# <u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ</u>

## HALLOYSİTE NANOTÜP VE NANO KAUÇUK PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ İMALATI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ İnci PİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ekrem TÜFEKCİ

HAZİRAN 2022



# <u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ</u>

## HALLOYSİTE NANOTÜP VE NANO KAUÇUK PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ İMALATI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnci PİR (503201501)

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Katı Cisimlerin Mekaniği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ekrem TÜFEKCİ

HAZİRAN 2022



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503201501 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi İnci PİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "HALLOYSİTE NANOTÜP VE NANO KAUÇUK PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ İMALATI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :

**Prof. Dr. Ekrem TÜFEKCİ** İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri :

**Prof. Dr. Burak ÖZKAL** İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğretim Üyesi Uğurcan EROĞLU** ...... MEF Üniversitesi

.....

 Teslim Tarihi
 : 17.05.2022

 Savunma Tarihi
 : 02.06.2022





Aileme,



## ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Katı Cisimlerin Mekaniği Yüksek Lisans Programı kapsamında Yüksek Lisans Tezi olaran sunulan bu çalışma kapsamında HNT katkılı, kauçuk katkılı ve hem HNT hem kauçuk katkılı epoksi kompozit malzemelerin imalatı ve mekanik karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MYL-2021-43440 proje kodlu proje ile desteklenmiştir.

Bu çalışma esnasında bana teknik ve manevi destek sağlayan amcam Mahir PİR'e teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, çalışmamı sabırla inceleyen, değerli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, akademik çalışma alanlarını keşfetmemi sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ekrem TÜFEKCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca bana her zaman her türlü desteği sağlayan annem Nihal PİR'e ve kardeşim İpek PİR'e teşekkürlerimi sunarım.

May1s 2022

İnci Pir Makina Mühendisi



# İÇİNDEKİLER

# <u>Sayfa</u>

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	XV
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
OZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GIRIŞ	
1.1 Epoksi	2
1.2 Halloysit Nanotüp (HNT)	
1.3 Kauçuk	5
1.4 Kompozit Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu	6
1.4.1 Deneysel Yöntemler	7
1.4.1.1 Çekme Deneyi	7
1.4.1.2 Uç Noktadan Eğme Deneyi	9
1.4.1.3 Charpy Darbe Deneyi	9
1.4.2 Sayısal Modelleme	
1.4.2.1 Mukavemet Yaklaşımı	
1.4.2.2 Hashin ve Shtrikman Üst ve Alt Sınırlar (H-S modeli)	11
1.4.2.3 Hui-Shia Modeli	
1.4.2.4 Cox Modeli (Kayma Gecikmesi Modeli)	
1.4.2.5 Mori-Tanaka Homojenizasyon Metodu	14
1.4.2.6 Halpin-Tsai Modeli	15
1.4.2.7 Moleküler Dinamik Yöntemi	16
1.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) Görüntüleri	16
1.6 Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemleri	17
2. MALZEME VE YÖNTEM	
2.1 Deneysel Çalışmalar	19
2.1.1 Çekme Deneyi	19
2.1.2 Üç Noktadan Eğme Deneyi	
2.1.3 Charpy Darbe Deneyi	
2.2 Sayısal Analiz ile Modelleme	23
2.2.1 Mori-Tanaka Homojenizasyon Metodu	23
2.2.2 Halpin-Tsai Modeli	25
2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) (Scanning Electron Microsc	ope-SEM)
2.4 Nanokompozitlerin İmalatı	
2.4.1 Vakum Odası	
2.4.2 Kalıp tasarımı	

2.4.3 Ultrasonik Karıştırıcı	29
2.4.4 Elektromanyetik Karıştırıcı	29
2.4.5 Nanokompozitlerin İmalat Aşamaları	30
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	33
3.1 Deneysel Sonuçlar	33
3.1.1 Çekme Deneyi Sonuçları	33
3.1.2 Üç Noktadan Eğme Deneyi Sonuçları	38
3.1.3 Charpy Darbe Deneyi	43
3.2 Sayısal Analiz ile Modelleme Sonuçları	44
3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) Sonuçları	47
3.3.1 Epoksi/HNT numunelerinin TEM görüntüleri	47
3.3.2 Epoksi/Kauçuk numunelerinin TEM görüntüleri	48
3.3.3 Epoksi/HNT/Kaçuk numunelerinin TEM görüntüleri	49
4. SONUÇLAR VE KAPANIŞ	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	61

# KISALTMALAR

HNT	: Halloysit Nanotüp
CNT	: Karbon Nanotüp
CTBN	: Carboxyl-Terminated Butadiene-Acrylonitrile
MD	: Moleküler Dinamik
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
SEM	: Scanning Electron Microscope
ASTM	: American Society for Testing and Materials



### SEMBOLLER

σ	: Gerilme
3	: Birim Şekil Değiştirme
F	: Kuvvet
$\mathbf{A}_{0}$	: Başlangıç Kesit Alanı
L <sub>0</sub>	: Başlangıçta Ölçülen Etkin Uzunluk
$\Delta L$	: Şekil Değiştirme
σ <sub>müh</sub>	: Mühendislik Gerilmesi
ε <sub>müh</sub>	: Mühendislik Birim Şekil Değiştirmesi
σ <sub>gerçek</sub>	: Gerçek Gerilme
E <sub>gerçek</sub>	: Gerçek Birim Şekil Değiştirme
σ <sub>e</sub>	: Eğilme Mukavemeti
1	: Mesnetler Arası Uzaklık
b	: Genişlik
h	: yükseklik
W	: Çökme
$\mathbf{E_{f}}$	: Lif Şeklindeki Takviye Malzemesinin Elastisite Modülü
Em	: Matris Malzemenin Elastisite Modülü
$V_{f}$	: Takviye Malzemesinin Hacim Oranı
Vm	: Matris Malzemesinin Hacim Oranı
EL	: Boyuna Elastisite Modülü
ET	: Enine Elastisite Modülü
<b>K</b> <sub>üst</sub>	: Bulk Modülünün Üst Sınırı
<b>K</b> <sub>alt</sub>	: Bulk Modülünün Alt Sınırı
Güst	: Kayma Modülünün Üst Sınırı
Galt	: Kayma Modülünün Alt Sınırı
K <sub>f</sub>	: Takviye Malzemesinin Hacim Modülünü
K <sub>m</sub>	: Matris Malzemenin Hacim Modülünü
$\mathbf{G}_{\mathbf{f}}$	: Takviye Malzemesinin Kayma Modülü
Gm	: Matris Malzemesinin Kayma Modülü

Ε	: Elastisite Modülü
λ	: Takviye Elemanının Boyu
d	: Takviye Elemanının Çapı
R	: Eş Merkezli Silindirik Bir Matris Kabuğun Yarıçapı
1	: Uzunluk
r <sub>f</sub>	: Lif Yarıçapı
$\eta_L$	: Uzunluğa Bağlı Etkinlik Katsayısı
K <sub>R</sub>	: Takviye Paketleme Düzenine Bağlı Olan Bir Sabit
e <sup>0</sup>	: Matris Malzemesinin Şekil Değiştirme Tansörü
e <sup>1</sup>	: Takviye Malzemesinin Şekil Değiştirme Tansörü
f <sub>0</sub>	: Matris Malzemesinin Hacim Oranı
$f_1$	: Takviye Malzemesinin Hacim Oranı
S	: Eshelby Tansörü
L <sub>0</sub>	: Matris Malzemesinin Malzeme Özellikleri Tansörü
L <sub>1</sub>	: Takviye Malzemesinin Malzeme Özellikleri Tansörü
e <sup>T</sup>	: Katkı Maddelerinin Kapsadığı Bölge İçinde Tanımlı Eşdeğer Dönüşüm Şekil Değiştirme Tansörü
ē	: Kompozit Malzemenin Şekil Değiştirme Tansörü
σ	: Kompozit Malzemenin Gerilme Şekil Değiştirme İlişkisi
L	: Kompozit Malzemenin Etkin Elastisite Modülü
ξ	: Takviye Faktörü
α	: Takviye Elemanının Kalınlık Ve Uzunluk Arasındaki İlişki İle İlgili Bir Sabit
e	: Eksponansiyel
°C	: Santigrat Derece
$\sigma_{c}$	: Çekme Mukavemeti
ε <sub>k</sub>	: Kopma Uzaması

# ÇİZELGE LİSTESİ

## <u>Sayfa</u>

Çizelge 1.1 : K <sub>R</sub> parametresinin paketleme düzenine bağlı değerleri 14
Çizelge 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı
mekanik özelliklerinin değişimi
Çizelge 3.2 : Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine
bağlı mekanik özelliklerinin değişimi
Çizelge 3.3 : HNT ve kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme
deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi
Çizelge 3.4 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme
deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi
Çizelge 3.5 : Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik
özelliklerinin değişimi 40
Çizelge 3.6 : Kauçuk ve HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik
özelliklerinin değişimi
Çizelge 3.7 : Mori-Tanaka homojenizasyon yöntemi ile elde edilen eğilme
altındaki elastisite modülü 46
Çizelge 3.8 : Halpin-Tsai modeli ile elde edilen eğilme altındaki elastisite modülü.



# ŞEKİL LİSTESİ

## <u>Sayfa</u>

Şekil 2.1 : Çekme deneyine tabi tutulan bir numune ve deney tesisatı ve çekme deneyi numunesine ait teknik resim görüntüsü
Şekil 2.2 : Üç noktadan eğme deneyine tabi tutulan bir numune ve deney tesisatı.
Sekil 2.3 : Üc noktadan eğme denevi numunesi teknik resmi
Sekil 2.4 : Charpy darbe denevi tesisati
Sekil 2.5 : Charpy darbe denevi numunesine ait teknik resim cizimiError!
Bookmark not defined.
Şekil 2.6 : Vakum odasına ait görsel 28
Şekil 2.7 : Çalışma kapsamında kullanılan teflon kalıp 28
Şekil 2.8 : Çalışma kapsamında kullanılan ultrasonik karıştırıcı
Şekil 2.9 : İmalat aşamasında elektromanyetik karıştırıcıda karışmakta olan
numuneler
Şekil 2.10 : Bu çalışma kapsamında kullanılan HNT takviye malzemesi 31
Şekil 2.11 : Bu çalışma kapsamında kullanılan Albipox1000
Şekil 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı
mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü, (b)Çekme
mukavemeti, (c)Kopma uzaması
Şekil 3.2 : Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine
bağlı mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü,
(b)Çekme mukavemeti, (c)Kopma uzaması
Şekil 3.3 : HNT ve kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme
deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü,
(b)Çekme mukavemeti, (c)Kopma uzaması
Şekil 3.4 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme
deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü,
(b)Eğilme mukavemeti, (c)Kopma uzaması
Şekil 3.5 : Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik
özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü, (b)Eğilme mukavemeti,
(c)Kopma uzaması
Şekil 3.6 : Kauçuk ve HNİ takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik
ozenikierinin degişimi, (a) Elastisite modulu, (b) Egime
mukavemeti, (c) Kopma uzamasi
Şekil 3.7 : Lakviye kombinasyonlarına göre kirilma enerjisi değişimi
Şekil 5.8 : Farklı miktarda HINI takviyeli epoksi/HINI numunelerinin I Elvi
goruntuleri (a) $\%$ U HIN I, (D) $\%$ U, 5 HIN I, (C) $\%$ I HIN IEffor! Doolymory not defined
BOOKIHAIK HOU deilined. Salvil 2.0. Earlyh milytanda hausuk takvivali analysi/kausuk numunalasisis TEM
yekii 5.7 ; rarkii iiiktarua kauçuk takviyeli epoksi/kauçuk numunelerinin 1 E.M.
goruntuleri (a) 700 (epoksi), (b) 705 kauçuk

Şekil 3.10 : Farklı miktarda kauçuk ve HNT takviyeli epoksi numunelerinin TEM görüntüleri (a)%0 kauçuk ve %0 HNT, (b)%5 kauçuk ve %0,5 HNT, (c)%5 kauçuk ve %1 HNT, (d)%10 kauçuk ve %0,5 HNT. 50

### HALLOYSİTE NANOTÜP VE NANO KAUÇUK PARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ İMALATI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

#### ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte mühendisler günümüzde yaygın olarak kullanılan demir, çelik gibi metal ve metal alaşımlarının yerine alternatif malzemeler aramaya başlamıştır. Alternatif malzemelerin araştırılmasındaki amaç ise bu malzemelere alternatif olarak hafiflik, dayanıklılık, üstün mekanik, elektriksel, kimyasal ve ısıl özellikler gösteren ve ekonomik açıdan daha avantajlı malzemeler ile birlikte çalışmaktır. Bu amaç doğrultusunda kompozit malzemelerin kullanıma yönelinmiştir ve geleneksel malzemelerin yerlerini kompozit malzemeler almaya başlamıştır. Kompozit malzemeler matris ve takviye fazlarından oluşmakta olup iki fazdaki malzemelerin fiziksel bir etki ile bir araya gelmesi ve malzeme içerisinde kendi özelliklerini kaybetmeden bulunması ile oluşurlar. Takviye malzemelerinin boyutlarının küçük olduğu durumlarda ise matris-takviye ara yüzey alanı artar ve etkileşimlerinin artması ile üstün özellikleri sahip kompozit malzeme elde edilir. Partikül takviyeli kompozit malzemeler havacılıktan elektroniğe, bilgisayardan gıda sektörüne kadar birçok alanda tasarlanmakta ve etkin olarak kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada halloysite nanotüp (HNT) takviyeli epoksi kompozit, CTBN (carboxylterminated butadiene-acrylonitrile) kauçuk takviyeli epoksi kompozit ve hem HNT hem CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi kompozit malzemeler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar kapsamında epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonunun sayısal yöntemlerle, deneysel yöntemlerle ve taramalı elektron mikroskobu ile yapılması amaçlanmıştır.

Birinci bölümde kompozit malzemelerin kullanım alanları, bu çalışma kapsamında kullanılan takviye malzemeleri olan HNT ve CTBN kauçuk hakkında ve matris malzemesi olan epoksi reçine hakkında bilgilendirme yapılmıştır. HNT ve CTBN kauçuk takviyelerinin epoksi matris üzerindeki etkileri literatürden araştırılmış ve bu bölümde sunulmuştur. Ayrıca bu bölümde, kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu için kullanılan sayısal ve deneysel yöntemlerden bahsedilmiş ve literatürde kullanılan yöntemler ve bu çalışmada kullanılan yöntemler hakkında yapılan literatür araştırmasına yer verilmiştir. Son olarak da bu bölümde kompozit malzemelerin imalat yöntemleri hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

İkinci bölümde ise, kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu için bu çalışma kapsamında kullanılan sayısal ve deneysel yöntemler ve taramalı elektron mikroskoobu hakkında bilgilendirme yapılmıştır. Yapılan hesaplara ve deney prosedürlerine yer verilmiştir. Çalışma kapsamıda kullanılan malzemelere, çalışılması amaçlanan kompozit malzemelerin imalat prosedürlerine yer verilmiş, malzeme üzerinde deneysel olarak gerçekleştirilecek karakterizasyon çalışmalarının uygun sonuçlar vermesi için imalat sırasında dikkat edilmesi gereken unsurlar vurgulanmıştır.

Bu tezin üçüncü bölümünde ise deneysel ve numerik çalışmaların sonuçları ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiş ve bu verilerin ışığında malzeme karakerizayonu yapılmışır. Her bir malzeme kombinasyonunun farklı deneyler altında ve farklı deney hızlarındaki davranışları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında malzemenin davranışı yorumlanmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

Dördüncü bölümde ise genel bir değerlendirme yapılmış, kapanış bölümü sunulmuş ve gelecek çalışmalar için çeşitli önerilerde bulunulmuştur.



#### MANUFACTURING AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF HALLOYSITE NANOTUBE AND NANO RUBBER PARTICLE REINFORCED EPOXY

#### SUMMARY

With the developing technology, engineers have started to look for alternative materials instead of traditional engineering materials namely metals and alloys such as iron and steel, which are widely used today. The common aim of these research studies is to study materials that exhibit lightweight, durability, superior mechanical, electrical, chemical and thermal properties and are feasible. For this reason, composite materials started to be used more often and widely replacing the traditional materials.

Composite materials usually consist of two phases, namely, matrix and reinforcement phases, and they are formed by the physical combination of materials in these phases and existing in the material without losing their physical properties. In the cases where the dimensions of the reinforcement materials are very small, the matrix-reinforcement interface area increases and with the increase of their interactions, nanocomposite materials with superior properties are obtained. Particle-reinforced composite materials are designed and used effectively in many areas from aviation to electronics, from computers to the food industry. Thus, this thesis is structured around the numerical and experimental investigation of the mechanical properties of nanocomposites. Hence, the present thesis consists of four chapters and in this summary section where each chapter is also briefly explained.

To be more specific, in this study, investigations are carried out on halloysite nanotube (HNT) reinforced epoxy composite, carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile (CTBN) rubber particle reinforced epoxy composites and both HNT and CTBN rubber reinforced epoxy composite materials. Here, it is aimed to explore the effects of the addition of HNT, and CTBN rubber reinforcements on epoxy composites individually and together which allows one to investigate the synergetic effect of HNT and CTBN rubber reinforcement on the epoxy-based composite material. Within the scope of this study, mechanical characterization of epoxy matrix composite materials by numerical methods, experimental methods performed and internal structure of samples are observed using the scanning electron microscope.

In the first chapter, an introduction to the thesis is formulated, which defines the research problem, and the knowledge present in the literature is given, which also includes the usage areas of composite materials and the reinforcing materials used in this study. Since the composite material is made of HNT and CTBN rubber particles as reinforcements and the epoxy polymer which is the matrix material, the studies published in the literature, that investigate the effects of the individual presence of HNT and CTBN rubber reinforcement particles on the mechanical properties of the epoxy-based polymeric composites, are presented in this section. Moreover, the numerical modelling methods and experimental methods, that are used in the mechanical characterization of composite materials, and scanning electron microscopy method for the characterization of composite materials is internal morphology and

structure are explained. Also, a literature review of the methods used in this study is presented in this first section alongside the manufacturing processes and methods for the preparation of the composite materials in the literature are summarized.

In the second chapter, the manufacturing process of the composite materials as well as the experimental and numerical methods used in this study for the mechanical characterization of composite materials and the scanning electron microscopy method is explained in detail. To manufacture the composite samples, moulding and degassing processes are found to be crucial. Thus, a Teflon mould is manufactured and the samples are cast into this manufactured mould. To be able to perform the degassing, a vacuum chamber is also manufactured in which the mould would fit. The experimental characterization process consists of tensile tests, three-point bending tests, and Charpy impact tests. These tests are carried out within the scope of this study and they are described here presenting all the necessary details regarding these procedures. In order to identify the viscoelastic behaviour of composite materials manufactured, the samples are put through tensile tests and three point bending tests at different strain rates. In terms of numerical procedures, the Mori-Tanaka mean-field homogenization method and the Halpin-Tsai model for composite modelling are chosen. These modelling techniques are also described in detail and the way they are applied is presented.

In the third chapter of this thesis, the results of strain rate dependent tensile and threepoint bending tests, Charpy impact tests, Mori-Tanaka homogenization method and Halpin-Tsai model, and scanning electron microscopy images are given. The behaviour of each material combination is obtained for tensile and three-point bending tests and at different strain rates and results are given. Conducting the tensile and threepoint bending tests at various strain rates is a useful technique for the identification of the strain rate dependent mechanical properties. The scanning electron microscopy images suggest that there are no significant material flaws exist in the microstructure of the composite material. From the results of the mechanical characterisation, it can be said that HNT and CTBN reinforcements have significantly opposite effects on the epoxy-based polymeric composites. While HNT reinforcement increases the material stiffness, CTBN rubber reinforced epoxy shows a softer behaviour. Also, usually, HNT reinforcements tend to lead to a brittle behaviour whereas CTBN rubber increases ductility and toughness. When the synergetic effect of HNT and CTBN rubber reinforcements is examined, it is observed that the samples show both high stiffness and ductile behaviour. The numerical studies, it is aimed to evaluate the stiffness variation of the epoxy matrix with different reinforcement materials and reinforcement ratios. The results of the numerical studies coincide with the experimental results. When the numerical results are examined, it is seen that the HNT additive to the epoxy matrix increases the rigidity of the material, while the CTBN rubber reinforcement to the epoxy matrix decreases the stiffness of the material. It is concluded that the synergetic effect of CTBN and HNT additives on the stiffness of the composite material depends on the reinforcement ratios, in some cases stiffness of the epoxy matrix increases and in some cases, it decreases. The data acquired show that all types of reinforcement lead to toughening behaviour. However, CTBN rubber particle reinforced epoxy-based composites are found to be the best in terms of impact resistance.

In the fourth chapter, a general assessment is carried out, and the work done and the acquired results are summarised. Hence, the conclusion part is presented and various suggestions are discussed for future studies.

It is believed that in the future, the manufacturing of composites using these and similar reinforcements together and examining their mechanical properties will become a necessity in terms of designing composite materials and expanding their application areas. Therefore, it is recommended to address this issue in future studies.



### 1. GİRİŞ

Kompozitler, makroskopik seviyede birleştirilen ve birbirleri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yapısal malzemelerdir. Kompozit yapıyı meydana getiren bileşenler yapı içerisinde özgül mühendislik özelliklerini korumaya devam etmektedirler. Kompozit malzemeler birden fazla elemandan/bileşenden oluştuğu için geleneksel malzemelerden farklı olarak hafiflik, rijitlik, sönüm ve düşük yoğunluk gibi özellikler göstermektedirler. Kompozit malzemelerin mühendislik özellikleri, uygun bir matris ve takviye malzemesi kombinasyonunun seçilmesi ile istenilen amaç doğrultusunda şekillendirilebilirler. Ayrıca, geleneksel malzemelere kıyasla imalat ve hammadde maliyetleri daha düşük olduğundan günümüzde geleneksel malzemelere bir alternatif olarak tercih edilmektedirler.

Kompozit malzemelerin kullanım alanları çok yaygındır. Savunma sanayii, otomotiv, elektronik, tıp, inşaat, enerji gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadırlar (Beardmore, 1986; Eda ve Chhowalla, 2009; Lewis, 1994; Peutzfeldt, 1997). Kompozit malzemelerin enerji alanında kullanılmasına rüzgar türbin kanatları örnek verilebilir (Tüfekci, Genel, Tatar ve Tüfekci, 2020).

Kompozit malzemeler, temel olarak, matris ve takviye elemanlarından oluşmuştur. Kompozit malzemelerde tek bir matris fazı ve birden fazla takviye fazları gözlemlenebilmektedir. Takviye malzemesi, genellikle, matris malzemesine göre daha dayanıklıdır ve kompozit yapıya mukavemet ve rijitlik sağlarken aynı zamanda bir yük aktarma ortamı görevi görür. Matris malzemesi de takviye malzemesinin parçacıklarını bir arada tutan bir yapıştırıcı görevi görür.

Kompozitler, matris malzemelerinin tipine göre sınıflandırılabilir. Bunlara polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler denilir. Polimer matrisli kompozitler, ortak bir polimer matris tarafından bir arada tutulan yüksek mukavemetli takviyelerden oluşur. Kompozit yapının maruz kaldığı mekanik yükler, takviye elemanı ile desteklenecek şekilde tasarlanmıştır (Bello, Agunsoye, Hassan, Kana ve Raheem, 2015). Polimer matrisli kompozitler, kolay imal

edilebilirlik, düşük maliyet ve iyileştirilmiş mekanik özellikleri nedeniyle diğer kompozitlerden daha geniş ve çeşitlilikte kullanım alanlarına sahiptir.

Kompozit malzemeler, takviye malzemesinin türüne göre de sınıflandırılabilirler. Takviye elemanı sürekli lif, kısa lif veya parçacık olabilmektedir. Parçacık takviyeli kompozitlerin özellikleri, takviye elemanının boyutuna, yüzey alanına, yüzey aktivitesine ve agrega yapısına, dağılımına (dispersiyonuna), kompozit malzeme içerisindeki miktarına ve takviye-matris etkileşimlerine bağlıdır (Shirazi, Talma ve Noordermeer, 2013; X.-X. Zhang, Lu ve Liang, 2007). Parçacık takviyeleri ise makro, mikro veya nano boyutta olabilmektedir.

Nanokompozitler, nanometre boyutundaki takviye elemanının matris fazı içerisinde dağılması ile oluşmaktadır. Malzemelerin nano boyuttaki özellikleri, aynı malzemenin makro boyuttaki özelliklerine göre önemli değişiklikler gösterir. Örneğin boyutlar küçüldükçe malzeme içerisindeki kusurlar azalacağından mekanik özellikler ciddi oranda yüksektir. Ek olarak daha iyi manyetik, elektrik, optik, ısıl ve kimyasal özellikler gösterirler. Malzeme boyutları küçülerek nanometre boyutlarına inmeye başladığında, kompozit malzemede oldukça üstün özellikler görülmektedir. Malzeme boyutları azaldıkça, yüzeylerinin hacimlerine olan oranı da artar. Bu durum, matris ile takviyenin ara yüzey etkileşimini arttırarak, yüksek nitelikli kompozit malzemeler üretilmesine olanak tanır. Fattah ve diğ., farklı boyutlardaki isli silika (fumed silica) parçacıkların epoksi ile kimyasal etkileşimini inceleyerek küçük boyutlu parçacıklardan daha fazla verim alındığını ifade etmişlerdir (El-Fattah, El Saeed ve El-Ghazawy, 2019). Bu boyutlardaki malzeme numuneleri üzerinde deney yapmak, aşırı hassasiyet gereksinimleri nedeniyle, oldukça zordur. Bununla birlikte, mevcut deneysel sonuçlar, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerin boyuta bağlı olduğunu göstermektedir (McFarland ve Colton, 2005; Salvetat ve diğerleri, 1999; Treacy, Ebbesen ve Gibson, 1996). Üstün malzeme özelliklerine sahip olmaları nedeniyle nanokompozitler, günümüzde birçok mühendislik uygulamasında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### 1.1 Epoksi

Epoksi, termosetler grubundan kimyasal bir reçinedir. Kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak epoksi reçinelere literatürde sıkça rastlanılmaktadır (Balguri, Samuel ve Thumu, 2021). Epoksi reçineler, güçlü mekanik özellikleri, kimyasal ve sıcaklık direnci, çeşitli alt tabakalara yapışmaları ve düşük maliyetleri nedeniyle çok çeşitli uygulamalarda kullanılırlar ve yüksek performanslı polimer kompozitlerde yapısal matris görevi görürler (Monoranu, Ghadbeigi, Patrick, Fairclough ve Kerrigan, 2021).

Epoksi reçine, yüksek performanslı güçlendirilmiş kompozitler için matris fazı olarak yaygın bir kullanıma sahiptir. Bununla birlikte, epoksi reçine, yüksek çapraz bağlı yapısından dolayı çok kırılgandır, darbe direnci ve çatlama başlangıcına karşı direnci zayıftır (Xu, Wang ve Mai, 2013).

Epoksi matrisli kompozitlerde epoksi matris güçlü mekanik özelliklere sahip çeşitli takviye elemanlar ile mekanik anlamda güçlendirilmektedir. Epoksilerin performansını iyileştirmede güçlü mekanik özelliklerinden dolayı nanoparçacıklar (silika, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), nanotüpler (karbon nanotüp (CNT), halloysit nanotüp (HNT)), lifler ve nanokiller gibi nano boyutlu katkı maddeleri kullanan epoksi nanokompozitlere yönelik kapsamlı çalışmalara literatürde rastlanmaktadır (Agrawal ve Satapathy, 2014; Cha ve diğerleri, 2016; Xie, Mai ve Zhou, 2005; Ye, Chen, Wu ve Ye, 2007).

#### 1.2 Halloysit Nanotüp (HNT)

Halloysit nanotüp (HNT), kil mineralinin nanometre boyuttaki silindirik yapılı formudur. HNT, alüminyum silikat minerallerinin hidrotermal değişimi ile ve bir tetrahedral ve bir oktahedal tabakanın üst üste gelmesi ile oluşan, doğada genellikle kaolin ile birlikte bulunan iki tabakalı bir mineralidir (Kausar, 2018; Rooj ve diğerleri, 2010). HNT'ler teorik olarak yapılarında alümina, silikat ve su bulundururlar (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>.nH<sub>2</sub>O, su ile birleştirilmiş (hydrated) durum için n değeri 2, sudan arındırılmış (dehydrated) durum için n değeri 0'dır) (Yu, Wang, Zhang, Zhang ve Liu, 2016).

HNT'ler nanotüp formunda olup iç çapları 10-30 nm arasında, dış çapları 50-70 nm arasında uzunlukları ise 1-15 µm arasında değişebilmektedir (Liu, Guo, Du, Cai ve Jia, 2007). Başka bir kaynağa göre ise HNT'lerin iç çapları 5-20 nm arasında, dış çapları 10-50 nm arasında uzunlukları ise 2-40 µm arasında değişebilmektedir (Du, Guo ve Jia, 2006).

HNT'ler, polimerik nanokompozitlerin mekanik ve ısıl özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, nanotüp yapısından kaynaklı olarak, matristen nanotüplere olan yük transferini optimize ederek kompozit malzemelerde polimerlerin güçlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, HNT'ler polimerik kompozitlerde avantaj sağlamaktadır (Gönüldaş, 2017).

Halloysit nanotüp takviyeli polimer matrisli kompozitlerinlerin ısıl ve mekanik özelliklerinin incelenmesinde çeşitli araştırmalar mevcuttur. Epoksi matrise HNT katkısı ile daha rijit bir yapı elde edildiği de literatürdeki çalışmalarda görülmektedir (Ravichandran, Rathnakar, Santhosh, Chennakeshava ve Hashmi, 2019; Ye ve diğerleri, 2007). Ravichandran ve diğ., epoksi malzemeye ağırlıkça %0, 1, 2, 3, 4 HNT hazırladıkları nanokompozitlerin takviyesi sonucu mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Ravichandran ve diğerleri, 2019). HNT'nin, epoksinin şekil değiştirmesini ve hareketini sınırlandırmasından dolayı, HNT katkılı nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin saf epoksiye göre daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Saf epoksinin 5.5 GPa olan çekme elastisite modülü ağırlıkça %3 HNT katkısıyla 7.6 GPa'a yükselmiştir. Ağırlıkça %4 HNT katkısında ise çekme modülü 7.1 GPa'a düşmüştür. Çekme mukavemeti değerlerinde de benzer artma eğilimi görülmüştür. Saf epoksinin çekme mukavemeti 191.4 MPa olarak elde edilirken bu değer %3 HNT katkısına kadar artış göstermiş ve 267.7 MPa'a ulaşmıştır. %4 HNT katkısında çekme mukavemeti 257.8 MPa'a düşmüştür. Ağırlıkça %3 HNT içeren epoksi-HNT nanokompozitlerinin çekme mukavemeti ve çekme modülünde sırasıyla %39,86 ve %38,18'lik bir artış meydana gelmiştir. %3 HNT katkısından daha fazla miktarda HNT'nin epoksi matriste iyi dağılmadığı, kümeleşmeye neden olduğu bildirilmiştir. Mekanik dayanımda meydana gelen azalmanın kümeleşmelerin neden olduğu gerilme yığılması noktalarının oluşumundan kaynaklandığı bildirilmiştir (Ravichandran ve diğerleri, 2019). Ramamoorthi ve Sampath, cam elyaf takviyeli epoksi malzemeye HNT katkısının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Epoksi-cam elyaf kompozit malzemenin çekme mukavemetinin 270 MPa ve çekme elastisite modülünün 7032 MPa olduğunu, malzemeye %4 HNT katkısına kadar arttığını ancak daha fazla miktarda HNT katkısında bu parametrelerin azaldığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, epoksi-cam elyaf malzemeye %4 HNT katkısıyla çekme mukavemetinde %33,7 ve çekme modülünde de %31,07 artış meydana gelmiştir (Ramamoorthi ve Sampath, 2015).

HNT'ler; doğal olmaları, ucuz olmaları, yüksek mekanik dayanımları, ısıl kararlılıkları, bulunma kolaylıkları, yüksek adsorpsiyon kapasiteleri, yüzey alanlarının fazla olması, malzeme içinde iyi bir şekilde dağılabilme özellikleri gibi önemli avantajlara sahiptir. Bu nedenle, birçok çalışmada kullanılmakla beraber yeni yapısal ve fonksiyonel malzemelerin hazırlanması konusunda da araştırmalara da ışık tutmaktadır (Tanıdır, y.y.).

#### 1.3 Kauçuk

Kauçuk takviyesi ile kompozit malzemenin kırılma enerjisi, kırılma tokluğu, darbe direnci gibi değerlerinde artış ve kompozit malzemede düşük sıcaklıklarda çok daha iyi mekanik özellikler beklenebilir. Kauçuk hem elastik hem de viskoz özellik gösteren bir malzemedir ve titreşim yalıtıcılarında da kauçuk malzemelerin kullanımı mevcuttur. Kauçuk takviyesinin küçük boyutlarda olması durumunda takviye elemanına ait çekme mukavemeti, yorulma ömrü, elektrik iletkenliği, sertlik gibi birçok mühendislik özelliğinin daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir (Schaefer, 2002). Epoksi matrise kauçuk takviyesi literatürde çeşitli şekillerde ele alınmıştır (J. Zhang, Deng, Wang ve Ye, 2016). Ele alınan bazı çalışmalarda kauçuk takviyesinin kompozit malzemenin ölçülen tokluk değerini arttırdığı görülmüştür (Hsieh ve diğerleri, 2010; Y. Huang ve Kinloch, 1992; L. C. Tang ve diğerleri, 2013). Bazı çalışmalarda ise kauçuk takviyesinin kompozit malzemenin titreşim özelliklerinden olan sönüm özelliğini arttırdığı görülmüştür (C. Y. Huang ve Tsai, 2015; Mansour, Tsongas ve Tzetzis, 2015; Senthamaraikannan, Sarathkumar ve Ramesh, 2014).

Epoksi reçineye CTBN (carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile) kauçuk takviyesi, kompozitlerin rijitliğini azaltmaktadır (SEPETÇİOĞLU, 2021; Xu ve diğerleri, 2013). Xu ve diğ. yaptıkları çalışmada epoksi reçineye CTBN kauçuk ilavesinden sonra elastisite modülü ve akma gerilmesi değerlerinin belirgin şekilde azaldığını gösterdiler. Epoksi reçinede optimum mukavemet ve optimum tokluk değerleri elde etmek amacıyla nanosilika ve CTBN kauçuk parçacıklarla takviyeli hibrit kompozitlerler üzerinde çalışmışlardır (Xu ve diğerleri, 2013).

Mansour ve diğ. çalışmalarında, CTBN kauçuğun farklı oranlarda karıştırıldığı epoksi kompozitlerini incelemişlerdir. Çalışmalarında hem çekme testi hem de modal test yöntemlerinden faydalanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, CTBN kauçuk

takviyeli epoksi kompozitlerin daha fazla şekil değiştirme enerjisini absorbe ettiğini görmüşlerdir. Modal test sonuçlarından, CTBN kauçuk takviyesinin epoksi matrisli kompozitlerin özelliklerini istenilen doğrultuda iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Ağırlıkça %25 CTBN kauçuk katkısının olduğu durumdaki kompozit malzemede diğer kombinasyonlara kıyasla en yüksek kayıp modülü değeri gözlemlenmiştir. Ölçülen kayıp modülü değeri saf epoksi reçinesine kıyasla %128 daha yüksek ölçülmüştür. Ancak, çalışmada epoksi-CTBN kauçuk kompozitlerin rijitliğinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %25 CTBN kauçuk katkısının olduğu durumda kompozit malzemenin en düşük elastisite modülü değeri ölçülmüştür. Ölçülen elastisite modülü değerinin saf epoksininkine göre %56 oranında düştüğü saptanmıştır (Mansour, Tsongas ve Tzetzis, 2016).

Sonuç olarak, HNT ve kauçuk takviyelerinin tek başlarına bir yapıya istenilen özellikleri sağlayamadığı görülmektedir. Kauçuk takviyesi, yapının sönüm özelliklerini geliştirmekte, ancak, yapının gevrekleşmesine neden olmaktadır. HNT takviyesi ise epoksi yapıya rijitlik sağlamaktadır. Epoksi polimerin hem rijitlik hem de sönüm özelliklerini geliştirmek amacıyla bu çalışmada takviye elemanı olarak hem HNT hem de kauçuk hibrit bir şekilde kullanılacaktır. Yani, bu çalışmada, HNT ve CTBN kauçuk katkılı hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri incelenecektir.

#### 1.4 Kompozit Malzemelerin Mekanik Karakterizasyonu

Bir malzemeye ait mekanik davranış, çeşitli zorlanmalar altında, malzemede oluşan gerilme ve şekil değiştirmeler ölçülerek yorumlanır. Elastisite modülü, malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı direnci olarak tanımlanabilir ve iç yapıya veya deney koşullarına bağlı olmayıp atomlar arası bağlar tarafından belirlenir. Malzemelerin mekanik davranışı incelenirken homojen ve sürekli ortam kabulü yapılır (Onaran, 2000).

Belirli bir yük uygulandığında, malzemenin yapacağı şekil değiştirme davranışını tanımlayan özellik rijitlik olarak adlandırılır. Malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme grafiğinin elastik bölgesinde rijitlik, elastisite modülü ile ilişkili olarak ele alınabilir. Bir malzemenin rijitliği arttırıldığında, malzemenin önceki durumu ile aynı değerde birim şekil değiştirme değerinin ölçülmesi için yeni numuneye uygulanması gereken kuvvet de artacaktır. Bu nedenle, geliştirilen kompozitlerin tasarlanmasındaki amaç, daha rijit bir yapı oluşturmaktır.

Sönüm, esas olarak bir enerji kaybıdır ve bu da mekanik enerjinin diğer enerji biçimlerine dönüştüğü anlamına gelir. Bu nedenle, titreşim sönümleme, titreşimli sistemden enerjinin uzaklaştırılmasının bir şeklidir. Yapıdaki sönüm, verilen koşullardaki mekanizmaya bağlıdır. Kompozitlerin sönümleme mekanizmalarında, malzeme sönümlemesi ve faz ara yüzlerinin sönümlenmesi olmak üzere iki ana husus vardır (Treviso, Van Genechten, Mundo ve Tournour, 2015). Sönüm, yapıların, kararlı ve geçici durumlardaki tüm mekanik davranışını etkiler (JOHNSON ve KIENHOLZ, 1981). Sönüm, bir titreşim sisteminin en önemli özelliklerinden biridir, bu nedenle tasarım sürecinde olası sorunları önlemek ve olası faydaları elde etmek için doğru bir şekilde tahmin edilmelidir (Crandall, 1970).

#### 1.4.1 Deneysel Yöntemler

Malzemenin karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde deneylerin yeri önemlidir. Deneylerin sonucunda malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilir ve bu eğriler ışığında malzemelerin mekanik davranışları yorumlanabilir. Gerilme etkisinde numunenin boyutları değişir ve lineer elastik durumda gerilmelerle şekil değiştirmeler orantılıdır. Bu durumda gerilme-şekil değiştirme bağıntısı, Hooke kanunu ile ifade edilir.

Literatürde, kompozit malzemelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi, matris malzemeye yapılan katkı miktarının malzemeye ait mühendislik özellikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması, deneysel yöntemler ile malzeme karakterizasyonunu konularında çeşitli araştırmalar mevcuttur (Gong, Zhao, Tang, Liu ve Mai, 2015; Irez, Bayraktar ve Miskioglu, 2017; Kumar, Ghosh ve Kumar, 2016). Kompozit malzemelerde uygulanan deneysel yöntemlere çekme deneyi, üç noktadan eğme deneyi, Charpy darbe deneyi ve dinamik mekanik analiz (DMA) örnek olarak verilebilir (Ye ve diğerleri, 2007). Bu bölümde, nanokompozitlerin mekanik karakterizasyonunda kullanılan deneysel yöntemlerden bahsedilecektir.

#### 1.4.1.1 Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik davranışı ile ilgili özellikleri belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ham sonuç olarak kuvvet ve şekil değiştirme cinsinden elde edilir. Elde edilen sonuçlar işlenerek, numunenin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışı gözlenir ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi çizilir. Bu deney yoluyla numunenin akma dayanımı, kopma

dayanımı, çekme mukavemeti, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi mühendislik sabitleri elde edilir. Elde edilen eğri yorumlanarak belirli sonuçlara varılır. Lineer bölgede Hooke kanunu kullanılarak malzemeye ait elastisite modülü değeri hesaplanır. Hooke kanunu, denklem 1.1 ile verilmiştir.

$$\sigma = E \varepsilon \tag{1.1}$$

Çekme deneyi sonuçları iki farklı yaklaşımla ele alınabilir. Bu yaklaşımlar sonucunda gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve mühendislik gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri olarak iki farklı eğri çizilebilir. Çekme deneyi esnasında uzamadan dolayı numunenin kesit alanında bir miktar değişiklik meydana gelmektedir. Mühendislik gerilmesinde bu değişiklik dikkate alınmaz ve deneyin başındaki kesit alanı dikkate alınarak hesap yapılır. Gerçek gerilme hesabında ise alandaki bu değişiklik dikkate alınmaktadır ve kesit alanı değişkenlik göstermektedir. Gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramında boyun verme başladıktan sonra çekme için gerekli yükün azalmasına rağmen yükün uygulandığı alanın daha hızlı küçülmesinden dolayı gerçek gerilme yükselmeye devam etmektedir. Mühendislik gerilmesi-şekil değiştirme eğrileri çizdirilirken ve mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekil değiştirmesi terimleri hesaplanırken 1.2-1.3 denklemleri dikkate alınır. Denklemlerde F terimi kuvveti, A<sub>0</sub> terimi başlangıçtaki kesit alanını, L<sub>0</sub> terimi numunenin başlangıçta ölçülen etkin uzunluğunu,  $\Delta L$  terimi şekil değiştirmeyi,  $\sigma_{müh}$  terimi mühendislik gerilmesini,  $\varepsilon_{müh}$  terimi mühendislik birim şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

$$\sigma_{m\ddot{u}h} = \frac{F}{A_0} \tag{1.2}$$

$$\varepsilon_{m\ddot{u}h} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{1.3}$$

Gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin çizdirilmesinde 1.4-1.5 denklemleri dikkate alınır. Denklemlerde  $\sigma_{gerçek}$  terimi gerçek gerilmeyi,  $\varepsilon_{gerçek}$  terimi gerçek birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

$$\sigma_{gerçek} = \sigma_{m\ddot{u}h}(1 + \varepsilon_{m\ddot{u}h}) \tag{1.4}$$

$$\varepsilon_{gerçek} = \ln(1 + \varepsilon_{m\ddot{u}h}) \tag{1.5}$$

Çekme deneyi tamamen standartlaştırılmıştır. Birçok deney türüne göre uygulanması kolay ve ucuzdur. Literatürde, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan çekme deneyi çalışmaları mevcuttur (Abdullah ve Ansari, 2015; Sapuan, Leenie, Harimi ve Beng, 2006; Sun ve diğerleri, 2008; L.-C. Tang ve diğerleri, 2013).

### 1.4.1.2 Üç Noktadan Eğme Deneyi

Kiriş, plak gibi yapı elemanları eğilme yükü taşırlar. Çeşitli kompozit malzemelere üç noktadan eğme deneyi yapılmasının literatürde örnekleri mevcuttur (Carbajal ve Mujika, 2009; Irez ve diğerleri, 2017; Sapuan ve diğerleri, 2006; Sfondrini ve diğerleri, 2014; Sideridis ve Papadopoulos, 2004). Üç noktadan eğme deneylerinde, iki ucundan mesnetli dikdörtgen kesitli çubuk kullanılmaktadır. Bu da numune hazırlama kolaylığı sağlamaktadır (Sideridis ve Papadopoulos, 2004). Çubuğun orta noktasından düşey doğrultuda F kuvveti etki eder ve bu kuvvetin neden olduğu eğilme momenti kiriş kesitinde normal gerilmeler oluşturur. Kirişin en alt lifinde en büyük çekme gerilmesi, en üst lifinde en büyük basma gerilmesi görülür. Kirişin ortasında tarafsız eksen üzerinde gerilme sıfırdır. En büyük gerilmenin değeri denklem 1.6 ile hesaplanır.

$$\sigma_{\rm e} = \frac{3Fl}{2bh^2} \tag{1.6}$$

Denklem 1.6'te kullanılan terimlerden F numuneye uygulanan kuvveti, *l* mesnetler arası uzaklığı, b kesitin enini, h yüksekliğini temsil etmektedir. Bu hesap, lineer bölgede kullanılabilir. Malzemenin şekil değiştirmeye karşı direnci olan eğilme rijitliği kirişin orta noktasında oluşan çökme (w) ölçülerek belirlenebilir. Eğilme rijitliği de malzemenin elastisite modülü ile orantılıdır. Buradan malzemeye ait elastisite modülü denklem 1.7 ile hesaplanabilir.

$$E = \frac{Fl^3}{4wbh^3}$$
(1.7)

#### 1.4.1.3 Charpy Darbe Deneyi

Charpy darbe deneyi ile malzeme kırılırken ne kadarlık bir enerji absorbe edildiği veya kırılma enerji miktarının ne kadar olduğu belirlenir. Malzemenin sünek veya gevrek davranışı hakkında bilgi edinilir. Deneyin amacı, ani darbe sebebiyle malzemenin yuttuğu enerji miktarını ölçmektir. Sonuçlar, numune tarafından yutulan darbe enerjisi

veya darbe direnci olarak ifade edilir. Deney sırasında, numunenin dinamik bir zorlama altında kırıldığı enerji doğru ölçülmelidir. Elde edilen bu değer, malzemenin darbe mukavemeti olarak tanımlanır. Literatürde, malzemelerin davranışını yorumlarken bu yönteme başvurulmaktadır (Abdullah ve Ansari, 2015; Conradi, Zorko, Kocijan ve Verpoest, 2013; Xian, Walter ve Haupert, 2006).

#### **1.4.2 Sayısal Modelleme**

Kompozit malzemelerin tasarımlarında hem deneysel hem de matematiksel modellemeler kullanılmaktadır. Malzeme tasarımında, tasarımı hedeflenen modellerin mühendislik parametreleri karşılaştırmalı olarak ön görülebildiğinden, matematiksel modelleme yöntemleri tercih edilmektedir. Bu durum, aynı zamanda, imalat öncesi tahmin edilebilirlik özelliğinden dolayı hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Deneysel yöntemlerle de matris malzemesine yapılan takviyenin kompozit malzemenin mekanik özellikleri ölçülerek karşılaştırmalı olarak incelenebilmektedir.

Birçok mühendislik malzemesinin, mekanik davranışını modellemek için homojenleştirme yöntemlerine başvurulmaktadır. Literatürde, homojenleştirme yöntemleri ile kompozit malzeme karakterizasyonunu ele alan birçok çalışma mevcuttur. Malzeme modelleri, bünye denklemlerinde kullanılan fonksiyonlarına göre farklılık gösterir. Bu fonksiyonlar, çeşitli yükleme koşulları altında mekanik davranışı belirleyen deneysel malzeme karakterizasyonu sonuçlarına dayanmaktadır (Alpatova ve diğerleri, 2013; Luo ve Daniel, 2003; Wang, Abdala, Hilal ve Khraisheh, 2017).

Nanokompozitlerin analitik olarak modellenmesinde, bazı araştırmacılar, sürekli ortamlar mekaniğini kullanmıştır. Fakat, elastisite modülünü tahmin edebilmek için yaygın olarak sürekli ortamlar mikromekaniği kullanılır. Bu mikromekanik modellere bazı örnekler verilebilir: Mukavemet yaklaşımı, Voigt üst sınırı ve Reuss alt sınırı (V-R model), Hashin ve Shtrikman üst ve alt sınırlar (H-S model), Halpin-Tsai modeli (H-T model), Hui-Shia modeli (H-S model), Wang-Pyrz modeli (W-P model), Cox modeli (Shear lag model) ve Mori-Tanaka homojenizasyon metodu (Hu, Onyebueke ve Abatan, 2010; Kaw, 2005; Y.-F. Zhang, Bai, Li ve Zhang, 2009).

#### 1.4.2.1 Mukavemet Yaklaşımı

Mukavemet yaklaşımında, sadece matris içerisindeki takviye elemanının hacim oranı dikkate alınır. Matris ve takviye malzemelerine ait elastisite modülü değerleri ele
alınarak yeni kompozit malzemenin enine ve boyuna elastisite modülü değerleri bu oran doğrultusunda sayısal olarak hesaplanır (Kaw, 2005). Hesaplamalar sırasında denklem 1.8 ve denklem 1.9'dan faydalanılır. Bu denklemlerde  $E_f$  lif şeklindeki takviye malzemesinin elastisite modülü değerini,  $E_m$  matris malzemenin elastisite modülü değerini, V<sub>f</sub> takviye malzemesinin hacim oranını, V<sub>m</sub> matris malzemesinin hacim oranını,  $E_L$  kompozit malzemenin boyuna elastisite modülünü ve  $E_T$  ise enine elastisite modülünü temsil etmektedir.

$$\mathbf{E}_L = \mathbf{E}_{\mathbf{f}} \mathbf{V}_{\mathbf{f}} + \mathbf{E}_{\mathbf{m}} \mathbf{V}_{\mathbf{m}} \tag{1.8}$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \tag{1.9}$$

## 1.4.2.2 Hashin ve Shtrikman Üst ve Alt Sınırlar (H-S modeli)

Hashin ve Shtrikman, takviye şeklinin kompozit malzemenin elastik sabitleri üzerinde sınırlayıcı bir faktör olmadığını, kompozit malzemenin makroskopik izotropiye sahip olduğunu ve yarı homojen olduğunu varsaymışlardır. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzeme için değişken elastiklik ilkelerine dayalı olarak kompozitin malzemenin elastik sabitlerinin üst ve alt sınırlarının hesaplarını ifade etmişlerdir (Hashin ve Shtrikman, 1962, 1963).

Matrisin takviye malzemesinden daha rijit veya daha yumuşak olması durumuna bağlı olarak, kompozit malzemeye ait hacim (bulk) modülünün (K<sub>üst</sub> ve K<sub>alt</sub>) ve kayma modülünün (G<sub>üst</sub> ve G<sub>alt</sub>) üst ve alt sınırları belirlenmiştir. Matris malzemesinin takviye malzemesinden yumuşak olduğu durumlar için alt sınırlar, matris malzemesinin takviye malzemesinden daha rijit olduğu durumlarda ise üst sınırlar ele alınmaktadır. Hashin ve Shtrikman alt ve üst sınırlarına ait bağıntılar, 1.10 - 1.14 denklemleri aracılığıyla verilmiştir. Bu denklemlerde K<sub>f</sub> takviye malzemesinin hacim modülünü, K<sub>m</sub> matris malzemenin hacim modülünü, G<sub>f</sub> takviye malzemesinin kayma modülünü, G<sub>m</sub> matris malzemesinin kayma modülünü ve V<sub>f</sub> takviye elemanının hacim oranını temsil etmektedir. H-S modeli de mukavemet yaklaşımına benzer şekilde, sadece üç parametre içermektedir.

$$K_{\text{üst}} = K_{\text{f}} + (1 - V_{\text{f}}) \left[ \frac{1}{K_{\text{m}} - K_{\text{f}}} + \frac{3V_{\text{f}}}{3K_{\text{f}} + 4G_{\text{f}}} \right]^{-1}$$
(1.10)

$$K_{alt} = K_m + V_f \left[ \frac{1}{K_f - K_m} + \frac{3(1 - V_f)}{3K_m + 4G_m} \right]^{-1}$$
(1.11)

$$G_{\text{üst}} = G_{\text{f}} + (1 - V_{\text{f}}) \left[ \frac{1}{G_{\text{m}} - G_{\text{f}}} + \frac{6V_{\text{f}}(K_{\text{f}} + 2G_{\text{f}})}{5G_{\text{f}}(3K_{\text{f}} + 4G_{\text{f}})} \right]^{-1}$$
(1.12)

$$G_{alt} = G_m + V_f \left[ \frac{1}{G_f - G_m} + \frac{6V_f(K_m + 2G_m)}{5G_m(3K_m + 4G_m)} \right]^{-1}$$
(1.13)

$$E = \frac{9K}{1 + 3K/G}$$
(1.14)

#### 1.4.2.3 Hui-Shia Modeli

Taya ve Mura (M Taya ve Mura, 1981) ve Taya ve Chou (Minoru Taya ve Chou, 1981), lif takviyeli kompozitlerin boyuna elastisite modülünü tahmin etmek için Mori-Tanaka yaklaşımını kullanmışlardır. Weng (Weng, 1984) ve Tandon ve Weng (Tandon ve Weng, 1984a) bu çalışmaları geliştirerek hizalanmış küresel izotropik takviye malzemeli kompozitlerin elastik sabitleri için denklemler geliştirmiştir. Hui ve Shia (Hui ve Shia, 1998) ve Shia ve diğ. (Shia, Hui, Burnside ve Giannelis, 1998), Tandon ve Weng (Tandon ve Weng, 1984b)'in sonuçlarından hareketle, lif ve parçacık takviyelere sahip kompozitlerin elastisite modüllerini tahmin etmek için basitleştirilmiş formüller türetmiştir ve teorik sonuçlarının deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde uyuştuğunu göstermişlerdir. Hui-Shia modeli ile kompozit malzemeye ait boyuna ve enine elastisite modülleri denklem 1.15 – 1.19 yardımıyla bulunur. Bu denklemlerde, Ef takviye malzemenin elastisite modülünü, Kr enine elastisite modülünü,  $\lambda$  takviye elemanının boyunu, d ise takviye elemanının çapını temsil etmektedir.

$$E_{L} = E_{m} \left[ 1 - \frac{V_{f}}{\xi} \right]^{-1}$$
(1.15)

$$E_{\rm T} = E_{\rm m} \left[ 1 - \frac{V_{\rm f}}{4} \left( \frac{1}{\xi} + \frac{3}{\xi + \Lambda} \right) \right]^{-1}$$
(1.16)

$$\xi = V_{f} + \frac{E_{m}}{E_{f} - E_{m}} + 3(1 - V_{f}) \left[ \frac{(1 - g)(\lambda/d)^{2} - g/2}{\alpha^{2} - 1} \right]$$
(1.17)

$$\Lambda = (1 - V_{\rm f}) \left[ \frac{3((\lambda/d)^2 + 0.25)g - 2(\lambda/d)^2}{(\lambda/d)^2 - 1} \right]$$
(1.18)

g

$$= \begin{cases} \frac{(\lambda/d)}{((\lambda/d)^{2} - 1)^{3/2}} \Big[ (\lambda/d)\sqrt{(\lambda/d)^{2} - 1} - \cosh^{-1}(\lambda/d) \Big] & (\lambda/d) \ge 1 \\ \frac{(\lambda/d)}{(1 - (\lambda/d)^{2})^{3/2}} \Big[ -(\lambda/d)\sqrt{1 - (\lambda/d)^{2}} + \cos^{-1}(\lambda/d) \Big] & (\lambda/d) \le 1 \end{cases}$$
(1.19)

#### 1.4.2.4 Cox Modeli (Kayma Gecikmesi Modeli)

Cox modeli, lif takviyeli kompozitler malzemeler için oluşturulan ilk mikro-mekanik modeldir. Cox modelinde matris ile takviye malzemesi ara yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri aracılığıyla gerilme aktarımından yola çıkılarak kompozit malzemeye ait elastik sabitler belirlenir. Cox, yarıçapı R olan eş merkezli silindirik bir matris kabuğu içine yerleştirilmiş, l uzunluklu ve  $r_f$  yarıçaplı bir lifi analiz etmiştir. Yapılan çalışma sonucu boyuna elastisite modülü denklem 1.20'deki bağıntı kullanılarak bulunabilmektedir (Cox, 1952). Bu denklemlerde Ef takviye malzemenin elastisite modülünü, Em matris malzemenin elastisite modülünü, Vf takviye elemanının hacim oranın ve EL boyuna elastisite modülünü temsil etmektedir.

$$E_{L} = \eta_{L} V_{f} E_{f} + (1 - V_{f}) E_{m}$$
(1.20)

Bu denklemdeki  $\eta_L$  ifadesi, uzunluğa bağlı etkinlik katsayısını belirtmektedir ve denklem 1.21 ve 1.22 yardımı ile bulunur.

$$\eta_L = 1 - \frac{\tanh(\beta l/2)}{\beta l/2} \tag{1.21}$$

$$\beta^{2} = \frac{4\mu_{m}}{r_{f}^{2}E_{f}\ln(K_{R}/V_{f})}$$
(1.22)

K<sub>R</sub> parametresi takviye paketleme düzenine bağlı olan bir sabittir ve değerleri Çizelge 1.1'de verilmiştir (Tucker III ve Liang, 1999).

Takviye Paketleme Düzeni	Kr
Cox	$2\pi/\sqrt{3}$
Kompozit Silindir	1
Heksagonal	$\pi/2\sqrt{3}$
Kare	$\pi/4$

Çizelge 1.1 : KR parametresinin paketleme düzenine bağlı değerleri.

Bu model ile kompozit malzemeye ait boyuna elastisite modülü hesaplanabilmektedir. Kompozit malzemeye ait bütün elastik sabitlerin belirlenmesinde bu model yetersiz kalmaktadır (Tucker III ve Liang, 1999).

## 1.4.2.5 Mori-Tanaka Homojenizasyon Metodu

Mori-Tanaka homojenleştirme yönteminde, kompozit yapıyı oluşturan malzemelerin mekanik özellikleri kapalı ve analitik formdaki denklemler ile kompozit malzemenin mekanik özelliklerini vermektedir (Mori ve Tanaka, 1973). Parçacıklı kompozitlerin homojenizasyonunda analitik ve kapalı bir çözüm bulabilme özelliği, Mori-Tanaka yöntemini işleme kolaylığı ve doğruluk açısından uygulanabilir kılmaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalar göz önüne alındığında, parçacık takviyeli nanokompozit malzemeler için Mori-Tanaka homojenleştirme metoduna sıkça başvurulduğu görülmüştür (Acarer, Pir, Tüfekci, Türkoğlu Demirkol ve Tüfekci, 2021; Peng, Hu, Zheng ve Fukunaga, 2009; Tüfekci, Durak, ve diğerleri, 2020).

Mori Tanaka yöntemi analitik olarak yazılabildiğinden homojenleştirme işlemi için bu yöntem kullanılmıştır. Mori Tanaka yönteminde kompozit malzemenin özellikleri, kompozit yapıyı oluşturan malzemelerin özellikleri kullanılarak çeşitli matematiksel yaklaşımlarla hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere ortalama adı verilmektedir (Kırış, 2007).

Matris Malzemesinin Şekil Değiştirme Tansörü:  $E^0$ Takviye Malzemesinin Şekil Değiştirme Tansörü:  $E^1$ Matris Malzemesinin Hacim Oranı:  $f_0$ Takviye Malzemesinin Hacim Oranı:  $f_1$ Eshelby Tansörü: **S** Matris Malzemesinin Malzeme Özellikleri Tansörü:  $L_0$ Takviye Malzemesinin Malzeme Özellikleri Tansörü:  $L_1$ Katkı Maddelerinin Kapsadığı Bölge İçinde Tanımlı Eşdeğer Dönüşüm Şekil Değiştirme Tansörü:  $E^T$ 

$$\mathbf{E}^{\mathbf{T}} = -(\mathbf{L}_{1} - \mathbf{L}_{0})[(\mathbf{L}_{1} - \mathbf{L}_{0})(f_{0}\mathbf{S} + f_{1}\mathbf{I}) + \mathbf{L}_{0}]^{-1}\mathbf{E}^{0}$$
(1.23)

Kompozit Malzemenin Şekil Değiştirme Tansörü: $\overline{\mathbf{E}}$ 

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{E}^0 + f^1 \mathbf{E}^\mathrm{T} \tag{1.24}$$

Kompozit Malzemenin Gerilme Şekil Değiştirme İlişkisi:

$$\overline{\mathbf{\sigma}} = \mathbf{L}\overline{\mathbf{E}} \tag{1.25}$$

Kompozit Malzemenin Etkin Elastisite Modülü: L

$$\mathbf{L} \equiv \mathbf{L}_{0} \{ \mathbf{I} - f_{1} (\mathbf{L}_{1} - \mathbf{L}_{0}) [(\mathbf{L}_{1} - \mathbf{L}_{0}) (f_{0} \mathbf{S} + f_{1} \mathbf{I}) + \mathbf{L}_{0}]^{-1} \}^{-1}$$
(1.26)

Bu denklemlerin ışığında Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin bilgisayar programları aracılığı ile modellenmesinin yapılabilmesi mümkündür (Arora ve Pathak, 2019; Ogierman ve Kokot, 2013; Trzepieciński, Ryzińska, Biglar ve Gromada, 2017). Bu yöntemde, malzemeye ait yoğunluk, elastisite modülü, hacim oranı verileri kullanılarak kompozit malzemenin statik davranışının öngörülmesi amaçlanır.

#### 1.4.2.6 Halpin-Tsai Modeli

Mukavemet yaklaşımı ile elde edilen enine elastisite modülü ve düzlem içi kayma modülü değerlerinin deneysel sonuçlarla pek uyuşmadığı görülmüştür. Bu nedenle, daha iyi modelleme tekniklerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, kompozit malzemelerin sayısal tasarımı için yarı deneysel modeller geliştirilmiştir. Çok çeşitli elastik özellikler ve lif hacim oranları kullanılabildiği için bu modellerin en kullanışlısı Halpin-Tsai modeli denilebilir. Halpin-Tsai modeli elastisiteye bağlı sonuçların eğri uydurma yöntemi ile basit denklemler haline getirilmiştir. Bu denklemlerde  $E_f$  takviye malzemenin elastisite modülünü,  $E_m$  matris malzemenin elastisite modülünü,  $V_f$ takviye malzemesinin hacim oranını,  $V_m$  matris malzemesinin hacim oranını,  $E_L$ boyuna elastisite modülünü,  $E_T$  enine elastisite modülünü temsil etmektedir.

$$E_{\rm L} = E_{\rm f} V_{\rm f} + E_{\rm m} V_{\rm m} \tag{1.27}$$

$$\frac{E_{\rm T}}{E_{\rm m}} = \frac{1 + \xi \eta V_{\rm f}}{1 - \eta V_{\rm f}} \tag{1.28}$$

$$\eta = \frac{(E_{\rm f}/E_{\rm m}) - 1}{(E_{\rm f}/E_{\rm m}) + \xi}$$
(1.29)

 $\xi$  takviye faktörüdür ve elyaf geometrisine, paketleme geometrisine ve yükleme koşullarına bağlıdır (Kaw, 2005).

#### 1.4.2.7 Moleküler Dinamik Yöntemi

Moleküler dinamik (MD) yöntemi nanokompozitlerin modellenmesinde yeni ortaya çıkan yaklaşımlardan biridir (Tong ve Li, 2016). Küçük ölçekteki malzemelerin mekaniğini anlamak için moleküler dinamik modern bilim dünyasında en yaygın yollardan biridir (Srivastava, Deepak, Chenyu ve Kyeongjae, 2003). MD simülasyonları sayısal olarak gerçekleştirilir ve genellikle hesaplama açısından pahalıdırlar. deneylerle karşılaştırılabilir sonuçlar sağlarlar. Ancak, MD simülasyonları, atomik ve moleküler ölçekteki etkileşimler için iyi ve tutarlı bilgiler sağlar (Arash, Wang ve Duan, 2011). MD teorisi, atomik ve moleküler etkileşimleri simüle etmeyi amaçlayan, tanımlanmış atomlar arası potansiyellere dayanmaktadır. MD simülasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılan denklemler, ampirik olarak tanımlanmış bağ enerjilerinin ifadesi ile doğrudan bağlantılı olan birden fazla parametre gerektirir ve denklemler simülasyonların doğruluğunu belirler.

### 1.5 Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope, SEM), nano ölçekli malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesini sağlar. Literatürde anlam bütünlüğünü korumak amacıyla taramalı elektron mikroskobu kısaltmasında SEM kısaltması kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler için homojen ve izotrop kabulünün yapılabilmesi ve sayısal analizler ile deneysel sonuçların örtüşmesi için takviye elemanlarının matris içerisinde homojen olarak dağılmış olması gerekmektedir. Nanomalzemeler topaklaşma eğilimindedirler. SEM görüntülerinin alınmasının amacı, nanomalzemelerde topaklaşmanın olup olmadığının görüntülenmesidir. SEM görüntülerinde gözenek boyutları ve sayısı görülebilmektedir. Ayrıca, kompozit malzemede, imalattan kaynaklanabilecek çentik etkisi yaratacak konumlar da belirlenebilmektedir. SEM görüntülemede, tarama işlemi vakum altında yapılmaktadır. Görüntüleme sürecinde yüzeye elektron gönderilip geri yansıyan elektronlar ile bir görüntü elde edilmektedir (Egerton, 2005).

SEM ile görüntülemenin çeşitli avantajları mevcuttur. SEM ile elde edilen görüntülerin çözünürlüğü ışık mikroskobuna kıyasla çok daha yüksektir. Transmisyon elektron mikroskopları, tek tek atomların konumunu ve kimyasını analiz edebilir. Görüntüleme aralıkları, bir görüntüleme seansı içinde, mikrodan nano ölçeğe kadar birçok farklı uzunluktaki mikro yapıların karakterizasyonunu sağlar (Inkson, 2016).

### 1.6 Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemleri

Literatürde ve uygulama alanlarında kompozit malzemelerin imalatına yönelik çeşitli metotlar bulunmaktadır. Bu metotlara kalıpla üretim, filament (lif) sarma, reçine emdirilmiş kumaş veya lif ile yatırma, enjeksiyon kalıplama, otoklav kalıplama örnek verilebilir (Bello ve diğerleri, 2015; Kaw, 2005).

Termoset kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde optimum değerleri elde edebilmek amacıyla hava boşluklarının giderilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla termoset kompozitler yüksek basınç ve ısı altında kürlenmelidir. 1 atm den daha yüksek düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanması istenen durumlarda otoklav yöntemine başvurulmaktadır.

Enjeksiyon yöntemi yüksek üretim hızı ve düşük üretim maliyeti nedeniyle tercih edilen yöntemler arasındadır. Termoplastik reçinelerin kullanımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak enjeksiyon yöntemi ile yüksek hacimlerde kompleks parçaların üretimi de yapılabilmektedir.

Filamet lif sarma yöntemi genellikle tek yönlü kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntemle imal edilen tek yönlü kompozit tabakalar yapısal olarak iyi özellikler göstermektedir. Hızlı ve kolay bir metod olduğu için tercih edilmektedir. Bu imalat yönteminde takviye lifler reçine banyosundan geçirildikten sonra çeşitli dönüş hızları ile mandrel üzerine sarılarak imalatları tamamlanır.



### 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1 Deneysel Çalışmalar

Bu yöntemlerin haricinde kompozit malzemelerin çalışmada, sayısal karakterizasyonunun yapılması amacıyla deneysel yöntemlere de başvurulmuştur. Şekil değiştirme, iç yapıdan başka deney ve çevre koşullarına da bağlı olduğundan, yapılan mekanik deneyler, oda sıcaklığında yavaş artan yük altında gerçekleştirilmiştir. Bazı malzemelerde, yükleme hızı sonucu etkiler. Uzun süreli deneylerde düşük mukavemet, yüksek süneklik görülebilirken, kısa süreli deneylerde yüksek mukavemet, düşük süneklik görülebilir. Davranışları, yükleme hızına ve süresine bağlı malzemelere viskoelastik malzeme adı verilir (Onaran, 2000). Bu çalışma kapsamında tasarlanan nanokompozitlerin karakterizasyonu için çekme, üç noktadan eğme ve Charpy darbe deneylerinden faydalanılmıştır.

Bu doğrultuda, HNT katkılı epoksi nanokompozitin, CTBN kauçuk katkılı epoksi nanokompozitin ve hem HNT hem de CTBN kauçuk katkılı epoksi nanokompozitin rijitlik ve sönüm özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üretilen numunelere, çekme, üç noktadan eğme ve Charpy darbe deneyleri uygulanmıştır.

### 2.1.1 Çekme Deneyi

Çekme makinası aşağı ve yukarı hareket edebilen çenelerden oluşur. Standartlara uygun olarak boyutlandırılmış deney numunesi eksenel olarak bu çenelere bağlanır. Numuneleri bu çenelere düzgünce bağlamak çok önemlidir. Çünkü, uygulanan yükün sadece eksenel olarak etki etmesi istenir. Herhangi bir eksen kaçıklığı veya açılı yerleştirilme olması durumunda, deney sırasında eğilme ve burulma momentleri oluşabilir. Dolayısıyla, yanlış sonuçlar elde edilip yanlış yorumlar yapılabilir. Çeneler, numune kopana kadar eksenel olarak hareket eder. Deney makinası uygulanan kuvveti ve bu kuvvet sonucu uzama miktarını ölçebilen kısımlardan oluşur. Elde edilen veriler sonucunda, gerilme-şekil değiştirme eğrisi çizilerek malzeme hakkında genel bir bilgi edinilmiş olur. Ayrıca, deney hızı da önemli bir parametredir. Uygun olmayan hızlarda yapılan deneyler malzeme özelliklerini doğru yansıtmayabilir.

Bu çalışmada saf epoksi, ağırlıkça %0,5 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %1 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %5 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi ve ağırlıkça %0,5 HNT ve %5 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi numunelerine çekme deneyi yapılmıştır.

Bu deneyler, kompozit malzemenin değişen birim şekil değiştirme hızındaki yüklemeler altındaki davranışı hakkında bilgi edinmek için yapılmıştır. Deneyler, Shimadzu AG-IS 50kN Universal Test Machine cihazında yapılmıştır. Çekme hızı olarak üç farklı hızda deney yapılmıştır bu hızlar 0,01 birim şekil değiştirme/dakika, 0,05 birim şekil değiştirme/dakika ve 0,1 birim şekil değiştirme/dakika olarak belirlenmiştir, her bir hız değeri ve her bir hız değerindeki deney için üç tane numune toplamda bir takviye kombinasyonu için dokuz adet numune hazırlanmıştır, hazırlanan numunelere çekme deneyi yapılmıştır. Çekme numuneleri ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır (ASTM, 2006). Çekme deneyi yapılan örnek bir numuneye ait görsel ve numuneye ait teknik resim çizimi Şekil 2.1'de verilmiştir.



**Şekil 2.1 :** Çekme deneyine tabi tutulan bir numune ve deney tesisatı ve çekme deneyi numunesine ait teknik resim görüntüsü.

## 2.1.2 Üç Noktadan Eğme Deneyi

Üç noktadan eğme deneyinde, standartlara uygun olarak hazırlanmış deney numunesi, kenarlardan mesnetlenip mesnetler arası uzaklık ölçülür. Çubuğun tam orta noktası belirlenir. Cihazın üst çenesi ve numune ile hafif temas sağlanana kadar aşağı doğru indirilir kuvvetin çubuğun belirlenen orta noktasına etkitilmesi sağlanır. Deney süresince, uygulanan kuvvet arttırılırken, numunenin tam orta noktasında oluşan çökme değeri ölçülür. Bu değerlerle, numuneye ait kuvvet-şekil değiştirme grafiği elde edilir. Uygulaması kolay bir yöntem olduğundan tercih edilmektedir. Elde edilen sonuçlar denklem 1.24 ve 1.25 doğrultusunda yorumlanacaktır.

Bu çalışmada saf epoksi, ağırlıkça %0,5 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %1 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %5 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi ve ağırlıkça %0,5 HNT ve %5 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk, ağırlıkça %1 HNT ve %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi numunelerine üç noktadan eğme deneyi yapılmıştır. Bu deneyler, kompozit malzemenin değişen birim şekil değiştirme hızındaki yüklemeler altındaki davranışı hakkında bilgi edinmek için yapılmıştır. Üç noktadan eğme deneyleri, Shimadzu AG-IS 50kN Universal Test Machine cihazında yapılmıştır. Yükleme hızı olarak üç farklı hızda deney yapılmıştır bu hızlar 0,01 birim şekil değiştirme/dakika, 0,05 birim şekil değiştirme/dakika ve 0,1 birim şekil değiştirme/dakika olarak belirlenmiştir, her bir hız değeri için her bir malzeme kombinasyonu için üçer adet numune hazırlanmıştır böylece her bir kombinasyon için testler üç kere tekrarlanmıştır. Üç noktadan eğme numuneleri ASTM D790 standardına uygun olarak hazırlanmıştır (ASTM, 2002). Üç noktadan eğme deneyi tesisatına ve numune teknik resmine ait görseller şekil 2.2 ve 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Üç noktadan eğme deneyine tabi tutulan bir numune ve deney tesisatı.



Şekil 2.3 : Üç noktadan eğme deneyi numunesi teknik resmi.

# 2.1.3 Charpy Darbe Deneyi

Nankompozitlerin birim şekil değiştirme hızına bağlı mekanik özelliklerinin karakterizasyonunun ardından, farklı kombinasyonlardaki numunelerin kırılma enerjilerini karşılaştırmak amacıyla Charpy darbe deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde takviye tiplerinin ve miktarlarının epoksi matrisin kırılma enerjisi üzerindeki etkisinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Charpy darbe deneyinde belirli bir ağırlığa sahip olan sarkaç belirli bir yüksekliğe çıkarılarak potansiyel enerji kazandırılır. Sarkaç, çıkarılan bu yükseklikten serbest olarak bırakılır. Bırakılan sarkaç, numuneye çarparak deney numunesini kırarak diğer yönde ölçülen bir yüksekliğe çıkar. Sarkacın kütlesi, bırakıldığı yükseklik ve çıktığı yükseklik bilindiğinde, aradaki potansiyel enerji farkı hesaplanır. Bu değer, numunenin kırılması için gereken enerji, diğer bir deyişle darbe direncidir.

Bu çalışmada, saf epoksi, ağırlıkça %1 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %2 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %5 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça

%10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi numunelerine charpy darbe deneyi uygulanmıştır. Bu deneyler, kompozit malzemelerin absorbe ettiği enerji miktarlarını karşılaştırma amacıyla yapılmıştır. Charpy darbe testi numuneleri ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır (Astm-D6110-10, 2010). Her bir numune için testler altı kere tekrarlanmıştır. Charpy darbe deneyi tesisatına ait görsel şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Charpy darbe deneyi tesisatı.

## 2.2 Sayısal Analiz ile Modelleme

Üretim, zaman ve deney gibi maliyetlerin minimum tutulması amacıyla ve kompozit malzemelerde yapı hakkında bilgi edinmek amacıyla ön çalışma olarak sayısal analiz ile modelleme yapılmıştır. Homojen olmayan yapıların modellenmesi zor olduğundan, kompozit malzemeler, homojenleştirme yöntemi kullanılarak modellenmektedirler. Literatürde kabul edilmiş çeşitli homojenleştirme yöntemleri mevcuttur ve literatürde nano parçacık takviyeli nanokompozitlerin modellenmesinde Mori-Tanaka homojenizasyon metodunu ve Halpin Tsai modelini kullanan çalışmalar bulunmaktadır (Das Lala, Sadikbasha ve Deoghare, 2020; Ghorbanpour Arani, Baba Akbar Zarei ve Haghparast, 2016; Hbaieb, Wang, Chia ve Cotterell, 2007; Zare, 2016).

## 2.2.1 Mori-Tanaka Homojenizasyon Metodu

Malzeme modellemesinde kullanılan homojenleştirme yöntemleri, ticari yazılımlar kullanılarak yapılabilmektedir. Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi de bunlardan biridir ve MSc Software firmasına ait Digimat MF yazılımı ile yapılabilmektedir. Digimat MF yazılımı, mikromekanik analiz için Eshelby çözümüne ve Mori-Tanaka modeline dayanan çok ölçekli bir malzeme modelleme yazılımıdır. Bir kompozit malzemedeki takviye malzemelerinin boyutu, dağılımı ve konumu bu programa girdi olarak tanıtılmaktadır. Simüle edilmiş katmanların malzeme özelliklerini tanımlamak için elastisite modülü ve takviye malzemesine ait en boy oranı değerleri kullanılmaktadır.

Gözenekli katılar için, birinci dereceden Mori-Tanaka modeli kullanılabilmektedir. Mori-Tanaka modeli, Digimat-MF'deki gözenekli katılar için mevcuttur. Kullanılan birinci derece homojenizasyon tekniği üç adımda gerçekleştirilir:

1. Şekil değiştirme tensörü, makroskopik ağın her integrasyon noktası için hesaplanır;

2. Makroskopik bir noktanın şekil değiştirme tensörü, temsili hacim elemanına uygulanan sınır koşullarını formüle etmek için kullanılır. Bu koşullar, temsili hacim elemanının şekil değiştirmesine neden olur;

3. Başlangıç makroskopik noktasının gerilme tensörü, temsili hacim elemanındaki gerilme alanının temsili hacim elemanı hacmi üzerinden ortalaması alınarak hesaplanır.

Trzepiecinski ve diğ. Digimat yazılımı kullanılarak BaTiO<sub>3</sub>'ün 3 boyutlu bir mikroyapı modeli oluşturup; tane boyutu, konum ve gözenekliliğin sayısal modellemesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, sayısal modelleme ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler ve deneyler sonucunda elde edilen ortalama elastisite modülü değerlerinin uyum içerisinde olduğu görülmüştür (Trzepieciński ve diğerleri, 2017).

Arora ve Pathak, çalışmalarında bir duvarlı karbon nano tüp (SWCNT) takviyeli polimer nanokompozit malzemenin sayısal modellemesini Mori-Tanaka yöntemi ile Digimat MF ticari yazılımını kullanarak yapmışlarıdır (Arora ve Pathak, 2019).

Bu çalışmada, Mori-Tanaka homojenizasyon metodu kullanılarak ağırlıkça %0,5 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %1 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %5 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi ve ağırlıkça %0,5 HNT ve %5 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk, ağırlıkça %1 HNT ve %10 CTBN kauçuk, ağırlıkça %1 HNT ve %10 CTBN

kauçuk takviye edilmiş epoksi nanokompozitler için sayısal analiz ile modelleme yapılmıştır.

### 2.2.2 Halpin-Tsai Modeli

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerden biri de Halpin-Tsai modelidir. Haplhin ve Tsai tarafından elastisite teorisine dayanan, eğri uydurma yöntemi ile geliştirilmiştir (Kaw, 2005). Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye malzemelerinin elastik özellikleri, kompozit malzeme içerisindeki oranları gibi etkiler göz önüne alınarak yapılan bir homojenleştirme işlemidir. Literatürde, polimer matrisli nanokompozitlerin Halpin-Tsai modeli ile modellenmesinin yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Hassanzadeh-Aghdam ve Jamali, 2019; V. K. Srivastava, 2012; Yeh, Tai ve Liu, 2006). Bu çalışmada da Yeh ve diğ. tarafından verilen denklemler yardımı ile kompozit malzemeye ait elastisite modülü belirlenecektir (Yeh ve diğerleri, 2006). Kullanılacak olan bağıntılar, denklem 2.1-2.3'te verilmiştir.

$$\mathbf{E} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \mathbf{E}_{\mathbf{m}}$$
(2.1)

$$\eta = \frac{(\alpha E_f / E_m) - 1}{(\alpha E_f / E_m) + \xi}$$
(2.2)

$$\xi = 2(\lambda/d)e^{-55V_{\rm f}-0.5} \tag{2.3}$$

 $\lambda$  takviye elemanının boyunu, d ise takviye elemanının çapını,  $\alpha$  takviye elemanının kalınlık ve uzunluk arasındaki ilişki ile ilgili bir sabiti göstermektedir. Rastgele dağılmış takviye elemanlarında, takviye elemanının boyunun kalınlığından büyük olduğu durumlarda  $\alpha = 1/3$  alınır. Takviye elemanının boyunun kalınlığından küçük olduğu durumlarda ise  $\alpha = 1/6$  olarak alınır.

Bu çalışmada Halpin-Tsai modeli kullanılarak ağırlıkça %0,5 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %1 HNT takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %5 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi, ağırlıkça %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi ve ağırlıkça %0,5 HNT ve %5 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk, ağırlıkça %0,5 HNT ve %10 CTBN kauçuk takviye edilmiş epoksi nanokompozitler için sayısal analiz ile modelleme yapılmıştır.

#### 2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM)

Bu çalışmada malzeme karakterizasyonunun yapılabilmesi amacıyla SEM görüntüleri de değerlendirilmiştir. Bu incelemede, yüzeyin iletken olması istenmektedir. Polimerik nanokompozit yapının iletken hale getirilmesi amacıyla, yüzey, ilk önce altın ile kaplanmaktadır. Daha sonra SEM işlemine başlanır. Taramalı Elektron Mikroskobu ile analizler Gebze Teknik Üniversitesi Laboratuvalarında (GebzeLab) gerçekleştirilmiştir.

#### 2.4 Nanokompozitlerin İmalatı

Nanokompozitlerin imalatı, oldukça dikkat isteyen, zor ve karmaşık bir süreçtir. Deney sonuçlarının istenilen hassasiyet düzeyinde ve birbiriyle tutarlı olması için, imalat aşaması büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda nanokompozitlerin imalatı sırasında izlenecek yol detaylı olarak araştırılmış, çeşitli imalat metodları denemiş ve edinilen tecrübeler doğrultusunda en uygun imalat sürecine karar verilmiştir. Bu bölüm kapsamında epoksi matrisli kompozitlerin imalatı için izlenen prosedüre yer verilmiştir.

Epoksi matrisli kompozitlerin imalatı sırasında malzeme icerisinde hava kabarcıklarının bulunması malzemenin amaclanan mekanik özelliklerini yansıtmamaktadır. Bu nedenle yapılan deneysel çalışmalar ve literatür taraması sonucunda, imalat aşamalarından olan jelleşme ve kürlenme aşamalarının vakum ortamında yapılması, imal edilen nihai numune içerisinde hava kabarcığı bulunmaması ve kompozit malzemenin kalitesi ve mekanik özelliklerinin tutarlılığı açısından önem arz etmektedir ve benzer çalışmalarda da vakum prosedürünün izlendiği görülmüştür (Feng, Fang ve Gu, 2004; Giannakopoulos, Masania ve Taylor, 2011; Jordan, Jacob, Tannenbaum, Sharaf ve Jasiuk, 2005). Bu durum, imalat sırasında vakum kullanılması gereksinimi doğurmaktadır. Bu doğrultuda bu çalışma kapsamında vakum odası kullanılmıştır.

Epoksi matrisli nanokompozit imalatı, literatürde, bir kalıba dökülerek yapılmaktadır. Kalıp malzemesi olarak literatürde plastik, teflon, metal malzemeler kullanılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Bello ve diğerleri, 2015; Joy, Varughese, Shanmugam ve Haridoss, 2019). Yapılan bu araştırmalar sonucunda, kalıp malzemesi olarak teflonun seçilmesine karar verilmiştir. Numunelerin şekli, yapılacak testlere uygun olarak seçilip bir kalıp tasarımı yapılmıştır.

Nanopartiküllerin epoksi içerisinde düzgün dağılması, malzemenin özelliklerinin her noktasında aynı olması için çok önemlidir. Bu nedenle, imalat aşamaları sırasında, çeşitli malzeme karıştırma yöntemleri araştırılmıştır. Karıştırma sırasında kullanılacak ekipmanlar elektromanyetik karıştırıcı, ultrasonik banyo ve ultrasonik karıştırıcı şeklindedir.

### 2.4.1 Vakum Odası

Yapılan deneysel çalışmalar ve literatür taraması sonucunda partiükül takviyeli epoksi kompozit imalat aşamalarından olan jelleşme ve kürlenme aşamalarının vakum ortamında yapılması imal edilen ürünün içinde hava kabarcığı bulunmaması ve imalat kalitesi açısından önem arz ettiğinden daha önce de bahsedilmiştir. Bu durum, imalat sırasında vakum kullanılması gereksinimi doğurmaktadır. Bu doğrultuda, vakum odası ihtiyacı oluşmuştur.

Bu çalışma kapsamında kullanılması amacıyla çeşitli vakum odası tipleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, daha önceden tasarlanmış kalıbımızın boyutlarına uygun olan ve malzeme bakımından da uygun olduğu düşüncesiyle çelik vakum odası yapılmasına karar verilmiştir. Vakum odası imalarında çelik plakalar kullanılmıştır ve kullanılan malzemeler alt ve yanlar olmak üzere 1 adet 600 mm x 400 mm x10 mm, 2 adet 600 mm x 100 mm x 10 mm, 2 adet 400 mm x 100 mm x 10 mm boyutlarında olan çelik plakalardır. Bu parçalar birbirine gönyeli bir şekilde kaynatılmıştır ve hava çıkmaması için kaynak sırasında ekstra özen gösterilmiştir. Daha sonra kaynatılan gövdede CNC tezgahında pleksi kapağın denk geleceği yüzeye hava kaçmaması için temizlik pasosu verilmiştir. Kapakta o-ring kanalı açılmış, kapak bağlantı delikleri delinmiş ve son olarak kapağında bir kenarına barometre saati monte edilmiştir. Tasarlanan vakum odasına ait görseller Şekil 2.5'te verilmiştir. Test aşamasında imal edilen vakum değerine ulaşılmış olup bu tasarımın ihtiyaca uygun olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 2.5 : Vakum odasına ait görsel.

## 2.4.2 Kalıp tasarımı

Bu çalışmada partikül takviyeli epoksi kompozit numunelerinin imalatı teflon bir kalıba dökülerek yapılmaktadır. Kalıp malzemesi ile ilgili literatürde çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, kalıp malzemesi olarak teflonun seçilmesine karar verilmiştir. Elde edilecek numunelere çekme testi, üç noktadan eğme testi ve Charpy darbe testi yapılması amaçlanmıştır. Bu testlerin yapılabilmesi için test numunelerine ait standartlar mevcuttur. Bu standartlar doğrultusunda CNC tezgahında teflon kalıp üzerine işlemeler yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda işlenmiş teflona ait görsel Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6 : Çalışma kapsamında kullanılan teflon kalıp.

### 2.4.3 Ultrasonik Karıştırıcı

Nanopartiküllerin nanometre seviyesinde dağılmasında mekanik karıştırma işlemlerinin yetersiz olduğu literatürde yapılan birçok çalışmada gösterilmiştir. Homojen ve izotropik malzeme kabulünü sağlamak için nanopartikül takviyelerin epoksi matris içerisinde eşit bir dağılım göstermesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla nanopartikül takviyeli epoksi kompozitin imalat aşamalarında ultrasonik karıştırıcı kullanılmasına karar verilmiştir.

Ultrasonik karıştırıcının çalışma prensibinde ucunda bulunan ultrasonik probun çok yüksek frekanslı titreşimleri sonucu nanopartikül takviyeler epoksi matris içerisinde eşit ve homojen şekilde dağılması amaçlanmaktadır. Ultrasonik karıştırıcı nanometre boyutuna sahip parçacıkların epoksi matris içerisine dağılmasında kullanılmış, mikron mertebesindeki kauçuk takviyelerinde ise sadece manyetik karıştırma işlemi yapılmıştır. Bu çalışma sırasında kullanılan ultrasonik karıştırıcıya ait görsel Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 : Çalışma kapsamında kullanılan ultrasonik karıştırıcı.

## 2.4.4 Elektromanyetik Karıştırıcı

Bu çalışma kapsamındaki imalat aşamalarında elektromanyetik karıştırıcı kullanılmasındaki amaç, yapılan karıştırma işleminin mekanik olan kısmının kas gücü yerine makina yardımı ile yapılmasıdır. Elektromanyetik karıştırıcıda kimyasal

karışım manyetik bir kuvvet yardımıyla karıştırılmaktadır. Karışımın içerisinde manyetik balık adı verilen bir bilya bulunmaktadır ve bu bilya manyetik alanın etkisi ile dönmektedir. Dönen bilya beher içindeki kimyasalın karıştırılmasını sağlamaktadır. Çeşitli hızlarda karıştırma işlemi yapılabilmektedir, eğer istenirse üstüne beher konulan tabla ısıtılarak kimyasalın sıcak karıştırma yapılması sağlanabilmektedir. Şekil 2.8'de deneysel çalışmalarımızda kullanılan elektromanyetik karıştırıcılar ve elektromanyetik karıştırıcıda karışmakta olan numuneler görülmektedir.



Şekil 2.8 : İmalat aşamasında elektromanyetik karıştırıcıda karışmakta olan numuneler.

# 2.4.5 Nanokompozitlerin İmalat Aşamaları

Partikül takviyeli epoksi kompozilerin imalatlarında temel olarak karıştırma yöntemleri önem taşımaktadır. Bu nedenle imalat aşamaları sırasında karıştırma süreci uzun bir zaman dilimini kapsamaktadır. Bu çalışmada epoksi matrise Halloysite Nanotüp takviyesi yapılmıştır. Halloysite nanotüp, nanotüp formunda olup bu çalışmada kullanılan takviye malzemesini çapı 30-70 nm aralığında değişmekte olup uzunluğu ise 1-3 µm aralığındadır. Halloysite nanotüp takviyesinde ise nemlenme probleminin gözlemlenmemesi amacıyla HNT imalttan önce 6 saat 60°C etüvde tutulmaktadır. Şekil 2.9'da Nanografi Nano Technology firmasından temin edilen HNT malzemesine ait görsel sunulmaktadır.



Şekil 2.9 : Bu çalışma kapsamında kullanılan HNT takviye malzemesi.

Epoksi matrise yapılacak olan CTBN kauçuk katkısı için de Evonik Industries, AG Germany'den Albipox1000 ürünü hibe olarak alınmıştır. Alipox1000 ağırlıkça %40 CTBN kauçuk katkılı DGBA epoksi kompozittir. Literatürde yapılan çalışmalarda CTBN kauçuk katkısının boyutlarının 0,5-1 µm aralığında küresel parçacıklar olduğu taramalı elektron mikroskop görüntüleri ile saptanmıştır. Albipox 1000® laminasyon epoksisi eklenmesi ile seyreltilerek kullanılabilmektedir. Epoksi reçine olarak da Hexion firmasına ait MGS® L 285 ve sertleştirici olarak da Hexion firmasına ait MGS® 287 laminasyon epoksi seti seçilmiştir. Bu çalışmada imalat aşamalarında laminasyon epoksisi eklenerek karışım %5 ve %10 oranlarına seyreltilmiştir. Takviye sırasında hassas terazi ile takviyeler kontrollü bir şekilde eklenmektedir. Şekil 2.10'da bu çalışma kapsamında kullanılan CTBN kauçuk takviyeli Albipox 1000®'e ait görsel sunulmaktadır.



Şekil 2.10 : Bu çalışma kapsamında kullanılan Albipox1000.

Takviyeler epoksi malzemeye eklendikten sonra karışım ilk önce mekanik olarak elle karıştırılmıştır. Daha sonra ise manyetik karıştırıcıda yaklaşık 60-90 dakika, homojenleşme gözlenene kadar karıştırılmıştır. Karışımlar daha sonra vakum odasında yaklaşık 2 saat (malzeme içerisindeki hava kaybolana kadar) bekletilmiştir.

Vakum odasından çıkarılan halloysit ve epoksi karışımı ultrasonik karıştırıcı ile %30 amplitude frekansında aralıklı olarak toplamda 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu sırada, 50 saniyede bir sıcaklık kontrolü yapılarak karışım sıcaklığının kontrol altında tutulmasına dikkat edilmiştir. Ultrasonik karıştırma işlemi sonunda malzemede çok fazla hava kabarcığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle ultrasonik karıştırma aşamasından sonra da karışımlara1 saat (malzeme içerisindeki hava kaybolana kadar) tekrar vakum uygulanmıştır.

Bu sırada döküm yapılacak olan teflon kalıp ilk başta temizlenmiştir. Daha sonra 15'er dakika aralıklar ile üç kat kalıp ayırıcı sürülmüştür. Bu doğrultuda imal edilen epoksi kompozit numunelerin teflon kalıba yapışmaması amaçlanmıştır.

Daha sonra kürlenmenin başlaması amacıyla karışıma sertleştirici eklenmiştir. Karışımda renk homojenliği sağlanana kadar (yaklaşık 10 dakika) karışım el ile çubuk yardımıyla karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra malzeme içerisine hava karışması ihtimaline karşı çok ince bir şekilde teflon kalıba döküm gerçekleştirilmiştir. Döküm yapılan teflon kalıp vakum odasına yerleştirilmiştir ve karışım 24 saat oda sıcaklığında vakumda kür sürecinde tutulmuştur. 24 saatin sonunda ise post-kür için 60 °C'lik etüvde 15 saat tutulmuştur.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında HNT ve kauçuk takviyeli kompozitlerin mekanik karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda sayısal çalışmalar, deneysel çalışmalar yürütülmüş ve taramalı elektron mikroskobu ile incelemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçları bu bölümde verilmiştir.

### 3.1 Deneysel Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında deneysel çalışma olarak çekme deneyi, üç noktadan eğme deneyi ve Charpy darbe deneyi yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları olarak takviye elemanlarının epoksi matris üzerindeki mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar bu bölümde verilmektedir.

### 3.1.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Deneyi yapılan epoksi matrisli kompozitlerin hıza bağlı mekanik karakterizasyonu amacıyla yapılan çekme deneylerinin sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Bu bölümde elastisite modülü (E), çekme mukavemeti ( $\sigma_{c}$ ) ve kopma uzaması ( $\epsilon_{k}$ ) değerlerinin, farklı birim şekil değiştirme hızlarında ve farklı partikül kombinasyonlarında çekme deneylerinden elde edilen sonuçları verilmiştir.

Sonuçlar konusunda bütün malzeme kombinayonlarının rijitliğinin değişen birim şekil değiştirme hızına bağlı olarak aynı davranışı sergilediği, artan birim şekil değiştirme hızı ile birlikte malzemelerin kaydedilen elastisite modülü değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum viskoelastik davranışa sahip epoksi matristen beklenen bir sonuçtur.

Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1, HNT takviyeli epoksi matrisli nanokompozit numunelerinin mekanik özelliklerinin hıza ve ağırlıkça HNT yüzdesine bağlı değişimini göstermektedir. Kompozitlerin rijitliğinin ve çekme mukavemetinin HNT takviyesi ile arttığı görülmektedir. Deney hızının arttığı durumda da benzer bir eğilim görülmektedir. Ayrıca kompozit yapısında artan ağırlıkça HNT oranına bağlı olarak kopma uzaması değerlerinde statik durum için artma diğer durumlar için azalma görülebilmektedir. Bu durum malzemenin düşük şekil değiştirme hızlarında sünekleşerek toklaştığını gösterirken, yüksek şekil değiştirme hızlarında ise malzemenin gevrekleşerek tokluğunu kaybettiğini göstermektedir. Viskoelastisite teorisi değerlendirildiğinde, bu durum malzemenin sönüm özelliklerinin yükleme hızına bağlı olarak da değişebileceğine işaret etmektedir.

,	. 6	e							
Takviye Oranı	0%	0,5%	1%						
Elastisite Modülü (E) [MPa]									
Statik	598,86	674,44	687,73						
5%	635,60	690,52	725,45						
10%	693,73	724,53	801,74						
	Cekme Mukavemeti ( $\sigma_c$ ) [MPa]								
Statik	60,22	77,57	78,57						
5%	68,13	87,00	84,50						
10%	74,16	68,48	80,05						
	Kopma Uz	zaması (ɛk)							
Statik	0,0959	0,1045	0,1182						
5%	0,1518	0,1205	0,1094						
10%	0,1173	0,0954	0,0974						

**Çizelge 3.1 :** HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi.





Şekil 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü, (b)Çekme mukavemeti, (c)Kopma uzaması

Kauçuk takviye edilmiş epoksi numuneler üzerinde yapılan çekme deneylerinin sonuçları Çizelge 3.2 ve Şekil 3.2'de sunulmuştur. Kauçuk takviyesinde ise HNT takviyesinin zıttı olarak takviye oranı arttıkça malzemenin rijitliğinde düşüş görülmektedir. Deney hızının rijitliğe olan etkisi ise diğer numune örneklerine benzer bir davranış göstererek artan hız ile birlikte rijitliğin arttığı görülmüştür. Kopmadaki uzama değerleri ise saf epoksi kontrol grubu ile karşılaştırıldığında kauçuk takviyesi ile birlikte artış göstermektedir. Ayrıca epoksi matrise ağırlıkça %5 kauçuk ve %10 kauçuk eklenmiş numunelerin sonuçları kendi içerisinde karşılaştırıldığında çekme mukavemetinde de genel anlamda bir azalma görülmektedir. Sonuç olarak epoksi matrisli kompozit kauçuk takviyesi ile daha zayıf ve daha sünek davranış göstermektedir.

Takviye Oranı	0%	5%	10%					
Elastisite Modülü (E) [MPa]								
Statik	598,86	413,10	370,06					
5%	635,60	499,60	450,17					
10%	693,73	513,11	467,93					
	Çekme Mukavem	neti (σ <sub>c</sub> ) [MPa]						
Statik	60,22	84,81	64,17					
5%	68,13	80,37	60,21					
10%	74,16	73,68	64,03					
	Kopma Uza	ması (ε <sub>k</sub> )						
Statik	0,0959	0,1722	0,1416					
5%	0,1518	0,1551	0,1195					
10%	0,1173	0,1314	0,1507					

**Çizelge 3.2 :** Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi.





Şekil 3.2 : Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü, (b)Çekme mukavemeti, (c)Kopma uzaması

Bu çalışmada ayrıca HNT ve kauçuk birlikte etkisi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Bu sayede iki farklı karakterde parçacık kullanımının kompozit malzeme üzerindeki sinerji etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Şekil 3.3'te ve Çizelge 3.3'te verilmiştir. HNT takviyesi ile birlikte malzemede rijitlik sağlanırken kauçuk takviyesi ile süneklik sağlanabilmektedir. Hem rijitlik hem de süneklik sağlayan takviyelerin birlikte kullanıldığı durumlarda sonuçların yorumlanması diğer durumlara göre biraz daha karmaşık olabilmektedir. İlk önce artan birim şekil değiştirme hızı ile birlikte malzeme rijitliğinin arttığı söylenebilmektedir. Çekme durumu için kauçuk ve HNT takviye edilmiş malzemelerin rijitliğinin saf epoksi kontrol grubuna kıyasla düştüğü görülmektedir. Ayrıca kopma uzaması değerlerinde de artış gözlemlendiği, malzemenin sünek bir davranış gösterdiği söylenebilmektedir. Çekme mukavemetinin deney hızı ve takviye malzemesi kombinasyonuna göre farklı davranışı olduğu görülmüştür.

Takviye Oranı	0%	0,5% HNT ve	0,5% HNT ve	1% HNT ve	1% HNT ve			
-		5% Kauçuk	10% Kauçuk	5% Kauçuk	10% Kauçuk			
		Elastisite Mo	dülü (E) [MPa]					
Statik	598,86	468,77	430,78	502,71	458,82			
5%	635,60	485,31	517,97	556,50	521,11			
10%	693,73	592,20	537,91	682,33	564,63			
		Çekme Mu	kavemeti (σ <sub>ç</sub> )					
Statik	60,22	65,66	65,80	79,93	79,11			
5%	68,13	65,92	69,83	76,82	65,84			
10%	74,16	64,96	67,46	71,19	62,20			
Kopma Uzaması ( $\varepsilon_k$ )								
Statik	0,0959	0,128	0,1242	0,1379	0,1567			
5%	0,1518	0,1113	0,1328	0,1351	0,1190			
10%	0,1173	0,1275	0,1326	0,1166	0,1028			

Çizelge 3.3 : HNT ve kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi.







(c)

# 3.1.2 Üç Noktadan Eğme Deneyi Sonuçları

Deneyi yapılan epoksi matrisli kompozitlerin hıza bağlı mekanik karakterizasyonu amacıyla yapılan üç noktadan eğme deneylerinin sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Bu bölümde elastisite modülü (E), eğilme mukavemeti ( $\sigma_e$ ) ve kopma uzaması ( $\epsilon_k$ ) değerlerinin, farklı birim şekil değiştirme hızlarında ve farklı partikül kombinasyonlarında üç noktadan eğme deneylerinden elde edilen sonuçları verilmiştir.

Şekil 3.4 ve Çizelge 3.4, HNT takviyeli epoksi matrisli nanokompozitlerin numunelerinin mekanik özelliklerinin değişimi hıza ve ağırlıkça HNT yüzdesine bağlı değişimini göstermektedir. Kompozitlerin rijitliğinin HNT takviysi ile arttığı görülmektedir. Deney hızının arttığı durumda da benzer bir eğilim görülmektedir. Fakat artan birim şekil değiştirme hızı ile kopma uzaması değerlerinin düştüğü söylenebilir. Kopma uzaması, en büyük birim şekil değiştirme hızı altında ve ağırlıkça %0,5 HNT'nin olduğu durumda minimuma ulaşmıştır. Ağırlıkça %1 HNT durumunda kopma uzaması %0,5 durumuna göre artmıştır. Bu durum, malzeme içindeki gerilme durumunun incelenmesiyle açıklanabilir. HNT takviyelerinin varlığı, epoksi matriste üc eksenli gerilme yığılmalarına neden olmakla birlikte, malzemenin yük tasıma kabiliyetine katkı vermektedir. Bu nedenle, %0,5 HNT takviyesi halinde, gerilme yığılmalarının oluşumu nedeniyle parçada daha gevrek bir davranış görülürken, artan HNT takviyeleri halinde, HNT'nin yük taşıma kabiliyetine verdiği katkı artarak gerilme yığılmaları nedeniyle oluşacak çatlak oluşumlarını geciktirdiği ve neticesinde hasarın da daha geç meydana geldiği öngörülebilir. Dolayısıyla malzeme performansı ve özellikleri açısından daha sünek bir davranış elde etmek için HNT'nin ağırlıkça yüzdesi ile ilgili çalışmalar yapılabilir.

Takviye Oranı	0%	0% 0,5%						
Elastisite Modülü (E) [MPa]								
Statik	2410,77	2648,57	2827,04					
5%	2627,69	2765,14	2998,76					
10%	2806,98	2922,12	3121,31					
Eği	lme Mukavem	eti (σult) [MPa]						
Statik	101,13	81,87	100,80					
5%	103,30	88,77	84,66					
10%	105,08	74,00	91,31					
	Kopma Uza	ıması (ε <sub>k</sub> )						
Statik	0,0487	0,03299	0,0342					
5%	0,0436	0,0356	0,0311					
10%	0,0393	0,0264	0,0337					

**Çizelge 3.4 :** HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyine bağlı mekanik özelliklerinin değişimi.







Bir sonraki kompozit malzeme grubu olarak, CTBN kauçuk (Albipox 1000®) partikülleri ile takviye edilmiş epoksiden yapılmış numuneler üzerinde yapılan üç

noktadan eğme deneylerinin sonuçları Çizelge 3.5 ve Şekil 3.5'te sunulmuştur. Kauçuk takviyesinde elde edilen mekanik özellikler HNT'de elde edilenlere kıyasla bir miktar farklıdır. En önemli fark artan ağırlıkça kauçuk oranı ile mukavemet ve rijitlikte düşüş görülmesidir. Kopmadaki uzama değerleri kauçuk takviyesi ile birlikte artmaktadır ve kauçuk takviyesi içeren epoksi kompozit numunelerin HNT takviyeli kompozitlere göre kopma uzaması değerleri daha yüksektir. Deney hızında artış ile birlikte rijitliğin arttığı da görülmektedir. Malzeme, içindeki daha fazla kauçuk partikülü ile daha zayıf hale gelse de malzemenin sünekliği önemli ölçüde artmaktadır.

Takviye Oranı	0%	5%	10%					
Elastisite Modülü (E) [MPa]								
Statik	2410,77	2383,80	2083,45					
5%	2627,69	2474,72	2350,29					
10%	2806,98	2587,18	2413,11					
Eğilme Mukavemeti (oult) [MPa]								
Statik	101,13	92,74	81,11					
5%	103,30	98,46	72,22					
10%	105,08	89,86	87,75					
	Kopma Uza	mas1 ( $\varepsilon_k$ )						
Statik	0,0487	0,0479	0,0384					
5%	0,0436	0,0514	0,0382					
10%	0.0393	0,0403	0.0448					

**Çizelge 3.5 :** Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik özelliklerinin değişimi.





Şekil 3.5 : Kauçuk takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik özelliklerinin değişimi, (a)Elastisite modülü, (b)Eğilme mukavemeti, (c)Kopma uzaması

Bu çalışmada ayrıca HNT ve kauçuk malzemelerin epoksi matrise birlikte takviye edilmesinin mekanik özelliklere olan etkisi üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Şekil 3.6'da ve Çizelge 3.6'da verilmiştir. Bu takviyelerin eklenmesi, malzeme davranışını daha karmaşık bir şekilde etkiler. Yapılan bu çalışmalar sonucunda artan şekil değiştirme hızı ile birlikte rijitlik ve mukavemette artış gözlemlenirken kopma uzaması değerlerinde düşüş görülmektedir. Ayrıca ağırlıkça %10 kauçuk ve %0,5 HNT katkılı epoksi kompozitte rijitlikte düşüş görülmüş, diğer kombinasyonlarda artan HNT ve azalan kauçuk oranı ile birlikte rijitleşme gözlemlenmiştir. Eğilme mukavemeti değerleri karşılaştırıldığında bütün kombinasyonların eğilme mukavemeti değerleri beklendiği üzere saf epoksinin altında kalmaktadır. Kopma uzaması değerlerinin HNT katkılı epoksi nanokompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir, burada da kauçuk katkısının etkisinin görüldüğü söylenebilir hatta bazı durumlarda saf epoksiden de daha yüksek kopma uzaması değerlerinin ölçüldüğü de görülmektedir.

Üç noktadan eğme deney sonuçlarının genel olarak takviyecinsi, takviye miktarı ve şekil değiştirme hızı parametreleri göz önüne alındığında çekme deneyinin sonuçlarına, beklendiği gibi paralellik gösterdiği söylenebilir. Ancak, Mertebe itibarıyla, çekme deneyi neticesinde elde edilen elastiklik modülü ve dayanım değerleri oldukça farklıdır. Bu belirgin farklılığın nedeni temelde, epoksi matrisin çekme ve basma yükleri altındaki mekanik davranışının farklılığından kaynaklandığı söylenebilir. Çekme deneyi, yalnızca tek eksenli bir çekme yükü oluşturarak tek yönlü pozitif bir gerilme altındaki davranışı incelerken, üç noktadan eğme deneyinde basit eğilme biçiminde yüklenen deney numunesinde aynı anda hem çekme hem basma görülmektedir. Bu da, hem basma altındaki hem de çekme altındaki davranışın karmaşık biçimde bir arada görülmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, her ne kadar iki deney sonucunda, teoride benzer değerlerin bulunması umulsa da, gerçek malzeme davranışı idealleştirilenden farklıdır. Dolayısıyla çekme ve üç noktadan eğme deneyleri sonuçlarının farklılık göstermesi sıkça rastlanan doğal bir neticedir.

				0,					
Takviye	0%	0,5% HNT	0,5% HNT ve	1% HNT ve	1% HNT ve				
Oranı		ve 5%	10% Kauçuk	5% Kauçuk	10% Kauçuk				
		Kauçuk							
		Elastisite M	odülü (E) [MPa]						
Statik	2410,77	2312,00	2293,91	2538,43	2442,67				
5%	2627,69	2552,67	2436,58	2675,49	2568,20				
10%	2806,98	2627,58	2508,11	2925,29	2713,09				
		Eğilme Mukav	emeti (oult) [MPa	l]					
Statik	101,13	87,29	86,67	86,75	84,05				
5%	103,30	88,70	89,79	93,00	87,64				
10%	105,08	83,57	98,36	90,49	84,64				
	Kopma Uzaması ( $\varepsilon_k$ )								
Statik	0,0959	0,0522	0,0476	0,0453	0,0428				
5%	0,1518	0,0431	0,0415	0,0485	0,0441				
10%	0,1173	0,0366	0,0493	0,0378	0,0407				

**Çizelge 3.6 :** Kauçuk ve HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik özelliklerinin değişimi.





Şekil 3.6 : Kauçuk ve HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin mekanik özelliklerinin değişimi, (a) Elastisite modülü, (b) Eğilme mukavemeti, (c) Kopma uzaması.

## 3.1.3 Charpy Darbe Deneyi

Epoksi ve epoksi matrisli kompozitlerin birim şekil değiştirme hızına bağlı mekanik karakterizasyonu yapıldıktan sonra, bu malzemelerin kırılma davranışları da incelenmiş ve sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Bu kapsamda Charpy darbe deneyleri her bir numune kombinasyonu için altı defa tekrarlanmış ve çıkan sonuçların ortalaması alınarak karşılaştırmalı bir sütun grafiği hazırlanmıştır. Hazırlanan grafik Şekil 3.7'de verilmektedir. Grafiklerden hem HNT takviyesinin hem de kauçuk takviyesinin malzemenin kırılma enerjisini arttırdığı, saf epoksi numunelerde ölçülen kırılma enerjisi değerinin en düşük değerde olduğu görülmektedir. Kırılma enerjisindeki en az artış ağırlıkça %0,5 HNT takviye edilmiş epoksi nanokompozitte görülürken, en büyük artış ise ağırlıkça %10 Kauçuk takviye edilmiş epokside görülmektedir. Sonuçlardan yola çıkılarak hem kauçuğun hem de HNT'nin kırılma enerjisini arttıran bir etkisi olduğunu söylemek mümkündür. Öte yandan takviye malzemesi olarak hem kauçuk hem de HNT parçacıklarının kullanılması, sadece HNT takviyeli ve sadece kauçuk takviyeli kompozitler arasında bir ara davranışa yol açar. Bu nedenle, malzemenin kırılma enerjisi üzerinde birbirinden çok farklı etkiye sahip olmayan bu iki parçacığın varlığının birlikte oluşturduğu etki, herhangi bir öngörülemeyen karmaşık sonuca neden olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.7 : Takviye kombinasyonlarına göre kırılma enerjisi değişimi.

## 3.2 Sayısal Analiz ile Modelleme Sonuçları

Belirli bir yük altında bir malzemenin deformasyon davranışını tanımlayan malzeme özelliği rijitlik olarak tanımlanır. Bir malzemenin rijitliği arttığında, malzemenin önceki hali ile aynı değerde birim şekil değiştirme değerini ölçmek için yeni numuneye uygulanması gereken kuvvet de artacaktır. Bu çalışmada ağırlıkça %10 kauçuk ve %0,5 HNT, %10 kauçuk ve %1 HNT, %5 kauçuk ve %0,5 HNT, %5 kauçuk ve %1 HNT takviyeli epoksi kompozitlerin davranışları hem Halpin-Tsai modeli hem de Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemleri ile modellenmiştir. Çekme deneyinde elde edilen sonuçlar için modelleme yapılırken kauçuk takviyesi için elde edilen değerlerde yüksek hata oranına rastlanmıştır. Bu nedenle sadece kompozitlerin eğilme altındaki davranışları modellenmiştir. Modelleme sonucunda tasarlanan malzemelerin elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.7 ve 3.8'de sunulmuştur.

Mori-Tanaka homojenizasyon yöntemi ile elde edilen malzemelerin elastisite modülü Çizelge 3.7'de gösterilmektedir. Çizelge 3.7'de görüldüğü gibi HNT katkısı epoksi kompozitin elastisite modülünü arttırma, kauçuk katkısı ise azaltma eğilimi göstermektedir. Mori-Tanaka homojenizasyon yöntemi sonucunda ağırlıkça %1 HNT, %0,5 HNT, %5 kauçuk ve %10 kauçuk, %10 kauçuk ve %0,5 HNT, %10 kauçuk ve %1 HNT, %5 kauçuk ve %0,5 HNT, %5 kauçuk ve %1 HNT takviyeli epoksi kompozitler için çeşitli hızlar için hesaplanan elastisite modülleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Epoksi matrise HNT ilavesi ile elastisite modülü artarken, epoksi matrise kauçuk ilavesi ile elastisite modülü sırasıyla azalmıştır. Kauçuk ve HNT takviyesinin birlikte uygulandığı durumda ise takviye oranlarına bağlı olarak hem artma hem de azalma görülmüştür.

Halpin-Tsai yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.8'de verilmiştir. Sonuçlardan, epoksi matrise HNT katkısının elastisite modülünde bir artışa yol açtığı ve kauçuk ilavesinin ise azaltıcı bir etkisi olduğu söylenebilir. Halpin-Tsai modeli ile ağırlıkça %1 HNT, %0,5 HNT, %5 kauçuk ve %10 kauçuk, %10 kauçuk ve %0,5 HNT, %10 kauçuk ve %1 HNT, %5 kauçuk ve %0,5 HNT, %5 kauçuk ve %1 HNT katkılı epoksi kompozitler için elastisite modüllerini sırasıyla Çizelge 3.8'de verilmiştir. Epoksi matrise HNT ilavesi ile elastisite modülü değerlerinde artış gözlenirken, epoksi matrise kauçuk ilavesi ile elastisite modülü değerlerinde düşme gözlemlenmiştir. Kauçuk ve HNT takviyesinin birlikte uygulandığı durumda ise takviye oranlarına bağlı olarak hem artış hem de azalma görülmüştür.

Sheng v.d. yaptıkları çalışmada Halpin-Tsai ve Mori Tanaka modellerini karşılaştırmıştır ve yaptıkları çalışmanın sonucunda her iki modelde elde edilen değerlerin benzer eğilimler gösterdiğini, Halpin Tsai modelinin daha rijit sonuçlar verdiğini ve Halpin-Tsai modeliyle kabul edilebilir verilerin elde edildiğini sunmuştur. Mori-Tanaka modelleri ile de büyük en-boy oranına sahip takviyeler için en iyi sonuçlar elde edilmiştir (Sheng ve diğerleri, 2004). Başka bir çalışmada ise Halpin-Tsai modelinin düşük ağırlıkça yüzde takviyelerine sahip kombinasyonlarda makul sonuçlar verdiği paylaşılmıştır (Tucker III ve Liang, 1999). Bu nedenden dolayı Halpin-Tsai modeli bu çalışmadaki yüksek ağırlıkça yüzde oranlarında tutarlı sonuçlar vermemiştir fakat bir ön görülebilirlik sağlamıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan sayısal modelleme sonuçları literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, epoksi matrise ağırlıkça HNT ilavesinin epoksi kompozitin elastisite modülünü arttırdığı ve epoksi matrise ağırlıkça kauçuk ilavesinin epoksi matrisin elastisite modülünü azalttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığında benzer bulgulara da rastlanmaktadır (Dadfar ve Ghadami, 2013; S. Srivastava ve Pandey, 2019).

	Epoksi	0,5%	1%	5%	10%	0,5% HNT	0,5% HNT	1% HNT	1% HNT
		HNT	HNT	Kauçuk	Kauçuk	ve 5% Kauçuk	ve 10% Kauçuk	ve 5% Kauçuk	ve 10% Kauçuk
Statik	2410,7707	2614,8	2819,8	2232,3	2069,6	2435,733	2272,467	2640,200	2476,267
5%	2627,6887	2833,8	3040,9	2426,2	2243	2631,467	2447,600	2837,667	2653,200
10%	2806,9840	3014,4	3222,9	2586,4	2386,1	2793,067	2592,133	3000,733	2799,200

Çizelge 3.7 : Mori-Tanaka homojenizasyon yöntemi ile elde edilen eğilme altındaki elastisite modülü.

Çizelge 3.8 : Halpin-Tsai modeli ile elde edilen eğilme altındaki elastisite modülü.

	Epoksi	0,5%	1%	5%	10%	0,5% HNT	0,5% HNT	1% HNT	1% HNT
		HNT	HNT	Kauçuk	Kauçuk	ve 5% Kauçuk	ve 10% Kauçuk	ve 5% Kauçuk	ve 10% Kauçuk
Statik	2410,7707	2743,22	3041,48	1784,88	1061,72	2099,96	1336,17	2373,9	1559,71
5%	2627,6887	2964,6	3269	1921,67	1101,4	2241,5	1379,09	2521,83	1606,42
10%	2806,9840	3146,85	3455,65	2033,68	1131,81	2356,98	1411,88	2642,03	1642,01
### 3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Sonuçları

Bu çalışma kapsamında taramalı elektron mikroskobu sonuçları bu bölümde verilmiştir. Her bir takviye kombinasyonu için ayrı ayrı başlıklar altında sonuçların gruplandırılması yapılmıştır.

## 3.3.1 Epoksi/HNT numunelerinin SEM görüntüleri

Farklı miktarda HNT takviyeli epoksi/HNT numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 3.8'de yer almaktadır. Şekiller karşılaştırıldığında, epoksi numunesinin yüzeyinin HNT katkılı epoksilerin yüzeylerinden daha homojen ve daha pürüzsüz olduğu açıkça görülmektedir. Düşük miktarda HNT yüklemesinde (%0,5 HNT), HNT epoksi matrisinde iyi bir dağılım sergilemiştir. Ayrıca, diğer HNT/epoksi numuneleri ile karşılaştırıldığında, %0,5 HNT takviyeli epoksi numunesinde bireysel HNT'lerin matris içerisinde varlığı daha net görülmektedir. HNT yüklemesi %1'e ulaştığında malzeme yüzeyinde meydana gelen agregatların boyutları artmıştır ve daha pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. Literatürde, bu sonuçlara benzer şekilde epoksi reçine içerisindeki HNT dolgusunun artan konsantrasyonuna bağlı olarak (ağırlıkça %2,5'ten %6,5'e) HNT'nin dağılımında önemli ölçüde bir farklılık meydana geldiği rapor edilmiştir (Hornak, Kadlec ve Polanský, 2020). Bu çalışmada, artan HNT takviyesiyle birlikte agrege olan HNT'lerin sayısındaki artış, yüksek HNT yüklemesinin viskoziteyi arttırmaya bağlı olarak epoksi içerisinde iyi bir dağılım sergileyememesine atfedilebilir. Farklı nanomalzemelerin epoksi reçinenin viskozitesini arttırmasına ilişkin sonuçlar Che ve diğ. tarafından yapılan çalışmada gösterilmiştir (Che ve diğerleri, 2015).

HNT'nin nano yapısı matris içerisinde daha iyi dağılması nedeniyle mekanik özellikleri kauçuk katkısına göre daha iyidir. Görüntülerden görüldüğü üzere kauçuk takviyeli numunelerin yüzeyinde partiküller büyük durmaktadır. Bu durum hem malzeme yapısı açısından hem de malzeme karakterizasyonu açısından istenmeyen bir durumdur. Daha pürüzsüz daha küçük dağılan şeyler yüzeyler ara yüz etkileşiminin daha iyi olduğunu göstermektedir.





**Şekil 3.8 :** Farklı miktarda HNT takviyeli epoksi/HNT numunelerinin SEM görüntüleri (a)%0 HNT, (b)%0,5 HNT, (c)%1 HNT.

## 3.3.2 Epoksi/Kauçuk numunelerinin SEM görüntüleri

Farklı miktarda kauçuk takviyeli epoksi/kauçuk numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 3.9'da yer almaktadır. Epoksi içerisine kauçuğun dahil edilmesiyle, malzeme yüzeyleri daha pürüzlü hale gelmiştir. %5 kauçuk takviyeli numunenin yüzeyinde yaklaşık 1 µm'ye dairesel kaçuk agregatlarının varlığı açıkça görülmektedir. Diğer yandan, epoksi içerisindeki kauçuk takviyesi miktarı arttırıldığında malzeme yüzeyinin oldukça heterojen bir yapıya sahip olmuştur, agregaların daha düzensiz bir dağılım sergilemiştir ve 1 µm'den daha büyük agregatlar oluşmuştur. Sonuçlara bakılarak, yüksek kauçuk yüklemesinde epoksi ile kauçuk arasındaki arayüz etkileşiminin azaldığı ve kauçuk parçacıklarının agregasyona oldukça elverişli hale geldiği söylenebilir.



**Şekil 3.9 :** Farklı miktarda kauçuk takviyeli epoksi/kauçuk numunelerinin SEM görüntüleri (a) %0 (epoksi), (b) %5 kauçuk.

### 3.3.3 Epoksi/HNT/Kaçuk numunelerinin SEM görüntüleri

Şekil 3.10'da kaçuk ve HNT takviyeli epoksi/kauçuk/hnt numunelerinin SEM görüntüleri yer almaktadır. Tüm kauçuk ve HNT takviyeli malzemelerin yüzeyi katkısız epoksiye kıyasla daha heterojen ve pürüzlü yapıdadır. %5 kauçuk ve %0,5 HNT katkılı epoksinin yüzey yapısı ayrı ayrı %5 kauçuk ve %0,5 HNT katkılı numunelere göre daha heterojen yapıdadır. Bu durum, her iki takviye malzemenin sinerjik etkisinin malzemelerin tek başına kullanımlarına göre epoksi içerisinde dağılımı zorlaştıran viskoziteyi daha fazla arttırmasıyla ilişkilendirilebilir. Benzer açıklamalar %5 kauçuk ve %1 HNT katkılı malzeme için de söz konusudur. %5 kauçuk ve %1 HNT katkılı epoksi malzemenin yüzeyi ayrı ayrı %5 kauçuk ve %1 HNT'nin katıldığı epoksi malzemeye göre daha heterojen yapıdadır. %5 kauçuk katkılı epoksi içerisindeki HNT miktarı ağırlıkça %0,5'den %1'e çıkarıldığında, malzeme yüzeyindeki HNT'lerin sayısında artış meydana geldiği TEM görüntülerinden net bir şekilde görülmektedir. Öte yandan, %5 kauçuk katkılı epoksi numunesindeki HNT içerisi ağırlıkça %0,5'ten %1 arttığında yüzeyde büyük boyutlu agregatlar meydana gelmiştir. Benzer şekilde, %10 kauçuk ve %0,5 HNT katkılı epoksi numunesinin yüzey yapısı, ayrı ayrı %10 kauçuk ve %0,5 HNT katkılı malzemeden daha heterojen yapıdadır.



**Şekil 3.10 :** Farklı miktarda kauçuk ve HNT takviyeli epoksi numunelerinin SEM görüntüleri (a)%0 kauçuk ve %0 HNT, (b)%5 kauçuk ve %0,5 HNT, (c)%5 kauçuk ve %1 HNT, (d)%10 kauçuk ve %0,5 HNT.

#### 4. SONUÇLAR VE KAPANIŞ

Bu çalışmada amaç çeşitli partikül takviyeli epoksi kompozitlerin imalatı ve birim şekil değiştirme hızına bağlı mekanik karakterizasyonunun ve bu kompozitlerin darbe performanslarını ele almaktır. Bu amaç kapsamında hem deneysel hem de sayısal çalışmalar yapılmış olup elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu bağlamda ilk olarak saf epoksi, HNT, Albipox 1000®, ve Albipox 1000® ve HNT takviyeli epoksi olmak üzere tüm malzeme kombinasyonlarını imalatı için tutarlı bir imalat prosedürü oluşturulmuştur. Saf epoksi numunler kontrol grubu olarak ele alınmış ve karşılaştırma için bir temel olarak takviye malzemelerinin epoksi matris üzerinde etkilerinin net bir şekilde görülmesi amacıyla kullanılmıştır. İmalat aşamasından sonra imal edilen numuneler, çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi, Charpy darbe deneyi ve taramalı elektron mikroskobu gibi çeşitli deneysel prosedürlerden geçirilmiştir.

Çekme deneylerinin sonuçlarından epoksi malzemenin çekme karşısında kırılgan olduğu ve çekme etkisi altında rijitliğinin zayıf olduğu görülmüştür. Malzemeye HNT katkısının malzemeye rijitlik kazandırdığı, kauçuk takviyesinin ise süneklik kazandırdığı gözlemlenmiştir. Artan deney hızı ile birlikte numunelerin rijitliğinin arttığı görülmüş.

Üç noktadan eğme deneyi sonuçlarına bakıldığında bütün numunelerin çekme durumundaki değerlerine göre daha rijit, kopma uzaması daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum da malzemenin davranışının uygulanan yükün yönüne ve tipine bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca üç noktadan eğme deneylerinin sonuçları, genel olarak bakıldığında malzemelerin daha yüksek birim şekil değiştirme hızları altında daha rijit olma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Takviye malzemelerinin epoksi matris üzerindeki etkisi incelendiğinde ise çekme deneyindeki sonuçlara benzer olarak HNT katkısı ile rijitlik artarken, kauçuk katkısı ile de yapıya sönüm kazandırılır.

Deneysel prosedürlerin yanı sıra, Mori-Tanaka homojenizasyon metodu ve Halpin-Tsai modeli kullanılarak sayısal modellemeler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, deneysel sonuçlara dayalı olarak takviye malzemelerin etkin mekanik özelliklerini belirlemek için ilk Mori-Tanaka ve Halpin-Tsai modelleri geliştirilmiştir, geliştirilen modellerde deneysel olarak elde edilen saf epoksi değerleri üzerinden yola çıkılmıştır. Daha sonra belirlenen bu mekanik özellikler kullanılarak kompozitlerin etkin mekanik özellikleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Genel olarak elde edilen bu sonuçlar literatür ve deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içerisindedir.

Sonuç olarak, farklı özelliklere sahip takviye elemanlarının kullanılması epoksi matris üzerinde istenen özellikleri dengelemek için oldukça faydalı olabileceğinden dolayı, farklı mekanik özelliklere sahip çoklu takviye türlerinin kullanılmasının, rijitlik, süneklik ve tokluk göz önünde bulundurularak kompozit malzemelerin tasarlanması/uyarlanması için faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Gelecekte, bu ve benzer karakterde takviyelerin farklı oranlarda birlikte kullanıldığı kompozitlerin imal edilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, kompozit malzemelerin tasarımı ve uygulama alanlarının genişletilmesi açısından bir gereklilik haline gelecektir. Bu nedenle, gelecek çalışmalarda bu konunun ele alınması önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abdullah, S. I. ve Ansari, M. N. M. (2015). Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites. *HBRC Journal*, 11(2), 151–156. doi:10.1016/j.hbrcj.2014.06.001
- Acarer, S., Pir, İ., Tüfekci, M., Türkoğlu Demirkol, G. ve Tüfekci, N. (2021). Manufacturing and characterisation of polymeric membranes for water treatment and numerical investigation of mechanics of nanocomposite membranes. *Polymers*, 13(10). doi:10.3390/polym13101661
- Agrawal, A. ve Satapathy, A. (2014). Experimental Investigation of Micro-sized Aluminium Oxide Reinforced Epoxy Composites for Microelectronic Applications. *Procedia Materials Science*, *5*, 517–526. doi:https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.295
- Alpatova, A., Kim, E.-S., Sun, X., Hwang, G., Liu, Y. ve Gamal El-Din, M. (2013). Fabrication of porous polymeric nanocomposite membranes with enhanced antifouling properties: Effect of casting composition. *Journal of Membrane Science*, 444, 449–460. doi:https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.05.034
- Arash, B., Wang, Q. ve Duan, W. H. (2011). Detection of gas atoms via vibration of graphenes. *Physics Letters A*, 375(24), 2411–2415. doi:10.1016/j.physleta.2011.05.009
- Arora, G. ve Pathak, H. (2019). Modeling of transversely isotropic properties of CNT-polymer composites using meso-scale FEM approach. *Composites Part B: Engineering*, 166(December 2018), 588–597. doi:10.1016/j.compositesb.2019.02.061
- Astm-D6110-10. (2010). Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. Astm. doi:10.1520/D6110-18.1
- ASTM. (2002). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Annual Book of ASTM Standards. doi:10.1520/D0790-17.2
- ASTM. (2006). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. doi:10.1520/D0638-14.1
- Balguri, P. K., Samuel, D. G. H. ve Thumu, U. (2021). A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 346– 355. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.742
- Beardmore, P. (1986). Composite structures for automobiles. *Composite Structures*, 5(3), 163–176. doi:https://doi.org/10.1016/0263-8223(86)90001-2
- Bello, S. A., Agunsoye, J. O., Hassan, S. B., Kana, M. G. Z. ve Raheem, I. A. (2015). Epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties: A review. *Tribology in Industry*, 37(4), 500–524.
- Carbajal, N. ve Mujika, F. (2009). Determination of compressive strength of unidirectional composites by three-point bending tests. *Polymer Testing*, 28(2), 150–156. doi:10.1016/j.polymertesting.2008.11.003
- Cha, J., Jin, S., Shim, J. H., Park, C. S., Ryu, H. J. ve Hong, S. H. (2016). Functionalization of carbon nanotubes for fabrication of CNT/epoxy

nanocomposites. *Materials & Design*, 95, 1–8. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.077

- Che, B. D., Nguyen, B. Q., Nguyen, L. T. T., Nguyen, H. T., Nguyen, V. Q., Van Le, T. ve Nguyen, N. H. (2015). The impact of different multi-walled carbon nanotubes on the X-band microwave absorption of their epoxy nanocomposites. *Chemistry Central Journal*, 9(1), 1–13. doi:10.1186/s13065-015-0087-2
- Conradi, M., Zorko, M., Kocijan, A. ve Verpoest, I. (2013). Mechanical properties of epoxy composites reinforced with a low volume fraction of nanosilica fillers. *Materials Chemistry and Physics*, 137(3), 910–915. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.11.001
- Cox, H. L. (1952). The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British Journal of Applied Physics*, 3(3), 72–79. doi:10.1088/0508-3443/3/3/302
- Crandall, S. H. (1970). The role of damping in vibration theory. *Journal of Sound* and Vibration, 11(1), 3-IN1. doi:https://doi.org/10.1016/S0022-460X(70)80105-5
- Dadfar, M. R. ve Ghadami, F. (2013). Effect of rubber modification on fracture toughness properties of glass reinforced hot cured epoxy composites. *Materials* & Design, 47, 16–20. doi:10.1016/j.matdes.2012.12.035
- Das Lala, S., Sadikbasha, S. ve Deoghare, A. B. (2020). Prediction of elastic modulus of polymer composites using Hashin–Shtrikman bound, mean field homogenization and finite element technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(8), 1653–1659. doi:10.1177/0954406219895791
- Du, M., Guo, B. ve Jia, D. (2006). Thermal stability and flame retardant effects of halloysite nanotubes on poly(propylene). *European Polymer Journal*, 42(6), 1362–1369. doi:10.1016/J.EURPOLYMJ.2005.12.006
- Eda, G. ve Chhowalla, M. (2009). Graphene-based Composite Thin Films for Electronics. *Nano Letters*, 9(2), 814–818. doi:10.1021/nl8035367
- Egerton, R. F. (2005). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/b136495
- El-Fattah, M. A., El Saeed, A. M. ve El-Ghazawy, R. A. (2019). Chemical interaction of different sized fumed silica with epoxy via ultrasonication for improved coating. *Progress in Organic Coatings*, 129, 1–9. doi:https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.023
- Feng, Y., Fang, Z. P. ve Gu, A. (2004). Toughening of cyanate ester resin by carboxyl terminated nitrile rubber. *Polymers for Advanced Technologies*, 15(10), 628–631. doi:10.1002/pat.519
- Ghorbanpour Arani, A., Baba Akbar Zarei, H. ve Haghparast, E. (2016). Application of Halpin-Tsai Method in Modelling and Size-dependent Vibration Analysis of CNTs/fiber/polymer Composite Microplates. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 47(1), 45–52. doi:10.22059/jcamech.2016.59254
- Giannakopoulos, G., Masania, K. ve Taylor, A. C. (2011). Toughening of epoxy using core-shell particles. *Journal of Materials Science*, *46*(2), 327–338. doi:10.1007/s10853-010-4816-6

- Gong, L.-X., Zhao, L., Tang, L.-C., Liu, H.-Y. ve Mai, Y.-W. (2015). Balanced electrical, thermal and mechanical properties of epoxy composites filled with chemically reduced graphene oxide and rubber nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 121, 104–114. doi:https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.10.023
- Gönüldaş, H. (2017). Nanoparçacık ile Fonksiyonelleştirilmiş PES/Grafen Oksitli Kompozit Membran Sentezi ve Antibakteriyel Özelliklerinin İncelenmesi. Mersin Üniversitesi.
- Hashin, Z. ve Shtrikman, S. (1962). On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 10(4), 335–342. doi:https://doi.org/10.1016/0022-5096(62)90004-2
- Hashin, Z. ve Shtrikman, S. (1963). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *11*(2), 127–140. doi:https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7
- Hassanzadeh-Aghdam, M. K. ve Jamali, J. (2019). A new form of a Halpin-Tsai micromechanical model for characterizing the mechanical properties of carbon nanotube-reinforced polymer nanocomposites. *Bulletin of Materials Science*, 42(3), 117. doi:10.1007/s12034-019-1784-6
- Hbaieb, K., Wang, Q. X., Chia, Y. H. J. ve Cotterell, B. (2007). Modelling stiffness of polymer/clay nanocomposites. *Polymer*, 48(3), 901–909. doi:10.1016/j.polymer.2006.11.062
- Hornak, J., Kadlec, P. ve Polanský, R. (2020). Halloysite nanotubes as an additive to ensure enhanced characteristics of cold-curing epoxy resins under fire conditions. *Polymers*, *12*(9). doi:10.3390/POLYM12091881
- Hsieh, T. H., Kinloch, A. J., Masania, K., Sohn Lee, J., Taylor, A. C. ve Sprenger, S. (2010). The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 45(5), 1193–1210. doi:10.1007/s10853-009-4064-9
- Hu, H., Onyebueke, L. ve Abatan, A. (2010). Characterizing and Modeling Mechanical Properties of Nanocomposites-Review and Evaluation. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 09(04), 275–319. doi:10.4236/jmmce.2010.94022
- Huang, C. Y. ve Tsai, J. L. (2015). Characterizing vibration damping response of composite laminates containing silica nanoparticles and rubber particles. *Journal of Composite Materials*, 49(5), 545–557. doi:10.1177/0021998314521257
- Huang, Y. ve Kinloch, A. J. (1992). Modelling of the toughening mechanisms in rubber-modified epoxy polymers - Part I Finite element analysis studies. *Journal of Materials Science*, 27(10), 2753–2762. doi:10.1007/BF00540702
- Hui, C. Y. ve Shia, D. (1998). Simple formulae for the effective moduli of unidirectional aligned composites. *Polymer Engineering & Science*, 38(5), 774– 782. doi:10.1002/pen.10243
- Inkson, B. J. (2016). Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. G. Hübschen, I. Altpeter, R. Tschuncky ve H.-G. Herrmann (Ed.), *Materials Characterization Using*

*Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* içinde (ss. 17–43). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-100040-3.00002-X

- Irez, A. B., Bayraktar, E. ve Miskioglu, I. (2017). Design and Mechanical-Physical Properties of Epoxy-Rubber Based Composites Reinforced with Nanoparticles. *Procedia Engineering*, 184, 486–496. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.119
- JOHNSON, C. ve KIENHOLZ, D. (1981). Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers. 22nd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference içinde . Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi:10.2514/6.1981-486
- Jordan, J., Jacob, K. I., Tannenbaum, R., Sharaf, M. A. ve Jasiuk, I. (2005). Experimental trends in polymer nanocomposites - A review. *Materials Science* and Engineering A, 393(1–2), 1–11. doi:10.1016/j.msea.2004.09.044
- Joy, A., Varughese, S., Shanmugam, S. ve Haridoss, P. (2019). Multiwalled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Nanocomposites for Vibration Damping. *ACS Applied Nano Materials*, 2(2), 736–743. doi:10.1021/acsanm.8b01865
- Kausar, A. (2018). Review on Polymer/Halloysite Nanotube Nanocomposite. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, *57*(6), 548–564. doi:10.1080/03602559.2017.1329436
- Kaw, A. K. (2005). Mechanics of Composite Materials. National SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings). CRC Press. doi:10.1201/9781420058291
- Kırış, A. (2007). Hasarlı Malzemelerin Mikro Elastik Teorilerle Modellenmesi Ve Eshelby Tansörleri. İstanbul Technical University.
- Kumar, K., Ghosh, P. K. ve Kumar, A. (2016). Improving mechanical and thermal properties of TiO2-epoxy nanocomposite. *Composites Part B: Engineering*, *97*, 353–360. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.080
- Lewis, S. J. (1994). The use of carbon fibre composites on military aircraft. *Composites Manufacturing*, 5(2), 95–103. doi:10.1016/0956-7143(94)90060-4
- 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). doi:10.1088/0957-4484/18/45/455703
- Luo, J.-J. ve Daniel, I. M. (2003). Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(11), 1607–1616. doi:https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00060-5
- Mansour, G., Tsongas, K. ve Tzetzis, D. (2015). Internal Friction of Epoxy Resin Composites Reinforced With Carboxyl-Terminated Butadieneacrylonitrile (CTBN) Rubber. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21, 575.
- Mansour, G., Tsongas, K. ve Tzetzis, D. (2016). Investigation of the dynamic mechanical properties of epoxy resins modified with elastomers. *Composites Part B: Engineering*, 94, 152–159. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.024
- McFarland, A. W. ve Colton, J. S. (2005). Role of material microstructure in plate stiffness with relevance to microcantilever sensors. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *15*(5), 1060–1067. doi:10.1088/0960-1317/15/5/024
- Monoranu, M., Ghadbeigi, H., Patrick, J., Fairclough, A. ve Kerrigan, K. (2021).

Chip formation mechanism during orthogonal cutting of rubber microparticles and silica nanoparticles modified epoxy polymers. *Procedia CIRP*, *103*, 176–181. doi:10.1016/j.procir.2021.10.028

- Mori, T. ve Tanaka, K. (1973). Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, *21*(5), 571–574. doi:10.1016/0001-6160(73)90064-3
- Ogierman, W. ve Kokot, G. (2013). Mean field homogenization in multi-scale modelling of composite materials. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, *61*(2), 343–348.
- Onaran, K. (2000). Malzeme Bilimi (8. bs.). Istanbul: Bilim Teknik Yayınevi.
- Peng, X., Hu, N., Zheng, H. ve Fukunaga, H. (2009). Evaluation of mechanical properties of particulate composites with a combined self-consistent and Mori-Tanaka approach. *Mechanics of Materials*, 41(12), 1288–1297. doi:10.1016/j.mechmat.2009.07.006
- Peutzfeldt, A. (1997). Resin composites in dentistry: the monomer systems. *European Journal of Oral Sciences*, 105(2), 97–116. doi:https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1997.tb00188.x
- Ramamoorthi, R. ve Sampath, P. S. (2015). Experimental investigations of influence of halloysite nanotube on mechanical and chemical resistance properties of glass fiber reinforced epoxy nano composites. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 74(12), 685–689.
- Ravichandran, G., Rathnakar, G., Santhosh, N., Chennakeshava, R. ve Hashmi, M. A. (2019). Enhancement of mechanical properties of epoxy/halloysite nanotube (HNT) nanocomposites. *SN Applied Sciences*, 1(4), 1–8. doi:10.1007/s42452-019-0323-9
- Rooj, S., Das, A., Thakur, V., Mahaling, R. N., Bhowmick, A. K. ve Heinrich, G. (2010). Preparation and properties of natural nanocomposites based on natural rubber and naturally occurring halloysite nanotubes. *Materials & Design*, 31(4), 2151–2156. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.009
- Salvetat, J.-P., Briggs, G. A. D., Bonard, J.-M., Bacsa, R. R., Kulik, A. J., Stöckli, T., ... Forró, L. (1999). Elastic and Shear Moduli of Single-Walled Carbon Nanotube Ropes. *Phys. Rev. Lett.*, 82(5), 944–947. doi:10.1103/PhysRevLett.82.944
- Sapuan, S. M., Leenie, A., Harimi, M. ve Beng, Y. K. (2006). Mechanical properties of woven banana fibre reinforced epoxy composites. *Materials & Design*, 27(8), 689–693. doi:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.12.016
- Schaefer, R. J. (2002). Mechanical Properties of Rubber. C. M. Harris ve A. G. Piersol (Ed.), *Harris' Shock and Vibration HandbookHarris' Shock and Vibration Handbook* içinde (5. bs.).
- Senthamaraikannan, C., Sarathkumar, S. K. ve Ramesh, R. (2014). Experimental Investigation on Modal Response of Woven Fabric Carbon Composite Plate Reinforced with Particles of Micro Rubber Blended Epoxy Matrix under Free Vibration Condition. *Modern Achievements and Developments in Manufacturing and Industry* içinde, Advanced Materials Research (C. 984, ss. 273–279). Trans Tech Publications Ltd.

doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.984-985.273

- SEPETÇİOĞLU, H. (2021). Characterization of Mechanical of CTBN Liquid Rubber-Modified Epoxy Cured by Anhydride- and Amine-Based Agent. *European Mechanical Science*, 5(3), 121–129. doi:10.26701/ems.869293
- Sfondrini, M. F., Massironi, S., Pieraccini, G., Scribante, A., Vallittu, P. K., Lassila, L. V. ve Gandini, P. (2014). Flexural strengths of conventional and nanofilled fiber-reinforced composites: a three-point bending test. *Dental Traumatology*, 30(1), 32–35. doi:10.1111/edt.12055
- Sheng, N., Boyce, M. C., Parks, D. M., Rutledge, G. C., Abes, J. I. ve Cohen, R. E. (2004). Multiscale micromechanical modeling of polymer/clay nanocomposites and the effective clay particle. *Polymer*, 45(2), 487–506. doi:https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.10.100
- Shia, D., Hui, C. Y., Burnside, S. D. ve Giannelis, E. P. (1998). An interface model for the prediction of Young's modulus of layered silicate-elastomer nanocomposites. *Polymer Composites*, *19*(5), 608–617. doi:10.1002/pc.10134
- Shirazi, M., Talma, A. G. ve Noordermeer, J. W. M. (2013). Viscoelastic properties of short aramid fibers-reinforced rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, *128*(4), 2255–2261. doi:https://doi.org/10.1002/app.38093
- Sideridis, E. ve Papadopoulos, G. A. (2004). Short-beam and three-point-bending tests for the study of shear and flexural properties in unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(1), 63–74. doi:10.1002/app.20382
- Srivastava, Deepak, , Chenyu, W. ve Kyeongjae, C. (2003). Nanomechanics of carbon nanotubes and composites . *Applied Mechanics Reviews*, 56(2), 215– 230. doi:10.1115/1.1538625
- Srivastava, S. ve Pandey, A. (2019). Mechanical behavior and thermal stability of ultrasonically synthesized halloysite-epoxy composite. *Composites Communications*, *11*, 39–44. doi:10.1016/j.coco.2018.11.003
- Srivastava, V. K. (2012). Modeling and mechanical performance of carbon nanotube/epoxy resin composites. *Materials and Design*, *39*, 432–436. doi:10.1016/j.matdes.2012.02.039
- Sun, L., Warren, G. L., O'Reilly, J. Y., Everett, W. N., Lee, S. M., Davis, D., ... Sue, H.-J. (2008). Mechanical properties of surface-functionalized SWCNT/epoxy composites. *Carbon*, 46(2), 320–328. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.11.051
- Tandon, G. P. ve Weng, G. J. (1984a). The effect of aspect ratio of inclusions on the elastic properties of unidirectionally aligned composites. *Polymer Composites*, 5(4), 327–333. doi:10.1002/pc.750050413
- Tandon, G. P. ve Weng, G. J. (1984b). The effect of aspect ratio of inclusions on the elastic properties of unidirectionally aligned composites. *Polymer Composites*, 5(4), 327–333. doi:10.1002/pc.750050413
- Tang, L.-C., Wan, Y.-J., Yan, D., Pei, Y.-B., Zhao, L., Li, Y.-B., ... Lai, G.-Q. (2013). The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites. *Carbon*, 60, 16–27. doi:https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.03.050

- Tang, L. C., Wang, X., Wan, Y. J., Wu, L. Bin, Jiang, J. X. ve Lai, G. Q. (2013). Mechanical properties and fracture behaviors of epoxy composites with multiscale rubber particles. *Materials Chemistry and Physics*, 141(1), 333–342. doi:10.1016/j.matchemphys.2013.05.018
- Tanıdır, T. (y.y.). Karbon ve Halloysit Nanotüp Katkılı Polikaprolakton Nanofiberlerin Morfolojik ve Nanomekanik Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi.
- Taya, M ve Mura, T. (1981). On Stiffness and Strength of an Aligned Short-Fiber Reinforced Composite Containing Fiber-End Cracks Under Uniaxial Applied Stress. *Journal of Applied Mechanics*, 48(2), 361–367. doi:10.1115/1.3157623
- Taya, Minoru ve Chou, T.-W. (1981). On two kinds of ellipsoidal inhomogeneities in an infinite elastic body: An application to a hybrid composite. *International Journal of Solids and Structures*, 17(6), 553–563. doi:https://doi.org/10.1016/0020-7683(81)90018-4
- Tong, Q. ve Li, S. (2016). Multiscale coupling of molecular dynamics and peridynamics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 95, 169–187. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.05.032
- Treacy, M. M. J., Ebbesen, T. W. ve Gibson, J. M. (1996). Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, *381*(6584), 678–680. doi:10.1038/381678a0
- Treviso, A., Van Genechten, B., Mundo, D. ve Tournour, M. (2015). Damping in composite materials: Properties and models. *Composites Part B: Engineering*, 78, 144–152. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.081
- Trzepieciński, T., Ryzińska, G., Biglar, M. ve Gromada, M. (2017). Modelling of multilayer actuator layers by homogenisation technique using Digimat software. *Ceramics International*, 43(3), 3259–3266. doi:10.1016/j.ceramint.2016.11.157
- Tucker III, C. L. ve Liang, E. (1999). Stiffness predictions for unidirectional shortfiber composites: Review and evaluation. *Composites Science and Technology*, 59(5), 655–671. doi:https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00120-1
- Tüfekci, M., Durak, S. G., Pir, İ., Acar, T. O., Demirkol, G. T. ve Tüfekci, N. (2020). Manufacturing, characterisation and mechanical analysis of polyacrylonitrile membranes. *Polymers*, 12(10), 1–21. doi:10.3390/polym12102378
- Tüfekci, M., Genel, Ö. E., Tatar, A. ve Tüfekci, E. (2020). Dynamic Analysis of Composite Wind Turbine Blades as Beams: An Analytical and Numerical Study. *Vibration*, 4(1), 1–15. doi:10.3390/vibration4010001
- Wang, K., Abdala, A. A., Hilal, N. ve Khraisheh, M. K. (2017). Mechanical Characterization of Membranes. *Membrane Characterization* içinde (ss. 259– 306). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-63776-5.00013-9
- Weng, G. J. (1984). Some elastic properties of reinforced solids, with special reference to isotropic ones containing spherical inclusions. *International Journal of Engineering Science*, 22(7), 845–856. doi:10.1016/0020-7225(84)90033-8
- Xian, G., Walter, R. ve Haupert, F. (2006). A synergistic effect of nano-Tio2 and graphite on the tribological performance of epoxy matrix composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *102*(3), 2391–2400.

doi:https://doi.org/10.1002/app.24496

- Xie, X.-L., Mai, Y.-W. ve Zhou, X.-P. (2005). Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(4), 89–112. doi:https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.002
- Xu, S. A., Wang, G. T. ve Mai, Y. W. (2013). Effect of hybridization of liquid rubber and nanosilica particles on the morphology, mechanical properties, and fracture toughness of epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 48(9), 3546– 3556. doi:10.1007/s10853-013-7149-4
- Ye, Y., Chen, H., Wu, J. ve Ye, L. (2007). High impact strength epoxy nanocomposites with natural nanotubes. *Polymer*, 48(21), 6426–6433. doi:10.1016/j.polymer.2007.08.035
- Yeh, M.-K., Tai, N.-H. ve Liu, J.-H. (2006). Mechanical behavior of phenolic-based composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 44(1), 1–9. doi:10.1016/j.carbon.2005.07.005
- Yu, L., Wang, H., Zhang, Y., Zhang, B. ve Liu, J. (2016). Recent advances in halloysite nanotube derived composites for water treatment. *Environmental Science: Nano*, 3(1), 28–44. doi:10.1039/C5EN00149H
- Zare, Y. (2016). Development of Halpin-Tsai model for polymer nanocomposites assuming interphase properties and nanofiller size. *Polymer Testing*, *51*, 69–73. doi:10.1016/j.polymertesting.2016.02.010
- Zhang, J., Deng, S., Wang, Y. ve Ye, L. (2016). Role of rigid nanoparticles and CTBN rubber in the toughening of epoxies with different cross-linking densities. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 80, 82–94. doi:10.1016/j.compositesa.2015.10.017
- Zhang, X.-X., Lu, C.-H. ve Liang, M. (2007). Preparation of rubber composites from ground tire rubber reinforced with waste-tire fiber through mechanical milling. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(6), 4087–4094. doi:https://doi.org/10.1002/app.25510
- Zhang, Y.-F., Bai, S.-L., Li, X.-K. ve Zhang, Z. (2009). Viscoelastic properties of nanosilica-filled epoxy composites investigated by dynamic nanoindentation. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 47(10), 1030–1038. doi:https://doi.org/10.1002/polb.21709

ÖZGEÇMİŞ			
Ad-Soyad	: İnci Pir	_	

## ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- Lisans : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü

# YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

• Pir, İ., Tüfekci, E., 2022. Numerical Modelling of HNT and Rubber Reinforced Epoxy CompositesErasmus. 42nd International Conference on "Engineering & Technology, Computer, Basic & Applied Sciences 2022", March 26-27, 2022 London, United Kingdom.

# DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Acarer, S., Pir, İ., Tüfekci, M., Türkoğlu Demirkol, G. ve Tüfekci, N. (2021). Manufacturing and characterisation of polymeric membranes for water treatment and numerical investigation of mechanics of nanocomposite membranes. *Polymers*, 13(10). doi:10.3390/polym13101661
- Tüfekci, M., Durak, S. G., Pir, İ., Acar, T. O., Demirkol, G. T. ve Tüfekci, N. (2020). Manufacturing, characterisation and mechanical analysis of polyacrylonitrile membranes. *Polymers*, *12*(10), 1–21. doi:10.3390/polym12102378
- Koçak, O., Özkan, Y., Pir, İ., Tüfekci, M., (2021). Köpük Çekirdek Malzemesinin Boşluk Oranının Kompozit Rüzgar Türbin Kanadının Yapısal Davranışına Etkisinin İncelenmesi, 22. Ulusal Mekanik Kongresi, 6 Eylül 2021, Adana, Türkiye.
- Özkan, Y., Koçak, O., Pir, İ., Tüfekci, M., (2021). 23 Metre Uzunluğunda Bir Kompozit Rüzgar Türbin Kanadının İç Yapısının Topoloji Optimizasyonuyla Tasarlanması, 22. Ulusal Mekanik Kongresi, 6 Eylül 2021, Adana, Türkiye.
- Tüfekci, M., Pir, İ., Tüfekci, E. (2021) Nondimensional Analysis Of Two-Dimensional Elastic Porous Materials With Regularly Distributed Circular Holes,

25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 23 Ağustos 2021, Milano, İtaya

• Acarer, S., Pir, İ., Tüfekci, M., Türkoğlu Demirkol, G. ve Tüfekci, N. (2020). Polimerik Membranların Üretimi ve Nanokompozit Membranların Mori-Tanaka Yöntemi ile Mekanik Özelliklerinin Belirlenerek Modellenmesi, *5th International Symposium on the Environment and Morals*, 24 Eylül 2020.