şekillenebilir. Kompozit malzemelerin yüksek performansları ile bu tür uygulamalarda yaygın kullanımının evrensel olarak kabul görmesi, tasarımına ve malzeme özelliklerinin uzun soluklu korunmasına büyük ölçüde bağlı olacaktır. Malzemelerin çevresel faktörlerin etkisiyle bozulmaya bağlı süreçlerin aşamalarının ortaya çıkarılması ve bu ortamlardaki kullanım potansiyellerinin ön plana çıkarılması gerekmektedir. Kompozit malzemelerdeki belirgin bozulmalar genellikle şu şekilde meydana gelmektedir;

1. Takviye fiberlerin zayıflaması,
2. Yapışma ve bağlanma yüzeylerinde meydana gelen zayıflamadan dolayı fiber/matris arayüzeylerinde meydana gelen bozulmalar,
3. Matris malzemenin nem, su buharı, tuzlu su gibi aşındırıcı maddelere geçirgenliği

4. Matris malzemesinin kullanım ömrü ve sıcaklığa karşı dayanımı,
5. Sıcaklık ve nemin etkisiyle ortaya çıkan hızlı bozulma,

Bu çevresel faktörlerin bir sonucu olarak, kompozit malzemelerdeki özellik kaybı ve performans düşüklüğü kopma ve ciddi hasarlara sebep olur ve kompozit malzemenin kullanım ömrü son bulur (Halpin, 1969).

Kompozit malzemelerin üzerlerine binen yük karşısında ve çevresel şartların oluşturduğu zor durumlar karşındaki davranışının tam olarak belirlenmesi ve bu durumlara karşı alınacak önlemler, bu malzemelerin zor şartlar altındaki kullanımlarına bir çare olacak ve kullanım alanlarını genişletecektir. Sınırlı sayıda yapılmış olan akademik çalışmalara bu tez çalışma konusuyla bir yenisi daha eklenmiştir. Yapılan bu çalışma ile bazalt fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin cıvatalı montajlarında tuzlu suyun etkisi çeşitli mekanik testlerle ifade edilmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit terimi ilk olarak 1950 'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzeme karmaşık, çok bileşenli ve çok fazlı bir sistem olduğundan tam ve doğru olarak tanımlanması zordur. Kısa bir tanımla ifade edilmesi gerekirse, kompozit malzeme, farklı özelliklere ve farklı formlara sahip iki veya daha fazla bileşenli malzemenin birleşmesi sayesinde meydana gelen birleşim malzemesidir (Wang ve ark., 2011). Başka bir tanımlama da ise, kompozit, makroskobik düzeyde, birbiri içerisinde çözünmeyen ve iki veya daha fazla bileşenden oluşmuş yapı malzemeleri olarak ifade edilmektedir (Kaw, 2005). Kompozit sadece orijinal bileşenlerin özelliklerini korumakla kalmaz aynı zamanda da yeni özelliklerin türetilmesine de olanak sağlar. Kompozit malzemeler şu özelliklere sahiptir; mikroskobik olarak homojen olmayan bir yapıya sahiptir ve ayrı bir arayüze sahiptir; birleştirilen bileşenlerin performansları her zaman birbirinden farklıdır; oluşturulan kompozit malzeme bileşenlerinden üstün bir performans göstermelidir; bileşen malzemelerin hacim oranı % 10' dan daha büyüktür (Wang ve ark., 2011). Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerden biri takviye malzemesi olarak diğeri de matris olarak adlandırılır. Bu ifadeye göre saman ile takviye edilmiş kilden oluşan kerpiç, demir çubuklarla takviyeli edilmiş beton, tel ile takviye edilmiş araba lastiği, fiberlerle takviye edilmiş polimer malzeme kompozit malzemeye günümüz örneklerindedir. Wang ve arkadaşları, kompozit malzemelerin yapısal olarak içyapısı incelendiğinde aslen üç temel faz içeriği olduğunu ifade etmektedirler. Biri sürekli olan matris fazı, diğeri matris tarafından çevrelenen takviye fazı, sonuncusu da takviye fazı ve matris fazı arasında arabirim olan kompozitlerin arayüzey fazı olarak adlandırılır. Arayüzey fazı, mikro yapı seviyesinde incelendiğinde, matris ve takviye fazlarının tek başına gösterdikleri özelliklerin dışında, bu iki fazın birleşimi neticesinde oluşan kompozit malzemenin arayüzeyinde farklı kompleks yapılar meydana geldiğini görmüşlerdir. Aynı zamanda arayüzey fazında oluşan bu farklı yapı ve morfolojinin kompozit malzemenin performansını da etkilediğini dile getirmişlerdir. Bu sebeple, arayüzey fazının kompozitin üçüncü bir aşaması olduğunu söylemekte. Ayrıca bu üç fazın yapısı ve doğası, birbirleriyle olan konfigürasyonu ve etkileşimi kompozitin performansını direkt olarak etkilediğini söylemişlerdir (Wang ve ark., 2011).

Kompozit malzemeleri sınıflandırmanın birden çok yöntemi vardır. Örneğin takviye prensibine göre difüzyon takviyeli kompozit malzemeler, parçacık takviyeli kompozit malzemeler, fiber takviyeli kompozit malzemeler bulunmaktadır. Farklı uygulama ve esaslara dayalı, yapısal ve fonksiyonel sınıflandırmalarda mevcuttur. Fonksiyonel olan grupta kompozit malzemeler işlevlerine uygun olarak da elektriksel fonksiyonlu kompozit malzeme, termal fonksiyonlu kompozit malzeme, optik fonksiyonlu kompozit ve benzerlerine ayrılabilir. Kompozit malzemeler farklı hazırlama işlemlerine göre de lamine kompozit malzemeler, sarımlı kompozit malzemeler, pultrüzyon kompozit malzemeler, tekstil yapıları kompozit malzemeler vb. gibi de sınıflandırılmıştır (Wang ve ark., 2011). Kompozit malzemeler ile alakalı kaynakların birçoğu buraya kadar bahsedilen sınıflandırmaların dışında daha işlevsel ve kolay olan aşağıdaki sınıflandırmaları yapmışlardır.

(1) Matris malzemesinin tipine göre sınıflandırma: Metal matrisli kompozitler, inorganik metal olmayan matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitlerdir. En önemli inorganik metal olmayan matris kompozit malzemeler; seramik matris kompozitleri ve karbon/karbon kompozit malzemeler gibi karbon esaslı kompozit malzemeleri içinde barındırmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerde ise ısıyla sertleşen termoset ve termoplastik reçine bazlı kompozit malzemeleri içermektedir.

(2) Faz formunun tipine göre sınıflandırma: Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler, örgü fiber takviyeli kompozit malzemeler, tabaka takviyeli kompozit malzemeler, süreksiz/kısa fiber takviyeli kompozit malzemeler, parçacık katkılı kompozit malzemeler, nano parçacık katkılı kompozit malzemeler.

(3) Takviye tipine göre sınıflandırma: Karbon fiber kompozit malzemeler, cam fiber kompozit malzemeler, organik fiber kompozit malzemeler, bor fiber veya silisyum karbür fiber kompozit malzemeler, hibrit fiber kompozit malzemeler.

### **2.1.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler**

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, aralarında farklı yüzey, fiziksel-kimyasal özellik ve farklı hammaddeye sahip, bir matris içerisine gömülü veya yapıştırılmış yüksek mukavemetli ve elastikiyet modülüne sahip fiberlerden oluşur. Bu formdaki bir malzemede hem takviye malzemesi hem de matris malzemesi fiziksel ve kimyasal özelliklerini korur ama birlikte gösterdikleri özellik, tek başlarına gösterdiklerinden farklı

ve ikisinin kombinasyonu şeklinde olacaktır. Yük aktarımı sağlayan matris tarafından çevrelenip bir arada ve rijit olarak kalması sağlanan fiberler ana yük taşıyıcı elemanlardır. Ayrıca, fiberlerin yüksek sıcaklık ve nemden kaynaklı ortam koşullarından etkilenmesi de matris tarafından gerçekleşmektedir. Matris içindeki takviye elemanları olarak adlandırılırsa da, fiberler kompozit yapıya apayrı bir özellik katan malzemelerdir. Ticari kullanımda başlıca fiberler, cam, karbon ve kevlar fiberlerdir. Buna ek olarak bazalt, bor, silisyum karbür, alümina fiber türleri de endüstri tarafından yavaş yavaş kabul görmeye başlamıştır. Bütün bu fiberler, sürekli uzunluklardaki fiber veya süreksiz, kırılmış fiber halinde matris içerisine dâhil edilebilmektedir. Matris malzemesi olarak polimer, metal veya seramik malzeme de kullanılabilir. Her matris türünde istenilen özellik, tasarım ve kullanım yerine göre farklı birleşimler ve mikro yapı düzenlemeleri yapılabilmektedir.

Fiberlerle takviye edilmiş kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanıldığı en yaygın biçimi, fiber/matris birleşiminin istiflendirilerek ya da tabakalı halde bir araya getirilmesi ile meydana gelmektedir. İstenen kalınlıkta kompozit malzemenin üretilmesine imkân sağlanan bu tür malzemeye tabakalı kompozit adı verilmektedir. Tabakalı kompozit malzemede her bir tabakanın dizilim sırası ve fiberlerin yön/doğrultuları (oryantasyonları) değiştirilerek birbirinden farklı fiziksel ve mekanik özellikler türetilerek şekilde kontrol edilebilir.

Fiber takviyeli kompozitlerin birçoğu sıradan metal malzemedan daha iyi mekanik özellik sağlamaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin düşük yoğunluklarından kaynaklı mukavemet/ağırlık oranları metalik malzemelerinkinden belirgin bir şekilde daha yüksektir. Çizelge 2.1. de metal ve kompozit malzemelerin çekme özellikleri verilmiştir. Buna ek olarak bu malzemelerin metal malzemeye göre yorulma toleransları da daha yüksektir. Bu nedenlerden ötürü fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler temel bir malzeme sınıfı olarak ortaya çıkmakta ve havacılık, otomotiv, denizcilik gibi birçok endüstriyel alanda metal malzemelerin yerine kullanılmaktadır (Mallick, 2007).

**Çizelge 2.1.** Metal ve kompozit malzemeler için çekme özellikleri (Mallick, 2007)

Malzeme Türü	Yoğunluk gr/cm <sup>3</sup>	Modül GPa	Çekme Mukavemeti MPa	Mukavemet/Ağırlık Oranı, 10 <sup>3</sup> m
SAE 1010 Çelik (Soğuk Şekillendirilmiş)	7.87	207	365	4.72
AISI 4340 Çelik (Temperlenmiş)	7.87	207	1722	22.3
6061-T6 Alüminyum Alaşım	2.70	68.9	310	11.7
7178-T6 Alüminyum Alaşım	2.70	68.9	606	22.9
Ti-6Al-4V Titanyum Alaşım	4.43	110	1171	26.9
17-7 PH Paslanmaz Çelik	7.87	196	1619	21.0
INCO Nikel Alaşım	8.2	207	1399	17.4
Yüksek Dayanımlı Karbon Fiber/Epoksi (Tek yönlü)	1.55	137	1550	101.9
Yüksek Modüllü Karbon fiber/Epoksi (Tek yönlü)	1.63	215	1240	77.5
E-Cam Fiber/Epoksi (Tek Yönlü)	1.85	39.3	965	53.2
Kevlar 49 Fiber/Epoksi (Tek Yönlü)	1.38	75.8	1378	101.8
Bor Fiber/6061 Al Alaşım Matris	2.35	220	1109	48.1
Karbon Fiber/Epoksi (Quasi izotropik)	1.55	45.5	579	38
Hazır Kalıp Kompozit (izotropik)	1.87	15.8	164	8.9

Çelik ve alüminyum alaşımları gibi geleneksel metaller ölçüm yönünden bağımsız olarak eşit veya neredeyse benzer özellikler sergiledikleri için izotropik olarak kabul edilirler. Buna karşın fiber takviyeli kompozit malzemede benzer ifadeyi kullanmak mümkün değildir. Çünkü bu malzemenin mekanik özellikleri ölçüm yönüne bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, tek yönlü bir oryantasyona sahip kompozit malzemede, oryantasyon yönünde yapılan bir çeki kuvveti doğrultusunda mukavemet ve mekanik modülleri maksimumdur. Fiber yönüne dik doğrultuda yapılan yüklemde ise bu özellikler daha düşüktür. Darbe mukavemeti, termal genleşme katsayısı ve termal iletkenlik gibi diğer termal ve mekanik özellikler için benzer açısallık gözlenir. İki veya daha fazla yönlü takviyede bu özellikler daha dengeli bir biçimde oluşmaktadır. Bu mekanik özellikler tek yönlü bir kompozitin özelliklerinden daha düşük olmasına rağmen, yine de yapısal metallere göre önemli bir avantaja sahiptir.

Bir fiber takviyeli kompozitin tasarımı, metal malzemeye göre yöne bağımlı olduğundan zordur. Bunun yanında, kompozit malzemenin bu izotropik olmayan doğası gereği malzemenin tasarım gerekliliklerini kontrol etmek için eşsiz bir fırsattır. Bu tasarım esnekliği, malzemeyi belirli yönde güçlendirebilme kolaylığı, sertliğini tercih

edilen bir yönde arttırabilme, ikincil bir işlem olmadan kıvrımlı veya kavisli yapılar oluşturabilme, sıfır genleşme katsayısına sahip yapılar üretebilme kolaylığı sunmaktadır.

Metal ve fiber takviyeli kompozit malzemeler arasında yöne bağımlılığın dışında farklı durumlarda söz konusudur. Örneğin, metal malzemelerde genelde süneklik ve plastik şekil değiştirmenin fazla olduğu durumlar söz konusuysen, çoğu fiber takviyeli kompozit malzemede elastiklik durumu daha çok ön plandadır. Bu duruma birde malzemenin heterojen olması eklenirse kompozit malzemenin enerji yutma eğilimini arttıracaktır. Dışardan gelen yüklerin tipine ve büyüklüğüne bağlı olarak kompozit malzemede özellik olarak kademeli bir hasar oluşabilir ama genelde oluşan hasar katastrofik bir tarzda meydana gelmeyecektir. Metal bir malzeme yerine kullanılacak fiber takviyeli bir kompozit malzemede oluşan hasar mekanizması oluşumu ve gelişimi metalinkinden çok farklı olduğu için tasarım yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur (Mallick, 2007).

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin termal genleşme katsayıları metallerinkinden çok daha düşüktür. Bundan dolayı kompozit malzemeler daha geniş bir sıcaklık aralığında daha iyi bir performans sergilemektedirler. Bu malzemeler birlikte kullanıldıklarında, termal özellik farklarından dolayı aralarında gereksiz bir termal gerilme oluşmaktadır. Isı yayılımının hızlı ve verimli olması gereken yerlerdeki uygulamalarda; örneğin elektronik ambalajlarda, paket içindeki aşırı ısınma ve istenmeyen sıcaklık artışından dolayı bileşenlerin zarar görmesini engellemek için kullanılırlar. Diğer yandan fiber takviyeli polimer kompozitlerin elektriksel iletkenliği de genel olarak metallerinkinden düşüktür.

Fiber takviyeli kompozitlerin bir diğer spesifik özelliği ise yüksek iç sönümlenmeleridir. Bu özellik, malzeme içerisinde daha iyi titreşimden kaynaklı enerji emilimi sağlar. Bunun vasıtasıyla da çevresindeki bileşenlere giden gürültü ve titreşim yoğunluğu azalacaktır. Kompozit malzemelerin yüksek sönümlenme kapasitesi, gürültünün, titreşimin ve sertliğin yolcu konforu için kritik konular olduğu birçok otomotiv uygulamasında faydalı olabilir. Birçok spor malzemesi uygulamasında yüksek sönümlenme ihtiyacı hâsıl olduğundan, bu alanlarda da kullanımı faydalı olacaktır (Mallick, 2007).

Fiber takviyeli kompozitlere atfedilen bir diğer avantaj ise yüksek aşınma davranışlarıdır. Bununla beraber, fiber takviyeli polimer çevresindeki ortamdan nemi veya kimyasal emebilmektedir. Bu da malzemede boyutsal değişikliklere veya ters iç

gerilmelere oluşturabilmektedir. Bu tür davranışların oluşmasını engellemek için kompozit yüzey uygun bir boya veya kaplama ile nem ve kimyasallardan korunmalıdır.

### 2.1.1.1. Bazalt fiberler

Bazalt, volkanik kayalarda bulunan ve kaynağı donmuş lav olan, 1500 °C ve 1700 °C arasında değişen erime sıcaklığına sahip doğal bir malzemedir (Militký ve Kovacic, 1996; Militký ve ark., 2002). Bazaltların neredeyse % 80 'i iki temel mineralden oluşur; plajiyosen ve piroksen (Fiore ve ark., 2015). Kimyasal bileşimi incelendiğinde SiO<sub>2</sub> 'nin ana bileşen olduğu, ikinci önemli bileşenin ise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olduğunu gözlemlemek mümkündür (Militký ve ark., 2002; Deák ve Czigány, 2009; Wei ve ark., 2010a). Çizelge 2.2. 'de bazaltın kendine özgü kompozisyonları verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Bazalt fiberin bileşenleri (Militký ve ark., 2002; Deák ve Czigány, 2009)

Bileşen	% İçerik (ağırlıkça)	
	(Militký ve ark., 2002)	(Deák ve Czigány, 2009)
SiO <sub>2</sub>	43.3-47	42.43-55.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11-13	14.21-17.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<5	10.80-11.68
CaO	10-12	7.43-8.88
MgO	8-11	4.06-9.45
Na <sub>2</sub> O	<5	2.38-3.79
TiO <sub>2</sub>	<5	1.10-2.55
K <sub>2</sub> O	<5	1.06-2.33

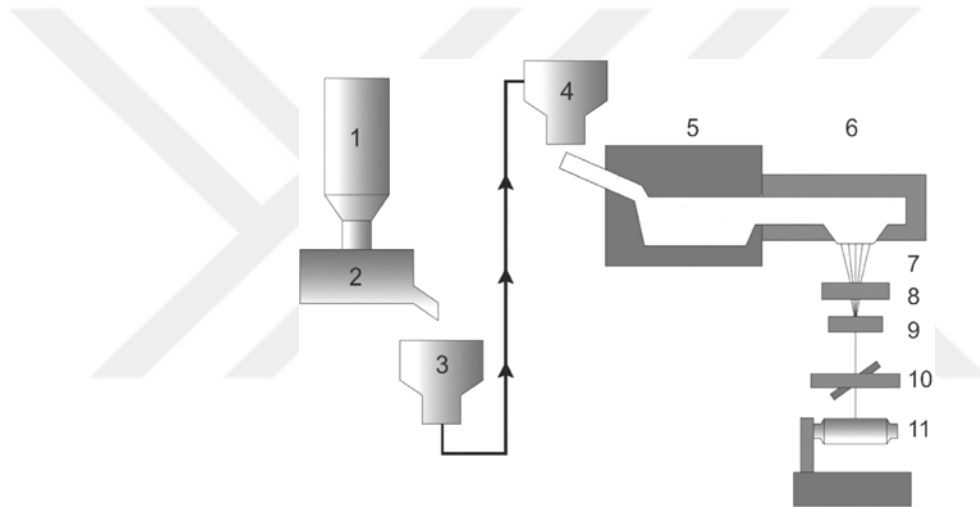
1953-1954 yıllarında Moskova Cam ve Plastik Araştırma Enstitüsü tarafından geliştirilen Bazalt fiber, 30 yıllık araştırma ve geliştirme sonrasında eski Sovyetler Birliği tarafından icat edilen ileri teknoloji ürünü bir fiberdir (Morova, 2013).

Bazalt liflerin temel maliyeti, hammaddesinin kalitesi ve türüne, üretim sürecine ve nihai ürünün özelliklerine bağlı olarak değişir. Maliyet olarak, kimyasal ve mekanik özellikler hammaddenin bileşimine bağlıdır. Bileşim ve element yoğunlaşması açısından farklılıklar, termal ve kimyasal kararlılık ile az ya da çok iyi mekanik ve fiziksel özellikler arasında farklılık gösterir (Novitskii, 2004).

Genel olarak, bazalt fiberin üretim süreci, cam fiberinkine benzer, ancak daha az enerji tüketir ve hiçbir katkı maddesi içermediğinden cam veya karbon fiberden daha ucuzdur. Hammade olarak kullanılan volkanik bazalt taşı, 1450-1500 °C 'de fırın içinde konularak eritilir. Erimiş malzeme lif oluşturmak için bir platin/rodyum esaslı pota burçlarından geçirilir. Sürekli eğirme yöntemi diye adlandırılan bu teknik, tekstil alanında üretim sürecinde kullanılmaya ve kompozit malzemelerde kullanımında büyük bir

potansiyel uygulamasına sahip olan takviye malzemesini sürekli veya süreksiz lifler şeklinde üretilip kullanılmasına da imkân sağlar. Konvansiyonel süreçler ve ekipmanlarca kolayca işlenebilme özelliğine ek olarak, bazalt fiberler tek bir üretim sürecinden başka hiçbir süreç ve katkı maddesi içermez, bu da maliyet açısından ek bir avantaj sağlar (Sim ve Park, 2005).

Kısa ve ucuz bazalt lif üretimi için mekanik özellik olarak biraz daha zayıf üretim yapan eriyik üfleme tekniği önerilmektedir (Deák ve Czigány, 2009). Sürekli fiberlerin üretimi ise cam fiber üretimindeki gibi püskürtme memesi (spinneret) yöntemi ile üretilir. Şekil 2.1. 'de yöntem şematik olarak ifade edilmektedir. Son zamanlar da Kim ve ark. laboratuvar ortamında fiber üretmek için dielektrik ısıtmaya dayalı eriyik eğirme yöntemini de önerdiler (Kim ve ark., 2013).



**Şekil 2.1.** Bazalt üretim şeması: 1) Ezilmiş taş deposu 2) Yükleme istasyonu 3) Taşıma sistemi 4) Toplu şarj istasyonu 5) Başlangıç erime noktası 6) Hassas sıcaklık kontrollü ikincil ısı bölgesi 7) Filaman şekillendirme yatakları 8) Boyutlandırma istasyonu 9) İplik şekillendirme istasyonu 10) Fiber germe istasyonu 11) Otomatik sarma istasyonu (Deák ve Czigány, 2009)

Bazalt fiberler yüksek kimyasal kararlılığa sahiptir (Wei ve ark., 2010b; 2010a). Zehirli ve yanıcı değildirler ve yüksek sıcaklığa karşı dayanıklıdırlar (Berozashvili, 2001; Fiore ve ark., 2011). Dahası bazaltın en belirgin özellikleri cam fiberlerle kıyaslanabilir ve hatta cam fiberlerden daha iyi olduklarıdır.

Son yıllarda bazalt fiberler birtakım uygulamalarıyla ön plana çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık, yüksek darbe dayanımı, hafiflik ve mukavemetlerinden dolayı doğal gazların (CNG) sıkıştırılmasında kullanılan silindir tank üretiminde kullanılabilir (Pavlovski ve ark., 2007).

Otomotiv sektöründe, bazalt fiberler otomobil tavan döşemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamada bazaltın, otomotiv üreticileri tarafından

kullanılmasının en önemli avantajı geri dönüştürülebilme özelliğinin olması olarak gösterilmektedir. Ayrıca, bazaltın otomotivde fren diski balatalarında ve debriyaj balata uygulamalarında kullanımı giderek artmaktadır. Bu uygulamalarda kullanılmasının sebebi de servis ömrünün 2-3 kat artması, aşınma olmadan metal ile sürtünme temasına karşı dayanıklılığı, daha yüksek ve daha kararlı sürtünme katsayısı faktörüne sahip olması, şok direncinin yüksek olması, uzun çalışma sıcaklığı aralığı, kimyasal ortamlara dayanıklılığı, düşük su emiciliği ve çevre dostu olmasıdır (Fiore ve ark., 2015).

İnşaat sektöründe, bazaltın çeşitli uygulamaları mevcuttur. Bazaltın, çelikten daha sert ve hafif olması; alkali, pas ve asitlere karşı doğal dayanıklılığı; beton ile aynı genişleme katsayısına sahip olması; özel bir kaplama işlemine ihtiyaç duymaması; kolay bir şekilde kesilebilmesi; elektriksel iletkenliğinin olmaması; korozyon direncinin yüksek olması özelliklerinden dolayı betonarme yapılarda, betonlar için takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır (Fiore ve ark., 2011; Fiore ve ark., 2015). Yapılan bir çalışmada, bazalt fiber kullanımı ile betonun deformasyon ve enerji absorbe edebilme kapasitesini geliştirdiği fakat basma mukavemetinde etkisinin olmadığı ifade edilmektedir (Li ve Xu, 2009b; 2009a). Bazalt fiberler termoplastik matrislerle kullanılarak, inşaat yapılarında depreme dayanıklılık özelliklerini de geliştirdiği görülmüştür (Fiore ve ark., 2015). Yapılan başka bir çalışmada, bazalt fiberin yapısal yapı elamanları (beton) için güçlendirici bir malzeme olarak uygulanabilirliği araştırılmıştır. Dayanıklılık, mekanik özellikleri ve eğilme mukavemeti için çeşitli deneysel testler yapıldığında, bazalt fiber diğer fiberler arasında (cam, karbon) iyi bir alternatif olarak görülmektedir (Sim ve Park, 2005).

Bazalt fiberler ulaşım alanında da kullanılabileceği ifade edilmektedir. Asfalt yapımında güçlendirici rol üstlendiği ve asfaltın gerilme mukavemetini, tokluğunu ve çentik deformasyon direnci performanslarını etkili bir şekilde geliştirdiği gözlenmiştir (Fiore ve ark., 2015).

Yenilenebilir enerji temel taşlarından olan rüzgârgülleri için de bazalt fiberler kullanılabilir. Rüzgârgülü yapımında kullanılan cam fiberlere göre, bazaltın % 30 daha güçlü, % 15-20 daha sert ve E-camdan % 8-10 daha hafif olduğu bazalt üreticiler tarafından sunulmaktadır.

Bazalt fiberler, spor ekipmanlarında da sıkça kullanılmaktadır. Özellikle kullanıldığı eşyalar; su kayağı, araba ve motosiklet dış parçaları, bisikletler, kanolar ve kano kürekleri, kayaklar ve kaykaylar ve tenis raketleridir.



Bazalt fiberin kullanım alanlarını ilgilendiren bir çalışmada, bazalt fiber takviyeli polimer kompozitlerin tuzlu suya daldırma, nem emilimine, sıcaklık ve nem döngüsüne karşı toleranslarını açıklamaya çalışmışlardır. Aynı çalışmalarını paralel olarak cam fiberler içinde yapmışlardır. Tuzlu suda 240 günlük yaşlandırma işleminden sonra, elastiklik modülünde ve bazalt kompozitin çekme mukavemetinde düşüş gözlenmiştir. Donma-çözülme testlerinde kayma direncinde önemli bir düşüş olmamıştır. Ancak, 40 °C tuzlu su içindeki yaşlandırmada bazaltın kayma dayanımında düşüş olmuştur. Sonuç olarak, bazalt kompozitlerin arayüzey bölgelerinin cam kompozitlere göre hasar dayanımının daha zayıf olduğu ileri sürülmüştür (Liu ve ark., 2006a).

Bazalt fiberin, ısı iletim özelliklerinin yüksek olması onu bir yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmesinde imkân tanımaktadır. İyi bir elektrik yalıtım özellikleri nedeniyle baskılı devre kartlarında da kullanılabilir. Ayrıca elektrik kabloları ve yer altı kanalları elektro teknik uygulamalarda kullanılırlar (Fiore ve ark., 2011). Isı yalıtım özellikleri nedeniyle daha önce kumaş ve bant şeklinde ve ateş, yangından koruma amaçlıda kullanılmıştır (Hao ve Yu, 2010). Yüksek özgül mukavemeti, korozif ortama dayanıklı ve yüksek elektriksel yalıtım özelliği sayesinde yüksek voltajlı güç hatlarında izolatör gibi özel ürün olarak karşımıza çıkmaktadır (Shokrieh ve Memar, 2010).

Denizcilik sektöründe tersanelerdeki tekne imalatında, ekonomik ve doğal oldukları, işçiler için güvenli ve sağlıklı olmasının yanında maliyetli olması ve bu sebeple cam fiberlere olası muhtemel bir alternatif olması bazalt fiberlerin kullanımını arttırmaktadır. Denizcilik uygulamaları için yapılan bir çalışmada, bazalt fiber takviyeli kompozitlerin üç noktada eğilme ve çekme testlerinde bazalt kompozitin cam kompozite göre üstün bir performans sergilediği görülmüştür (Fiore ve ark., 2011).

### **2.1.2. Polimer matrisler**

Fiber takviyeli kompozit malzeme matris; fiberleri bir arada tutmak, fiberler arasındaki gerilmeleri aktarmak, nemin ve kimyasalların bulunduğu ortama karşı bariyer sağlamak, fiber yüzeylerini aşınma gibi mekanik bozulmalara karşı korumak gibi vazifeleri vardır. Matrisin kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesindeki rolü mekanik özelliklerinden dolayı biraz daha küçüktür. Bunun birlikte matris, kompozit malzemenin basma dayanımı, tabakalar arası ve yüzeylerde oluşan kayma gerilmesi performansını direk olarak etkilemektedir. Ayrıca, basma yükleri altındaki kompozit malzeme fiberlerin burkulma olasılığına karşı yanal destek sağlar. Eğilme yükü

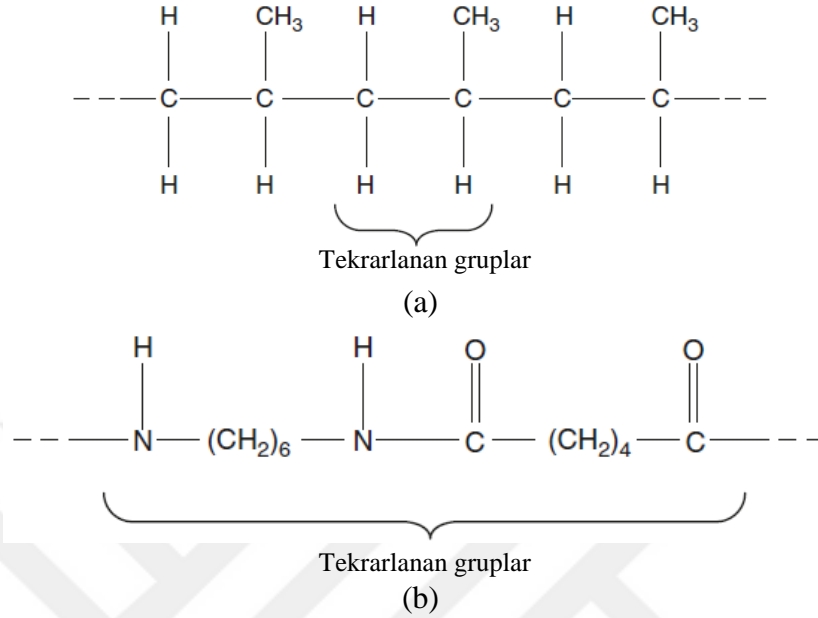
altındaki kompozit yapıda tabakalar arası kayma gerilmesinin tasarımda göz önünde bulundurulması gerekirken, diğer yandan da burulma yükü altındaki malzemede de düzlem içi kayma mukavemeti önem arz etmektedir. Bu sebepler, hasar toleranslı yapıların tasarımında düşünülmesi gereken önemli noktalardan birisi matris malzemesi ve fiber takviyesi arasındaki etkileşimdir. Sonuç olarak, kompozit malzemede meydana gelen hasar ve kusurlar, malzeme üzerinde yapılacak işlemler için matris malzemesinin özelliklerine büyük ölçüde bağlıdır. Yaygın bir şekilde ticari olarak ve araştırmalarda kullanılan çeşitli matris malzemeleri Çizelge 2.3. 'te verilmiştir. Bunlar arasında epoksi, polyester ve vinilester gibi termoset polimerler, işlem kolaylığı ve düşük viskoziteye sahip olduklarından dolayı sürekli veya uzun fiber takviyeli kompozitler de matris malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Termoset polimerlerde daha çok kısa fiberlerle beraber kullanılmakta olup, son zamanlarda sürekli fiber kompozit malzemelerde de kullanılmaya başlanmıştır.

**Çizelge 2.3.** Polimer matris malzemeleri ve genel kullanım yerleri (Mallick, 2007)

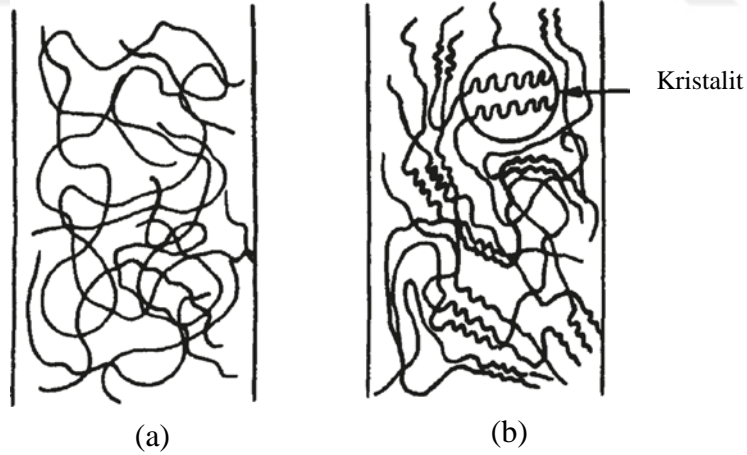
Termoset Polimer Matrisler
Epoksi: Havacılık ve uzay uygulamaları
Polyester, Vinilester: Otomotiv, denizcilik, kimyasal ve elektriksel uygulamalar
Fenolik: Kalıp uygulamaları
Poliimid, Polibenzimidazoller: Havacılıkta yüksek sıcaklık uygulamaları
Termoplastik Polimer Matrisler
Naylon, Termoplastik Polyester, Polikarbonat, Poliasetal: Süreksiz fiberlerin enjeksiyon kalıplama uygulamaları
Poliamid, Polieter, Polisülfon, Polipenilin Sülfat, Polieterimid: Sürekli fiberlerin yüksek sıcaklık uygulamaları

Polimerler, güçlü kovalent bağları ile bir araya getirilen bir ya da daha fazla tekrarlanan atom grupları içeren, uzun molekül zincirleri olarak tanımlanır. Şekil 2.2. 'de polimer zincirindeki tekrarlanan gruplar polipropilen ve naylon 6.6 için örnek olarak verilmiştir. Yaygın olarak plastik olarak da adlandırılan polimerik malzemeler benzer kimyasal yapıya sahip ancak eşit uzunlukta olmayan molekül zincirlerine sahiptirler. Katı halde, bu moleküller ya amorf polimer halinde rastgele bir şekilde ya da yarı kristal polimer halinde düzenli/rastgele bir şekilde bulunmaktadır. Şekil 2.3. 'te amorf ve yarı kristal polimer haldeki molekül dizilişi gösterilmektedir. Mikroskobik ölçekte bir polimer zincirinde rastgele ve farklı tepki verecek gruplar bulunmaktadır. Sıcaklığın artışı ile bu

grupların sayısı, yoğunluğu ve frekansı artmaktadır. Bu da polimer malzemenin özelliklerinde değişmelere sebep olacaktır.



Şekil 2.2. Polimer moleküllerinde örnek tekrarlanan gruplar a) Polipropilen molekülü b) Nylon 6.6 molekülü (Mallick, 2007)

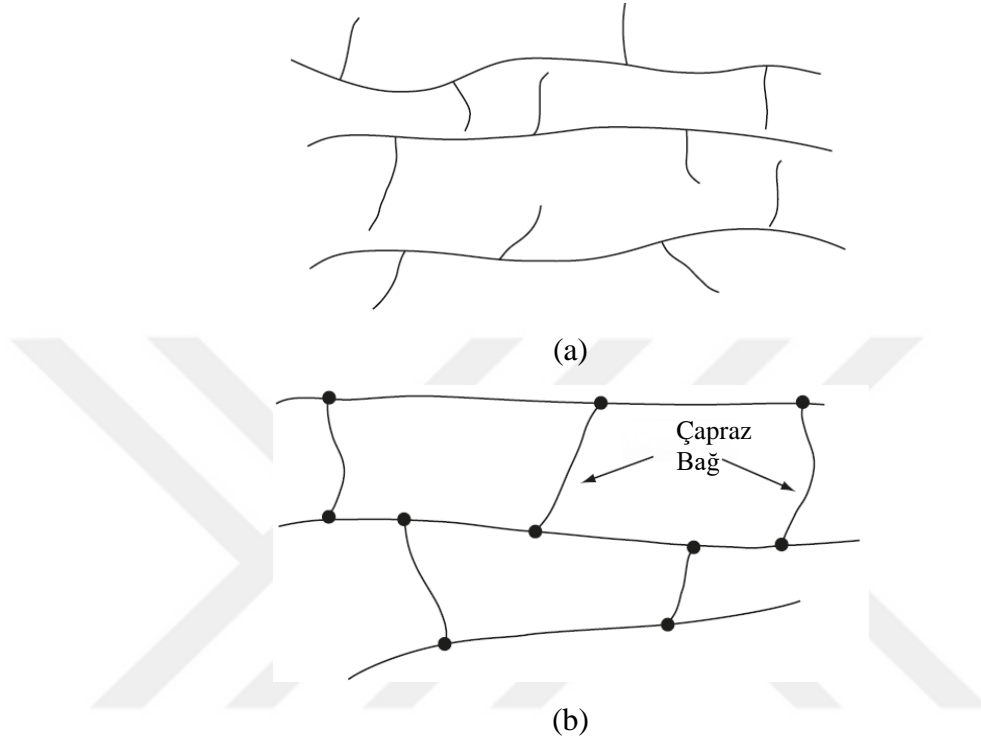


Şekil 2.3. Molekül düzeni a) Amorf polimer b) Yarı kristal polimer (Mallick, 2007)

### 2.1.2.1. Termosetler ve termoplastikler

Polimer malzemeler, termoset ve termoplastik olmak üzere iki ana başlık altında toplanmışlardır. Termoplastik bir malzemede moleküller tek tek özel olarak birleştirilmez. Termoplastik polimer Şekil 2.4. (a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Bunlar zayıf ikincil bağlar veya Van Der Waals bağları ve hidrojen bağları gibi moleküler arası kuvvetler tarafından bir arada tutulur. Katı bir termoplastik malzemede ısı ile

beraber bu ikinci bağlar geçici olarak kırılabilir ve moleküller birbirine göre hareket ettirilebilir. Soğutulduklarında ise, ikincil bağlar yeni bir oluşum içine girip restore edilerek yeni bir katı elde edilebilir. Sonuç olarak, termoplastik polimerler ısıyla yumuşatılabilir, eritilebilir ve arzu edildiği kadar yeniden şekillendirilebilirler.



Şekil 2.4. a) Termoplastik polimer b) Termoset polimer şematik gösterimi (Mallick, 2007)

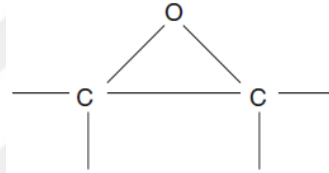
Termoset malzemelerde moleküller, üç boyutlu bir ağ yapısı ve rijitlik oluşturan çapraz bağlar vasıtasıyla kimyasal olarak birbirine bağlanırlar. Şekil 2.4. (b) termoset bir polimer malzemenin şematik gösterimini temsil etmektedir. Bu çapraz bağlar polimerizasyon (kürleme) sırasında oluşturulmakta ve ısı müdahalesiyle herhangi bir erime söz konusu olmamaktadır. Fakat sayı olarak çapraz bağ sayısı düşükse yüksek sıcaklıklarda termoset malzemeyi yumuşatmak mümkün olabilmektedir.

#### 2.1.2.1.1. Epoksi matris

Epoksi reçine sistemleri, yapıştırma işlemlerinde, kalıplama bileşenlerinde ve yapısal uygulamalarda kullanılan fiber takviyeli kompozit malzemeler için matris olarak kabul görmüştür. Bu kısımda daha çok fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerindeki kullanımı hakkında bahsedilecektir. Bu rolde diğer polimer tiplerine göre çeşitli avantajları mevcuttur. Epoksi polimer doğası gereği, çok çeşitli fiberlerle sağlam bir

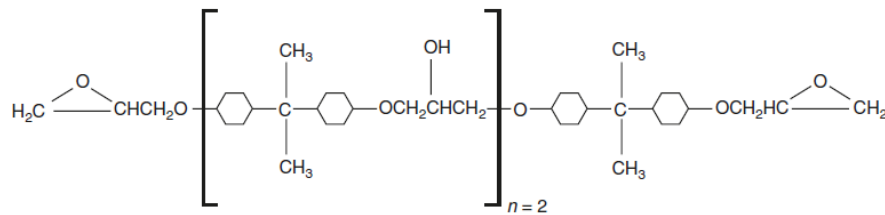
yapışma olması, kürleşme esnasında ki büzülmesi çok az olduğundan fabrikasyon yapılar için boyutsal doğruluğunun yüksek olması, kürleşmesi için kullanılan kimyasalların uçuculuğunun olmaması, çapraz bağlara sahip olmasından dolayı ağır çevre koşullarına karşı direncinin yüksek olması göze çarpan avantajları olarak görülmektedir (Peters, 2013). Bu avantajlara ek olarak, geniş bir yelpazedeki özel işleme ve performans gereksinimlerini karşıladığından epoksi reçinelerin muazzam bir çeşitliliği ve çok yönlülüğü vardır. Bu çok yönlülüğü daha net ifade edebilmek için epoksi reçinenin kimyasını ve yapı-özellik ilişkileri konusunda temel bilgilere sahip olmak gerekmektedir.

Kimyasal uygulamalara göre, moleküller içerdikleri radikal gruplar tarafından sınıflandırılabilirler. Bu nedenle, yapısının bir parçasında Şekil 2.5. 'te gösterilen epoksid grubunu içeren bir molekül, molekülün kalan detaylarına bakılmaksızın epoksi olarak adlandırılabilir (Peters, 2013).

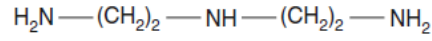


Şekil 2.5. Epoksid grup

Epoksi matrisin yaygın olarak kullanılan türlerinden birisi molekülün her bir ucunda bir tane olmak üzere iki epoksid grup içeren diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) dır (Şekil 2.6.(a)). Sıvı epoksi reçineyi katı hale dönüştürmeye yönelik polimerizasyon reaksiyonu, fiberlerin sıvı karışımına katılmasından hemen önce bir miktar reaktif sertleştirici madde eklenerek başlatılır. Bu tür sertleştirme maddesi dietilen triamin (DETA) dir (Şekil 2.6.(b)). Bir DETA molekülünün amin (NH<sub>2</sub>) gruplarındaki hidrojen atomları, Şekil 2.7.(a) 'da gösterilen şekilde DGEBA moleküllerinin epoksid grupları ile reaksiyona girer. Reaksiyon devam ederken, DGEBA molekülleri birbirleriyle çapraz bağlar oluştururlar (Şekil 2.7.(b)) ve üç boyutlu ağ yapısı yavaşça oluşur (Şekil2.7.(c)). Son olarak elde edilen malzeme katı bir epoksi polimerdir.

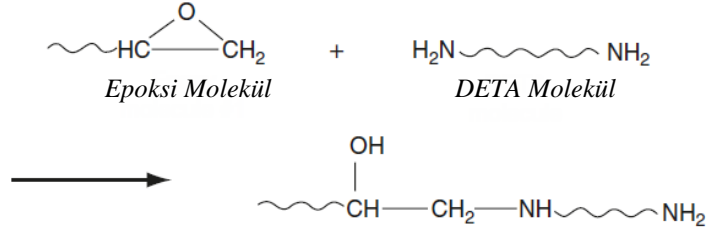


(a)

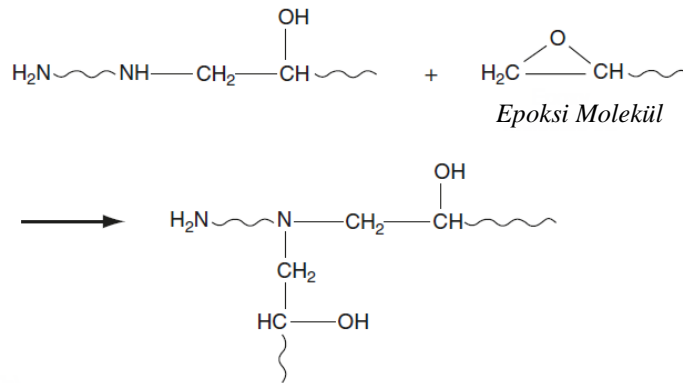


(b)

**Şekil 2.6.** Epoksi matrisin hazırlanmasında temel bileşenler a) Diglisidil eter bisfnol A molekülü (DGBA)  
b) Dietilen triamin (DETA)

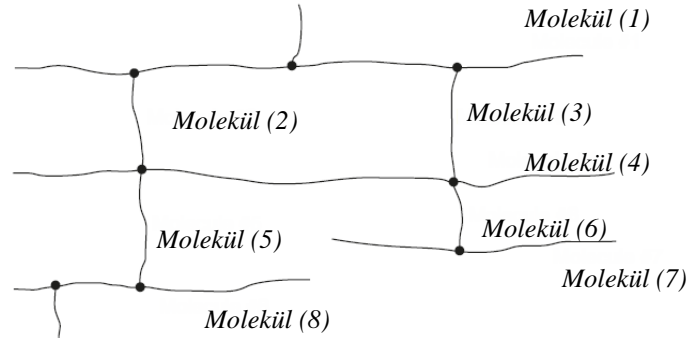


(a)



(b)

Sıvı Epoksi Reçine + Kürleştirici  $\xrightarrow{\text{Isı}}$



(c)

**Şekil 2.7.** Çapraz bağlı epoksi reçinenin şematik gösterimi a) Epoksid grubun DETA molekülü ile reaksiyonu b) Çapraz bağların oluşumu c) Katı epoksinin üç boyutlu ağ yapısı

Kürleme reaksiyonu, tüm moleküller çapraz bağlanmadan önce dışarıdan reaksiyon sıcaklığının düşürülmesi gibi müdahalelerle yavaşlatılırsa reçine A formundan, B formu dönüşecektir. Bu durumda, çapraz bağlar reaktif kütlelerin geniş aralıklı noktalarında oluşmuştur. B formundaki reçinenin sertliği, yapışkanlığı ve çözücü

reaktivitesi, B formuna dönüşme evresi sonundaki kürleşme gelişimine ve derecesine bağlıdır.

Kürlenme süresi ve polimerizasyon reaksiyonu sıcaklık, kütleme kimyasalının türüne ve miktarına bağlıdır. Bazı kütleme kimyasalları oda sıcaklığında başlayıp ilerlerken, yüksek sıcaklık isteyen türleri de bulunmaktadır. Ayrıca, yavaş ilerleyen reaksiyonu hızlandırmak ve katılma süresini kısaltmak için hızlandırıcı kimyasalı karışıma eklenebilir. Katılmış bir epoksi reçinenin özellikleri esas olarak çapraz bağlantı yoğunluğuna veya ardışık çapraz bağlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Genel olarak, çekme modülü, camsı geçiş sıcaklığı, termal ve kimyasal dayanıklılık çapraz bağ yoğunluğunun artması ile iyileşmektedir fakat kopma uzaması ve kırılma tokluğu zayıflamaktadır. Çapraz bağ yoğunluğunu kontrol eden başlıca faktörler sıvı reçinenin kimyasal yapısı (epoksi gruplarının sayısı ve epoksi gruplar arasındaki boşluk), kür kimyasalının işlevselliği (DETA 'daki aktif hidrojen atomlarının sayısı), sıcaklık ve zaman gibi reaksiyon koşullarıdır (Mallick, 2007).

Epoksi reçine sistemleri diğer termoset matrislere göre aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- 1- Farklı kür kimyasalları, farklı tip modifiyeler yapılarak epoksiye çeşitli özellikler kazandırılabilir.
- 2- Kürleşme sırasında tahliye edilecek uçucu bir madde yoktur.
- 3- Kürleşme sırasındaki büzülmesi düşüktür.
- 4- Kimyasallara ve çözücülere karşı mükemmel bir direnç sahibidir.
- 5- Çok çeşitli dolgu malzemelerine, fiberlere ve diğer başka yüzeylere çok iyi derecede yapışma özelliği vardır.

Başlıca dezavantajları ise nispeten yüksek maliyeti ve uzun kürleşme süresi olarak gösterilebilir. Epoksi reçinelerin tipik özellikleri Çizelge 2.4. 'te verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Epoksi reçinenin özellikleri

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.2 – 1.3
Çekme Mukavemeti (MPa)	55 – 130
Çekme Modülü (GPa)	2.75 – 4.10
Poisson Oranı	0.2 – 0.33
Termal Genleşme Katsayısı (10 <sup>-6</sup> m/m °C)	50 – 80
% Büzülme oranı	1 – 5

## 2.2. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Uygulama Alanları

Her malzeme benzersiz fiziksel, mekanik ve birbirinden farklı işleme özelliklerine sahiptir. Bu nedenle malzemeye nihai şeklini vermek için uygun bir üretim tekniği kullanmak gereklidir. Bir üretim yöntemi bir malzeme için uygun olmakla beraber başka bir malzeme için uygun bir üretim yöntemi olmayabilir. Örneğin bir ahşabın, metalin ya da seramik bir malzemenin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin birbirinden farklı olması, üretim yöntemlerin de farklı metotların kullanımını mümkün kılmaktadır. Buna benzer ifadeyi kompozit malzemelerin üretimi içinde kullanabiliriz. Kompozit malzeme üretiminde, fiberler, reçineler, keçeler, fiberler, prepregler (polimer ile ıslatılmış fiberler) ve kalıplama bileşenleri de dâhil olmak üzere çeşitli tipte kompozit bir parçayı oluşturacak hammaddeler kullanılır. Her üretim yöntemi, farklı malzeme sistemleri, farklı işleme koşulları ve parça üretimi için yukarıda saydığımız hammaddelerin kombinasyonlarını gerektirmektedir. Her üretim tekniğinin işleme, parça boyutu, parça şekli, maliyeti vb. bakımından kendine ait avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Kompozit malzeme parçasının başarılı üretimi, üretim yönteminin doğru seçimine ve aynı zamanda işleme parametrelerinin doğru seçilmesine bağlıdır (Mazumdar, 2001). Kompozit malzeme üretiminde basınçlı kalıplama, el yatırma, püskürtme, vakum infüzyon, vakum torbalama, reçine transferi ile kalıplama (RTM), vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM), otoklav, filaman sarım, santrifüj kalıplama, pultrüzyon, enjeksiyon kalıplama gibi teknikler çokça kullanılan üretim yöntemleridir. Bunlara ek olarak fiber hacim oranının kontrol altına almak adına yapılan tekniklerden biride yarı mamul halde, polimer emdirilmiş prepreg yöntemidir (Seydibeyoglu ve ark., 2017).

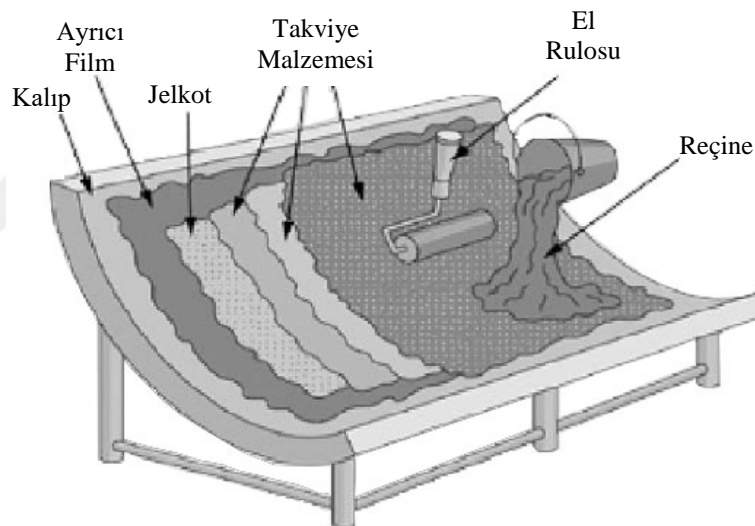
Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin ticari ve endüstriyel uygulamaları öyle değişkendir ki listelenmesi çok zordur. Kısaca uçak, uzay, otomotiv, spor malzemeleri, denizcilik ve altyapı gibi ana yapısal uygulama alanları genel olarak vurgulanabilir. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, elektroniklerde örneğin baskılı devre kartlarında, bina yapımında örneğin zemin kirişleri, mobilyalarda ( sandalye yayları), enerji endüstrisi (trafo muhafazası, rüzgârgülleri), petrol endüstrisinde (denizaltı petrol platformları), tıp endüstrisi (kemik plakaları, implantlar, protezler), oksijen depolamak tankları, basamaklı merdivenler, güç aktarma milleri gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanımı birçok mühendislik alanında bulunmaktadır. Bunları fiili kullanıma sokmak, dikkatli mekanik tasarım ve benzersiz



mekanik, fiziksel ve termal özelliklerinin anlaşılmasına dayanan uygun süreç araştırma ve geliştirme gerektirir (Mallick, 2007).

### 2.2.1. Elle yatırma yöntemi

Elle yatırma yöntemi, geniş bir endüstri yelpazesinde kullanılan en yaygın kompozit üretim tekniklerinden biridir. Estetik ve güzel görünüm katılması için polimer matris içerisine katılan jelkotlar ve çeşitli katkı malzemeleri de içerebilir. Oluşturulan ve modifiye edilen polimer matris takviye elemanı üzerine bir rulo yardımıyla emdirilir. Bu emdirilme esnasında rulonun takviye malzemesi üzerinde yuvarlanması aynı zamanda hava kabarcıklarının da tahliye olmasını sağlar. İşlem, bir sonraki takviye tabakasının üstüne yerleştirilmesi ve istenen kalınlığa ulaşılan kadar reçinenin takviye malzemesi üzerine benzer şekilde uygulanmasıyla sürdürülür. Yöntemin şematik gösterimi Şekil 2.8. da verilmiştir.

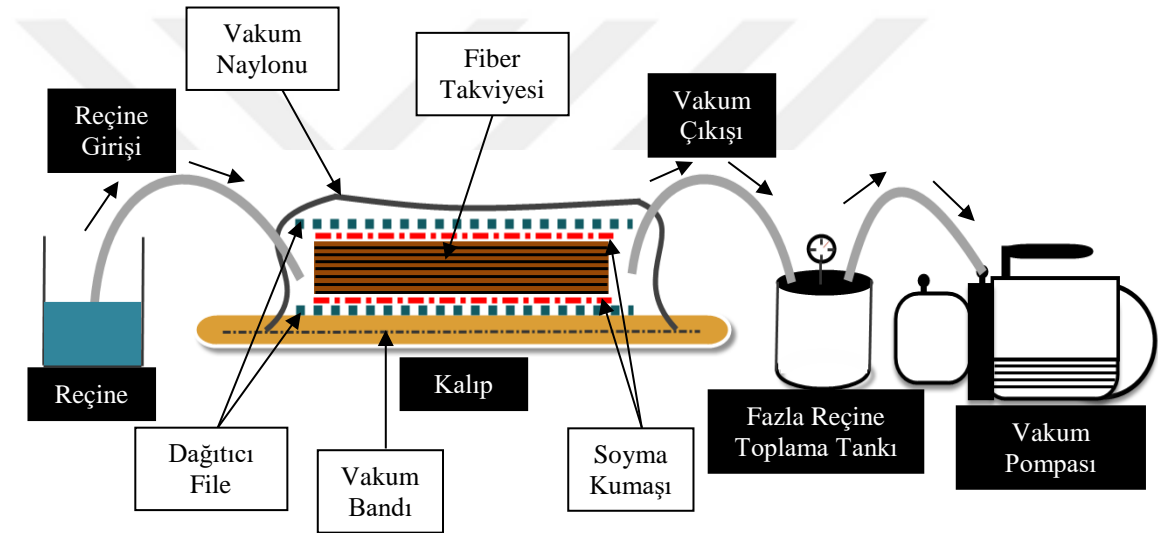


Şekil 2.8. Elle yatırma yöntemi şematik gösterimi (Seydibeyoglu ve ark., 2017)

### 2.2.2. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, 1980 'li yıllardan beridir başta ABD olmak üzere birçok ülkede kompozit malzeme üretim yöntemi olarak kullanılmaktadır. Vakumlanmış takviye elemanı ortamı içine reçinenin emdirilmesi prensibiyle ilerleyen bu yöntemde, el değmeden üretim meydana gelmektedir (Genç ve Arıcı, 2008; Durgun, 2014). Kompozit malzeme üretimindeki reçine transfer kalıplama (RTM) yönteminin türlerinden biri olan vakum destekli reçine infüzyon yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en önemli özellik reçinenin emdirilmesi veya fazla reçinenin takviye malzemesinden çekilmesi için ekstra

vakum ile desteklenmesidir. Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin farklı uygulama yolları mevcutken genel tanımıyla; reçinenin vakum yardımıyla kapalı bir ortamda takviye elemanları tarafından emilmesine müsaade edilip fazlasının tahliye edildiği bir metottur. Kuru ya da reçineli takviye elemanları kalıp içerisine yerleştirilerek alt ve üst taraflarına soyma kumaşı ve reçine dağıtıcı file yerleştirilir. Bu sistemin etrafı vakum bantlarıyla çevrelendikten sonra vakum naylonu ile kapalı bir ortam oluşturulur. Vakum ortamına alınan sisteme gönderilen reçine takviye elemanları tarafından emilmesi ve fazla reçinenin toplama tankı içerisine dökülmesine başlamasıyla yöntem son bulur ve kürleşmeye bırakılır. Şekil 2.9. 'da vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir.



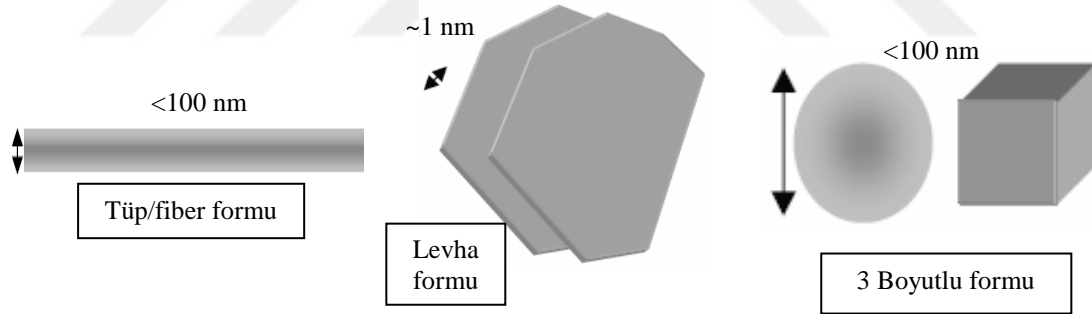
Şekil 2.9. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi

Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin; büyük boyutlu parçaların üretimi için elverişli olması, düşük kalıp maliyeti, reçine pompalama işleminin olmaması, üretim esnasında hava kabarcıklarını minimize etmesi, hurda oranının düşük olması, üretim sonunda fiber/hacim oranının yüksek olması, reçinenin fiber üzerine dağılımı ve emiliminin aynı olması gibi avantajlarının yanında yüksek iş gücü ve işlem basamaklarının karmaşık olmasına bağlı dezavantajları da vardır (Töre, 2011; Durgun, 2014).

### 2.3. Polimer Nanokompozit Malzemeler

Polimer kompozit malzemeler, yüksek performanslı kompozitler içeren uygulama alanlarına sahip olan önemli ticari malzemelerdir. Özel kullanım alanlarına sahip bu

yüksek performanslı kompozit malzemeler, mikro boyutta dolgu malzemeleri ile iyileştirilmeye çalışılmaktaydı. Ancak son yıllarda, geleneksel mikrometre ölçekli kompozit dolgu maddelerinin kompozit malzemenin özelliklerini optimize etme sınırlarına ulaşılmıştır. Çünkü elde edilen özellikler genellikle tavizler içermektedir. Yani istenilen bir özellik, başka bir özellikten ödün verilerek elde edilmektedir. Özellikle dolgu malzemelerinin hacimsel oranlarının fazla veya düşük olduğu bölge sebebiyle oluşan kusurlar ve çatlaklar, çoğu zaman malzemenin kırılmasına veya kopmasına sebep olmaktadır. Son zamanlarda, mikro metre ölçekli dolgu içeren polimer kompozitlerin sınırlamalarının üstesinden gelebilmek için nano ölçekli parçacık içeren polimer kompozitler anahtar bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Polimer nanokompozit malzeme, takviye elemanının nanometre aralığında (<100) boyutlarından en az birine sahip olduğu polimer matris kompozitlerdir. Şekil 2.10. 'da farklı boyutlardaki nano ölçekli parçacık tipleri şematik olarak verilmiştir. Bu kompozitler sadece üstün mekanik özellikler açısından değil aynı zamanda üstün termal, elektriksel, optik özellik, hacimsel oran ve diğer özellikler açısından da büyük umut vadetmektedir (Schadler, 2003; Mallick, 2007).

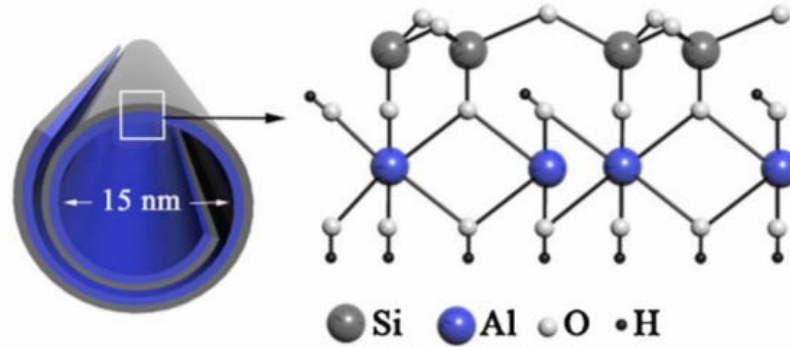


Şekil 2.10. Nano ölçekli parçacıkların genel şematik görünümü (Schadler, 2003)

### 2.3.1. Halloysit nanotüp (HNT) takviyeli nanokompozitler

Halloysit nanotüp (HNT) içi boş nanotübüler yapıya sahip bir tür doğal alüminosilikattır ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  1:1). Yüzeyi birkaç hidroksil grubuna sahip siloksan içermektedir. Bu yüzden, HNT 'ler kauçuklarda, diğer doğal silikatlardan (kaolinit, montmorillonit vb...) çok daha iyi bir dispersiyon gösterir ve hidrojen bağı oluşumu için potansiyel bir yetenektir (Tjong ve Mai, 2010). HNT 'ler çok duvarlı inorganik nanotüplerdir. İdeal bir HNT kristali, 1:1 stokiyometrik oranda oktahedral (sekiz yüzlü) olarak konumlanmış  $\text{Al}^{+3}$  ve tetrahedral (dört yüzlü) olarak konumlanmış

Si<sup>+4</sup> içeren Şekil 2.11.'de görülen katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır (Joussein ve ark., 2005). Çizelge 2.5.'te HNT 'lerin tubüler mikro yapı analiz verileri verilmiştir.



Şekil 2.11. HNT 'lerin kristal yapılarının şematik gösterimi (Yah ve ark., 2012)

Çizelge 2.5. HNT 'lerin analiz verileri (Liu ve ark., 2014)

Kimyasal Formülü	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$
Uzunluk	0.2-2 $\mu m$
Dış Çap	40-70 nm
İç Çap	10-40 nm
Boy/En Oranı (L/D)	10-50
Elastikiyet Modülü (Teorik)	140 GPa (230-340 GPa)
Sulu Çözeltide Ortalama Parçacık Büyüklüğü	143 nm
Sulu Çözeltide Parçacık Büyüklüğü Aralığı	50-400 nm
Yüzey Alanı	22.1-81.6 $m^2$ (Pasbakhsh ve ark., 2013)
Boşluk Hacmi	% 14-% 46.8
Yoğunluk	2.14-2.59 $g/cm^3$
Ortalama Gözenek Büyüklüğü	79.7-100.2 Å
Yapısal Su Tahliye Sıcaklığı	400-600 °C

Halloysit nanotüplerin (HNT) yüksek uzunluk oranı (Boy/en), matristen nanotüplere olan yük transferlerini optimize ederek kompozit malzemelerde polimerlerin kuvvetlenmesine yardımcı olmaktadır. HNT 'ler 140 GPa elastikiyet modülüne sahiptir ve bu değer teorikte 230-340 GPa olarak bulunmuştur (Guimaraes ve ark., 2010; Lu ve ark., 2011; Lecouvet ve ark., 2013). Ağırlıkça % 5 'lik sulu bir çözeltide ortalama HNT parçacık büyüklüğü 143 nm 'dir ve büyüklükleri 50 ila 400 nm arasında değişmektedir (Liu ve ark., 2007). Yüksek fiziksel özellik, küçük boyut ve yüksek dayanım HNT 'lerin yüksek performanslı polimer nanokompozitlerde potansiyel kullanımlara sahip olduğunu göstermektedir. Son zamanlarda da, polimerlerin termal ve mekanik özelliklerinin artırılmasında, yeni tür katkı maddeleri olarak Halloysit nanotüpler büyük ilgi görmüştür (Deng ve ark., 2009; Prashantha ve ark., 2011; Tang ve ark., 2011). Karbon nanotüplere (CNT) en/boy bakımından benzerliği, benzersiz kristal yapıları, CNT 'lere kıyasla düşük maliyetli olması, polimer matriste kolay bir şekilde dağılabilmeleri ve içerisinde rijit

malzemeleri bulundurması nedeniyle HNT 'ler polimer nanokompozitlerin hazırlanmasında ideal malzemeler olarak kabul edilir (Ye ve ark., 2007; Deng ve ark., 2009; Prashantha ve ark., 2011; Alamri ve Low, 2012a).

#### 2.4. Kompozit Malzemelerde Bağlantı Tasarımı

Bir bağlantının amacı bir yapıdaki yükleri bir elemandan diğerine aktarmaktır. Bağlantının tasarımı, fiber takviyeli kompozit malzemelerde iki nedenden ötürü özel bir öneme sahiptir; (1) bağlantılar bir kompozit yapının en zayıf bölgesidir ve (2) kompozit malzemeler gelen yüklere karşı metaller gibi davranmamasıdır (Mallick, 2007). Bağlantılar çoğu zaman, sistemin performansını belirleyen büyük bir kompozit parça ile kompozitin yetersiz mukavemete sahip olduğu ve yüksek yatak gerilmesi oluşturan metal bir parça arasında gerçekleşmektedir. Bağlantılar genel olarak kompozit yapıların tasarımında en büyük zorluklardan birisini temsil eder. Bağlantıların geometrik yapıda ve malzemeler üzerinde yoğunlaşan yükler karşısında düzensizlikler meydana getirmesi bunun sebebi olarak gösterilir. Bilhassa, mekanik bağlantılarda gerilme konsantrasyonları bağlantı noktasının etrafında yoğunlaştığı için tehlikeli durumlar oluşturabilmektedir. Metal malzemelerdeki bağlantı mukavemeti ya da bağlantıyı plastik deformasyona sokacak gerilme  $P/A$  yaklaşımıyla yani uygulanan toplam yükün temas alınana bölünmesiyle kontrol altına alınabilmektedir. Organik matrisli kompozitlerde bu gerilme kontrolü elastik gerilme analizleriyle yapılmaktadır (Peters, 2013).

Kompozit malzemelerin temel bağlantı türleri mekanik ve yapıştırma bağlantılarıdır. Mekanik bağlantılar, malzemelerin cıvatarla veya perçinlerle tutturulmasıyla oluşturulurken, yapıştırılmış bağlantılar, malzemeler arasında yapışkan bir ara katman vasıtasıyla birleştirilir. Bu iki bağlantı türünün de kendine ait avantajı ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Mallick, 2007).

Mekanik bağlantı;

1. Birleştirilmiş malzemeler hasarsız bir şekilde tamir edilip ya da değiştirilip tekrar tekrar sökölüp takılmaya izin verir
2. İşlem öncesi veya sonrası herhangi bir yüzey hazırlığı gerektirmez
3. Bağlantı kalitesi kolay bir şekilde kontrol edilebilir
4. Bağlantı için malzeme üzerine açılan delikler fiberlerin sürekliliğini ve kompozit tabakalarına zarar verip mukavemet düşüşüne sebep olmaktadır

5. Bağlantı ve çevresinde malzemeye ve bağlantı sistemine zarar verebilecek gerilme konsantrasyonları oluşur
6. Yapıda ayrıca ağırlık oluşturmaktadır
7. Bağlantı üzerindeki bağlantı elemanında korozyon sorunu oluşabilir.

Yapıştırıcı bağlantı;

1. Yapıştırma yüzeyine gelen yükü mekanik bağlantıdan daha fazla bir alana dağıtır
2. Delik gerektirmez fakat yüzey temizliği gerektirebilir
3. Yapıda az da olsa ağırlık oluşturur
4. Birbirine bağlanmış malzemeler hasar almadan demontaj hale getirmek zordur
5. Sıcaklık, nem ve diğer çevresel koşullardan etkilenebilir
6. Bağlantı kalitesini kontrol etmek zordur

#### **2.4.1. Kompozit malzemelerde mekanik bağlantılar**

Kompozit malzemeler için mekanik bağlantı sistemleri 1960 'lı yılların ortalarından bu yana yüksek modüllü ve yüksek dayanımlı kompozitlerin ilk kullanıldığı zamandan beri çalışılmaktadır. Bu dönemlerin başlarında, cıvata bağlantılı kompozitlerin davranışının metallerde meydana gelen bağlantılardan oldukça farklı olduğu, çünkü gerilme konsantrasyonlarının bağlantı davranışına etkisinin normalden çok fazla olduğunu ve bağlantı sistemlerinin gerilme analizlerinin çok önemli olduğu bulunmuştur. Günümüz koşullarında, meydana gelen gerilme koşullarının ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi için gereken bilgi ve teknoloji gücünün olması bu çalışma sahası için bir şans olarak görülmektedir (Peters, 2013). Kompozit malzemelerdeki mekanik bağlantıların tasarımına yönelik temel yaklaşımlar Amerika Savunma Departmanı (DOD), Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi (NASA) ve üniversitelerin havacılık ve diğer uygulamalara yöntem arayışı sağlamayı amaçlayan bölümlerde ortaya çıkmıştır.

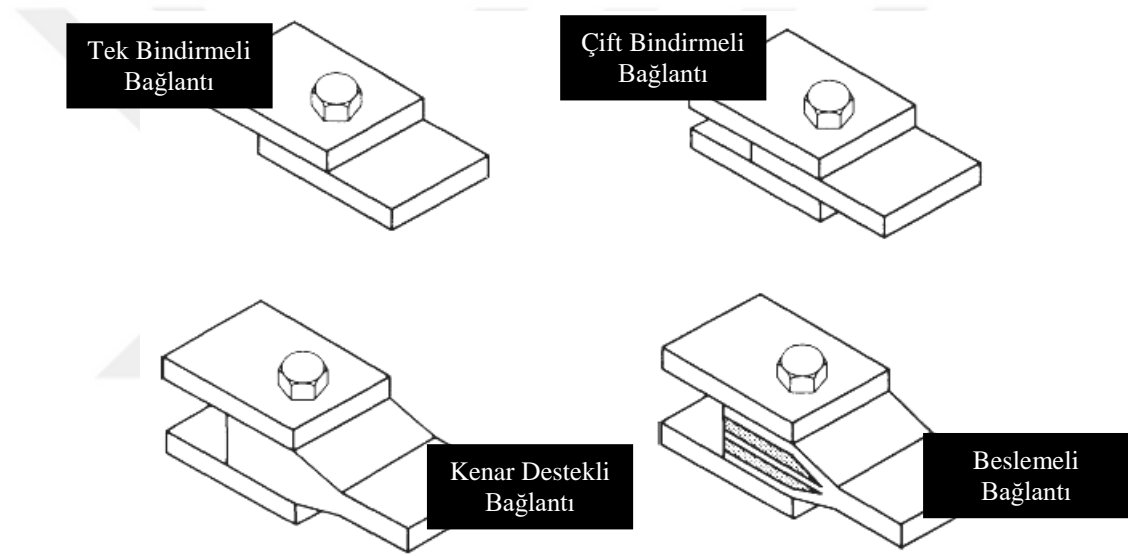
Kompozit malzemelerde yüksek sertlik ve yüksek mukavemet elde edildiğinden dolayı sıradan malzemeler gibi mekanik bağlantı sistemleri uygulanamaz. Mekanik bağlantıların mukavemeti aşağıdaki parametrelere bağlıdır.

- Geometrik parametreler; delik çapının kenar mesafelere uzaklığının delik çapına oranı ( $e/d$ ), levha genişliğinin delik çapına oranı ( $w/d$ ), levha

kalınlığının delik çapına oranı ( $h/d$ ). Çoklu cıvata bağlantılı sistemde delikler arasındaki mesafe ve cıvata düzeni önem arz etmektedir.

- Malzeme parametreleri; fiber tipi, fiber oryantasyonu ve tabaka dizilim sırası önemlidir.
- Mekanik bağlayıcı parametreleri; bağlayıcı tipi, delik çapı, rondela baskı kuvveti, ön yükleme.
- Tasarım parametreleri; uygulanan gerilme tipi (Çekme, basma, yorulma vb.) bağlantı modeli, çevresel etkenler (Mallick, 2007; Sen, 2007).

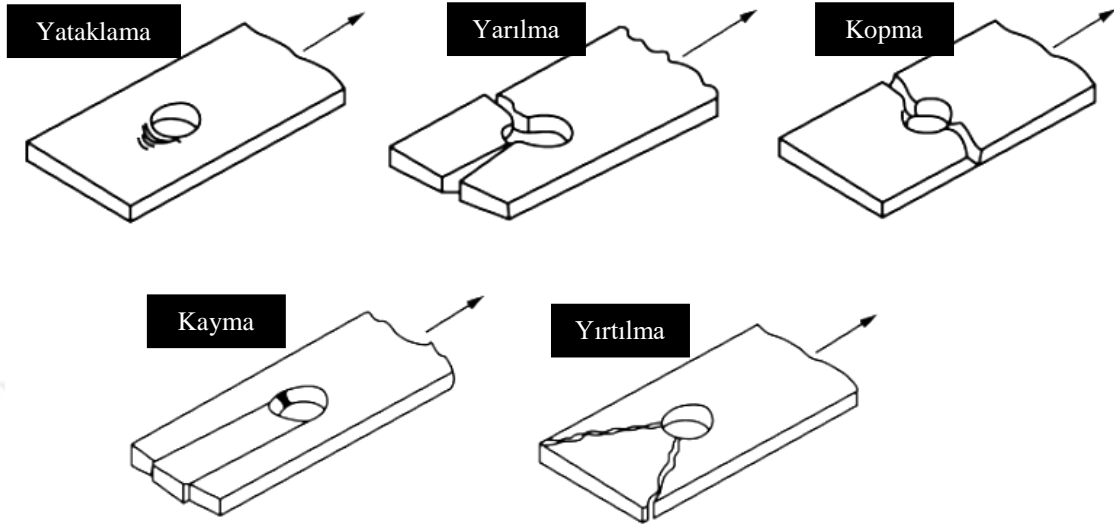
Tasarımda, kompozit malzemelerin cıvatalı birleştirilmelerinde genel olarak Şekil 2.12. 'de görüldüğü gibi bağlantı şekilleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.12. Kompozit malzemelerdeki mekanik bağlantı türleri

Mekanik bağlantıların kullanıldığı uygulamalarda kompozit malzemelerde kayma hasarı, kopma hasarı, yataklama hasarı, yarıлма hasarı ve yırtılma hasarı gibi hasar türleri meydana gelmektedir. Bu hasar türleri Şekil 2.13. 'te verilmiştir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde genellikle çelik bağlantı elemanları kullanıldığı için pek bağlantı hasarlarına rastlanmamıştır. Tabakalar  $0^\circ$  yönünde fiberler içermekteyse yarıлма hasarının oluşması mümkün gözükmemektedir. Bağlantının güvenli olması bakımından, bağlantıda bir hasar oluşacaksa yataklama hasarının meydana gelmesi tercih edilmektedir. Bununla beraber,  $e/d$  ve  $w/d$  oranları çok büyük olmadıkça, en iyi yatak mukavemeti nadiren elde edilir. Genelde,  $e/d > 3$  ve  $w/d > 6$  parametrelerinde kayma ve kopma hatalarının oluşması zordur. Fakat gerçek geometrik değerler genellikle ilgili

malzemelerde pim-cıvata-yatak testleri ile belirlenir. Ayrıca kayma hasarının oluşmasını önlemek içinse cıvata ve malzeme arasına pul koymak ya da artan tabaka kalınlığı ile delik kenar mesafesini azaltma önerilmektedir (Mallick, 2007).



Şekil 2.13. Mekanik bağlantılardaki hasar türleri (ASTM, 1996)

Kompozit malzemelerde bağlantı etrafında oluşan gerilme konsantrasyon bölgeleri azaltılarak, bağlantı mukavemeti kontrol edilebilmektedir. Cıvata yatak bölgelerine, düşük modüle sahip tampon şerit malzemeler yerleştirmek, uygun tabaka oryantasyonları, fiberlere minimum şekilde zarar verecek bağlantı elemanı seçimleri bu gerilme yoğunluklarını azaltmaktadır (Eisenmann ve Leonhardt, 1981).

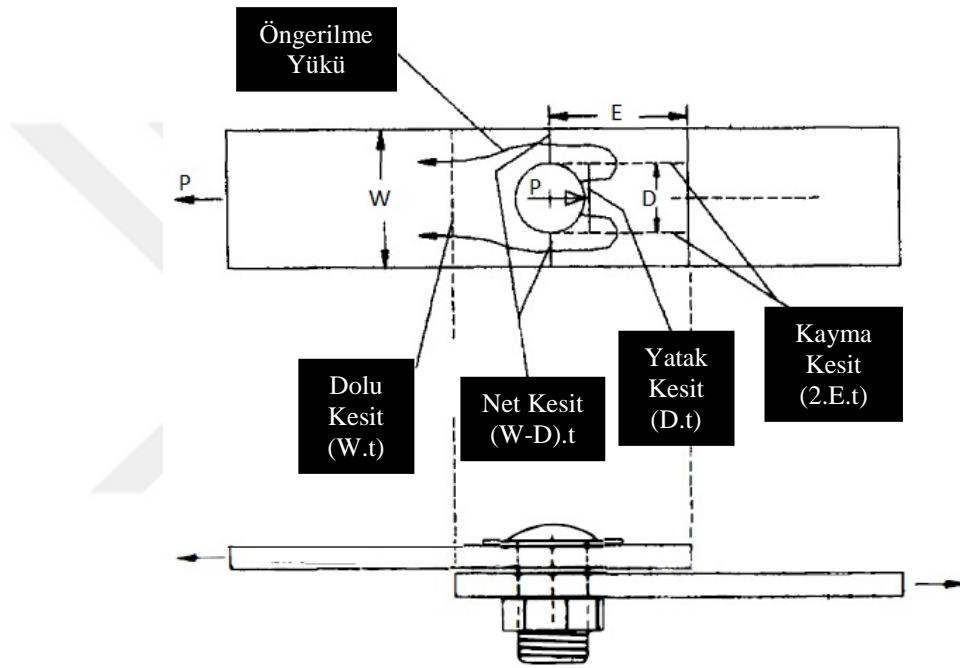
Mekanik bağlantılarda delik işlemleri, parçanın üretimi sırasında ya da üretim işleminden sonra bir işlenebilirlik prosesi olan delik delme ile elde edilir. Bu işlem için genelde delik delme işlemi tercih edilir çünkü üretim sırasında bırakılmak istenen delik etrafında istenmeyen düzensizlikler meydana gelme ihtimali çok yüksektir. Bununla birlikte yaygın olarak kullanılan delik delme işleminde, uygun kesme hızı, uygun kesici takım ve ilerleme oranı kullanılmadığında malzeme üzerinde özellikle çıkış yüzeylerinde ciddi hasarlar meydana getirmektedir. Delik delme esnasında, delik kalitesini direkt olarak etkileyen bu parametreleri dikkate alarak delik delme işlemi yapılmalıdır (Kaybal ve ark., 2018).

## 2.5. Cıvata Bağlı Kompozit Malzemelerin Tasarımında Dikkat Edilecek Hususlar

Cıvata bağlı kompozit yapıların bağlantı kalitesini etkileyen ve davranışını kontrol eden çeşitli kriterler söz konusudur. Bu kriterler oluşturulurken tek bağlantı ve birden



fazla bağlantı içeren kompozit malzemeler göz önüne bulundurulmuştur. Bağlantı tipinin davranışı, takviye elemanlarının yönüne, W/D oranına, E/D oranına, cıvata uygulanan ön gerilmeye, cıvata-delik arasındaki delik toleransına ve tek-kesme etkisi olarak belirtilmiştir. Bu kriterlerin dikkate alınması; yapıların mukavemet analizinde, gelen yüklere göre oluşan hasar tiplerinin tayininde bilgi sahibi olmamızı kolaylaştırmaktadır (Peters, 2013). Şekil 2.14. 'te tek bindirmeli bir cıvata bağlantısı verilmiştir. Burada D cıvata çapı, t kalınlık, E kenar mesafesi (delik merkezinden karşı kenara olan mesafe), W plaka genişliği olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.14. Tek bindirmeli cıvata bağlantısı (Peters, 2013)

Cıvata bağlı kompozit yapılardaki gerilme hesapları aşağıda verilmiştir.

Yatak Gerilmesi;

$$\sigma = P/Dt$$

Kayma Gerilmesi;

$$\tau = P/2Et$$

Net Kopma Gerilmesi;

$$\sigma = P/(W - D)t$$

Yukarıda verilen bu formüller aynı zamanda yataklama, kayma ve kopma hasarında meydana gelen gerilmelerin hesaplarında da kullanılmaktadır. Bu konuyla alakalı yaklaşımlar literatür çalışmaları kısmında detaylandırılmıştır.

## 2.6. Kompozit Malzemelerin Düşük Hızlı Darbe Davranışı

Kinetik ve/veya potansiyel enerjiye sahip iki cismin çarpışmasıyla meydana gelen temas ile beraber çarpışma yüzeyleri üzerinde gerilimler meydana gelmektedir. Bu temas eden yüzeyler üzerinde yoğunlaşan gerilmeler, yapı üzerinde deformasyonlar ve süreksizlikler meydana getirmektedir.

Hareketlinin başlangıçtaki kinetik enerjisi, dikkate alınması gereken önemli bir parametredir, ancak diğer birçok faktör de yapının davranışını etkiler. Kinetik enerjileri aynı olsa bile, düşük başlangıç hızına sahip büyük bir kütle yüksek hızda daha küçük bir kütle ile aynı miktarda hasara yol açmayabilir. Birisinde yapının gösterdiği davranış genel bir tepki oluştururken diğerinde, tepki etki noktasını çevreleyen küçük bir bölgede yoğunlaşmıştır. Bu sebeple, test koşullarının gerçek etki koşullarına benzer olması için uygun test prosedürünün seçimi çok dikkatli yapılmalıdır. Deneysel çalışmalar, kontrollü ve oluşturulabilen koşullar altında, yapı üzerinde meydana gelen gerçek durumları çoğaltmaya çalışır. Örneğin uçak iniş ve kalkış sırasında pistten uçan kirlilik ve döküntüler hasara sebep olabilmektedir. Bu durum deneysel ortamda, gaz tabancaları kullanılarak yüksek hızda fırlatılan küçük cisimlerle simüle edilir. Diğer bir endişe ise sıklıkla görülen; kompozit bir yapı üzerine yanlışlıkla iş takımı veya aletlerinin düşmesi, yani, düşük hızda daha büyük bir cisim tarafından meydana gelen etkidir. Bu durumda en iyi şekilde ağırlık düşürme test cihazı ile canlandırılmaktadır (Abrate, 2005).

Darbe testleri genellikle düşük hızlı darbe, yüksek hızda darbe bazen de hiper (çok yüksek) hızda darbe olarak sınıflandırılmaktadır ama araştırmacılar bu darbe çeşitlerinin geçişlerini net olarak ortaya koymamaktadırlar. Sjoblom ve Shivakumar, düşük hızlı darbeyi, numunenin sertliğine, malzeme özelliklerine, çarpma tertibatı kütesine ve sertliğine bağlı olarak 1-10 m/s hız aralığında meydana gelen testler olarak tanımlamaktadırlar (Shivakumar ve ark., 1985; Sjoblom ve ark., 1988). Yüksek hızlı darbe testinde, malzeme gelen tepkiye cevap vermeden yoğun hasar ile karşı karşıya kalmaktadır. Düşük hızlı darbe de ise temas süresi numunenin etkiye karşı cevap vermesi için yeterince uzundur ve elastik olarak daha fazla enerji emilimi sağlamaktadır (Agrawal ve ark., 2014). Charpy ve izod gibi ağırlık düşürmeli darbe testleri göz önüne alındığında genel olarak 10 m/s 'ye kadar düşük hızlı darbe olarak sınıflandırılırken (Cantwell ve Morton, 1991), bunun aksine, tabakalı kompozitler üzerindeki etkisinin incelendiği başka bir çalışmada 100 m/s 'den daha düşük darbe hızları için düşük hızlı etkilerin meydana geldiği belirtilmiştir (Abrate, 1991). Bazı araştırmacılar, darbe testine maruz kalmış

numune üzerindeki hasar yoğunluğuyla alakalı sınıflandırmalar yapmışlardır. Yüksek hızın sınırlarını malzeme üzerinde penetrasyon hasarının oluşmasına, düşük hızın sınırını ise delaminasyon ve matris çatlaması ile ilişkilendirmişlerdir (Joshi ve Sun, 1987; Liu ve Malvern, 1987).

Şimdiye kadarki yürütülen kapsamlı deneysel çalışmalar, darbe hasarlarının başlama ve ilerlemesini etkileyen parametrelerin anlaşılması adına önem arz etmektedir. Bu parametrelerin başında, malzeme özellikleri önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü kompozit yapının, temas rijitliğini ve dinamik yüke olan davranışını direk olarak etkilemektedir. Bu sebeple araştırmacılar, darbe hasarının başlamasını ve büyümesini kontrol eden matris ve fiber özellikleri, fiber/matris arayüzey bağlanmaları ile direk ilgilenmektedirler. Ayrıca tabaka kalınlığı, levha genişliği, sınır koşulları, vurucunun ağırlığı, şekli ve elastik özelliği de darbe dinamiğini etkileyen faktörlerdir. Bunun yanında kompozitin tabaka dizilimi, fiber dikiş açısı ve yönü, ön yükleme ve çevresel koşullar dikkat edilmesi gereken diğer önemli parametrelerdir (Agrawal ve ark., 2014).

### **2.6.1. Düşük hızlı darbede hasar başlangıcı**

Düşük hızlı darbe esnasında malzeme üzerinde çok karışık hasar dağılımları meydana gelmekte ve tüm olay sırasını yeniden oluşturmak oldukça güçtür. Düşük hızda yapılan bir darbede ilk olarak bir matris çatlağı oluşmasıyla başlamaktadır. Bazı durumlarda, malzeme esnektir ve malzemenin en alt tabakasında meydana gelen çekme ve eğilme gerilmeleriyle, tabaka düzlemine dik çatlaklar oluşmaktadır. Darbe sırasında oluşan bu çatlaklara çekme çatlağı adı verilmektedir. Kalın malzemelerde, tabakanın üst kısımlarında, vurucu ve malzeme arasında oluşan temas gerilmelerinden kaynaklı çatlaklar oluşmaktadır. Kayma çatlakları olarak adlandırılan bu çatlak tipi, orta düzlemlere göre eğimlidir. Bu matris hasar türleri, tabakalar arasındaki arayüzeylerde delaminasyonlara neden olur ve aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya bir hasar evrimi başlatır. Bu sebeple, hasarın başlangıcını tahmin etmek mümkün olsa da, nihai hasar durumunun ayrıntılı yorumuna gerçekçi bir şekilde ulaşamaz (Abrate, 2005; Agrawal ve ark., 2014).

Darbe hasarını öngörmek için iki farklı yaklaşım söz konusudur. İlk yaklaşım genel hasar büyüklüğünü tahmin etmeyi amaçlar. Darbe hasarında kritik bir bileşen olan delaminasyonların, vurucunun temas ettiği çevrede meydana getirdiği enine kayma gerilmeleriyle arttığı görülmüştür. Bu ilk yaklaşım, ortaya çıkan enine kayma kuvvetinin

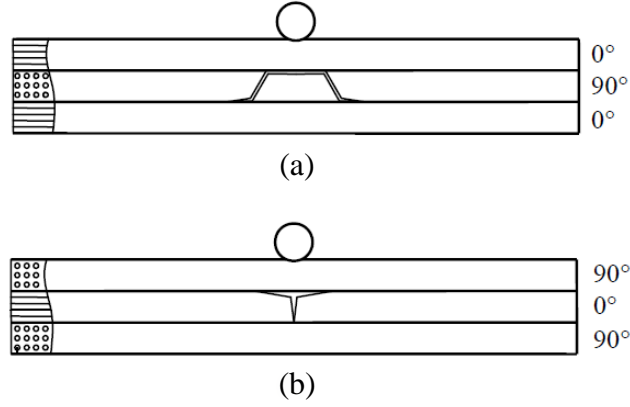
çarpma noktası etrafındaki dağılımını belirlemek ve hasar bölgesinin boyutunu tahmin etmek için uygun bir hasar kriteri kullanılması temeline dayanmaktadır. İkinci yaklaşım ise, hasar başlangıcına sebep olan temas kuvvetinin sınır değerini tahmin etmektir. Hasar alanı maksimum darbe kuvvetine karşı çizildiğinde, yük kritik bir  $P_{kritik}$  değerine ulaştığında hasar boyutunda ani bir artış olur. Bu kritik değer altında ise hasar bölgesi küçük ve başlangıçtaki durumuna karşılık gelir (Abrate, 2005; Agrawal ve ark., 2014).

### 2.6.2. Düşük hızlı darbenin hasar modları

Doğası gereği heterojen ve anizotropik bir yapıya sahip olan fiber takviyeli polimer tabakaların darbe deneylerinde birbirinden farklı hasar modları yer almaktadır. Meydana gelen hasar türleri çoğunlukla 1) çekme, basma ve kaymadan kaynaklı, fiberlere paralel olarak meydana gelen matris hasarı, 2) tabakalar arasındaki kayma gerilmelerinin bir sonucu olarak oluşan delaminasyon ve/veya ayrışmalar 3) fiber kopması ve burkulması ve 4) penetrasyon şeklinde oluşmaktadır. Hasar modları arasındaki karşılıklı etkileşim, hasar başlamasını ve ilerleyişini direk olarak etkilemektedir (Abrate, 2011).

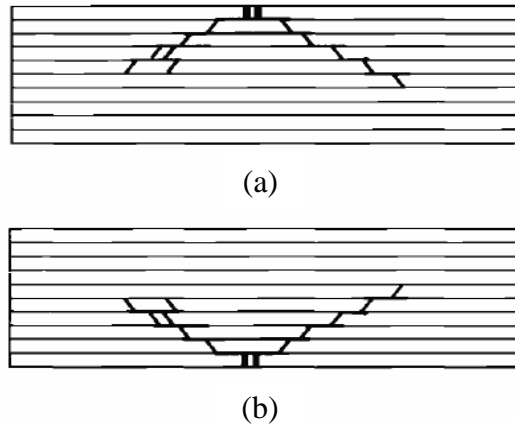
#### 2.6.2.1. Matris hasarı

Düşük hızlı darbe deneyi sonunda enine yönde ortaya çıkan hasar türü matris hasarlarıdır. Genelde matris kırılması, fiber/matris ayrılması ve delaminasyon başlangıcına sebebiyet vermeden hemen önce oluşmaya başlarlar. Düşük enerjilerde (1-5 J) zor tespit edilebilecek düzeyde hasarlar meydana gelir. Tek yönlü fiber takviyeli yapılarda matris çatlakları genellikle fiberlere paralel doğrultuda yönelir. Matris çatlakları üst tabakalarda, vurucunun malzemeye ilk temas ettiği noktalarda başlar. Malzeme içinde darbe esnasında ortaya çıkan yüksek seviyedeki transvers (enine) kayma gerilmeleri sonucunda kayma çatlakları oluşur. Eğilme sırasında oluşan çekme gerilmesi etkisinde kalan alanda ortaya çıkan çatlaklar eğilme çatlağı olarak adlandırılır ve bu çatlaklar tabakaya dik olarak yönelirler (Abrate, 2011). Matriste meydana gelen çatlak türleri Şekil 2.15. 'te verilmiştir.



Şekil 2.15. Matris çatlakları a) çekme çatlakları b) kayma çatlakları (Kara, 2012)

Matris çatlaklarının tipi darbe yapılan numunenin genel özelliklerine bağlıdır. Kısa ve kalın numuneler ise daha rijittir. Bu sebeple, yüksek miktardaki temas kuvvetleri numune yüzeyindeki tabakalarda transvers kayma çatlaklarına yol açar. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü gibi şekillenir (Şekil 2.16.(a)). Uzun ve ince numuneler için, transvers çökmeden kaynaklı alt katmanlardaki eğilme gerilemelerinden doğan çatlaklar çok fazladır. Hasar, ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir görüntü verir (Şekil 2.16.(b)) (Abrate, 2005; Kara, 2012).



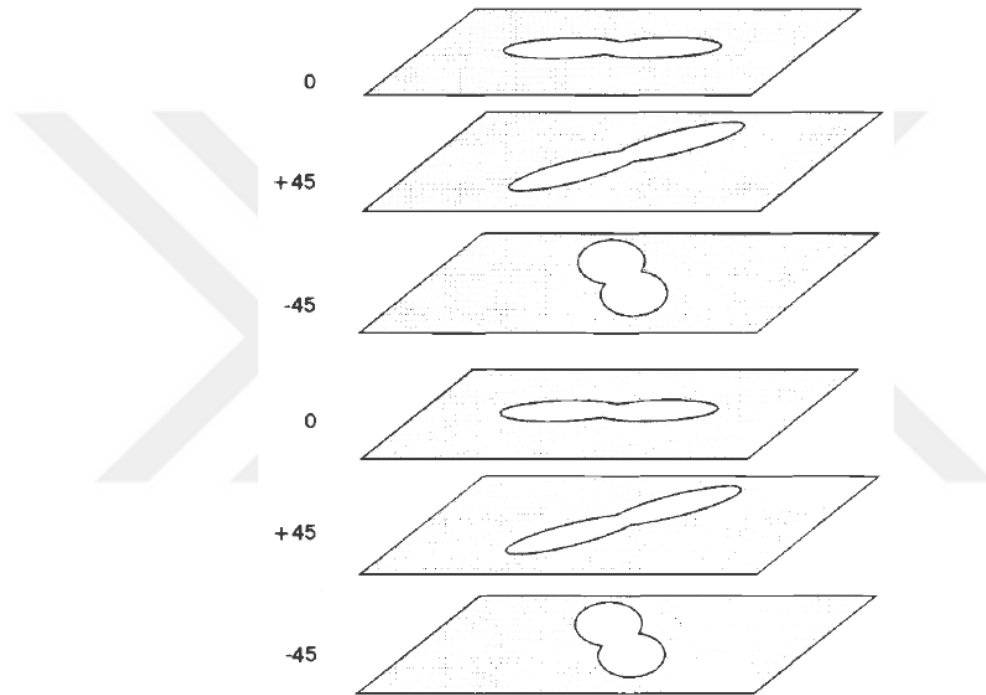
Şekil 2.16. Hasar örnekleri a) çam ağacı b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümü (Abrate, 2005)

### 2.6.2.2. Delaminasyon

Delaminasyonlar, tabakalar arasında reçine bakımından zengin bölgelerde meydana gelen ve ilerleyen bir tabaka ayrılması hasarıdır. Delaminasyon, komşu tabakalar arasındaki eğilme rijitliği farkının bir sonucudur. Örneğin tabakalar arasında birbirinden farklı fiber oryantasyonuna sahip komşu tabakalar böyle bir rijitlik farkı meydana getirebilirler (Liu, 1988; Jang, 1994). Numune üzerinde delaminasyon alanı

genelde elips halini alır ve ana eksenini, arayüzeyin altındaki tabakanın fiber oryantasyonu ile çakışır. 0/90 tabakalar için, tipik olarak fıstığa benzer şekilde bir hasar meydana gelir. Birbiri ile komşu olan tabakalar arasındaki uyumsuzluk ne kadar fazlaysa delaminasyon alanı da o kadar fazla olur. Malzemenin özelliği, tabakalanma sırası ve tabaka kalınlığı da delaminasyon hasarını etkiler (Liu ve Malvern, 1987; Abrate, 2011).

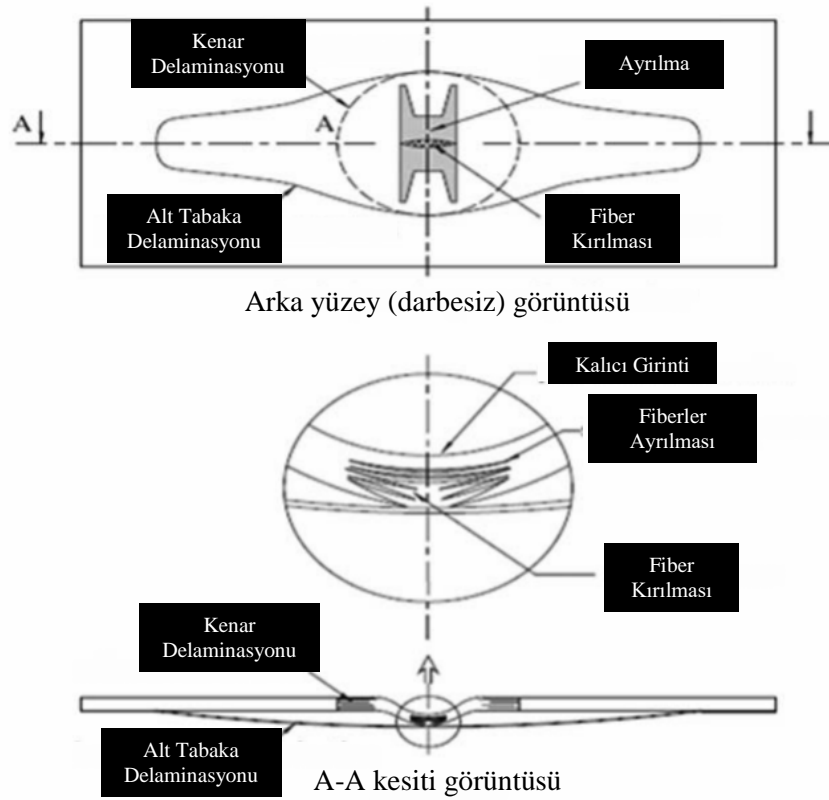
Darbeye maruz kalmış bir numunenin farklı fiber oryantasyon açılarındaki tabaka arayüzeylerinde ve alt tabaka arayüzeylerinde fiber açlarına göre meydana gelen yerfıstığına benzer delaminasyon hasar alanları Şekil 2.17. 'deki gibidir.



Şekil 2.17. Fiber oryantasyon açılarına göre delaminasyon hasar alanları (Abrate, 2005)

### 2.6.2.3. Fiber hasarı

Kırılma prosesinde, matris çatlama ve delaminasyondan sonra fiber hasarı meydana gelir. Fiber hasarı, vurucunun numune üzerinde girinti oluşturup, temas bölgesi etrafında meydana getirdiği yüksek lokal gerilmeler nedeniyle vurucu ucun hemen altında meydana gelir. Darbe yapılan yüzeyin tersi yüzeyde ise yüksek eğilme yüzeyleri nedeniyle fiber hasarı gözlenir. Fiber hasarları, katastrofik penetrasyon modunun bir ön aşamasıdır (Abrate, 2011). Fiber hasarı ile birlikte farklı hasar türlerinin verildiği şematik görüntü Şekil 2.18. de verilmiştir.



Şekil 2.18. Fiber hasar ve diğer hasar türleri (Aktaş ve ark., 2009)

#### 2.6.2.4. Penetrasyon

Penetrasyon, hasarın en büyük boyuttaki bir türüdür ve fiber hasarı kritik bir boyuta ulaştığında meydana gelir. Sonuç olarak, vurucu uç malzemeyi tümüyle penetre eder. Darbe enerjisi penetrasyon sınırı numune kalınlığı bağlı olarak artar. Tabakanın penetrasyonu sırasında gerçekleşen temel mekanizmalar; kayma, delaminasyon ve elastik eğilme sırasında enerji absorbe edilir. Bu mekanizmalar arasında kayma, tabaka kalınlığına bağlı olarak % 50-60 oranında bir etkiye sahiptir.

#### 2.7. Çevresel Koşulların Kompozit Malzemeye Etkisi

Yüksek sıcaklık, yüksek nem, aşındırıcı sıvılar ve ultraviyole (UV) ışınları gibi çevresel faktörlerin polimer matris kompozitlerin performansı üzerindeki etkisi birçok uygulamada önemlidir. Bu çevresel koşullar, aşağıda belirtilen nedenlerden biri veya birkaçı nedeniyle fiber takviyeli bir polimerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde bozulmalara neden olabilir.

Polimer matrisinin fiziksel ve kimyasal bozulmasına, artan sıcaklıktan dolayı modülde azalma, nem emilimi nedeniyle hacimsel genişleme ve kimyasal etki veya

ultraviyole ışınları nedeniyle polimer moleküllerinin ayrılması ya da değişmesi örnek olarak verilebilir. Bununla birlikte, farklı polimer gruplarının ve hatta aynı polimer grubu içindeki farklı moleküler konfigürasyonların aynı çevreye farklı tepki verebileceği de bilinmelidir.

Su veya diğer aşındırıcı sıvılar fiber-matris arayüzeyine difüze olarak buradaki yapışmayı ya da bağlanmaları zayıflatabilir. Bununla beraber ortaya çıkan gerilme korozyonları da fiberlerdeki dayanımı düşürmektedir. Birçok deneysel çalışma, uygun modifikasyonlarla en ağır çevresel koşullarında bile arayüzeydeki ayrılmaları ve bozulmaları önleme ya da yavaşlatılabileceği üzerinde durmuştur.

Kısa vadeli veya aralıklı bir sıcaklık artışı için fiberlerdeki mukavemet ve modülü gibi özelliklerin azalması önemsizdir. Bununla beraber, fiber türüne bağlı olarak diğer çevresel koşullar fiber özelliklerinde bozulmaya neden olabilir. Örneğin, nemi cam fiberlerin statik yorulmalarını hızlandırdığı bilinmektedir. Kevlar fiberler, ortamdaki nemi emerek çekme mukavemetini ve modülünü azaltır. Kevlar fiberlerin gerilme mukavemeti, ultraviyole ışınlarına doğrudan maruz kalma ile de azalır. (Mallick, 2007)

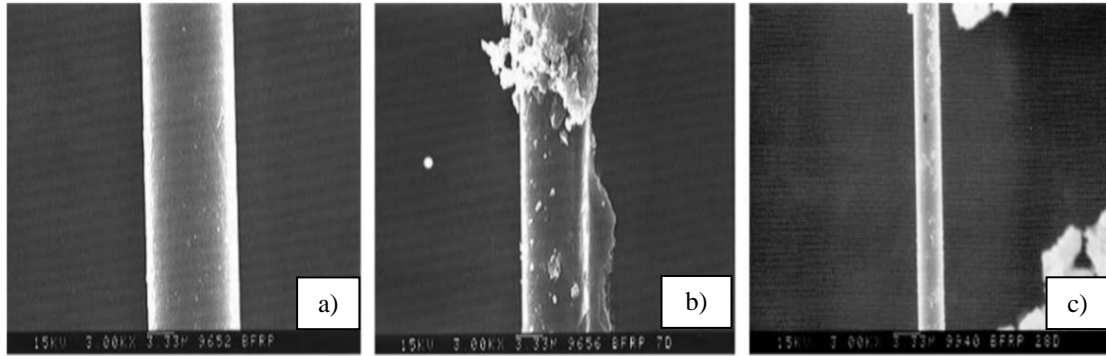
Farklı mekanik özelliklere sahip fiberlerle takviye edilmiş polimer matrisli kompozit malzemede bulunan fiber/matris ve tabakalar arasındaki arayüzeyler çevresel bozulmalara en hızlı maruz kalan bölgelerdendir. Bu sebeple, kompozit içindeki fazların (takviye, matris vb.) çevresel etki ve dayanıklılıkları üzerine düşünmek gereklidir. Bu etkileşimler hakkında genel bir kanıya sahip olmak için çevresel ortamın matris ve fiber fazları üzerindeki etkisi, bu fazların birbirinden ayrı düşünülmesiyle elde edilebilir (Harris, 2003).

### **2.7.1. Bazalt fiberin bozulması**

Bazalt fiberler, yüksek elastikiyet modülü, yüksek mukavemet, korozyon direnci, yüksek sıcaklık direnci ve uzun çalışma sıcaklık aralığına sahip olduğundan kullanımı oldukça cezbedicidir. Bazalt fiberlerin nem geri kazanımı ve nem içeriği % 1 'den azdır. Bu fiberlerin en temel avantajlarından biri, alkalın ortamlarında pH derecesi 13-14 'e kadar dirençli olmasıdır. Buna göre, güçlü asit ortamlarında nispeten daha az kararlılık gösterirler. Bazalt fiberler, NaOH çözeltisi ortamlarında özellikleri % 8 'e kadar kayıp yaşarken, bu oran hidroklorik (HCl) asit ortamında % 25 'e kadar ulaşmaktadır. Bu tarz ortamlarda ağırlık kaybı % 2,2 - % 5 arası değişmektedir. Şekil 2.19. 'da NaOH çözelti ortamında bazalt fiberin yaşlandırma süresine göre hasar kıyaslamasını göstermektedir.



Ayrıca bazalt fiberler, mantar ve mikro organizmaların etkisine karşı güçlü bir dirence de sahiptir (Singha, 2012).



Şekil 2.19. Bazalt fiberin NaOH çözeltisi içindeki SEM görüntüleri a) normal ortam b) 7.gün c) 28. gün (Singha, 2012)

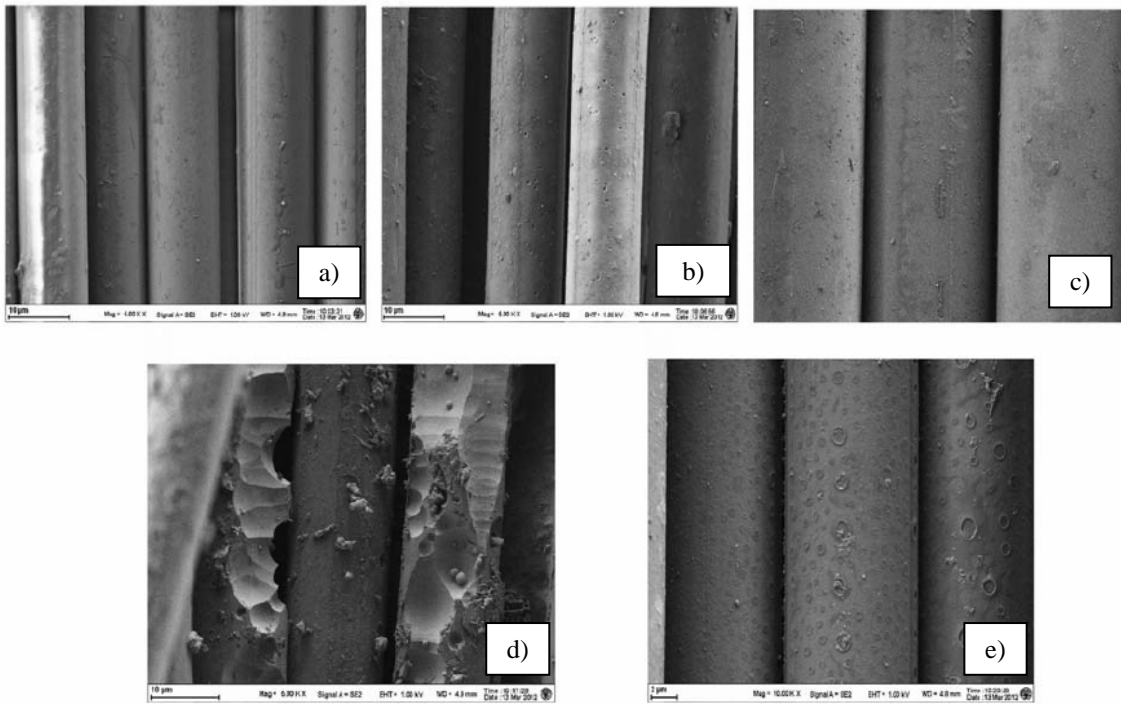
Bazalt fiberin tuz ve su çözeltilerinde dış yüzeylerinde belirgin bir değişiklik olmadığını ifade edilmektedir. Bununla birlikte alkali çözeltilerde bekletilen numunelerde, birkaç aylık daldırma işleminden sonra birkaç bazalt fiberin kırıldığı gözlenmiştir. İki aylık bir daldırma işleminden sonra kırılan fiberlerin arttığı görülmüştür. Bazalt fiberlerin yüzeyleri de orijinal renklerinden beyaz bir renge büründüğü ve fiberlerin sertleştiği fark edilmiştir. Asit çözeltisine maruz kalan bazalt fiberlerde kısmi fiber kırılmaları görülmüştür. Genel olarak alkalın ve asit çözeltilerine maruz kalan bazalt fiberlerin çekme mukavemetlerinin azalması, su ve tuz çözeltilerine maruz kalanlarınkinden daha şiddetli olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık asit çözeltilerine maruz kalan fiberlerin bozulmasını hızlandırırken alkalın çözeltisinde fiberler üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır. Asit çözeltisine maruz kalan bazalt liflerin kütle kaybı yaşlandırma günleri arttıkça büyük ölçüde azalırken, yaşlanma günlerinden bağımsız olarak su ve tuz çözeltilerine maruz kalan fiberlerin kütle kaybı tutarlıdır. Bazalt fiberin 55 °C deki su, tuz ve asit çözeltisindeki kütle kayıpları şartlandırmaya bağlı olarak Çizelge 2.6. 'da verilmiştir (Wu ve ark., 2015).

Su çözeltisine maruz kalan bazalt fiberlerde çok sayıda büyük ölçekli aşınma gözlenirken, tuz çözeltisine maruz kalanda yüzeylerinde daha az ve daha küçük aşınmalar görülmüştür. Su ve tuz çözeltilerinin dışında, alkali ve asit çözeltilerine maruz kalan bazalt fiberlerin yüzeyinde de önemli şekilde değişiklikler olmuştur. Özellikle alkalın çözeltisine maruz kalan fiberde geniş çukurlar nedeniyle ciddi hasarlar gözlenmiştir ve bu da bozulmadan kaynaklı kuvvet kayıplarıyla sonuçlanmıştır. Asit çözeltisine maruz kalan fiberler için, yüzey üzerinde dairesel çukur şeklinde yoğun korozyon olduğu fark

edilmiştir. Şekil 2.20. 'de, farklı ortamlarda bazalt fiberlerde meydana gelen korozyonların SEM görüntüleri verilmiştir (Wu ve ark., 2015).

**Çizelge 2.6.** Bazalt fiberin kütle kaybı (Wu ve ark., 2015)

Şartlandırma Çözeltisi (55 °C)	Su çözeltisi	Tuz çözeltisi	Asit çözeltisi
7 gün	0.711	0.217	1.304
% Kütle Kaybı	14 gün	0.268	2.587
	28 gün	0.396	6.146



**Şekil 2.20.** Farklı çözeltilerdeki bazalt fiberlerin korozyon SEM görüntüleri a) Orijinal fiber b) Su korozyonu c) Tuz korozyonu d) Alkalın korozyonu e) Asit korozyonu (Wu ve ark., 2015)

### 2.7.2. Epoksi polimerin bozulması

Epoksi polimer matrisler alkali, asit, tuz ve su çözeltilerine daldırıldıktan sonra, numunenin orijinal koyu renginden açık yeşil bir renge dönüştüğü görülmüştür. Bu gözlemler, aşındırıcı etkilerin reçinenin içine nüfuz edebileceğini göstermektedir. Bunun üzerine yapılan testlerde çekme mukavemeti, su ve asit çözeltilerine maruz kalmanın bir sonucu olarak azalırken, alkalın ve tuz çözeltilerine maruz numunede bu azalma daha minimize gerçekleşmiştir. Bu sonuç, su ve asit çözeltilerinin reçineye daha fazla nüfuz ettiğini ve bu da nüfuz edilen çözeltilerden çıkarılıp kurutulmasından sonra reçinede daha fazla iç etki oluşturduğunu göstermektedir. Bu durumlar açıkça hasarın gelişimini ve reçinedeki mukavemet azalmasını hızlandırmıştır (Wu ve ark., 2015).

George ve Thomas tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, bir polimerde nem taşıma işleminin derecesini etkileyen faktörler şunlardır (George ve Thomas, 2001);

- Polimerin doğası: Nem taşınımı polimerin doğası gereği baskın bir olaydır. George ve Thomas 'a göre polimer içerisindeki serbest hacim ve polimer zincirinin hareketliliği difüzyona doğrudan etki ederken, doyumluk seviyesi, çapraz bağlanma, kristallik derecesi nem girişini dolaylı olarak etkiler. Epoksi, polipropilen, polietilen, poliakrilamid, polistiren, polimidler gibi camsı polimerler sert ve kırılmandır. Camsı geçiş sıcaklığının altında, polimerde 1/40 serbest hacim olduğu ifade edilmiştir (Bueche, 1973). Saf polimerden daha fazla serbest hacim içeren bir sıvı ile karıştırılmış olan polimer, camsı geçiş sıcaklığı  $T_g$  'yi düşürecektir. Daha düşük  $T_g$  'li polimerler için, daha yüksek segmental hareketlilik nedeniyle yayılma kabiliyeti daha fazladır. Lastiksi polimerler büyük segmental hareketlilik ve moleküller arası yüksek miktarda serbest hacim bulundurmaktadırlar. Bunlar küçük moleküller için yumuşak ve kolay difüzyon sağlar. Daha büyük moleküler boyut, zincir hareketliliğini azaltır ve bu nedenle emilme oranını ve büyüklüğünü de azaltır. Buna ek olarak, çok kristalli malzemelerde tane sınırları boyunca hızlanmış difüzyondan dolayı, tek kristalli malzemeye göre difüzyon daha hızlıdır. Malzemede kristal fazın hacim oranı, kauçuk oranı artırılarak azaltılabilir ve bundan dolayı, malzemedeki genişleme (şişme) hızlanmaktadır (George ve Thomas, 2001).
- Çapraz bağlar: Çapraz bağlanmış, epoksi reçinelerinin homojen olmayan ağ yapısı nem difüzyon işleminin gerçekleşmesini zorlaştırır (Adamson, 1980). Bunun yanında zincir ağlarının esneyip bükülebilme kabiliyeti polimerin azami çözelti çekme potansiyelini iyileştirir ve artan çapraz bağ yoğunluğu emilim oranını azaltır (George ve Thomas, 2001).
- Plastikleşmenin etkisi: Polimer içerisine plastikleştiricilerin eklenmesi difüzyon katsayısını arttıran ve çözünürlük katsayısını azaltan segmental hareketlilik ve nüfuziyeti artırır (George ve Thomas, 2001).
- Çözücülerin boyutu ve şekli: Penetrant (nüfuz eden) boyutunun artırılmasının yayılmayı azalttığı bildirilmiştir (Prager ve ark., 1953; Fujita ve ark., 1960). Ayrıca, penetrantın zincir uzunluğunun artırılmasının denge penetrant alınımını da azalttığı bulunmuştur (Prager ve ark., 1953). Ek olarak, bazı araştırmacılar, düzleştirilmiş veya uzun moleküllerde, küresel moleküllere

veya eşit molekül hacmine kıyasla daha yüksek difüzyon katsayılarının elde edilebileceğini bulmuştur (Yi-Yan ve ark., 1980; Berens ve Hopfenberg, 1982).

- Takviyeler: Takviyeli bir sistemdeki nem taşınımı, takviye yapısının doğasına, bağlanma kabiliyetine ve polimerlerle uyumluluğuna bağlıdır. Karbon takviyeli kompozit malzemelerde ısı ve nem genleşme katsayısındaki farklılığa bağlı olarak, matris genişlemesi fiber tarafından sınırlandırılır ve dolayısıyla kompozitlerdeki genişlemesi anizotropiktir. İyi bir fiber/matris arayüzey yapışmalarında genişleme (şişme) etkisi önemli değildir (Das, 1973; Varghese ve ark., 1995). Fiber içeriğinin artması ve arayüzey yapışmalarını güçlendirici dolgular, difüzyondan kaynaklı genişlemeyi azaltmaktadır (Varghese ve ark., 1995). Genişlemeyi sınırlamak demek aynı zamanda da emilimi azaltmak demektir. Malzeme içerisinde kullanılan uygun olmayan dolgu malzemeleri, arayüzeyler üzerinde boşluk oluşturabilir ve bu da serbest hacmi arttıracığından geçirgenlik artabilir. Matrisle uyumlu olan dolgu malzemeleri de, polimer içerisinde serbest hacimleri doldurabilir ve nüfuz eden moleküller için kıvrımlı bir yol oluşturabilir (Crank, 1968). Bu kıvrımların seviyesi, takviyenin yönüne, şekline ve hacim oranına bağlıdır. Bir çalışmada karbon siyahı partiküllerin boyutu sebebiyle geçirgenliği azalttığı bildirilmiştir (Lawandy ve Helaly, 1986).
- Sıcaklık: Genel olarak artan sıcaklık çözünürlüğü azaltır, yayılma kabiliyetini ve nem içeriğini artırır (Pogany, 1976). Yapılan bir çalışmada yüksek sıcaklığın moleküler zincir gevşemesini arttırdığı, camsı geçiş sıcaklığını düşürdüğü ve moleküller bant kuvveti zayıflattığını ortaya koydu (Lv ve ark., 2008). Bu durumda, moleküller arası boşluk oluşumuna ve bu boşluklara daha fazla su girmesine sebep olmuştur. Bu şekilde, su emilimi ve nem oranı artmıştır ve numuneler agresif bir şekilde zarar görmüştür.

## 2.8. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bazalt fiberin askeri araştırmalar için sınıflandırılmış bir malzeme olarak 1923 'te Amerikan bilim adamları tarafından keşfedilmesinden bu yana, II. Dünya Savaşı sırasında ABD, Avrupa ve Sovyetler Birliği tarafından savunma ve havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmıştı (Ross, 2006; Pavlovski ve ark., 2007; Colombo ve ark., 2012).

Son yıllarda, artan mekanik özelliklerinden dolayı bazalt fiber kullanımına yönelik artan bir ilgi, polimer endüstrisinde de hareketliliği sürüklemiştir. Bu fiberler alt yapı ve inşaat uygulamaları için hafif, yüksek kaliteli hibrit kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır (Dehkordi ve ark., 2013). Bazalt fiberler çevreye karşı zararsızdır ve kanserojen maddelerden ve diğer sağlığı tehdit eden unsurlardan arındırılmıştır. Ayrıca, iyi termal özelliğe, yüksek mekanik ve kimyasal dayanıma sahiptir (Lee ve ark., 2010). Piyasada birçok organik ve inorganik fiber mevcuttur, fakat çoğu yapısal sağlamlık veya dayanıklılıktan yoksundur ya da istenen yük taşıma kapasitesine oldukça maliyetlidir. Bu sebeple bazalt fiber tercih edilen bir elyaf türüdür. Yüksek elastikiyet modülü ve mukavemetinin yanında gelişmiş kırılma şekil değişimi, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnciyle inorganik bir elyaftır ve işlenmesi kolay ve ucuzdur (Fiore ve ark., 2011; Lopresto ve ark., 2011; Wei ve ark., 2011a; Borhan, 2012; Wang ve ark., 2013; Larrinaga ve ark., 2014). Karbon fiber kompozitler üstün mekanik özelliklerinden dolayı otomotiv yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takviye malzemesi araç ağırlığını % 40-60 oranında azaltabilmektedir fakat tüm işlemin maliyeti şu anda ekonomik olarak uygun değildir. Bu nedenle, bazalt fiberlerin ümit verici doğası, düşük maliyeti ve etkin özellikleri karbon elyafların yerine kompozit malzemelere takviye malzemesi olarak aday olabilir. Bazalt fiberin, diğer fiberlere tercih edilebileceğine dair çalışmalar mevcuttur. Lopresto ve diğerleri, bazalt fiber takviyeli polimer kompozitlerin, cam fiber takviyeli polimer kompozitlere göre daha yüksek elastikiyet modülü, basma gerilmesi ve eğilme davranışına sahip olduğunu ve cam fiberlere göre daha iyi bir performans sergilediğini ifade etmişlerdir (Lopresto ve ark., 2011). Carmisciano ve ark., bazalt takviyeli kompozit malzemenin yüksek eğilme modülüne ve tabakalar arası yüksek kayma dayanımına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, elektriksel özellik olarak cam fiberlere benzer olduğunu ifade etmişlerdir (Carmisciano ve ark., 2011). Ayrıca, bazalt deniz, darbe veya balistik uygulamalar gibi diğer uygulamalarda da kullanılabilir. Fiore ve ark., denizcilik uygulamaları için cam fiber ve tek yönlü bazalt kumaştan meydana gelen hibrit kompozitlerin, bazalt tabakaların sayısının ve konumunun mekanik özelliklere olan etkisini değerlendirmek için üç noktada eğme ve çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. İki harici bazalt tabakanın bulunduğu hibrit kompozit malzemedeki, cam fiber takviyeli kompozitlere göre mekanik özelliklerinde en yüksek artış yaşandığını bulmuşlardır. Bu deneysel sonuca ek olarak sayısal bir model geliştirilip, sayısal ve deneysel sonuçlar gerçek bir gemi bileşeninde uygulandığında modelin doğruluğunu kanıtladığını bildirmişlerdir (Fiore ve ark., 2011). Dehkordi ve ark., bazalt ve içinde ağırlıkça farklı

oranlarda naylon fiber bulunan hibrit kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe deneyinde maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme, yutulan enerji, elastik enerji ve düşük hızda etkili hasarın tipini ve büyüklüğünü 16 J, 30 J ve 40 J enerji seviyelerinde incelemişlerdir. Sonuçlar, bu kompozit malzemelerin darbe davranışının naylon / bazalt fiber içeriğinden direk olarak etkilendiğini göstermiştir (Dehkordi ve ark., 2010). Sarasini ve ark., bazalt ve aramid fiberlerle takviye edilmiş hibrit kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışını incelemişlerdir. Farklı istifleme sırası göz önünde bulundurularak 5 J, 12.5 J ve 25 J enerji seviyelerinde yapılan deneylerde farklı konfigürasyona sahip hibrit tabakalarda daha iyi darbe enerjisi ve tüm aramid tabakalara göre iyileştirilmiş hasar toleranslarına sahip olduğu belirtilmiştir (Sarasini ve ark., 2013a).

Fiber takviyeli kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Yaklaşımlardan biri, kendine özgü termal, mekanik, kimyasal, elektriksel ve optik özellikleri optimize eden fiber takviyeleri çeşitleridir (Sgriccia ve Hawley, 2007). İkinci bir yaklaşım ise matris polimeri güçlendirmektir. Epoksi sitemlerinin doğasından gelen gevrekliğin üstesinden gelmek için modüle edilmesi veya temoplastiklerin kauçuk ile serleştirilmeye çalışılması bu yaklaşımın örneğidir. Park ve ark., ağırlıkça farklı oranlarda karboksil kauçuk ve hidroksil polyester ile sertleştirilmiş karbon fiber takviyeli kompozitlerin, camsı geçiş sıcaklıkları ve darbe enerjileri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Modüle edilen kompozit malzemelerin tokluk değerlerini ağırlıkça oranlarda optimize etmişler ve malzemelerin tokluklarını arttırmayı başarmışlardır (Park ve ark., 2007). Huang ve ark. ester modifiyeli epoksi reçinenin çeşitli oranlarda ve kürlenme koşullarında nem emilimini ve ısıl bozulma sıcaklığını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar ağırlıkça % 30 % 40 ve % 50 oranında ester içeren epoksida, 180 °C de post kürlenmedeki nem emilimi en düşük seviyede olurken, 200 °C de ki ısıl bozulma en yüksek olarak görülmüştür. Numunelerin hepsi 230 °C de post kürlendiğinde ise aynı ester oranına sahip numunelerin nem konsatrasyonu ve ısıl bozulmaları birbirine çok yakın değerler olmuştur. Bu bilgilerden yol alarak, kürlenme sonrası sıcaklığın termal özellikleri ve nem emilimini etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermişlerdir (Huang ve ark., 2008). Fiber takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi adına bir diğer yaklaşımda, yük taşınım ve transfer özelliklerini iyileştirmek için fiber/matris arayüzünü optimize etmektir. Bu yaklaşımda arayüzeyleri optimize çalışması nano ve mikro ölçekli takviyeleri birleştirmeyi amaçlamaktadır. Mathur ve ark., kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile büyütölen farklı karbon substratları içeren karbon nanotüpleri karbon fiber takviyesi ile birleştirmişlerdir.

Numunelerin eğilme dayanımı tek yönlü karbon nanotüpte % 20, iki yönlüde % 75, üç yönlüde % 66 oranında artış göstermiştir. Bu kompozitlerin eğilme modülleri de sırasıyla % 28, % 54 ve % 46 oranında arttığını gözlemişlerdir (Mathur ve ark., 2008). Bekyarova ve ark., karboksilik asit ile fonksiyonel hale getirdikleri tek cidarlı karbon nanotüpleri karbon fiber takviyeli kompozitler için incelemiştir. Ağırlıkça % 0.5 'lik bir karbon nanotüp yüklemesinde kayma mukavemetinde % 40 'lık bir artış sağlamışlardır (Bekyarova ve ark., 2007).

Nanopartikül ile modifiye edilmiş fiber takviyeli epoksi kompozitleri, malzemenin bulk halinde özelliklerini geliştirme fırsatı sağlamaktadır. Genelde cam ve karbon fiberler için yoğunlaşmış bu yaklaşım bazalt fiberler içinde kullanılmıştır. Chen ve ark., bazalt fiberlerle takviye edilmiş çok cidarlı karbon nanotüp modifiyeli epoksi prepreg kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Fonksiyonel haldeki karbon nanotüpler epoksilerde önemli miktarda mukavemet ve elastikiyet modülü artışı sağlamıştır. Çok cidarlı karbon nanotüpler bazalt fiber/epoksi laminaları için matris olarak kullanıldığında, karbon nanotüplerin güçlendirici etkisi sayısal tahminleri aşarak ciddi bir başarı sağlamıştır (Chen ve ark., 2009). Lee ve ark., karbon nanotüp (CNT) modifikasyonu ile bazalt fiber kompozitlerin gerilme ve termal özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Modifiye edilmemiş, asitle modifiye edilmiş ve silan ile modifiye edilmiş her biri ağırlıkça % 1 oranda CNT 'lerden oluşan kompozit numune grubunun mekanik ve termal özelliklerini belirlemek için gerilme testleri ve dinamik mekanik analiz (DMA) testleri yapılmıştır. Çekme dayanımı ve elastikiyet modülü katkısız malzemeye göre silan kaplı CNT/ bazalt kompozit malzemede sırasıyla % 34 ve % 60 artış belirlemiştir. Aynı zamanda silanize edilmiş kompozite camsı geçiş sıcaklığının asitli numuneye göre artış olduğunu gözlemişlerdir. Silanize edilmiş numunenin bu denli gelişim göstermesini CNT 'lerin polimer içerisindeki düzgün dağılımına ve güçlü arayüzey etkileşimine bağlamışlardır (Lee ve ark., 2010). Nano takviyesi olarak yapılan bir diğer çalışmada, bazalt fiberler üzerine kaplanan SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizleri ile karakterize edilmiştir. SiO<sub>2</sub> nanoparçacıkları bazalt fiberlerin katkısız epoksi kaplamaya göre gerilme kuvvetlerinde önemli bir artışa neden olduğu ve bazalt fiber takviyeli reçine matris kompozitin de umut verici bir arayüzey özelliği kazandırdığı ifade edilmiştir (Wei ve ark., 2011b). Bazalt fiberlerin sürtünme ve aşınma davranışlarını geliştirmek için grafit, nano SiO<sub>2</sub> ve her ikisinin de bulunduğu numuneler üretilmiştir. Elde edilen numunelerin tribolojik özellikleri incelendiğinde, tek başına grafit katkısının

bazalt fiber kompozitin tribolojik özelliklerini arttırmada nano SiO<sub>2</sub> 'den daha faydalı olduğu görülmüştür. Her iki katkı oranının aralarında iyi bir sinerji oluşturmasıyla sürtünme ve aşınma özellikleri daha da gelişmiştir. Farklı kayma koşulları altındaki tribolojik testler, hem grafit hem de nano SiO<sub>2</sub> katkılı bazalt fiber kompozit malzemenin yüksek kayma hızı ve yükü altındaki tribolojik uygulamalar için daha uygun olduğu görülmüştür (Wang ve ark., 2010). Kil takviyeli polipropilen nanokompozitler ve kırılmış bazalt fiber takviyeli polipropilen-kil katkılı nanokompozitler üzerinde yapılan bir çalışmada, dayanım özellikleri üzerine karşılaştırılmalı bir araştırma yapılmıştır. Polipropilen matris ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarda nanokil ile katkılanmış ve numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı, elastikiyet modülü ve toklukları çeşitli sıcaklık koşullarında araştırılmıştır. Nanokil katkısı polipropilen ve bazalt takviyeli polipropilen kompozitlerin akma dayanımını ve elastikiyet modüllerini artırırken çekme dayanımlarını azaltmıştır. Ayrıca, kil takviyeli polipropilen kompozitlere kırılmış bazalt fiber takviyesi ile elastikiyet modülünü arttırmıştır. Numunelerin elastikiyet modülleri ve akma dayanımları -196 °C de oldukça yüksekken, 25 °C de düşer, 120 °C de ise en fazla düşüş meydana gelir (Eslami-Farsani ve ark., 2014). Günümüzün yeni nano takviyesi grafen, CNT 'lere bir alternatif olarak ortaya çıkmakta ve çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Kang ve ark., 2016; Mittal ve ark., 2017; Zakaria ve ark., 2017). Nano grafen parçacıkların bazalt epoksi kompozitleri için mekanik özellikler üzerine etkisini araştıran Bulut, ağırlıkça % 0.1 , % 0.2 ve % 0.3 grafen içeren numuneleri birbirleriyle kıyaslamıştır. Ağırlıkça % 0.1 grafen içeren bazalt epoksi nanokompozitte fiber-grafen-epoksi arasındaki arafazlarda yüksek bağlanma kuvvetine bağlı, kompozitte mekanik özelliklerin önemli ölçüde arttığını gözlemiştir (Bulut, 2017). TiO<sub>2</sub> nano parçacıklarının bazalt kumaş takviyeli polisiloksan kompozit malzemelerin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki ağırlıkça yükleme etkisinin incelendiği bir çalışmada, çekme mukavemeti, yükleme yüzdelere kıyasla ağırlıkça % 1.5 nano TiO<sub>2</sub> katkılı kompozitte en yüksek değerine ulaşmıştır. Ayrıca dinamik mekanik analizlerinin de (DMA) gerçekleştirildiği çalışmada yine ağırlıkça % 1.5 katkılı numunede diğerlerine kıyasla en yüksek depolama modülüne sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında kompozit malzeme içindeki ağırlıkça katkı oranı arttığında camsı geçiş sıcaklığının ve ısıl bozulma sıcaklığının da buna bağlı olarak arttığı görülmüştür (Mishra ve ark., 2012).

Halloysit nanotüpler (HNT), çok cidarlı CNT 'lere morfolojik olarak benzeyen ucuz ve düşük teknoloji bir alternatif sunar. HNT 'ler tübüler nano yapısı, büyük boy oranı, doğal bulunabilirliği, zengin işlevsellik, iyi bio uyumluluk ve yüksek mekanik



özellikleri ile benzersiz yeni bir nano malzemedir. Bu özellikleriyle polimer nanokompozitler için düşük maliyetle elde edilen mekanik, termal ve biyolojik özellikler sunar (Du ve ark., 2010; Lvov ve Abdullayev, 2013). Bu nedenle HNT 'ler yüksek performans istenen nanokompozitlerde daha pahalı CNT 'lerin yerini alabilirler. HNT 'lerin epoksi matris içinde yüksek düzeyde dağıtılabilmesi HNT/epoksi nanokompozitlerin sertliği ve tokluk özelliklerini ciddi anlamda geliştirmektedir. Burada epoksi içerisinde iyi bir dağılımın elde edilmesi için düşük konsantrasyonlu sodyum hidroksit (NaOH) ile işleme tabi tutulması önerilmektedir. NaOH işlemi, HNT 'nin yüzeyinde hidroksil gruplarının oluşmasına sebep olmakta ve bu da epoksi polimer içerisinde yüksek seviyede bir dağılım oluşturmuştur (Zeng ve ark., 2014). Halloysit nanotüpler epoksi ve diğer kırılğan polimerler için malzeme özellikleri üzerine çok etkili mekanizmalara mevcuttur. Ağırlıkça farklı oranlarda HNT katkısıyla üretilen epoksi nanokompozit numunelerin termal ve mekanik özellikleri; termogravimetrik analiz, dinamik mekanik analiz (DMA), charpy darbe testi ve üç noktada eğme testi olarak gerçekleştirilen bir çalışmada, ağırlıkça % 2.3 HNT ile modifiye edilen epoksi nanokompozitte en iyi termal ve mekanik özelliklere kavuştuğu ifade edilmektedir. Hasar görüntüleri incelendiğinde, darbe testinde gelen enerjiyi emen nanotüplerin köprüleme, çekme ve kırılma mekanizmaları gözlenmiştir (Ye ve ark., 2007). HNT nano parçacıklarının karbon fiber epoksi içerisine difüze edildiğinde dinamik mekanik analizi neticesinde depolama modülü % 25 oranda artış olmuş ve camsı geçiş sıcaklığı da (Tg) artmıştır. Ayrıca izod darbe dayanımında da gelişme göstermiştir (Ye ve ark., 2011b). HNT 'lerin karbon fiber içerisinde ilave edilmesi, tabakaları arası kayma mukavemetini ve mod 1–mod 2 yüklemeleri altında kırılma direncinin de büyük ölçüde iyileştirdiği görülmüştür (Ye ve ark., 2011a). HNT nano parçacıkları aynı zamanda doğal fiberler içerisinde de katkı malzemesi kullanılmakta, malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmektedirler. Ağırlıkça % 5 HNT katkılı selüloz fiber takviyeli vinilester kompozit malzemedede, Halloysit nanotüp ilavesi su emiliminde olumlu bir azalma sağladığını ve iyileştirilmiş mukavemet özelliği sunan fiber matris arasındaki yapışmayı arttırdığı belirtilmiştir (Alhuthali ve Low, 2013a). HNT nano parçacıklarının selüloz fiber takviyeli epoksi kompozitlere ilave edildiği başka bir çalışmada, mekanik özelliklerin artışında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma da ağırlıkça % 1 HNT ilavesinde, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğunda artışa sebep olmuştur. Ağırlıkça katkı oranı % 5 e yükseltildiğine ise kompozit numunelerin darbe dayanımı % 27 oranında artmıştır (Alamri ve Low, 2012a). Ayrıca, bio bazlı nanokompozitlerin HNT ile

modifikasyonu, numunelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilememekte fakat alev alırlığı (yanıcılığı) azaltmıştır (Nakamura ve ark., 2013). Fiber takviyeli kompozit malzemelerin en büyük dezavantajlarından biri tasarım ve dış etkenlerden kaynaklı tabakalar arasındaki kırılmanın hızlı, yapışmanın zayıf olmasıdır. Özellikle, hibrit olan takviyelerin fiziksel ve mekanik olarak birbiriyle uyumsuz olması bu dezavantajı daha çok ön plana çıkarmaktadır. Aramid ve bazalt fiberlerle takviye edilmiş hibrit bir kompozitte tabakalar arası mukavemeti ve mekanik özelliklerini arttırmak için numune matrisine farklı oranlarda HNT nano parçacığı ilave edilmiştir. HNT katkısı ile eğilme mukavemeti ve tabakalar arası kayma mukavemeti testi sonucunda iyileştirici bir etki görülmüştür çünkü fiber ve matris arasında bir köprü vazifesi yaptığı düşünülmektedir. Bunun yanında belirli bir HNT katkısından sonra, numunede kırılma tokluğu, eğilme dayanımı ve tabakalar arası kayma mukavemetinde düşüş görülmüştür (Jin-Woo ve ark., 2017).

Kompozit malzemelerin kullanım yerlerine göre, bazı durumlarda kimyasal korozyona uğraması kaçınılmazdır. Örneğin denizcilik uygulamalarındaki konteynır, deniz taşıtları, borular, açık deniz platformları ve ekipmanları, alkali bir ortamda uzun süreli servis sonrası korozyona uğrayabilmektedir. Kompozit malzemelerin kritik ortamlarda hizmet verirken uzun vadeli kullanımında dayanıklılık ve performans verilerinin olması, kullanımı ve ömrü için önem arz etmektedir. Bu yüzden, malzemelerin yaşlandırılmış bir ortamda, uzun süreli uygulamalarda nasıl davrandığını bilmek gerekmektedir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde yaşlandırılmış ortamlardaki çalışmaların çoğu, fiberlerin çevrelendiği matrisler üzerinde odaklanmıştır. Daha doğrusu, fiberin hasar ve bozulma davranışı mekanizmaları tam olarak anlatılamadığı görülmüştür. Kompozit yapılarıdaki korozyon direnci direk olarak reçinenin direncine bağlı olduğu ve korozyondan kaynaklı meydana gelen çatlak oluşumu ve yayılması da reçinenin tokluğuyla alakalı olduğu ifade edilmektedir (Belarbi ve Bae, 2007; Mertiny ve Ursinus, 2007; Amiruddin ve ark., 2008). Cam fiber ve bazalt fiber takviyeleri, vinilester ve epoksi matrisli kompozitlerin alkali bir ortamda bekletilmesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde meydana gelen değişiklikleri ortaya koyan bir çalışmada, cam fiber takviyeli vinilester matrisli kompozit malzemede şartlandırmadan sonra en iyi fiziksel ve mekanik özelliklere bulunmuştur. Aynı zamanda da düşük bozulma oranına sahip olduğu gözlenmiştir. Bazalt fiber epoksi kompozitler de bu numuneden sonra en iyi özelliği sergilemiştir (Benmokrane ve ark., 2015). Sıcaklığın ve alkali çözeltinin etkisini bazalt, cam ve karbon fiberler üzerinde incelenen başka bir çalışmada, bazalt ve cam fiberin

alkali çözelti içinde hacim ve kuvvet kaybına uğradığı, karbon fiberlerde ise önemli bir kuvvet kaybı yaşanmadığı görülmüştür. Bununla beraber, bazalt fiberler 2 saat 600 °C ye maruz kaldıktan sonra dayanımlarının % 90 korumayı başarmışlardır (Sim ve Park, 2005). Bazalt fiberin ve epoksi reçineli kompozitlerinin 3 ay boyunca alkali çözelti bırakılması sonucu kimyasal dayanıklılığı ve mekanik özellikleri incelendiğinde bazalt fiber epoksi kompozit malzemenin elastiklik modülünün etkilenmediği ancak dayanımının % 40 oranında azaldığı görülmüştür (Mingchao ve ark., 2008). Nem reçine içinde, reçine ve fiberler arasında boşluk ve çatlak oluşturarak yayılabilir. Artan boşluk ve çatlaklar nedeniyle su ve çözelti moleküllerinin difüzyon hızı artar ve bağlanma yüzeylerinin bozulmasına sebebiyet verir. Nem, okyanus ortamlarında genelde bulunan klorür iyonları içeriyorsa, bu etki daha baskın bir hal almaktadır (Cosenza ve ark., 2002; De Lorenzis ve ark., 2002; Chen ve ark., 2007; El Refai ve ark., 2014). Saf su, sodyum hidroksit, hidroklorik asit içerisinde kaynatılmış bazalt fiber dayanıklılığını ölçmek için yapılan başka bir çalışmada, kütle kaybı ve mekanik dayanım değişimi incelendiğinde bazaltın alkali dayanımının asit direncinden daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Kompozitlerin 15, 30 ve 90 gün boyunca eğilme özellikleri ve yüzey morfolojileri incelendiğinde asit ve alkali ortamlarda büyük değişimler meydana gelmiştir. Asit ortamlarında eğilme dayanımı ve eğilme modülü paralel olarak düşerken, alkali ortamlarda eğilme modülü orijinal değere yakın kalırken eğilme dayanımı kademeli olarak azalır. Ayrıca çalışmada, cam fiber epoksi kompozit ile kıyaslandığında bazalt fiber epoksi kompozitte bazalt ve epoksi arasında oluşan arayüz bağlanmasının daha iyi olduğu görülmüştür (Mingchao ve ark., 2008). Bazalt fiberin deniz taşımacılığında kullanımının önü açıldıktan sonra çevresel dayanıklılık bilgisi de iyice önem kazanmıştır. Liu ve ark., bu konu üzerinde yaptığı araştırma, bazalt ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin tuzlu suda daldırma, nem emme, sıcaklık ve nem çevrim toleranslarını açıklamaktadır. 240 gün boyunca tuzlu suda ve suda yaşlandırılmış bazalt fiberlerin Young modülünde ve çekme dayanımlarında önemli ölçüde azalma olmuştur. 199 donma/çözülme döngüsüne kadar bazalt fiberde kayma gerilmesi değişmezken, 40 °C de tuzlu su ve su yaşlandırmasında kayma dayanımının düştüğü görülmüştür. Yaşlandırma sonuçları, bazalt kompozitler içindeki arayüzey bölgelerinin cam kompozitlere göre hasara karşı daha savunmasız olabileceği ifade edilmiştir (Liu ve ark., 2006b). Bazalt ve cam fiberler sırasıyla sodyum hidroksit ve hidroklorik asit ile farklı sürelerle muamele edildiğinde bazalt lifleri için asit direnci alkali direncinden çok daha iyi bulunmuştur. Cam fiberler da ise alkali direnci ve asit direnci hemen hemen benzer sonucu verdiği

görülmüştür. Numunelerin çekme dayanımı yaşlandırma süresi arttıkça azalmıştır. Ayrıca asidik çevre koşullarında bazaltın dayanımı camdan daha iyi olduğu belirlenmiştir (Wei ve ark., 2010b). Nem emiliminin bazalt ve cam fiberlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada da, 100 gün süreyle 80 °C de daldırılan numunelerde bazalt fiberin mekanik özelliklerinin bozulması cam fibere göre daha az gerçekleşmiştir (Kim ve ark., 2011). Birim hacim başına geniş yüzey alanlarına sahip nano parçacıklar polimer matris ile uyumuyla, yüksek fiziksel ve kimyasal özellik katmasının yanında yaşlandırma ortamlarının etkisine karşı direnç sağlamamaktadır. Su emiliminin farklı nano takviyeli (Nanokil, halloysit nanotüp, nano silisyum karbür) epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, nano takviyesi ile su emiliminin ve difüzyonun azaldığı tespit edilmiştir. Su emilimine bağlı olarak eğilme dayanımının ve eğilme modülünün azaldığı görülmüştür. Şaşırtıcı bir şekilde suya maruz kalan nanokompozit numunelerde darbe dayanımı arttığı belirlenmiştir (Alamri ve Low, 2012b). Kil takviyeli epoksi nanokompozit olarak hazırlanan başka bir çalışmada, 80 °C de epoksinin çapraz bağlanma yoğunluğundaki azalmaya bağlı olarak saf epoksi matrisli olandan daha fazla su emmiştir. Su ve sıcaklıktan kaynaklı mekanik özelliklerdeki düşüşün yanı sıra suyun matris ve kompozitlerin arayüzeyi üzerinde zararlı bir etkisi ve bu yüzeyler üzerinde de mikro boyut çatlaklar görülmüştür (Manfredi ve ark., 2008). Prolongo ve ark. çalışılmışın dışında karbon nanotüp (CNT) takviyeli numunelerin su emme davranışlarını incelemiştir. Su emilimi gravimetrik olarak izlenerek, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırıldığında, emilen su içeriği epoksi / CNT kompozitlerde önemli ölçülerde azaldığını bulmuşlardır (Prolongo ve ark., 2012). Bazalt fiber, keten fiber ve hibrit bazalt/keten fiber takviyeli vinilester matrisli kompozit numune grubunun yatlarda kullanımına bağlı olarak tuzlu su içerisindeki etkilerini gözlemlemek adına yapılan çalışmada Zivkovic ve ark., tek başına keten fiberin en fazla, bazaltın ise en az su emiliminin ifade etmişlerdir. Darbe dayanımları incelendiğinde ise hibrit numune de belirgin bir şekilde gelişme olduğu kaydedilmiştir (Živković ve ark., 2017).

Günümüzde fiber takviyeli kompozit malzemelerin birçok alanda kullanılmaya başlanmasıyla beraber montaj işlemlerinin önemi de gün yüzüne çıkmıştır. Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırma, mekanik bağlantı ve yapıştırma/mekanik hibrit bağlantıları sıkça kullanılmasının yanında civatalı ve hibrit bağlantının kullanımı daha fazladır. Mekanik bağlantılar, yapıya zarar vermeden sökülme avantajının yanında yüzey hazırlığı ve sıcaklık veya neme karşı hassas değildir (Thoppul ve ark., 2009). Kompozit yapılardaki yapısal bütünlüğü ve güvenirliliği sağlamak için uygun veya

optimum geometrik parametrelerin ve malzemelerin seçimi esastır. Kompozit yapıdaki herhangi bir bağlantı uygun şekilde tasarlanmamış ise hasar başlangıcına sebep olabilmekte ve yapı bütünlüğünü bozabilmektedir. Camanho ve Lambertin kompozit malzemelerin mekanik bağlantıları üzerine yaptığı çalışmalarında hasar başlangıcını ve hasar modunun tahmini için yeni bir metot ileri sürmüşlerdir. Her bir tabakadaki gerilme dağılımlarını nümerik metotlarla açıklamaya çalışmışlardır. Hasar kriteri üzerinde tabaka dayanımlarını ve gerilme dağılımlarını kullanarak mekanik bağlantıların elastik limitini tahmin etmişlerdir. Pim ve cıvata bağlı numunelerin deneysel verileri ile karşılaştırıldığında hasar yükleri ve hasar modlarının doğru ve etkili bir biçimde nümerik olarak tahmin edilebildiğini göstermişlerdir (Camanho ve Lambert, 2006). Bağlantı geometrisinin, tek delikte pim bağlantılı cam fiber epoksi dokuma kompozitler üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, numune genişliği delik çapına oranı (W/D) ve kenar mesafesinin delik çapına oranı (E/D) değerlendirilmiştir. W ve E oranlarının artırılmasıyla numunelerdeki yük taşıma kapasitesi artarken, E/D oranının 2 'nin ve W/D oranının 3 'ün üzerinde olması bağlantının yük taşıma kapasitesi üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır (Okutan ve ark., 2001). Tek cıvata bağlantılı cam epoksi tabakaların mekanik bağlantı yatak mukavemetlerinin hasar analizinin konu olduğu çalışmada, E/D oranı 1 ila 5, W/D oranı 2 ila 5 olarak seçilmiştir. Dört farklı tabaka oryantasyonunun yanında cıvatalara 0, 2.5 ve 5 Nm ön yükleme momenti uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, kompozit tabakaların yatak mukavemetleri ön yükleme momentinin, E/D ve W/D oranının artmasıyla arttığını göstermiştir. Ayrıca çalışmada  $[0/90]_s$  tabaka dizilimi diğer dizilimlere göre daha performanslı görülmüştür (Sayman ve ark., 2007). Sıkma torkunun ve rondela çapının cıvata bağlı cam fiber takviyeli kompozit üzerine araştırıldığı çalışmada, 0, 5, 10, 15 Nm sıkma torku, 14, 18, 22, 27 mm rondela dış çapı kullanılarak numuneler farklı fiber açılarıyla beraber teste tabi tutulmuştur. Aynı sıkıştırma torkunun altında, kuvvet-yer değiştirme diyagramlarının eğimi rondela çapının azalmasıyla artmıştır. 18 mm rondela çapı ve 15 Nm sıkıştırma torkunda cıvata bağlantısı maksimum yük taşıma kapasitesine erişmiştir. Ayrıca,  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  tabakalarda delaminasyon, sadece  $90^\circ$  tabakada kopma hasarı, sadece  $0^\circ$  tabakalarda kayma hasarı ve sadece  $\pm 45^\circ$  tabakalarda yatak hasarından kaynaklı katastrofik hasar tipleri görülmüştür (Khashaba ve ark., 2006). Aktaş ve Dirikolu,  $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]$  ve  $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]$  tabaka dizilimli pim bağlantılı karbon epoksi kompozit tabakaların güvenli ve maksimum yatak mukavemetlerini belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Farklı E/D ve W/D oranlarının kullanıldığı çalışmada,  $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$  oryantasyona sahip numune

$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$  oryantasyonuna göre güvenli yatak mukavemeti % 12 ve maksimum yatak mukavemeti ise % 20 oranında daha yüksek çıkmıştır. Ek olarak, her iki konfigürasyon da  $E/D \geq 4$  ve  $W/D \geq 4$  oranlarında güvenli ve maksimum yatak mukavemeti en iyi değerlere ulaşmıştır (Aktas ve Dirikolu, 2003). Zhao ve ark., tek cıvatalı bağlantılı kompozit malzemedeki gerilmelerin tahmini için temel tasarım parametrelerini içeren olasılığa dayalı bir model ortaya koymuşlardır. Olasılık modelini, geometrik boyutlar, fiber oryantasyon açıları ve malzeme özelliklerini içeren rastgele parametrelerin istatistiksel modelleri oluşturmaktadır. Önerilen modelin geçerliliğini sağlayan hasar yüklerini elde etmek için numunelere statik çekme testleri yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki tutarlılık önerilen modelin cıvata bağlantılı kompozitlerin hasar yükünü doğru bir şekilde tahmin edebileceğini ve rastgele değişkenlerin olasılık dağılım türüne duyarlı olmadığı belirtilmiştir (Zhao ve ark., 2017). Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak hibrit kompozit / metal cıvata bağlantıların çeşitli geometrilere sahip ve farklı eğilme yükleri altındaki performansı araştırılmıştır. Hem deneysel hem de analiz sonuçları birbiriyle paralel sonuçlar vermiştir (Caccese ve ark., 2007). Sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel sonuçların paralellik gösterdiği başka bir çalışmada pim bağlantılı kompozit plakalarda üç boyutlu gerilme alanlarını belirlemek için uygulanmıştır. Delaminasyon başlangıç bölgesi ve buna karşılık gelen yük, model kriterler vasıtasıyla tahmin edildi. Analiz sonuçlarından çıkan delaminasyon başlangıç tahminleri deneysel gözlemler ile de doğrulanmıştır (Persson ve ark., 1998). Kompozit malzemedeki cıvata deliğinde meydana gelen deformasyonu bağlayıcının sertlik ve dayanımı ile doğrudan ilgilidir. Cıvata ile delik arasındaki yük etkileşimleri yükün taşındığı temas alanını düzenler. Delikte meydana gelen deformasyon bağlantıda gevşeklik meydana getirir. Buda bağlanmış kompozit sistemin daha az yük taşıması anlamına gelmektedir. Kelly ve Hallström tabaka diziliminin ve bağlantı geometrisinin karbon fiber epoksi tabakaların yatak mukavemeti üzerine etkisini cıvata delik açıklığını göz önünde bulundurarak açıklamaya çalışmışlardır. ASTM standartları ile belirlenmiş % 4 delik deformasyonu karşısındaki numunelerin yük taşıma kapasitesinin azalma meydana gelmiştir. Böylece, cıvata delik açıklığı mekanik bağlantı tasarımında sistemin dayanımı açısından önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Kelly ve Hallström, 2004). Polimer kompozitlerin mekanik bağlantı özelliklerini etkileyen bir diğer hususta bağlantıya uygulanan sıkıştırma kuvvetleridir. Karbon fiber epoksi kompozitler üzerinde yapılan bir çalışmada, cıvata sıkıştırma kuvveti, fiber ve matrisin ayrılmasına ve delaminasyon oluşmasına eğimli tabakalardaki çentikli çekme mukavemetini önemli

ölçüde azaltabileceği söylenmiştir. Sıkıştırma basıncının yükselmesi çentik dayanımında azalmaya sebep olmuştur. Bununla birlikte, tabaka dizilimine bakılmaksızın kopma hasarına karşı sıkıştırma kuvveti bağlantı dayanımını iyileştirmiştir (Yan ve ark., 1999). Deneysel ve nümerik çalışmaların bu sefer seri bağlı iki pim ile cam fiber epoksi kompozitler üzerinde gerçekleştirildiği Özen ve Sayman 'nın yapmış olduğu çalışmada, E/D oranı, K/D oranı ve W/D oranı gibi bir dizi geometrik parametreler kullanılmıştır. Ayrıca araştırmacılar ön yükleme momentlerinin ve deniz suyunun da bağlantı üzerine etkilerini görmek istemişlerdir. Bu amaçla, numuneler 3 ve 6 Nm ön yükleme momentleri altında ve 24 saat deniz suyunda tutularak etkileri incelemeye koyulmuşlardır. Deney sonucunda, deniz suyu içerisine bekletilmenin moment uygulanmayan numunelerde hasar yükünün azaldığı tespit edilmiştir. Ön yükleme altında olan numuneler ise deniz suyuna daldırılmamış numunelerle neredeyse benzer yatak mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. E/D, K/D ve W/D oranlarının en yüksek olduğu değerlerde numunenin hasar yükü artmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar % 10 'dan daha az bir hata oranı ile birbirini tutmaktadır (Ozen ve Sayman, 2011). Mekanik olarak bağlanmış kompozit malzemelerin uzun süreli kullanımları açısından, erken bir bileşen hasarını önlemek için korozyon dayanıklılığını artırılması esastır. Kompozitin ve bağlantı sisteminin ağır ortamlarda dayanıklı olması gerektiği iyi bilinen bir durum olsa da literatürde bu konuda az sayıda çalışma bulunmaktadır. Miyano ve ark., hızlandırılmış şartlandırma ortamı içinde karbon fiber/metal civata bağlı kompozitlerin su emilimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Numune bağlantıları kuru, ıslak ve ıslak-kuru koşulda hazırlanmış ve çeşitli yükleme oranlarında ve sıcaklıklarında çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, numunelerin uzun süreli ömür tahmini için çekme ve yorulma testleri sonunda alınan eğriler, numunelerin su emiliminin servis ömürlerini açıkça etkilediği gerçeğini aydınlatmışlardır (Miyano ve ark., 2010). Diğer bir çalışmada perçinlenmiş kompozit/metal ve cam fiber kompozit/karbon fiber kompozit bağlantısının 15 hafta maruz bırakıldığı tuzlu ortamla olan etkileşimi incelenmiştir. Tek yüzde bileştirilmiş numunelerin kayma testleri şartlandırılmış ortamın mekanik özelliklerine tesirini gözlenmiş ve kompozit/metal bağlantılarının mekanik performansı maruz kalınan şartlandırma süresi sonunda azaldığı görülmüştür. Ayrıca cam fiber kompozitin karbon fiber kompozite göre şartlandırılmış ortamda bozulma hassasiyetinin fazla olduğu tespit edilmiştir. Cam fiberlerin hibritli bağlantılarında yarıma ve kopma hasarı meydana gelirken karbon fiberin hibritli bağlantısında yataklama hasarı gözlenmiş ve bu da cam fiberin korozyon dayanımının karbon fibere göre zayıf olması ile ilişkilendirilmiştir

(Fiore ve ark., 2017). Uygulamada literatürde yapılan şartlandırılmış ortamlardan biri de sıcak su ortamındaki bağlantının davranışdır. Soykok ve ark., cam fiber epoksi kompozitlerin mekanik olarak tutturulmasıyla, bağlantıların sıcak suya batırılmasından nasıl etkilendiğini keşfetmeyi amaçlamışlardır. Numuneler 1 ve 2 haftalık zaman dilimlerinde, 50 °C, 70 °C ve 90 °C sıcaklıklarda, sıcak suya maruz bırakılmıştır. Çekme testleri yapıldıktan sonra hasar davranışlarının direk olarak sıcaklığa ve sıcak suda bekletilme sürelerine göre değiştiğini gözlemişlerdir. Hem maruz kalma süresinin hem de sıcaklığın artmasının bağlantının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini bulmuşlardır. Buna ek olarak cam fiberlerde su emiliminden dolayı ağırlığının arttığı ve bunun da sıcak suya maruz kaldığı süre ve sıcaklıkla ilişkili olduğunu fark etmişlerdir (Soykok ve ark., 2013b). Aynı araştırmalar bu sefer tek bindirmeli iki seri bağlı cam fiber kompozit için termal durumun ve sıkıştırma torkunun hasar davranışına olan tesirini araştırmışlardır. Yapılan çekme testleri sırasında numunelere 40, 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklık etkisi altına bırakılmışlardır. Bağlantıların yük taşıma kapasitesinin artan sıcaklık karşısında azaldığı görülmüştür. Oda sıcaklığına kıyasla, matriste meydana gelen termal hasarlardan dolayı, 70 °C ve 80 °C sıcaklıklarda, taşınan yükler sırasıyla % 55 ve % 70 civarında azalma meydana gelmiştir. Sıkma momenti olarak 0 ve 6 Nm kullanıldığında, sıkma momentinin bağlantı dayanımına verimli olarak katkı sağladığı ifade edilmiştir (Soykok ve ark., 2013a). Bir diğer şartlandırılmış ortam ise denizcilik alanında kullanılan numuneler için hazırlanan deniz suyu ortamıdır. Aktaş ve Uzun ‘un yapmış olduğu çalışmada, deniz suyunun etkisinin gerçeğe daha yakın olması için numuneler bir gemiye bağlanmıştır. Cam fiber kompozitin yatak mukavemetinin incelendiği çalışmada pim bağlı kompozitlerin E/D ve W/D oranı sistematik olarak değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Numuneler 1, 2 ve 4 ay boyunca % 2.2 tuz oranına ve 22-26 °C sıcaklığa sahip Marmara Denizi ‘nde tutulmuştur. Deney sonuçları 4 ay boyunca denizde tutulan numunedeki yatak mukavemetinin 1 ve 2 ay boyunca tutulanlara göre ciddi bir şekilde azaldığını göstermiştir. Fakat hasar modlarında bir farklılık olmamıştır. Ayrıca pimin yatak içindeki yer değiştirmesi şartlandırma süresi arttıkça numunede meydana gelen yumuşamadan dolayı artmıştır (Aktaş ve Uzun, 2008). Kompozit malzemelerdeki bağlantı ömrünü ve güvenli bağlantıyı etkileyen faktörlerden biri de birleştirilecek malzemelerin özellikleridir. Asi yaptığı bir çalışmada aşınma dayanımı yüksek ve seramik özelliği ile bilinen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklarını kullanarak epoksi polimeri modifiye etmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklarını farklı ağırlıkça oranlarda (% 7.5, % 10, % 15) matris içinde kullanılıp, farklı bağlantı geometrileri ile cam fiber takviyeli kompozitlerdeki pim



bağlantılarının çekme testini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, matris içindeki ağırlıkça  $Al_2O_3$  parçacıklarının artması kompozitlerin yatak mukavemetlerini geliştirmiştir. Ağırlıkça % 10  $Al_2O_3$  parçacık içeren numunede en yüksek dayanım elde edilmiştir ve tüm dolgu takviyelerindeki dayanım katkısızca göre yüksek çıkmıştır (Asi, 2010). Birleştirilecek parçaların özelliklerini iyileştirmede yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi de kompozit malzeme içindeki polimer matris içerisine nano parçacık takviyeler yapılmasıdır. Nanokil ve karbon nanotüpün karbon fiberler için kullanıldığı tek cıvatalı bir sistemde, numunelerin yatak mukavemetleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, sırasıyla nanokil, karbon nanotüp ve hibrit takviyeli kompozitler için yatak mukavemetinde % 5.2, % 3.9 ve % 0.8 artış göstermiştir (Tüzemen ve ark., 2017). Başka bir çalışmada, karbon nanotüplerin cıvata bağlanmış tek yönlü cam fiber takviyeleri kompozitlerin sünekliklerini ve tokluklarını sırasıyla % 97 ve % 197 gibi bir artış sağladığı ifade edilmiştir. Farklı ağırlıkça yapıya takviye edilen karbon nanotüpler ağırlıkça % 1 oranda önemli sonuçlar vermiştir. Ayrıca, karbon nanotüplerin yapıya dâhil edilmesi kayma mukavemetini ve enerji emilimini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermişlerdir (Genedy ve ark., 2017). Karbon nanotüpler literatürde kompozit yapılarıdaki hasar durumunu izlemek için yenilikçi teknikler geliştirmeye konu olmuştur. Bilhassa mekanik ve yapıştırma bağlantılarında delaminasyon, çatlak ve bağlantı gevşemesi gibi hasarların tespiti için kullanılmıştır. Thostenson ve Chou, mekanik olarak bağlanmış cam epoksi kompozit bağlantılarda hasar ve bağlantı gevşemesini algılamak için karbon nanotüplerin eşsiz özelliğinden faydalanmışlardır (Thostenson ve Chou, 2008).

### **2.8.1. Tez konusunun literatürdeki yeri**

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde fiber takviyesi olarak sıkça kullanılan cam fiber ve karbon fiberlerin yanında, özellikleriyle ön plana çıkan ve bu fiberlerin kullanım yerlerine aday olan bazalt fiberler endüstriyel uygulamalarda ve bununla beraber bilimsel çalışmalarda yavaş yavaş yer edinmektedir. Bazalt fiberlerin ileriye dönük kullanım alanlarının daha da artması, onun hakkında teknik ve mekanik özelliklerinin ortaya çıkma ihtiyacını arttırmaktadır.

Bazalt fiberlerin aydınlığa kavuşturulması gerekli olan kısımlarından biride denizcilik uygulamalarındaki kullanımlarından dolayı yük ve ortam koşulları altındaki davranışını incelemektir. Literatürde bazalt fiber takviyeli polimer kompozitlerin

mekanik testleri üzerinde sınırlıda olsa çalışmalar bulunsa da, montaj işlemleri mekanik bir bağlantı aparatı (cıvata, pim, perçin vb.) yardımıyla yapılan bazalt fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin mekanik özellikler ve ortam şartlarındaki davranışları üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dahası son yıllarda, fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için, polimer matris içerisine nano parçacık takviyesinde de iyi gelişmeler ve çalışmalar ortaya konmuştur. Yine bu durum bazalt fiber polimer kompozit malzemelerde sınırlı olarak ilerlemektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, tek bindirmeli cıvata bağlı halloysit nanotüp katkılı bazalt fiber takviyeli epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin (HNT-Epoksi/BF) yatak mukavemetlerinin ve düşük hızlı darbenin etkisini hem normal ortamda hem de tuzlu su ile oluşturulmuş yaşlandırılmış ortamda araştırılmıştır. Çalışmada deneyler toplamda 4 aşamadan oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın ilk aşaması olarak, halloysit nanotüpün (HNT) epoksi içerisindeki en iyi katkı değerini bulmak amacıyla ağırlıkça % 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5 oranları ile HNT katkılı polimer nanokompozitler (HNT-Epoksi) üretilmiştir. Üretilen polimer nanokompozitlerin en iyi mekanik performansını bulmak amacıyla çekme testine tabi tutulmuş ve ağırlıkça % 2 HNT katkılı epoksi nanokompozit malzemede en iyi mekanik performans gözlenmiştir. Deneylerin ikinci aşamasında, bu performansın etkisini bazalt fiber takviyesinde gözlemek adına polimer matrisi ağırlıkça % 2 HNT katkısı ile modifiye edilen nanokompozitler üretilmiş ve yine çekme testine tabi tutulmuşlardır. HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemede de ciddi bir mukavemet artışı gözlenmiştir. Bu aşamaya kadar artık tek bindirmeli cıvata bağlantısını oluşturan malzemelerin tasarımı tamamlanmıştır. Deneysel çalışmanın üçüncü aşamasında, tek bindirmeli cıvata bağlantılı Epoksi/BF kompozit ve HNT-Epoksi/BF nanokompozitlerin çekme testleri ile yatak mukavemetleri hesaplanmış ve hasar modları tahlil edilmiştir. Tuzlu su çözelti içinde bekletilen numunelerin ayrıca 2., 4. ve 6. ay sonunda testleri tekrarlanmış, normal ortamda yapılan deneylere göre mukavemet düşüşleri ve oluşan hasar tipleri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların son aşamasında, normal ortam ve yaşlandırılmış ortam zaman periyotları sonunda numunelerin (Epoksi/BF ve HNT-Epoksi/BF) düşük hızda darbe testleri ile darbe dayanımları incelenmiştir. Darbe deneyleri malzeme üzerinde hem cıvata üzerine düşürülerek hem de cıvata sistemine temas etmeyen deliğe en yakın nokta üzerine düşürülerek gerçekleştirilmiş ve sonuçları kıyaslanmıştır. Numunelerin kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman grafikleri hesaplanmıştır. Ortaya çıkan hasar ve düzensizlikler taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzeme Üretiminde Kullanılan Ürünler

Çalışmalarda kullanmak amacıyla kompozit malzeme üretimi için gerekli epoksi reçine Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti. 'den tedarik edilen Momentive firmasının düşük viskoziteli MGS L160 diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) epoksi laminasyon reçinesi ve sertleştiricisi yine aynı firmanın MGS H160 amin sertleştirici tercih edilmiştir. Epoksi reçine ve sertleştiricinin genel özellikleri Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2. 'de sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Epoksi reçine özellikleri

Epoksi Laminasyon Reçinesi MGS L160	
Uygulama Alanı	Planör, Motorlu planör, motorlu uçak, bot, gemi, spor aletleri, model uçaklar, kalıp ve genel uygulamalar
Özellikleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Çok üst düzey uyumluluk</li> <li>• Çok iyi mekanik ve ısıl özellikler</li> <li>• 45 dk dan 4-5 saate kadar çalışma süresi</li> </ul>
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,13-1,17
Viskozite (mPas)	700-900

**Çizelge 3.2.** Sertleştirici özellikleri

Sertleştirici MGS H160	
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,96-1,00
Viskozite (mPas)	10-50
Amin Değeri (mgr KOH/gr)	550-650
Ağırlıkça Karışım Oranı	100:25 ±2

Nanokompozit malzemenin modifiyesinde kullanılan halloysit nanotüp (HNT) nanopartiküller iç çapı 10-30 nm, dış çapı 30-100 nm ve 10 µm boy uzunluğuna kadar olup ve Eczacıbaşı Esan Türkiye'den tedarik edilmiştir. Kimyasal içerik olarak % 43.3 SiO<sub>2</sub>, % 38.4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 0.7 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.1 TiO<sub>2</sub>, 0.08 CaO, 0.12 MgO, 0.27 Na<sub>2</sub>O ve 0.12 K<sub>2</sub>O bulunmaktadır.

Bazalt fiber dokuma kumaşın (300 gr/m<sup>2</sup>) tedariki Tila Kompozit Temsilcilik İç ve Dış Tic. Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır. Bazalt fiberin yüzde kütle minimum maksimum / mineral içeriği, bunun yanında fiberin fiziksel ve mekanik özelliği Çizelge 3.3. ve Çizelge 3.4. 'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Bazalt fiberin mineral içeriği

Bileşenler	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Diğer
% Kütle	45-60	12-19	5-15	6-12	3-7	0,9-2,0	2,5-6,0	2,0-3,5

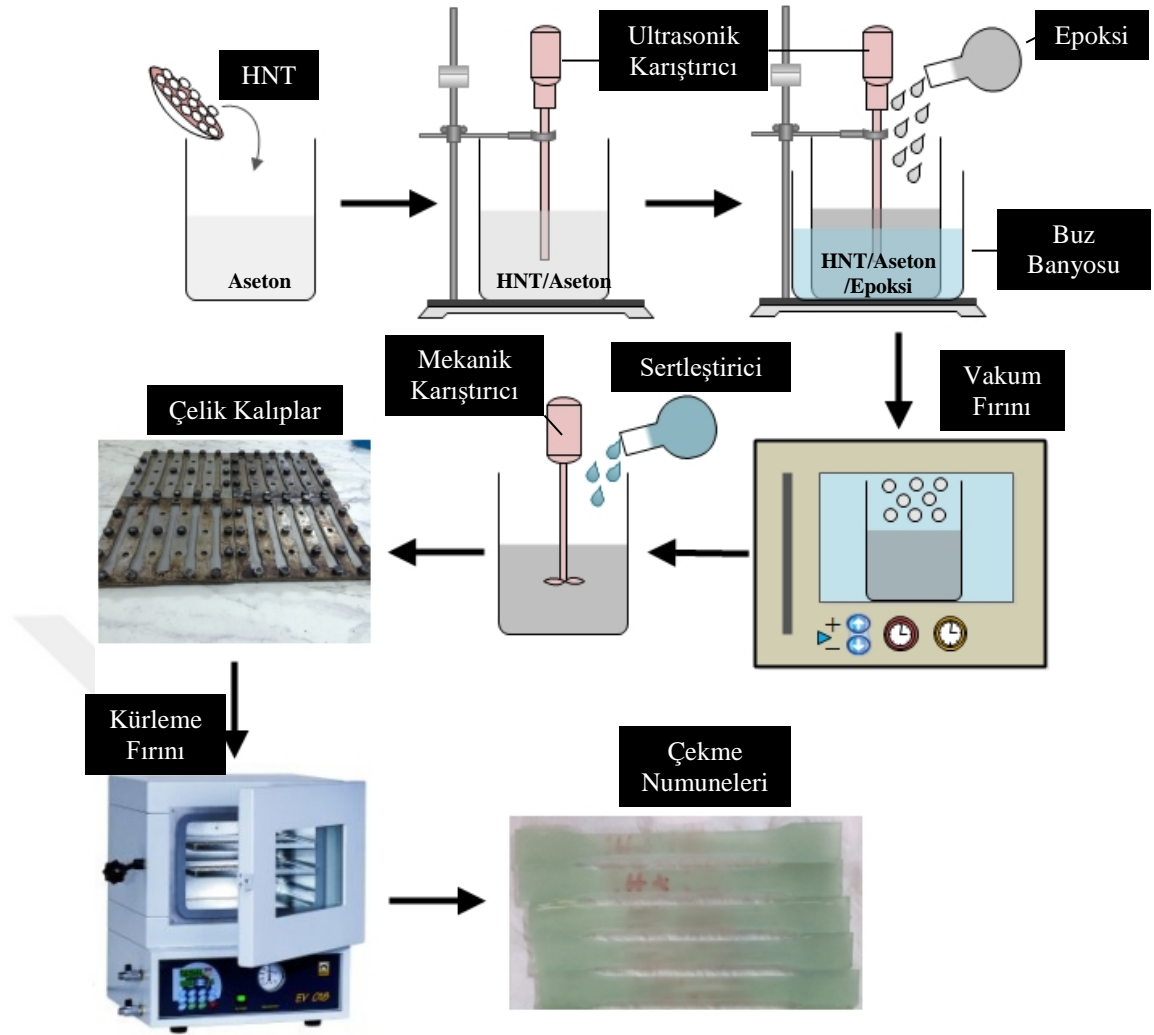
**Çizelge 3.4.** Bazalt fiberin fiziksel ve mekanik özelliği

Özellik	Sonuç
Sargı / Dokuma Fiber Yoğunluğu	600 / 300 [Teks]
Çekme Mukavemet (Sargı/Dokuma)	4600 / 2000 [MPa]
Kalınlık	0,45 [mm]
Ağırlık	300 [g/m <sup>2</sup> ]
Isıl Kararlılık	-260 / 700 [°C]

## 3.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi

### 3.2.1. HNT/Epoksi nanokompozit ve epoksi polimer kompozit çekme numunesi üretimi

Kompozit malzeme üretiminde tez çalışmasının ilk basamağı olarak Halloysit Nanotüp (HNT) nanopartiküllerinin epoksi matriste modifiye edilmesi için dogbone çekme çubuklarının üretimi ASTM D638-14 standardına göre gerçekleştirilmiştir. HNT nanopartikülünün optimum mekanik değerini bulmak için ağırlıkça % 1 den % 5 oranlarda epoksi içerisinde karıştırılmıştır. HNT nanopartikül 15 dk boyunca aseton içinde ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra, yeterli miktarda epoksi polimer karışım içerisine dökülmüştür. Karışım 60 dk boyunca, yüksek sıcaklıkla oluşacak durumların önüne geçmek için bir buz banyosu içerisinde, ultrasonik karıştırıcı ile tekrar karıştırılmıştır. Ardından 70 °C sıcaklık altında vakum fırınına konarak 24 saat boyunca asetonun karışım içerisinden uçurma işlemi yapılmıştır. Karışım içinden aseton uzaklaştırıldıktan sonra, sertleştiricinin (kürleştirici) de ilave edilmesiyle, karışım 5 dk da mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlanan reçine, çekme numunesi şeklindeki çelik kalıplar içerisine dökülerek kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme işlemleri fırında 1 saat boyunca 70 °C de ve 4 saat boyunca 120 °C de gerçekleştirilmiş, daha sonrada kalıplar soğumaya bırakılmıştır. HNT katkısız epoksi polimer kompozit malzemenin de üretim yöntemi aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. HNT/Epoksi Nanokompozit malzeme üretim basamakları Şekil 3.1. 'deki şemada gösterilmektedir.

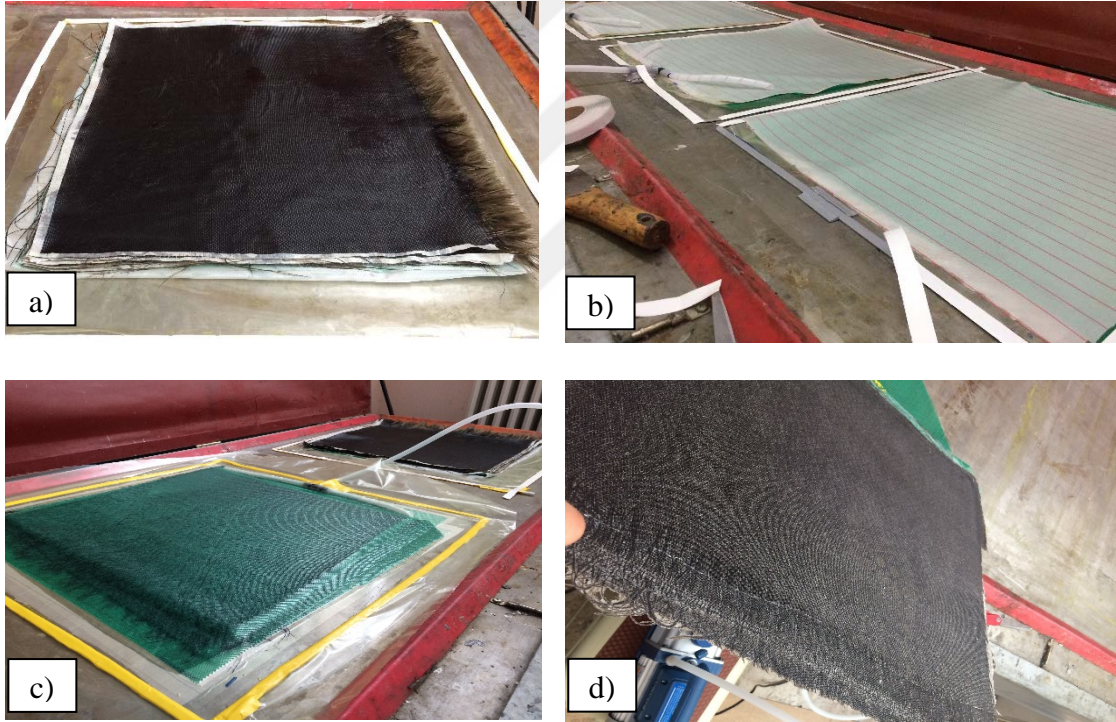


Şekil 3.1. HNT/Epoksi polimer nanokompozit üretim şeması

### 3.2.2. Bazalt fiber takviyeli HNT/epoksi nanokompozit malzemenin üretimi

Nanokompozit malzeme üretimindeki en önemli aşamayı epoksi matrisin HNT ile homojen olarak karıştırılması işlemi oluşturmaktadır. HNT/Epoksi nanokompozit üretiminde gerçekleştirilen karıştırma işlemi, benzer bir şekilde fiber takviyeli nanokompozit malzeme üretimi içinde yapılmıştır. Bazalt fiber takviyeli HNT katkılı epoksi matris (HNT-Epoksi/BF) nanokompozit malzeme üretimi, iki üretim yöntemin kullanılmasıyla elde edilmiştir. 500x500 mm ebatlarında, 10 katman olacak şekilde kesilen bazalt fiberlere, ağırlıkça HNT parçacığı ihtiva eden epoksi matris ile elle yatırma işlemi yapılarak emdirilmiştir (Şekil 3.2.(a)). Elle yatırma işleminin uygulanmasıyla fiberler üzerindeki ıslanmama problemi ortadan kalkmış, aynı zamanda da polimer içindeki HNT 'nin de homojen bir şekilde fiberlere tutunması amaçlanmıştır. Üretimdeki ikinci işlem ise elle yatırma ile epoksi emdirilmiş fiberler vakum ortamına alınarak

üzerlerindeki fazla epoksinin ortamdaki tahliye edilmesidir. Malzeme üretiminde kullanılan dağıtıcı file üzerindeki kanallar vasıtasıyla, vakum ortamından tahliye edilen epoksi polimere kılavuzluk etmektedir. Ayırıcı kumaşlar ise katılma tamamlandıktan sonra dağıtıcı filenin ve vakum poşetinin kompozit malzeme üzerine hem yapışmasını önlemekte hem de üretim sonuna da malzemeden kolayca soyulmasını sağlamaktadır (Şekil 3.2.(b)). Bununla beraber oluşturulan vakumla, katmanlar arasındaki arayüzeylerin birbirleriyle temas yüzeyleri artırılmış, epoksi polimer içerisindeki hava boşlukları minimize edilmiştir (Şekil 3.2.(c)). Vakum tezgâhı zemini altında bulunan PLC kontrollü rezistansların oluşturduğu sıcaklık ile kompozit malzemeler 1 saat 70 °C ve 4 saat 120 °C de kurluşma işlemleri tamamlanmıştır. Üretim aşamaları Şekil 3.2. 'de gösterildiği gibidir.



**Şekil 3.2.** Nanokompozit malzeme üretim aşaması a) El yatırma ile epoksi emdirilmiş fiber b) Dağıtıcı file ve ayırıcı kumaş hazırlanışı c) Vakum ortamı d) Üretimden çıkan ürün

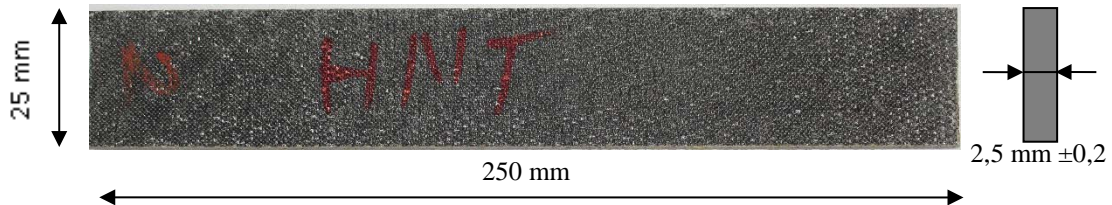
Üretim hem katkısız (Epoksi/BF) hem de ağırlıkça %2 HNT katkılı (HNT-Epoksi/BF) nanokompozit malzeme için gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2.(d)). Ağırlıkça %2 HNT katkısının kullanılmasının sebebi HNT nanopartikülün polimer kompozit deneylerinde en iyi mekanik özellik göstermesinden kaynaklıdır. Üretimi tamamlanan Bazalt fiber takviyeli HNT katkılı epoksi matris (HNT-Epoksi/BF) nanokompozit

malzeme, mekanik testlere hazır hale getirilmesi için ASTM standartları kullanılarak kesme işlemlerine geçilebilir duruma gelmiştir.

### 3.3. Nanokompozit Malzemelerin Mekanik Testlere Hazırlanışı ve Yaşlandırılması

Üretimi tamamlanan kompozit ve nanokompozit malzemeler, HNT katkısının fiber üzerindeki etkisini görmek için ilk önce çekme testine tabi tutulmuştur. Daha sonra, kompozit ve nanokompozit malzemeler, polimer matris kompozit malzemelerin yataklama davranışlarının incelenmesi için önerilen montaj işlemlerine göre birleştirilmeleri yapılmış ve yatak mukavemeti tespiti için cıvatalı çekme testi uygulanmıştır. Son mekanik test olarak, cıvatalı kompozit malzeme üzerinde ağırlık düşürmeli düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır.

Kompozit ve nanokompozit malzemelerin çekme deneyleri ASTM D3039/3039M-14 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3. 'te nanokompozit malzeme çekme çubuğu numunesi ve ölçüleri belirtilmiştir. Deney numunesi 250 mm uzunluk, 25 mm genişlik ve  $2,5 \pm 0,2$  mm kalınlık ölçüsüne sahiptir. Çekme deneylerinin hepsinde şekilde verilen ölçüler kullanılarak, en az üçer tekrarlı bir şekilde yapılmıştır. Deneysel hatalar, üretim hataları ve diğer çevresel koşullar göz önüne alınarak, tekrar deneylerinin beş tekrara kadar çıktığı durumlarda olmuştur.



Şekil 3.3. Nanokompozit malzeme çekme numunesi

Kompozit ve nanokompozit malzemelerin, yataklama davranışlarını incelemek için yapılan numune tasarımı ASTM D5961/5961M-13 göre belirlenmiştir. Cıvata bağlantısının tek bindirmeli bağlantı olarak uygulandığı tasarım aşamaları Şekil 3.4. 'te aşama aşama verilmiştir.

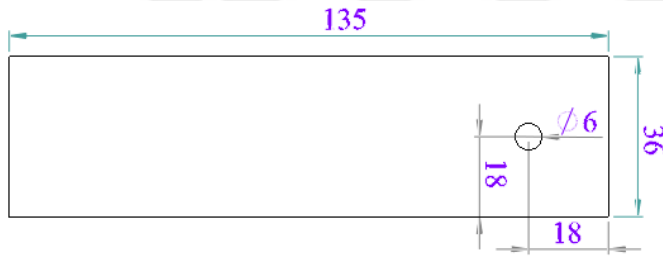




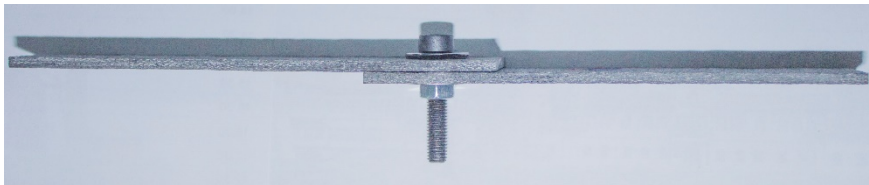
Kompozit ve nanokompozit numuneler, standartta belirtilen 135 mm uzunluğunda 36 mm  $\pm$ 1 genişliğinde 3,8 mm  $\pm$  0,2 kalınlığında kesilmiştir.



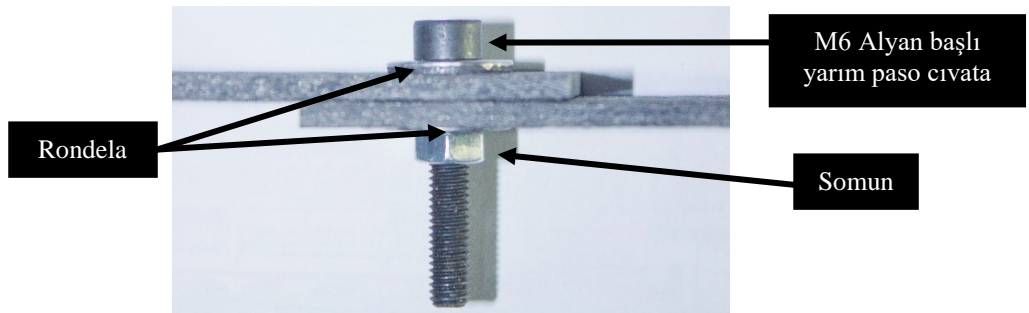
Kesilmiş numuneler üzerine, Mazak Variaxis 500 CNC işleme merkezinde 6 mm çapta, sinterlenmiş karbür matkap ucu ile 90 m/dk kesme hızı ve 0,005 mm/dev ilerleme oranı kesme parametreleri kullanılarak delikler açılmıştır (Kaybal, 2015).



Delik delme işleminden sonra numuneler montaj işlemine hazır hale getirilmiştir.



Numuneler tek bindirmeli cıvata bağlantısı olarak montajlanmıştır.



Şekil 3.4. Tek bindirmeli cıvata bağlantısı tasarımı

Kompozit ve nanokompozitlerin tek bindirmeli cıvata bağlantılarında 12.9 mukavemet sınıfına sahip M6 alyan başlı cıvata 15 Nm sıkıştırma torku uygulanarak



montaj işlemi yapılmıştır (Khashaba ve ark., 2006; Saleem ve ark., 2015). Cıvata ve somunun malzeme üzerinde istenmeyen durumların oluşmasını engellemek amacıyla, cıvata-numune ve somun-numune arasına iç çapı  $d_i = 6,25$  mm ve dış çapı  $d_d = 18$  mm olan rondelalar yerleştirilmiştir (Khashaba ve ark., 2006). Her bir test için yeni mekanik bağlantı elemanları kullanılmıştır.

Ağırlık düşürmeli düşük hızlı darbe testlerinde yukarıda tasarımını yaptığımız tek bindirmeli bağlantı tertibatına göre gerçekleştirilmiştir. Deney ile alakalı geniş bilgi başlık 3.5 'te etraflıca verilmiştir.

Tek bindirmeli cıvata bağlı kompozit ve nanokompozit numunelerin denizcilik uygulamalarında kullanımında, tuzlu suyun statik ve dinamik davranışlarına etkisini gözlemek için ağırlıkça % 6 deniz tuzu içeren sulu çözeltiler içerisine koyulmuştur (Wei ve ark., 2011a). Deniz tuzu piyasadan ticari olarak tedarik edilmiştir. Normal (kuru) ortamın dışında, numuneler 2, 4 ve 6 ay boyunca tuzlu su içerisinde oda sıcaklığında bekletilmiştir ve her bir mekanik test bu zaman periyotlarının sonunda tekrarlanmıştır. Ayrıca, çözelti içerisinde tuzun çökmesini engellemek ve homojenliğini sağlamak amacıyla belli periyotlar ile çözelti mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmış ve çözeltideki buharlaşmayı önlemek için de bulunduğu kabın ağzı sıkıca kapatılmıştır (Deniz ve ark., 2013).

### **3.4. Kompozit Malzemelerin Çekme ve Yatak Mukavemeti Testleri**

Epoksi polimer kompozit malzemelerin çekme testleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekanik Laboratuvarı 'nda bulunan Shimadzu AGS-X universal test cihazında ASTM D638-14 standardına göre, 2 mm/dk çene ilerleme hızında en az üç tekrar olmak üzere beş tekrara kadar, oda sıcaklığında yapılmıştır. Numuneler çenelere bağlanmadan önce, çentik etkisini ortadan kaldırmak için 800 lük zımpara ile keskin kenar kısımları zımparalanmıştır. Deneysel katkısız epoksi polimer ve ağırlıkça % 1, 2, 3, 4 ve 5 HNT içeren epoksi polimer nanokompozit malzemeler için uygulanmıştır.

Bazalt takviyeli epoksi (Epoksi/BF) kompozit ve Bazalt takviyeli HNT epoksi (HNT-Epoksi/BF) nanokompozit malzemenin levha şeklindeki çekme ve cıvata bağlantılı yatak mukavemeti deneyleri yine aynı laboratuvarda bulunan Instron 8801 universal test cihazı ile çekme testi için ASTM D3039/3039M-14 standartı ve yatak mukavemeti testleri için ise ASTM D5961/5961M-13 standartına göre

gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin, yatak mukavemeti testleri tuzlu su ortamında bekletilmiş 2., 4. ve 6. ay sonundaki numuneler için de uygulanmıştır. Universal test cihazlarına ait görüntüler Şekil 3.5. 'te verilmiştir.



Shimadzu AGS-X çekme cihazı



Instron 8801 çekme cihazı

Şekil 3.5. Üniversal çekme cihazı üniteleri (Demir, 2017)

Numuneler uygulanan bir  $P$  kuvveti ve bu uygulanan kuvvet altında numunede ki uzama  $\delta$ , üniversal test cihazı tarafından anlık olarak ölçülmektedir. Denklem 3.1., kuvvet altındaki bir numunede oluşan maksimum çekme dayanımını ifade etmektedir.

$$\sigma_{maks} = P_{maks}/A \quad (3.1.)$$

Burada  $\sigma_{maks}$  numunede oluşan maksimum gerilmeyi (çekme mukavemeti-MPa),  $P_{maks}$  numunenin maksimum taşıdığı yükü (N),  $A$ , ortalama kesit alanını ( $\text{mm}^2$ ) belirtmektedir. Cıvata bağlantılarında meydana gelen yatak gerilmesi de Denklem 3.2. 'de verilmiştir.

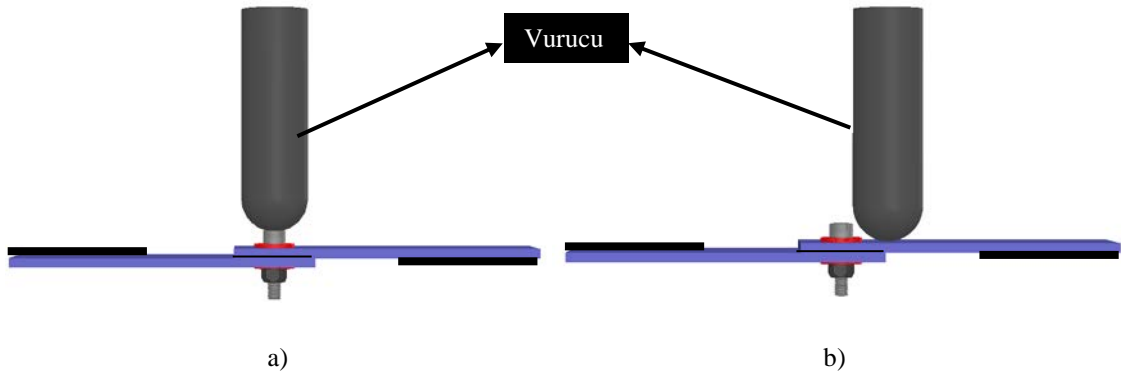
$$\sigma_{yatak} = P/D \cdot t \quad (3.2.)$$

Burada  $\sigma_{yatak}$  cıvata bağlı kompozitin yatak gerilmesini (yatak mukavemeti-MPa),  $D$ , delik çapı (mm),  $t$ , numune kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

### 3.5. Kompozit Malzemelerin Düşük Hızlı Darbe Testleri

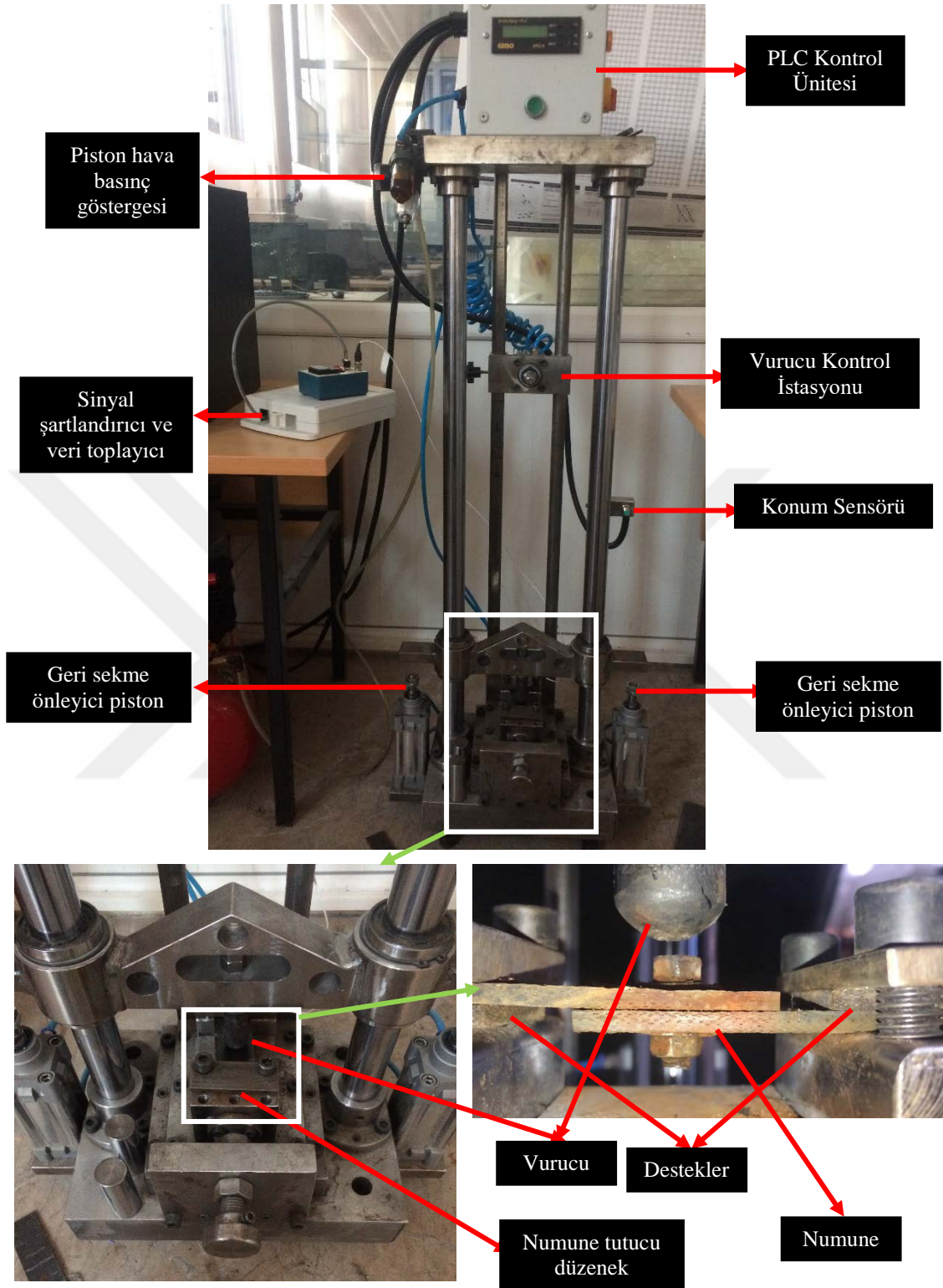
Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekanik Laboratuvarı 'nda bulunan ASTM D7136/7136M-15 standartına göre üretilmiş ağırlık düşürme darbe test cihazı ile yapılmıştır. Deneyler, ASTM D5961/5961M-13 standartında belirtilen numune montaj konfigürasyonuna (tek bindirmeli bağlantı) göre, 15 J, 20 J ve 25 J olmak üzere üç farklı enerji seviyesinde, oda sıcaklığında ve normal (kuru) ortam, yaşlandırılmış ortamın 2., 4., ve 6. ay sonunda gerçekleştirilmiştir.

Cıvata bağlı kompozit malzemede, delik prosesinden dolayı delik ve etrafında oluşan istenmeyen gerilmeler bağlantının ömrünü tehdit etmektedir. Cıvata bağlantısının montajı, demontajı veya tamiri sırasında ya da kazara malzeme üzerine düşen iş takımları ve benzeri aletler, malzeme üzerindeki delikten cesaret alarak bağlantıya ciddi anlamda hasara uğratabilmektedir. Bunun gibi malzeme üzerine gelen yüklerin bağlantı üzerinde oluşturduğu etkiyi gözlemlemek adına düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Darbe deneylerinde, vurucu malzemenin en kritik iki bölgesine; direk cıvata tertibatı üstüne darbe (CÜD) ve cıvata/rondela tertibatına temas etmeyen en yakın nokta olan kompozit üstüne darbe (KÜD) olarak düşürülmüştür. Şekil 3.6. 'da vurucunun düştüğü bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Vurucunun temas ettiği bölgeler a) cıvata üstü darbe (CÜD) b) kompozit üstü darbe (KÜD)

Vurucu kütle, vurucu kütle istasyonu üzerine sabitlenerek uygulanması istenen enerji seviyesine göre (15J-20J-25J) gerekli yüksekliğe çıkarılarak ayarlanır. Vurucunun, numune üzerinde ikinci bir defa sekmesini önlemek için pistonların açılması süresi göz önünde bulundurularak konum sensörlerinin mesafeleri ayarlanmıştır. Bu mesafeler her enerji seviyesi için farklılık göstermekte ve ayarlanması



Şekil 3.7. Ağrlık düşürmeli düşük hızlı darbe test ünitesi

gerekmektedir. Kompozit numuneler, vurucunun numune üzerine düşürüleceği yer belirlendikten sonra numune tutucu düzenek üzerine bağlanmıştır. Verilerin bilgisayara

alınmasını sağlayan LabView yazılımı, süreye bağlı veri kaydetme moduna alındıktan sonra PLC kontrol ünitesi üzerinden kontrol edilebilen ve vurucu istasyonu üzerinde bağlı vurucu serbest hale getirilmesiyle numune üzerine serbest düşmesi sağlanır. Konum sensöründen aldığı komutla çalışan geri sekme önleyici pistonlar, vurucunun numune üzerine çarpıp geri sıçramasıyla devreye girerek, vurucunun numune üzerine tekrarlı darbeler yapması önlenmiştir. Darbe sırasında oluşan kuvvetler, vurucu ucunda bağlı olan 25 kHz örnekleme hızına sahip bir yük hücresi tarafından ölçülmüştür. Burada yük hücresi tarafından alınan sinyaller, şartlandırıcıda yükseltilerek veri toplayıcıya yönlendirilmiştir. Son olarak, dijital bir hale gelen veriler bilgisayar ortamında LavView yazılımı yardımıyla işlenmiş ve kuvvet-zaman verisi olarak kaydedilmiştir. Şekil 3.7. 'de, ağırlık düşürmeli düşük hızlı darbe testi ünitesinin genel kısımları ifade edilmiştir.

### **3.6. Hasar Görüntülerinin Alınması**

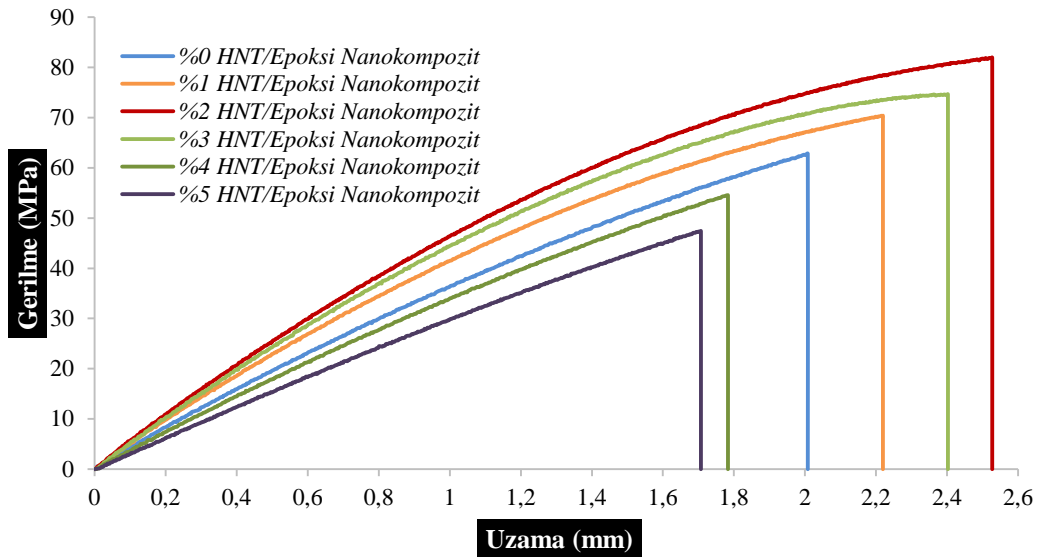
Bazalt takviyeli epoksi (Epoksi/BF) kompozit ve Bazalt takviyeli HNT epoksi (HNT-Epoksi/BF) nanokompozit malzemelerde, civata bağlantılarının çekme testi sonrasında ve düşük hızlı darbe testleri sonrasında yüzeylerinde meydana gelen makro boyuttaki hasarlar Nikon D90 marka DSLR fotoğraf makinesi ile görüntülenmiştir. Mikro boyuttaki hasar mekanizmaları ise, Zeiss Evo LS10 marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile teşhis edilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, üretimi ve mekanik testlere hazır halde bulunan HNT-Epoksi polimer nanokompozit, Epoksi/BF kompozit ve HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin plaka çekme, cıvata bağlı çekme ve düşük hızlı darbe testlerinin sonuçları verilmiştir. Her başlıkta sonuçlar kendi içerisinde etraflıca tartışılmıştır.

##### 4.1. Epoksi Kompozit ve HNT-Epoksi Nanokompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları

Deneysel çalışmaların ilk aşaması olarak, HNT nano parçacığının epoksi polimer matrisi mekanik performans olarak hangi en iyi oranda modifiye ettiğini bulmak için HNT-epoksi nanokompozitlerin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Üretimi %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında HNT nano parçacığı ile modifiye edilerek elde edilen HNT-Epoksi nanokompozit malzemelerin uygun değerdeki mekanik özelliğini tespit etmek için numunelerin, Shimadzu marka test cihazında çekme testi uygulamaları yapılmıştır. Numunelerin çekme testi gerilme-uzama sonuç grafiği Şekil 4.1. 'de gösterildiği gibidir. Grafikten anlaşıldığı üzere, epoksi reçinenin %2 HNT nano parçacığı ile modifiye edilmesi durumunda, diğer oranlara göre daha fazla çekme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında, kopuncaya kadarki şekil değişimi de diğerleri ile kıyaslandığında daha fazla olduğu görülmektedir. Katkısız kompozit malzemeye uygulanan % 1 ve % 3 HNT katkılarında da hem mukavemet açısından hem de şekil değişimi açısından olumlu yönde değişiklik olduğu görülmektedir. Ama bu olumlu değişimin en fazla % 2 HNT katkısı ile takviye edilmiş nanokompozit malzeme meydana geldiği görülmektedir. Epoksi reçineye uygulanan ağırlıkça % 4 ve % 5 HNT katkısı, bu değerlerden itibaren nanokompozit malzemeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu değerlerdeki nanokompozit malzemenin taşıdığı maksimum yük ve şekil değişimi katkısız kompozit malzemeye göre düştüğü gözlenmektedir. Buradan, belli bir miktar HNT katkısından sonra malzemenin mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği sonucu çıkarılabilir. Sebep olarak, ağırlıkça yüksek orana sahip HNT nano parçacığının epoksi ile karışımının zorlaşması ve bunun sonucunda nano parçacıkların makro boyutta bir arada bulunması, topaklanması ve homojen bir yapı oluşumunu engellemesi olarak gösterilebilir.

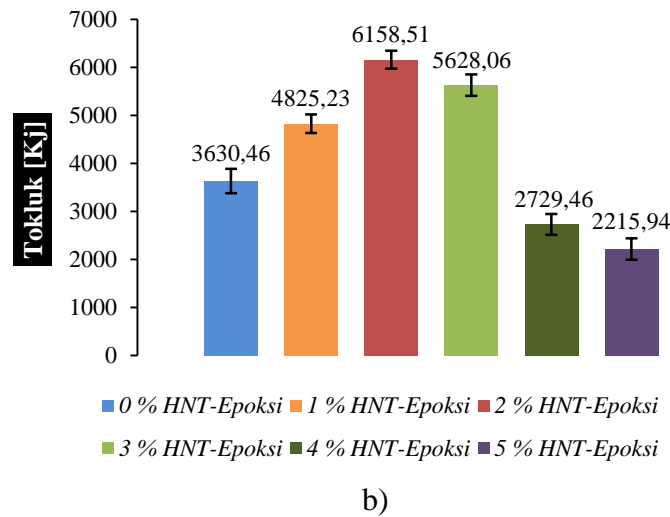
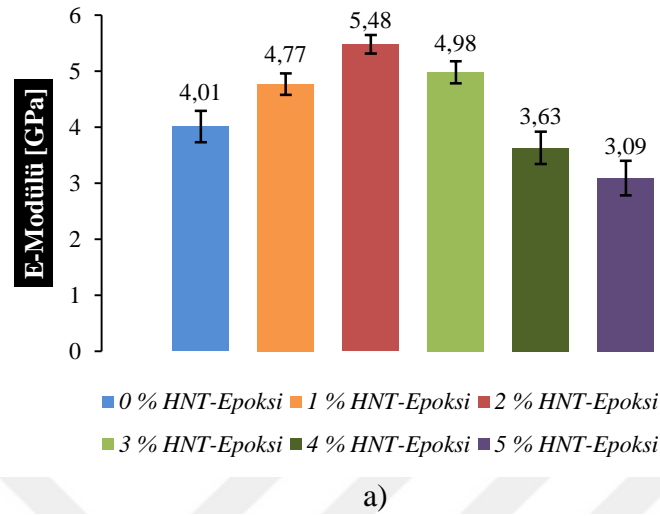


Şekil 4.1. Epoksi kompozit ve HNT-epoksi nanokompozit malzemenin çekme testi eğrisi

Epoksi kompozit ve HNT-Epoksi nanokompozit malzemenin çekme testi eğrisinden elde edilen diğer mekanik özellikleri elastiklik modülü ve kopuncaya kadar numunelerin yuttuğu enerjiyi ifade eden tokluk değerleri sütun grafiği olarak Şekil 4.2. (a) ve (b) 'de verilmiştir. HNT nano parçacıklarının epoksi matris içerisine ilavesiyle elastiklik modülü üzerindeki etkisi Şekil 4.2.(a) 'da verilmiştir. Katkısız epoksi numuneye göre, % 1, % 2 ve % 3 ağırlıkça oranlarda elastiklik modülü artış göstermekte iken % 4 ve % 5 oranlarda azalma meydana gelmektedir. Çekme yükü altındaki epoksi numunede hasar, numune yüzeyi ya da içindeki bir kusurdan başlar ve kopma veya kırılmadan önce önemli bir kalıcı deformasyon meydana gelir. Gelişmiş en-boy oranı ile yüksek yüzey alanına sahip HNT 'ler ağırlıkça % 1, % 2 ve % 3 takviyeli epoksi nanokompozitte çatlak başlamasına sebep veren kusurlar üzerinde güçlendirici etkisiyle hem daha fazla bir yük taşımına hem de elastiklik modülünün artışına sebep olmaktadır (Deng ve ark., 2008). Ağırlıkça % 4 ve % 5 HNT parçacıklarının polimer içerisinde kendi aralarında topaklanmasıyla (aglomere) oluşan gerilme konsantrasyonlarından dolayı hasarların erken ortaya çıkması çekme dayanımını ve elastiklik modülünün azalması şeklinde etki yapacaktır. Numunelerin yük dayanımlarının ve elastiklik modüllerinin artması aynı zamanda kopuncaya kadar yuttukları enerjilerinde arttığını ifade etmektedir. Epoksi numune içerisinde bulunan kusurlar neticesinde ilerleyen çatlaklar karşılına çıkan HNT parçacıklarını epoksi içerisinden sıyırmak veya kırmak isteyecekler ve bu mekanizmanın faaliyete geçmesi için daha fazla bir enerji hali ortaya çıkacaktır. Şekil



4.2.(b) 'de gösterildiği üzere, malzemelerin kopuncaya kadar yuttukları enerji % 1, % 2 ve % 3 HNT takviyelerinde artarken % 4 ve % 5 oranlarında azalma göstermiştir.



Şekil 4.2. Mekanik özellik sütun grafikleri a) Elastiklik modülü b) Tokluk

Epoksi kompozit ve HNT-Epoxy nanokompozit malzemelerin gerilme, uzama, elastiklik modülleri ve toklukları incelenip kıyaslandığında HNT katkısının epoksi kompozitte ciddi mekanik performans artışı sağladığı görülmüştür. Ağırlıkça % 1 'den % 5 'e oranlar kıyaslandığında epoksi polimer içerisine % 2 HNT takviyesi sonucunda en yüksek mekanik performans elde edilmiştir. % 0 HNT-Epoxy numunenin referans malzeme olarak alındığı Çizelge 4.1. 'de HNT katkısının her numune için mekanik performansa etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. Ağırlıkça % 2 HNT katkısındaki performansın göze batmasının yanında % 1 ve % 3 oranlarda da güzel sonuçlar elde edilmiştir. Katkı oranının % 2 olduğu durumda, katkısız malzemeye göre çekme



mukavemetinde % 30,5, kopma birim şekil değiştirmede %20,4, elastiklik modülünde % 36,7 ve tokluk değerinde % 69,6 artış bulunmuştur. En düşük performans ise çekme mukavemetinde %24,5, kopma birim şekil değiştirmede % 14,5, elastiklik modülünde %22,6 ve tokluk değerinde % 38,9 azalma ile % 5 HNT katkılı malzemede gerçekleşmiştir.

**Çizelge 4.1.** HNT katkısının epoksi üzerine % etkisi

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Etki	Birim Şekil Değiştirme (mm/mm)	% Etki	Elastiklik Modülü (GPa)	% Etki	Tokluk (KJ)	% Etki
% 0 HNT-Epoksi	62,81		0,0201		4,01		3630,5	
% 1 HNT-Epoksi	70,39	(+)% 12,1	0,0221	(+)% 10	4,77	(+)% 19	4825,2	(+)% 32,9
% 2 HNT-Epoksi	81,95	(+)% 30,5	0,0240	(+)% 20,4	5,48	(+)% 36,7	6158,5	(+)% 69,6
% 3 HNT-Epoksi	74,64	(+)% 18,8	0,0253	(+)% 25,9	4,98	(+)% 24,2	5628,1	(+)% 55
% 4 HNT-Epoksi	54,55	(-)% 13,2	0,0178	(-)% 11,4	3,63	(-)% 9,5	2729,5	(-)% 24,8
% 5 HNT-Epoksi	47,43	(-)% 24,5	0,0171	(-)% 14,9	3,09	(-)% 22,9	2215,9	(-)% 38,9

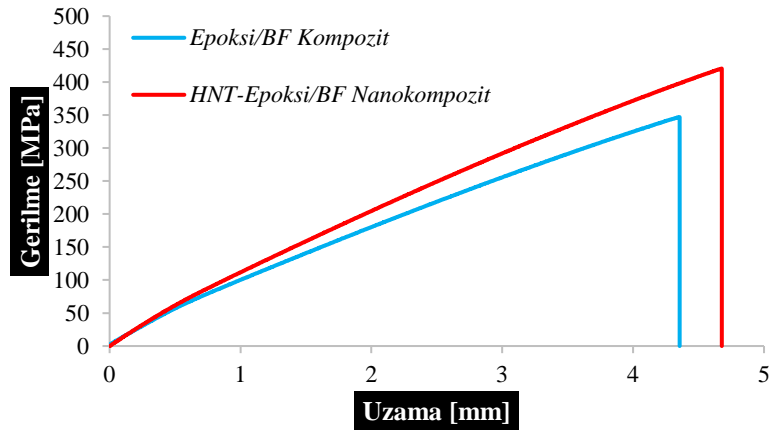
+: Artma - :Azalma

Literatürde yapılan çalışmalarda HNT katkısının epoksi polimer içerisinde dikkat çekici iyileştirmeler yapıldığı ifade edilmiştir. Alamri ve Low, farklı oranlarda HNT katkısı ile yaptığı çalışmada, en dikkat çekici sonucu % 1 oranda HNT katkısında bulmuştur (Alamri ve Low, 2012a). Yapılan benzer bir çalışmada ise % 6, % 8 ve % 10 ağırlıkça oranlarda birbirinden farklı önemli değişiklikler gözlenmiştir (Saif ve ark., 2016). HNT parçacıklarının epoksi içerisindeki homojen dağılımının önemi vurgulanan bir diğer çalışmada ise en iyi mekanik performansın ağırlıkça % 10 katkıda erişildiği belirtilmiştir (Deng ve ark., 2009). Çalışmalarda bu temel iyileşmeler, HNT 'nin yüksek fiziksel özelliklerinde dolayı, ilerleyen çatlak ve HNT parçacık kümeleri arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak meydana gelen çatlak durdurma, köprüleme, sapma ve bükme mekanizmalar ile ilişkilendirilmektedir (Wetzel ve ark., 2006; Deng ve ark., 2008).

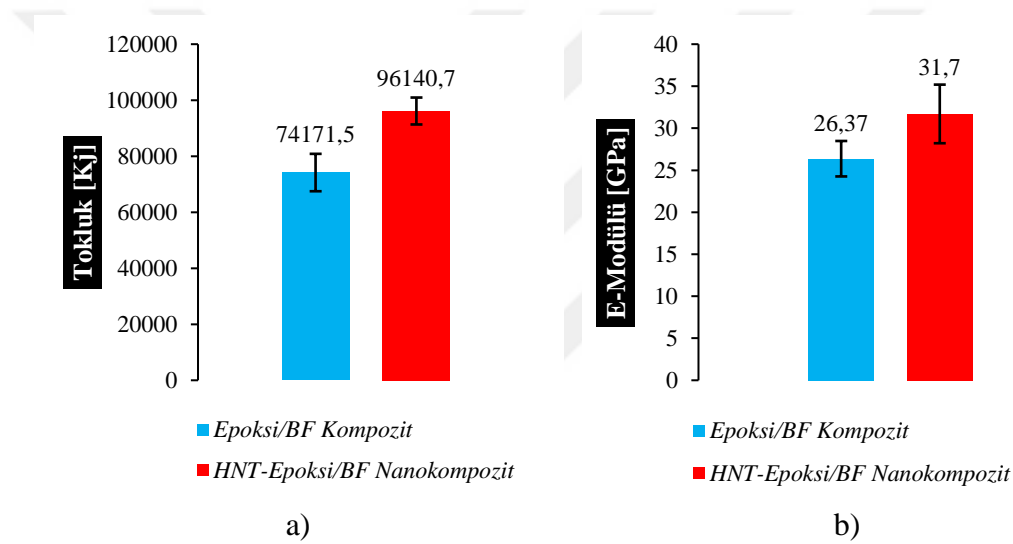
#### **4.2. Epoksi/BF Kompozit ve HNT-Epoksi/BF Nanokompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları**

HNT nano parçacıklarının epoksi polimer içerisinde farklı ağırlıkça oranlarda modifiye edilmesinden sonra performans olarak en iyi oran olan ağırlıkça % 2 HNT takviyesi, bazalt fiber kompozitin epoksi matris malzemesi içerisine taşınmıştır. Bu çekme testi ile beraber % 2 HNT katkısının bazalt fiber içinde meydana getirdiği mekanik

değişimler incelenmiştir. Ağırlıkça % 2 HNT katkısının bazalt fiber takviyeli epoksi matris kompozitlere etkisini göstermek amacıyla gerilme-uzama grafiği Şekil 4.3. 'te elastiklik modülü sütun grafiği Şekil 4.4. (a) 'da ve yuttuğu enerji verileri Şekil 4.4. (b) 'de verilmiştir. HNT katkısının olumlu etkisi bazalt takviyeli nanokompozit malzeme üzerinde de devam etmiştir. Çekme mukavemeti ve bu gerilme altındaki uzama sonuçları irdelendiğinde nanokompozit malzeme, epoksi/BF kompozite göre daha üstün özellik göstermiştir. Katkısız Epoksi/BF kompozitin çekme mukavemeti 346,9 MPa iken ağırlıkça % 2 HNT katkısı ile çekme mukavemeti nanokompozit malzemenin 420,4 MPa 'a ulaşmıştır (Şekil 4.3.). HNT parçacığının epoksi içerisindeki meydana getirdiği mukavemetlendirme mekanizmalarının fiber-matris ve tabakalar arasındaki arayüzeyle yayılması fiber takviyesinde böyle bir sonucu doğurmuştur. Bununla beraber, Şekil 4.4. (a) 'da ve Şekil 4.4. (b) 'de HNT katkısıyla bazalt fiber takviyeli nanokompozitin elastiklik modülünde ve kopuncaya kadar yuttuğu enerjide artış olduğu görülmektedir. Görüldüğü üzere HNT katkısının bazalt takviyesi üzerinde mekanik performansı hissedilebilir bir şekilde iyileştirmiştir. Bu iyileştirmelerin sayısal oranlarına Çizelge 4.2. 'den ulaşılabilir. HNT katkılı nanokompozit malzemede, katkısız malzemeye göre çekme mukavemetinde % 21,2, kopma birim şekil değiştirmede %7,4, elastiklik modülünde % 20,2 ve tokluk değerinde % 29,6 artış bulunmuştur. Bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Alamri ve Low yaptıkları çalışmada, % 1, % 3 ve % 5 katkı oranında fiber takviyeli kompozit mekanik özelliklerinde iyileşmeler tespit etmişler ve bunun sebebi olarak HNT parçacıklarının meydana getirdiği, fiber-matris arasındaki gelişmiş modifiyeli arayüzey bağlantıları olduğunu ifade etmişlerdir (Alamri ve Low, 2012a). Yen ve ark. karbon fiber takviyeli yaptıkları bir çalışmada % 5 HNT katkısının nanokompozit malzemenin mekanik özelliklerini % 25 oranında arttırdığını söylemişlerdir. Böyle bir sonucun ortaya çıkış sebebini HNT bakımından zengin bölgelerde meydana gelen tabakalar arası çatlakları köprüleme etkisiyle ilerleyişine engel olması ve durdurmasına bağlamışlardır. Ayrıca HNT kümelerinin önemli miktarda enerji emebilen ve hasar bölgelerini daha güçlü yapacak mekanizmalara sahip olduğundan da bahsetmişlerdir (Ye ve ark., 2011a).



Şekil 4.3. Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzeme çekme testi eğrisi



Şekil 4.4. Fiber takviyeli numunelerin mekanik özellik sütun grafikleri a) Elastiklik modülü b) Tokluk

Çizelge 4.2. HNT katkısının bazalt fiber üzerine % etkisi

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Etki	Birim Şekil Değişirme (mm/mm)	% Etki	Elastiklik Modülü (GPa)	% Etki	Tokluk (KJ)	% Etki
% 0 HNT-Epoksi/BF Kompozit	346,9		0,0435		26,37		74171,5	
% 2 HNT-Epoksi/BF Nanokompozit	420,4	(+)% 21,2	0,0467	(+)% 7,4	31,7	(+)% 20,2	96140,7	(+)% 29,6

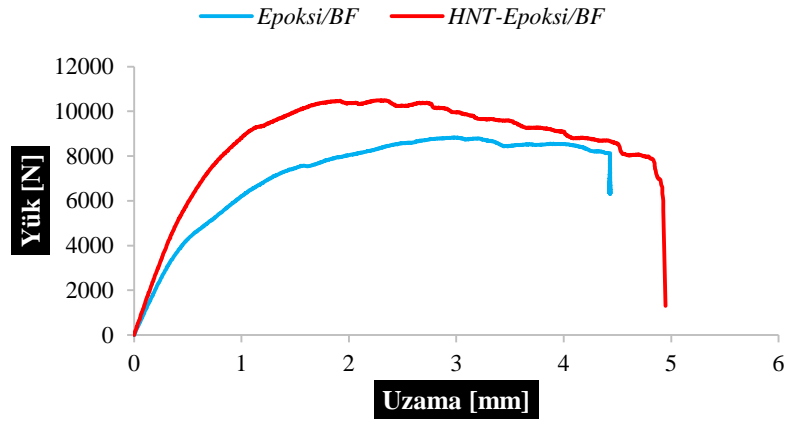
### 4.3. Tek Bindirmeli Cıvata Bağlı Epoksi/BF Kompozit ve HNT-Epoksi/BF Nanokompozit Malzemenin Çekme Testi Sonuçları

Tek bindirmeli cıvata bağlantılı numunelerin, yük taşıma kapasitelerini bulmak için bağlantıların çekme testi Instron 8801 marka test ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme test ünitesinde bağlı olan deney numuneleri, hasar meydana gelene kadar yük ile

yüklenmiştir. Böylece, numunelerin yük-uzama eğrileri elde edilmiştir. Yapılan deneylerde tek değer olarak; cıvata tork değeri 15 Nm, E/D oranı 3 ve W/D oranı 6 alınmıştır. Şekil 4.5. cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit için normal ortam, 2. ay, 4. ay ve 6. ay sonundaki yük-uzama eğrilerini göstermektedir. Elde edilen eğriler incelendiğinde her test sonunda cıvata bağlı HNT katkılı nanokompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi ve bu yük altındaki uzama miktarı katkısız kompozit malzemeye göre yüksek çıkmıştır. Şekil 4.5. (a) 'da yaşlandırılmamış, normal ortam deneyi sonucunda, cıvata bağlı epoksi/BF kompozit malzemenin maksimum yük taşıma kapasitesi 8835,83 N iken, HNT katkısı ile nanokompozit malzemenin maksimum yük taşıma kapasitesi %18,8 artış göstererek 10499,78 N olmuştur. Bununla beraber, tam hasar meydana gelene kadar yük altındaki cıvatanın yatak içerisindeki yer değiştirmesi (uzama) de kompozit malzemede 4,43 mm iken nanokompozit malzemede %11,7 'lik artışla 4,95 mm olarak gerçekleşmiştir. Tuzlu su ortamında 2 ay bekletilip yaşlandırılan numunelerin yük uzama eğrisi incelendiğinde (Şekil 4.5. (b)), epoksi/BF kompozit malzemede normal ortam sonucuna göre maksimum yük %26,5 azalarak 6491,35 N, HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemede ise %27,6 azalma ile 7600,1 N olarak tespit edilmiştir. Yük altındaki uzama miktarları incelendiğinde, cıvata bağlı epoksi/BF kompozit malzeme normal ortam sonuçlarına göre %47 artışla 6,51 mm de tam hasara uğrarken, HNT-epoksi/BF nanokompozit malzeme %43 artışla 7,1 mm de tam hasara uğramıştır. Numunelerin 4. ay sonundaki eğrileri incelendiğinde (Şekil 4.5. (c)), numuneler üzerinde ani yük düşüşleri göze çarpmaktadır. Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit malzeme de 4. ayın sonunda, %37,1 oranda bir yük kaybı ile yük taşıma kapasitesi 5561,41 N iken HNT-epoksi/BF nanokompozitte bu düşüş %39,8 ile gerçekleşmiş ve yük kapasitesi 6322,51 N olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte yük altındaki numunelerde cıvatanın yatak içerisindeki yer değiştirme miktarları da artmaya devam etmiştir. En son yaşlandırma periyodu olan 6. ay sonunda eğriler incelendiğinde (Şekil 4.5.(d)), numunelerdeki ani düşüş ve boyun vermeler net olarak görülmektedir. Epoksi/BF kompozit malzemede yük taşıma kapasitesinde %46,5 oranda keskin bir düşüş yaşanarak 4730,28 N olmuşken, nanokompozit malzemede ki düşüş %45,3 ile 5740,58 N 'da son bulmuştur. Bu durumun, cıvata bağlı numunelerin 6. ay sonunda Tuzlu suyun etkisiyle yük taşıma kapasitelerinde neredeyse yarı yarıya bir kayıp oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca, cıvatanın yatak içerisindeki yer değişimindeki artış bu zaman periyodu sonunda da devam etmiştir.

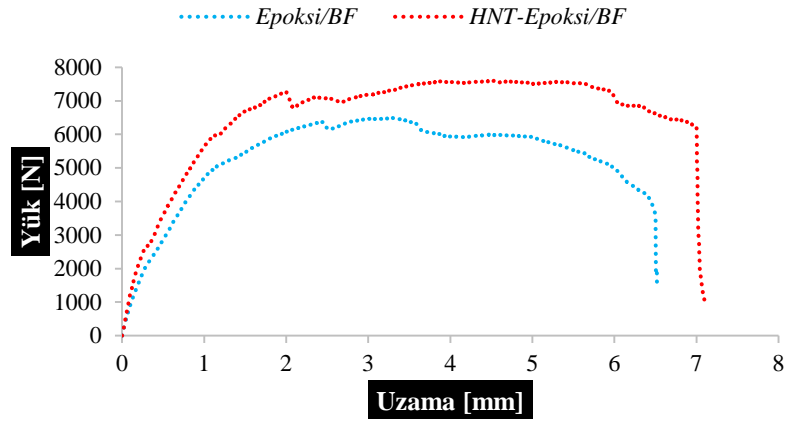
a)

Normal Ortam



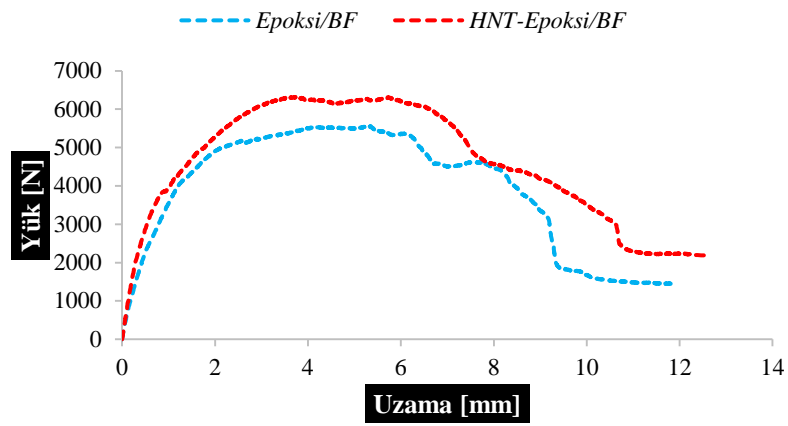
b)

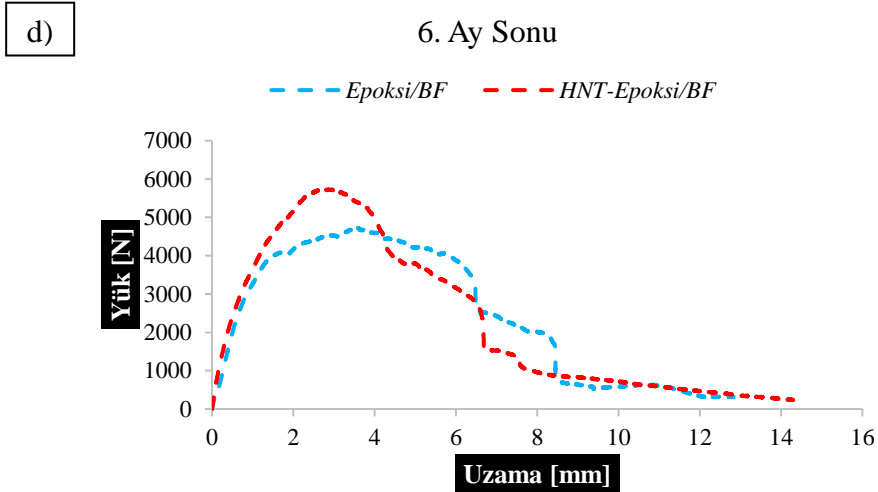
2. Ay Sonu



c)

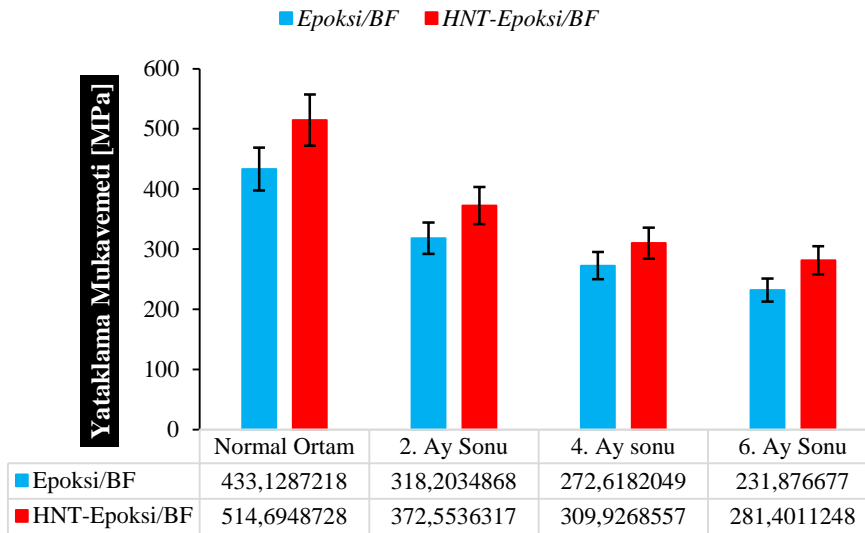
4. Ay Sonu





Şekil 4.5. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemenin yük-uzama eğrileri a) Normal ortam b) 2. ay sonu c) 4. ay sonu d) 6. ay sonu

Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin, mekanik bağlantı sisteminin delik duvarları üzerine basma yönünde uyguladığı gerilmenin bir ölçüsü olan yataklama gerilmelerinin maksimum değerleri Denklem 3.2 'de verilen eşitliğe göre hesaplanmış ve Şekil 4.6. 'da verilmiştir.



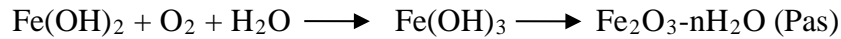
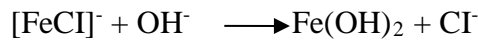
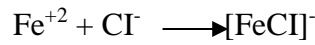
Şekil 4.6. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemenin normal ve yaşlandırma sonrası yataklama mukavemetleri

Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit numunelerin her yaşlandırma zaman periyotları sonunda yatak dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. HNT katkısı normal ortam deneylerinde yataklama mukavemetini yüksek tutmayı başarmasının yanında her yaşlandırma periyodu sonunda bağlantının yatak mukavemet değerlerini diri tutmaya

çalışmaktadır. Tuzlu suyun etkilediği epoksi/BF kompozitlerde yatak dayanımı düşüşü fazla olurken, HNT katkısı bu düşüş karşısında direnmekte ve yaşanan mukavemet düşüşlerini oran olarak azaltmaktadır. 6. Ay sonunda HNT katkılı ve katkısız numunede mukavemet düşüşü hemen hemen aynı oranda olmakta ve değer olarak nanokompozit malzeme de yine yüksek seyrettiği gözlenmiştir.

Bir kompozit malzeme iki farklı arayüzey bölgesine sahiptir. Bunlar tabakalar arasındaki arayüzey ve fiber/matris arasındaki arayüzey bağlantılarıdır. Nanokompozit malzemedeki HNT kümeleri bu arayüzeyler arasına yerleşerek, fiber-matris arasındaki ve tabakalar arasındaki temas yüzeylerini arttırmakta ve bu sayede katkısız malzemeye göre mukavemet artışı sağlamaktadır. HNT nano parçacıkları bu arayüzeylerde meydana gelen gerilmeler sonucu oluşan çatlak ilerlemelerini saptırması ve köprüleme etkisiyle çatlak ilerlemesini durdurmaya yönelik etkilere sahiptir. HNT parçacıklarının kırılması veya sıyrılması ekstra enerji gereksinimini arttıracığı için malzemenin çatlak başlama ve ilerleme direncini artırarak tokluk özelliklerini iyileştirmektedir (Alhuthali ve Low, 2013b). HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemenin, katkısız Epoksi/BF kompozit malzemeye göre mukavemet artışının sebebi bu şekilde açıklanabilir. Bunun dışında, her zaman dilimi sonunda mukavemet düşüşü devam etmiştir. 6. Ayın sonunda katkısız Epoksi/BF kompozit malzeme % 46 mukavemet düşüşü yaşanırken, HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzeme % 45 mukavemet düşüşü yaşanmıştır (Şekil 4.6.). Tuzlu su içerisinde bırakılan numunelerde, iki farklı bozulma mekanizması devreye girmektedir. İlki, matris ve tuzlu suyun temasından kaynaklı epoksi reçinenin bozulması, ikincisi ise malzeme üzerindeki boşluklar ve çatlaklar aracılığıyla nemin veya tuzlu suyun fiberlere kadar nüfuz etmesiyle oluşan fiberdeki bozulmadır (Yan ve Chouw, 2015). Absorbe edilen tuzlu suyun Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağlarıyla oluşan kimyasal reaksiyonlar, atom zincirlerinin hareketliliğini arttırmaktadır. Bunun neticesinde kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde zayıflama, epoksi de ise polimerizasyon (polimerleşme, plastikleşme) meydana gelmektedir (Prolongo ve ark., 2012). Bu durum, civatanın yatak içerisindeki yer değiştirmesini diğer bir ifadeyle uzamasını arttırmıştır. Emilim sırasındaki, tuzlu su içerisine bırakılan malzemeye kanallar, boşluklar ve çatlaklar yoluyla H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> molekülleri ve Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> iyonları epoksi matris içerisine nüfuz eder ve matris, fiber ve fiber/matris arayüzeyleri ile etkileşime girer. Bununla beraber aynı anda fiberden dışarıya Ca, Mg, Al ve K vb. içeren bazı bileşenler ortam içinde çözülür ve bu elementler arayüzeylerle temas halindeki ortamdaki tuzlu su ile birleşmiş bir formdadır (Lund ve Yue, 2008). Bu çözümler kompozitin mikro yapısını değiştirmekte

ve fiber kopmalarına yol açan çatlak formlarının oluşmasına sebep olmaktadır ve fiber/matris arasındaki bağlanma etkisini azaltmaktadır. Bozulma mekanizmasında en etkin rol oynayan kimyasal reaksiyon  $Fe^{2+}$  ve  $Cl^-$  arasındaki reaksiyondur.



Kompozit malzemelerin arayüzeyleri üzerindeki meydana gelen reaksiyonlar sonucu oluşan pas, su emilimini arttırarak epoksi matrisin genişlemesine sebep olacak ve gerilme altında çatlak oluşumunu hızlandıracaktır (Wei ve ark., 2011a). Bu da malzemenin yataklama mukavemetinin azalmasına sebep olan durumların başında gelmektedir.

#### 4.3.1. Hasar bölgesinin makro görüntüleri

Kompozit malzemelerin mekanik bağlantı sonucu oluşan hasarlar yataklama, kopma, yarıma, kayma ve yırtılma hasarı olarak başlık 2.4. 'de ifade edilmiştir. Literatürde her bir hasar türü, numunelerin geometrik özelliklerine, mekanik bağlantı türüne, fiziksel bağlantı tipine göre değiştiği hakkında çalışmalar mevcuttur. Bu parametrelerin sabit tutulduğu sadece malzeme ve tuzlu su yaşlandırmasının etkisinin incelendiği çalışmamızda ortaya çıkan hasarlar HNT katkısı ve yaşlandırılmış ortamın etkisiyle farklı tiplerde meydana gelmiştir. Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin cıvata bağlantılı çekme testinde yük taşıyana kadar yüklenmesi sonucunda numunelerde meydana gelen hasarlar Şekil 4.7. 'de gösterilmiştir. Yaşlandırılmamış koşullarda meydana gelen hasarda, Epoksi/BF kompozit malzemede yataklama ve azda olsa kopma hasarına sebep olacak bir çatlak ilerlemesinin varlığı gözlemlenirken, HNT katkısı ile nanokompozit malzemede net bir şekilde yarıma hasarı meydana geldiği görülmektedir. HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemenin tam hasara uğrayana kadar taşıdığı yük kapasitesi ve yataklama mukavemeti düşünüldüğünde daha fazla bir enerji emilimi yaptığı ve bunun sebebinin ise HNT katkısından kaynaklandığı açıkça görülebilmektedir. Tuzlu su içeren yaşlandırılmış ortamda bekletilen numunelerin 2. ay sonundaki hasar görüntülerinde normal ortama göre hasar tiplerinin değiştiği görülmektedir. Her iki malzemede de kopma hasar tipi meydana gelmiştir. 4. ay sonundaki test sonuçlarında, diğer hasar tiplerinden farklı olarak epoksi/BF kompozitte kayma hasarı gözlenirken, nanokompozitte yırtılma hasar başlangıcı ve kayma hasarının



---

**Normal Ortam**

---



---

**2. Ay sonu**

---



---

**4. Ay sonu**

---



---

**6. Ay sonu**

---



Şekil 4.7. Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin çekme testi sonrası hasar görüntüleri

aynı anda oluşumu izlenmiştir. Bu durum, 6. ay sonunda yerini kompozit malzemede yine kayma hasarı tipinde devam ederken, nanokompozit malzemede yırtılma hasarı olarak meydana gelmiştir. Sonuç olarak, literatürde yapılan çalışmalarda, araştırmacılar bağlantı modellerinin (tek bindirmeli, çift bindirmeli, tek cıvatalı, çoklu cıvatalı vb.), bağlayıcı tiplerinin (pim, cıvata, perçin vb.) ve geometrik parametrelerin (E/D oranı, W/D oranı, sıkıştırma torku vb.) hasar tipleri üzerindeki etkilerini araştırıp sınıflandırırken, Şekil 4.7. 'deki hasar görüntüleri incelendiğinde, hasar tiplerini değiştiren diğer etkenler arasında, nano parçacık takviyeleri ve yaşlandırma sürelerinin oluşturduğu etkiler olduğu ortaya çıkmıştır.

#### **4.4. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları**

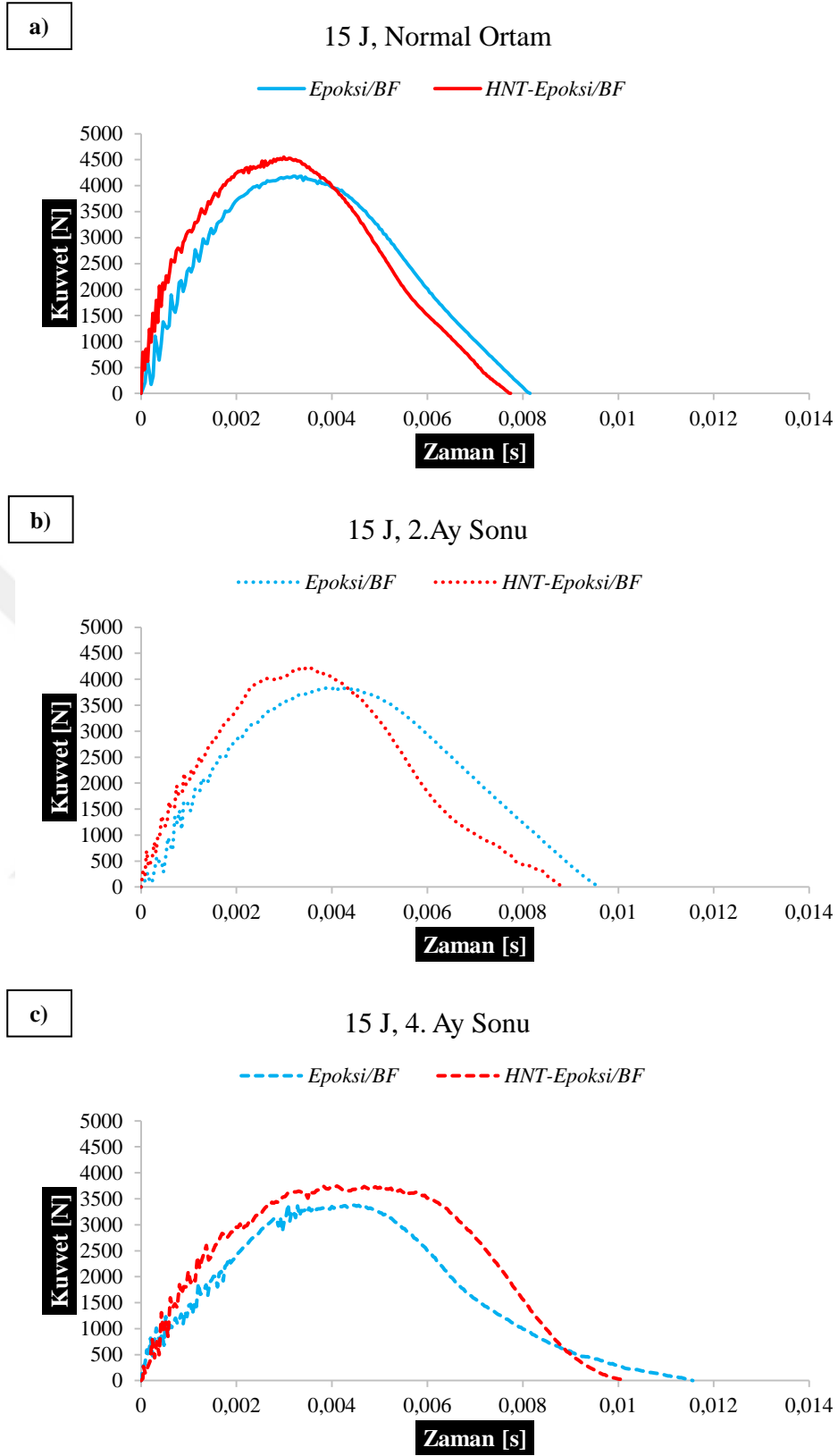
Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testi deneyleri, oda sıcaklığında 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Cıvata bağlantılı kompozitlerin montajı veya demontajı sırasında, bir iş parçasının veyahut bir iş aletinin bağlantı üzerine düşmesi, çarpması veya temas etmesi gibi meydana gelebilecek iş kazalarına karşı, malzemenin dinamik davranışının araştırılması için bu darbe testi yapılmıştır. Delik kalitesi, bağlantının ömrü ve sağlığı açısından önemli tasarım aşamalarından biridir. Delik üzerine veya yakınına gelebilecek ani yükler sonucu oluşan hasarlar, bağlantının ömrünü, kalitesini doğrudan etkilemektedir. Yapılan bu düşük hızlı darbe deneyinde, vurucu uç; hem cıvata bağlantısı üzerine hem de cıvata bağlantısına temas etmeyen deliğe en yakın kompozit malzeme üstüne olmak üzere iki farklı bölge üzerine düşürülmüştür. Darbe deneyleri bu iki farklı bölge için normal ortamda yaşlandırılmamış numuneler, 2., 4., ve 6. ay tuzlu su ortamında bekletilmiş numuneler için en az üçer tekrarlı olarak şekilde yapılmıştır.

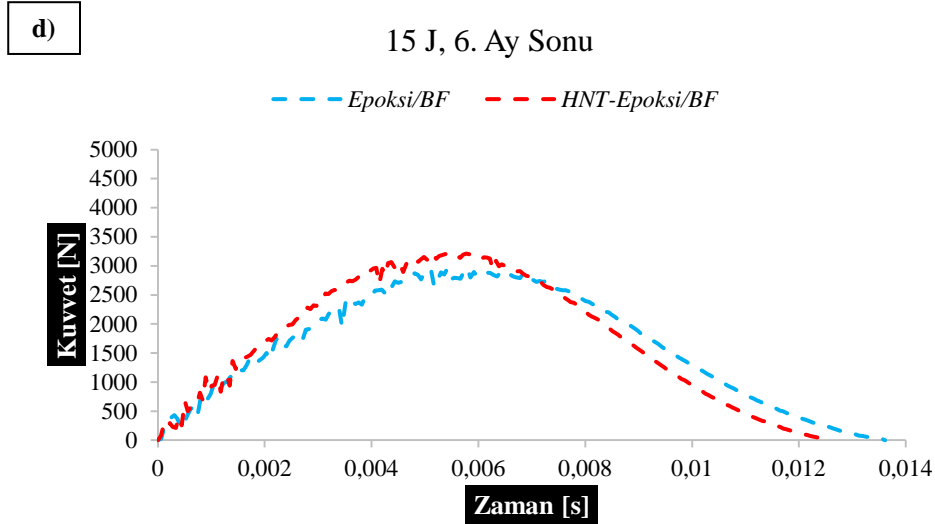
##### **4.4.1. Cıvata üstü darbe (CÜD) testi sonuçları**

###### **4.4.1.1. Cıvata üstü darbe (CÜD) kuvvet-zaman grafikleri**

Kuvvet-zaman eğrileri iki farklı bölgeden meydana gelmektedir. Birinci bölge, vurucunun malzemeye teması ile başlamakta ve gelen enerjinin hepsini malzemeye yüklediği an veya maksimum darbe yüküne erişildiği noktada son bulmaktadır. İkinci bölge ise, birinci bölgenin son bulunduğu noktadan yani maksimum darbe yükünün olduğu andan vurucunun malzeme üzerindeki temasının son bulunduğu ana kadarki bölgedir. Bu iki bölge kuvvet-zaman grafiklerinin yorumlanmasında kolaylık göstermektedir.

Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesindeki cıvata ustü darbe deney sonucunun kuvvet-zaman eğrileri Şekil 4.8. 'de gösterilmektedir. Eğrilerin birinci bölgeleri irdelendiğinde, normal ortam sonucunda (Şekil 4.8. (a)) ve yaşlandırma zaman periyotları sonunda (Şekil 4.8. (b), (c), (d)) nanokompozit malzemelerin darbe kuvvetleri katkısız malzemeye göre yüksek seyretmiştir. Yaşlandırmanın 2. ay zaman diliminde (Şekil 4.8. (b)) darbe kuvvetlerinde düşüş gözlenirken, 4. ve 6. ay zaman dilimlerinde de (Şekil 4.8. (c), (d)) bu düşüş devam etmiştir. 4. ve 6. ay sonunda malzemeler arasındaki darbe kuvveti farkı da azalmıştır. Birinci bölgede, eğrilerin eğimi malzemelerin temas rijitliklerinin bir ifadesidir. Temas rijitliği normal ortam (Şekil 4.8. (a)) ve 2. ay sonu (Şekil 4.8. (b)) deneylerinde HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemede Epoksi/BF kompozit malzemeye göre daha yüksek çıkarken, bu durum 4. ay ve 6. ay sonunda (Şekil 4.8. (c), (d)) hemen hemen benzer seyretmiştir. İkinci bölgede, vurucu ile kompozit malzeme etkileşim süresi, normal ortam ve yaşlandırma zamanları sonunda epoksi/BF kompozit malzemede yüksek çıkmıştır. Gelen enerjinin numuneye tümüyle aktarılması numuneler içerisinde yeni yüzeylerin oluşmasına (matris çatlağı, fiber kopması, tabaka ayrılması vs.) sebep olmaktadır. Katkısız kompozit malzemede vurucunun malzemeye temasından, gelen enerjinin tümünün malzemeye iletilmesi sırasında meydana gelen hasarlar sonucu zayıflayan malzemede vurucunun temas süresi katkısız kompozit malzemede nanokompozit malzemeye göre daha fazladır. Bu süre, yaşlandırılmış süre sonlarında yapılan testlerde artarak devam etmiştir. Yani, darbe sırasında kompozit malzemede nanokompozit malzemeye göre oluşan hasarların fazla olduğu sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, vurucu ve kompozit malzeme temas süresi ilişkisinin yaşlandırma süresi ile alakalı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Kuvvet-zaman eğrileri üzerinde meydana gelen titreşim hareketleri malzemede matris hasarlarının, fiber kopmalarının ve tabaka ayrılmalarının meydana gelebileceğinin habercisidir. Büyük oranda meydana gelen ani düşüşler fiber kırılması veya sıyrılması olarak meydana geldiği ifade edilmektedir (Kara, 2012; Demir, 2017). Fakat 15 J enerji seviyesi için buradaki beklenti daha çok matris çatlaması üzerinde yoğunlaşmıştır. İlgili hasarın görüntüsü başlık 4.4.1.4. de verilmiştir.

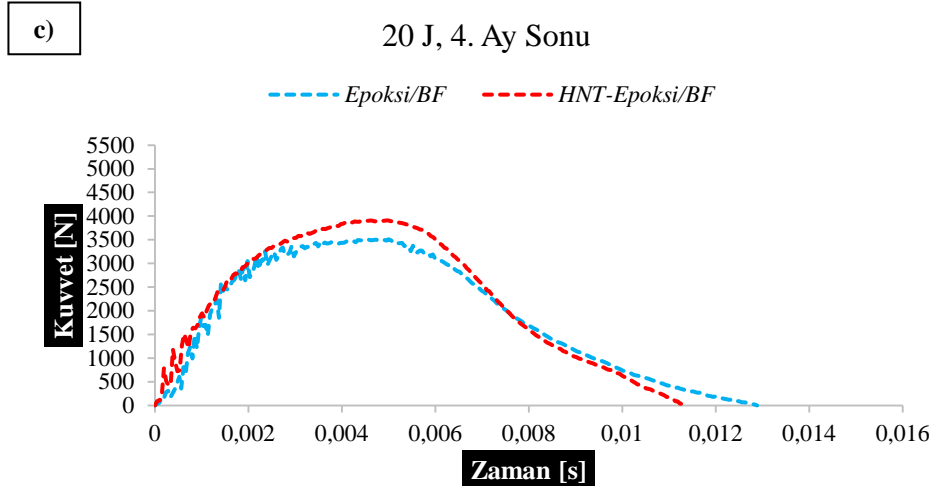
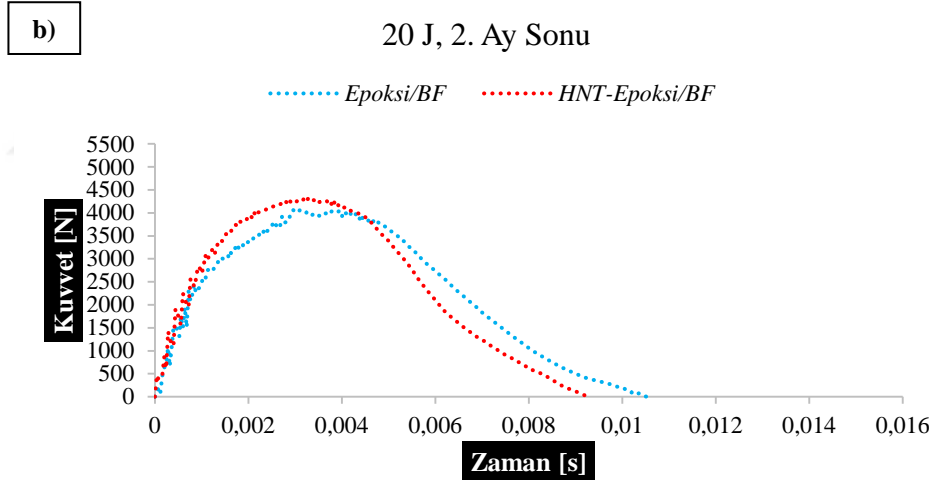
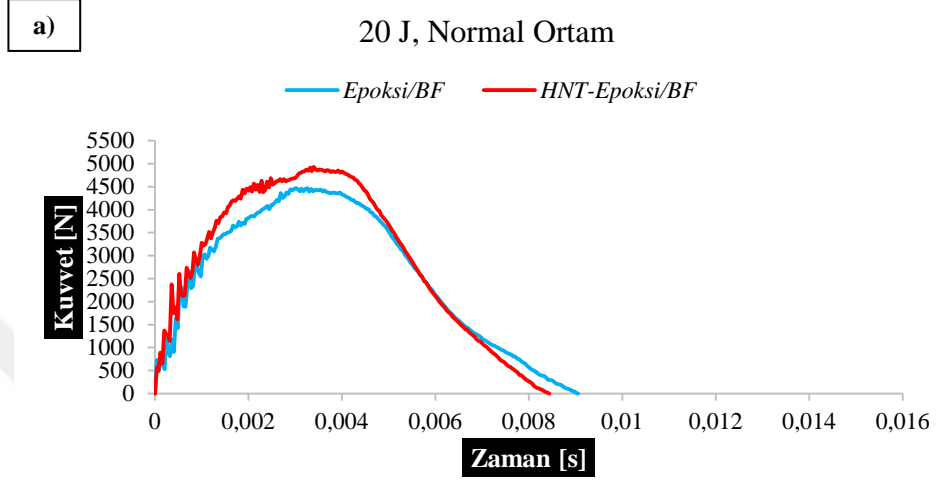


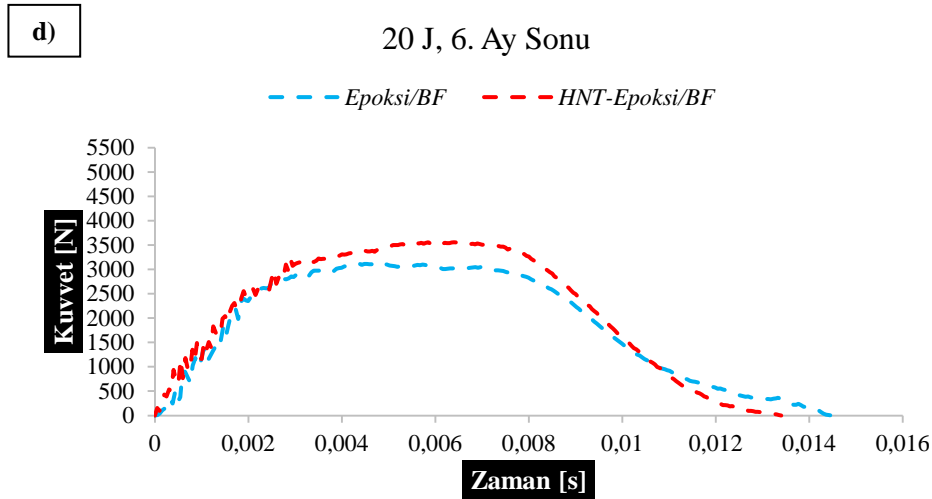


Şekil 4.8. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde CÜD kuvvet-zaman grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Şekil 4.9. kompozit ve nanokompozit malzemelerin 20 J enerji seviyesindeki kuvvet-zaman grafikleri yaşlandırılmış ortam sonuçları ile beraber gösterilmektedir. Şekil 4.9. (a) 'da yaşlandırılmamış numunede 20 J enerji seviyesinde kompozit malzemenin taşıdığı darbe kuvveti 4471 N iken HNT katkısı ile nanokompozit malzemedeki darbe kuvveti 4929 N olarak bulunmuştur. Vurucunun malzemeler üzerine temasından, gelen enerjinin malzemeye aktarıldığı andan itibaren meydana gelen hasarlar darbe kuvvetinde azalmalar ve artışlar meydana getirmiştir. Bunun yanında HNT katkısı nanokompozit malzemede darbe yükünü arttırmıştır. Temas süreleri incelendiğinde, kompozit malzemede meydana gelen hasarlardan dolayı nanokompozit malzemeye göre vurucunun malzemeye teması daha fazla çıkmıştır. Şekil 4.9. (b) 'de 2 ay tuzlu suda yaşlandırılmış numunelerde taşınan darbe kuvvetleri kompozit malzemede % 8,7 düşüş göstererek 4078 N, nanokompozit malzemede % 12,3 düşüş göstererek 4322 N seviyelerine gerilemiştir. 2. ay sonunda artan hasarlar neticesinde kompozit malzemedeki temas süresi nanokompozit malzemeye göre fazladır. Her iki malzemenin de temas süresi şartlandırılmamış numunelere göre artmıştır. 4. ay sonunda şartlandırılmış numunelerde (Şekil 4.9. (c)) darbe kuvvetlerinin azalması devam etmekte sırasıyla kompozit ve nanokompozit malzemede 3510 N ve 3908 N olarak bulunmuştur. Temas süreleri, artan hasar miktarıyla beraber artışlarını devam ettirmiştir. Şekil 4.9. (d) 'de 6 ay şartlanmış numunelerde darbe kuvvetlerinde en fazla düşüş meydana gelmiştir. Kompozit malzemede % 29 düşüş ile 3146 N darbe kuvveti bulunurken, nanokompozit malzemede % 27 ile 3557 N darbe kuvveti bulunmuştur. Temas süresi, 6 ay şartlandırma sonucu en uzun zamana ulaşmış kompozit malzemede 0,0145 s iken nanokompozit malzemede

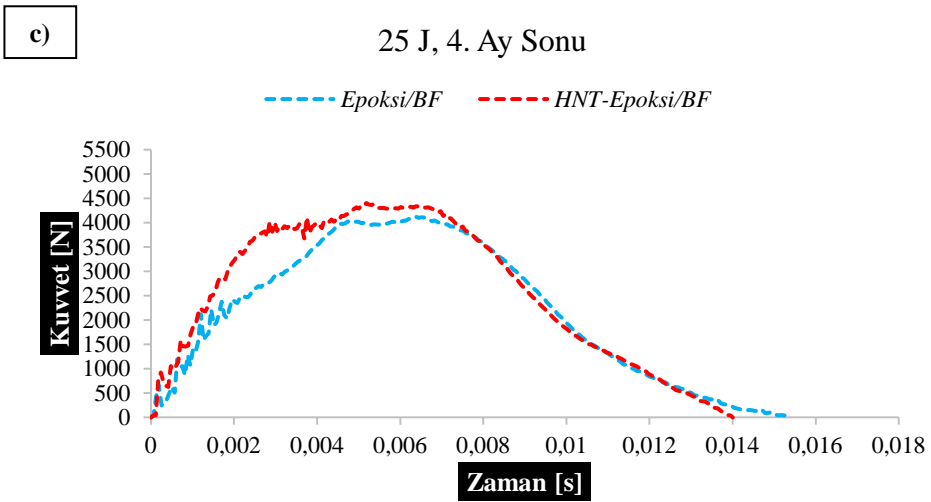
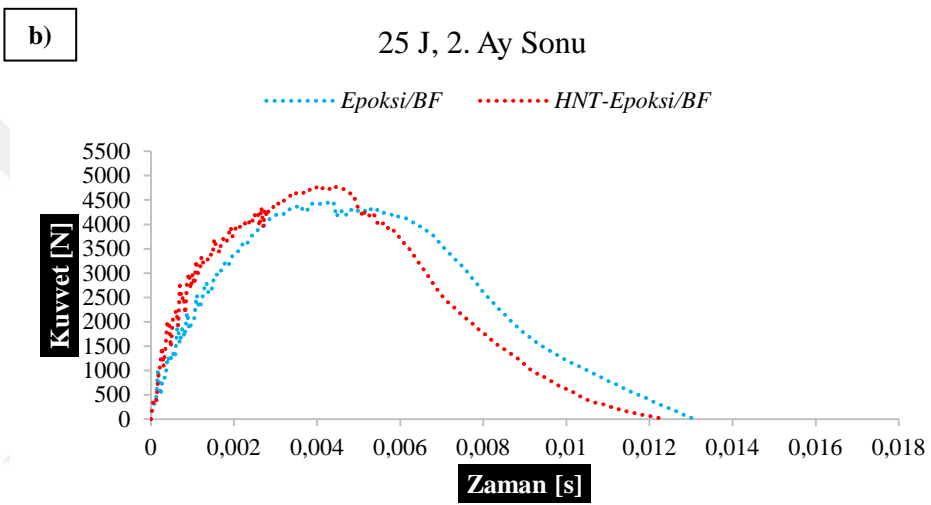
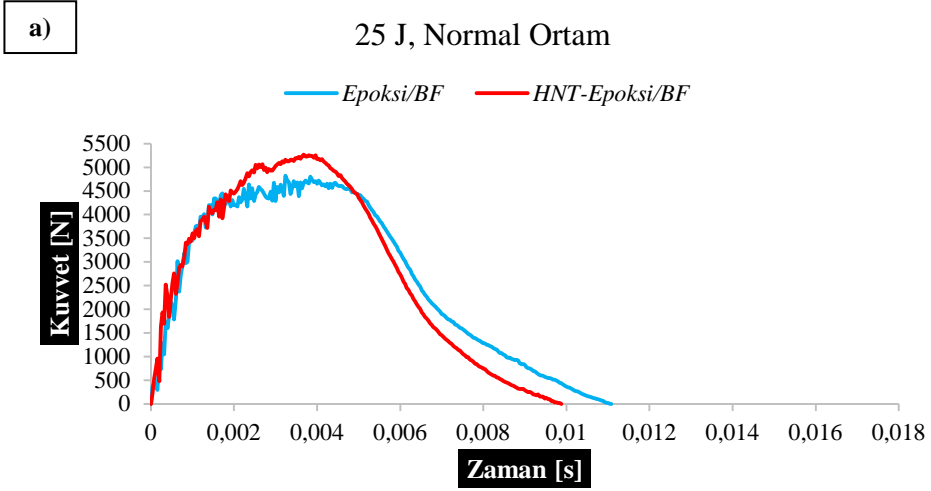
0,0134 s olduğu görülmektedir. Numunelerin temas rijitliklerinin ifadesi olan eğrilerin eğimleri incelendiğinde, tüm sonuçlarda çok az bir farkla nanokompozit malzemelerin temas rijitliğinin yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.9. (a), (b), (c), (d)). Yaşlandırma süresi arttıkça malzemelerin taşıdığı yük azalırken, temas sürelerindeki artış dikkat çekmektedir.



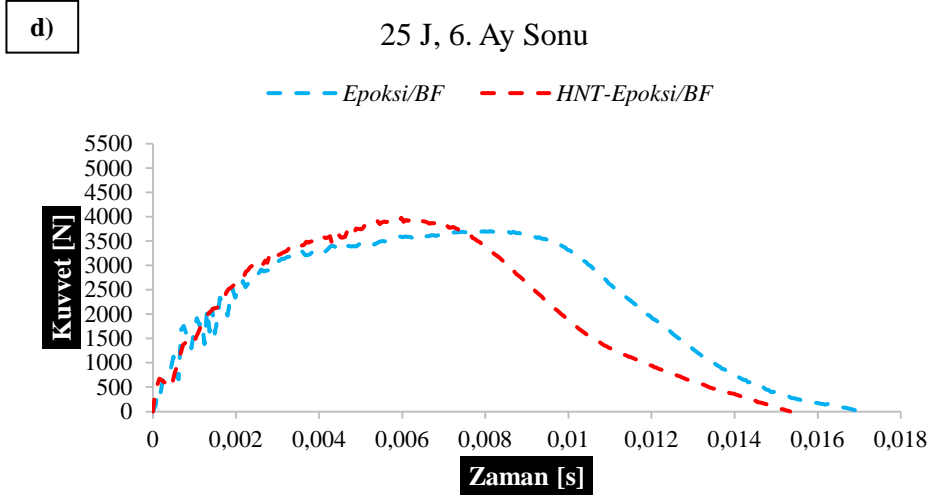


Şekil 4.9. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesinde CÜD kuvvet-zaman grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin cıvata üstü darbe deneylerindeki son enerji seviyesi olan 25 J ‘deki kuvvet-zaman grafikleri Şekil 4.10. ‘daki gibidir. Şekil 4.10. (a) ‘da yaşlandırılmamış numunelerin eğrisi incelendiğinde bu zamana kadarki en yüksek darbe yüklerinin elde edildiği görülmektedir (4822 N ve 5270 N). Bu yükler altında malzemede meydana gelen hasarlar neticesinde vurucunun kompozit malzeme üzerindeki temas süresi 0,01108 s iken nanokompozit malzemedeki temas süresi 0,00988 s olarak ölçülmüştür. Bu süreler kompozit malzemede meydana gelen hasarın daha fazla olduğunu göstermektedir. Şekil 4.10. (b) ‘de 2 ay tuzlu suda yaşlanmış numunelerde darbe yüklerinde azalmanın yanında temas sürelerindeki artışta devam etmiştir. Şekil 4.10. (c) ve (d) ‘de yine yaşlandırma süresinin artmasıyla numunelerdeki azalan darbe kuvvetleriyle artan temas süreleri, numunelerde ciddi hasar yoğunluk artışlarının meydana gelebileceğinin bir göstergesidir. Temas rijitliğinin kıyası ele alındığında nanokompozit malzemenin üstün bir performans sergilediği görülmektedir (Şekil 4.10. (a)-(d)). Ayrıca, numunelerin artan şartlandırma sürelerine bağlı olarak darbe yüklerindeki azalmayla, hasar yoğunlukları artmıştır, bu da eğrilerdeki salınım hareketlerinin fazlalığı ile doğrulanmaktadır.

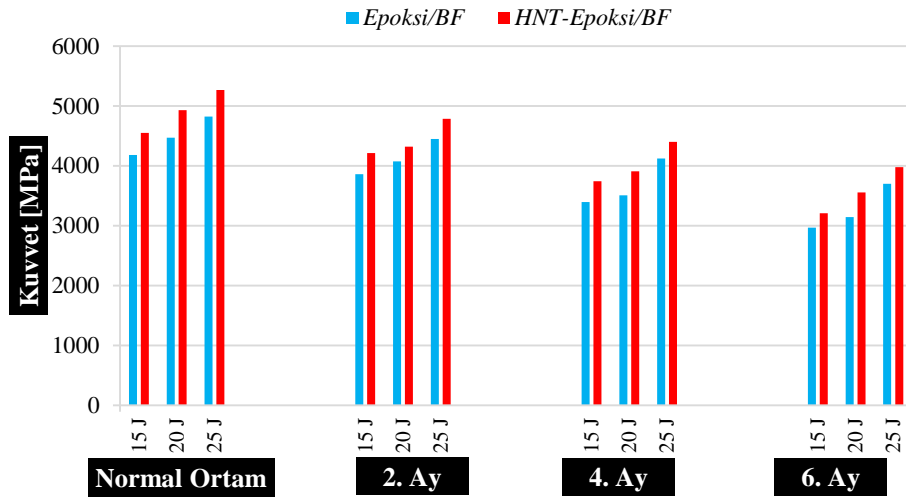






Şekil 4.10. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 25 J enerji seviyesinde CÜD kuvvet-zaman grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin normal ortam ve diğer yaşlandırılmış ortam CÜD deneylerinde 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerindeki taşıdığı darbe kuvvetleri Şekil 4.11. 'de verilmiştir. Verilen sütun grafiği,



Şekil 4.11. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde ve farklı yaşlandırılmış zaman periyotlarındaki CÜD kuvvetleri

tüm enerji değerleri ve farklı zaman sonunda yapılan deneylerin kendi aralarında mukayesesine imkân tanımaktadır. Her deney periyodu kendi içerisinde değerlendirildiğinde, artan darbe enerji seviyesi darbe kuvvetlerini arttırmıştır. Genel duruma bakıldığında, her iki kompozit malzemenin taşıdığı darbe kuvvetleri normal ortamdaki 6. ay sonuna kadar düşüş göstermektedir. Darbe kuvvetlerindeki bu düşüş, aynı zamanda yaşlandırılmış numunelerin enerji seviyelerini kendi aralarında kıyaslanmasıyla da meydana gelmiştir. Kompozit numuneler kendi arasında kıyaslandığında,

nanokompozit malzemenin darbe kuvveti taşıma kapasitesi kompozit malzemeye göre istikrarlı bir performans göstermiştir. Bu da nanokompozit malzemede HNT etkisiyle, darbe kuvvetleri altında hasar yoğunluğunun artması için daha fazla bir enerjiye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bunun neticesi de darbe yükünün kompozit malzemeye göre artması olarak sonuçlanmıştır.

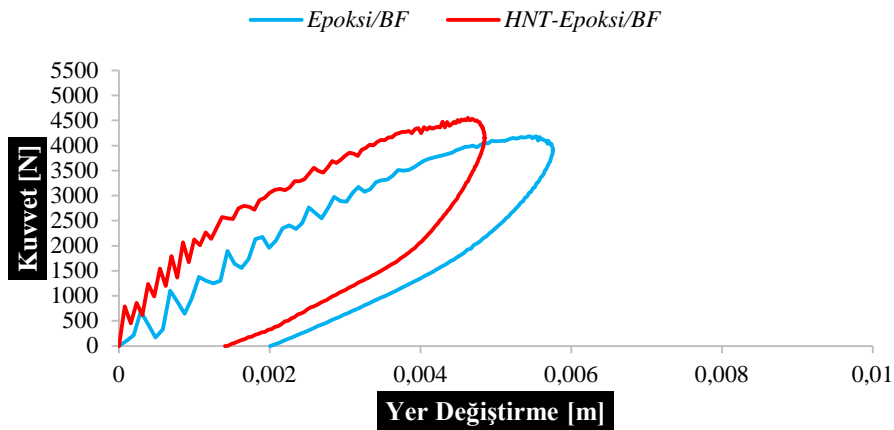
#### 4.4.1.2. Cıvata üstü darbe (CÜD) kuvvet-yer değiştirme grafikleri

Kuvvet-yer değiştirme grafikleri vurucunun numune üzerine temasıyla başlayan kuvvetin numune üzerinde meydana getirdiği çökmenin bir ifadesidir. Eğriler, kuvvetin maksimum noktaya ulaştığı bir kısma, akabinde ise kuvvetin boşalmasını ifade eden azalan bir kısma sahiptir. Eğrinin maksimum kuvvete ulaştığı kısmın eğimi, darbe kuvveti altındaki numunelerin eğilmeye karşı direncini ifade eden eğilme rijitliğini vermektedir. Ayrıca, bu iki kısım arasında kalan bölge ise numunelerin yuttuğu enerjinin bir göstergesidir. Eğrilerin en büyük yer değiştirme noktasından kuvvet eksenine paralel, yer değiştirme eksenini dik kesen doğru ile yük boşalma eğrisi altında kalan alan ise geri sıçrama enerjisini ifade etmektedir. Şekil 4.12. epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesindeki cıvata üstü darbe (CÜD) deney sonucunun kuvvet-yer değiştirme eğrisini göstermektedir. Yaşlandırılmamış numunelerin normal ortam sonucu yapılan deneyinde (Şekil 4.12. (a)) meydana gelen eğride, numuneler üzerinde maksimum darbe kuvvetine erişene kadar hasarları temsil eden bir takım salınımlar gerçekleşmiştir. Eğri üzerindeki hasarların yoğunluğu epoksi/kompozit malzemede daha hissedilebilir olduğundan, darbe yüklerinin maksimum olduğu noktada yer değiştirme miktarı kompozit malzemede daha fazladır. Ayrıca, gelen kuvvet ile malzemenin yer değiştirmeye karşı bir direnç ölçüsü olan eğilme rijitliği de nanokompozit malzemede daha yüksek seyretmiştir. Eğri üzerinde, hasarları temsil eden salınımlar kompozit malzemede daha derin olduğu görülmektedir. Numunelerin yuttuğu enerjiler kıyaslanırsa da katkısız kompozit malzemenin yuttuğu enerjinin nanokompozit malzemeye göre daha fazla olduğu, bununla birlikte nanokompozit malzemenin geri sıçrama enerjisinin yüksek olduğu sonucu çıkmaktadır. Numunelerin yuttuğu ve geri sıçramaya verdiği enerjiler, enerji-zaman grafikleri başlığı altında daha detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Numunelerin tuzlu suda 2 ay kadar yaşlandırılması sonucu (Şekil 4.12. (b)) hasar kaynaklı yer değiştirme her iki malzemede artmıştır. Eğilme rijitliği nanokompozit malzemede yüksek çıkmıştır. Maksimum darbe kuvveti altında en yüksek şekil değişimi katkısız kompozit malzemede meydana gelmiştir. Şekil 4.12. (c) ve Şekil 4.12. (d) ‘ de 4

ve 6 ay yaşlandırma sonucu kuvvet altındaki yer değiştirme miktarları yaşlandırmaya bağlı olarak artmaya devam etmiştir. Numunelerin 4. ay itibariyle eğilme rijitliği davranışlarında değişiklik meydana gelmiştir. 6. ay yaşlandırmasında ise numuneler neredeyse benzer eğilme rijitliğinde davranmışlardır. Ayrıca hem 4. ay hem de 6. ay sonunda rijitlik eğrisi üzerinde meydana gelen salınım yoğunluğunda buna bağlı olarak hasar miktarında artış olduğu gözlenmiştir. Genel anlamıyla, yaşlandırılmış ortamda bekleme süresi arttıkça malzemelerin eğilme rijitlikleri de azalmıştır. Normal ortam ve yaşlandırılmış ortamda yapılan test sonuçları incelendiğinde yük altında yer değiştirme miktarları her dönem sonunda katkısız malzemede en fazla gerçekleşmiştir. Grafik altında kalan bölgeler malzemenin yuttuğu enerjiyi ifade etmesi göz önüne alındığında, yaşlandırılmış ortam süresi arttıkça malzemenin yuttuğu enerji miktarı da artış göstermektedir. Buna bağlı olarak da geri sıçrama enerjileri artmıştır.

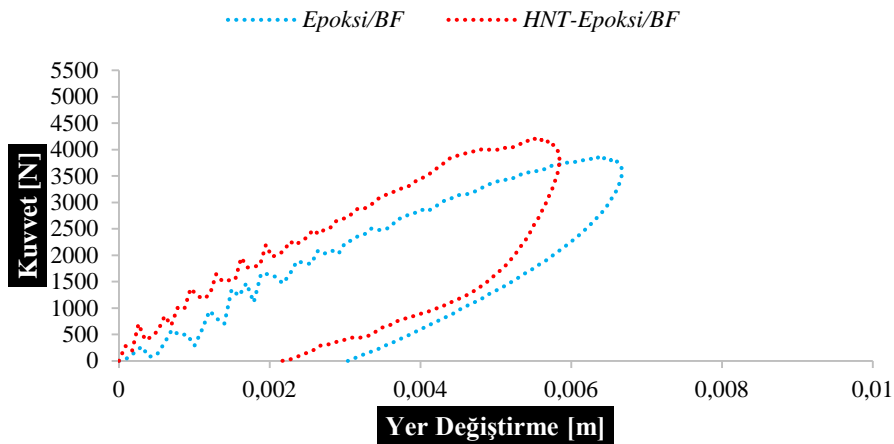
a)

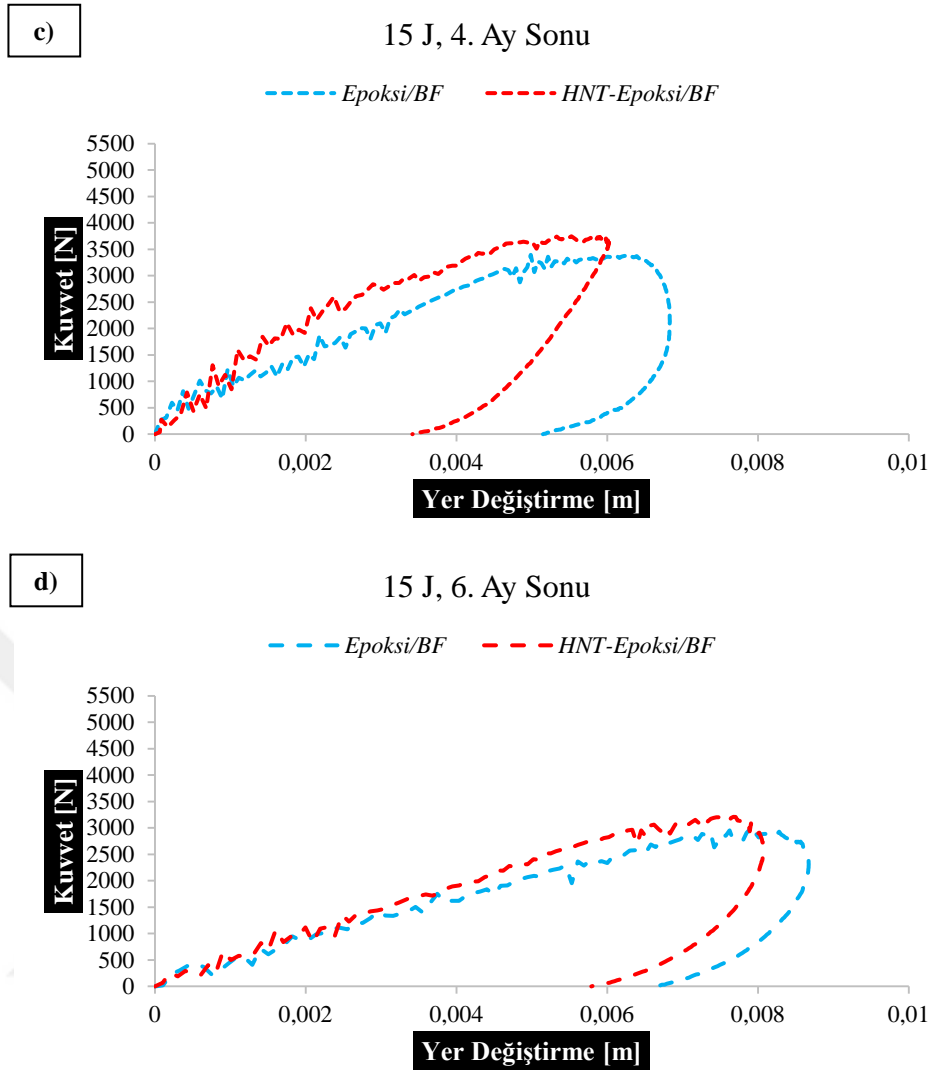
15 J, Normal Ortam



b)

15 J, 2. Ay Sonu





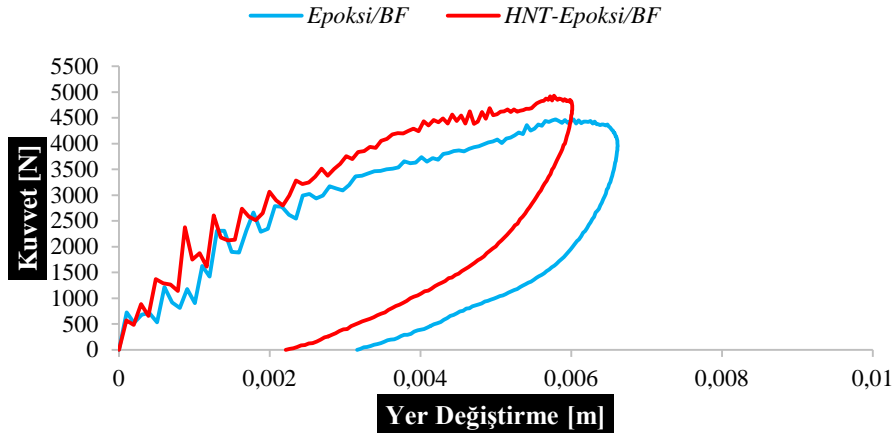
Şekil 4.12. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde CÜD kuvvet-yer değiştirme grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesindeki cıvata ustu darbe deney sonucunun kuvvet-yer değiştirme eğrisini Şekil 4.13. göstermektedir. 20 J enerji seviyesiyle beraber normal ortam deney sonucunda (Şekil 4.13. (a)), eğilme rijitliği ekseninde meydana gelen hasarları simgeleyen salınımlar artmıştır. Nanokompozit malzemenin eğilmeye karşı olan direnci kompozit malzemeye göre fazladır. Numuneler maksimum yüke ulaştıklarında yer değiştirme miktarı katkısız kompozitte ysek çıkmıştır. Gelen 20 J enerjisi en fazla yutan katkısız kompozit malzeme olmuştur. Nanokompozit malzemenin ise geri sıçrama enerjisi daha yüksektir. Yaşlandırmanın etkisiyle 2, 4, ve 6 ay sonunda (Şekil 4.13. (b), (c), (d)) gelen enerjinin 15 J ‘dan 20 J ‘a artmasıyla beraber numunelerin kuvvet altındaki yer değiştirme miktarları artmıştır. Eğilme rijitliği eğrilerinin eğimleri sürekli azalma eğiliminde olup nanokompozit malzemede bu direnç katkısız kompozit malzemeye göre yine üstün olarak

izlenmiştir. Gelen enerjinin emilimi yaşlandırma süresine bağlı olarak artmaya devam etmiştir.

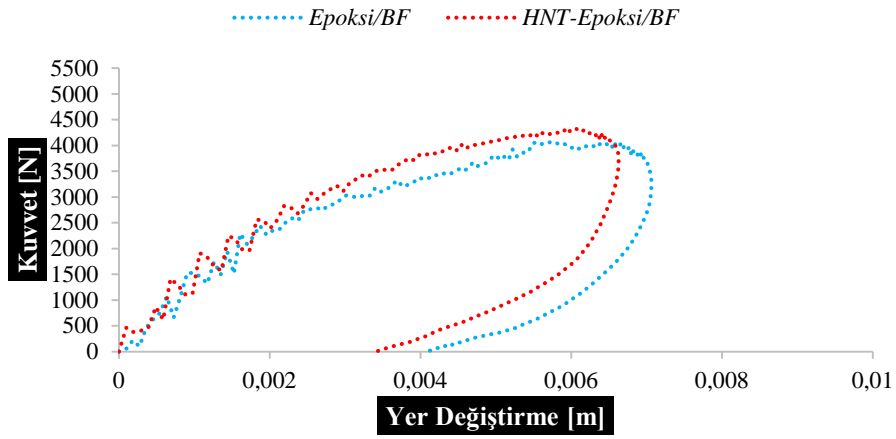
a)

20 J, Normal Ortam



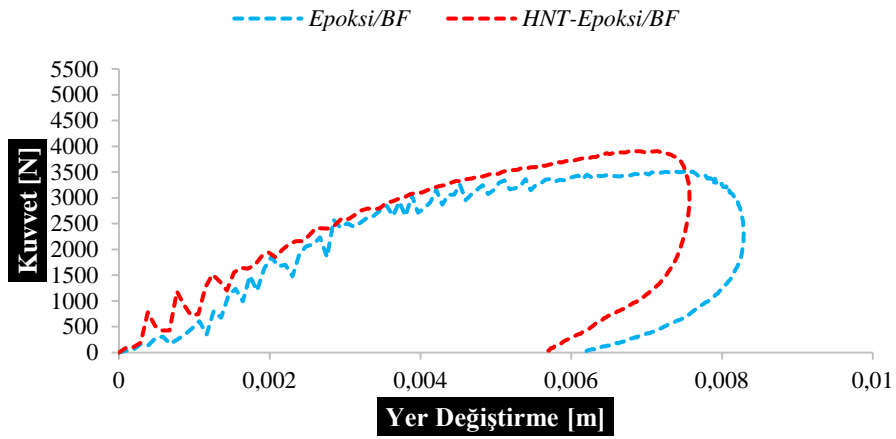
b)

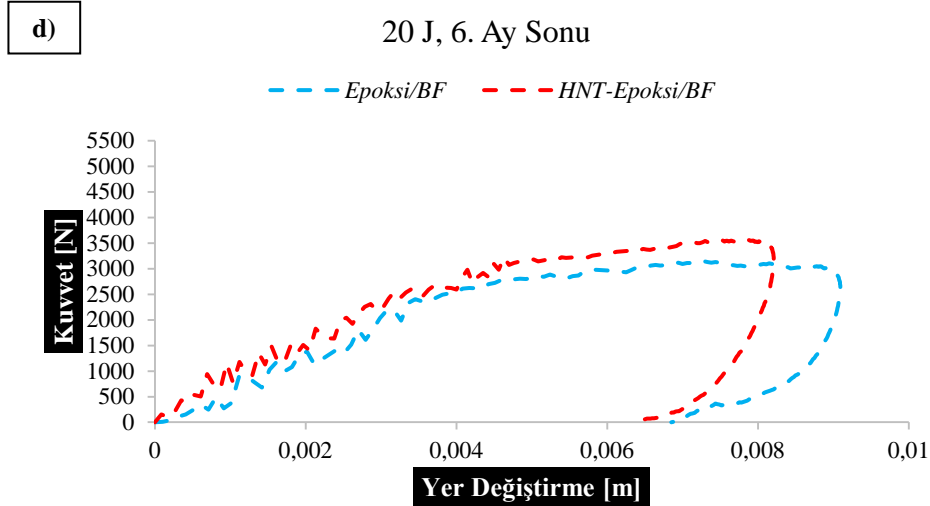
20 J, 2. Ay Sonu



c)

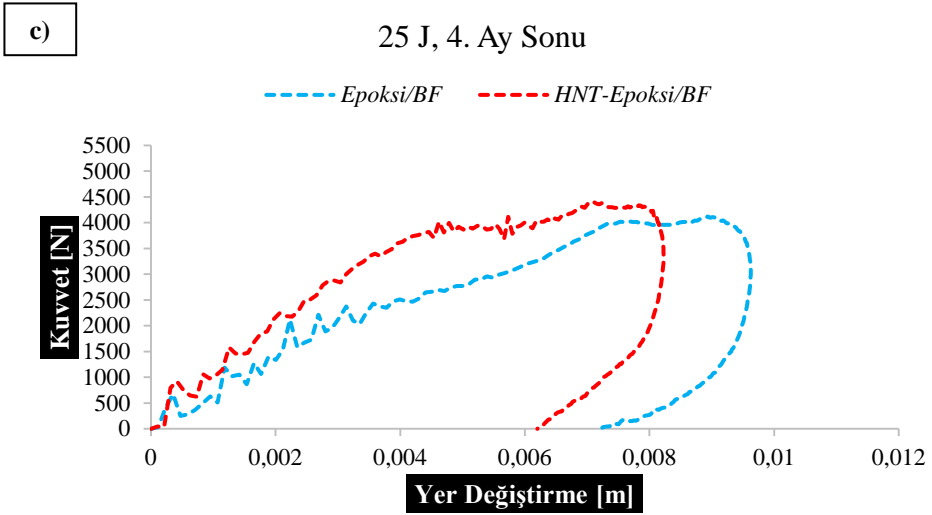
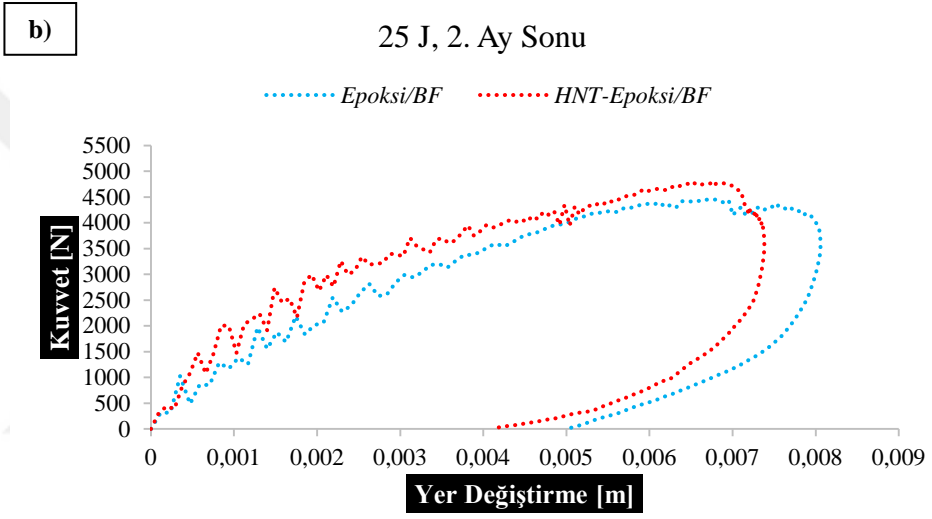
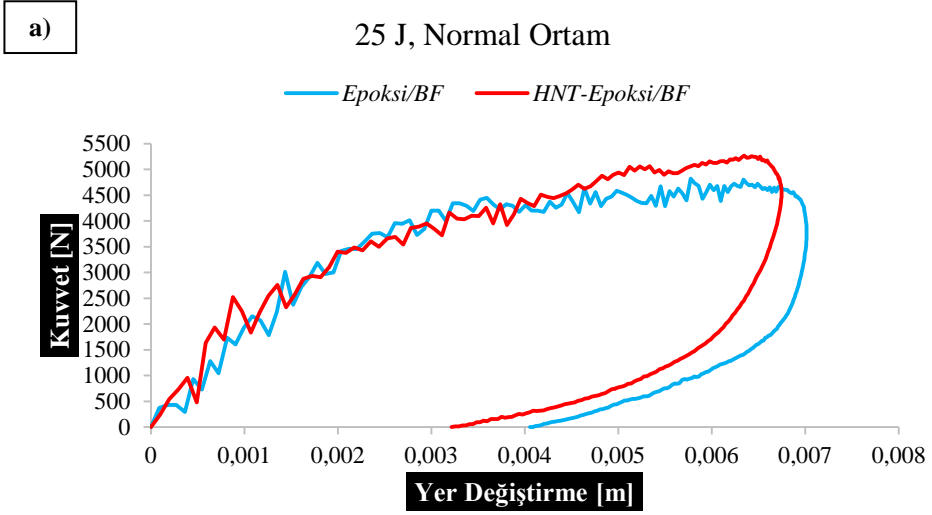
20 J, 4. Ay Sonu

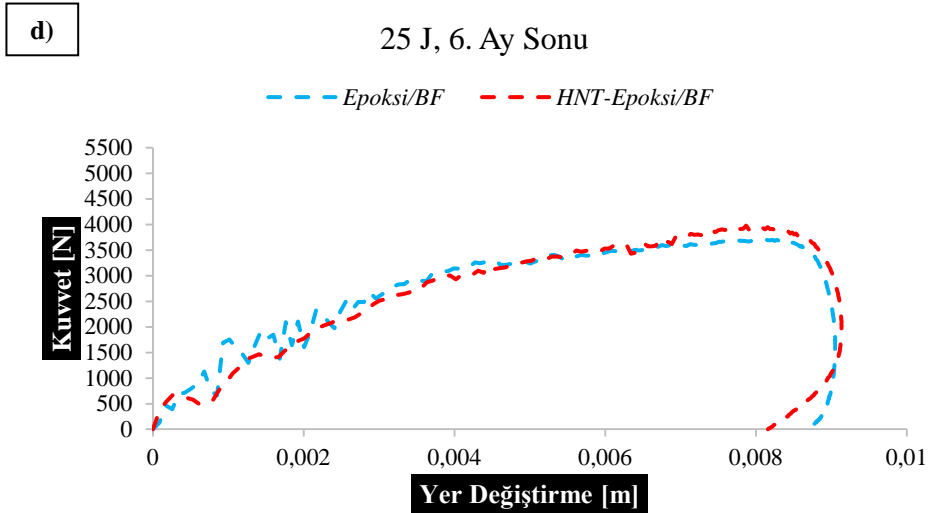




Şekil 4.13. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesinde CÜD kuvvet-yer değişirme grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

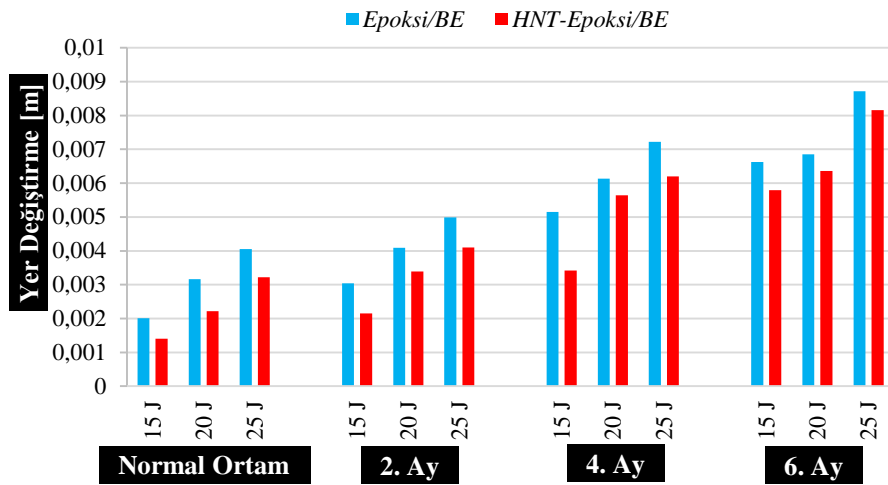
Kompozit malzemelerin 25 J enerji seviyesindeki CÜD deney sonucunun kuvvet-yer değişirme eğrisi Şekil 4.14. 'teki gibidir. Şekil 4.14. (a) 'da yaşlandırılmadan teste tabi tutulan numunelerin eğilme rijitliği eğrisi üzerinde meydana gelen salınımları sembolize hasarlar gelen enerjinin artışıyla kendini iyice hissettirmiştir. Buna bağlı olarak maksimum yük altında kompozit malzeme yine nanokompozit malzemeye göre en fazla yer değişirme miktarına sahiptir. Kuvvetin numuneler üzerinden boşalmasıyla kalıcı şekil değişim miktarları diğer enerji seviyelerine göre artmıştır. Bu da gelen enerjinin fazlaca yutulduğunu göstermektedir. Ayrıca, nanokompozit malzemenin geri sıçrama enerjisi kompozit malzemeye göre daha fazladır. 2 aylık bir yaşlandırma sonrasında ise eğilme rijitliği eğrisinin eğimi azalma eğilimindedir (Şekil 4.14. (b)). Numuneler normal ortam deneylerine göre daha az bir darbe kuvveti altında daha fazla yer değişirme miktarına sahiptirler. Yer değişirme miktarlarının azalan darbe yüküne rağmen 4. aydan 6 aya kadar sürekli arttığı görülmüştür (Şekil 4.14. (c)-(d)). Bu yaşlandırma periyotları sonrasında numunelerdeki geri sıçrama enerjileri çokça azalmış numuneler gelen enerjinin birçoğunu bünyelerine yutmuşlardır.





Şekil 4.14. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 25 J enerji seviyesinde CÜD kuvvet-yer değişirme grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin normal ortam ve diğer yaşlandırılmış ortam CÜD deneylerinde 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerindeki darbe kuvvetlerine karşı meydana gelen yer değişirme miktarları Şekil 4.15. 'te verilmiştir.



Şekil 4.15. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde ve farklı zaman periyotlarında yaşlandırılmış CÜD yer değişirme miktarları

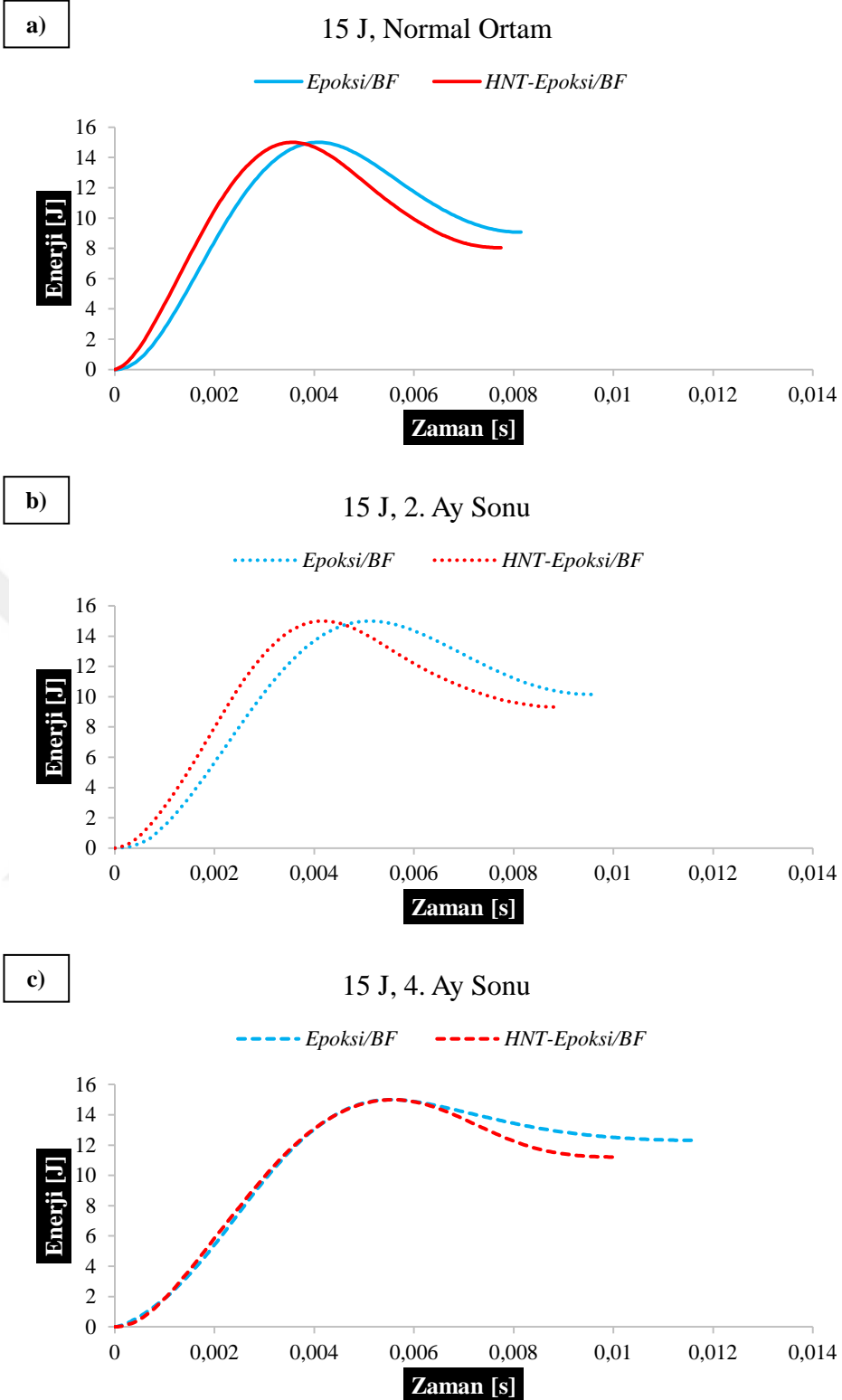
Tüm ortam sonuçlarında, yük altındaki yer değişirme miktarları kompozit malzemede nanokompozit malzemeye kıyasla daha fazladır. Dolayısıyla darbe yükü altındaki katkısız kompozit malzemede daha fazla plastik deformasyona bağlı yer değişirme meydana gelmiştir. Polimerin tuzlu sudaki plastikleşmesine bağlı olarak, 2. ay sonundan itibaren normal ortama göre her enerji seviyesinde malzemede, yüke karşı yer değişirme

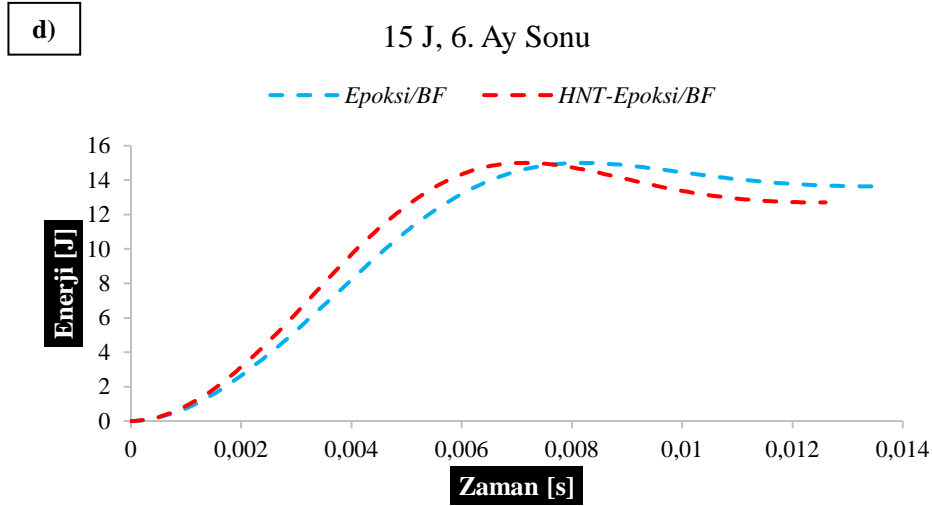


miktarları artmıştır. Bu artış, 4. ay ve 6. ayda da kendini hissettirmiştir. 6. Ay sonunda ise malzemeler enerji seviyeleri arasındaki kıyasla en yüksek yer değiştirme miktarlarına ulaşmıştır.

#### 4.4.1.3. Cıvata üstü darbe (CÜD) enerji-zaman grafikleri

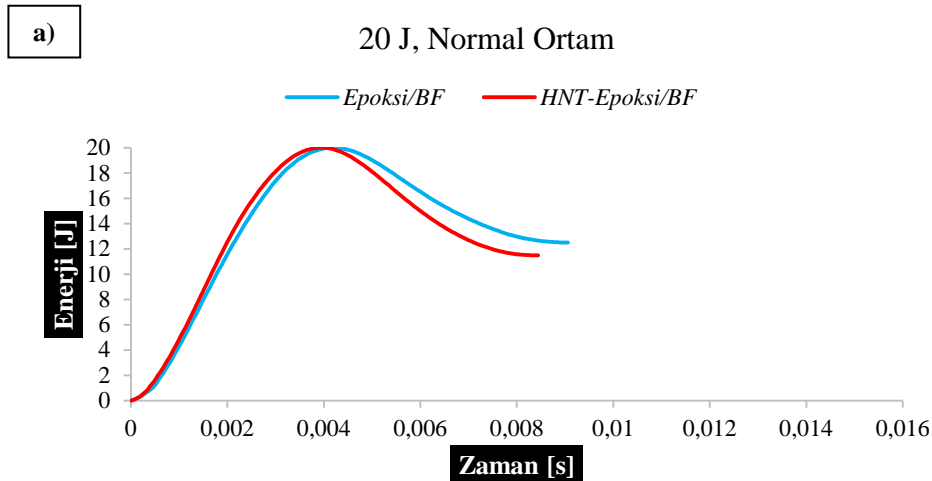
Enerji zaman grafikleri, vurucunun numune üzerine temasıyla gelen enerjinin numune tarafından yutulup, yutulamayan kısmının ise vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır olduğunun ifadesidir. Epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde cıvata üstü uygulanan darbe testinden elde edilen enerjinin zamana göre değişimi grafiği Şekil 4.16. 'da verilmiştir. Şekil 4.16. (a), normal ortam darbe testi sonucunda, HNT katkılı nanokompozit malzemenin yuttuğu enerji, katkısız malzemeye göre daha az olduğu görülmektedir. Nanokompozit malzeme 15 J ile gelen enerjinin neredeyse yarısını absorbe ederken, diğer yarısını da vurucunun malzeme üzerinden tekrar geri sekmesi (sıçraması) için kullanmıştır. Katkısız kompozit malzemeye gelen enerjinin yarısından çoğunun emildiği gözlenmiştir. Şekil 4.16. (b) 'de 2 ay yaşlandırılmış numunelerde, vurucu ile gelen 15 J enerji, malzemede hasarlara yol açtığı için artan temas suresi ile beraber malzeme içerisine yutulan enerji miktarı her iki malzeme için de artmıştır. 15 J enerjinin yutulan dışındaki diğer kısmı vurucunun tekrar geri sıçramasına aktarılmıştır. Bu geri sıçrama enerjisi de normal ortama göre azalmıştır. Numunelerin 4. ay ve 6. ay yaşlandırmaları sonucu (Şekil 4.16. (c)-(d)) tuzlu suyun etkisi iyice kendini hissettirmiş ve numunelerde artan hasar ile beraber temas süreleri uzamıştır. Artan hasarlarla beraber 4 ve 6 ay yaşlandırma sonucu yutulan enerjiler artmış ve geri sıçrama enerjileri azalmıştır. Nanokompozit malzemelerin geri sıçrama enerjileri kompozit malzemeye göre daha fazla çıkmıştır. Bu da nanokompozitte meydana gelen hasar yoğunluğunun kompozit malzemeye göre daha az olduğu ifade edilebilir.

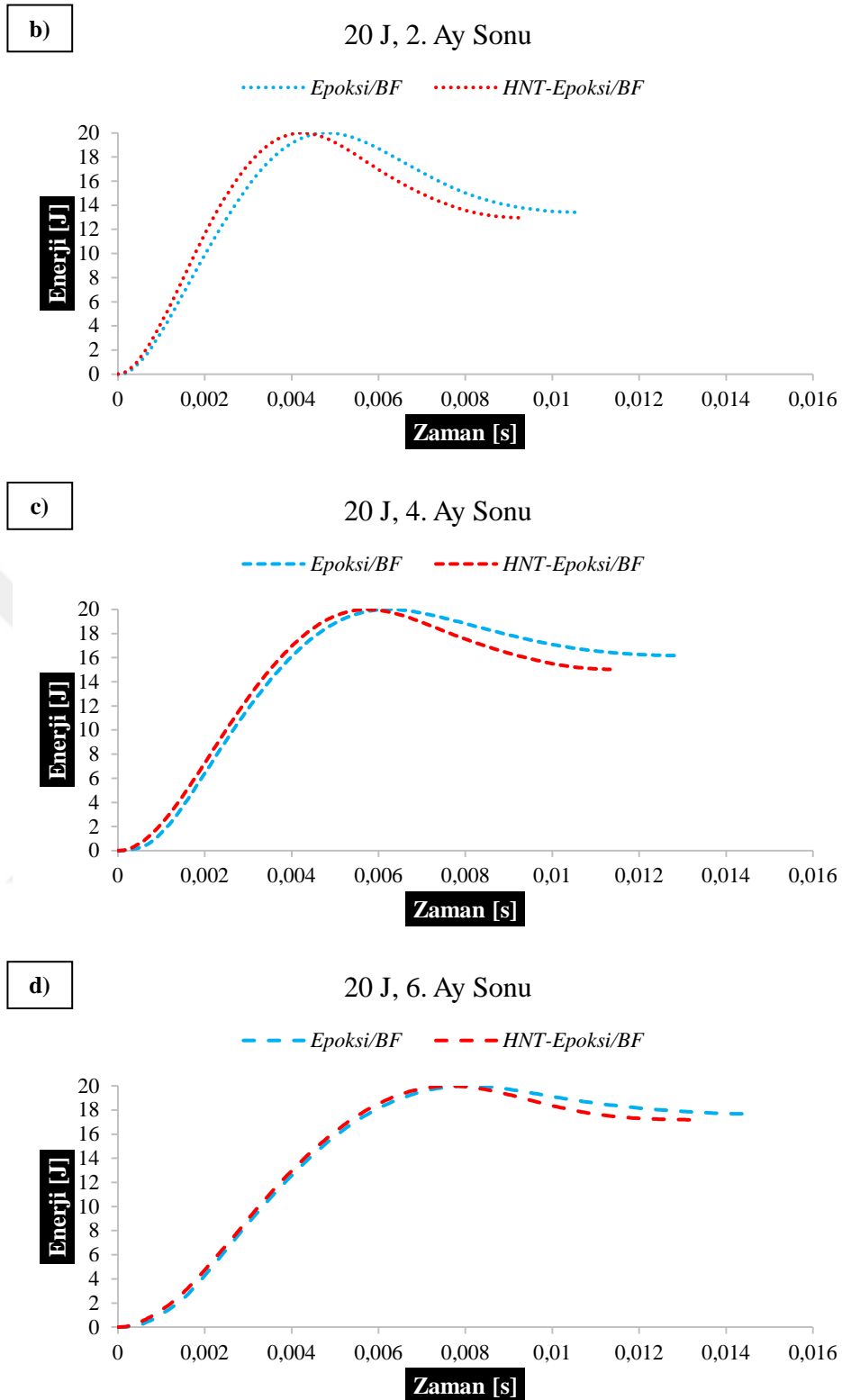




Şekil 4.16. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde CÜD enerji-zaman grafikleri a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

20 J enerji seviyesinde, epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin CÜD testi sonucu elde edilen enerji-zaman grafiği Şekil 4.17. 'de verilmiştir. Şekil 4.17. (a) 'da şartlandırılmamış numuneler için çizilen eğride görüldüğü üzere her iki malzemede gelen enerjinin yarısından çoğu emilmiştir. Kalan enerjide sıçrama enerjisi olarak geri verilmiştir. 2 ay tuzlu suda yaşlandırılmış numunelerde 20 J enerji seviyesinde yutulan enerji kompozit numune de 13,4 J iken nanokompozitte 12,9 J olarak emilmiştir (Şekil 4.17. (b)). 4. ay yaşlandırmasında Şekil 4.17. (c) 'de gelen enerjinin 16,1 J 'lük kısmı kompozit malzeme tarafından emilmiştir. Nanokompozit malzeme ise gelen 20 J enerjinin 15,03 J 'lük kısmını yutup geri kalanını sıçramaya vermiştir. 6. ay sonunda, tuzlu suyun etkisiyle gelişen hasarlar ile beraber gelen enerjinin çoğu numuneler tarafından yutulmuştur (Şekil 4.17. (d)). 17,7 J kompozit numune, 17,2 J nanokompozit numune tarafından emilmiştir.

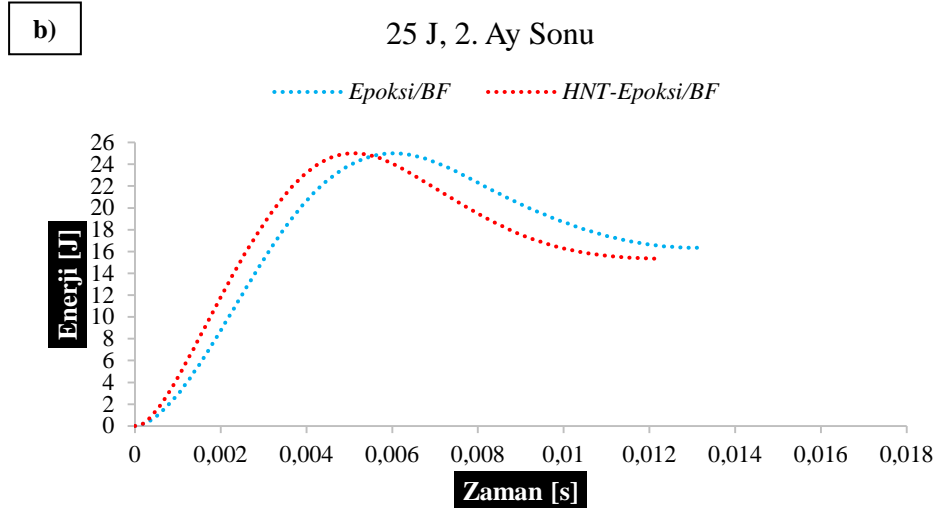
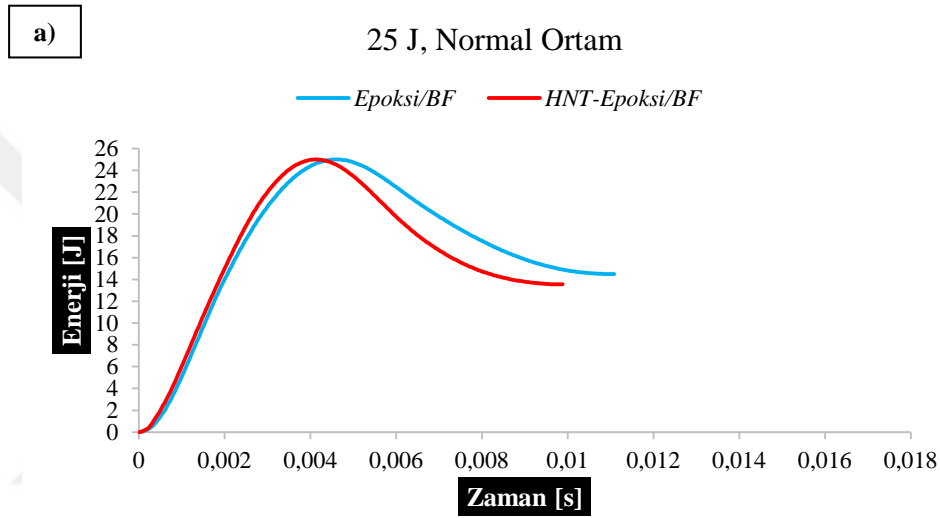


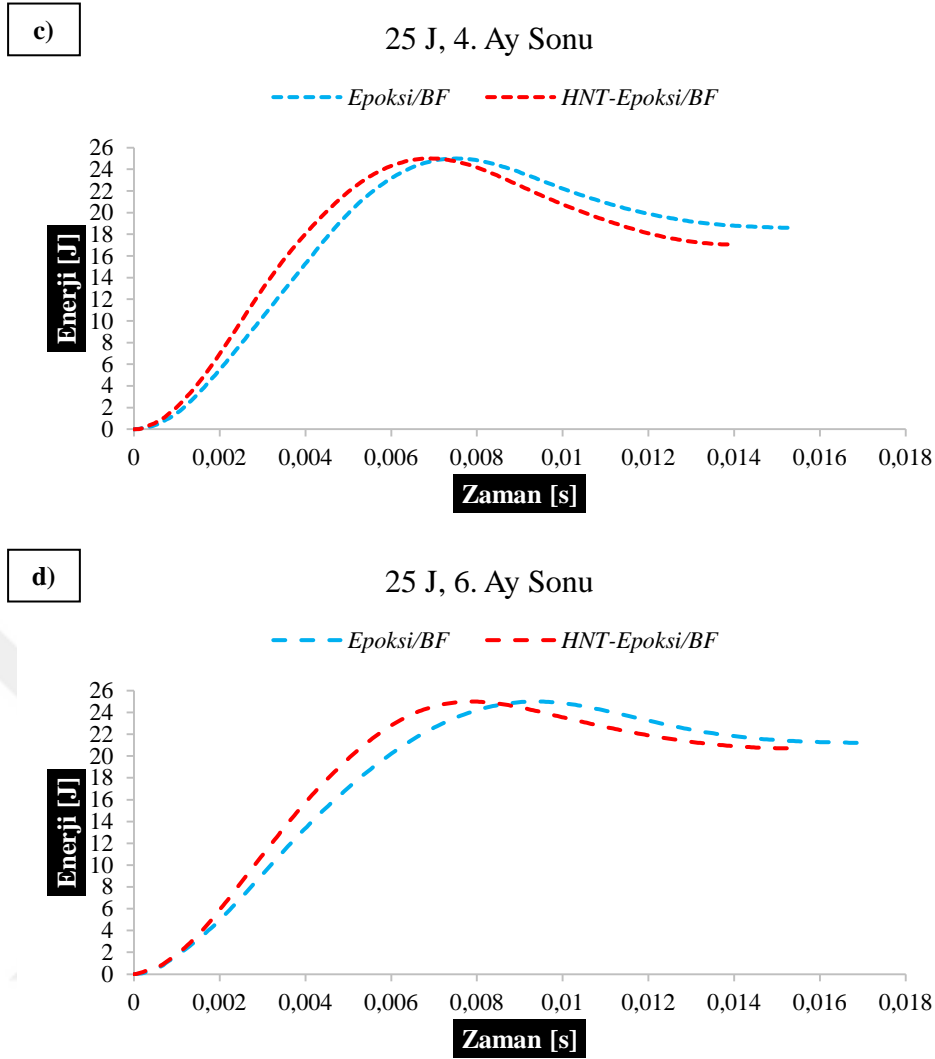


Şekil 4.17. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesinde CÜD enerji-zaman grafikleri a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Kompozit malzemelerin 25 J enerji seviyesi CÜD deneylerinin enerji-zaman grafikleri Şekil 4.18. 'de gösterilmiştir. Şekil 4.18. (a) 'da normal ortam sonucunda gelen enerjideki artış numunelerin yuttuğu enerjileri arttırmıştır. 15 J ve 20 J 'den sonra 25 J

enerji seviyesinde de yutulan enerjiler ve hasara bağılı vurucunun temas süresi giderek artmıştır. Numunelerin 2. ay yaşlandırma zaman diliminden sonra yutulan enerjilerin artışı, numuneler içerisinde yeni yüzeylerin oluşmasına sebep olmuş bu sayede temas süreleri artmıştır (Şekil 4.18. (b)). 4. ay sonunda da benzer durumlar (enerji Emilimi ve temas süresi artışı) devam ettikten sonra (Şekil 4.18. (c)), 6. ay da yaşlandırmanın etkisiyle en fazla enerji Emilimi ve temas süreleri artışı her iki malzeme içinde gözlenmiştir (Şekil 4.18. (d)). Numuneler bu yaşlandırma sonucunda neredeyse geri sıçrama enerjisi vermeden ciddi hasarlara uğradığı gözlenmiştir.

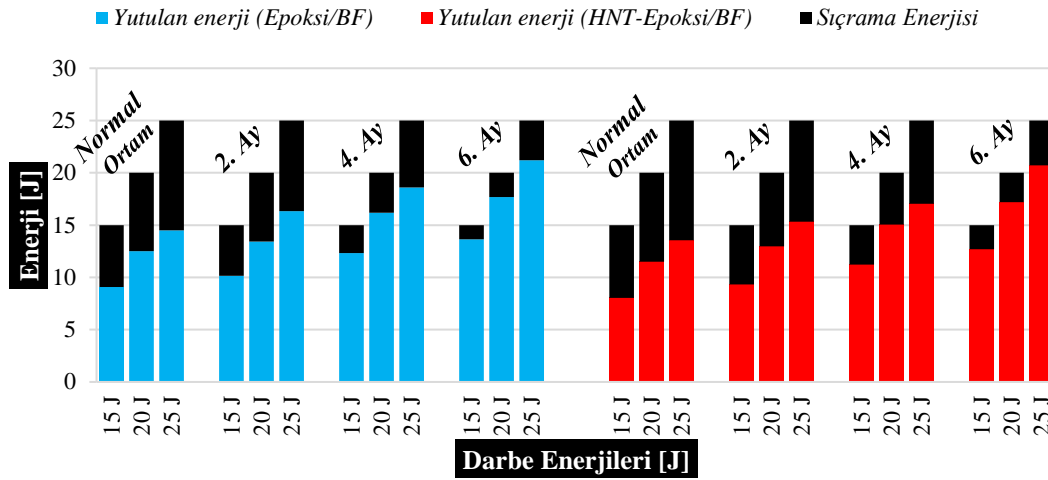




Şekil 4.18. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 25 J enerji seviyesinde CÜD enerji-zaman grafikleri a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin kullanılan enerji seviyelerindeki, yutulan ve geri verilen enerji miktarlarını ifade eden deney sonuçları sütun grafiği ile Şekil 4.19. 'da verilmiştir. Normal ortam içinde, şartlandırılmadan yapılan testler tüm enerji seviyelerinde kıyaslandığında nanokompozit malzemede kompozit malzemeye göre yutulan enerjilerin az olduğu görülmektedir. Ayrıca yutulan enerjiler her ortamın kendi içerisinde değerlendirildiğine gelene enerjinin artmasıyla artış göstermiştir. Numunelerde yutulan enerjinin artması sıçrama enerjisinin azalması, diğer bir deyişle numunelerdeki hasar miktarlarının artması sonucunu doğurur. Yaşlandırma süresinin artmasıyla deniz tuzu suyunun fiberlerde ve epoksi matriste meydana getirdiği tahribat ile geri sıçrama enerjisi azalmış, gelen enerjinin birçoğu malzemeler tarafından yutulmuştur. Genel itibarıyla, yaşlandırma sonucu her iki malzeme takviye elemanı ve matrisi bundan etkilendiği görülmektedir. Bu etkinin yanında, HNT

katkısı ile nanokompozit malzeme, cıvata üzerine gelen darbe performansı ile katkısız malzemeye göre ön plana çıkmaktadır.



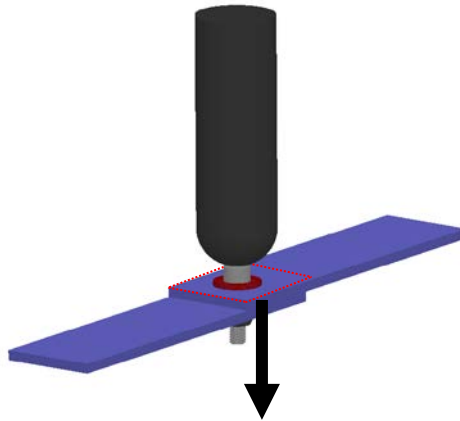
Şekil 4.19. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyesinde CÜD enerji dağılım grafikleri

#### 4.4.1.4. Cıvata üstü darbe (CÜD) sonucu hasar görüntüleri

Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit numunelerde, 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyesinde yaşlandırılmadan ve yaşlandırmanın 4. ayı ve 6. ayı sonunda vurucunun cıvata üstüne düşürülmesi sonucu meydana gelen hasarların ön yüzeyden geniş görüntüleri Şekil 4.20. 'de verilmiştir. Numunelerin arka yüzeylerinde herhangi bir hasar meydana gelmediği için ayrıca görüntülerine yer verilmemiştir. Fakat bu başlık altında darbe yükünün numune üzerinde oluşturduğu başka bölgedeki hasarlarda incelenmiştir. Yoğun olarak vurucunun ilk temas ettiği noktada ve deliğe en yakın noktalardaki hasarlar kritik bir öneme sahip olduğundan sadece ön yüzeydeki kusurlar görüntülenmiştir. Şekil 4.20.A 'da verilen şematik çizim üzerinde kırmızı sınır çizgileri ile gösterilen bölgeden alınan görüntülerden, meydana gelen hasarların pul etrafında olduğu görülmektedir. Pul altında sıkıştırılmış bölgede, cıvatanın pullara uyguladığı gerilme neticesinde pul altında herhangi bir çatlak ve ilerlemesi meydana gelmemiştir. Pulun sadece belli kısımlarında meydana gelen hasarlar, darbe sırasındaki çökme ile beraber pul kenarlarının numuneleri baskılamasıyla meydana gelmektedir. 15-20-25 J enerji seviyesinde yaşlandırılmamış epoksi/BF kompozit malzemede meydana gelen hasar yüzeyleri sırasıyla Şekil 4.20 B1., B2., ve B3. 'te gösterildiği gibidir. Kompozit malzemede artan enerji seviyesi ile hasar miktarının arttığı

görülmektedir. Oluşan hasar, darbe sırasında pulun malzeme üzerine basmasının yanında yan kenarlara dik bir şekilde ilerleyen lineer bir doğru halini almıştır. Gelen enerji seviyesinin artmasıyla bu doğru şeklindeki hasarların sayısı da artmaktadır. Şartlandırılmamış HNT-epoksi/BF nanokompozit numuneler sırasıyla incelendiğinde (Şekil 4.20 C1., C2., C3.) artan enerji seviyesi kusur miktarını arttırdığı görülmektedir. Kompozit numunede benzer hasar tipleri görünmüş olmakla beraber bu numuneden farklı bir olayı; nanokompozit numunede hasarın ilerleyişi lineer olmayan bir şekilde yine yan kenarlara dik olarak ilerlemektedir. Ayrıca nanokompozit malzemede meydana gelen hasar yoğunluğu kompozit malzemeye göre az olduğu gözlenmiştir. Numunelerin ara yaşlandırma zaman dilimi 4. ay sonunda kompozit numunelerde (Şekil 4.20 D1., D2., D3.) şartlandırılmamış ortama kıyasla farklı bir hasar tipi meydana gelmemiştir fakat hasar yoğunluğu artmıştır. Yan kenarlara lineer olarak ilerleyen hasarlarda artış olmuştur. Şekil 4.20 E1., E2., ve E3. 'teki nanokompozit numunelerde ise şartlandırılmamış numunelere kıyasla hasar yoğunluğu yine artmıştır ama kompozit numunenin 4.ay sonuçlarına göre yine az bir şekilde oluşmuştur. Nanokompozit numunedeki lineer olmayan hasar ilerlemeleri de dikkat çekmektedir. 6.ay yaşlandırması sonuçları değerlendirildiğinde kompozit numunelerdeki hasar en yüksek mertebeye erişmiştir (Şekil 4.20 F1., F2., F3.). Pul kenarları malzeme üzerinde diğer görüntülerde yarım daire şeklinde hasar meydana getirirken burada neredeyse tüm daireye yakın hasar oluşturmuştur. Nanokompozit numunelerde G1. görüntüsünde zikzak görünümlü hasar, G2. ve G3. 'de de dallanmış hasarların oluşma sebebi olarak, HNT katkısının malzeme içerisinde çatlak yön değiştirme, çatlak durdurma ve köprüleme mekanizmalarını devreye sokmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Nanokompozit malzemelerdeki bu hasar görüntüsü tüm sonuçlarda gözlenmektedir.

A.

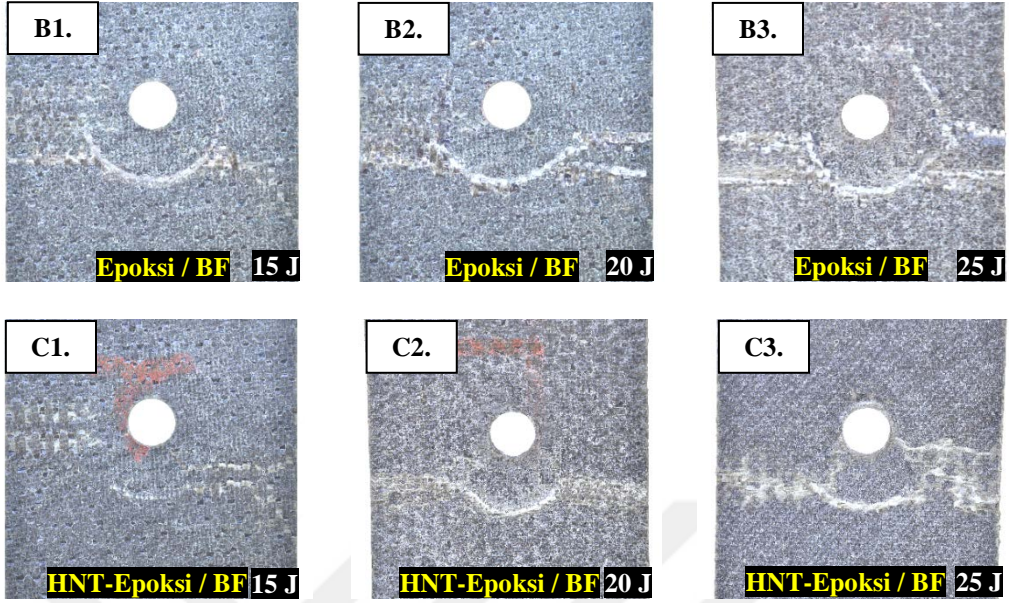




---

 Normal ortam sonu hasar görüntüleri
 

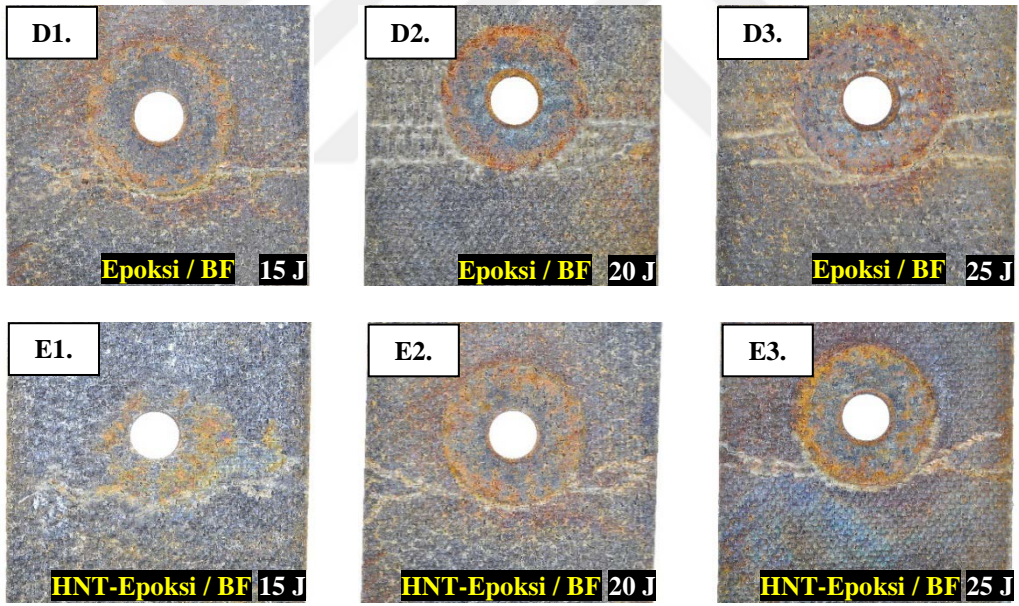
---




---

 4. Ay sonu hasar görüntüleri
 

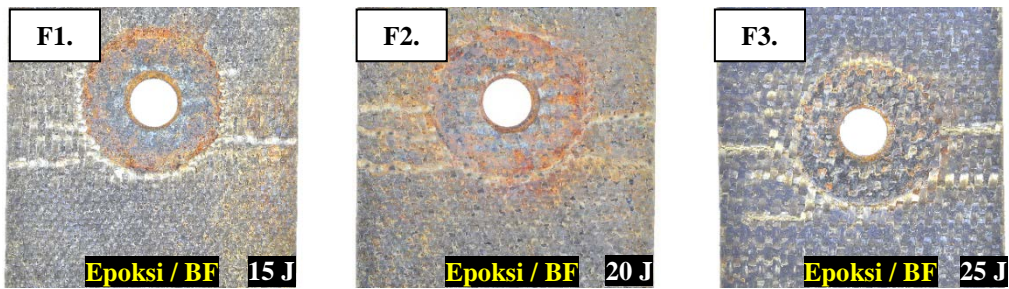
---

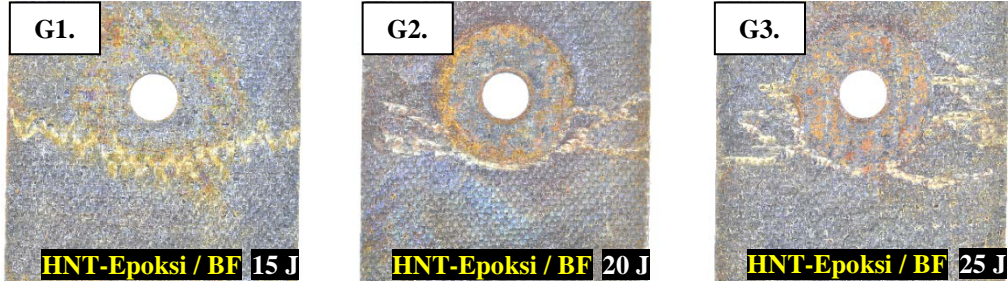



---

 6. Ay sonu hasar görüntüleri
 

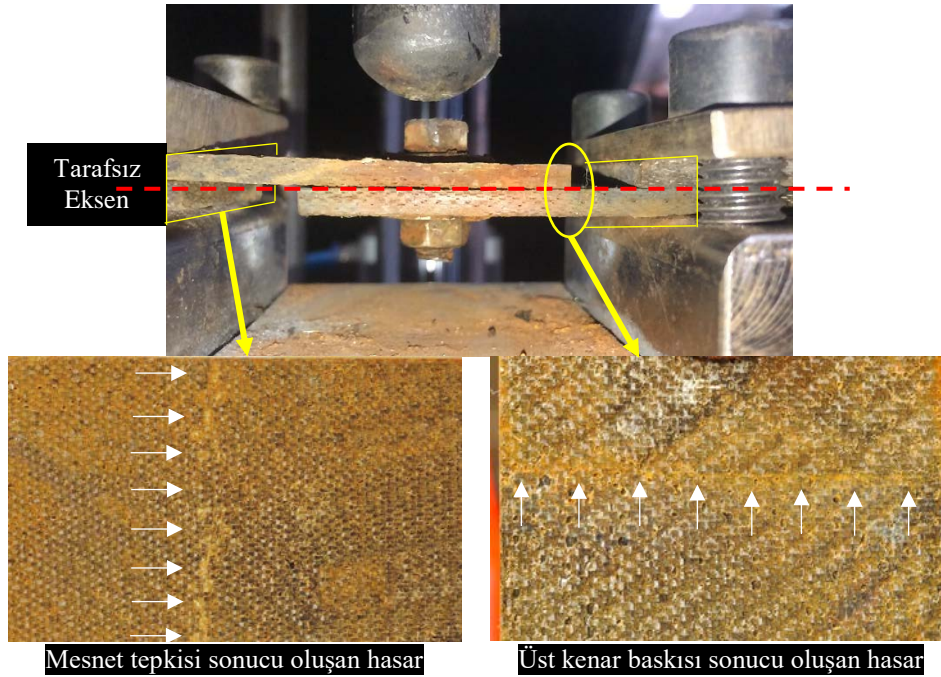
---





Şekil 4.20. 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde CÜD; A) Şematik gösterim B-G) Hasar görüntüleri

Cıvata üstü darbe testinde, kompozit ve nanokompozit numuneler üzerine gelen darbe enerjileri yutulduğunda sadece yukarıda görünen hasarlar oluşmamıştır. Gelen enerjinin yutulmasına sebep olan matris çatlakmaları, fiber/matris arayüzey hasarları, tabaka ayrılması, fiber kopmalarının dışındaki diğer etkenler şöyledir; cıvata ile delik arasındaki sürtünme, bağlantı sistemindeki pulun numuneler üzerinde meydana getirdiği hasar, üst levha kenarının darbe esnasında alt levha üzerine basmasıyla oluşan hasar ve ankastre mesnetin darbe sırasında malzeme üzerlerinde meydana getirdiği hasarlardır. Bu bahsi geçen olayların hepsi malzeme üzerine gelen enerjinin yutulmasında etkin rol oynayan durumlardır. Şekil 4.21. 'de 25 J enerji seviyesinde, 6 ay yaşlandırılmış numunede meydana gelen ve ekstra enerji yutan hasar görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.21. CÜD testi sonrası oluşan diğer hasarlar



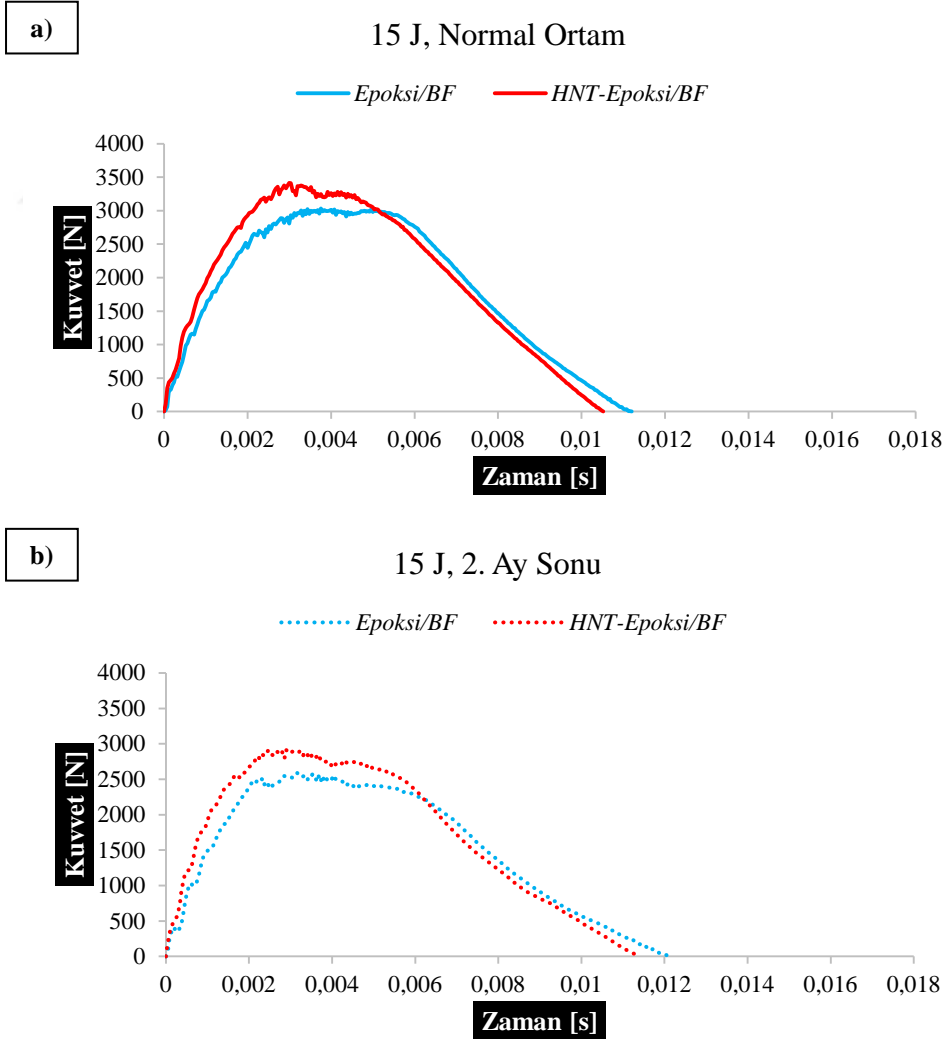
Cıvata üstü darbe testinde bahsedilmesi elzem bir diğer hususta şöyledir; darbe testlerindeki esas kriterlerden biri numunede darbe esnasında bir çökmenin olmasıdır. Burada cıvatanın birleştirdiği yüzeyler teorik olarak bağlantının tarafsız ekseninde yer almaktadır. Dolayısıyla bu eksen üzerinde herhangi bir çökme olması beklenmez. Burada darbe testinin, bağlantı sisteminin genel tepkisini ölçtüğü şeklinde düşünülmelidir.

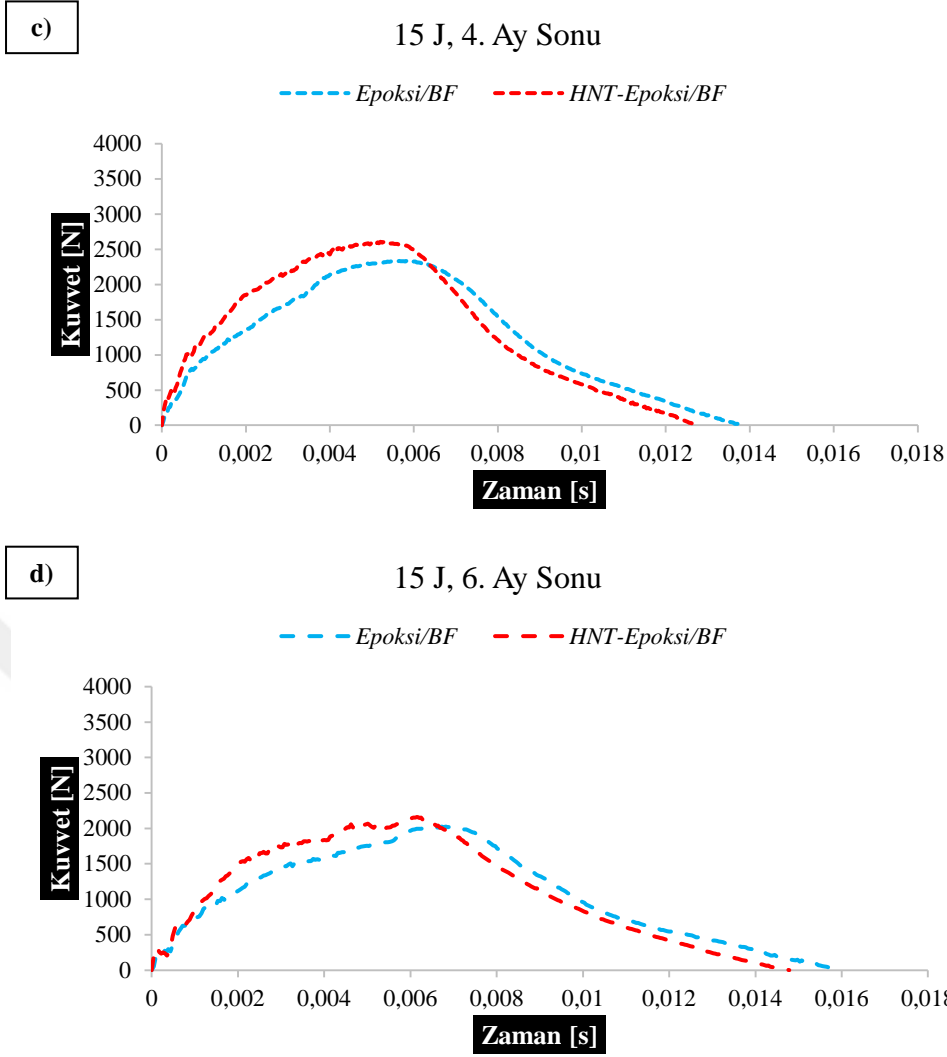
#### **4.4.2. Kompozit üstü darbe (KÜD) testi sonuçları**

##### **4.4.2.1. Kompozit üstü darbe (KÜD) kuvvet-zaman grafikleri**

Vurucu ucun, mekanik bağlantı elemanlarına temas etmeyen, deliğe en yakın bölgeye düşürüldüğü kompozit üstü darbe (KÜD) testi sonuçlarına ait, 15 J enerji seviyesinde meydana gelen kuvvet-zaman grafiklerinin epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit için eğrileri Şekil 4.22. 'de verilmiştir. Yaşlandırılmamış numunelerin 15 J eğrisi Şekil 4.22. (a) 'da, nanokompozit malzeme 3414 N darbe yükü taşıyorken, katkısız kompozit malzemenin taşıdığı darbe yükü 3029 N olarak çıkmıştır. Cıvata üstü darbe (CÜD) deneyinde 15 J 'de elde edilen darbe kuvvetlerinden daha düşük kuvvet değerleri bulunmuştur. Vurucunun cıvata üstüne düşüşü daha rijit bir malzeme üzerine olduğu için bu şekilde bir sonucun çıkması olağandır. Yine temas süreleri değerlendirildiğinde KÜD deneylerinde daha yüksek çıkmaktadır. CÜD deneylerinde gelen enerji ilk olarak bağlantı sistemine iletilmesiyle, gelen enerji ilk olarak mekanik bağlantıya daha sonrasında ise malzemeye iletilmektedir. Dolayısıyla CÜD deneylerinde meydana gelen hasar daha az olmakta ve temas süresinde daha kısadır. KÜD deneylerinde vurucunun sadece malzemeye teması gelen enerjinin direk paylaşılmadan malzemeye iletilmesi hasar miktarını arttırmakta ve dolaylı olarak temas süreleri uzamaktadır. Cıvata üstü darbe başlığı altında birinci bölge olarak adlandırdığımız, vurucunun temasından maksimum taşıdığı yüke kadar ki eğrinin eğimini ifade eden temas rijitliği, nanokompozit malzemede daha yüksek çıkmıştır. Numuneler üzerinden yükün boşalmasıyla beraber temas sürelerindeki farklılık ve boşalma eğrilerindeki düzensiz geri dönüşler malzeme üzerinde bir takım hasarların meydana geldiğini ifade etmektedir. Hasarların bir diğer tanığı da vurucunun temasından maksimum kuvvete kadar eğri üzerinde meydana gelen salınımlardır. Bu hasarlar malzemedeki temas süresini de uzatmaktadır. Kompozit malzemede meydana gelen hasarlar, vurucunun temas süresini nanokompozit malzemeye göre arttırmıştır. 2.ay yaşlandırması sonrasında, kompozit malzemenin darbe kuvveti

2588 N 'a gerilerken nanokompozit malzemenin 2922 N 'a düşmüştür (Şekil 4.22. (b)). Birinci bölge eğrisinin eğiminin ifadesi temas rijitliği nanokompozit malzemede yüksek iken, ikinci bölge eğrisi olan kuvvet boşalması sonrasında eğriler hasarda dolayı düzensiz bir şekilde tamamlanmıştır. CÜD sonuçlarının 2. ay yaşlandırmasına göre yine hasar yoğunluğunun fazla olmasıyla temas süreleri de numunelerde artmıştır. Numunelerin 4. ay yaşlandırması sonucu darbe yüklerin düşüşü tuzlu suyun etkisinden dolayı devam etmiştir (Şekil 4.22. (c)). Her iki malzemede, birinci bölge üzerinde gözle görülebilir salınımlar gözükme de yük boşaltma eğrisi düzensiz bir geri dönüş sergilemişlerdir. Temas rijitliği değeri 4. ay sonunda nanokompozit malzemede yüksek çıkmasına rağmen 6. ay sonunda numuneler arasında benzer temas rijitliği değerleri oluşmuştur (Şekil 4.22. (d)). Darbe yükü taşıma kapasiteleri de 2701 N kompozit numune ve 2845 N nanokompozit numune için çıkmıştır. Darbe yüklerinin düşüşü temas süresini uzatmıştır. Bu da 6. ayda hasar yoğunluğunun arttığını ifade etmektedir.

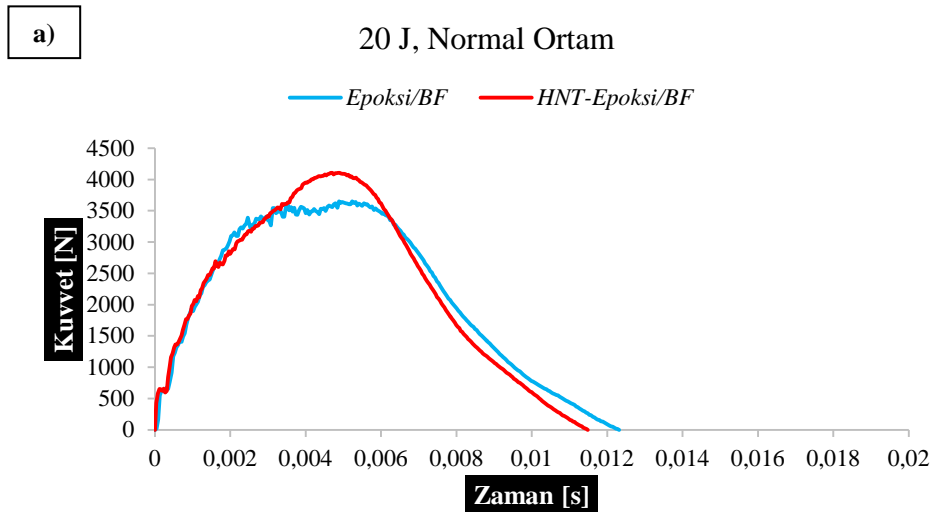


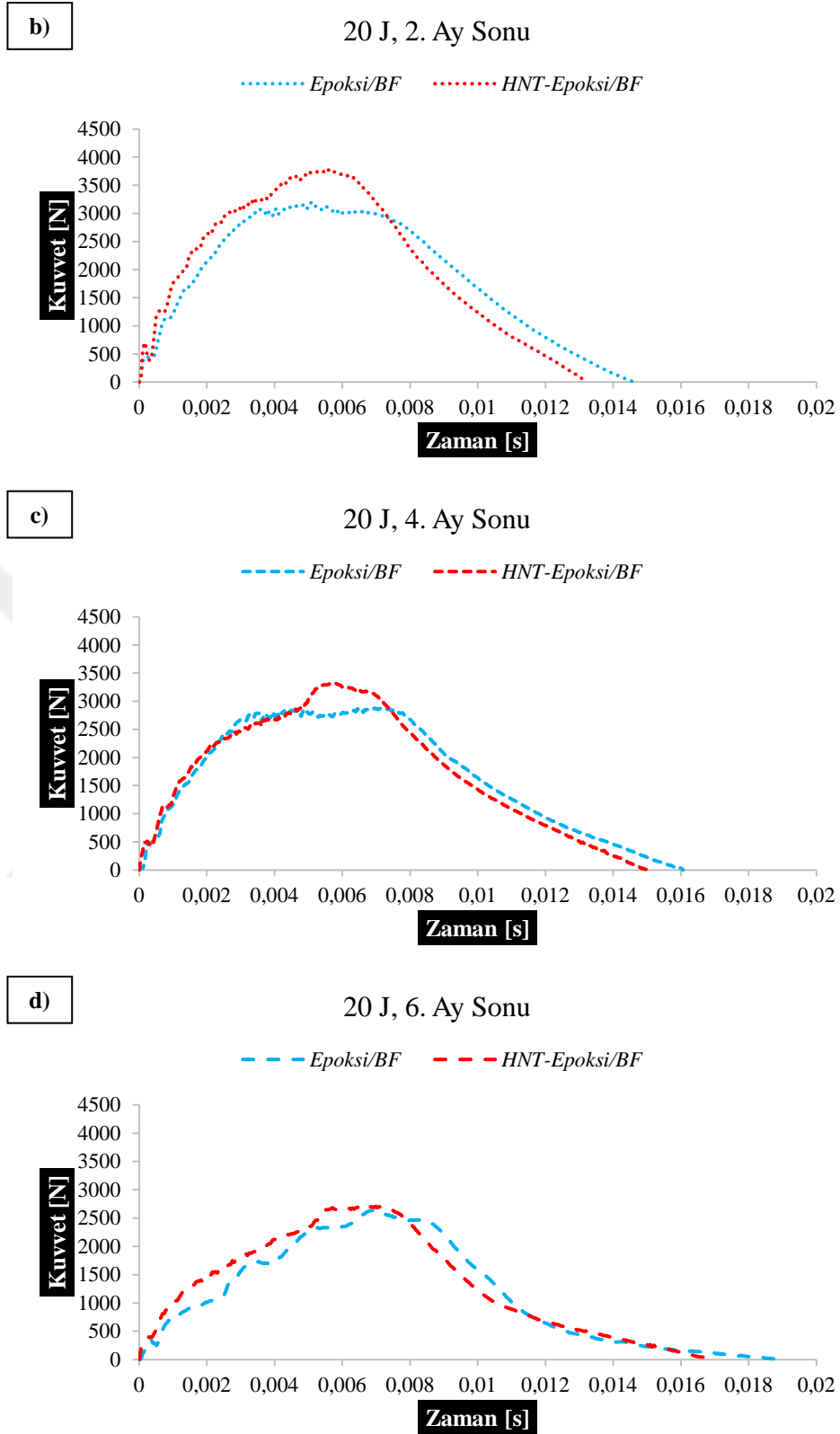


Şekil 4.22. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde KÜD kuvvet-zaman grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Numunelerin 20 J enerji seviyesindeki kuvvet-zaman grafiği Şekil 4.23. 'te verilmiştir. Şekil 4.23. (a) 'da normal, yaşlandırılmamış şartlarda numuneler birinci bölgede benzer temas rijitliklerine sahipken, birinci bölge eğrisi sonunda nanokompozit malzeme kompozit malzemeye göre daha fazla darbe yüküne sahiptir ve nanokompozit malzemenin eğrisi sıradan olmayan bir forma bürünmüştür. İlerleyen test sonuçlarında da benzer bir formda olması bunun HNT katkısı ile ilişkilendirilebileceği anlamını taşımaktadır. 15 J darbe yüklerine kıyasla gelen enerjinin artması 20 J 'de darbe yüklerini arttırmıştır. Temas rijitliği eğrisi üzerinde meydana gelen düzensiz salınımlar malzemede meydana gelen hasarı temsil ettiği düşünülürse, temas süresinin kompozit malzemede fazla çıkması hasar derecesinin yüksek olmasından kaynaklıdır. CÜD deneylerine kıyasla malzemelerin temas süreleri daha uzun sürmüştür. Buna bağlı olarak KÜD deneylerindeki darbe yükü taşıma kapasitesi daha düşüktür. 20 J 'de gelen enerji 2 ay

yaşlandırılmış numunelere uygulandığında Şekil 4.23. (b) 'de verildiği üzere numunelerin darbe kuvvetlerinde kompozit malzemede % 12,2 bir kayıp, nanokompozit malzemede ise % 8,2 düşüş gerçekleşmiştir. Eğriler üzerindeki ani kuvvet düşüşleri hasarın varlığını ifade etmesi ve bunun neticesinde temas sürelerinin artması olağan bir durumdur. Ayrıca nanokompozit numune eğrisinin sıradan olmayan eğri formu, normal ortamdaki eğri formatına benzerdir. Şekil 4.23. (c) 'de 4. ay yaşlandırması sonucunda, numuneler içinde buldukları yaşlandırmanın etkisiyle fiber ve matris bozulmalarına bağlı olarak performanslarını gözle görülür kaybetmeye başlamışlardır. Kompozit malzemenin darbe kuvvetinde % 21,2 oranda, nanokompozit malzemede ise % 19,1 oranda kayıp yaşanmıştır. Nanokompozit malzemenin eğrisinde normal ortam sonuçlarından beridir meydana gelen karakteristik eğri tipi 4.ay eğrisinde de oluşmuştur. HNT katkısının bu durumun oluşmasındaki katkısını hangi mekanizmalar ile sağladığı mikroskop görüntüleri ile ayrıca bahsedilecektir. Yük boşalma eğrisi üzerindeki normal olmayan geri dönüşte malzemede meydana gelen hasarların habercisidir. 6. ay yaşlandırma sonucunda Şekil 4.23. (d) 'de malzemedeki performans kayıpları tam anlamıyla kendini belli etmiştir. Numunelerde yüksek kuvvet kayıplarının yanında, yük boşalması sonrası malzemede çok ciddi kusurlar meydana geldiği eğrilerin geri dönüşlerinden gözlenmektedir. Kompozit malzemede % 27,8, nanokompozit malzemede ise % 34 darbe kuvvet düşüşü yaşanmıştır. Temas sürelerinde ise bu hasarlara bağlı artış daha derin olmuştur.

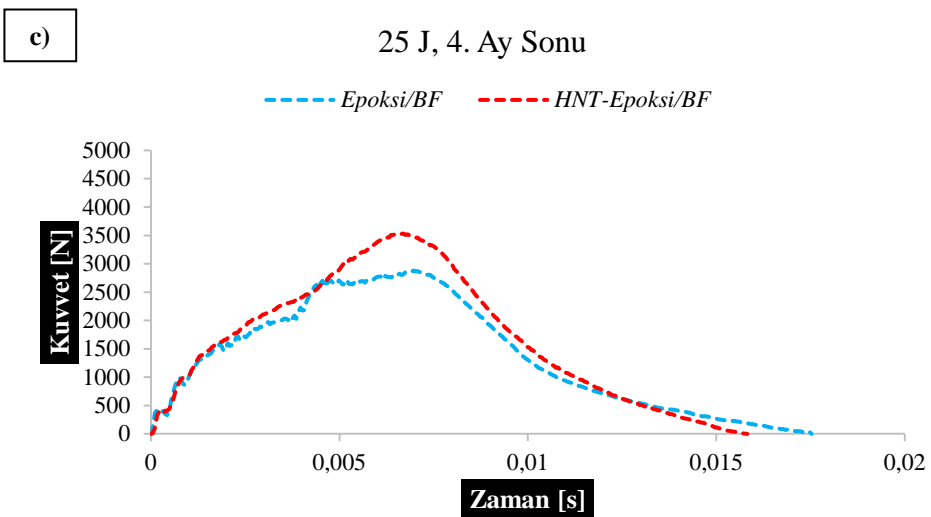
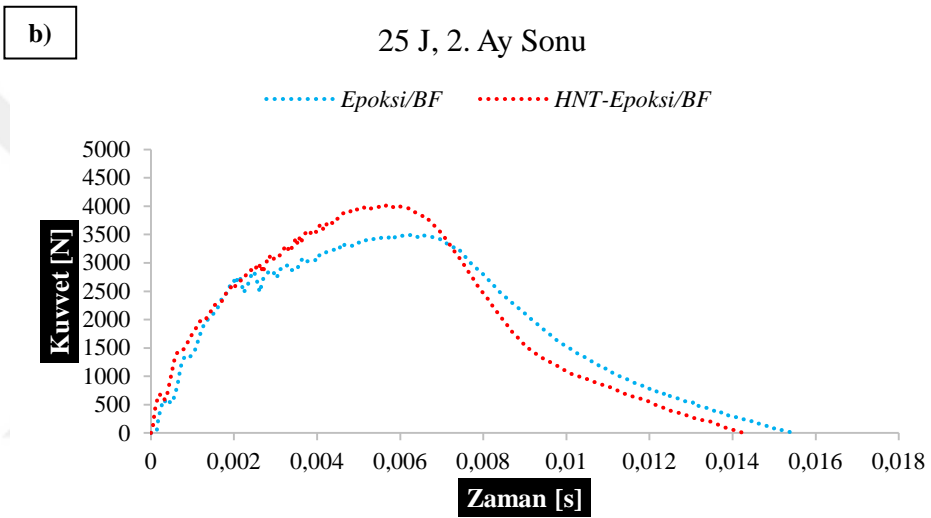
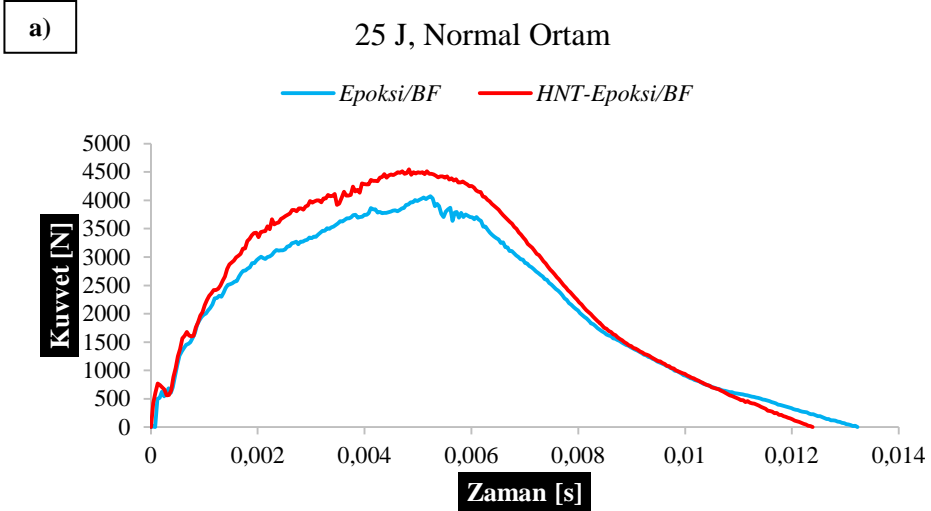


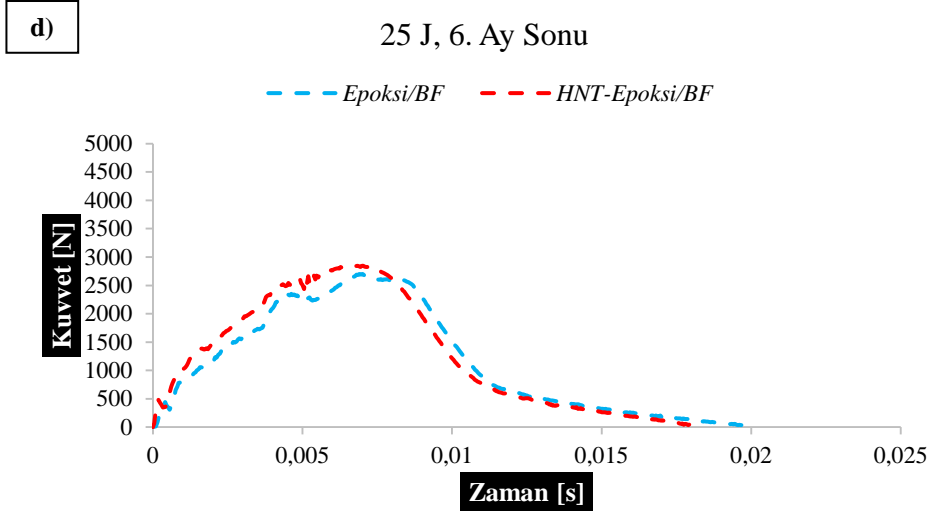


Şekil 4.23. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesinde KÜD kuvvet-zaman grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

25 J enerji seviyesinin numuneler üzerindeki etkisinin kuvvet-zaman grafiği Şekil 4.24. 'te verilmiştir. Yaşlandırılmayan numunelerin normal ortam testinde (Şekil 4.24.(a)), kompozit malzeme 4072 N, nanokompozit malzeme ise 4545 N maksimum darbe yüküne erişmişlerdir. Bu darbe yüküne bağlı olarak eğrinin başlangıç noktasından maksimum kuvvete kadar hasarı sembolize eden titreşimler meydana gelmiştir. Kompozit malzemede diğer durumlardan farklı olarak yük en yüksek olduktan sonra da hasar oluşması devam etmiştir. Elde edilen yük değerleri CÜD 'ün 25 J enerji seviyesine göre yine düşük çıkmıştır. KÜD deneylerinde gelen enerjinin tümüyle malzemeye aktarılması malzemede daha fazla deformasyon getireceği için darbe kuvvetleri düşmüş, temas süreleri CÜD sonuçlarına göre artmıştır. Deneylerin değişmez sonuçlarından biri de genelde temas rijitliği nanokompozit malzemelerin daha yüksek çıkmış ve bu malzemelerin darbe kuvvetine karşı elastik şekil değişimleri daha fazla olmuştur. Numunelerin 2. ay yaşlandırma sonuçları kuvvet-zaman grafikleri Şekil 4.24.(b) 'de verilmiştir. Kompozit malzemede darbe kuvveti değeri 3494 N 'a gerilerken nanokompozit malzemede 4018 N olarak ölçülmüştür. Gelen enerjinin artışı ve yaşlandırmanın etkisiyle numunelerdeki darbe yükü sırasıyla % 14,2 ve % 11,6 oranda düşüş yaşamıştır. Vurucunun numuneler üzerindeki temas zamanı da normal ortam verilerine göre artmıştır. Şekil 4.24.(c) 'de 4. ay yaşlandırması sonucunda eğrilerin keskin boyun vermeleri gözlenmektedir. Aynı zamanda hasarları da temsil eden keskin yön değiştirmiş eğriler darbe yüklerinin azalmasına sebep olmuştur. Artan hasar ile beraber temas süreleri de artmıştır. Ayrıca daha önceki grafiklerde de görülen eğri ucundaki sivrilme nanokompozit malzemede bu test sonunda da gözlenmiştir. 25 J 'lük enerji 6. ay numunelerine düşürüldüğünde numunelerin darbe kuvvetleri ciddi oranda düşüş yaşamıştır (Şekil 4.24.(d)). En yüksek temas kuvvetine eriştikten sonra, yük boşaltma eğrisinin geri dönüşü, numunelerde meydana gelen derin hasarların işaretidir.

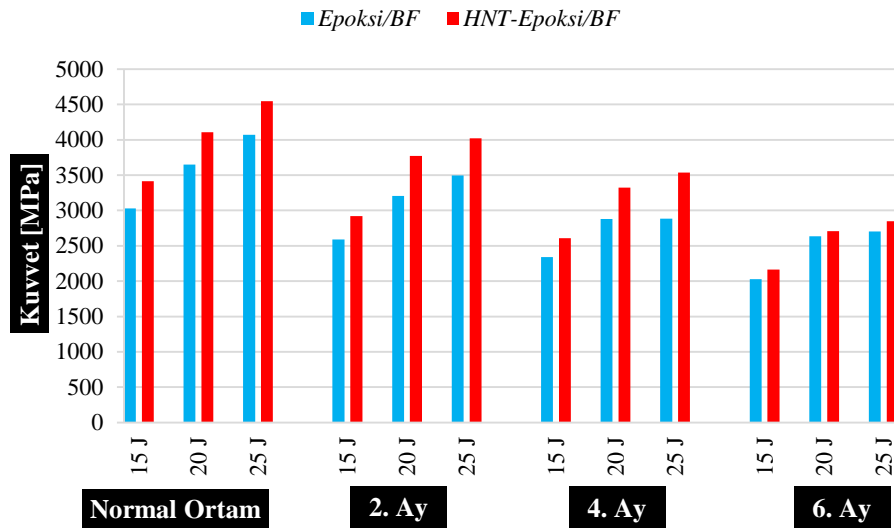






Şekil 4.24. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 25 J enerji seviyesinde KÜD kuvvet-zaman grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin yaşlandırılmamış, 2, 4 ve 6 ay tuzlu suda yaşlandırılmış numunelerinin farklı enerji seviyeleri altındaki en büyük darbe kuvvetlerinin kıyaslamalı sütun grafiği Şekil 4.25. 'te verilmiştir.



Şekil 4.25. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde ve farklı yaşlandırılmış zaman periyotlarındaki KÜD kuvvetleri

Numunelerin her zaman dilimi sonunda, artan enerji seviyeleri ile taşıdığı darbe yükleri artmıştır. Numunelerin yaşlandırılması, tuzlu suyun etkisiyle fiber, matris ve fiber/matris arayüzey bozulmalarıyla malzemeler içinde hata ve kusurlar artmıştır. Bu sebeple, ikinci ay itibariyle malzemelerin taşıdığı darbe yükleri azalmıştır. 6 aylık yaşlandırma sonunda kuvvetlerde ciddi oranda bir düşüş olmuştur. Genel itibariyle bu test süreleri neticesinde

HNT katkılı nanokompozit malzemenin darbe yükü taşıma performansında katkısız kompozit malzemeye göre iyi sonuçlar elde edilmiştir. CÜD sonuçlarına kıyasla KÜD verilerinin darbe kuvvetleri daha düşük elde edilmiştir. Vurucu ile gelen enerji CÜD testinde ilk mekanik bağlantı üzerine temasıyla gelen enerji bağlantı sistemine ve malzemelere dağılmaktadır. KÜD testinde ise vurucu getirdiği enerjiyi direk kompozit numune üzerine bırakmaktadır. Bu gelen enerji kompozit üzerine tamamıyla dağıldığından ötürü malzemedeki CÜD testine göre temas gerçekleştiğinden sonra daha fazla hasar oluşmaktadır. Bunun neticesinde KÜD testinde taşınan darbe yükleri azalmaktadır.

#### 4.4.2.2. Kompozit üstü darbe (KÜD) kuvvet-yer değiştirme grafikleri

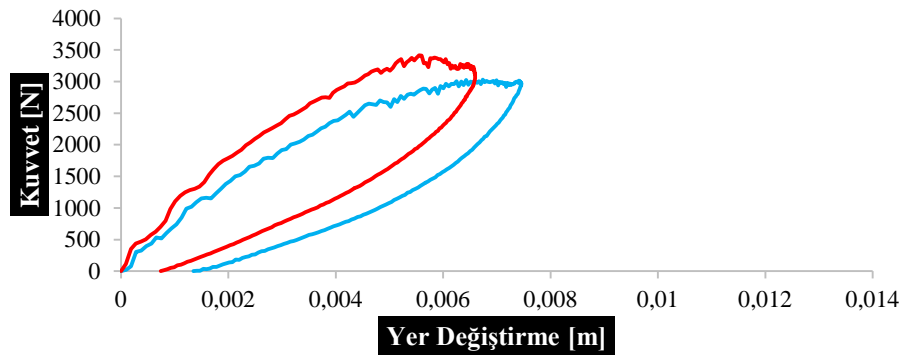
Nanokompozit ve kompozit numunelerin KÜD kuvvet-yer değiştirme grafikleri 15 J enerji seviyesinde Şekil 4.26. 'da verilmiştir. Şekil 4.26. (a) yaşlandırılmamış numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiğidir. Darbe kuvvetinin en yüksek noktaya kadar olan kısmın eğimi malzemelerin eğilme rijitliğini vermektedir. Nanokompozit malzemenin eğilme rijitliği kompozit malzemeye göre yüksektir. Numunelerde meydana gelen hasarlar malzemeyi zayıf düşürmekte ve darbe yükü altındaki çökme (yer değiştirme) miktarını arttırmaktadır. Numunelerin geri dönüş eğrileri incelendiğinde kompozit malzemedeki yer değiştirme miktarı fazla olduğu için elastik şekil değiştirme kabiliyeti nanokompozit malzemeye göre sınırlıdır. Numunelerin geri sıçrama enerjileri incelendiğinde, sıçrama enerjisi nanokompozit malzemedeki daha fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla gelen 15 J enerjiden nanokompozit malzeme tarafından yutulanı nanokompozit malzemedeki daha azdır. CÜD testi sonuçları ile kıyaslandığında, meydana gelen yer değiştirmeler KÜD testinde daha az çıkmıştır. Vurucunun civata üstü bağlantı sisteminin geometrik olarak orta noktasına temas etmesi, tüm bağlantı sistemi düşünüldüğünde daha fazla bir yer değiştirme miktarına sahip olması beklenen bir durumdur. Şekil 4.26. (b) 'de 2. ay yaşlandırılmalı numunelerde, nanokompozit malzemedeki eğilme rijitliği yüksek çıkmıştır. En yüksek yük taşıma kapasitesine kadar meydana gelen hasarlar ve 2 aylık tuzlu su yaşlandırması etkisiyle yük altındaki her iki numunede normal ortam sonuçlarından daha fazla çökme meydana gelmiştir. Ayrıca bu dönem sonucundaki, çökme miktarı kompozit malzemedeki daha fazladır. 4. ay yaşlandırma sonuçlarında, numunelerde maksimum yük altında meydana gelen elastik şekil değişimi göze çarpmaktadır (Şekil 4.26. (c)). Eğilme rijitliği ile de ilişkilendirilebilen elastik şekil değiştirme kabiliyeti kompozit malzemedeki

nanokompozite göre sınırlıdır. Bunun yanında, numune üzerinden yük boşaldıktan sonra kalıcı yer değişimi miktarı kompozit malzemede daha fazladır. Sebebi ise kompozit malzemede meydana gelen hasarlardır. Şekil 4.26. (d) 'de 6 aylık yaşlandırılan numunelerin yer değiştirme eğrisinde her iki malzemede meydana gelen hasar göze batmaktadır. Hasar miktarının artması yük altındaki yer değiştirmeleri arttırmaktadır. Kompozit malzemede yer değiştirme miktarı nanokompozit malzemeye göre fazla çıkmıştır.

a)

15 J, Normal Ortam

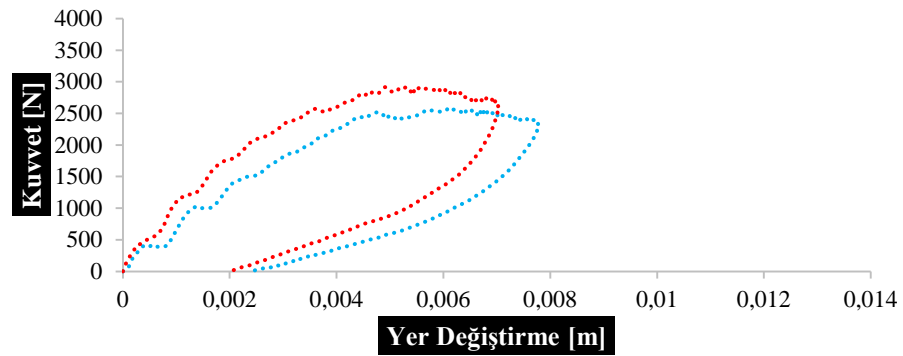
— Epoksi/BF — HNT-Epoksi/BF

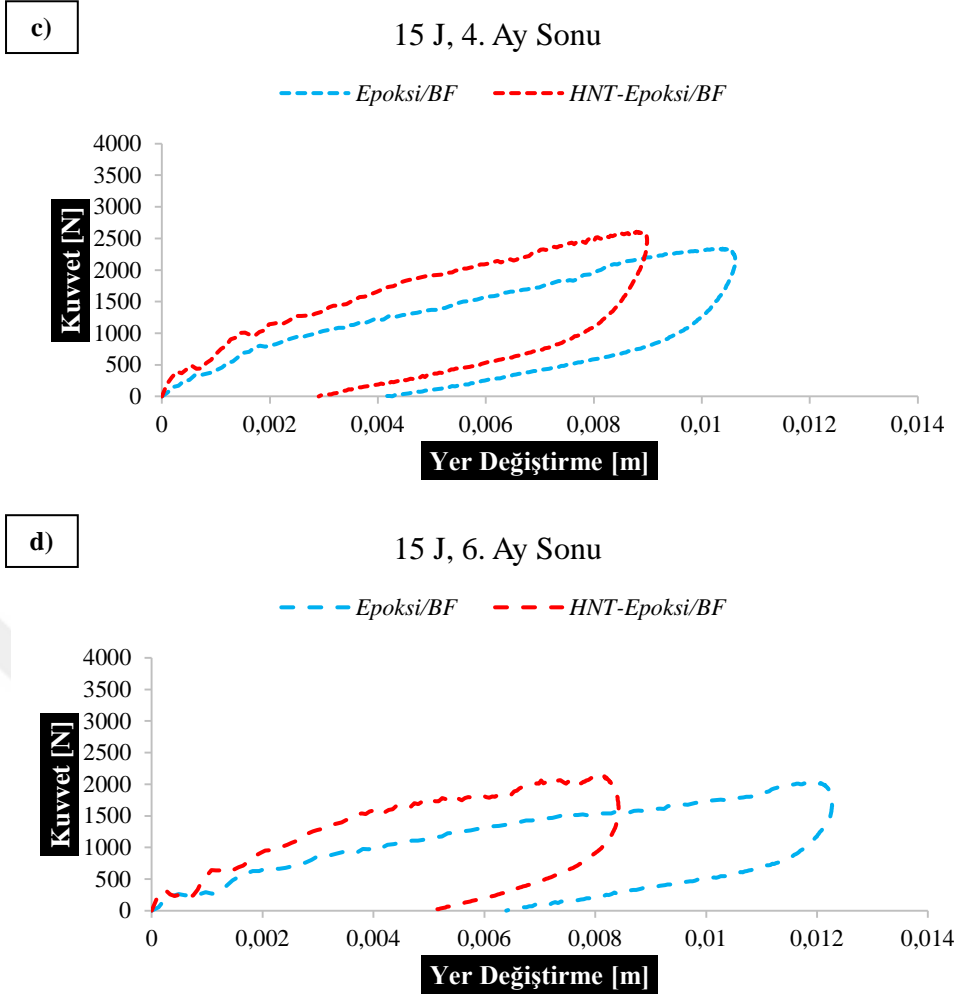


b)

15 J, 2. Ay Sonu

..... Epoksi/BF ..... HNT-Epoksi/BF

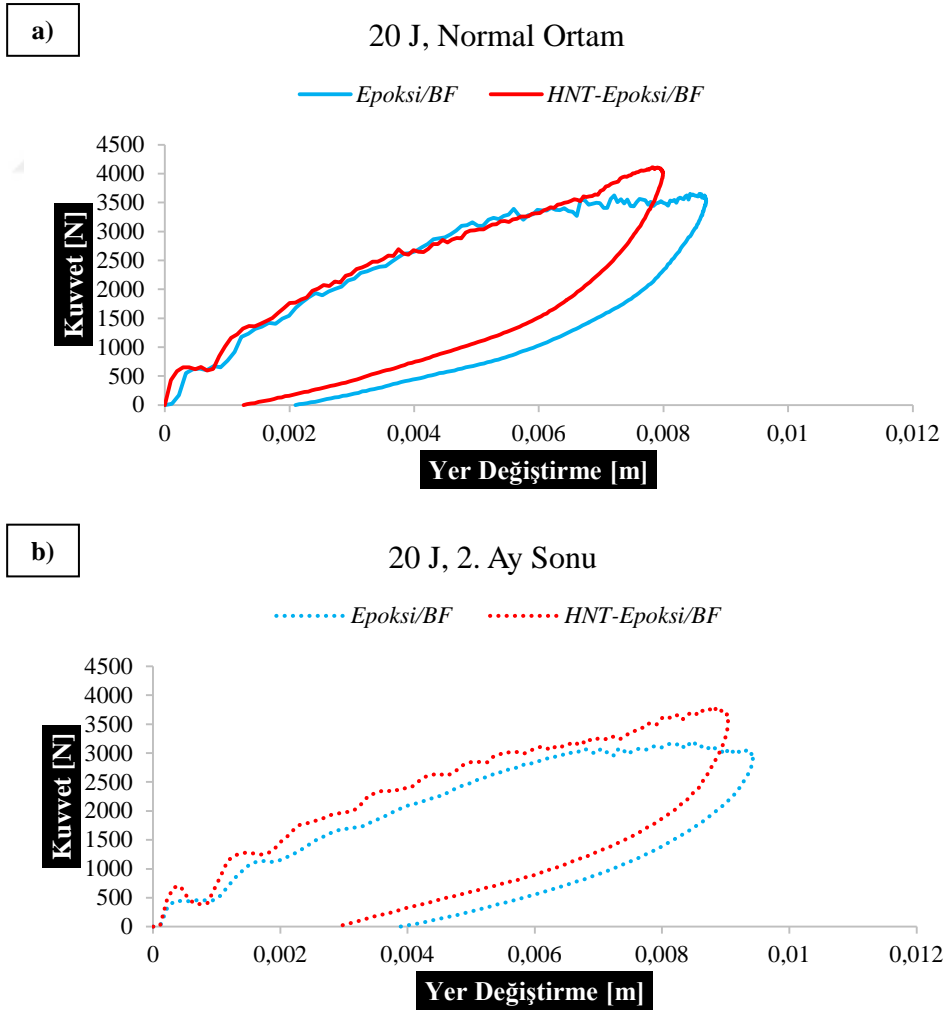


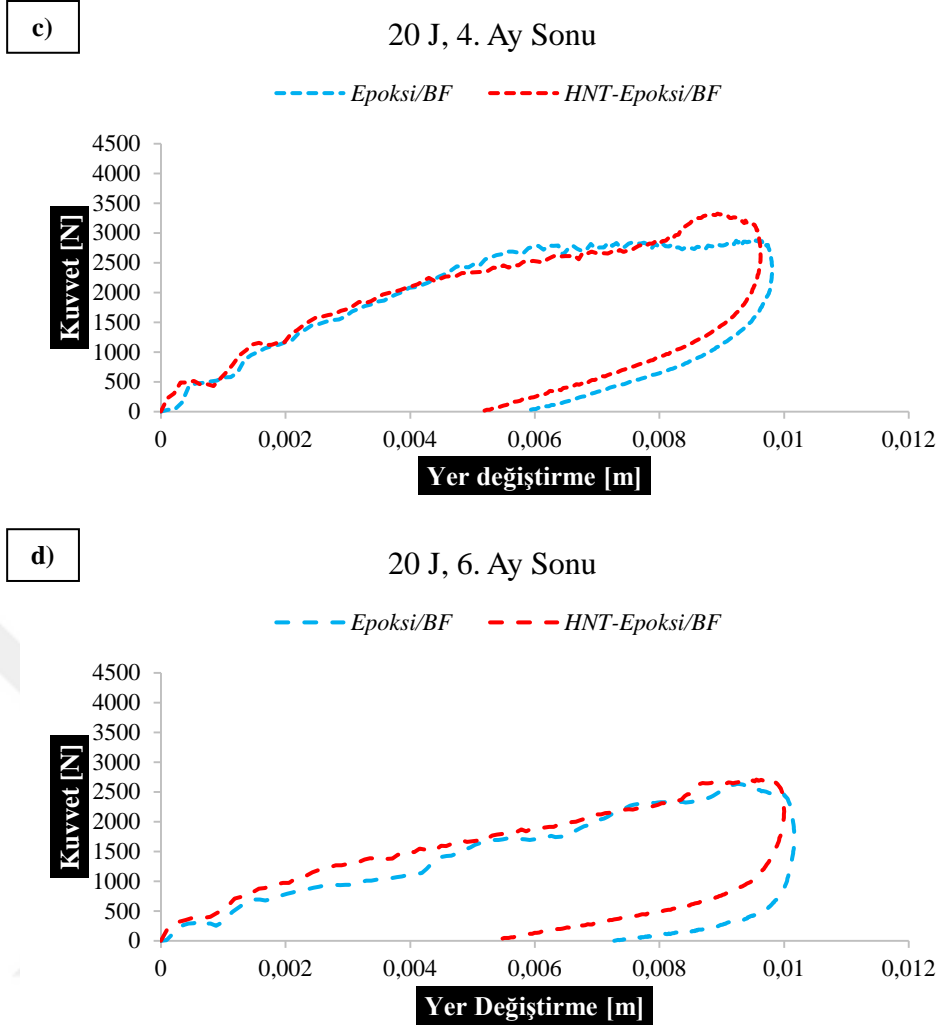


Şekil 4.26. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde KÜD kuvvet-yer değiştirme grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Kompozit numunelerin 20 J enerji seviyesindeki kuvvet-yer değiştirme grafikleri şartlandırılmamış ve zaman aralıklı şartlandırılmış numuneler için Şekil 4.27. 'de verilmiştir. Şekil 4.27. (a) 'da şartlandırılmamış numunelerin kuvvet-zaman grafiğinde eğriler maksimum darbe kuvvetine erişene kadar eğri üzerinde meydana gelen salınımlar hasarlar göstergeleridir. Katkısız kompozit malzemede meydana gelen hasarlar eğri salınımlarından nanokompozit malzemeye göre fazla görülmektedir. Bu sebeple en yüksek darbe yükü altındaki sehimler kompozit malzemede daha çoktur. Ayrıca, temas halinden en yüksek yüke kadar olan eğrinin eğimine bakılırsa nanokompozit malzeme daha fazla eğilme rijitliğine sahiptir. Numuneler en yüksek darbe kuvvetine eriştikten sonra üzerlerindeki yükün boşalmasıyla kalıcı şekil değişimleri kompozit malzemede 0,002093 mm iken nanokompozit malzemede 0,001259 mm olarak gerçekleşmiştir. Bununla beraber, CÜD sonuçları ile kıyaslandığında numunelerde meydana gelen kalıcı yer değiştirmeleri daha fazla olmuştur. Numunelere 2 aylık tuzlu su yaşlandırması

uygulandığında (Şekil 4.27. (b)) darbe kuvvetlerinin düşüşünün yanında yük altındaki elastik yer değiştirmesi artmıştır. Yük boşalması sonrasında ise kompozit malzemedeki kalıcı yer değiştirme 0,003881 mm nanokompozit malzemedeyse 0,002892 mm olmuştur. 4. ay sonunda (Şekil 4.27. (c)) numunelerin elastik yer değiştirmelerinin artmasının yanında kalıcı şekil değişimleri de artmıştır. Eğriler altındaki alan incelendiğinde geri sıçrama için elde ettikleri enerjilerin azaldığı dolayısıyla numunelerin yuttuğu enerjilerinde arttığı görülmektedir. Numuneler bu dilim içerisinde benzer özellikler gösterdiği görülsede hasara bağlı kalıcı yer değiştirme yine kompozit malzemede daha fazla olmuştur. 6.ay sonunda (Şekil 4.27. (d)) numunelerin elastik ve kalıcı yer değiştirmelerinde ciddi farklılıklar gözlenmiştir. Numunelerde neredeyse kalıcı olarak çökme meydana gelmiştir. Özellikle kompozit malzemede hasar bağlı kalıcı yer değiştirme tehlikeli hasar boyutuna geçmiştir. Geri sıçrama enerjileri irdelendiğinde kompozit malzemedeki gelen enerjinin emilimi nanokompozit malzemeye göre çok daha fazla olduğu görülmektedir.

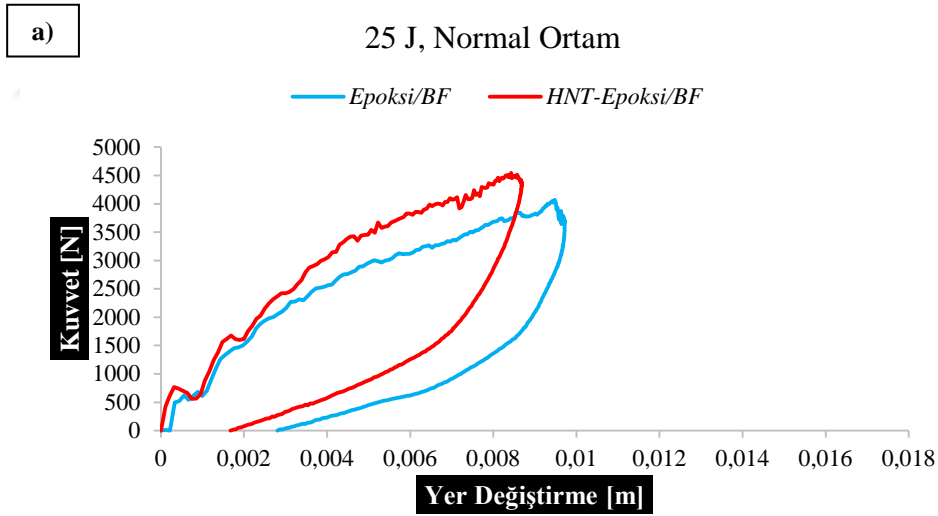




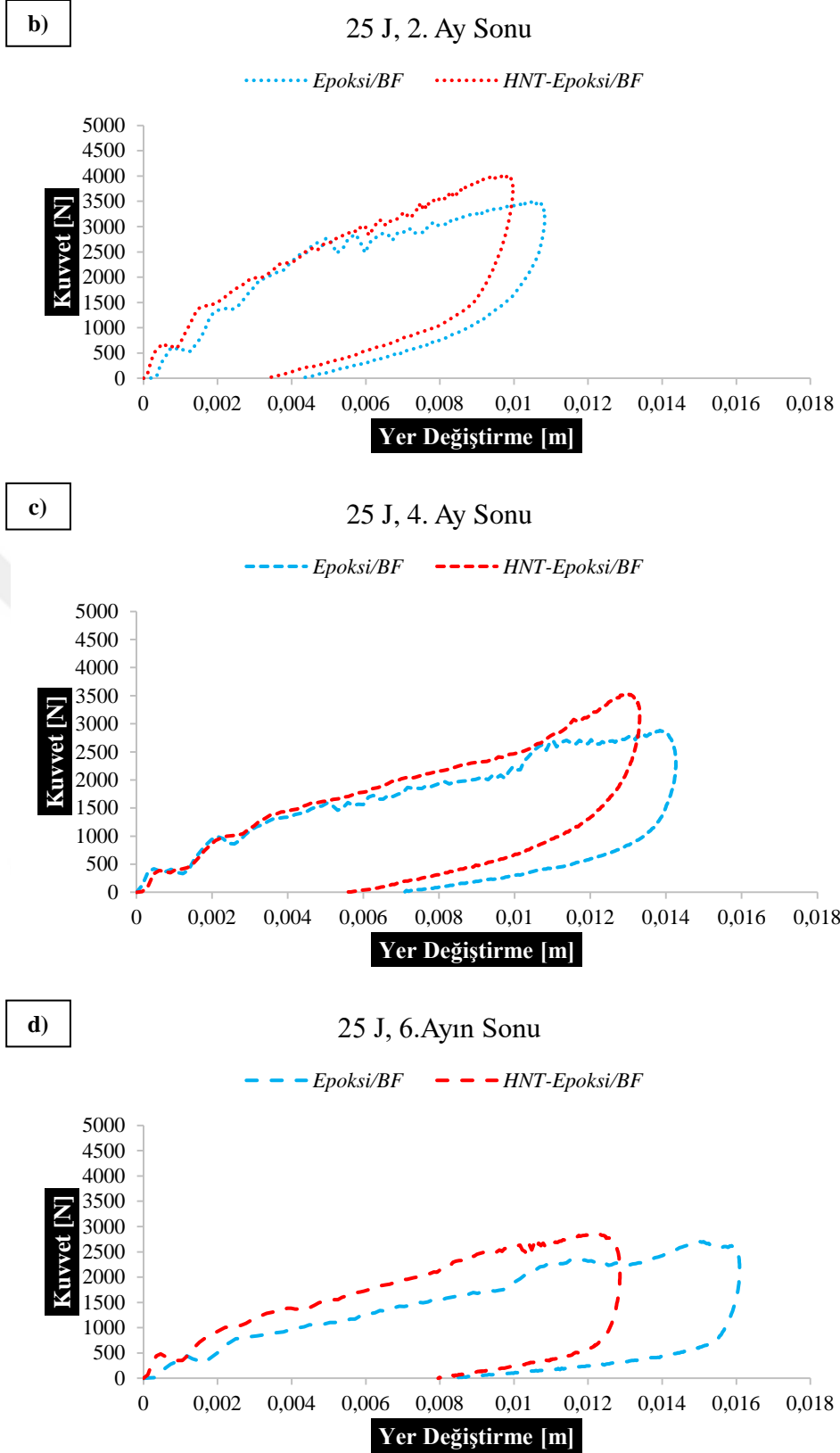
Şekil 4.27. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesinde KÜD kuvvet-yer değiştirme grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Şekil 4.28. numunelerin 25 J enerji seviyesinde farklı yaşlandırma dilimlerindeki kuvvet-yer değiştirme grafiklerini göstermektedir. Şekil 4.28. (a) 'da kuru ortamda yapılan test sonucunda, gelen enerjinin 25 J enerji seviyesine çıkması numunelerin eğrileri üzerindeki hasarları temsil eden salınımları arttırmış ve derinleştirmiştir. Bunun sonucunda numunelerde kalıcı yer değiştirmeler meydana gelmiştir. Kompozit malzemedeki yer değiştirmenin nanokompozit malzemeye göre fazla olması hasar yoğunluğunun yüksek olmasının bir sonucudur. Eğriler altındaki kalan alanlar değerlendirildiğinde kompozit malzemenin yuttuğu enerji nanokompozit malzemedən, nanokompozit malzemenin geri sıçrama enerjisi de kompozit malzemedən daha fazladır. Kompozit numunede meydana gelen kalıcı yer değiştirme 0,002811 mm iken nanokompozit numune 0,001677 mm dir. Ayrıca nanokompozit malzemenin eğilmeye karşı direnci kompozit malzemeye göre yüksektir. Şekil 4.28. (b) 'de, 2. ay sonuçlarında

ise yaşlandırma etkisiyle, kalıcı yer değiştirmede artış meydana gelmiş kompozit malzemede 0,0042 mm, nanokompozit malzemede ise 0,003302 mm olmuştur. Şekil 4.28. (a) 'ya göre geri sıçrama enerjilerinde azalma, numunelerin kendi bünyelerine aldıkları enerjide artma meydana gelmiştir. Şekil 4.28. (c) 'de 4.ay sonunda yük altındaki elastik yer değiştirmedeki artış göze batmaktadır. Numunelerde en yüksek darbe kuvveti altında ciddi bir elastik şekil değişimi söz konusu olmasının yanında, numuneler üzerindeki yük boşalmasıyla kalıcı şekil değiştirme miktarları da artmıştır. Kompozit malzemede 0,007080 mm nanokompozit malzemede 0,05531 mm kalıcı yer değiştirme meydana gelmiştir. 6.ay yaşlandırması sonunda Şekil 4.28. (d) 'de numunelerde hasarın ciddi oranda ilerlemesi, hem elastik yer değiştirmeyi hem de kalıcı yer değiştirmeyi arttırmıştır. Numunelerin kendi bünyelerine yuttuğu enerjiler fazlasıyla artmıştır. Geri sıçrama enerjileri ise bir o kadar azalmıştır. Kompozit malzemede 0,008459 mm olan yer değiştirme miktarı nanokompozit malzemede 0,007955 mm olarak gerçekleşmiştir. Numunelerde gerçekleşen en yüksek kalıcı yer değiştirme 25 J enerji seviyesinin bu yaşlandırma zaman diliminde meydana gelmiştir.

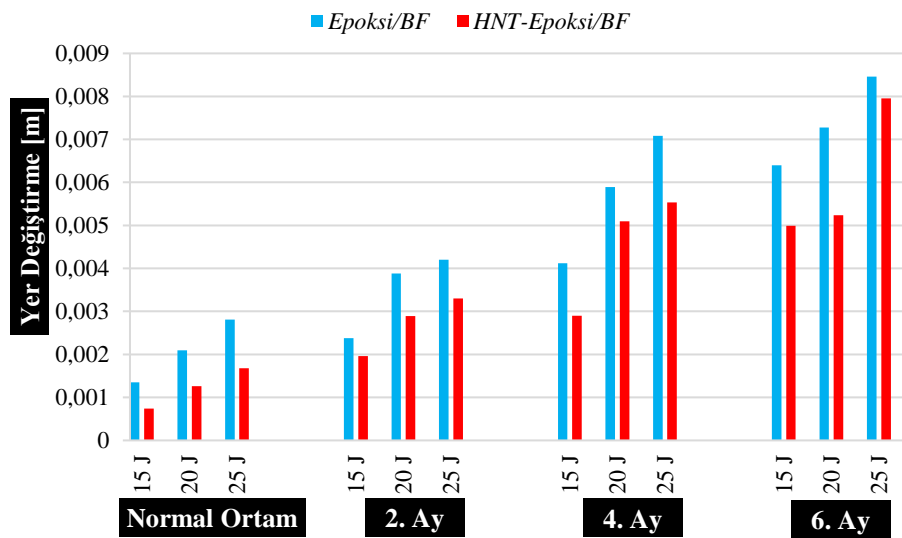






Şekil 4.28. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 25 J enerji seviyesinde KÜD kuvvet-yer değişirme grafiği a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. Ay

Cıvata bağlı numunelerin Şekil 4.29. 'da verilen kıyaslamalı sütun grafiğinde, enerji seviyelerinin ve yaşlandırma sürelerinin kalıcı yer değiştirme miktarlarına etkisi ifade edilmiştir. Normal kuru ortam içinde, 2, 4 ve 6 ay yaşlandırma süreci sonunda gelen enerjinin artmasıyla numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler artmıştır. Hasara bağlı olarak sonuçlanan kalıcı değişimler kompozit malzemede meydana gelen zayıflıkların daha yoğun olduğunu ifade etmektedir. Bu yoğunluklar 4. ve 6. ay yaşlandırması sonuçlarında kendini hissedilebilir bir şekilde göstermektedir. Bunun yanında, tuzlu suyun epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin yaşlandırılmasında uzun soluklu kullanılması yük altında farklı elastik ve plastik davranış kattığı da 2. aydan 6. aya kadarki süreçte gözlenmektedir. Yük altındaki kalıcı yer değiştirme miktarları yaşlandırma etkisiyle 2. ayda kendini göstermeye başlamakta 6. ayda ise etkisi en yüksek düzeyde görülmektedir.

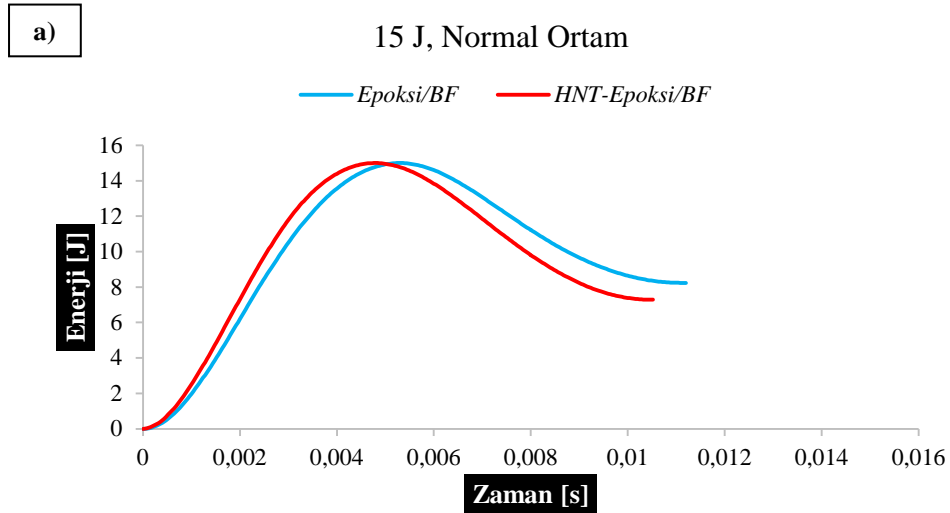


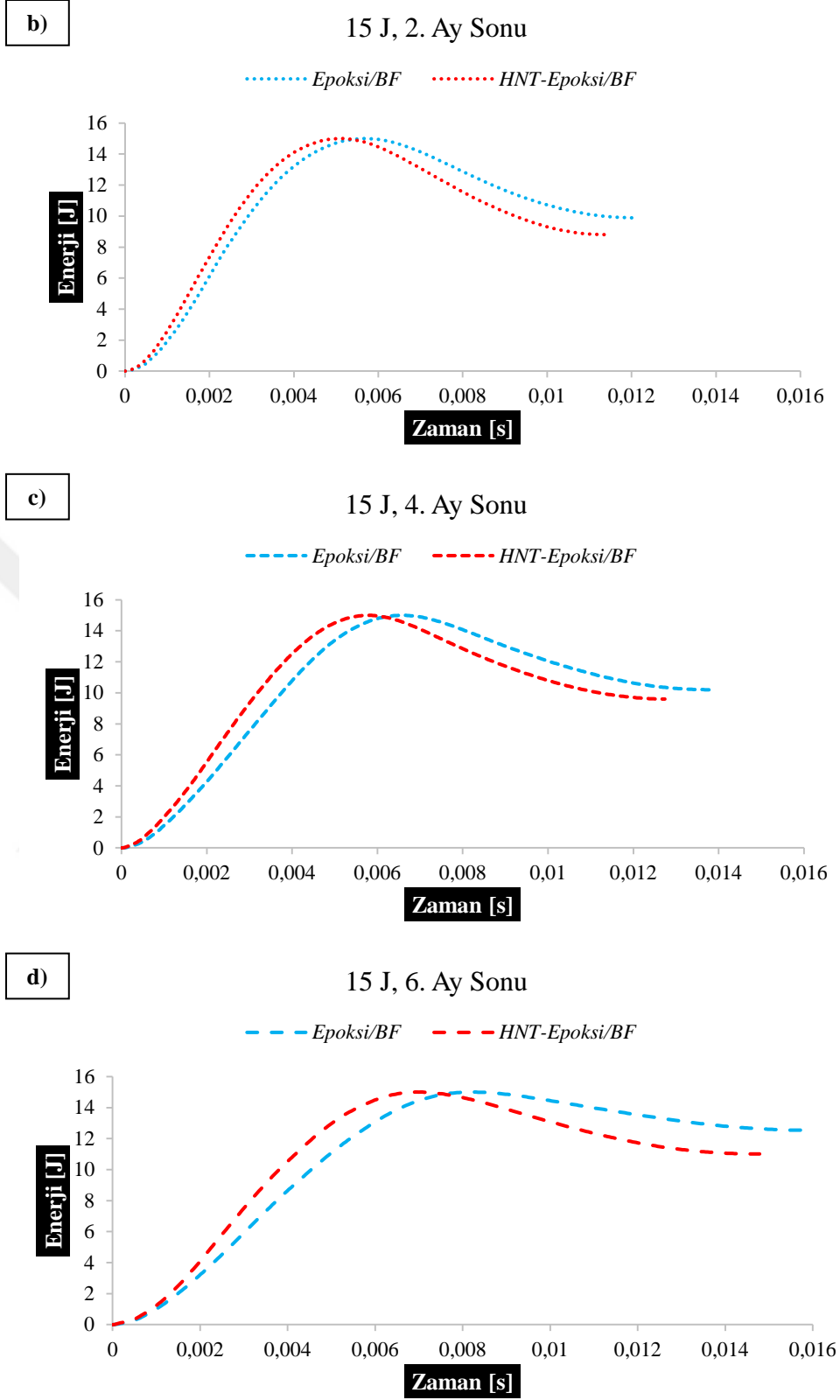
Şekil 4.29. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde ve farklı yaşlandırılmış zaman periyotlarındaki KÜD kalıcı yer değiştirme miktarları

#### 4.4.2.3. Kompozit üstü darbe (KÜD) enerji-zaman grafikleri

Vurucunun gelen enerjii kompozit üstü darbe (KÜD) ile numuneye aktarması sonucu, kompozit ve nanokompozit malzemelerin yuttuğu ve sıçrama için geri veri verdiği enerjileri zamana bağlı temsil eden grafikler enerji-zaman grafikleridir. 15 J enerji seviyesinde yaşlandırılmamış ve süreye bağlı yaşlandırmaya maruz kalmış numunelerin enerji-zaman grafikleri Şekil 4.30. 'da verilmiştir. Şekil 4.30. (a) 'da kuru ortamda kompozit malzeme gelen enerjiden 8,24 J yutarken, nanokompozit malzeme 6,76 J enerji yutmuştur. Geri kalan enerjiler ise malzemede geri sıçrama enerjisi olarak iade edilmiştir.

Aynı şartlardaki CÜD sonuçlarına kıyasla malzemelerin yuttukları enerji daha azdır. CÜD testinde gelen enerji ilk olarak rijit olan mekanik bağlantı sistemi üzerinden tüm bağlantı sistemine dağılırken, KÜD testinde gelen enerji kompozit numune üzerinden tüm sisteme dağılmaktadır ve böylece KÜD testinde mekanik bağlantının yuttuğu enerji CÜD 'e göre azalmaktadır. Numunelerin 2. ay yaşlandırması sonrası Şekil 4.30. (b) 'de kuru ortam testi sonuçlarına nazaran artan temas süresi ile beraber numunelerin yuttukları enerji artmıştır. Kompozit malzemenin yuttuğu enerji 9,8 J iken nanokompozit malzemede yutulan enerji 8,8 J olmuştur. Kompozit numunelerin doğasından ve üretiminden gelen düzensizlikler, tuzlu su ortamında matris ve fiber fazlarının içerisinde nem emilimini kolaylaştırmakta ve bozulmalara sebep olmaktadır. Bu ay itibariyle ilerleyen düzensizlikler malzemede gelen enerjinin normal ortam sonuçlarına göre emilimini arttırmıştır. Diğer bir ifadeyle de geri sıçrama enerjileri azalmıştır. 2.ay ile başlayan bozulma 4.ay yaşlandırması sonrası da ilerleyerek devam etmiştir. Şekil 4.30. (c) 'de, epoksi/BF kompozitin yuttuğu enerji 10,2 J, HNT-epoksi/BF nanokompozitin yuttuğu enerji 9,6 J olmuştur. Bu durum 6. ay sonunda daha ileri bir seviyeye taşınmış numunelerin yuttukları enerji sırasıyla 12,5 J ve 11 J olmuştur (Şekil 4.30. (d)).

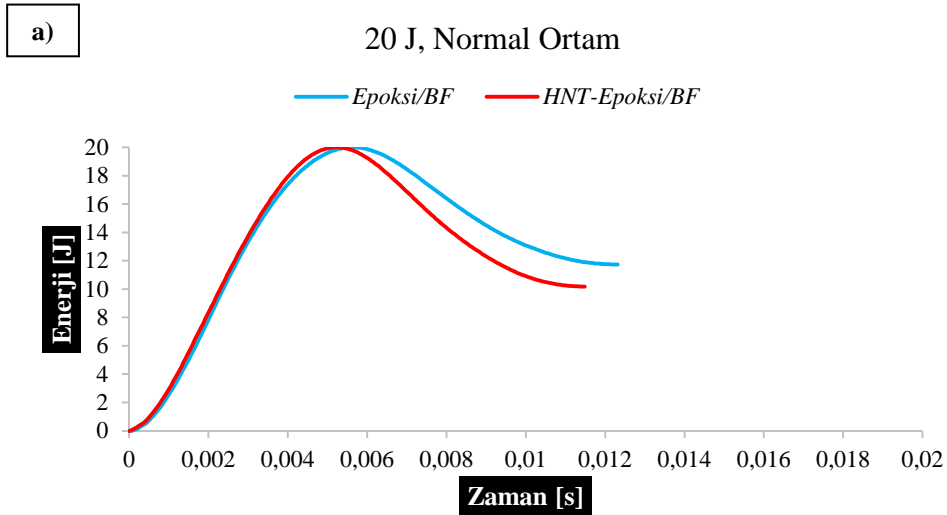


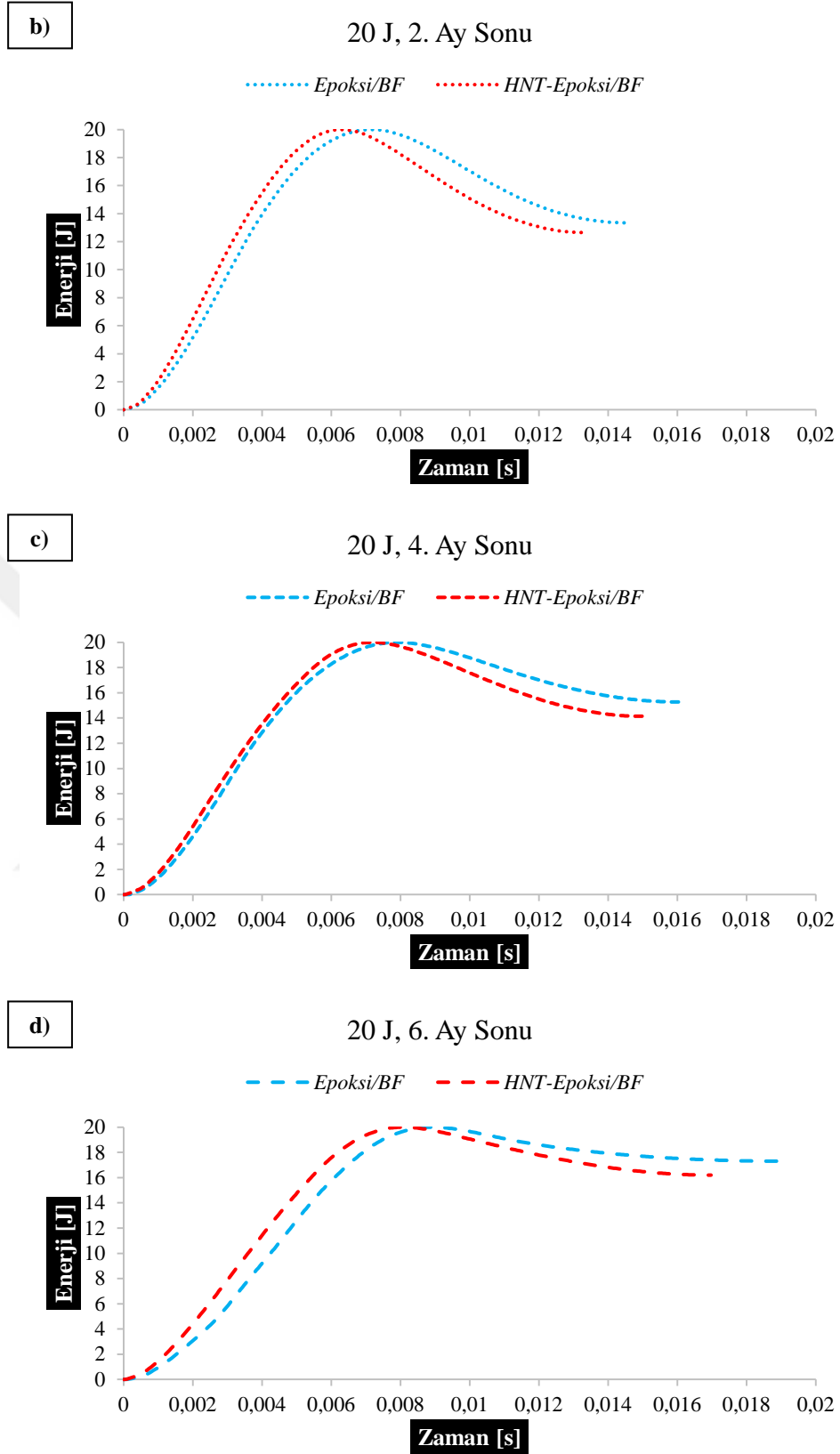


Şekil 4.30. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15 J enerji seviyesinde KÜD enerji-zaman grafikleri a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Gelen enerji seviyesinin 20 J olduğu durumda numunelerin enerji-zaman grafikleri Şekil 4.31. 'de verilmiştir. Normal, kuru ortamda yapılan deney sonucunda

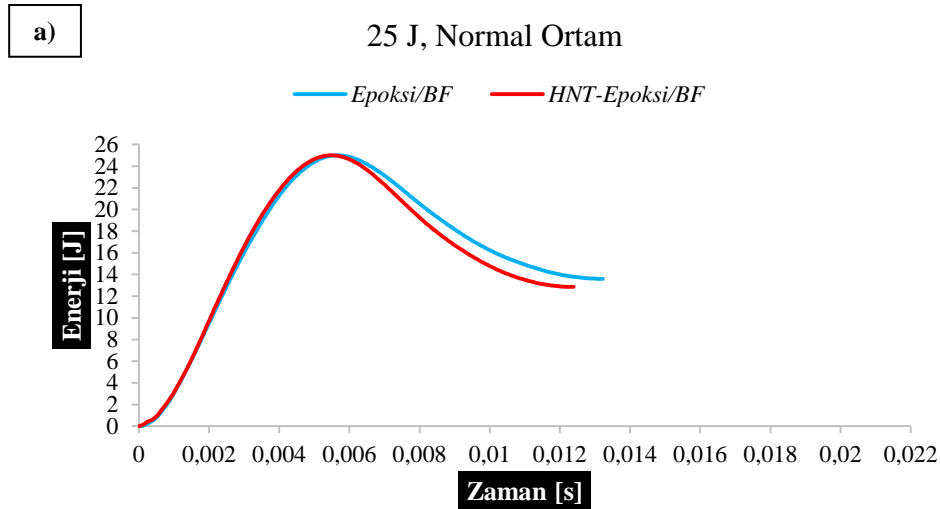
(Şekil 4.31. (a)), numuneler üzerine gelen 20 J enerjinin 11,74 J kompozit malzeme tarafından emilirken 8,26 J geri sıçrama enerjisi olarak geril verilmiştir. Nanokompozit malzemede ise 10,18 J emilim yaşanmış, 9,82 J geri sıçramaya verilmiştir. Hasardan kaynaklı temas süresindeki gecikmeden dolayı kompozit malzemenin nanokompozit malzemeye göre daha fazla enerji yutması olağan bir durumdur. Şekil 4.31. (b) 'de numunelerin 2 ay yaşlandırılmasından sonra, numunelerde temas süreleri artmasının yanında kendi bünyelerine absorbe ettikleri enerjilerde artış gerçekleşmiştir. Kompozit numunedeki absorbe 13,34 J, nanokompozit numunede ise 12,66 J olmuştur. Yutulan enerjinin artması, geri sekme için gerekli enerjinin azalmasına sebep olmuştur. Yaşlandırma sürecindeki etkiler 4. ve 6. ay yaşlandırma sonunda da artarak devam etmiştir. 4.ay sonunda 15,26 J enerji yutumu kompozit malzemede 14,14 J enerji yutumu nanokompozit malzemede gerçekleşmiş, geri sıçramaya kalan enerjiler ise sırasıyla 4,74 J ve 5,86 J olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.31. (c)). 6.ay sonunda numunelerdeki hasar boyutu tehlikeli sınırlara ulaşmıştır. Kompozit numunede 17,3 J olan yutulan enerji nanokompozit malzemede 16,2 J olarak gerçekleşmiştir. Geriye kalan 2,7 J ve 3,8 J enerji sırasıyla numuneler için geri sıçrama için kullanılmıştır (Şekil 4.31. (d)).

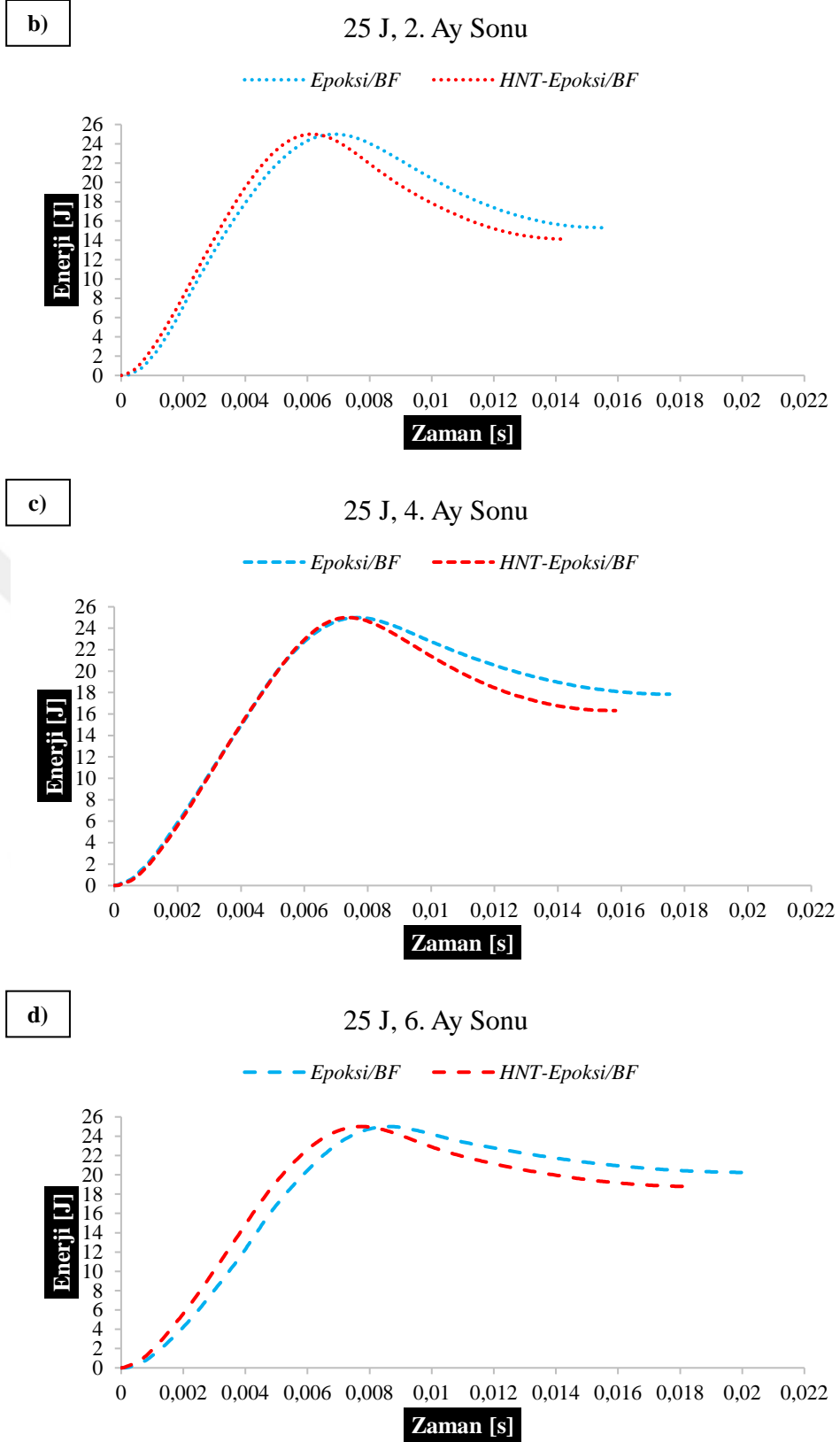




Şekil 4.31. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 20 J enerji seviyesinde KÜD enerji-zaman grafikleri a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay

Gelen enerjinin en yüksek seviyesi 25 J deki kuvvet-zaman grafikleri Şekil 4.32. 'de verilmiştir. Yaşlandırılmamış numuneler üzerine gelen 25 J enerji, numuneler tarafından sırasıyla 13,6 J ve 12,85 J olarak nerdeyse yarı yarıya yutulmuştur (Şekil 4.32.(a)). Yutulan enerjiler numuneler içerisinde düzensizliklerin (çatlak, üretim hasarları, doğal hasarlar vs.) ilerlemesine yani yeni yüzeylerin oluşmasına gitmiştir. Yutulan dışında kalan 11,4 J ve 12,15 J enerji sırasıyla kompozit ve nanokompozit numunelerin geri sıçrama enerjisi içerisine katılmıştır. 25 J enerji seviyesi 2 ay deniz tuzu suyunda beklemiş numunelere uygulandığında yutulan enerjiler, kuru ortam sonuçlarına göre yaşlandırmanın numuneler üzerindeki bozucu etkileri sebebiyle artış göstermiştir (Şekil 4.32.(b)). Bu bozucu etki, numunelerin 4.ay yaşlandırması sonunda da artarak devam etmiştir (Şekil 4.32.(c)). Kompozit malzeme gelen enerjinin 17,84 J kısmını yutarken 7,15 J geri sıçramaya harcanmıştır. Nanokompozit numunede ise yutulan enerji 16,32 J, sıçrama için geri verilen 8,68 J 'dur. 25 J enerji seviyesinin son testi ise Şekil 4.32.(d) 'de 6. ay yaşlandırmış numunelere uygulanmıştır. Numunelerdeki hasarlar sebebiyle bu zaman diliminde malzemenin kullanım ömrü tehlikeli sınırlara ulaşmıştır. Kompozit malzemede gelen enerjinin 20,25 J 'ü, nanokompozit malzemede ise 18,8 J 'ü malzeme içinde hasarın gelişimi ve ilerlemesi için yutulmuştur.

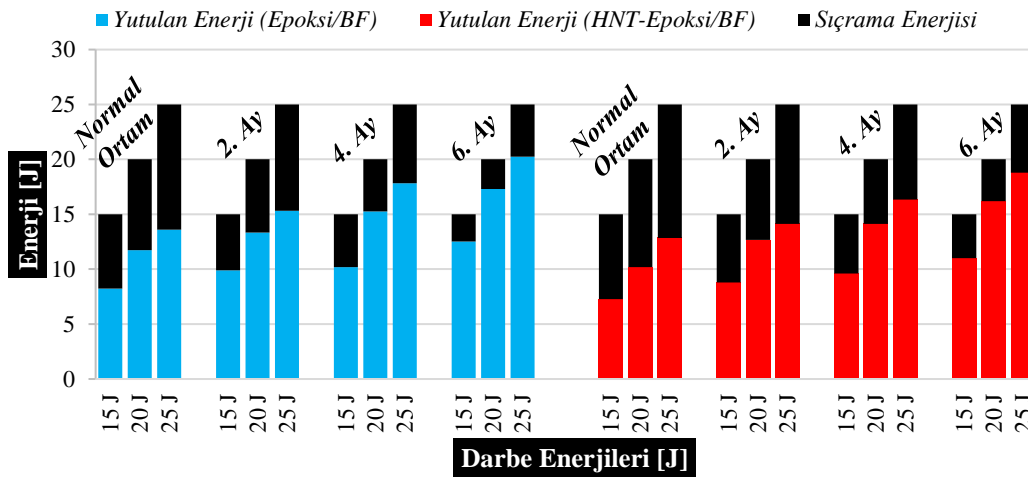




Şekil 4.32. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 25 J enerji seviyesinde KÜD enerji-zaman grafikleri a) Normal ortam b) 2. ay c) 4. ay d) 6. ay



Cıvata bağılı epoksi/BF kompozit ve HNT-Epoksi/BF nanokompozit malzemelerin farklı yaşlandırma süreleri ve farklı enerji seviyelerindeki kıyaslamalı sütun grafiği Şekil 4.33. 'te verilmiştir. Hem kuru (normal) ortam testlerinde hem de yaşlandırılmış zaman dilimleri içinde (2-4-6) malzemeler üzerine gelen enerji miktarı arttıkça, vurucunun numune üzerinde oluşturduğu hasar miktarı arttığından yutulan enerji miktarları da yükselmiştir. Her ortam testi sonucunda nanokompozit malzemenin enerji yutma ve geri sıçrama için verdiği enerjiler göz önünde bulundurulduğunda katkısız kompozit malzemeye göre daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir. HNT 'nin fiber, matris ve fiber /matris arayüzeyinde meydana getirdiği mekanizmalar sayesinde böyle bir sonuca varılmıştır. Bu mekanizmalar tartışma bölümünde detaylıca irdelenmiştir. Tuzlu su ortamında bekletilen numunelerde meydana gelen emilim sonucu oluşan fiber ve matris bozulmaları malzemeleri zayıflatmıştır. Yaşlandırma süresi uzadıkça bu bozulmaların dereceleri ilerlediğinden dolayı numuneler üzerine gelen enerjiler fazlaca yutulmuştur. Yani, yaşlandırma süresi arttıkça malzemede meydana gelen hasara bağlı olarak 2. aydan 6. aya yutulan enerji miktarları artmıştır.



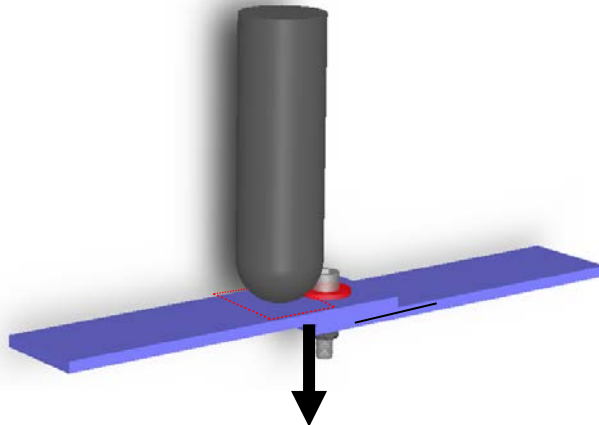
Şekil 4.33. Cıvata bağlantılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemenin 15J, 20 J ve 25 J enerji seviyesinde KÜD enerji dağılım grafikleri

#### 4.4.2.4. Kompozit üstü darbe (KÜD) sonucu hasar görüntüleri

Cıvata bağılı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin vurucunun malzeme üzerine düşürülüp hasar aldığı görüntülerin son hali Şekil 4.34. 'te verilmiştir. Vurucu, malzeme üzerine ve mekanik bağlantı sistemine temas etmeyen Şekil 4.34.A 'da şematik gösterimde gösterilen bölgelere düşürülmüştür. Bunun neticesinde hasarlar vurucunun malzeme üzerinde temas ettiği bölge üzerinde yoğunlaşmıştır. Delik

tarafına doğru ilerleyen bir çatlak mekanizması yüzeyde gözlenmemiştir. Yaşlandırılmamış kompozit malzemelerin 15-20-25 J enerji seviyesindeki hasar görüntüleri sırayla Şekil 4.34. B1., B2., ve B3. 'te verildiği gibi, vurucunun temas ettiği noktada artan enerji ile beraber oluşan hasar alanı ve yoğunluğu artmaktadır. Hasar ilerlemesi gelen enerjinin artması ile yan kenarlara dik bir şekilde olmaktadır. Yaşlandırılmamış nanokompozitte ise hasar, kompozit malzemede meydana gelenden daha az yoğunlukta olmuştur (Şekil 4.34. C1., C2., C3.). Aynı şekilde artan enerji ile hasar bölgesi genişlemiş, hasarların yan kenarlara doğru dallanarak ilerlemiştir. Hasarın ara yaşlandırma periyotlarında nasıl ilerlediğini anlamak için 4.ay yaşlandırmasının kompozit numuneleri Şekil 4.34. D1., D2., ve D3. 'te verilmiştir. 15 J enerji seviyesinden itibaren, yaşlandırılmamış normal ortam deneylerine göre hasar miktarları artmakta ve hasar yan kenarlara ilerlemektedir. 20 J seviyesinde ise yan kenarlara ilerleyen hasar izleri kalınlaşmıştır. 25 J seviyesinde de yan kenarlara uzanan hasar izi sayısı artmıştır. Benzer izlenimler kompozit malzemenin Şekil 4.34. E1., E2., ve E3. 4.ay yaşlandırmalarında da gözlenmiştir. Bu hasar yüzeylerinde en çok göze çarpan durum, yan kenarlara doğru ilerleyen hasar izleri düz bir yol izlemeyi tercih etmeden dolambaçlı olarak ilerlemiştir. 6. ay yaşlandırmasında numunelerde meydana gelen hasarlar artık tehlikeli boyutlara varmıştır. Kompozit malzemede Şekil 4.34. F1., F2., ve F3. 'te hasarlar artık yan kenarlara tamamıyla ulaşmıştır. Hasar yoğunlukları bir önceki duruma göre artmıştır. 25 J enerji seviyesinde ise malzemede neredeyse vurucunun tüm yüzey alanını anımsatan bir hasar meydana gelmiştir. Nanokompozit numunelerde oluşan durumda bundan farksızdır (Şekil 4.34. G1., G2., G3.). Yan kenarlara ulaşan hasarların artmasının yanında, dolambaçlı ve dallanmış hasar şekli dikkat çekmektedir.

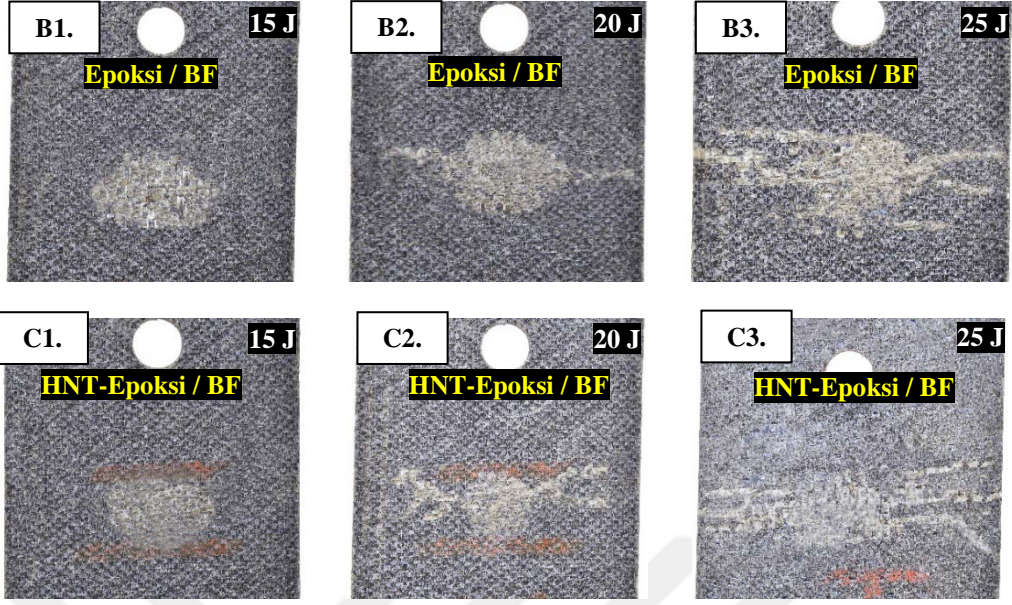
A.



---

 Normal ortam sonu hasar görüntüleri
 

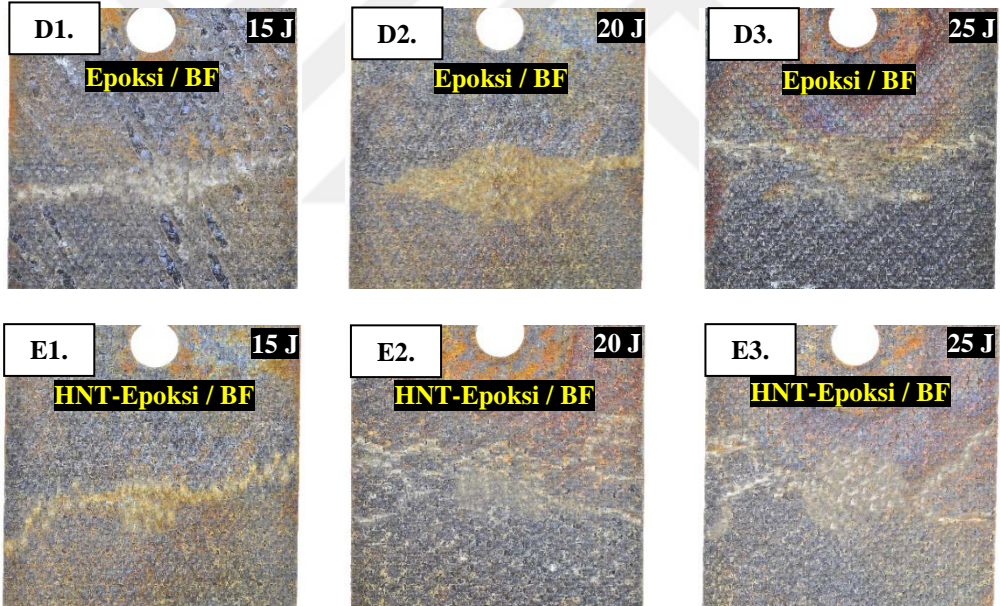
---




---

 4. Ay sonu hasar görüntüleri
 

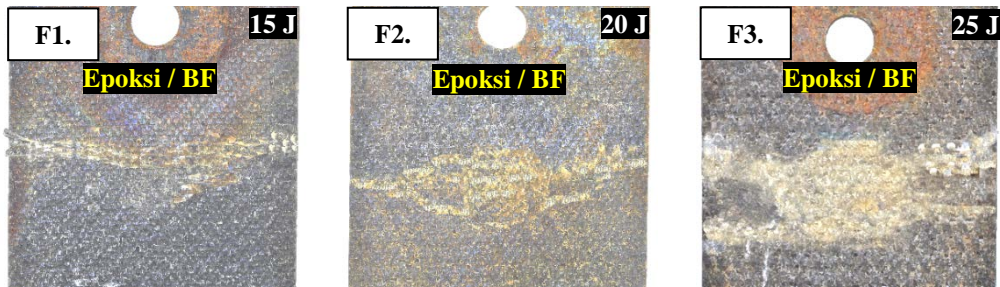
---



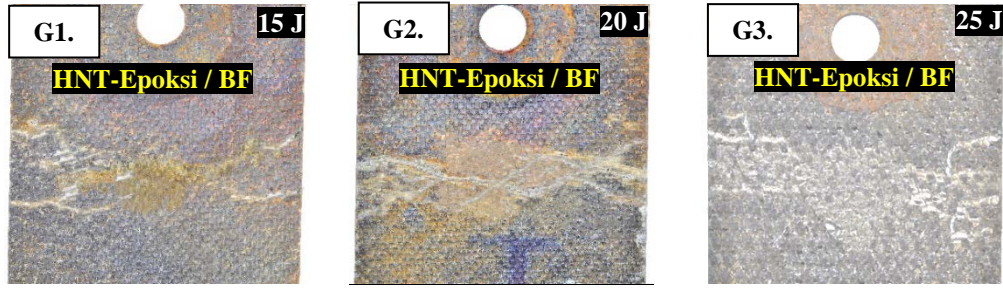

---

 6. Ay sonu hasar görüntüleri
 

---



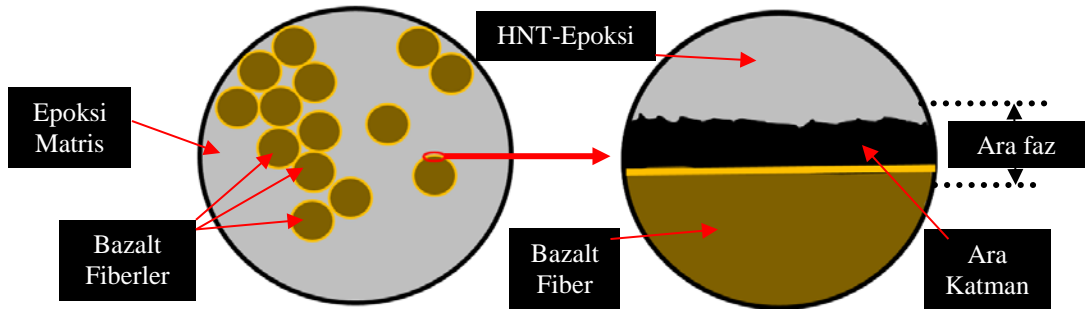




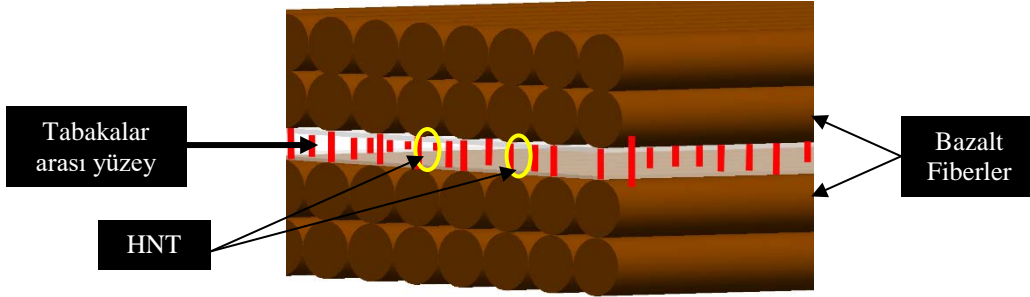
Şekil 4.34. 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde KÜD A) Şematik gösterim, B-G) Hasar görüntüleri

#### 4.4.3. Tartışma

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kritik olarak hasarın hızlı bir şekilde ilerlediği iki zayıf bölge bulunmaktadır. Bu bölgelerden biri malzemedeki fiber/matris arasındaki katman, diğer bölge ise tabakalar arasındaki arayüzeyle. HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemede fiber/matris arayüzünün şematik gösterimi Şekil 4.35. 'te gösterilmektedir. HNT katkısı ile epoksi malzeme ve bazalt fiberler arasındaki etkileşimi ifade eden bölge ara faz olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede HNT parçacıkları fiber/matris arasında yeni yapışma hacimleri oluşturarak, iki eleman arasındaki bağlantıyı güçlendirmektedir. Nanokompozit malzemenin bir diğer bölgesi tabakalar arası yüzeyin şematik gösterimi de Şekil 4.36. 'da verilmiştir. Bu bölgede de HNT 'ler tabakalar arası yüzeyler arasında köprü vazifesi görecektir şekilde konumlandığında, iki tabaka arasında bağlayıcı vazifesi görmekte ve tabakalar arası mukavemet sağlamaktadır.

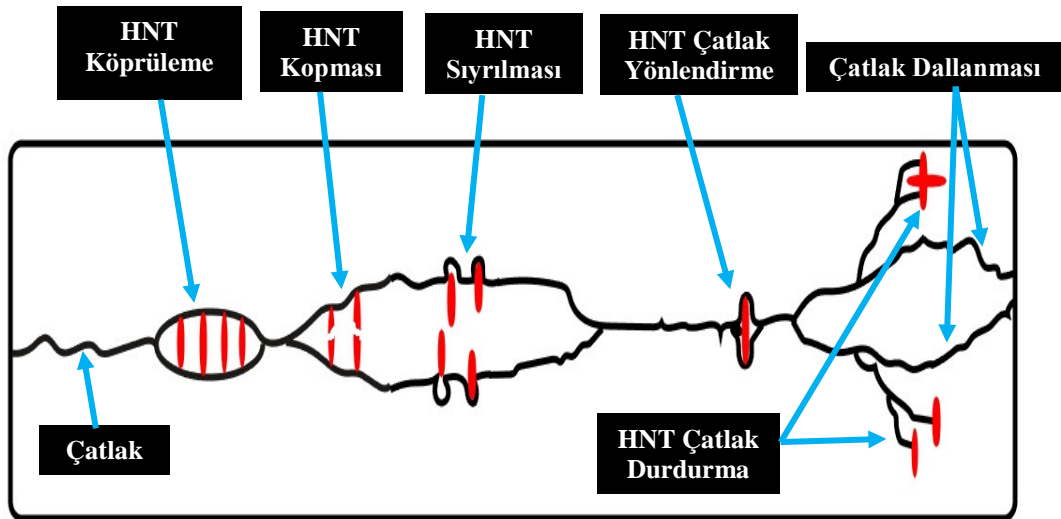


Şekil 4.35. HNT-epoksi/BF nanokompozit ara katman şematik gösterimi



Şekil 4.36. HNT-epoksi/BF nanokompozit tabakalar arası yüzey şematik gösterimi

Nanokompozit malzemelerdeki HNT kümelerinin yukarıda bahsi geçen arayüzelere yerleşerek fiber/matris arasındaki ve tabakalar arasındaki temas yüzeylerini arttırmaktadır. Bunun yanında HNT parçacıkları, bu arayüzelerde meydana gelen gerilmeler sonucu oluşan çatlaklara karşı birtakım davranışlar sergilemektedir. Bu davranış mekanizmalarının şematik ifadesi Şekil 4.37. 'de verilmiştir. HNT parçacıkları kompozit malzeme üzerinde çatlak köprüleme, çatlak durdurma ve çatlak yönlendirmesine bağlı çatlak dallanmasını sağlayacak etkilere sahiptir. Bunun yanında çatlak HNT ile karşılaşması sırasında HNT 'yi polimer içerisinden sıyırmaya ve kopmaya zorladığı durumlarda meydana gelmektedir. HNT parçacıklarının kırılmaya veya sıyrılmaya zorlanması, nanokompozit malzemedeki ekstra enerji gereksiniminin arttıracağından malzemenin çatlak başlama ve ilerleme direncini arttırarak tokluk özelliklerinin iyileştirmektedir.



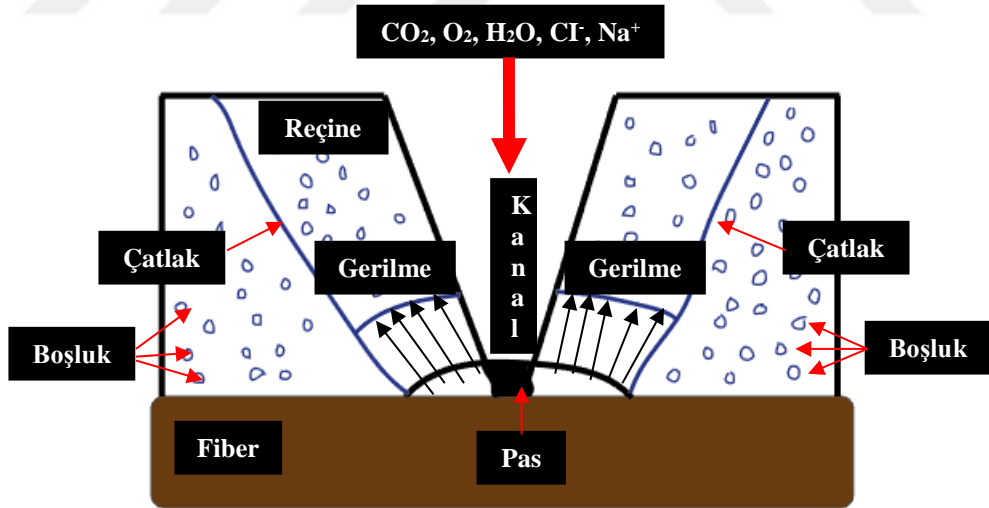
Şekil 4.37. HNT 'nin malzeme içerisindeki mekanizmaları

Cıvata bağlı kompozit ve nanokompozit malzemelerin cıvata üzerine ve malzeme üzerine vurucunun düşürülmesiyle yapılan düşük hızlı darbe testlerinde HNT katkılı nanokompozitler gözle görülür bir şekilde iyi bir performans sergilemiştir. Kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testindeki hasar davranış modelleri sırasıyla matris çatlaması, delaminasyon, fiber/matris arayüzey sıyrılması ve fiber kopması olarak nitelendirilmektedir (Kara ve ark., 2014; Demir, 2017). HNT parçacıkları, numunelerin bu tür hasar oluşma ihtimali yüksek kısımlarında kümelenmesi neticesinde, gelen enerjilerin ilk önce polimer içerisinde bu parçacıkları koparmaya veya sıyırmaya çalışmak istemesi, HNT katkılı nanokompozitlerin, katkısız malzemeye göre daha fazla darbe yüküne karşı dayanıklı olduğu ve darbe mukavemetlerinin fazla olduğu sonucunu doğurur. Ayrıca, yukarıda tanımladığımız HNT 'nin malzeme içerisinde meydana getirdiği mekanizmalar vasıtasıyla hasar yoğunluğunun ve ilerleyişinin çok ağır olması hem CÜD testi hem de KÜD testi sonunda nanokompozit malzemelerin hasar bağlı yer değiştirmelerini kompozit malzemeye göre daha az olmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak, nanokompozit malzemenin HNT davranışına karşın yüksek enerji gereksinimi karşılanamadığından numune içindeki hasarlar sınırlı gelişim göstermiş, numunelerin yuttuğu enerjiler dolayısıyla katkısız kompozit malzemeye göre daha az olmuştur. Bu vesileyle nanokompozit malzemedeki sınırlı hasar yoğunluğu temas süresinin de kompozit malzemeye göre daha kısa olmasını ifade etmektedir.

Tuzlu su ortamında yaşlandırılan numunelerde, tuzlu suyun kompozit malzemeye negatif yönlü etki mekanizması matristeki ve fiberdeki bozulmalar olarak ifade edilmektedir (Wei ve ark., 2011a; Pandian ve ark., 2014; Wu ve ark., 2015). Kompozit ve nanokompozit numunelerin tuzlu suya direk ve ilk temasının neticesinde bozulma mekanizmasının birinci aşaması olan matris bozulmaları başlamaktadır. Malzemelerin üretiminden gelen boşluk ve çatlaklar, yüzey çizikleri veya polimerle tuzlu suyun kimyasal etkileşiminden kaynaklı kusurlar neticesinde, numuneler tuzlu suyu içerisine absorbe etmektedir. Zamanla bu durum, ikincil bozulma mekanizması olan bazalt fiberlerin bozulmasına sebebiyet vermektedir. İkincil bozulmanın başlamasıyla malzemelerin fiber/matris ve tabakalar arasındaki arayüzeylerinin de zayıflamış olması neticesinde, gelen dinamik darbe yükleri altında numuneler üzerinde oluşan darbe hasar türlerinin oluşumu kolay hale gelmektedir. Bu sebeple numunelerin yaşlandırıldıktan sonra taşıdığı darbe yüklerinde, 2. aydan 6. aya sürekli olarak bir azalma söz konusudur.

Prolongo ve ark. yaptıkları çalışmada; absorbe edilen tuzlu suyun Van der Waals kuvvetleri ve hidrojen bağlarıyla oluşan kimyasal reaksiyonlar, polimer zincirlerinin

hareketliliğini arttırmaktadır. Bunun neticesinde kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde zayıflama, epoksi de ise polimerizasyon (polimerleşme, plastikleşme) meydana gelmektedir (Prolongo ve ark., 2012). Tuzlu suda numunelerde meydana gelen şematik bozulma mekanizması Şekil 4.38. 'de gösterilmiştir. Numunelerin tuzlu su yaşlandırması altında emilim sırasındaki, tuzlu su içerisine bırakılan malzemeye kanallar, boşluklar ve çatlaklar yoluyla  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  molekülleri ve  $Na^+$ ,  $Cl^-$  iyonları epoksi matris içerisine nüfuz eder ve matris, fiber ve fiber/matris arayüzeyleri ile etkileşime girer. Bununla beraber aynı anda fiberden dışarıya Ca, Mg, Al ve K vb. içeren bazı bileşenler ortam içinde çözülür ve bu elementler arayüzeylerle temas halindeki ortamdaki tuzlu su ile birleşmiş bir formdadır. Bu çözümler kompozitin mikro yapısını değiştirmekte ve fiber kopmalarına yol açan çatlak formlarının oluşmasına sebep olmaktadır ve fiber/matris arasındaki bağlanma etkisini azaltmaktadır. Bozulma mekanizmasında en etkin rol oynayan kimyasal reaksiyon  $Fe^{+2}$  ve  $Cl^-$  arasındaki reaksiyondur. Kompozitin arayüzeyleri üzerindeki meydana gelen reaksiyonlar sonucu oluşan pas, su emilimini artırarak epoksi matrisin genişlemesine sebep olacak ve gerilme altında çatlak oluşumunu hızlandıracaktır. Bu da malzemenin yataklama mukavemetinin ve taşıdığı darbe yükünün azalmasına sebep olan durumların başında gelmektedir.

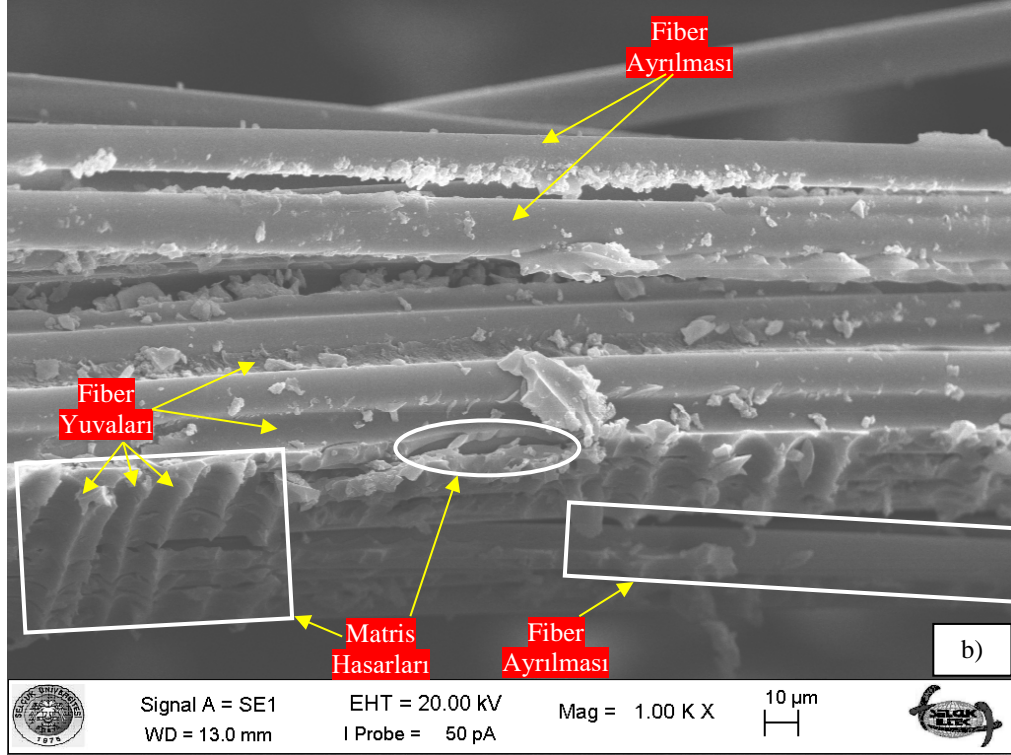
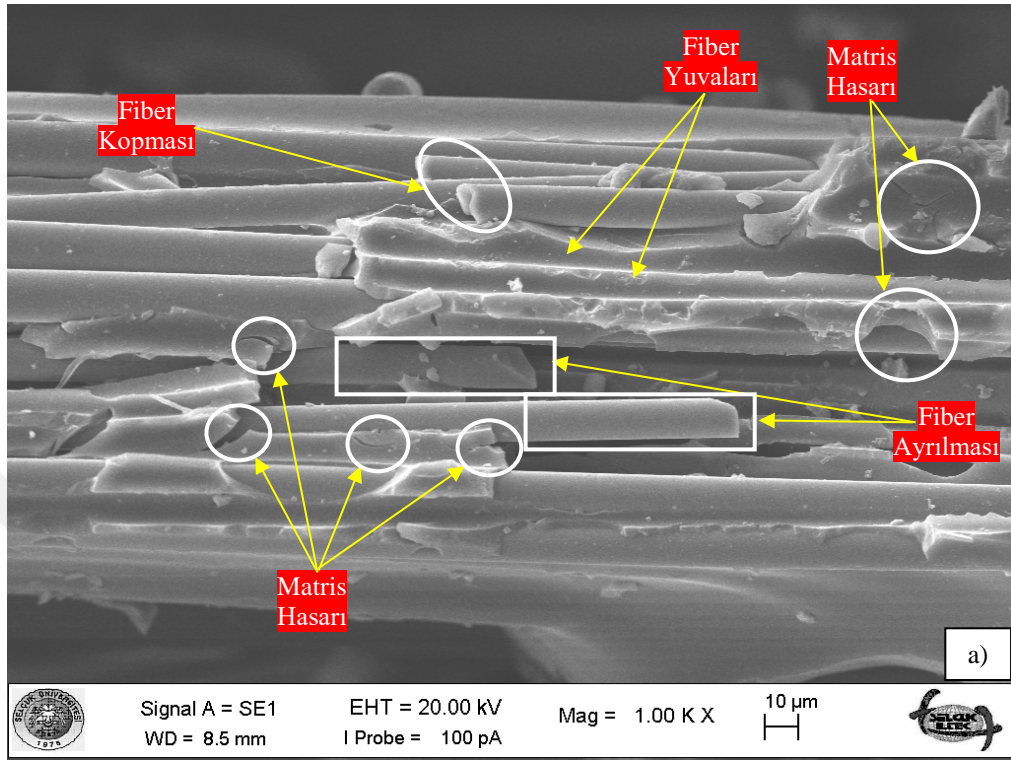


Şekil 4.38. Tuzlu su yaşlandırmasının şematik bozulma mekanizması

#### 4.5. Hasar Bölgelerinin Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile İncelenmesi

Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin yük altındaki hasar davranışlarını daha iyi anlayabilmek adına numunelerin kırılma ve hasar yüzeyleri üzerinden örnekler alınarak taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile

görüntülenmiştir. Şekil 4.39. cıvata bağlı yaşlandırılmamış numunelerin çekme testi sonunda meydana gelen hasarların 1000 büyütmeli SEM görüntülerini içermektedir. Şekil

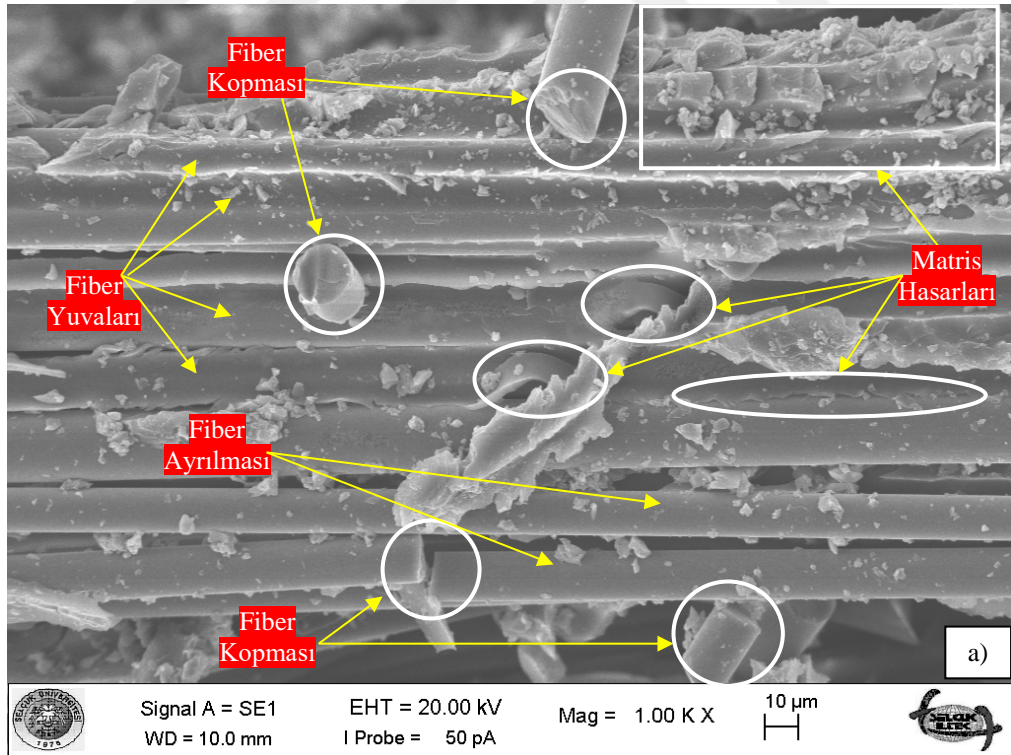


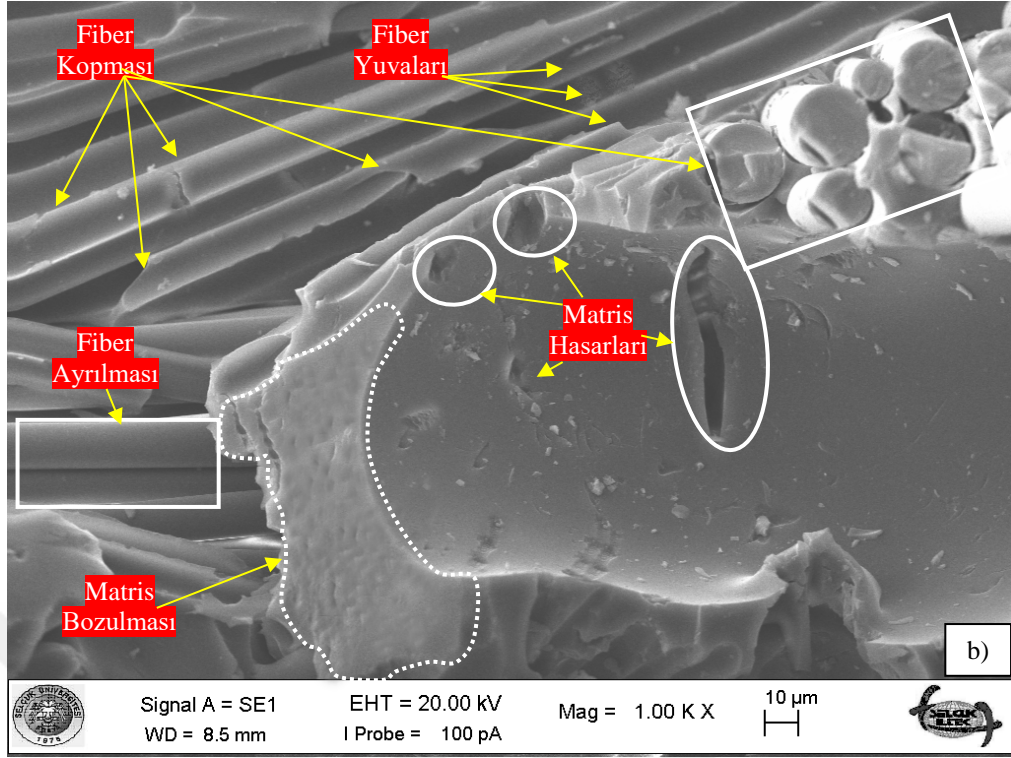
Şekil 4.39. Tek bindirmeli cıvata bağlantılı yaşlandırılmamış numunelerin çekme testi hasar bölgesi SEM görüntüleri a) Kompozit numune b) Nanokompozit numune



4.39. (a) 'da kompozit malzemede birbirinden farklı hasarlar meydana gelmiştir. Matris üzerinde meydana gelen çatlakların yoğunluğu ve fiber yuvaları da incelendiğinde epoksi içerisinde sıyrılmış (ayrılmış) fiberler görünmektedir. Epoksi matrinden sıyrılan fiberlerin bir müddet sonrada koptuğu gözükmektedir. Şekil 4.39. (b) 'de nanokompozit malzemede ise matrinden ayrılan fiberler üzerinde epoksi parçalarının yapıştığı görünmektedir. Bu da fiber/matris bağlantısının nanokompozit malzemede iyi olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca, fiber yuvaları içerisindeki matris hasarları ve plastik şekil değiştirmiş bölgeler yine arayüzey bağlantısının nanokompozit malzemede üstün olduğunun göstergesidir.

6 Ay yaşlandırılmış kompozit numunenin Şekil 4.40.(a) 'daki görüntüsünde yaşlandırılmamış haline göre hasar miktarının arttığı görülmektedir. Matris hasarlarında açık bir şekilde artış olduğu kırıntı olarak etrafa saçılmış epoksi parçalarından anlaşılmaktadır. Ayrıca matris hasarları içinde plastik deformasyon bölgelerinin de arttığı görülmektedir. Yaşlandırmaya bağlı olarak matristerki plastikleşmenin buna sebep olduğu düşünülebilir. Bununla beraber, fiber kopmaları ve ayrılmaları da görülmektedir.

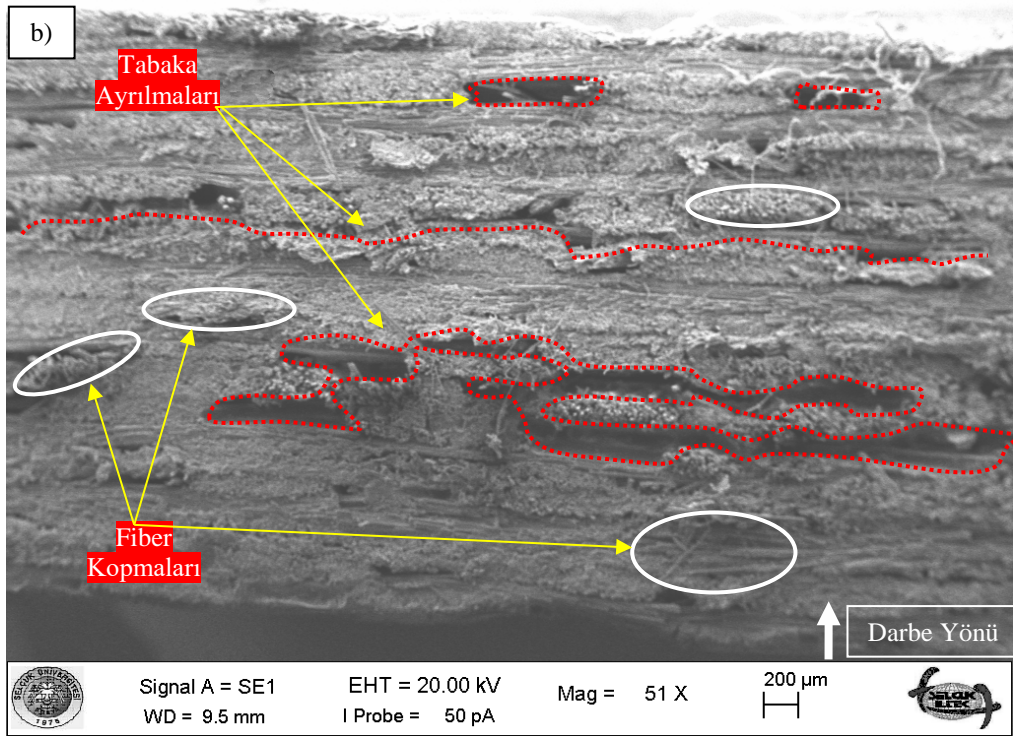
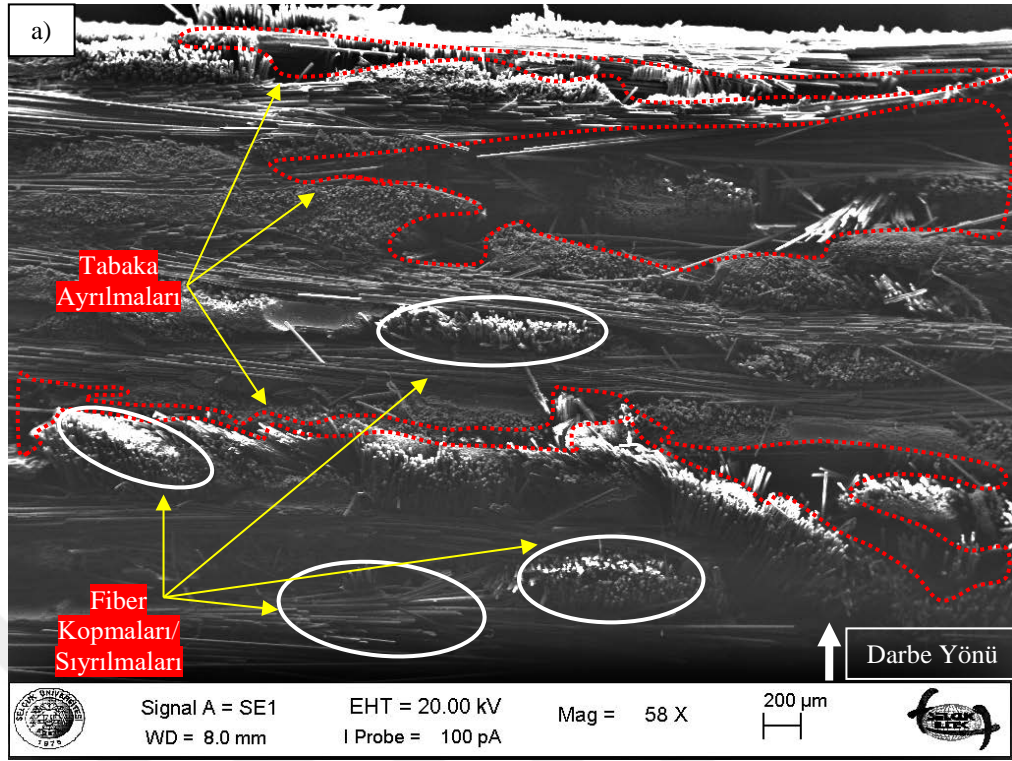




**Şekil 4.40.** Tek bindirmeli cıvata bağlantılı 6 ay yaşlandırılmış numunelerin çekme testi hasar bölgesi SEM görüntüleri a) Kompozit numune b) Nanokompozit numune

Aynı büyütmeye nanokompozit numunede derin matris hasarları mevcuttur (Şekil 4.40.(b)). Hasar bölgesinde halen matris içerisinde bulunan kopmuş hatta yuva içinde yarılmış fiberler bulunmaktadır. Yaşlandırılmamış nanokompozit numuneye göre plastik deformasyon bölgelerinin azaldığı gözlenmiştir. Sayfa düzlemine dik olan kopmuş fiberlerin yüzeylerinde parlak ve plastik kırılma yüzeyleri mevcuttur. Bunun yanında matris içerisinde ayrılmış fiberler de vardır. Ayrıca yaşlandırmaya bağlı olarak, bu başlık altında detaylı göreceğimiz matris bozulması da görülmektedir.

Normal ortamdaki, kompozit ve nanokompozit numunelerin Şekil 4.41. 'de 25 J enerji seviyesinde kompozit üstü darbe testi sonundaki hasar bölgeleri görüntüleri verilmiştir. Kompozit numunede (Şekil 4.41.(a)), ciddi oranda tabaka ayrılmaları ve yüksek yakınlaşmalarda daha net göreceğimiz farklı taraflara yönelmiş fiber kırılma ve sıyrılmaları görülmektedir. Nanokompozit numune de ise kompozit malzemeye göre daha az yoğun tabaka ayrılmaları mevcuttur (Şekil 4.41.(b)). Ayrılmalar alt tabakalara doğru daha da seyrekleşmiştir. Ayrıca, kompozit malzemeye kıyasla meydana gelen fiber kopmaları ve sıyrılmaları daha azdır.

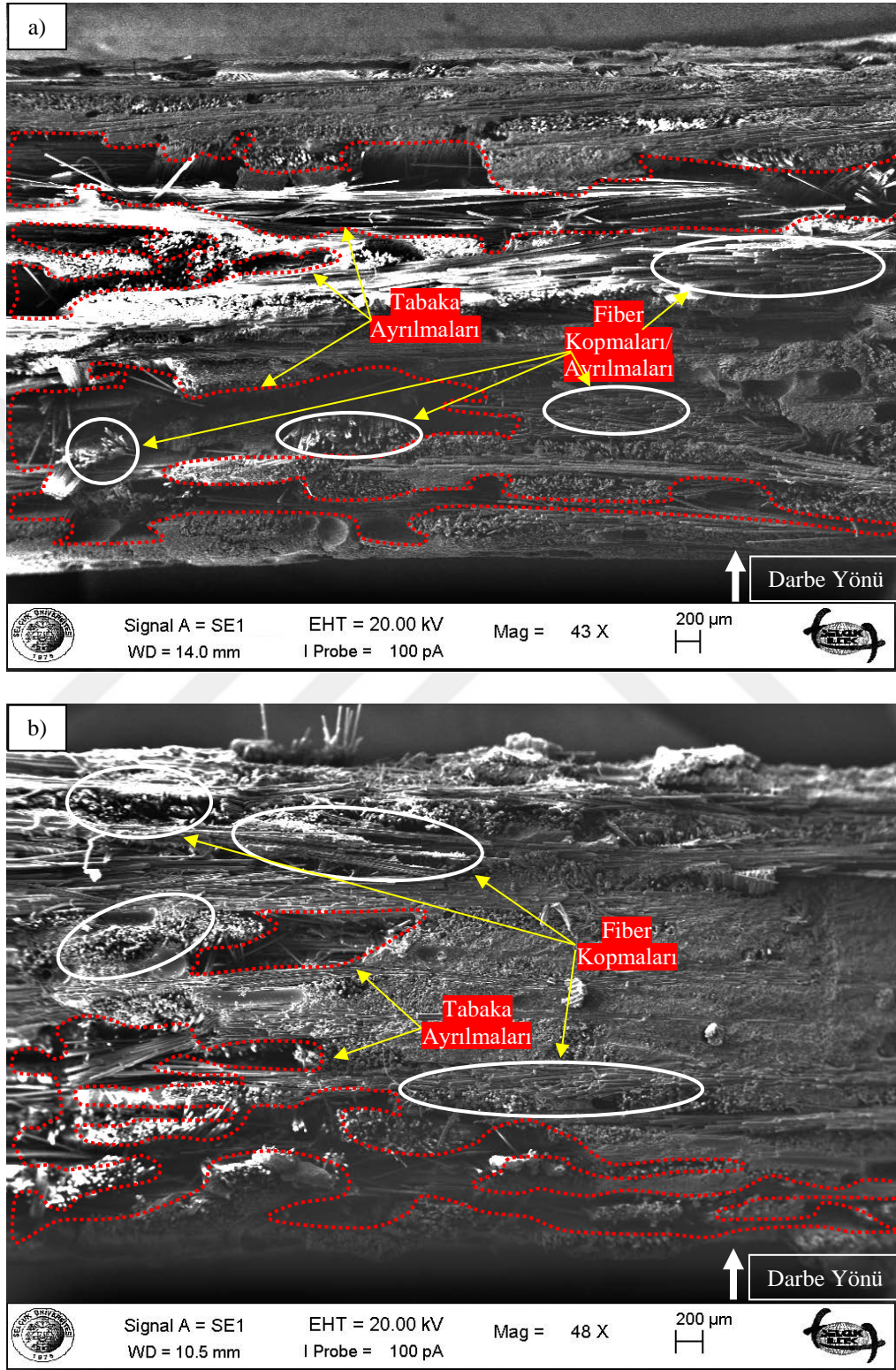


**Şekil 4.41.** Tek bindirmeli cıvata bağlantılı yaşlandırılmamış numunelerin 25 J enerji seviyesinde darbe hasar bölgesi SEM görüntüleri a) Kompozit numune b) Nanokompozit numune

25 J enerji seviyesinde karşısında, 6 ay yaşlandırılmış numunelerde meydana gelen hasarlar Şekil 4.42. 'de verilmiştir. Kompozit numunenin Şekil 4.42. (a) 'daki



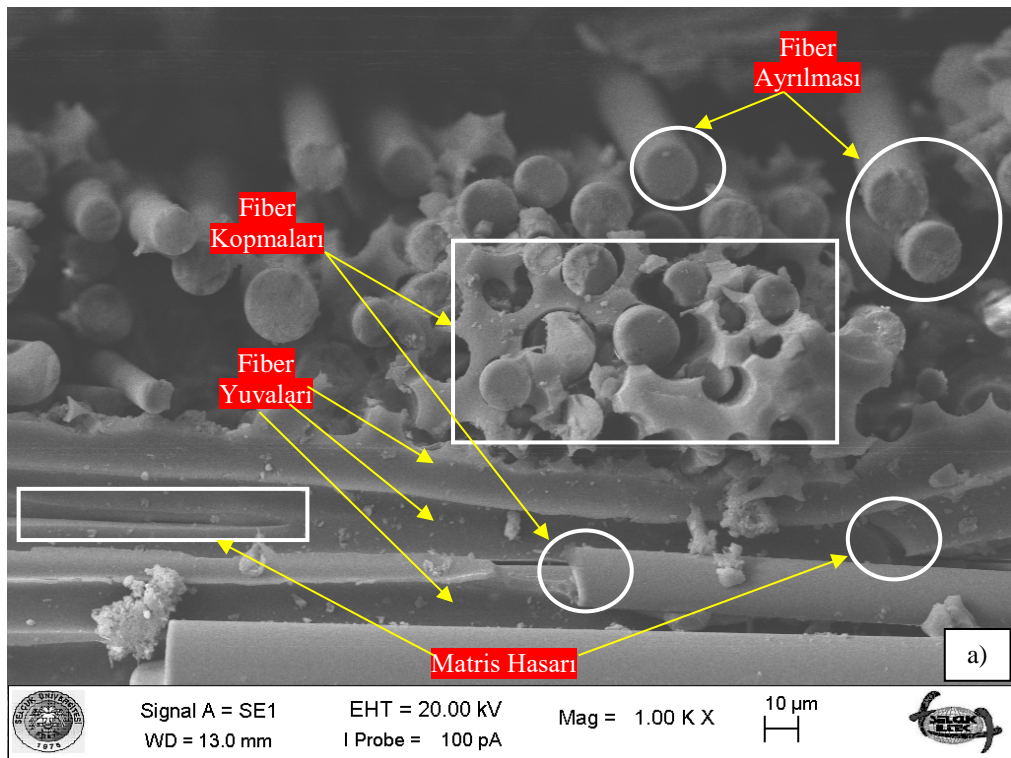
görüntüsünde yaşlandırılmamış numuneye göre tabaka ayrılması yoğunluğu artmıştır. Hem üst yüzeylerde hem de alt yüzeylerde ayrılmalar yoğunluktadır. Fiber sıyrılmaları

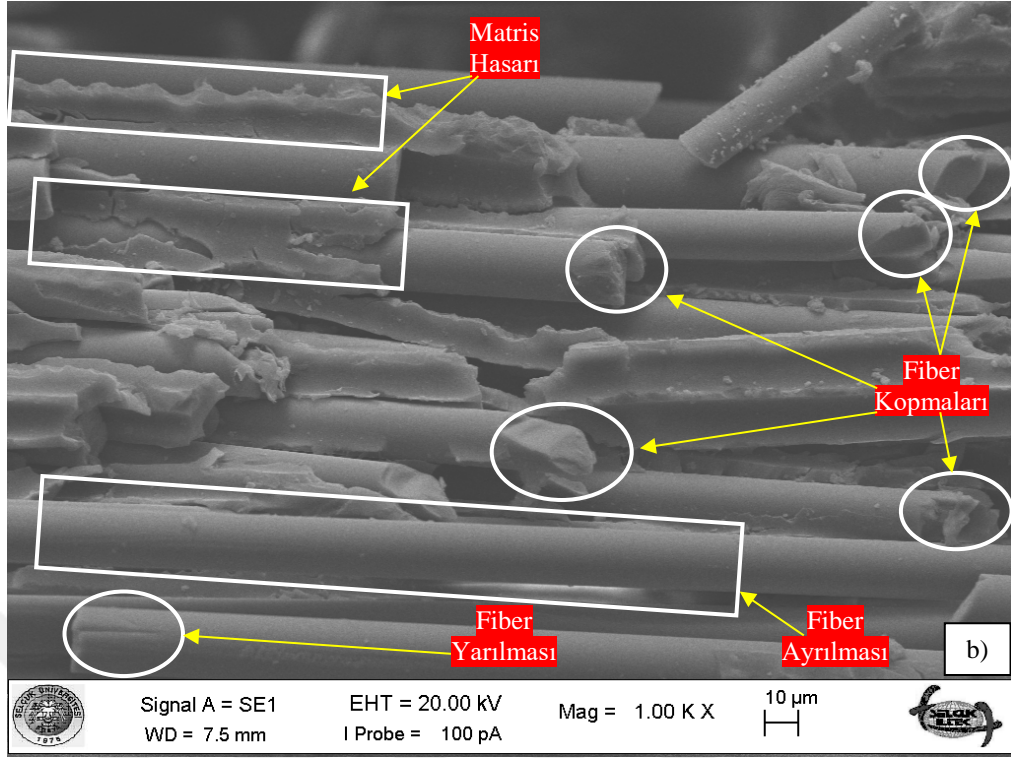


Şekil 4.42. Tek bindirmeli civata bağlantılı 6 ay yaşlandırılmış numunelerin 25 J enerji seviyesinde darbe hasar bölgesi SEM görüntüleri a) Kompozit numune b) Nanokompozit numune

ve kopmaları da mevcudiyetini devam ettirmiştir. Şekil 4.42. (b) 'de nanokompozit numune de ise tabaka ayrılması yoğunluğu üst yüzeylerde yoğunluğunu arttırmıştır. Yaşlandırılmamış numuneye göre hasar boyutu ve derinliği artarken, yaşlandırılmış kompozite göre hasar yoğunluğu azdır.

25 J 'deki darbe hasarlarının 1000 büyütme detaylı hasar görüntüleri sırasıyla yaşlandırılmamış ve 6 ay yaşlandırılmış numuneler için Şekil 4.43. ve Şekil 4.44. 'teki gibidir. Yaşlandırılmamış kompozit numunenin Şekil 4.43. (a) hasar görüntüsünde fiber kopmalarına rastlanmıştır. Fiberlerin kopma yüzeylerinin neredeyse birçoğu parlak ve kırılğan bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Enine ve dikine matris çatlaklarının da görüldüğü hasar bölgesinde fiber yuvaları ve sıyrılan (ayrılan) fiberler üzerinde plastik deformasyonla pek karşılaşılmamıştır. Fakat nanokompozit numunedeki fiber kopma yüzeyleri incelendiğinde, fiberlerin genelde belli bir açı ve plastik deformasyon geçirek kırıldığı görülmektedir (Şekil 4.43. (b)). Halen yarısı matris tarafından çevrili ayrılmış fiberler ve fiber yuvası içinde yarılmış fiberler de mevcuttur. Bu fiber/matris arayüzey bağlantısının kuvvetli olduğu anlamına gelmektedir. Matris içinden sıyrılmadan kırılmış fiberler bu durumun en güzel örneğidir. Matris hasarları incelendiğinde uzun yol kat etmiş enine ve boyuna çatlaklar ve kıvrım hale gelmiş plastik deformasyon bölgeleri de vardır.

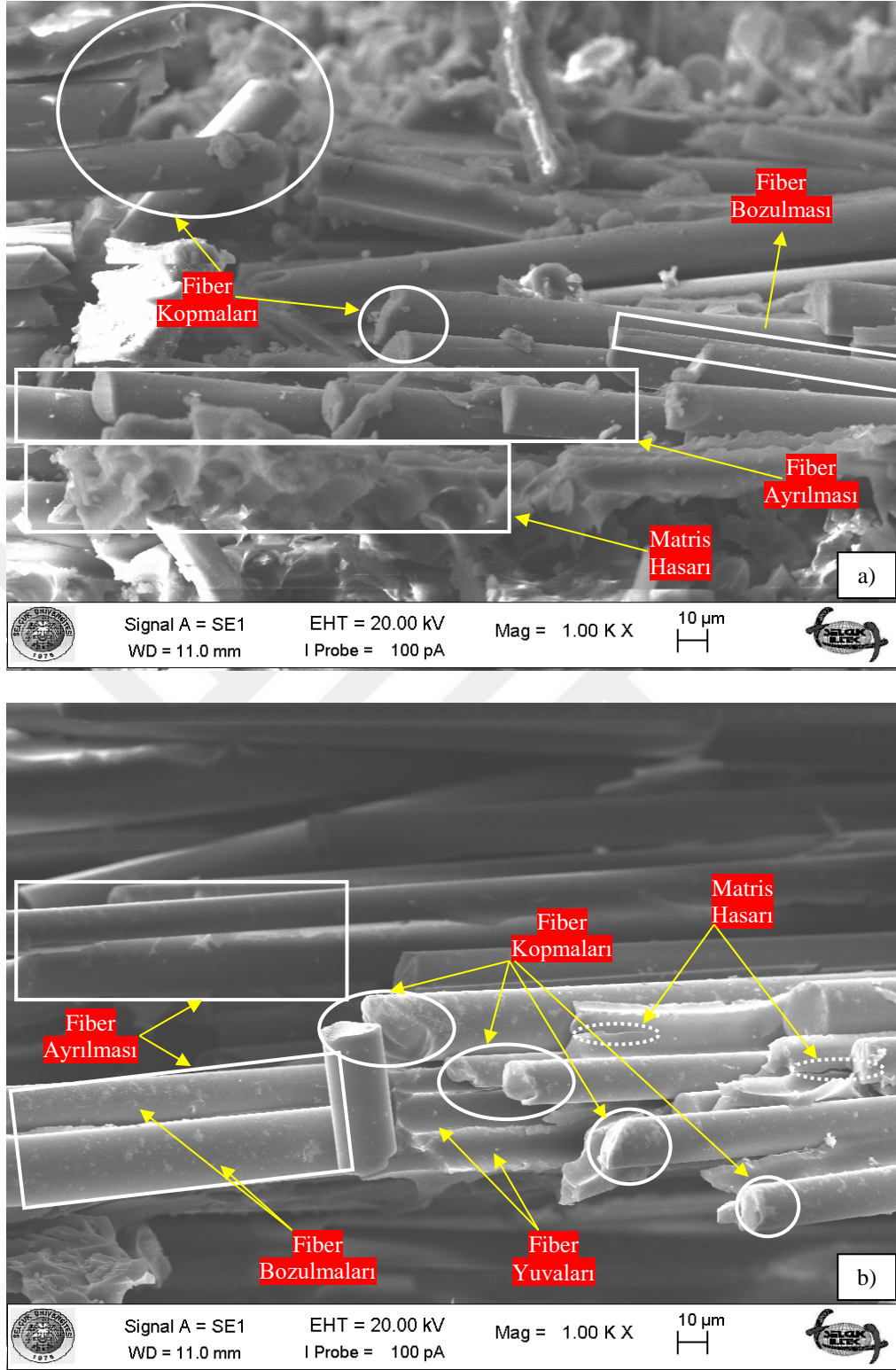




**Şekil 4.43.** Tek bindirmeli cıvata bağlantılı yaşlandırılmamış numunelerin 25 J enerji seviyesinde darbe hasar bölgesi SEM görüntüleri a) Kompozit numune b) Nanokompozit numune

Numunelerin yaşlandırıldıktan sonraki hasar görüntüleri fiber kopma ve matris hasarlarındaki artış ile sonuçlanmıştır. Şekil 4.44. (a) 'da düzensiz ve yoğun fiber kopmalarının yanında fiber sıyrılmaları sonrası yuvalarında matris hasarları mevcuttur. Yaşlandırılmamış numune de az şekilde meydana gelen plastik deformasyon yaşlandırılmış numune de fazlaca gözlenmiştir. Deneysel sonuçlara göre az yük taşımış olsa da plastikleşmenin (polimerleşme) etkisiyle plastik deformasyon bölge yoğunluğu artmıştır. Bu durumdan fiber/matris arayüzey bağlantısını iyileştirdiği anlamı çıkarılmamalıdır. Ayrılmış veya sıyrılmış fiberlerin yüzeyinde matris yapışmasına bağlı yapışma izlerinin olmaması bu durumun kanıtıdır. Ayrıca bu hasar görüntüsünde fiberler üzerindeki bozulmada görülmektedir. Şekil 4.44. (b) 'de nanokompozit numunenin hasar görüntüsünde fiberler üzerindeki bozulmalar dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, fiberlerin kırılma yüzeyindeki plastik deformasyon bölgelerinin varlığı yaşlandırmadan etkilenmediği görülmektedir. Matris hasar bölgelerinde gözlenen uzun çatlaklar yaşlandırılmamış numuneye kıyasla azda olsa devam etmiştir. Fiber yuvaları üzerinde ise deformasyon bölgelerinin azlığı fiber/matris arayüzey bağlantısının zayıfladığı anlamı taşıyabilir.

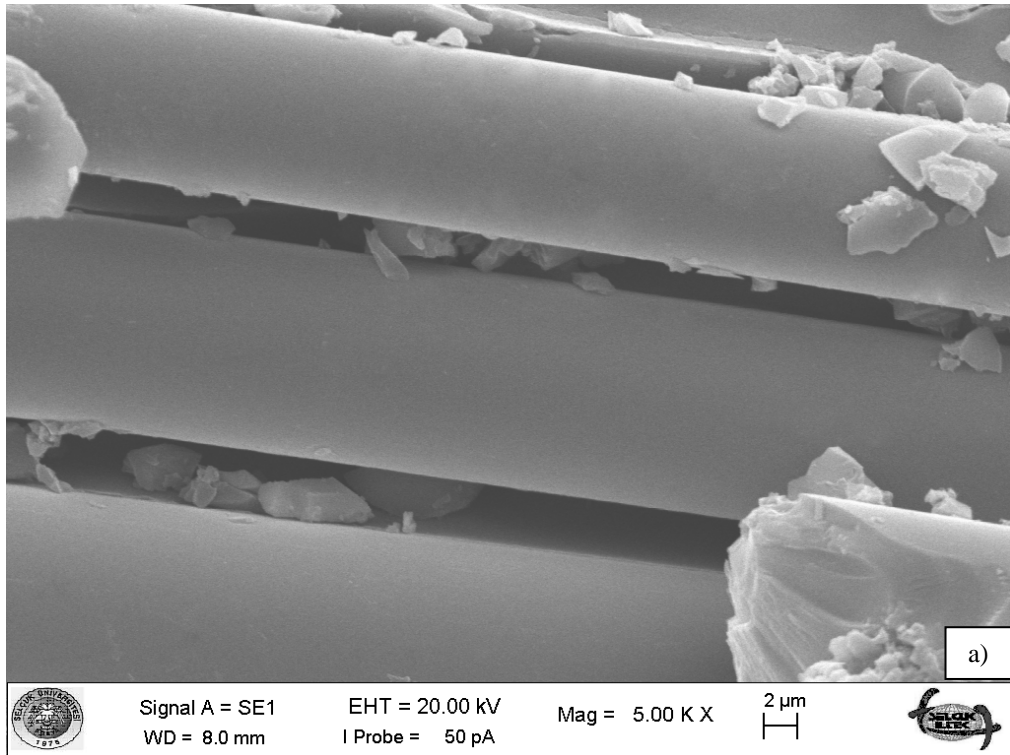




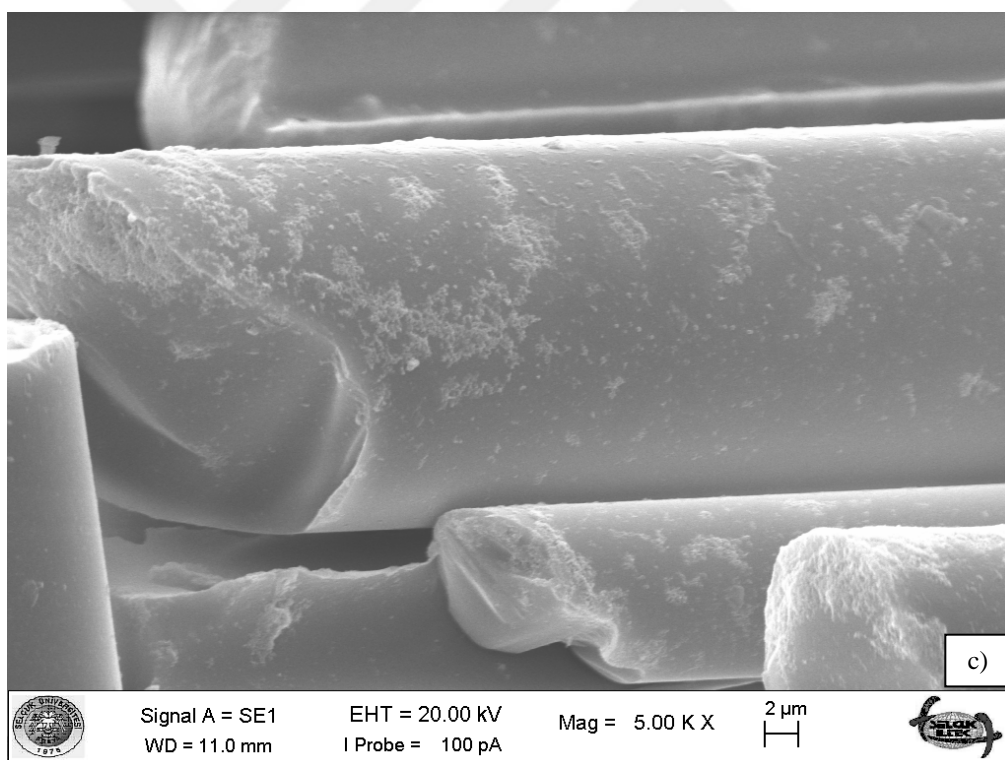
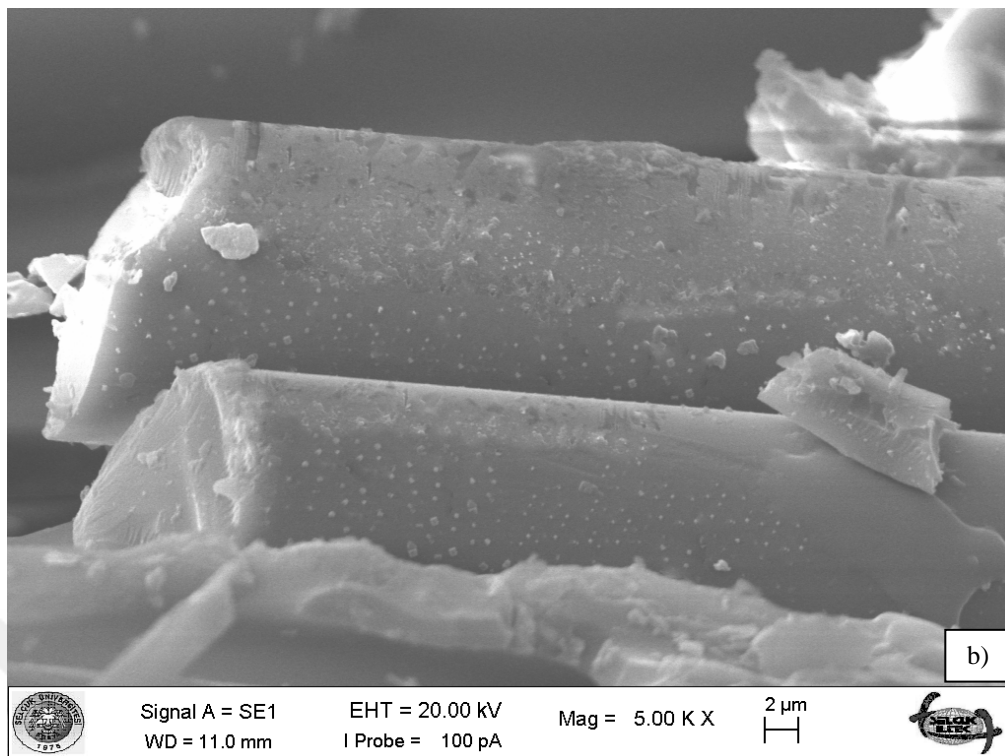
**Şekil 4.44.** Tek bindirmeli cıvata bağlantılı 6 ay yaşlandırılmış numunelerin 25 J enerji seviyesinde darbe hasar bölgesi SEM görüntüleri a) Kompozit numune b) Nanokompozit numune

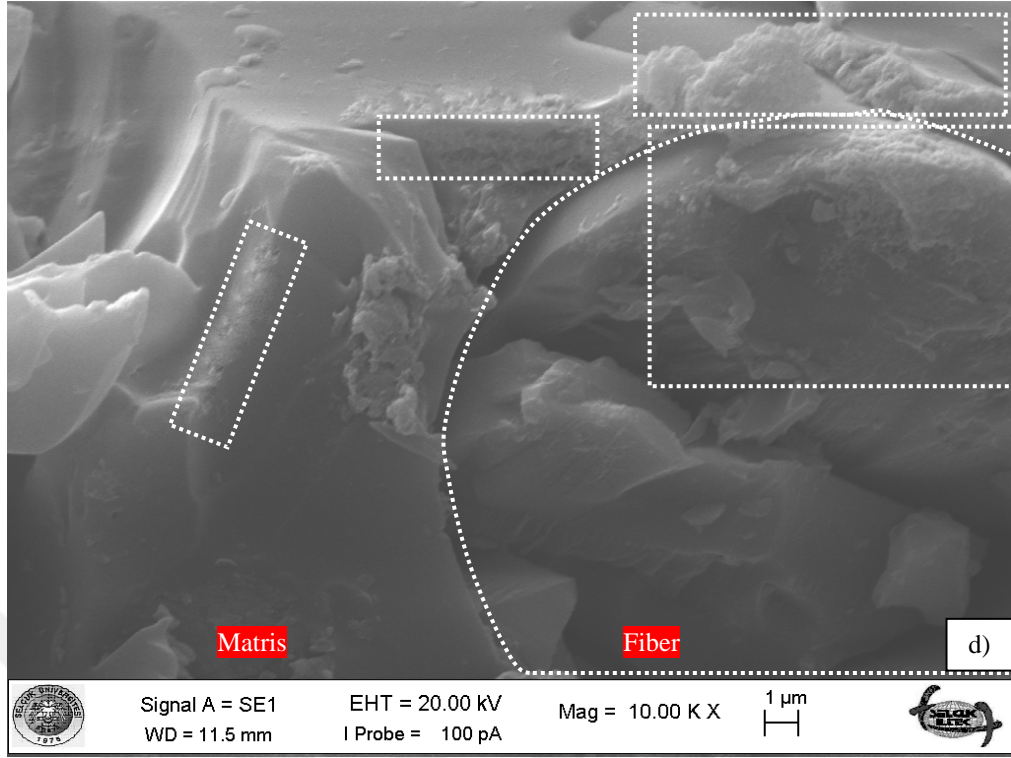
Hasar görüntülerinin bu aşamasına kadar mekanik test sonrası numune üzerlerinde meydana gelen hasarlar birbirleriyle kıyaslanarak irdelenmiştir. Bu aşamadan sonra, mevcut hasar tipi ve hasar yoğunluklarının değişimine sebep olan durumlar incelenmiştir.

Bunların başında numuneleri olumsuz olarak etkileyen yaşlandırmanın numuneler üzerine etkisi gelmektedir. Şekil 4.45. 'te fiber ve matriste meydana gelen hasarların görüntülenmesi teknik altyapının elverdiği kadarıyla verilmiştir. Şekil 4.45. (a) 'da yaşlandırılmamış kompozit bir numunenin 5000 büyütmede görüntüsü verilmiştir. Yaşlandırılmamış numunenin görsel olarak farkının net bir şekilde ortaya konması için fiberin en net, çıplak ve herhangi bir şekilde hasar almamış görüntüsü alınmıştır. Kompozit numunenin yaşlandırma ortamından 6. ay sonundaki görüntüsü Şekil 4.45. (b) 'de verilmiştir. Yaşlandırmanın etkisiyle fiberler üzerinde korozif bölgeler meydana gelmiştir. Korozif bölgenin bir kısmında ise parçalanmaya bağlı deformasyonlar oluşmuştur. Benzer bir durum Şekil 4.45. (c) 'de nanokompozit malzemede de meydana gelmiştir. Fakat kompozit numunedekine benzer bir deformasyon gözlenmemiştir. HNT katkısının kompozitlerdeki su emilimine karşı olan tampon vazifesinin bu durumun oluşmasına sebep olmuş olabilir (Alamri ve Low, 2012b). Yine nanokompozit numunede matris içerisinde kopmuş bir hasar görüntüsü 10.000 büyütmede Şekil 4.45. (d) 'de mevcuttur. Görüntüde fiber yüzeyinde ve azda olsa matriste meydana gelen korozif bölgelerin yanında fiberin içerisine sızmış kırılma yüzeyi üzerinde de korozif bir deformasyon görülmektedir.





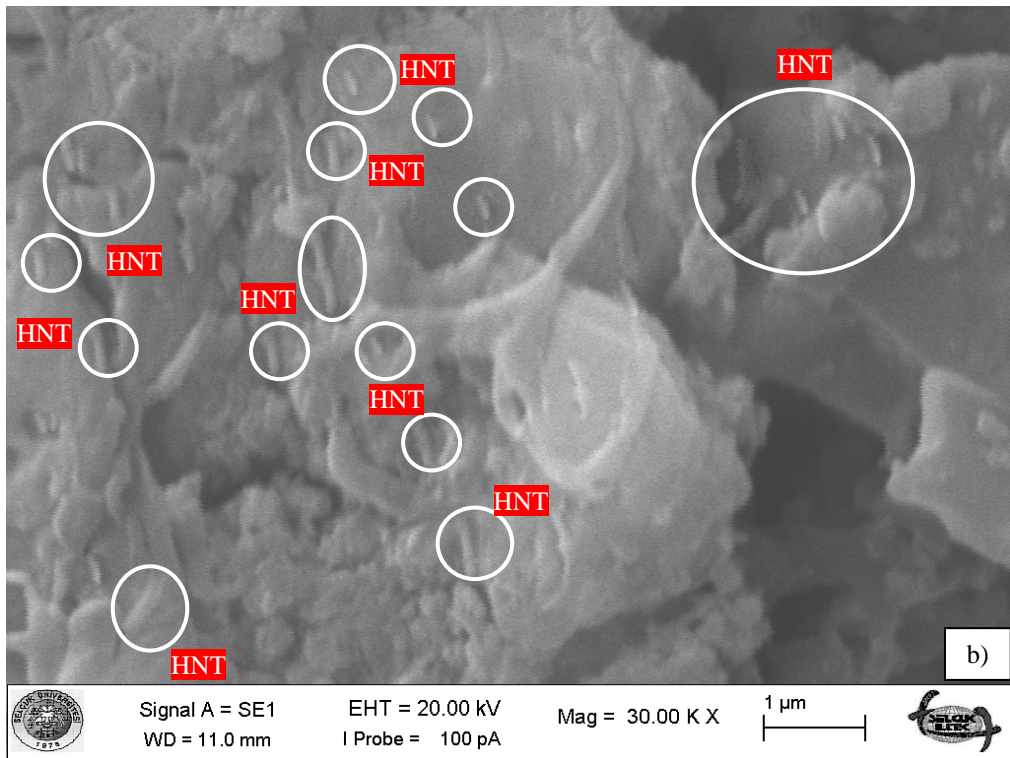
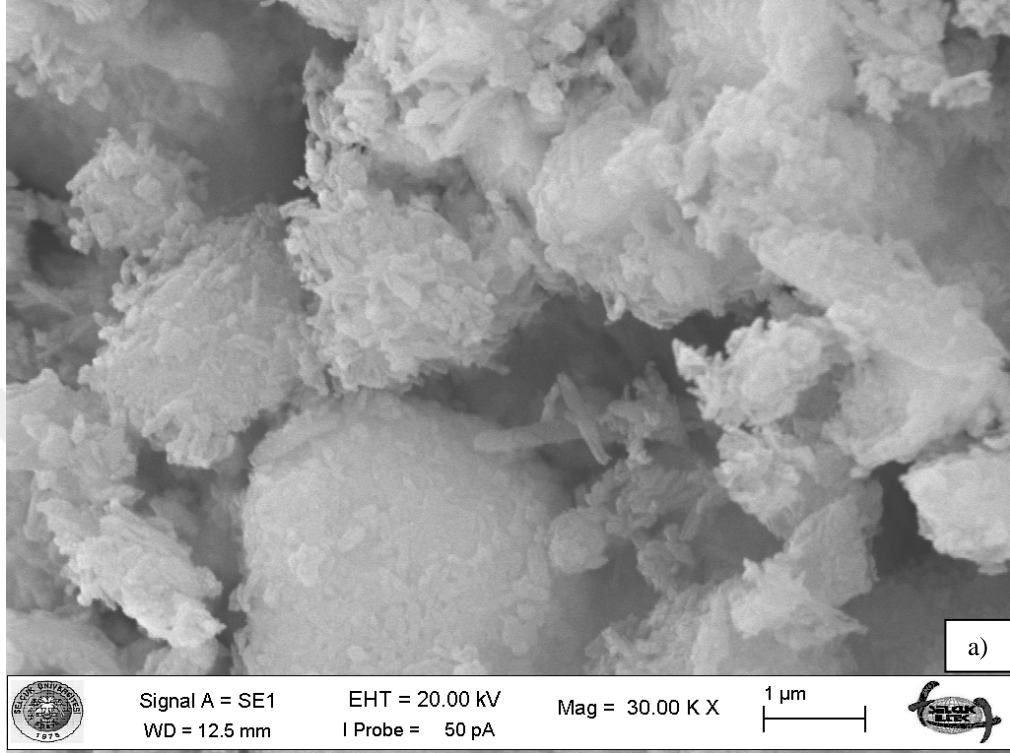




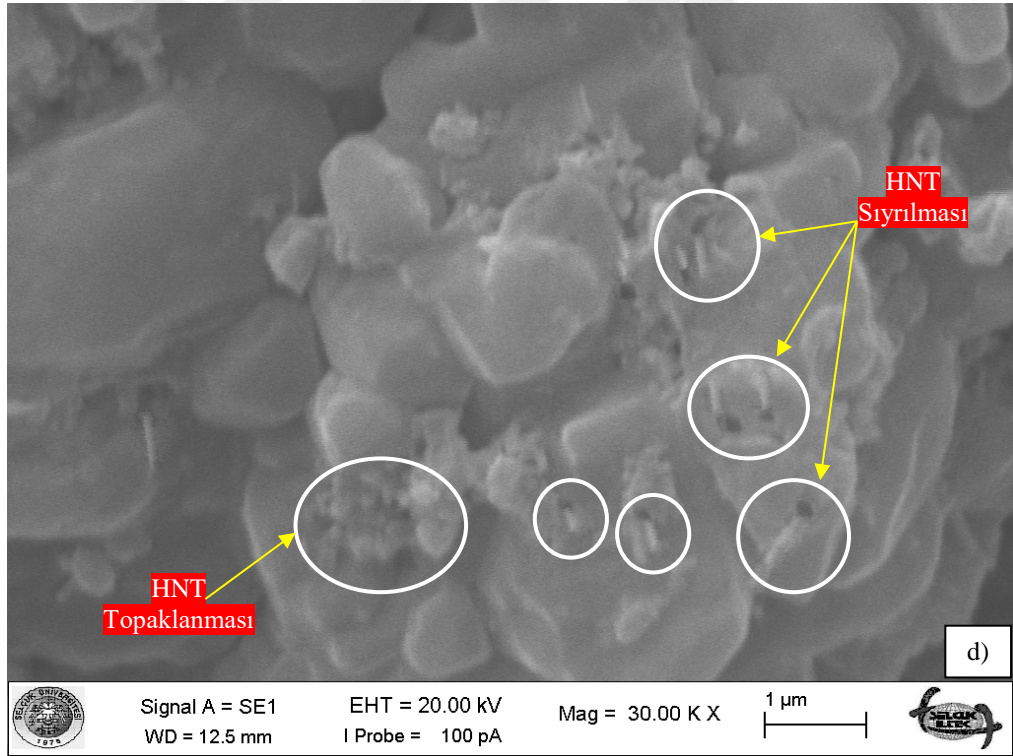
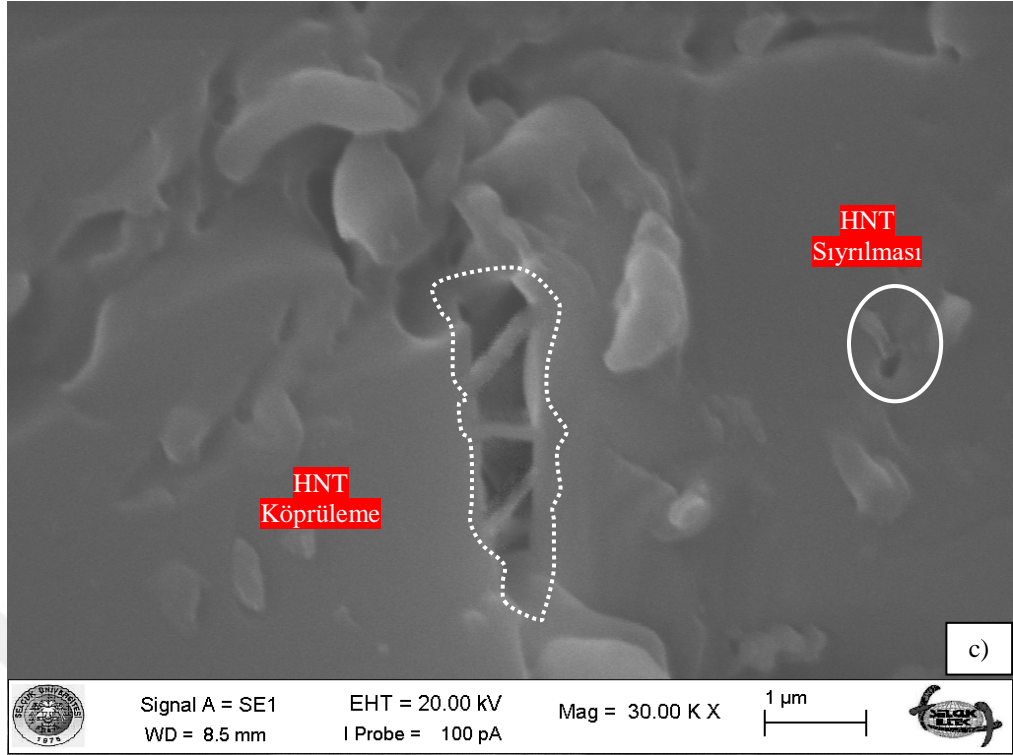
**Şekil 4.45.** Numunelerin yaşlandırma ile bozulma SEM görüntüleri a) Yaşlandırılmamış kompozit numuneden fiber görüntüsü b) 6 ay yaşlandırılmış kompozit numune fiber görüntüsü c) 6 ay yaşlandırılmış nanokompozit numune fiber görüntüsü d) 6 ay yaşlandırılmış nanokompozit numunedeki fiber/matris bozulması görüntüsü

Numunelerdeki hasar tipi ve hasar derinliğini etkileyen bir diğer durum ise kompozit numuneye HNT katkısıdır. Şekil 4.46. (a) 'da toz HNT 'nin 30.000 büyütme SEM görüntüsü verilmiştir. Tedarikçi firma, HNT 'nin fiziksel özelliklerini 30-100 nm dış çap oranında ve 10 µm boy uzunluğuna kadar olduğunu belirtmiştir. Bu SEM görüntüsünde de farklı boy ve çaplarda olduğu görülmektedir. Kullanılan HNT 'nin nanokompozit matrisindeki görüntüsü Şekil 4.46. (b) 'de verilmiştir. Burada HNT parçacıklarının homojen olarak epoksi matris içerisinde dağıldığı görülebilmektedir. Bazı parçacıkların epoksiye bulanmasıyla çaplarının ve boylarının büyüdüğü, bazılarının ise polimer içerisine gömüldüğü görülmektedir. Nano takviyeli kompozit malzemelerde nano katkısının etki mekanizmasını numune içerisinde yakalayabilmek bir hayli güç ve bulunması zaman gerektiren bir durumdur. Fakat başlık 4.4.3. 'te bahsedilen HNT 'nin etki mekanizmalarından olan köprüleme ve sıyırma olayı Şekil 4.46. (c) ve (d) 'de gözlemiştir. Makas ağız şeklinde ilerlemiş matris çatlaklarını köprüleyen, çatlak ağzının ve çatlak ilerleyişini durdurmaya çalışan HNT parçacıkları Şekil 4.46. (c) 'de verilmiştir. Bunun yanında yuvasından sıyrılmış bir HNT parçacığının görüntüsü yer alırken, birden fazla HNT sıyırılmasının olduğu etki mekanizması görüntüsü Şekil 4.46. (d) 'de

verilmiştir. HNT parçacıklarının hasar oluşma ihtimalinin kritik olduğu yerlerde bulunmasıyla, gelen enerjinin önce bu parçacıkları koparmak veya sıyırmak istemesi hasar oluşumunu veya ilerlemesini yavaşlatmaktadır.







Şekil 4.46. a) Toz HNT b) Epoksi içerisindeki HNT dağılımı c) HNT 'nin köprüleme ve sıyırılma mekanizmaları d) HNT topaklanması ve sıyırılması

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, bazalt fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ayrıca epoksi matris, deneysel çalışmalar ile elde edilen % 2 halloysit nanotüp (HNT) kullanılarak modifiye edilmiştir. Üretimi yapılan bazalt fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme (Epoksi/BF) ve HNT katkılı bazalt fiber takviyeli epoksi matrisli nanokompozit malzeme (HNT-Epoksi/BF) mekanik bir bağlantı elemanıya tek bindirmeli bağlantı oluşturulup çekme testleri ve iki farklı noktadan düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Aynı deneyler, numunelerin 2-4-6 ay tuzlu suda yaşlandırılmasıyla tekrarlanmış ve tuzlu su ortamının mekanik performansa etkisi incelenmiştir. Tez çalışması sonrası elde edilen veriler şu şekildedir:

- HNT parçacıklarının ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ve %5 oranlarda sadece epoksi matrisi modifiye etmesiyle üretilen epoksi nanokompozitlere çekme testi uygulandığında en iyi mekanik özellik ağırlıkça %2 HNT katkısında bulunmuştur.
- Ağırlıkça % 2 HNT katkısı epoksi nanokompozit malzemenin katkısız epoksiye göre çekme mukavemetini % 30, Elastiklik modülünü % 36 ve tokluğunu % 69 oranda arttırmayı başarmıştır. Ayrıca % 4 ve % 5 oranlarda nanokompozit malzemedeki mekanik özellikler düşmektedir.
- % 2 HNT katkısının epoksi nanokompozit üzerindeki başarılı etkisini bazalt fiberler üzerinde de görmek için % 2 katkı oranında bazalt fiber takviyeli epoksi matrisli (HNT-Epoksi/BF) nanokompozit malzemeler üretilmiştir. Nanokompozit malzemenin levha çekme testleri sonucunda katkısız epoksi/BF kompozit malzemeye göre, çekme mukavemetinde % 21, elastiklik modülünde % 20 ve tokluğunda % 29 oranda artış gerçekleşmiştir.
- Tek bindirmeli cıvata bağlı yaşlandırılmamış epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit malzemelerin çekme testi sonunda yük-uzama eğrileri incelendiğinde, nanokompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi kompozit malzemeye göre % 18,8 oranda artmıştır. Bu yük altındaki kopuncaya kadarki uzaması da % 11,7 oranda artış gözlenmiştir.
- Tuzlu suda 2 ay boyunca yaşlandırılmış kompozit ve nanokompozit numunelerin yük-uzama eğrilerinde, yaşlandırılmamış numunelerin sonuçlarına göre, kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi ve yük altındaki uzaması sırasıyla %

26,5 düşüş ve % 47 artış yaşanırken, nanokompozit malzemede yük taşıma kapasitesi % 27,6 oranda düşüş buna karşın uzamada ise % 43 oranda artış gerçekleşmiştir. Yaşlandırılmış iki numune kendi aralarında kıyaslandığında nanokompozit malzemenin daha üstün olduğu görülmektedir.

- Kompozit ve nanokompozit numunelerin 4.ay yaşlandırılması sonunda yapılan testlerinde, yaşlandırılmamış hallerine göre artan uzamalarının yanında yük taşıma kapasitelerinde sırayla % 37,1 ve % 39,8 kayıp yaşanmıştır.
- Numunelerin 6 aylık yaşlandırma periyodu sonunda her iki malzemede de ciddi oranda mekanik performans düşüklüğü yaşanmıştır. Kompozit numunedeki yük taşıma kabiliyeti % 46 oranda, nanokompozit malzeme ise % 45 oran ile neredeyse yarı yarıya fark etmiştir.
- Malzemelerin çekme testi sonunda cıvata bağlantısının yatak üzerine uyguladığı gerilmenin bir ifadesi olan yatak mukavemetleri incelendiğinde, nanokompozit malzemenin yatak dayanımı, kompozit malzemeye göre yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış zaman dilimleri sonunda yapılan testlerde yüksek performans göstermiştir.
- Cıvata bağlı kompozit ve nanokompozit numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve onun altındaki uzamaları incelendiğinde, numunelerin kati surette tuzlu su yaşlandırmasından etkilendiği görülmektedir. Yaşlanma süresi arttıkça malzemelerin mekanik performansı olumsuz olarak etkilenmiştir.
- Kompozit ve nanokompozit malzemelerin cıvata bağlı çekme testinde malzeme ve tuzlu su yaşlandırmasına bağlı olarak farklı hasar türleri ortaya çıkmıştır. Yaşlandırılmamış koşullarda yapılan testler sonunda epoksi/BF kompozit numunede yataklama ve kopma hasarı, HNT-epoksi/BF nanokompozit numunede yarıma hasarı oluşmuştur. 2 ay yaşlandırılan numunelerde çekme testi sonunda hasar tipi olarak her iki malzemede de kopma hasarı meydana gelmiştir. Yaşlandırmanın 4. ay sonunda yapılan test sonuçlarına göre hasar tipi kompozit numunede kayma hasarı şeklinde, nanokompozit numunede ise yırtılma ve kayma hasarı beraber oluşmuştur. Numunelerin tuzlu suda 6 ay bekletilmesi sonucunda hasar tipi kompozit numunede kayma hasarı olarak devam ederken, nanokompozit malzemede yırtılma hasarı olarak değişmiştir.
- Cıvata bağlı epoksi/BF kompozit ve HNT-epoksi/BF nanokompozit numunelere cıvata üstü darbe (CÜD) ve kompozit üstü darbe (KÜD) olmak üzere iki farklı noktada, 15 J, 20 J ve 25 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testi normal

ortam ve yaşlandırılmış numuneler için uygulanmıştır. Ortaya çıkan veriler değerlendirildiğinde farklı bulgular elde edilmiştir.

- Vurucunun cıvata üstüne düşürülmesiyle (CÜD) elde edilen deneylerde nanokompozit malzeme, kompozit malzemeye göre daha yüksek darbe kuvvetine erişmiş ve bu darbe yükü altında daha az yer değiştirmeye sahiptir.
- CÜD testinde nanokompozit malzemeye gelen 15-20-25 J enerji seviyelerinde yutulan enerjiler kompozit malzemeye göre daha düşük seyrederken, geri sıçrama enerjileri nanokompozit malzemede daha düşüktür.
- Yaşlandırılmış ortam sürelerinin artmasıyla CÜD testlerinde elde edilen veriler incelendiğinde, numunelerin dinamik davranışlarında performans kaybı görülmüştür. Normal ortam deneylerinden 6. ay yaşlandırmasına kadar yapılan darbe testi sonunda darbe kuvvetleri azalmış, yer değiştirmeler ve numunelerin yuttukları enerjiler artmış, temas süreleri uzamıştır.
- Numunelerin CÜD testinde, gelen enerjilerin artmasıyla darbe kuvvetleri artmıştır. Artan enerji seviyesi malzemedeki hasar yoğunluğunu yükselteceğinden yer değiştirmelerin ve temas sürelerinin artışa sebep olmasının yanında malzemeler tarafından yutulan enerjilerin de yükselmesine neden olmuştur.
- CÜD testi sonunda malzeme yüzeyleri incelendiğinde meydana gelen hasarların pul ve etrafında, yan kenarlara doğru ilerlediği görülmüştür. Gelen enerjinin artması ve yaşlandırma süresinin artması numunelerde meydana gelen hasar büyüklüğünü de arttırmıştır. Kompozit malzemede meydana gelen hasarın büyüklüğü genelde nanokompozit malzemeye göre daha büyük kalmıştır. Numunelerde ayrıca mesnet noktalarının malzeme üzerine basmasıyla oluşan, üst levhanın kenarının alt levha üzerine basmasıyla oluşan hasarlarda meydana gelmiştir.
- CÜD testi sonunda malzeme yüzeylerinde meydana gelen hasar tipi incelendiğinde kompozit malzemede yan kenarlara doğru ilerleyen hasar, düz bir doğruyu anımsatırken, nanokompozit malzemede lineer olmayan ve yön değiştiren bir hasar ilerleme görüntüsü vardır.
- Vurucunun mekanik bağlantı sistemine temas etmeyen en yakın bölgesi kompozit üstüne düşürülmesiyle (KÜD) elde edilen veriler incelendiğinde kompozit malzemenin darbe kuvveti verileri nanokompozit malzemeye göre düşük çıkmıştır. Darbe kuvveti altında numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler değerlendirildiğinde kompozit malzemede daha yüksek çıkmıştır.

- KÜD testinde kompozit malzemeye gelen 15-20-25 J enerji seviyelerinde yutulan enerjiler nanokompozit malzemeye göre daha yüksek seyrederken, geri sıçrama enerjileri nanokompozit malzemedede daha yüksektir. Gelen enerjinin artmasıyla, darbe kuvvetleri yükselmiş ve numunelerde oluşan hasar miktarı artmıştır. Hasara bağlı olarak temas süresi ve yer değiştirmeler de artmıştır.
- Numunelerin yaşlandırılması ile beraber darbe davranışı performanslarında düşme gözlenmiştir. Bu düşüş 2. ay yaşlandırmasından 6. ay yaşlandırmasına doğru artarak devam etmiştir. Yaşlandırma ile beraber malzemelerde darbe kuvvetleri azalmış, kuvvet altında hasara bağlı olarak yer değiştirmeler artmış ve temas süreleri uzamıştır. Bununla beraber, malzemelerdeki yutulan enerji miktarı da artmıştır.
- KÜD testi verileri CÜD testi sonuçları ile kıyaslandığında, darbe kuvvetleri KÜD testinde daha düşük çıkmıştır. Buna bağlı olarak temas süreleri de KÜD testinde daha uzundur. Gelen enerjilerin malzemeler tarafından yutulması dikkate alındığında CÜD testlerinde gelen enerjilerin malzemeler tarafından yutulması daha fazla olmuştur.
- Malzeme yüzeyleri KÜD testi sonunda incelendiğinde oluşan hasarlar vurucunun temas ettiği yüzey üzerinde yoğunlaşmış ve yan kenarlara dik bir şekilde ilerlemiştir. Numunelerde ayrıca darbe etkisiyle ankastre mesnetin malzemeler üzerinde ve üstteki levhanın deliğe yakın kenarının üst kenarının alt levhayı baskılamasıyla oluşan hasarlarda mevcuttur. Gelen enerjinin 15 J den sırasıyla 20 ve 25 J 'e gelmesi ve yaşlandırma süresinin 2. aydan 4 ve 6. aya çıkmasıyla malzeme yüzeylerindeki hasar büyüklüğü artmıştır.
- Kompozit malzemedede meydana gelen hasar türü lineer bir şekilde yan kenarlara doğru ilerlerken, nanokompozit malzemedede hasar dolambaçlı bir yol izlemiştir.
- Cıvata bağlı kompozit ve nanokompozit numunelerin çekme testi sonrasında SEM ile görüntülenmiş hasar bölgeleri incelendiğinde, nanokompozit numunede fiber/matris arayüzey bağlantısının kompozit numuneye göre daha iyi olduğu gözlenmiştir.
- Cıvata bağlı numunelerin hasar görüntüleri, yaşlandırmanın 6. ay sonunda yapılan çekme testinden sonra SEM ile incelendiğinde hem kompozit malzemedede hem de nanokompozit malzemedede hasar miktarının ve hasar derinliğinin arttığı gözlenmiştir.



- Kompozit ve nanokompozit numunelerin düşük hızlı darbe testi sonrasında hasar görüntüleri değerlendirildiğinde, kompozit malzemede nanokompozit malzemeye göre meydana gelen tabaka ayrılması daha yoğun olmuştur. Ayrıca, nanokompozit malzemede fiber kopmaları ve sıyrılmaları daha seyrek olmuştur.
- Tuzlu suda 6 ay yaşlandırılmış kompozit ve nanokompozit numunelerin darbe hasarı görüntülerinde normal ortam sonuçlarına göre tabaka ayrılmaları, matris hasarları, fiber kopmaları ve sıyrıma hasar yoğunlukları artmıştır.
- Kompozit ve nanokompozit numuneler üzerinde zayıflamaya sebep olan matris ve fiber bozulmaları SEM ile görüntülenmiştir.
- Nanokompozit malzemede HNT katkısı ile ortaya çıkan etki mekanizmalarından HNT köprüleme ve epoksi matristeki HNT sıyrıma mekanizmaları SEM görüntüleri ile gözlenmiştir.

## 5.2 Öneriler

Yürütülen tez çalışmasında ileriki zamanlarda yapılması düşünülen ve önerilen çalışmalar bu başlık altında ifade edilmiştir. Fiber takviyeli kompozit yapılardaki bağlantı davranışına etki eden, malzemeden gelen parametreler (fiber tipi, matris türü, fiber yönü vb.), bağlantı geometrisi parametreleri (W/D oranı, E/D oranı, K/D oranı vb.), bağlayıcı parametreleri (mekanik bağlantı tipi, delik büyüklüğü, pul baskı kuvveti vb.) ve tasarım parametreleri (yükleme tipi, bağlantı tipi, yüklemeye yönü, çevresel etkenler vb.) üzerine çalışmalar yapılabilir. Bunun yanında yorulma testi ile bağlantıların servis ömürleri tayin edilebilir. Ayrıca, farklı yaşlandırma ortamlarının daha uzun soluklu zaman dilimlerindeki etkisi üzerine çalışmalar devam ettirilebilir.

**KAYNAKLAR**

- Abrate, S., 1991, Impact on laminated composite materials, *Applied mechanics reviews*, 44 (4), 155-190.
- Abrate, S., 2005, Impact on composite structures, Cambridge university press, p.
- Abrate, S., 2011, Impact engineering of composite structures, Springer Science & Business Media, p.
- Adamson, M. J., 1980, Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials, *Journal of materials science*, 15 (7), 1736-1745.
- Agrawal, S., Singh, K. K. ve Sarkar, P., 2014, Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite—a review, *Journal of composite materials*, 48 (3), 317-332.
- Aktas, A. ve Dirikolu, M. H., 2003, The effect of stacking sequence of carbon epoxy composite laminates on pinned-joint strength, *Composite Structures*, 62 (1), 107-111.
- Aktaş, A. ve Uzun, İ., 2008, Sea water effect on pinned-joint glass fibre composite materials, *Composite Structures*, 85 (1), 59-63.
- Aktaş, M., Atas, C., İçten, B. M. ve Karakuzu, R., 2009, An experimental investigation of the impact response of composite laminates, *Composite Structures*, 87 (4), 307-313.
- Alamri, H. ve Low, I. M., 2012a, Microstructural, mechanical, and thermal characteristics of recycled cellulose fiber-halloysite-epoxy hybrid nanocomposites, *Polymer composites*, 33 (4), 589-600.
- Alamri, H. ve Low, I. M., 2012b, Effect of water absorption on the mechanical properties of nano-filler reinforced epoxy nanocomposites, *Materials & Design*, 42, 214-222.
- Alhuthali, A. ve Low, I. M., 2013a, Influence of halloysite nanotubes on physical and mechanical properties of cellulose fibres reinforced vinyl ester composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32 (4), 233-247.
- Alhuthali, A. ve Low, I. M., 2013b, Water absorption, mechanical, and thermal properties of halloysite nanotube reinforced vinyl-ester nanocomposites, *Journal of materials science*, 48 (12), 4260-4273.
- Amiruddin, A., Sapuan, S. ve Jaafar, A., 2008, Analysis of glass fibre reinforced epoxy composite hovercraft hull base, *Materials & Design*, 29 (7), 1453-1458.
- Asi, O., 2010, An experimental study on the bearing strength behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle filled glass fiber reinforced epoxy composites pinned joints, *Composite Structures*, 92 (2), 354-363.
- ASTM, D., 1996, 5961/D 5961 M Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Laminates, *American Society for Testing and Materials*.

- Bekyarova, E., Thostenson, E. T., Yu, A., Itkis, M. E., Fakhruddinov, D., Chou, T.-W. ve Haddon, R. C., 2007, Functionalized single-walled carbon nanotubes for carbon fiber– epoxy composites, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (48), 17865-17871.
- Belarbi, A. ve Bae, S.-W., 2007, An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets, *Composites Part B: Engineering*, 38 (5-6), 674-684.
- Benmokrane, B., Elgabbas, F., Ahmed, E. A. ve Cousin, P., 2015, Characterization and comparative durability study of glass/vinylester, basalt/vinylester, and basalt/epoxy FRP bars, *Journal of Composites for Construction*, 19 (6), 04015008.
- Berens, A. ve Hopfenberg, H., 1982, Diffusion of organic vapors at low concentrations in glassy PVC, polystyrene, and PMMA, *Journal of Membrane Science*, 10 (2-3), 283-303.
- Berozashvili, M., 2001, Continuous reinforcing fibers are being offered for construction, civil engineering and other composites applications, *Adv Mater Com News, Compos Worldwide*, 6, 5-6.
- Borhan, T. M., 2012, Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre, *Materials & Design*, 42, 265-271.
- Botev, M., Betchev, H., Bikiaris, D. ve Panayiotou, C., 1999, Mechanical properties and viscoelastic behavior of basalt fiber-reinforced polypropylene, *Journal of Applied Polymer Science*, 74 (3), 523-531.
- Bueche, F., 1973, Physical properties of polymers (interscience, new york, 1962), *Google Scholar*, 37.
- Bulut, M., 2017, Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets, *Composites Part B: Engineering*, 122, 71-78.
- Caccese, V., Kabche, J.-P. ve Berube, K. A., 2007, Analysis of a hybrid composite/metal bolted connection subjected to flexural loading, *Composite Structures*, 81 (3), 450-462.
- Camanho, P. P. ve Lambert, M., 2006, A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials, *Composites Science and Technology*, 66 (15), 3004-3020.
- Cantwell, W. J. ve Morton, J., 1991, The impact resistance of composite materials—a review, *Composites*, 22 (5), 347-362.
- Carmisciano, S., De Rosa, I. M., Sarasini, F., Tamburrano, A. ve Valente, M., 2011, Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties, *Materials & Design*, 32 (1), 337-342.
- Chen, W., Shen, H., Auad, M. L., Huang, C. ve Nutt, S., 2009, Basalt fiber–epoxy laminates with functionalized multi-walled carbon nanotubes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (8), 1082-1089.

- Chen, Y., Davalos, J. F., Ray, I. ve Kim, H.-Y., 2007, Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures, *Composite Structures*, 78 (1), 101-111.
- Colombo, C., Vergani, L. ve Burman, M., 2012, Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, *Composite Structures*, 94 (3), 1165-1174.
- Cosenza, E., Manfredi, G. ve Realfonzo, R., 2002, Development length of FRP straight rebars, *Composites Part B: Engineering*, 33 (7), 493-504.
- Crank, J., 1968, Chapter I in: J. Crank and GS Park (editors), *Diffusion in Polymers*, Academic Press, New York.
- Czigány, T., Vad, J. ve Pölöskei, K., 2005, Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites, *Periodica Polytechnica. Engineering. Mechanical Engineering*, 49 (1), 3.
- Czigány, T., 2007, Trends in fiber reinforcements-the future belongs to basalt fiber, Budapest Univ Technol & Econ Dept Polymer Eng, Muegyetem Rkp 3, Budapest, H-1111, Hungary.
- Das, B., 1973, Restricted equilibrium swelling—a true measure of adhesion between short fibers and rubber, *Journal of Applied Polymer Science*, 17 (4), 1019-1030.
- De Lorenzis, L., Rizzo, A. ve La Tegola, A., 2002, A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete, *Composites Part B: Engineering*, 33 (8), 589-603.
- Deák, T. ve Czigány, T., 2009, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: a comparison, *Textile Research Journal*, 79 (7), 645-651.
- Dehkordi, M. T., Nosraty, H., Shokrieh, M. M., Minak, G. ve Ghelli, D., 2010, Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics, *Materials & Design*, 31 (8), 3835-3844.
- Dehkordi, M. T., Nosraty, H., Shokrieh, M. M., Minak, G. ve Ghelli, D., 2013, The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites, *Materials & Design*, 43, 283-290.
- Demir, O., 2017, Karbon Nanotüp Takviyeli Cam-Karbon Elyaf/Epoksi Hibrit Nanokompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Düşük Hızlı Darbe Davranışları, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Deng, S., Zhang, J., Ye, L. ve Wu, J., 2008, Toughening epoxies with halloysite nanotubes, *Polymer*, 49 (23), 5119-5127.
- Deng, S., Zhang, J. ve Ye, L., 2009, Halloysite-epoxy nanocomposites with improved particle dispersion through ball mill homogenisation and chemical treatments, *Composites Science and Technology*, 69 (14), 2497-2505.

- Deniz, M. E., Ozdemir, O., Ozen, M. ve Karakuzu, R., 2013, Failure pressure and impact response of glass–epoxy pipes exposed to seawater, *Composites Part B: Engineering*, 53, 355-361.
- Du, M., Guo, B. ve Jia, D., 2010, Newly emerging applications of halloysite nanotubes: a review, *Polymer International*, 59 (5), 574-582.
- Durgun, İ., 2014, Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, *Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, Mayıs*.
- Eisenmann, J. ve Leonhardt, J., 1981, Improving composite bolted joint efficiency by laminate tailoring, In: *Joining of composite materials*, Eds: ASTM International, p.
- El Refai, A., Ammar, M.-A. ve Masmoudi, R., 2014, Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars to concrete, *Journal of Composites for Construction*, 19 (3), 04014050.
- Eslami-Farsani, R., Khalili, S. M. R., Hedayatnasab, Z. ve Soleimani, N., 2014, Influence of thermal conditions on the tensile properties of basalt fiber reinforced polypropylene–clay nanocomposites, *Materials & Design*, 53, 540-549.
- Fiore, V., Di Bella, G. ve Valenza, A., 2011, Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications, *Materials & Design*, 32 (4), 2091-2099.
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G. ve Valenza, A., 2015, A review on basalt fibre and its composites, *Composites Part B: Engineering*, 74, 74-94.
- Fiore, V., Calabrese, L., Proverbio, E., Passari, R. ve Valenza, A., 2017, Salt spray fog ageing of hybrid composite/metal rivet joints for automotive applications, *Composites Part B: Engineering*, 108, 65-74.
- Fujita, H., Kishimoto, A. ve Matsumoto, K., 1960, Concentration and temperature dependence of diffusion coefficients for systems polymethyl acrylate and n-alkyl acetates, *Transactions of the Faraday Society*, 56, 424-437.
- Genç, Ç. ve Arıcı, A. A., 2008, Yat İmalatında Kullanılan CTP Malzeme ve İmalat Yöntemleri Bölüm I: El Yatırma Yöntemi.
- Genedy, M., Chennareddy, R., Soliman, E. M., Kandil, U. F. ve Taha, M. M. R., 2017, Improving shear strength of bolted joints in pultruded glass fiber reinforced polymer composites using carbon nanotubes, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36 (13), 958-971.
- George, S. C. ve Thomas, S., 2001, Transport phenomena through polymeric systems, *Progress in polymer science*, 26 (6), 985-1017.
- Guimaraes, L., Enyashin, A. N., Seifert, G. ve Duarte, H. A., 2010, Structural, electronic, and mechanical properties of single-walled halloysite nanotube models, *The Journal of Physical Chemistry C*, 114 (26), 11358-11363.
- Halpin, J. C., 1969, Effects of environmental factors on composite materials, *Air Force Materials Lab Wright-Patterson AFB OH*.

- Hao, L. ve Yu, W., 2010, Evaluation of thermal protective performance of basalt fiber nonwoven fabrics, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 100 (2), 551-555.
- Harris, B., 2003, Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics, Woodhead Publishing, p.
- Huang, L., Wang, C. ve Lu, Y., 2008, Thermal and moisture adsorption properties of cyanate ester modified epoxy resin and fiber-glass composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (7), 725-738.
- Jang, B. Z., 1994, Advanced polymer composite: Principles and Application Pdl Handbook Series, p.
- Jin-Woo, L., Yu, T., Park, C.-W. ve Kim, Y.-H., 2017, Interfacial and Bending Properties by Adding HNTs on the Aramid/Basalt Reinforced Epoxy-Based Hybrid Composites.
- Joshi, S. ve Sun, C., 1987, Impact-Induced Fracture Initiation and Detailed Dynamic Stress Field in the Vicinity of the Impact.(Retroactive Coverage), *American Society for Composites Second Technical Conference*, 177-185.
- Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D. ve Delvaux, B., 2005, Halloysite clay minerals—a review, De Gruyter.
- Kang, W.-S., Rhee, K. Y. ve Park, S.-J., 2016, Thermal, impact and toughness behaviors of expanded graphite/graphite oxide-filled epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, 94, 238-244.
- Kara, M., 2012, Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kara, M., Uyaner, M., Avcı, A. ve Akdemir, A., 2014, Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength, *Composites Part B: Engineering*, 60, 507-514.
- Kaw, A. K., 2005, Mechanics of composite materials, CRC press, p.
- Kaybal, H. B., 2015, Karbon nanotüp takviyeli karbon elyaf/epoksi nanokompozit malzemelerin üretilmesi ve delme parametrelerinin incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kaybal, H. B., Ünüvar, A., Koyunbakan, M. ve Avcı, A., 2018, A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-18.
- Kelly, G. ve Hallström, S., 2004, Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance, *Composites Part B: Engineering*, 35 (4), 331-343.
- Khashaba, U., Sallam, H., Al-Shorbagy, A. ve Seif, M., 2006, Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures, *Composite Structures*, 73 (3), 310-317.

- Kim, J. S., Lim, J. H. ve Huh, Y., 2013, Melt-spinning basalt fibers based on dielectric heating and steady-state process characteristics, *Fibers and Polymers*, 14 (7), 1148-1156.
- Kim, Y.-H., Park, J.-M., Yoon, S.-W., Lee, J.-W., Jung, M.-K. ve Murakami, R.-I., 2011, The effect of moisture absorption and gel-coating process on the mechanical properties of the basalt fiber reinforced composite, *International Journal of Ocean System Engineering*, 1 (3), 148-154.
- Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C. ve San-José, J. T., 2014, Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress, *Materials & Design*, 55, 66-74.
- Lawandy, S. ve Helaly, F., 1986, Diffusion of a volatile liquid in polychloroprene rubber, *Journal of Applied Polymer Science*, 32 (6), 5279-5286.
- Lecouvet, B., Horion, J., D'haese, C., Bailly, C. ve Nysten, B., 2013, Elastic modulus of halloysite nanotubes, *Nanotechnology*, 24 (10), 105704.
- Lee, J., Rhee, K. ve Park, S., 2010, The tensile and thermal properties of modified CNT-reinforced basalt/epoxy composites, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (26), 6838-6843.
- Li, W. ve Xu, J., 2009a, Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar, *Materials Science and Engineering: A*, 513, 145-153.
- Li, W. ve Xu, J., 2009b, Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading, *Materials Science and Engineering: A*, 505 (1-2), 178-186.
- Liu, D. ve Malvern, L. E., 1987, Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates, *Journal of composite materials*, 21 (7), 594-609.
- Liu, D., 1988, Impact-induced delamination—a view of bending stiffness mismatching, *Journal of composite materials*, 22 (7), 674-692.
- Liu, M., Guo, B., Du, M., Cai, X. ve Jia, D., 2007, Properties of halloysite nanotube–epoxy resin hybrids and the interfacial reactions in the systems, *Nanotechnology*, 18 (45), 455703.
- Liu, M., Jia, Z., Jia, D. ve Zhou, C., 2014, Recent advance in research on halloysite nanotubes-polymer nanocomposite, *Progress in polymer science*, 39 (8), 1498-1525.
- Liu, Q., Shaw, M. T., Parnas, R. S. ve McDonnell, A. M., 2006a, Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation, *Polymer composites*, 27 (1), 41-48.
- Liu, Q., Shaw, M. T., Parnas, R. S. ve McDonnell, A. M., 2006b, Investigation of basalt fiber composite aging behavior for applications in transportation, *Polymer composites*, 27 (5), 475-483.

- Lopresto, V., Leone, C. ve De Iorio, I., 2011, Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic, *Composites Part B: Engineering*, 42 (4), 717-723.
- Lu, D., Chen, H., Wu, J. ve Chan, C. M., 2011, Direct measurements of the Young's modulus of a single halloysite nanotube using a transmission electron microscope with a bending stage, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 11 (9), 7789-7793.
- Lund, M. D. ve Yue, Y.-Z., 2008, Influences of chemical aging on the surface morphology and crystallization behavior of basaltic glass fibers, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354 (12-13), 1151-1154.
- Lv, X., Zhang, Q., Li, X. ve Xie, G., 2008, Study of the influence of immersion on the carbon fiber/epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (6), 659-666.
- Lvov, Y. ve Abdullayev, E., 2013, Functional polymer–clay nanotube composites with sustained release of chemical agents, *Progress in polymer science*, 38 (10-11), 1690-1719.
- Mallick, P. K., 2007, Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, CRC press, p.
- Manfredi, L. B., De Santis, H. ve Vázquez, A., 2008, Influence of the addition of montmorillonite to the matrix of unidirectional glass fibre/epoxy composites on their mechanical and water absorption properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39 (11), 1726-1731.
- Mathur, R., Chatterjee, S. ve Singh, B., 2008, Growth of carbon nanotubes on carbon fibre substrates to produce hybrid/phenolic composites with improved mechanical properties, *Composites Science and Technology*, 68 (7-8), 1608-1615.
- Mazumdar, S., 2001, Composites manufacturing: materials, product, and process engineering, CrC press, p.
- Mertiny, P. ve Ursinus, K., 2007, A methodology for assessing fatigue degradation of joined fibre-reinforced polymer composite tubes, *Polymer Testing*, 26 (6), 751-760.
- Militky, J. ve Kovacic, V., 1996, Ultimate mechanical properties of basalt filaments, *Textile Research Journal*, 66 (4), 225-229.
- Militký, J., Kovačič, V. r. ve Rubnerova, J., 2002, Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers, *Engineering Fracture Mechanics*, 69 (9), 1025-1033.
- Mingchao, W., Zuoguang, Z., Yubin, L., Min, L. ve Zhijie, S., 2008, Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (4), 393-407.
- Mishra, R., Tiwari, R., Marsalkova, M., Behera, B. ve Militky, J., 2012, Effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on basalt/polysiloxane composites: mechanical and thermal characterization, *Journal of The Textile Institute*, 103 (12), 1361-1368.



- Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S. J. ve Hui, D., 2017, Generation of the pores on graphene surface and their reinforcement effects on the thermal and mechanical properties of chitosan-based composites, *Composites Part B: Engineering*, 114, 348-355.
- Miyano, Y., Nakada, M. ve Sekine, N., 2010, Life prediction of CFRP/metal bolted joint under water absorption condition, *Journal of composite materials*, 44 (20), 2393-2411.
- Morova, N., 2013, Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 47, 175-180.
- Nakamura, R., Netravali, A., Morgan, A., Nyden, M. ve Gilman, J., 2013, Effect of halloysite nanotubes on mechanical properties and flammability of soy protein based green composites, *Fire and Materials*, 37 (1), 75-90.
- Novitskii, A., 2004, High-temperature heat-insulating materials based on fibers from basalt-type rock materials, *Refractories and Industrial Ceramics*, 45 (2), 144-146.
- Okutan, B., Aslan, Z. ve Karakuzu, R., 2001, A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate, *Composites Science and Technology*, 61 (10), 1491-1497.
- Ozen, M. ve Sayman, O., 2011, Failure loads of mechanical fastened pinned and bolted composite joints with two serial holes, *Composites Part B: Engineering*, 42 (2), 264-274.
- Pandian, A., Vairavan, M., Thangaiah, J., Jappes, W. ve Uthayakumar, M., 2014, Effect of moisture absorption behavior on mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer matrix composites, *Journal of composites*, 2014.
- Park, J. S., Park, S. S. ve Lee, S., 2007, Thermal and mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with CTBN and hydroxyl terminated polyester, *Macromolecular Symposia*, 568-572.
- Pasbakhsh, P., Churchman, G. J. ve Keeling, J. L., 2013, Characterisation of properties of various halloysites relevant to their use as nanotubes and microfibre fillers, *Applied Clay Science*, 74, 47-57.
- Pavlovski, D., Mislavsky, B. ve Antonov, A., 2007, CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, *Reinforced Plastics*, 51 (4), 36-39.
- Persson, E., Madenci, E. ve Eriksson, I., 1998, Delamination initiation of laminates with pin-loaded holes, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 30 (2), 87-101.
- Peters, S. T., 2013, Handbook of composites, Springer Science & Business Media, p.
- Pogany, G., 1976, Anomalous diffusion of water in glassy polymers, *Polymer*, 17 (8), 690-694.
- Prager, S., Bagley, E. ve Long, F., 1953, Diffusion of hydrocarbon vapors into polyisobutylene. II, *Journal of the American Chemical Society*, 75 (5), 1255-1256.

- Prashantha, K., Lacrampe, M.-F. ve Krawczak, P., 2011, Processing and characterization of halloysite nanotubes filled polypropylene nanocomposites based on a masterbatch route: effect of halloysites treatment on structural and mechanical properties, *Express Polymer Letters*, 5 (4).
- Prolongo, S., Gude, M. ve Urena, A., 2012, Water uptake of epoxy composites reinforced with carbon nanofillers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43 (12), 2169-2175.
- Ronkay, F. ve Czigány, T., 2006, Development of composites with recycled PET matrix, *Polymers for advanced technologies*, 17 (9-10), 830-834.
- Ross, A., 2006, Basalt fibers: Alternative to glass?, *Composites Technology*, 12 (4).
- Saif, M. J., Asif, M., Naveed, M., Zia, K. M., Khosa, M. K. ve Jamal, M. A., 2016, Halloysite reinforced epoxy composites with improved mechanical properties, *Polish Journal of Chemical Technology*, 18 (1), 133-135.
- Saleem, M., Zitoune, R., El Sawi, I. ve Bougherara, H., 2015, Role of the surface quality on the mechanical behavior of CFRP bolted composite joints, *International Journal of Fatigue*, 80, 246-256.
- Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Ferrante, L., Cioffi, S., Iannace, S. ve Sorrentino, L., 2013a, Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties, *Materials & Design*, 49, 290-302.
- Sarasini, F., Tirillò, J., Valente, M., Valente, T., Cioffi, S., Iannace, S. ve Sorrentino, L., 2013b, Effect of basalt fiber hybridization on the impact behavior under low impact velocity of glass/basalt woven fabric/epoxy resin composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 47, 109-123.
- Sayman, O., Siyahkoc, R., Sen, F. ve Ozcan, R., 2007, Experimental determination of bearing strength in fiber reinforced laminated composite bolted joints under preload, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26 (10), 1051-1063.
- Schadler, L. S., 2003, Polymer-based and polymer-filled nanocomposites, *Nanocomposite science and technology*, 77-153.
- Sen, F., 2007, Failure analysis of composite pin-loaded joints under preload moments, *PhD Thesis, Dokuz Eylül University, Izmir*.
- Seydibeyoglu, M. O., Mohanty, A. K. ve Misra, M., 2017, Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, Woodhead Publishing, p.
- Sgriccia, N. ve Hawley, M., 2007, Thermal, morphological, and electrical characterization of microwave processed natural fiber composites, *Composites Science and Technology*, 67 (9), 1986-1991.
- Shivakumar, K., Elber, W. ve Illg, W., 1985, Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates, *AIAA journal*, 23 (3), 442-449.

- Shokrieh, M. M. ve Memar, M., 2010, Stress corrosion cracking of basalt/epoxy composites under bending loading, *Applied Composite Materials*, 17 (2), 121-135.
- Sim, J. ve Park, C., 2005, Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, *Composites Part B: Engineering*, 36 (6-7), 504-512.
- Singha, K., 2012, A short review on basalt fiber, *International Journal of Textile Science*, 1 (4), 19-28.
- Sjoblom, P. O., Hartness, J. T. ve Cordell, T. M., 1988, On low-velocity impact testing of composite materials, *Journal of composite materials*, 22 (1), 30-52.
- Soykok, I. F., Sayman, O., Ozen, M. ve Korkmaz, B., 2013a, Failure analysis of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints under thermal effects, *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 192-199.
- Soykok, I. F., Sayman, O. ve Pasinli, A., 2013b, Effects of hot water aging on failure behavior of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints, *Composites Part B: Engineering*, 54, 59-70.
- Tang, Y., Deng, S., Ye, L., Yang, C., Yuan, Q., Zhang, J. ve Zhao, C., 2011, Effects of unfolded and intercalated halloysites on mechanical properties of halloysite-epoxy nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (4), 345-354.
- Thoppul, S. D., Finegan, J. ve Gibson, R. F., 2009, Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—a review, *Composites Science and Technology*, 69 (3-4), 301-329.
- Thostenson, E. T. ve Chou, T.-W., 2008, Carbon nanotube-based health monitoring of mechanically fastened composite joints, *Composites Science and Technology*, 68 (12), 2557-2561.
- Tjong, S. C. ve Mai, Y.-W., 2010, Physical properties and applications of polymer nanocomposites, Elsevier, p.
- Töre, C., 2011, Kompozit Malzeme Temelleri Polimer Matrisli, p. 302-308.
- Tüzemen, M. Ç., Salamcı, E. ve Avcı, A., 2017, Enhancing mechanical properties of bolted carbon/epoxy nanocomposites with carbon nanotube, nanoclay, and hybrid loading, *Composites Part B: Engineering*, 128, 146-154.
- Varghese, S., Kuriakose, B., Thomas, S. ve Joseph, K., 1995, Effect of adhesion on the equilibrium swelling of short sisal fiber reinforced natural rubber composites, *Rubber Chemistry and Technology*, 68 (1), 37-49.
- Wang, Q.-h., Zhang, X.-r. ve Pei, X.-q., 2010, Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO<sub>2</sub>, *Materials & Design*, 31 (3), 1403-1409.
- Wang, R.-M., Zheng, S.-R. ve Zheng, Y. G., 2011, Polymer matrix composites and technology, Elsevier, p.

- Wang, X., Wu, Z., Wu, G., Zhu, H. ve Zen, F., 2013, Enhancement of basalt FRP by hybridization for long-span cable-stayed bridge, *Composites Part B: Engineering*, 44 (1), 184-192.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2010a, Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers, Elsevier.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2010b, Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment, *Materials & Design*, 31 (9), 4244-4250.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2011a, Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater, *Corrosion Science*, 53 (1), 426-431.
- Wei, B., Song, S. ve Cao, H., 2011b, Strengthening of basalt fibers with nano-SiO<sub>2</sub>-epoxy composite coating, *Materials & Design*, 32 (8-9), 4180-4186.
- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F. ve Friedrich, K., 2006, Epoxy nanocomposites-fracture and toughening mechanisms, *Engineering Fracture Mechanics*, 73 (16), 2375-2398.
- Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z. ve Zhang, G., 2015, Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments, *Journal of composite materials*, 49 (7), 873-887.
- Yah, W. O., Xu, H., Soejima, H., Ma, W., Lvov, Y. ve Takahara, A., 2012, Biomimetic dopamine derivative for selective polymer modification of halloysite nanotube lumen, *Journal of the American Chemical Society*, 134 (29), 12134-12137.
- Yan, L. ve Chouw, N., 2015, Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications, *Construction and Building Materials*, 99, 118-127.
- Yan, Y., Wen, W.-D., Chang, F.-K. ve Shyprykevich, P., 1999, Experimental study on clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30 (10), 1215-1229.
- Ye, Y., Chen, H., Wu, J. ve Ye, L., 2007, High impact strength epoxy nanocomposites with natural nanotubes, *Polymer*, 48 (21), 6426-6433.
- Ye, Y., Chen, H., Wu, J. ve Chan, C. M., 2011a, Interlaminar properties of carbon fiber composites with halloysite nanotube-toughened epoxy matrix, *Composites Science and Technology*, 71 (5), 717-723.
- Ye, Y., Chen, H., Wu, J. ve Chan, C. M., 2011b, Evaluation on the thermal and mechanical properties of HNT-toughened epoxy/carbon fibre composites, *Composites Part B: Engineering*, 42 (8), 2145-2150.
- Yi-Yan, N., Felder, R. ve Koros, W., 1980, Selective permeation of hydrocarbon gases in poly (tetrafluoroethylene) and poly (fluoroethylene-propylene) copolymer, *Journal of Applied Polymer Science*, 25 (8), 1755-1774.

- Zakaria, M. R., Kudus, M. H. A., Akil, H. M. ve Thirmizir, M. Z. M., 2017, Comparative study of graphene nanoparticle and multiwall carbon nanotube filled epoxy nanocomposites based on mechanical, thermal and dielectric properties, *Composites Part B: Engineering*, 119, 57-66.
- Zeng, S., Reyes, C., Liu, J., Rodgers, P. A., Wentworth, S. H. ve Sun, L., 2014, Facile hydroxylation of halloysite nanotubes for epoxy nanocomposite applications, *Polymer*, 55 (25), 6519-6528.
- Zhao, L., Shan, M., Liu, F. ve Zhang, J., 2017, A probabilistic model for strength analysis of composite double-lap single-bolt joints, *Composite Structures*, 161, 419-427.
- Živković, I., Fragassa, C., Pavlović, A. ve Brugo, T., 2017, Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites, *Composites Part B: Engineering*, 111, 148-164.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Halil Burak KAYBAL  
**Uyruğu** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Kırıkkale/1988  
**Telefon** : 0505 599 80 61  
**Faks** :  
**E-Posta** : hbkaybal@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Kızılırmak L.	Kırıkkale	2005
Üniversite	: Erciyes Üniv.	Kayseri	2012
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniv.	Konya	2015
Doktora	: Konya Teknik Üniv.	Konya	2019

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2018	Selçuk Üniversitesi	Arş. Gör.
2018-...	Amasya Üniversitesi	Arş. Gör.

### UZMANLIK ALANI

Fiber takviyeli kompozit malzemeler ve işlenebilirliği, Nanokompozitler

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Ulus, H., Kaybal., H.B., Eskizeybek, V., Sahin, Ö.S., Avcı, A., " Static and dynamic mechanical responses of CaCO<sub>3</sub> nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites ", *Composite Part-B*, Vol. 140, pp. 223-231, 2018.

Kaybal, H.B., Ulus, H., Demir, O., Sahin, Ö.S., Avcı, A., " Effects of alumina nanoparticles on dynamic impact responses of carbon fiber reinforced epoxy matrix nanocomposites", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.03.011>, 2018.

Kaybal, H.B., Unuvar, A., Koyunbakan, M., Avcı, A., " A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-18, 2018.