

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NANOPARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ MALZEMELERİN TEORİK VE
DENEYSEL İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can DİKİCİOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NANOPARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ MALZEMELERİN TEORİK VE
DENEYSEL İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Can DİKİCİOĞLU
(503211304)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ

TEMMUZ 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF
NANOPARTICLE REINFORCED EPOXY MATERIALS**



M.Sc. THESIS

**Can Dikicioğlu
(503211304)**

Department of Mechanical Engineering

Materials and Manufacture Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ

JULY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503211304 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Can DİKİCİOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “NANOPARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ MALZEMELERİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELEMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mihriğül EKŞİ ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 9 Temmuz 2024





Aileme,



ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı kapsamında Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan çalışmada, CNF ve HNT takviyelerinin ağırlıkça farklı oranlarda bir arada ve ayrı ilave edildiği epoksi matris malzemeli kompozit malzemelerin imalatı yapılmıştır ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Çalışma, MYL-2022-44264 kodlu proje ile İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Çalışma süreci boyunca, sabırla çalışmamı inceleyen, bilgi ve tecrübeleriyle her aşamada yol gösteren, başta saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ekrem TÜFEKCİ'ye, çalışmamı yakından takip eden ve yardımcı olan arkadaşım İnci PİR'e, fikirleriyle çalışmama değer katan arkadaşım Dr. Mertol TÜFEKCİ'ye ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yardımcı olan ve beni her konuda destekleyen aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2024

Can Dikicioğlu
İmalat Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Epoksi	3
1.2 Halloysit Nanotüp (HNT)	4
1.3 Selüloz Nanofibril (CNF)	6
1.4 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	7
1.4.1 Deneysel yöntemler	8
1.4.1.1 Çekme deneyi	9
1.4.1.2 Üç noktadan eğme deneyi	10
1.4.1.3 Çentik darbe deneyi	11
1.4.2 Sayısal Modelleme	11
1.4.2.1 Mukavemet yaklaşımı	12
1.4.2.2 Cox modeli	13
1.4.2.3 Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi	14
1.4.2.4 Halpin-Tsai modeli	15
1.4.2.5 Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)	15
1.5 Taramalı Elektron Mikroskobu	17
1.6 Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemi	17
2. MALZEME VE YÖNTEM	19
2.1 Deneysel Çalışmalar	19
2.1.1 Çekme deneyi	19
2.1.2 Üç noktadan eğme deneyi	21
2.1.3 Çentik darbe deneyi	22
2.2 Sayısal Analiz ile Modelleme	23
2.2.1 Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi	23
2.2.2 Sonlu elemanlar yöntemi	24
2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu	25
2.4 Nanokompozitlerin İmalatı	25
2.4.1 Hassas tartı	26
2.4.2 Elektromanyetik karıştırıcı	27
2.4.3 Ultrasonik karıştırıcı	28
2.4.4 Kalıp tasarımı	29
2.4.5 Vakumlu etüv	29

2.4.6 Etüv	30
2.4.7 Nanokompozitlerin imalat aşamaları	31
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	35
3.1 Deneysel Sonuçlar	35
3.1.1 Çekme deneyi sonuçları	35
3.1.2 Üç noktadan eğme deneyi sonuçları.....	40
3.1.3 Çentik darbe deneyi sonuçları	46
3.2 Sayısal Analiz ile Modelleme Sonuçları	46
3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri.....	51
3.3.1 Epoksi / HNT numunelerinin SEM görüntüleri	52
3.3.2 Epoksi / CNF numunelerinin SEM görüntüleri.....	53
3.3.3 Epoksi / HNT / CNF ağırlıkça %0,5 numunelerinin SEM görüntüleri	55
3.3.4 Epoksi / HNT / CNF ağırlıkça %1 / %0,5 numunelerinin SEM görüntüleri	56
3.3.5 SEM görüntüleri genel sonuçlar.....	57
4. SONUÇLAR VE KAPANIŞ.....	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	69

KISALTMALAR

HNT	: Hallotsit Nanotüp
CNF	: Selüloz Nanofibril
SEM	: Taramaları Elektron Mikroskopu
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi





SEMBOLLER

σ	: Gerilme
E	: Elastisite Modülü
ε	: Birim Şekil Değişirme
K	: Dayanım Sabiti
n	: Pekleşme Üstelini
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik Gerilmesi
F	: Kuvvet
A_0	: Başlangıçtaki Kesit Alanı
$\varepsilon_{müh}$	: Mühendislik Birim Şekil Değişirmesi
ΔL	: Şekil Değişirme
L_0	: Başlangıçtaki Etkin Uzunluk
$\sigma_{gerçek}$	: Gerçek Gerilme
$\varepsilon_{gerçek}$	: Gerçek Birim Şekil Değişirmeyi
σ_e	: En Büyük Gerilme
b	: Numune Kesitinin En Ölçüsünü
h	: Numune Kesitinin Kalınlığı
$\varepsilon_{müh}$	: Mühendislik Birim Şekil Değişirmesi
E_L	: Boyuna Elastisite Modülü
E_T	: Enine Elastisite Modülü
E_F	: Lif Takviyesinin Elastisite Modülü
E_M	: Matris Malzemesinin Elastisite Modülü
V_f	: takviye malzemesinin hacimce oranı
V_M	: Matris Malzemesinin Hacimce Oranını
η_L	: Uzunluğa Bağlı Etkinlik Sayısı
K_R	: Paketleme Düzenine Bağlı Sabittir
E^0	: Şekil Değişirme Tansörü
E^1	: Şekil Değişirme Tansörü
f_0	: Matris Malzemesinin Hacim Oranı
f_1	: Takviye Malzemesinin Hacim Oranı
S	: Eshelby Tansörü

$\mathbf{E}^T$	: Katkı Maddelerinin Kapsadığı Bölge İçinde Tanımlı Eşdeğer Dönüşüm Şekil Değişirme Tansörü
$\bar{\mathbf{E}}$	: Kompozit Malzemenin Şekil Değişirme Tansörü
ξ	: Takviye Faktörünü



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : KR parametresinin paketlenme düzenine bağlı değerleri.....	13
Çizelge 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuç değerleri.	36
Çizelge 3.2 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuç değerleri.	38
Çizelge 3.3 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuç değerleri.	40
Çizelge 3.4 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme sonuç değerleri.	42
Çizelge 3.5 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme sonuç değerleri.	43
Çizelge 3.6 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme sonuç değerleri.	44
Çizelge 3.7 : Sayısal yöntemler ile analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar.....	49



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Çekme deneyi makinası.....	21
Şekil 2.2 : Çentik darbe deneyi düzeneği.	23
Şekil 2.3 : Elektromanyetik karıştırıcı.	27
Şekil 2.4 : Ultrasonik karıştırıcı.	28
Şekil 2.5 : Çalışmada kullanılan teflon kalıplar.	29
Şekil 2.6 : Vakumlu etüv.	30
Şekil 2.7 : Kürlleme süreci için kullanılan etüv.....	31
Şekil 2.8 : HNT takviye malzemesi.	32
Şekil 2.9 : CNF takviye malzemesi.	33
Şekil 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	37
Şekil 3.2 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	38
Şekil 3.3 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi gerilme- şekil değiştirme eğrileri.	40
Şekil 3.4 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	42
Şekil 3.5 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	43
Şekil 3.6 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	45
Şekil 3.7 : Takviye kombinasyonlarına göre darbe enerjisi.	46
Şekil 3.8 : Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eşdeğer von Mises gerilme değerlerinin hacim elemanı üzerinde görünümü.	50
Şekil 3.9 : HNT ve epoksinin 200 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) HNT takviyesi, (b) Epoksi.....	52
Şekil 3.10 : HNT ve epoksinin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) HNT takviyesi, (b) Epoksi.	52
Şekil 3.11 : HNT ve epoksinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) HNT takviyesi, (b) Epoksi.	53
Şekil 3.12 : HNT'nin 100000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.	53
Şekil 3.13 : CNF ve epoksinin 200 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) CNF takviyesi, (b) Epoksi.	54
Şekil 3.14 : CNF ve epoksinin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) CNF takviyesi, (b) Epoksi.	54
Şekil 3.15 : CNF ve epoksinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) CNF takviyesi, (b) Epoksi.	54
Şekil 3.16 : CNF'nin 50000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	55
Şekil 3.17 : HNT/CNF takviyelerinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	55
Şekil 3.18 : HNT/CNF takviyelerinin 20000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	56

Şekil 3.19 : HNT/CNF takviyelerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, (a) 50000 kat büyütülmüş, (b) 100000 kat büyütülmüş, (c) 50000 kat büyütülmüş..... **56**



NANOPARÇACIK TAKVİYELİ EPOKSİ MALZEMELERİN TEORİK VE DENEYSEL İNCELEMESİ

ÖZET

Günümüzde kullanılan geleneksel malzemelerin mühendislik uygulamaları için yetersiz kalması, yaygın olarak kullanılan çelik benzeri metal alaşımların istenen özellikleri karşılamaması, yeni malzemelerin araştırılıp geliştirilmelerine sebep olmuştur. Geleneksel olarak kullanılan yetersiz malzemelere alternatif olarak üretilen ve mühendislik uygulamalarında kullanılacak malzemelerin, yeterince hafif ve yüksek dayanımlı olması ve aynı zamanda mekanik, termal, kimyasal ve elektriksel özelliklerinin daha üstün olması ve maliyetlerinin daha düşük olarak kullanımlarının kolay bir hale gelmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç için kompozit malzemeler, araştırılmaya ve geliştirilmeye başlanmıştır. Matris ve bir veya birden fazla takviyeden oluşan kompozit malzemeler, yapısında farklı fazlarda bulunan malzemelerin olumlu özelliklerinin bir araya gelmesi sonucunda geleneksel malzemelere göre daha üstün özellikler göstermektedirler. Matris içerisinde beraber bulunan takviye malzemeler, kendilerine özgü özellikleri koruyarak kompozit yapısı içerisinde yer alırlar. Takviye malzemelerin matris ile olan etkileşimini malzemenin boyutları ve geometrik özellikleri de etkilemektedir. Takviyelerin boyutlarının küçülmesi sonucunda artan yüzey alanı-hacim oranları, takviyelerin matris ile oluşturduğu etkin yüzeyini artırarak malzemenin mekanik özelliklerini daha iyi bir duruma getirmektedir. Nano ölçekte olan takviyeler, bu sebeplerden dolayı kompozit imalatında daha yaygın olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Kompozitler günümüzde, havacılık, savunma, otomotiv, denizcilik, inşaat, enerji, sağlık, elektronik, makine gibi sektörlerde farklı amaçlar doğrultusunda sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, dünyanın sağlığı, gelecekte daha yaşanılabilir bir çevre için yenilenebilir kaynaklar, sürdürülebilir malzemeler ve teknolojiler oldukça önemlidir. Gelişen teknoloji doğrultusunda malzeme biliminde ve mühendislik uygulamalarında aranan üstün malzeme özellikleri ile birlikte sürdürülebilirlik, bir zorunluluk haline gelmiştir. Teknolojide, yeni gelişmelerin gerçekleşmesi ve ilerleme kat edilmesi için kullanılacak malzemelerin çevreye olan etkisi incelenip doğa için uygun olan malzemeler kullanılmalıdır. Bu çalışma kapsamında kompozit malzemeyi oluştururken takviye malzemesi seçimlerinde sürdürülebilirlik özellikleri de dikkate alınmıştır.

Çalışmada epoksi matrisli, selüloz nanofiber (CNF) ve halloysit nanotüp (HNT) takviyelerinin ağırlıkça farklı oranlarda birlikte ve ayrı ayrı bulunduğu nanokompozit malzemeler imal edilmiş ve bu doğrultuda incelemeler yapılmıştır. İmal edilen nanokompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin, çalışmada kullanılan sayısal modelleme yöntemleriyle, deneysel yöntemlerle ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilen iç yapı incelemeleri ile gerçekleştirilmesi

amaçlanmıştır. CNF ve HNT takviyelerinin birlikte bulunma durumunun epoksi reçine matris malzemeli nanokompozitlerdeki sinerjik etkileri araştırılmıştır.

İlk bölümde, kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre üstün özelliklerinden, kompozit malzemelerin kullanım alanlarından, nano ölçekteki takviye malzemelerin kompozit yapısına kazandırdığı özelliklerden, çalışmada tasarlanan ve üretilen nanokompozit malzemelerde kullanılan epoksi reçine, CNF ve HNT takviyesi hakkında bilgi verilmiştir. CNF'nin takviye olarak nanokompozit malzemelerde kullanılmasının, malzemenin sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi ve çevreye olan olumlu etkilerinden bahsedilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelenerek, CNF ve HNT takviyesinin, epoksi bazlı nanokompozit imalatında kullanılmasının malzeme özellikleri üzerindeki etkileri ve sonuçları incelenerek sunulmuştur. Çalışma kapsamında ayrıca kompozit malzemelerin tasarımının yapılması aşamasında mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan sayısal modellemelerden ve deneysel yöntemlerden bahsedilmiştir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi hakkında literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelenerek sunulmuştur. Bölümün sonunda, kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanılan imalat yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, bu çalışma kapsamında kullanılan, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tercih edilmiş sayısal modelleme yöntemleri ve deneysel yöntemler hakkında bilgi verilmiş, ayrıca iç yapı incelemelerini gerçekleştirmek üzere kullanılan taramalı elektron mikroskobu yöntemi açıklanmıştır. Sayısal yöntemler için kullanılan modeller, yapılan hesaplamalar ve çalışmada yapılan deneysel çalışmaların prosedürlerine detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Çalışmada tasarımı ve imalatı yapılan nanokompozit malzemelerin içeriğindeki matris ve takviye malzemeleri, imalat prosedürleri, üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında üretilen numuneler kullanılarak çekme, üç noktadan eğme ve çentik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntemler olarak Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, kendi içerisinde ve birbirleriyle karşılaştırmalı olarak tutarlı sonuçların elde edilmesi için imalat sürecinde dikkat edilmesi gereken önemli hususlara değinilmiştir. Nano takviye içeren epoksi matrisli kompozit imalatından ve deneylerin standartlarına uygun numunelere göre tasarlandığından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, çalışmada üretilen nanokompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonucuna, yazılım yardımı ile yapılan sayısal modellemelerin sonucuna ve malzemelerin taramalı elektron mikroskobu yardımı ile alınmış iç yapı görüntülerine yer verilmiştir. Deneysel sonuçların olduğu kısımda, farklı malzeme grupları için gerçekleştirilen çekme, üç noktadan eğme ve çentik darbe deneylerinin sonuçları sunulmuştur. Ayrıca çalışmada kullanılan Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi ve sonlu elemanlar yönteminin farklı malzeme grupları için hesaplanan sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Taramalı elektron mikroskobu yardımı ile gerçekleştirilen iç yapı incelemelerinde, malzemelerde önemli olacak süreksizliklerin bulunmadığı ve takviye malzemelerin matris içinde düzgün ve homojen bir şekilde dağıldığı belirtilmiştir. CNF ve HNT takviyesinin ağırlıkça farklı oranlarda birlikte ve ayrı ayrı bulunduğu nanokompozit malzemelerin, statik deformasyon hızı altında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları incelenmiş ve malzemelerin davranışları gözlemlenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda CNF takviyesinin epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin rijitliğini önemli ölçüde artırdığı, HNT takviyesinin de malzemenin rijitliğini olumlu yönde etkilediği

belirtilmiştir. Takviyelerin birlikte bulunma durumunda da sinerjitik etkilerle birlikte takviyelerin, nanokompozit malzemelerin mekanik özelliğini geliştirdiği sonuçlarla sunulmuştur. Sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara paralellik gösterdiği ancak daha yüksek olduğu, bu durumun yazılımda gerçekleştirilen sayısal modelleme için yapılan, takviyelerin matris içerisinde içerisinde homojen dağılım kabulünden dolayı gerçekleştiği açıklanmıştır.

Deneysel sonuçlar özetlendiği zaman, çekme deneyi sonuçları için HNT takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda malzemenin elastisite modülü değerlerinin %49,87 ve %62,28 oranında arttığı, CNF takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda elastisite modülü değerlerinin %19,87 ve %52,99 oranında arttığı görülmüştür. Üç noktadan eğme deneyi sonuçları için HNT takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda malzemenin eğilme modülü değerlerinin %14,42 ve %20,94 oranında arttığı, CNF takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda eğilme modülü değerlerinin %20,59 ve %39,04 oranında arttığı görülmüştür. Takviyelerinin birlikte bulunma durumlarında, malzemenin rijitliğinde farklı oranlarda artış gerçekleşmesine sinerjik etkinin takviyelerin yalnız bulunma durumu referans alınarak karşılaştırıldığında beklenenin altında olduğu yorumlanmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümü olan son bölümünde, çalışma hakkında genel bir değerlendirme yapılarak ve sonuçların özetlenmesi ile birlikte yapılan çıkarımlardan bahsedilerek kapanış bölümü sunulmuştur. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalar ve gerçekleştirilecek mühendislik uygulamaları için önerilerde bulunulmuştur. Süregelen çalışmalarda ve gelecekte, bu çalışmada kullanılan nanokompozitlere benzer olarak matris ve takviye malzemelerinin kullanılması durumunun aranan üstün mekanik özellikleri karşılayacağı ve doğanın korunması için kullanılan malzemelerin sürdürülebilir olduğu düşünülmektedir. Bu sebeplerden dolayı, çalışmaya paralel öneriler yapılmıştır.



THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NANOPARTICLE REINFORCED EPOXY MATERIALS

SUMMARY

The insufficiency of the materials now employed in engineering applications, along with their inability to match the desired properties of commonly used steel-like metal alloys, has prompted the exploration and creation of novel materials. The goal is to develop materials that can serve as alternatives to conventional, inadequate materials in engineering applications. These materials should possess a combination of desirable qualities, including being lightweight, durable, and having superior mechanical, thermal, chemical, and electrical properties. Additionally, they should be cost-effective and easy to use. In order to achieve this objective, there has been becoming a priority on the investigation and advancement of composite materials. Composite materials, which consist of a matrix and one or more reinforcement materials, surpass traditional materials by combining the beneficial characteristics of materials found in distinct phases of their manufacturing process. The reinforcements coexist within the matrix in a composite manufacturing while preserving their individual properties. The interaction between the materials and the matrix is affected by reinforcements' dimensions. The mechanical properties of the material are enhanced by reduced dimensions of the reinforcements, which leads to obtain greater surface area-volume ratios. Rise in this ratio, creates a larger active surface area generated between the reinforcements and the matrix. The use of nano-scale reinforcements has gained popularity in composite manufacturing due to these factors. Composite materials are widely utilized in aviation, defense, automotive, marine, construction, energy, health, electronics, and manufacturing industries. Furthermore, the utilization of renewable resources, sustainable materials and technologies are vital for the well-being of the planet and the establishment of a more sustainable environment in the future. The search for enhanced material qualities in materials science and engineering applications has made the sustainability a must as technology progresses. When it comes to technology, it is essential to thoroughly assess the environmental consequences of the materials used for new advancements and prioritize the usage of environmentally-friendly materials. The selection of materials was made with a focus on sustainability.

This study involved the manufacturing and investigation of nanocomposite materials consisting of an epoxy matrix, cellulose nanofiber (CNF), and halloysite nanotube (HNT) reinforcements. The material groups were manufactured in various weight ratios of reinforcements, combined and individually. The objective of this study is to perform the mechanical characterisation of the nanocomposite materials by utilizing numerical modeling methods, experimental techniques, and using scanning electron

microscopy for internal structure analysis. The jointly assessed impacts of the presence of CNF and HNT reinforcements in nanocomposites with an epoxy resin matrix material were analyzed.

The first part of the study provided details on the enhanced characteristics of composite materials in comparison to conventional materials. The various applications of composite materials and the particular characteristics that nanoscale particle reinforced materials contribute to the composite structure is also discussed. Furthermore, the study emphasized the use of epoxy resin, CNF, and HNT reinforcement in the design and manufacturing of nanocomposite materials. The utilization of cellulose nanofibrils (CNF) as reinforcement in nanocomposite materials was discussed, pointing out its impact on the sustainability of the material and its beneficial effects on the environment. This thesis also presents the impacts of including CNF and HNT reinforcements in the manufacturing of epoxy-based nanocomposites on material properties, based on the studies of existing researchs in the literature. The use of numerical modeling and experimental approaches to mechanically investigate composite materials throughout the design process is discussed. A comprehensive evaluation and presentation of materials' characterization process in literature is also mentioned. The chapter concludes by providing details on the commonly used manufacturing techniques for composite materials.

The second part of this study explains the numerical modeling approaches and experimental techniques performed to analyze the mechanical properties of composite materials. Furthermore, the utilization of a scanning electron microscope for investigating the interior structure of these materials is discussed. The study provides a comprehensive description of the models utilized for the numerical approaches, conducted calculations, and the procedures used to execute the tests. This study also provides an explanation of the matrix and reinforcement materials used in the design and manufacture of nanocomposite materials. The manufacturing techniques and experimental tests conducted to characterize the manufactured materials are explained. The experimental study involved conducting tensile, three-point bending, and impact tests on the manufactured samples. The numerical methods employed in this study were the Mori-Tanaka homogenization method and the finite element method. Additionally, this research illustrates the crucial factors that must be taken into consideration during the manufacturing procedure in order to ensure consistent results. The manufacturing of epoxy matrix composites with nano-reinforcements was carried out by molding process. A Teflon mold, constructed to fulfill the requirements of the research's test procedures, was used as the casting mold. The significance of utilizing a vacuum incubator during the manufacturing process was emphasized due to the potential issues that can arise from exposure to air before and after the casting process.

The third part presents the results of the experimental studies, numerical analysis conducted to characterize the nanocomposite materials manufactured in this study. Also, the internal structure images of the materials obtained using scanning electron microscopy. The experimental results section presents results of tensile, three-point bending, and impact tests conducted on several material groups. Furthermore, this research also poses a comparison of the results obtained from the Mori-Tanaka homogenization method and the finite element method, applied to several material groups. The internal structural investigations conducted using scanning electron microscopy confirmed that there were not any noteworthy discontinuities existed in the materials, and the reinforcements were homogeneously and uniformly dispersed

throughout the matrix material. The mechanical properties of nanocomposite materials were observed by examining the results of experiments conducted under a static deformation rate. Materials contained both CNF and HNT reinforcement, either combined or separately, in various weight ratios. The results indicate that the addition of CNF reinforcement greatly enhances the stiffness of epoxy matrix nanocomposite materials, whilst the inclusion of HNT reinforcement has a minor beneficial impact on the material's stiffness compared to CNF reinforcement. The nanocomposite materials exhibit improved mechanical characteristics due to synergistic effects when the reinforcements were combined. The numerical approaches yield results that are similar to the experimental results, but slightly greater. This difference can be explained to the assumption of a perfect homogeneous distribution of reinforcements in the matrix during the numerical modeling conducted in the software.

When the experimental results are summarized, it was observed that the elastic modulus values of the material increased by 49.87% and 62.28% for the tensile test results when the HNT reinforcement was 0.5% and 1% by weight, respectively. For the CNF reinforcement, the elastic modulus values increased by 19.87% and 52.99% when the reinforcement was 0.5% and 1% by weight, respectively. For the three-point bending test results, the bending modulus values of the material increased by 14.42% and 20.94% when the HNT reinforcement was 0.5% and 1% by weight, respectively. For the CNF reinforcement, the bending modulus values increased by 20.59% and 39.04% when the reinforcement was 0.5% and 1% by weight, respectively. When both reinforcements were present together, it was interpreted that the increase in the material's rigidity was different from the expected synergistic effect when compared to the condition where the reinforcements were present alone.

The fourth part of the research, which is the concluding section, presents a comprehensive review of the investigation, briefly summarizes the results, and concludes with a summary. Additionally, recommendations were provided for future researchs and implementations in the field of engineering.

Research suggests that the utilization of matrix and reinforcement materials, similar to the nanocomposites used in this research, would achieve the desired superior mechanical properties in future studies. Furthermore, these materials are considered to be sustainable, thus contributing to the protection of the environment.



1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı türde iki veya daha fazla malzeme çeşidinin makroskopik boyutta birleştirilerek, daha üstün özelliklerin elde edilmesi için üretilirler. Kendilerine ait farklı özelliklere sahip olan malzemeler, yapı içerisinde birlikte bulunduklarında birbirlerinin güçsüz olan özelliklerini telafi ederler. Kullanım alanlarına göre malzemeler için aranan özellikler ve koşullar değişir. Kullandığımız geleneksel malzemeler, aradığımız koşullara uyum sağlayamamaya başlamışlardır ve yerlerini kompozit malzemelere bırakmışlardır. Düşük yoğunluğa sahip olmaları ve aynı zamanda rijitlik, sönüm gibi belirli karakterlerinin olması yönünden kompozit malzemeler oldukça tercih edilebilir seçenekler haline gelmişlerdir. Matris ve takviye malzemelerin kullanım koşullarına uygun olarak seçilerek birleştirilmesi ile istenen malzeme özellikleri karşılanabilir. İmalat için seçilen malzemelerin bulunabilirlik açısından yaygın olması, maliyetin yeterince düşmesini ve böylelikle kompozit malzemelerin tercih edilebilir olmasını sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Havacılık, otomotiv sanayii, denizcilik, inşaat, spor, enerji, medikal ve elektronik, bu kullanım alanlarına örnektir (Hagnell ve Åkermo, 2019; Mangalgiri, 1999; Akgöl ve diğ, 2021; Sprenger, 2020; Bray ve diğ, 2013). Günümüzde enerji alanında, sunduğu imkanlardan dolayı son derece yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmışlardır. Aynı şekilde medikal alanda, insan sağlığını olumlu yönde etkileyen gelişmelerden dolayı sıkça tercih edilmektedirler. İmplant gibi biyolojik ekipmanlarda insan fizyonomisine uyumlu olmaları, kullanımları için gelecek vaat etmektedir.

Kompozit malzemeler, yapı olarak matris ve takviye malzemelerinden oluşur. Kompozit malzemeler matris malzemesi olarak tek bir malzeme bulundururken, bir veya daha fazla takviye malzemesi bulundurabilirler. Takviye ilavesinin amacı, farklı malzeme çeşitlerinin kullanışlı mekanik özelliklerini bir araya getirerek tek bir yapı olarak daha üstün bir malzeme elde etmektir. Takviyeler yapı içerisinde fiber, parçacık gibi durumlarda bulunabilir. Takviyeler, matris malzemelerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahiplerdir ve görevleri kompozit yapısına rijitlik ve mukavemet

sağlamanın yanı sıra yük aktarımını sağlamaktır. Matris malzemesinin görevi, takviyeleri ıslatarak yapının bir arada bulunmasını sağlamaktır (Güven ve Çınar, 2019).

Kompozit malzemeler, matris malzemesinin çeşidine göre polimer, metal, seramik matrisli kompozitler olmak sınıflandırılırlar (Müzel ve diğ, 2020). Matris malzemesinin sağladığı mekanik özelliklere göre farklı endüstrilerde kullanılmaktadırlar. Takviyeler ile oluşturulan kompozit yapılar, malzemenin maruz kalacağı zorlanmaların matris yardımı ile takviyelere iletilmesi için tasarlanmışlardır. Polimer matrisli kompozitler, en yaygın kullanılan kompozitlerdir. Termoset veya termoplastik polimer matris malzemesine takviye olarak yüksek mukavemetli fiber veya parçacıkların ilave edilmesi ile oluşturulmaktadırlar. İmal edilebilirliğinin kolay olması ve ekonomik olarak üretim maliyetlerinin düşük olması sebebiyle farklı alanlarda sıklıkla tercih edilirler. Aynı zamanda mekanik özellikleri, maliyetlere göre oldukça iyidir (Odegard ve diğ, 2005).

Kompozitler, matris malzemelerinden farklı olarak kullanılan takviye malzemelerin çeşidine göre de sınıflandırılmaktadırlar. Öncesinde bahsedildiği gibi, takviyeler parçacık olarak, sürekli veya kısa lif olarak bulunabilirler ve bu şekilde sınıflandırılabilirler (Rajak ve diğ, 2019). Takviye olarak parçacık tercih edilen kompozitlerin özellikleri, parçacıkların boyutu, yüzey alanı, aktivitesi ve agrega yapısı, dağılımı (dispersiyon), miktarı ve matris ile olan etkileşimleri gibi parametrelere bağlıdır. Lif olarak tercih edilen takviyelerin kompozit yapısının içerisindeki oryantasyonu, malzemenin özelliklerini değiştirip malzemenin izotropik veya anizotropik olmasını etkilemektedir (Krop ve diğ, 2016). Kompozit yapısının içerisinde bulunabilecek takviyeler; makro, mikro veya nano ölçekte olabilirler.

Nano ölçekte takviye içeren kompozitler nanokompozitler olarak isimlendirilirler. Nanometre mertebesindeki takviyelerin matris içinde dağılması sonucunda oluşurlar. Takviye ebatlarının nanometre mertebesinde olmasının olumlu yanları bulunmaktadır. Nano boyuttaki malzemeler, makro boyutlarına göre farklı özelliklere sahiptirler (Thostenson ve diğ, 2005). Bir malzemenin boyutları arttıkça malzemelerin kusur içerebilme ihtimali de artmaktadır. Boyutlar nano mertebesine doğru azaldıkça yüzey alanı – hacim oranının artması, takviyeler ile matris arasındaki etkileşim alanının artmasına ve böylece daha dayanıklı bir yapı oluşmasına olanak sağlar. Bu sebeplerden dolayı nanokompozitler, hem daha iyi mekanik özelliklere hem de daha iyi ısı,

manyetik, optik, elektriksel özelliklere sahiptirler. Literatürdeki çalışmalarda, kullanılan nano ölçekli takviyelerin kompozit yapısına olumlu özellikler kattığı ve üstün malzemelerin elde edildiği belirtilmiştir. Aynı zamanda, epoksi reçine ile birlikte kullanılan nano takviyelerin malzeme özelliklerini daha da iyileştirdiğinden bahsedildiği görülmüştür. Çalışmalarda, elde edilen deneysel sonuçlar dikkate alındığında takviye boyutunun nanoboyuta yaklaşması ile birlikte mekanik özelliklerin iyileştiği deneysel sonuçlara bakılarak incelenmiştir. Belirtilen avantajlarından dolayı nanokompozitlerin kullanımı, çeşitli alanlarda gün geçtikçe yaygınlaşmaya başlamıştır (Thirumalai ve diğ, 2019; Abdellaoui ve diğ, 2018; Bello ve diğ, 2015).

Her malzemede ve uygulamada olduğu gibi, kompozit malzemeler için de sürdürülebilirlik önemli bir konu haline gelmiştir (Ma ve diğ, 2014). Ekolojik ayak izini azaltmak, çevre dostu malzemeler kullanarak ihtiyaçları karşılamak, geri dönüşümü ve yeniden kullanımı artırmak doğa için önemlidir. Kompozit üretimi için matris veya takviye malzemesi olarak sürdürülebilir malzemelerin kullanılması, çevre duyarlılığı için gelişen teknolojiye gerekli bir adımdır (Lam ve diğ, 2022). Yeniden kullanım ve çevresel faktörlerin beraberinde ekonomik olarak da katkı sağlamaktadır (Moon ve diğ, 2017). Malzemelerin üstün özelliklerinden ödün vermeden bu avantajlardan faydalanmak mümkündür.

1.1 Epoksi

Epoksi, kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak sıkça kullanılan bir malzemedir. Polimer başlığı altında termoset malzemeler arasında yer alırlar. Kompozit imalatı için ekonomik olmaları ve imalatın sürecinin kolay olmasının yanı sıra kimyasal, mekanik, termal, elektriksel özelliklerinin de iyi olması, epoksiyi matris malzemesi olarak tercih edilebilir hale getirmektedir. Literatür araştırmalarında, polimer matrisli kompozit üretiminde epoksinin sıkça kullanıldığı ve yüksek performanslı olarak belirtildiği görülmüştür (Bello ve diğ, 2015).

Epoksinin, yaygın olarak kullanılmasını sağlayacak özelliklerinin yanında olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Toklukları düşüktür ve belirli sıcaklıklarda daha da gevrek hale gelmektedirler. Darbe durumunda ve düşük sıcaklıklarda beklenen değerleri karşılayamamaktadır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıkta da istenen performansı sağlamamaktadır (Balguri ve diğ, 2021).

Çalışmalarda, epoksi matrisli kompozitlerin farklı takviyelerle mekanik olarak güçlendirildiği görülmüştür. Bir veya birden fazla takviye içeren epoksi matrisli kompozitlerin özellikle elastisite modülü, dayanım değerlerinde artış görülmüştür. Epoksi matrise takviye olarak çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Yüzey alanı – hacim oranlarının yüksek olmasının getirdiği avantajlardan dolayı nano ölçekteki takviyelerin yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Nanoparçacıklar, nanotüpler ve lifler bu takviyelere örnektir ve literatürdeki çalışmalarda bu takviyelerin farklı kombinasyonlarını içeren nanokompozitler gözlemlenmiştir (Zappalorto ve diğ, 2015; Omrani ve diğ, 2008; Nakamura ve diğ, 2012).

1.2 Halloysit Nanotüp (HNT)

Halloysit nanotüpler (HNT), çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda ilgi gören, tüp şeklindeki nano ölçekte doğal olarak oluşan alüminosilikat kilerdir. Bu nanotüpler, kimyasal bileşimi $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ (nemli durumda n değeri 2 dir) olan halloysit mineralinden türetilmiştir. Kimyasal olarak HNT'ler alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$) ve silikon dioksit (SiO_2) katmanlarından oluşur ve su molekülleri, hidratlı formlarında katmanlar arasında yer alır (Ravichandran ve diğ, 2019). Bu bileşim HNT'lere üstün mekanik özellikler, termal stabilite ve biyolojik uyumluluk kazandırarak çeşitli teknolojik alanlarda fonksiyonel bir nanomalzeme olarak çok yönlülüklerini daha da artırmaktadır.

Halloysit nanotüpler, nano ölçekte tüp şeklindedirler. Çapları 50 ila 60 nanometre aralığında, uzunlukları ise 0,5 ila 10 μm aralığında değişmektedir. Literatürde, HNT'nin gözlemlenen ebatları değişmektedir ancak çalışmalardaki ortalama ölçüler benzer olarak belirtilmiştir (Kamble ve diğ, 2012; Yuan ve diğ, 2015).

HNT takviyesi, epoksiye benzer olarak polimer matrisli nanokompozitlerin mekanik özelliklerini belirli oranlarda artırmak için kullanılmaktadır. Aynı zamanda, yapıda bulunmaları durumunda termal stabiliteyi artırmaktadırlar ve epoksiye kıyasla daha yüksek sıcaklığın gerektiği uygulamalarda kullanılabilirler. Fiziksel yapılarından dolayı, kompozitin matris malzemesinde homojen olarak bulunduklarında yük dağılımını dengelerler (Rawtani ve Agrawal, 2012).

HNT takviyesinin epoksiye takviye olarak kullanıldığı ve deneysel sonuçların karşılaştırmalı olarak incelendiği çeşitli çalışmalarda görülmüştür. Çekme dayanımı,

elastisite modülü olarak rijitlik gibi malzeme özellikleri, ağırlıkça farklı oranlarda bulunan HNT takviyesi ile birlikte incelenmiştir. Nakamura ve diğ. (2012), epoksi reçineye takviye olarak ağırlıkça %0,25, 1, 1,5 , 2 olacak şekilde HNT ilave ederek deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda saf epoksinin çekme deneyi sonucunda elastisite modülünün 967 MPa olduğunu, takviyelerin oranlarına göre elastisite modülü değerlerinin sırasıyla 1208 MPa, 1118 MPa, 1059 MPa, 797 MPa ortalama olacak şekilde belirtilmiştir. Artan elastisite modülü değerlerinde meydana gelen düşüşün, HNT takviyesinin yapı içerisine homojen olarak dağılmayıp belirli bölgelerde topaklanmadan dolayı malzemeyi dayanıksızlaştırdığı şeklinde açıklanmıştır. Malzemenin imalat aşamasında takviyelerin düzgün dağılımının önemli olduğu ve sonuçları değiştirebildiği, bu sebepten dolayı imalatın dikkatli bir şekilde yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmalarında, ağırlıkça artan HNT takviye oranının malzeme içinde dağılımlarından kaynaklanan problemlerden dolayı beklenmeyen sonuçlar verebildiği belirtilmiştir. Ayrıca, çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça takviye oranlarına göre sırasıyla 39,7 MPa, 35,3 MPa, 32,5 MPa, 26,8 MPa olduğu belirtilmiş ve sonuçlardaki düşüş de benzer şekilde açıklanmıştır. Farklı bir çalışmada Ravichadran ve diğ. (2019), epoksi reçineye ağırlıkça %1, 2, 3, 4 olacak şekilde HNT takviyesi ilave edip deneysel sonuçlarla inceleme yapmışlardır. 3 noktadan eğme ve çekme deneyi sonuçlarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Saf epoksinin eğilme modülünün 6,03 GPa, elastisite modülünün 5,5 GPa, çekme dayanımının 191,4 MPa olduğu belirtilmiştir. HNT takviyesinin ağırlıkça %1, 2, 3, 4 ilavesi ile eğilme modülünün sırasıyla 7,94, 8,03, 8,74, 7,89 GPa değerlerinde, elastisite modülünün 6,8, 6,9, 7,6, 7,1 GPa değerlerinde, çekme dayanımının ise 234, 246,4, 267,7, 257,8 MPa değerlerinde olduğu belirtilmiştir. HNT ilave ile birlikte mekanik özelliklerin iyileştiği ancak ilave oranının ağırlıkça %4 ve üzerinde olması durumunda matris içerisinde takviye parçacıklarının topaklanarak malzemeyi olumsuz yönde etkilediği ve özelliklerin artış miktarında düşüşe sebep olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda, gerçekleştirilen çentik darbe deneylerinde de değerlerde benzer oranda artış olduğu üzerinde durulmuş.

HNT takviyesi özellikle epoksi benzeri polimer bazlı kompozitlerde kullanıldığı zaman malzemenin mekanik özelliklerini ve ısı özelliklerini kayda değer oranlarda artırmaktadır. Takviyenin nano ölçekte olması, yüzey alanı – hacim oranını artırdığı için matris ile etkileşim alanı artmaktadır ve bu sayede takviye, matris içine daha

düzenli ve homojen bir şekilde dağılabilmektedir. HNT'nin doğada kolay bir şekilde bulunabilmesi bu sayede ucuz olması, çalışmalarda ve sektörde yaygın olarak kullanılmasına sebep olmaktadır (Du ve diğ, 2010).

1.3 Selüloz Nanofibril (CNF)

Selüloz nanofibril, bitkilerin hücre duvarlarında bulunan sıklıkla rastlanan organik polimer olan selülozdan türetilen, biyolojik olarak parçalanabilir ve sürdürülebilir bir nanomalzemedir. CNF, selüloz liflerin nano ölçekli bileşenlerine mekanik fibrilasyon, kimyasal işlemler veya her ikisinin bir kombinasyonu uygulanarak elde edilir. Biyolojik olarak parçalanabilirlikleri ve düşük çevresel etkileri, CNF'nin çeşitli endüstriyel sektörlerde sentetik nanomalzemelere sürdürülebilir alternatifler olarak bulunmasını sağlar. Kimyasal olarak yapılarında yalnızca hidrojen, karbon ve oksijen ($(C_6H_{10}O_5)_n$) atomlarını içerirler ve bu atomların glikosidik bağlar ile polisakarid halde bulunması sonucu oluşurlar (Rajak ve diğ, 2019; Yasim-Anuar ve diğ, 2019; Bhatnagar ve Sain, 2005; Lam ve diğ, 2022).

Fibril halde bulunan CNFlerin çapları 10 ila 20 nm, uzunlukları ise 2 ila 3 µm aralığında değişebilmektedir. Farklı çalışmalarda gözlemlenen CNF lerin ebatlarının ortalama olarak yakın değerlerde olduğu görülmüş ancak fibrile bağlı olarak ebatların düşük oranda değişebildiği görülmüştür. Boy – en oranlarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Makroskopik olarak kuru toz halde bulunan CNFler, ağırlıkça %4 oranda nem bulundurabilmektedirler (Ansari ve diğ, 2014; Moon ve diğ, 2017).

CNF takviyesi, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra malzemeye üstün optik özellikler ve termal stabilite katmaktadır. CNF lerin epoksi benzeri polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanımının, yüzey alanı – hacim oranlarının yüksek olmasından dolayı matris yapısının içerisinde düzgün ve homojen bir şekilde dağılmasına, etkileşim alanının fazla olması sebebiyle takviyelere yük aktarımının dengeli bir şekilde gerçekleşmesine imkan sağladığı görülmüştür (Masoodi ve diğ, 2012; Isogai ve Bergström, 2018).

CNF takviyesinin, epoksiye ilave edildiği ve deneysel sonuçların karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmalar, literatürde görülmüştür. Nissilä ve diğ. (2019), CNF takviyesinin hacimce belirli oranlarda epoksi reçineye ilave ederek deneyler yapmışlardır ve sonuçlarında elastisite modülünün ve eğilme modülünün arttığından

bahsetmişlerdir. Fiber oryantasyonu, boyuna ve enine olacak şekilde ayrı ayrı hacimce %10 ve %13 CNF takviyesi içeren numunelere çekme deneyleri ve üç noktadan eğme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. CNF takviyesinin olmadığı epoksinin elastisite modülünü 1,17 GPa, eğilme modülünü 2,53 GPa olarak belirtmişlerdir. Takviyelerin hacimce %10 ve %13 olduğu durumlarda elastisite modülünün ortalama 1,3 GPa ve 1,48 GPa olduğunu, eğilme modülünün 3,33 GPa ve 3,97 GPa olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek yüzey alanlarının malzeme için önemli olduğundan ve topaklanmanın olabildiğince az olduğu durumlarda mekanik özelliklerde artışın kayda değer olduğundan bahsetmişlerdir. CNF takviyesinin farklı şekilde ilave edildiği başka bir çalışmada Ansari ve diğ. (2014), CNF takviyesini hacimce %15 ve %30 olacak şekilde epoksi reçineye ilave etmişlerdir ve elastisite modülü değerlerini deney sonucunda karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Takviye ilavesinin olmadığı epoksinin elastisite modülünün 2,1 GPa olduğunu, hacimce takviye ilavesinin %15 ve %30 olması durumunda elastisite modülünün 5,9 GPa ve 8,3 GPa olduğunu belirtmişlerdir. Mekanik özelliklerin sayısal değerlerindeki artış miktarının fazla olmasının fiber ağ yapısının ve oryantasyonunun farklı olması olarak açıklamışlardır. CNF takviyesinin elde edilmesi yönteme bağlı olarak komplike olabilmesine rağmen sunduğu imkanlardan dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Biyolojik olarak yenilenebilir ve sürdürülebilir bir malzeme olmasından, aynı zamanda takviye halde malzemenin özelliklerini kayda değer oranlarda iyileştirmesinden dolayı zırhlarda, esnek pillerde, ekranlarda, filtrelerde ve biyo yakıt olarak tercih edilmektedir.

1.4 Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Malzemelerin mekanik davranışları, gerçekleştirilen deneyler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, kompozit malzemelerde kullanılan takviyelerin malzeme içerisinde düzgün bir şekilde yayıldığı ve malzemenin homojen olduğu kabulü yapılarak incelenir. Elastisite modülü gibi malzemenin rijitliğini sayısal olarak ifade eden, şekilde değiştirme kapasitesini tanımlayan malzemeye özgü özellikler, koşullara göre farklılık göstermeden malzemenin iç yapısında atomlar arası bağlar ile belirlenir ve gözlemler bu şekilde gerçekleştirilir (Onaran, 2000).

Yük altındaki malzemeler, farklı şekilde direnç gösterirler. Malzemelerin şekil değiştirebilme kapasitesi rijitlik ile ilişkilidir ve elastisite modülü ile matematiksel olarak ifade edilir. Malzemelere özgü olan gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi incelenerek, elastik şekil değişiminin gerçekleştiği bölge analiz edilir ve o bölgedeki lineer eğim kullanılarak elastisite modülü değeri elde edilir. Lineer bölge incelendiğinde, birim şekil değişiminin artması için malzemeye uygulanacak yükün artması gerektiği görülmektedir ve bu sebeplerden dolayı malzemelerde rijitlik önemlidir. Kompozit malzemelerin üretim amacı, öncelikle rijitlik anlamında üstün malzemelere ulaşabilmektir (Tüfekci ve diğ, 2020; Bray ve diğ, 2013).

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deneysel yöntemler ile birlikte sayısal modellemeler kullanılarak sonuçların tutarlılığı ve teorik hesaplamalara yakınlığı incelenmektedir. Sayısal modeller kullanılarak teorik olarak mekanik özelliklerinin belirlenmesi için başlangıç değerleri olarak elde edilmiş birtakım sonuçların kullanılması gerekmektedir. Çekme, üç noktadan eğme gibi deney sonuçları doğrultusunda, takviye kullanılarak oluşturulacak yeni malzemelerin karakterleri hesaplamalar sonucunda öngörülerek malzemelerin tasarımı yapılmaktadır (Battistella ve diğ, 2008).

1.4.1 Deneysel yöntemler

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, kullanım alanları için önemlidir. İstenen koşulları sağlayacak malzemeleri seçebilmek için malzemenin karakterinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden malzemeler için belirlenen standartlara uygun numuneler imal edilerek deneyler gerçekleştirilir. Deneyler sonucunda malzemeye ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri gibi grafikler elde edilir. Deneyler sırasında zorlanmaya maruz kalan numunelerin boyutları değişir. Şekil değiştirmeler, lineer elastik bölgede gerilme ile doğrusaldır ve Hooke yasasına göre uygundur. Plastik şekil değişimi durumunun incelenmesi için ise Holloman bağıntısı gibi denklemler kullanılır ve malzemenin karakteri yorumlanır.

Çalışma kapsamında incelenen, nanokompozit malzeme başlığı altında yer alan malzemelerin mekanik ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için birtakım deneyler gerçekleştirilir. Literatür de incelendiği zaman, nanokompozit malzemelerin yapısında bulunan katkıların ve bulunma miktarlarının malzeme üzerindeki etkisi araştırmak için dinamik mekanik analiz, çekme deneyi, çentik darbe deneyi, üç

noktadan eğme deneyi gibi deneylerin yapıldığı çalışmalar görülmüştür (Carolan ve diğ, 2017; Abadyan ve diğ, 2010; Nayak ve Sahu, 2019). Beraberinde sayısal yöntemler de kullanılarak kompozit malzemeler incelenmektedir ve malzemelerin karakteri yorumlanmaktadır (Jrad ve diğ, 2013; Drugan, 2003). Çalışmanın bu bölümünde imal edilmiş olan epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin karakter özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysek yöntemlerden bahsedilmiştir.

1.4.1.1 Çekme deneyi

Çalışmalarda malzemelerin mekanik özelliklerini ve çekme zorlanmasına karşı gösterdikleri karakteri, sayısal sonuçlarla belirlemek ve yorumlayabilmek için yaygın bir şekilde çekme deneyi gerçekleştirilir. Deney için kullanılan elektronik makina yardımı ile kuvvet ve ilerleme değerleri elde edilir. Belirli denklemler yardımıyla elde edilen sonuçlar, makina mühendisliğinde sıkça kullanılan malzemeye ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrisine dönüştürülür. Eğride elastik şekil değişimi ve plastik şekil değişimi bölgeleri görülür. Çekme deneyi sonucunda eğri yorumlanarak; elasite modülü, çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma dayanımı, poisson oranı ve elastik – plastik birim şekil değiştirme gibi değerlere ulaşılır. Elastik şekil değiştirmenin gerçekleştiği bölgedeki lineer kısımda, Hooke kanunu denklemi, denklem 1.1, kullanılarak elasite modülü değerine ulaşılır. Plastik şekil değiştirmenin gerçekleştiği kısımda, efektif plastik şekil değiştirmeyi yorumlayabilmek için Holloman bağıntısı, denklem 1.2, kullanılır. Denklemlerde σ , E, ϵ , K, n terimleri sırasıyla gerilme, elasite modülü, birim şekil değiştirme, dayanım sabiti, pekleşme üstelini ifade etmektedir.

$$\sigma = E \epsilon \quad (1.1)$$

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (1.2)$$

Deney sonucunda elde edilebilecek eğriler, farklı yaklaşımlara göre değişir. Bu yaklaşımlar gerçek ve mühendislik eğrisi olarak isimlendirilir. Gerçek gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması için, deney sırasında malzemeye ait poisson oranına göre numunenin boyca uzamasından kaynaklanan kesit alanındaki daralma anlık olarak hesaplanır ve gerçek gerilme değerleri kullanılır. Numune, boyun vermenin başlangıcından sonra da devam eden kesit daralmasından etkilenir ve gerilme değerleri yükselmeye devam eder. Mühendislik eğrisi yaklaşımında kesit alanındaki anlık daralma ihmal edilir ve hesaplamalar başlangıçtaki kesit alanına göre

yapılır. Deney öncesinde ölçülen etkin uzunluk ve kesit alanı değerleri denklem 1.3 ve denklem 1.4 yardımı ile mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekilde değiştirmesi değerlerine dönüştürülür. Denklemlerdeki $\sigma_{müh}$, F , A_0 , $\varepsilon_{müh}$, ΔL , L_0 terimleri sırasıyla mühendislik gerilmesi, kuvvet, başlangıçtaki kesit alanı, mühendislik birim şekil değiştirmesi, şekil değiştirme, başlangıçtaki etkin uzunluğu ifade etmektedir.

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.4)$$

Mühendislik eğrisi yaklaşımından, gerçek eğri yaklaşımına geçilmesi için denklem 1.5 ve denklem 1.6 kullanılır. Denklemlerde $\sigma_{gerçek}$, terimi gerçek gerilmeyi, $\varepsilon_{gerçek}$ terimi gerçek birim şekil değiştirmeyi, $\ln$ terimi ise doğal logaritmayı ifade etmektedir.

$$\sigma_{gerçek} = \sigma_{müh}(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (1.5)$$

$$\varepsilon_{gerçek} = \ln(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (1.6)$$

Çekme deneyi, akademik çalışmalar için gerçekleştirilebilecek en basit ve ekonomik deneyler arasında yer alır. Yaygın bir şekilde kullanımında dolayı farklı malzeme türlerine göre farklı standartlara sahiptir (Zheng ve diğ, 2020; Celentano ve diğ, 2004). Bu çalışmada kullanılan numuneler, kompozit malzeme türüne uygun bir şekilde hazırlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürde, kompozit malzemeler için gerçekleştirilen deneyler arasında çekme deneyinin de olduğu görülmüştür (Velmurugan ve diğ, 2014).

1.4.1.2 Üç noktadan eğme deneyi

Temel yapı elemanları, mekanizmalardaki elemanlar eğilme zorlanmasına maruz kalırlar. Üç noktadan eğme deneyi, çeşitli malzeme türleri ile hazırlanan numuneler için farklı standartlarda gerçekleştirilir ve çalışmada kullanan kompozit malzeme türü için de bu deneyin gerçekleştirildiği literatürde görülmüştür (Bashar ve diğ, 2012; Hsieh ve diğ, 2010; Tüfekci ve diğ, 2023). Numuneler, dikdörtgen kesite sahip olacak şekilde hazırlanmışlardır. Kesitin bu şekilde olması numune imalatını kolaylaştırmaktadır. Deneyin gerçekleştirilmesi için numuneler, uç kısımlarından mesnetlerin üzerine simetrik duracak şekilde yerleştirilir. Mesnetler arası mesafe önemlidir ve deney öncesinde belirlenir. Numunelerin orta noktasına denk gelecek

şekilde F kuvveti uygulanır ve sonucunda numuneler eğilme momentinden dolayı sehim yapar. Kuvvetin etkisi ile birlikte numune kesitinde normal gerilmeler meydana gelir. Kuvvet uygulanan yüzeyin en üst kısmında en büyük basma gerilmesi, diğer yüzeyin en alt kısmında ise en büyük çekme gerilmesi görülür. Tarafsız eksen olarak tanımlanan, kirişin orasındaki eksen de gerilme değerleri sıfırdır. Denklem 1.7 kullanılarak en büyük gerilme değerleri hesaplanır.

$$\sigma_e = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1.7)$$

Denklem 1.7’de kullanılan σ_e , F, l, b, h terimleri sırasıyla en büyük gerilme, uygulanan kuvvet, mesnetler arası mesafe, numune kesitinin en ölçüsünü, numune kesitinin kalınlığını ifade etmektedir. Deney sonucunda oluşan eğrinin lineer bölgesi için denklem 1.8 kullanılır. Elastisite modülü ile orantılı olan eğilme rijitliği, numunede meydana gelen sehim (w) değeri kullanılarak denklem 1.8 ile hesaplanabilir.

$$E = \frac{Fl^3}{4wbh^3} \quad (1.8)$$

1.4.1.3 Çentik darbe deneyi

Çentik darbe deneyi ile numunelere ait darbe enerjisi olarak da tanımlanan dinamik tokluk değerleri elde edilir. Deney, malzemenin hasar öncesinde absorbe edebildiği kırılma enerjisi ve kırılma karakterinin sünek veya gevrek olma durumu hakkında bilgi verir. Çekiç darbesi, deformasyon hızından dolayı dinamik olarak tanımlanır ve numunenin dinamik tokluğu incelenmiş olur. Çekiç darbesinin malzeme üzerindeki etkisinin sayısal olarak gözlemlenebildiği bu deneyde, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanır. Çeşitli malzeme türleri için gerçekleştirilebilen Çentik darbe deneyinin farklı çalışmalarda kompozit malzemelerin incelenmesi için de gerçekleştirildiği görülmüştür (Saba ve diğ, 2018; Evci ve Gülgeç, 2012; Sutherland, 2018).

1.4.2 Sayısal Modelleme

Kompozit malzemelerin üretilmeden önce tasarlanması ve kullanılacak malzemelerin planlanması için modellemeler yapılmaktadır. Deneysel modellemelerin yanı sıra matematiksel modellemeler de kullanılmaktadır. Matematiksel modellemelerin kullanılmasının temel amacı, kompozit malzeme tasarımı öncesinde matematiksel olarak malzeme özelliklerinin hesaplanması ve malzemelerin optimize edilmesidir.

Malzemeler üretilip deneysel olarak incelenmeden önce, matematiksel modeller kullanılarak zaman ve paradan tasarruf edilmektedir. Matematiksel olarak öngörülebilecek durumlar, gereksiz denemelerden kaçınmayı sağlar. Sonucunda, matematiksel modeller yardımı ile tasarlanan kompozit malzemelerin deneysel sonuçları ile teorik sonuçları karşılaştırılarak mantıklı incelemeler gerçekleştirilir.

Mühendislik uygulamaları için tasarlanan ve kullanılan malzemelerin birçoğunda, malzemenin mekanik davranışlarını incelemek ve modellemek üzere homojenleştirme yöntemi gerçekleştirilir. Homojenleştirme için farklı yaklaşımlar mevcuttur ve literatürdeki çalışmalarda, kompozit malzemelerin tasarımı için malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli malzeme modellerin kullanıldığı görülmüştür (Luo ve Daniel, 2003; Wang ve diğ, 2017; Alpatova ve diğ, 2013). Modellerde kullanılan bünye denklemlerinde farklı fonksiyonların kullanılması modelleri değiştirir. Yükün malzemeye uygulanma koşullarına göre değişen deneysel olarak belirlenen malzemelerin mekanik özelliklerine ait sonuçlar, bünye denklemlerindeki fonksiyonların temelidir.

Nanokompozit malzemelerin sayısal modeller kullanılarak incelenmesi için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Elastisite modülü değerinin incelenebilmesi ve matematiksel olarak hesaplanabilmesi için sıkça kullanılan sürekli ortamlar mekaniği yerine alt başlığı olan sürekli ortamlar mikromekaniğinin kullanılması gerekmektedir. Kullanılabilecek mikromekanik modellere örnek olarak mukavemet yaklaşımı, Cox modeli, Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi, Halpin-Tsai modeli verilebilir (Kaw, 2005; Hu ve diğ, 2010). Mikromekanik modellerden farklı olarak, sonlu elemanlar yöntemi ile de malzemelerin mekanik özellikleri belirlenebilmektedir.

1.4.2.1 Mukavemet yaklaşımı

Mukavemet yaklaşımı olarak, matris malzemesinin ve takviye malzemenin elastisite modülü değerleri ve hacimce oranları kullanılarak hesaplamalar yapılır. Hesaplamalar sonucunda üretilen kompozit malzemenin boyuna ve enine yönde elastisite modülü değerleri elde edilir (Kaw, 2005). Denklem 1.9 ve denklem 1.10 kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilir. Denklemlerde kullanılan E_L , E_T , E_F , E_M , V_f , V_M terimleri sırasıyla oluşturulacak kompozitin boyuna elastisite modülü, enine elastisite modülü, lif takviyesinin elastisite modülü, matris malzemesinin elastisite modülü, takviye

malzemesinin hacimce oranı ve matris malzemesinin hacimce oranını karşılaşmaktadır.

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (1.9)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (1.10)$$

1.4.2.2 Cox modeli

Cox modeli, Mukavemet yaklaşımında olduğu gibi lif takviyeli kompozitler için oluşturulmuş mikromekanik modellerin ilkidir. Kompozit malzemeyi oluşturan takviye malzemesinin, matris ile ara yüzeyi olarak tanımlanan temas yüzeyindeki kayma gerilmeleri kullanılarak oluşturulan kompozit malzemeye ait elastik sabitler hesaplanır. Modelde kullanılan lifin, l uzunluğuna, r_f yarıçapına sahip olacak şekilde R yarıçaplı eş merkezli silindir şeklindeki matris kabuğunda yerleştiği kabulü yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda denklem 1.11 kullanılarak, elde edilecek malzemenin boyuna elastisite modülü değerleri elde edilmiştir (Cox, 1952). Denklemdeki E_L , η_L , V_f , E_f , E_m terimleri sırasıyla oluşturulan malzemenin boyuna elastisite modülü, uzunluğa bağlı etkinlik sayısı, takviye malzemesinin hacimce oranı, takviye malzemesinin elastisite modülü, matris malzemesinin elastisite modülünü temsil etmektedir. η_L ifadesi, denklem 1.12 ve 1.13 ile hesaplanır.

$$E_L = \eta_L V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (1.11)$$

$$\eta_L = 1 - \frac{\tanh(\beta l/2)}{\beta l/2} \quad (1.12)$$

$$\beta^2 = \frac{4\mu_m}{r_f^2 E_f \ln(K_R/V_f)} \quad (1.13)$$

Hesaplamalarda yer alan K_R parametresi, takviye paketleme düzenine bağlı olan bir sabittir ve belirli durumlarda aldığı değerler çizelge 1.1 de sunulmuştur (Tucker III ve Liang, 1999).

Çizelge 1.1 : K_R parametresinin paketleme düzenine bağlı değerleri.

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

Cox modeli, kompozit malzemenin boyuna elastisite modülü değerinin hesaplanmasına yardımcı olmaktadır ancak elastik sabitlerinin hepsinin hesaplanamamasından dolayı yetersiz olarak kabul edilmektedir.

1.4.2.3 Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi

Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, analitik ve kapalı denklemler ile hesaplanabilmektedir. Yöntemin, parçacık takviyesi içeren kompozit malzemelerin homojenleştirme işlemi için analitik olarak çözüm bulabilmesinden dolayı süreç kolaylaşmaktadır ve sonuçlar doğrulukla elde edilebilmektedir. Hesaplamaların öncesinde kullanılan parçacık veya lif takviyesinin malzeme içerisinde düzgün bir şekilde dağıldığı kabulü yapılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, farklı takviyeler içeren kompozit malzemelerin homojenleştirilmesi için sıkça kullanılan yöntemler arasında olduğu görülmüştür (Mori ve Tanaka, n.d.; Kim ve diğ, 2017; Mirkhalaf ve diğ, 2020; Singh ve diğ, 2016; Acarer ve diğ, 2021).

Analitik olarak yazılabilen bu yöntem, homojenleştirme için kullanımının kolay ve doğruluğunun yüksek olmasından dolayı çalışmada tercih edilmiştir. Tasarlanan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri için çeşitli matematiksel yaklaşımlar kullanılmıştır ve değerler ortalama olarak hesaplanmıştır (Kırış, 2007). Denklemlerde kullanılan terimler belirtilmiştir.

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

Kompozit Malzemenin Şekil Değiştirme Tansörü: $\bar{E}$

Kompozit Malzemenin Etkin Elastisite Modülü: L

$$E^T = -(L_1 - L_0)[(L_1 - L_0)(f_0S + f_1I) + L_0]^{-1}E^0 \quad (1.14)$$

$$\bar{E} = E^0 + f^1E^T \quad (1.15)$$

$$\bar{\sigma} = L\bar{E} \quad (1.16)$$

$$L \equiv L_0\{1 - f_1(L_1 - L_0)[(L_1 - L_0)(f_0S + f_1I) + L_0]^{-1}\}^{-1} \quad (1.17)$$

Denklem 1.14 – 1.17 kullanılarak, bilgisayar ile kompozit malzemelerin modellenmesi ve homojenleştirme işleminin gerçekleştirilmesi sağlanabilir. Bilgisayar programları da kullanılarak hesaplamalar hızlı bir şekilde, malzemeye ait yoğunluk, elastisite modülü, takviye malzemesine ait parçacık en-boy oranı ve hacim oranları değerleri ile birlikte gerçekleştirilebilir (Trzepieciński ve diğ., 2017; Ogierman ve Kokot, 2013). Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi ile malzemenin statik yük altındaki davranışlarını öngörülür.

1.4.2.4 Halpin-Tsai modeli

Mikromekanik modellerin yetersiz kaldığı durumlarda yeni modeller ve hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Örnek olarak mukavemet yaklaşımı kullanılarak elde edilen enine elastisite modülü ve düzlem içi kayma modülünü değerlerinin deney sonuçları ile tutarlı olmadığı gözlemlenmiştir ve bu doğrultuda elastik özelliklerin ve lif hacim oranlarının kullanıldığı Halpin-Tsai modeli geliştirilmiştir. Elastisite ile ilgili malzeme değerlerinin eğriye oturtularak denklemler oluşturulması sonucunda hesaplamalar yapılabilmektedir. Halpin-Tsai modelinde kullanılan bağıntılar Denklem 1.18 – 1.20 olarak belirtilmiştir. Denklemlerde kullanılan E_L , E_F , E_M , V_f , V_m , E_T , ξ terimleri sırasıyla boyuna elastisite modülü, takviye malzemesinin elastisite modülü, matrisin elastisite modülü, takviyenin hacimce oranı, matrisin hacimce oranı, enine elastisite modülü, eyafların geometrisine ve yükleme koşullarında bağlı olan takviye faktörünü temsil etmektedir (Bisoi ve diğ., 2024; Kaw, 2005).

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (1.18)$$

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (1.19)$$

$$\eta = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi} \quad (1.20)$$

1.4.2.5 Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi, özellikle kısmi diferansiyel denklemleri içeren mühendislikteki karmaşık problemleri çözmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Sürekli olarak tanımlanabilecek bir alanın sonlu elemanlar adı verilen daha küçük,

daha basit parçalara ayrılmasını içerir. Bu elemanlar düğüm noktalarına bağlanır ve malzemenin davranışını yöneten denklemler her bir eleman içinde çözülerek tüm problem için yaklaşık bir çözüm sağlanır. Bu yöntem yapısal analiz, ısı transferi, akışkan dinamiği ve diğer birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi, çeşitli ölçeklerdeki problemleri çözmek için kullanılan sayısal bir araç olsa da sürekli ortam mikromekaniğini, mikro ölçekteki malzeme davranışını anlamak ve bunu makro ölçekle ilişkilendirmek için teorik bir temel sağlar. Bu yöntem, mikromekanikten türetilen etkin özellikleri kullanarak kompozit malzemelerin veya diğer heterojen malzemelerin davranışını simüle etmek için mikromekanik modeller içerebilir. Dolayısıyla, sonlu elemanlar yönteminin kendisi sürekli ortam mikromekaniğinin bir alt kümesi olmasa da karmaşık malzemeleri ve yapıları analiz etmek için mikromekanik teorilerle birlikte kullanılabilir. Literatürdeki çalışmalar incelendiği zaman, deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılarak deney sonuçlarının incelenmesi için sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı görülmüştür (Hassanzadeh-Aghdam, 2021; Ishikawa ve Chou, 1983; Kliem ve diğ, 2019).

Sonlu elemanlar yönteminin bilimsel çalışmalar için avantajları göz ardı edilmemelidir. Karmaşık geometrilere sahip malzemelerin analizlerinin gerçekleştirilebilmesi, malzeme özelliklerine göre kolay bir şekilde kullanılabilir olması, sürekli ve süreksiz olabilen değişken yüklerin basit bir şekilde incelebilmesi, denklemlerin oluşturulması ile birlikte sınır koşullarının kolay bir şekilde modele dahil edilebilmesi, matematiksel olarak genelleştirilip çeşitli problemlerin çözümüne imkan sağlaması sonlu elemanlar yönteminin avantajlarına örnektir. Aynı zamanda matematiksel temelinin detaylı olması, çalışmalar için önem arz etmektedir.

Avantajlarının yanı sıra, sonlu elemanlar yöntemini kullanırken dikkat edilmesi gereken hususlar da bulunmaktadır. Modelde kullanılacak sonlu eleman tipinin ve büyüklüğünün doğru bir şekilde belirlenmesi ve yükün yayılı veya noktasal olacağına karar verilmesi gibi yöntemin sonuçlarını doğrudan etkileyebilecek, hatalara sebep olabilecek durumlar vardır. Bu sebeplerden dolayı sonlu elemanlar yönteminde kullanılacak girdilerin doğru ve net bir şekilde modele aktarılması gerekmektedir.

Yöntemin olumsuz yanı, çözülmesi gereken problemin zorluğuna ve karmaşıklığa bağlı olarak çözüm için harcanacak zamanı ve kullanılacak işlem gücünü artırmaktadır. Zamanın ve işlem gücünün planlı olarak yönetilmesi gerekmektedir.

1.5 Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu yardımıyla malzemelerin iç yapısı nano ölçekte fiziksel olarak gözlemlenebilir. Çalışmalarda genel olarak anlaşılabilirlik için, karışıklık yaşanmaması adına İngilizce karşılığının kısaltması olan “SEM” kısaltması kullanılır. Kompozit malzemelerde kullanılan takviyelerin, matris yapısının içinde homojen olarak dağılması oldukça önemlidir. Dağılımın düzgün gerçekleşmesi sonucunda malzeme özelliklerinin yönden bağımsız olduğu, yani malzemenin izotrop olduğu kabulü yapılır ve bu sayede deney sonuçları, sayısal analiz sonuçları ile tutarlılık gösterir. SEM incelemesinin yapılmasının sebebi, malzemenin iç yapısının gözlemlenerek takviyelerin yapı içerisine dağılmalarının incelenmesidir. Nano ölçekli malzemeler kullanılarak gerçekleşen imalat sonucunda iç yapıda meydana gelebilecek topaklanmaların olup olmadığı, hava veya dış unsurlardan kaynaklanan gözenek gibi süreksizliklerin varlığı ve dağılımları incelenir. Malzeme iç yapısında olası çentik etkisi yaratabilecek bölgeler incelenerek imalatın başarısı gözlemlenmiş olur. SEM incelemesi, hava moleküllerini etkisizleştirmek ve görüntülenmenin net gerçekleştirilebilmesi için vakum altında yapılır. Görüntüleme yapılacak bölgeye elektronlar çarptırılır ve tarayarak görüntü elde edilir. Işık mikroskoplarına göre daha yüksek çözünürlüklerde detaylı görüntüler elde edilebilir. Görüntülerin kalitesi ve detaylardan dolayı akademik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılır (Abdullah ve Mohammed, 2019; Zhou ve diğ, 2007; Khaskhanova ve diğ, 2022). Literatürde, kompozit malzemelerin iç yapısındaki farklı malzemelerin birbirleri ile etkileşiminin öneminden dolayı, SEM analizinin farklı alanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda sıkça kullanıldığı görülmüştür (Pucha ve Worthy, 2014; Fidelus ve diğ, 2005).

1.6 Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemi

Kompozit malzemelerin imalatı için farklı yöntemler bulunmaktadır. Çalışma alanlarındaki örnekler incelendiğinde kompozit imalat yöntemlerinin, elde edilmek istenilen ürünlere göre çeşitlilik gösterdiği görülmüştür. Kalıpla gerçekleştirilen döküm işlemi için açık kalıplama olarak el yatırması, püskürtme ve elyaf sarma yöntemleri mevcuttur. Kapalı kalıplama üretimi için ise vakum torbalama, vakum infüzyon, reçine transferi, sıkıştırma, reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerin yanı sıra, sıcaklık ve basınç değerlerinin hassas ayarı için otoklav kalıplama gerçekleştirildiği görülmüştür (Bello ve diğ, 2015).

Matris malzemesi olarak termoset malzeme kullanılan kompozitlerin imalatı için sıcaklık ve basınç değerleri önemlidir. Aynı zamanda üretim sırasında malzeme içerisine yerleşebilecek hava kabarcıklarının giderilmesi gerekmektedir. Otoklav kalıplama yöntemi, yüksek basıncın ve uygun sıcaklığın ayarlanabilmesinden dolayı bu sebeplerle tercih edilmektedir. Değerlerin düzenli olarak kontrolüne ihtimal sağlamaktadır.

Açık kalıplama yöntemleri arasından el yatırması yöntemi, basit olması ve ekonomikliğinden dolayı kullanılan en yaygın yöntemdir. Kalıba tek tek yerleştirilen elyaf takviyelerin arasına fırça yardımıyla reçine uygulanır. Püskürtme yöntemi, el yatırması yöntemine benzer bir şekilde gerçekleştirilir. Püskürtme tabancası yardımıyla takviye ve matris malzemeleri aynı anda veya ayrı ayrı olarak püskürtülebilir. Sonrasında sıkışan havanın uzaklaştırılması için püskürtülen malzeme üzerinden rulo geçirilir.

Filament sarma yöntemi, diğer açık kalıplama yöntemlerinden farklılık göstermektedir. Dönen mandrel üzerindeki filamentlerin, reçine banyosundan geçirildikten sonra gerilme altında sarılması gerçekleştirilir. Fiber oryantasyonları düzgün bir şekilde ayarlanabilir. Bu yöntem genel olarak tek yönlü kompozit malzemelerin imalatında kullanılmaktadır ve elde edilen kompozitler yöne bağlı olarak iyi mekanik özelliklere sahip olurlar. Yüksek çekme mukavemeti değerlerine sahip olunması istenen uygulamalarda sıkça tercih edilir.

Kapalı kalıpta kompozit imalatı için yaygın olarak tercih edilen yöntem reaksiyon enjeksiyonlu kalıplama yöntemidir. Karmaşık ve yüksek hacimde olan tasarımların imalatını sağlayan bu yöntemde, bileşenler düşük basınçta kapalı kalıba enjekte edilir. Özellikle termoplastik reçineler için sıkça kullanılan bir üretim yöntemidir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında, imal edilen malzemelerin modellemesinin gerçekleştirilebilmesi için sayısal modellemeler ile birlikte deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sonuçların kendi aralarında tutarlı olması ve doğruluklarının yüksek olması için çekme deneyi, üç noktadan eğme deneyi ve çentik darbe deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler ile elde edilen sonuçlar sayısal modelleme yaklaşımları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Deneyler sonucunda kırılan numuneler, SEM görüntüleri ile birlikte incelenmiş ve yorumlanmıştır.

2.1 Deneysel Çalışmalar

Çalışmada, imal edilen kompozit malzemelerin karakterlerinin incelenmesi için sayısal yöntemlerin haricinde deneysel yöntemler de kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır ve yorumlanmıştır. Deneyler, dış faktörlerin etkilerinin minimumda tutulması için oda sıcaklığında, kabul edilebilir nem oranında, yavaş artan yük altında gerçekleştirilmiştir. Bu şartlarda, malzemede gerçekleşen şekil değiştirmenin yalnızca iç yapıya bağlı olması sağlanmıştır. Viskoelastik olarak tanımlanan malzemelerde, zorlanma altındaki malzeme davranışı yükleme hızına göre değişiklik gösterdiği için yükleme hızının ayarlanması önemlidir. Çalışmada imal edilen nanokompozit malzemelerin karakter analizlerinin yapılabilmesi için çekme, üç noktadan eğme, çentik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme ve üç noktadan eğme deneyleri, statik kabul edilen hızda gerçekleştirilmiştir.

Deneyler ile birlikte, takviye olarak HNT, CNF ve ikisinin birlikte farklı oranlarda bulunduğu nanokompozit malzemelerin rijitlik, süneklik gibi özellikleri sayısal değerler yardımıyla gözlemlenmiştir.

2.1.1 Çekme deneyi

Çekme deneyi için kullanılan makina, düşey ekseninde hareket edebilen üst çeneden ve sabit alt çeneden oluşmaktadır. Deney sırasında, numunenin konumundan kaynaklı

burulma etkisinin giderilmesi için, çeneler kendi eksenini etrafında minimal hareket kapasitesine sahiptir. Deney standartlarında uygun imal edilmiş numunelerin, hareket etmeyecek şekilde çenelerin arasına bağlanması gerekmektedir. Yükenin aksel olarak etki edebilmesi için numunelerin çenelere yerleştirilmesine dikkat edilir ve çenelerdeki olası kaymalar engellenir. Aksi takdirde elde edilen sonuçlardaki değerler, malzemenin yanlış bir şekilde yorumlanmasına sebep olur. Deneyde, düşey ekseninde hareket edebilen üst çene yardımıyla numuneye yavaşça artan çekme kuvveti uygulanır. Numunenin kopmasına kadar uygulanan kuvvet ve çenedeki yer değiştirme miktarı makina tarafından ölçülür ve veriler uygun bir formatta aktarılır. Deneysel yöntemler bölümünde bahsedilen denklemler yardımıyla gerilme – birim şekil değiştirme grafiği elde edilerek malzemenin elastik ve plastik şekil değiştirmesi hakkında bilgi sahibi olunur. Deney, uygun bir birim şekil değiştirme hızında gerçekleştirilir.

Çalışmada; saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi numunelerine çekme deneyi yapılmıştır.

Deneyler, imal edilen nanokompozit malzemelerin statik yük altındaki davranışının gözlemlenmesi için gerçekleştirilmişlerdir. Shimadzu AG-IS 50kN Universal Test Machine isimli makina kullanılmıştır. Makinaya ait fotoğraf, şekil 2.1’de verilmiştir. Statik kabul edilen 0,01 birim şekil değiştirme/dakika olacak şekilde çekme hızı ayarlanmıştır ve çenenin hareket hızı olarak makineye girilmiştir. Her malzeme grubu için 3 adet numune ile çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler kendi içlerinde ve aralarında karşılaştırılmışlardır. Çekme numuneleri için ASTM D638 standardı kullanılmıştır (ASTM, 2006).



Şekil 2.1 : Çekme deneyi makinası.

2.1.2 Üç noktadan eğme deneyi

Üç noktadan eğme deneyleri de Shimadzu AG-IS 50kN Universal Test Machine makinasında gerçekleştirilmiştir. Makinanın çeneleri değiştirilerek üç noktadan eğme deneyi için uygun bir hale getirilmiştir. Deney için, düşey ekseninde hareketli üst çene ve sabit alt mesnetler kullanılmıştır. Üst çene, basma kuvvetinin düzgün bir şekilde numuneye uygulanabilmesi için uç kısmında bir silindir parça içerir. Alt mesnetlerin arasındaki mesafe ölçülerek deney için ayarlanmıştır. Deneyin gerçekleştirilebilmesi için üç noktadan eğme standartlarına uygun olarak imal edilen numuneler çenelerin arasına simetrik bir şekilde yerleştirilmiştir. Basma kuvveti, numunenin tam merkezine denk gelecek şekilde yavaş bir şekilde artarak uygulanmıştır. Kuvvet ve üst çenenin hareket mesafesi, dolayısıyla numunede meydana gelen sehim anlık olarak makina tarafından ölçülmüştür ve aktarılmıştır. Deneysel yöntemler bölümünde bahsedilen denklemler kullanılarak kuvvet ve yer değiştirme değerleri gerilme – birim şekil değiştirme değerlerine dönüştürülüp oluşan eğriler incelenmiştir.

Çalışmada; saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi numunelerine üç noktadan eğme deneyi yapılmıştır. Deneyler, imal edilen malzemelerin statik kabul edilen birim şekil değiştirme hızı altındaki davranışlarının gözlemlenmesi için gerçekleştirilmiştir. Hız 0,01 birim şekil değiştirme/dakika olacak şekilde ayarlanmıştır ve numunelerin

ebatlarına göre üst çenenin hareket hızı makinaya girilmiştir. Her malzeme grubu için üç farklı numune ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Üç noktadan eğme numuneleri, ASTM D790 standardına uygun olarak hazırlanmıştır ve bu şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir (ASTM, 2002).

2.1.3 Çentik darbe deneyi

Çalışmada imal edilen numunelerin, dinamik olarak kabul edilebilecek darbe etkisindeki davranışlarının gözlemlenebilmesi için çentik darbe deneyleri yapılmıştır. Farklı takviye kombinasyonlarında hazırlanan malzemelerin, kırılmadan önce absorbe ettikleri enerji miktarlarının, dinamik tokluklarının, karşılaştırılması ve takviye çeşitlerinin darbe enerjisi üzerindeki etkisinin yorumlanması amaçlanmıştır.

Çentik darbe deney düzeneği, malzeme türlerine göre çeşitlilik göstermektedir. Deneyler gerçekleştirilmeden önce numunelere uygun Joule değerine sahip olan çekiç seçilir ve ibre ayarlanır. Çekiç belirli bir yüksekliğe çıkarılır ve sonrasında numune, çekicinin çentiğinin zıt yüzeyine çarpabileceği şekilde alt kısma yerleştirilir. Potansiyel enerjiye sahip olan çekiç, deney sırasında enerjisinin bir miktarını numuneye çarparak aktarır. Çekişte meydana gelen enerji farkı, çekice paralel hareket eden ibre yardımıyla okunur ve bu değer numunenin dinamik tokluk değeri olarak not edilir.

Çalışmada; saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi numunelerine çentik darbe deneyi yapılmıştır. Çentik darbe deneyi numuneleri ASTM D638 standardına uygun bir şekilde hazırlanmıştır ve deneyler bu şekilde gerçekleştirilmiştir (Astm-D6110-10, 2010). Her malzeme grubu için 3 farklı numune ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada yapılan çentik darbe deneyleri, Devotrans marka DVT CD48 numaralı model düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Düzeneğe ait fotoğraf, şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Çentik darbe deneyi düzeneği.

2.2 Sayısal Analiz ile Modelleme

Kompozitlerin imalatının, ekonomik ve süre olarak maliyetleri olmaktadır. Oluşturulacak yeni malzemeler için imalat sürecinin belirlenip çeşitli deneylerin tekrarlı gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Sürecin uzun ve maliyetli olmasından dolayı çalışmada malzemelerin önceden modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Kompozit yapısının içerisindeki takviyelerin homojen olarak dağılmama durumu modelleme aşamasını zorlaştırmaktadır ve bu yüzden birtakım yöntemlerle homojenleştirmenin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Literatür araştırması yapıldığında, nano ölçekli takviyeler içeren kompozit malzemelerin modellenmesinde Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan çalışmalar bulunmuştur (Tüfekci, 2023; Brassart, 2010; Catalanotti, 2016).

2.2.1 Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi

Malzemelerin sayısal olarak modellenmesi için kullanılan homojenleştirme yöntemleri, yazılımlar yardımıyla kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Örnek olarak, MSc Software firmasına ait Digimat MF yazılımı verilebilir. Çok ölçekli bir malzeme modelleme yazılımı olan Digimat MF ile gerçekleştirilebilecek mikromekanik analizlerden için kullanılacak modellerden bir tanesi de Mori-

Tanaka'dır. Analizin gerçekleştirilebilmesi için tasarlanacak kompozit malzeme içerisindeki matrise dağılmış olan takviyelerin boyutları, oryantasyonları ve dağılımlarının programa tanıtılması gerekmektedir. Program tarafından hesaplanarak simüle edilecek malzeme için ayrıca elastisite modülü değerleri ve takviye malzemelere ait en boy oranlarının da önceden tayin edilmesi gerekmektedir.

Mori-Tanaka homojenleştirme yönteminin gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak geometrinin tanımlanması gerekmektedir. Temsili hacim elemanı oluşturularak matrisin ve matrisin içine dağılan takviyelerin simüle edilmesi ile modellenme işlemine başlanır. Yapı içerisinde bulunan bütün malzemelerin boyutlarının, matris içindeki beklenen dağılımlarının düzgün bir şekilde tanımlanmalıdır. Mori – Tanaka yöntemi için takviyelerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve gerilmenin de matris ile takviye arasında uyumlu bir şekilde dağıldığı varsayımları yapılır. Bu varsayımlarla birlikte sürekli ortamlar mekaniği kullanılarak tekrarlı denklemler kullanılır ve hesaplamalar gerçekleştirilir.

Literatür incelendiği zaman Digimat yazılımı kullanılarak homojenleştirme işleminin gerçekleştirildiği çalışmalar görülmüştür (Trzepieciński ve diğ, 2017). Shin ve diğ. (2016), polimer matrisli nanokompozitlerin homojenleştirme işlemini gerçekleştirebilmek için malzemelerin temsili hacim elemanlarını oluşturmuşlardır ve Eshelby çözümü ile iki ölçekli homojenleştirme işlemini Digimat FE yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Farklı bir çalışmada Nayak ve Sahu (2019), grafen ve alüminyum alaşımı içeren nanokompozitlerin karakter analizlerini gerçekleştirmek Digimat yazılımından faydalanmışlardır ve deneysel sonuçlar ile program tarafından hesaplanarak elde edilen değerleri karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir.

Çalışmada; saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi matrisli nanokompozitler için sayısal analiz ile modelleme yapılmıştır.

2.2.2 Sonlu elemanlar yöntemi

Sürekli ortamlar mikromekaniği modellerinden farklı olarak, sonlu elemanlar yöntemi ile de malzemeler için sayısal modellemeler gerçekleştirilebilmektedir. Mori-Tanaka yönteminde de belirtilen, Digimat FE yazılı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak

modelleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Yöntemin kullanılarak modelleme işleminin gerçekleştirilebilmesi için, matris ve takviye malzemelerine ait yoğunluk, elastisite modülü, en-boy oranları ve ortalama çap değerleri programa girdi olarak tanıtılmıştır. Nanokompozit malzemeler için çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemi için, epoksi reçine olan polimer matrisin lineer elastik davranış gösterdiği ve izotropik olduğu, takviye malzemelerin matris içerisinde rastgele bir dağılımla homojen olarak matris içerisine dağıldığı kabulü yapılmıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiği zaman, nanokompozit malzemelerin homojenleştirilmesi için sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı görülmüştür. Bouchak ve diğ. (2009), nano ölçekte fiber takviyeli kompozitlerin sayısal olarak modellenmesini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yazılımlar ile gerçekleştirmişlerdir, matris ve takviye malzemeye ait stres değerlerini çalışma sonucu olarak sunmuşlardır.

Çalışmada; saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi matrisli nanokompozitler için sayısal analiz ile modelleme yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan farklı sayısal modellerin sonuçları ve elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu

Çalışmada imal edilen nanokompozit numunelerin karakterlerinin incelenmesi ve iç yapılarının görüntülenmesi için SEM'den faydalanılmıştır. İncelemenin gerçekleştirilebilmesi için numune yüzeyleri platin ile kaplanmıştır. Yükün düzgün dağılabilmesi ve net görüntüler elde edilebilmesi için numunelere iletken bant takılmıştır. Sonrasında SEM ile incelemeler başlamıştır. Analizler Boğaziçi Üniversitesi İleri Teknolojiler ARGE Merkez Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.4 Nanokompozitlerin İmalatı

Kompozit malzemeler, yapılarının hassas olmasından dolayı imalat aşamasında dikkat gerektirirler. Takviye olarak ilave edilen malzemelerin, matris malzemesi içinde homojen bir şekilde dağıtılıp olası iç yapı kusurlarının önüne geçilmelidir. Kullanılan

malzemelerin fiziksel durumundan dolayı imalat süreci son derece önemlidir. Yapının homojenliğinin sağlanması için imalat sürecinde farklı yöntemler geliştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Bu bölümde, çalışmada epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin imalat süreci için belirlenen, uygulanan yöntemler ve kullanılan cihazlardan bahsedilmiştir.

İmalat süreci için kullanılacak epoksi ve takviye nano parçacıklar, beher yardımıyla elektronik hassas tartı kullanılarak ölçülmüştür.

Epoksi matrisli nanokompozitlerin imalat sürecinde takviye malzemenin, matris içine homojen bir şekilde dağılması önemlidir. Bu doğrultuda imalatın ilk aşamalarında malzemelerin birbirleri içerisinde düzgün bir şekilde karışması için uygun yöntemler ve cihazlar kullanılmalıdır. Literatürdeki çalışmaların da incelenmesi sonucunda, bu çalışmada elektromanyetik karıştırıcı ve ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır.

Epoksi matrisli kompozit malzemelerin imalatında döküm yönteminden yararlanılmıştır. Döküm yönteminden kaynaklanan; malzemenin içinde hava kalması gibi olası iç yapı kusurları mevcuttur. Literatürdeki çalışmalar incelendiği zaman, döküm yönteminin optimize edilmesi için malzemelerin farklı süreçlerden geçtiği anlaşılmıştır. Çalışmalarda, imal edilen numunelerin içerisinde hava kabarcığı kalması gibi durumların önüne geçmek için vakumdan yararlanıldığı, numunelerin jelleşme ve kurlenme aşamalarının da vakum veya etüv ortamının içerisinde gerçekleştirildiği görülmüştür (Jordan ve diğ, 2005; Giannakopoulos ve diğ, 2011). Bu sayede, imal edilen numunelerin kaliteleri artmıştır ve malzemelerin mekanik özellikleri kendi içerilerinde ve karşılaştırmalı olarak tutarlı hale gelmiştir.

Döküm yöntemi kullanılarak epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin imal edilebilmesi için uygun bir kalıp kullanılmalıdır. Çalışmalarda değişkenlik gösteren; metal, teflon, plastik gibi kalıp malzemelerinin seçildiği görülmüştür (Joy ve diğ, 2019; Bello ve diğ, 2015). Bu çalışma için uygun olan kalıp malzemesinin teflon olduğu belirlenmiştir. Teflon kalıp, imal edilecek numunelerin deneylerde kullanılacak çeşidine göre tasarlanmıştır. Kalıpta çekme, üç noktadan eğme, çentik darbe deneyi numuneleri için uygun ebatlarda kesilmiş bölümler mevcuttur.

2.4.1 Hassas tartı

Epoksi matrisli nanokompozitlerin imalatı hassas bir süreçtir ve dikkat edilmesi gereken unsurlar içermektedir. Numune malzemelerinin, kimyasal halde

karıştırılmalarının öncesinde birtakım hesaplamalar yapılmalıdır. Ağırlıkça malzeme oranının önemli olduğu bu gibi durumlar için kullanılan tartı önemlidir. Uygun malzeme miktarlarını sağlayabilmek için belirli bir hassasiyete sahip tartı kullanılmalıdır.

2.4.2 Elektromanyetik karıştırıcı

Elektromanyetik karıştırıcı için kullanılan cihaz, basit bir karıştırma işlemi gerçekleştirmektedir. El ile yapılacak karıştırma işleminin daha düzgün gerçekleştirilmesini sağlamanın yanı sıra karıştırma işlemi için uygun sıcaklık değerini de sağlayabilmektedir. Cihazın üzerinde karıştırma işlemi için devir ayarı ve sıcaklık ayarı yapabilmek için çevirmeli buton bulunmaktadır.

Elektromanyetik karıştırıcı, malzemeleri manyetik olarak karıştırabilmek için balık olarak isimlendirilen bilyaya ihtiyaç duymaktadır. Beher içerisinde bulunan malzeme karışımının içerisinde bilya atıldıktan sonra cihaz üzerinde devir ve sıcaklık ayarlamaları yapılarak karıştırma işlemine başlanılır. Bilya kendi etrafında dönerek, nano ölçekli takviyelerin matrisin içerisinde düzgün bir şekilde dağılması sağlanır. Çalışmada, bütün malzeme grupları için elektromanyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Cihazın ait fotoğraf, şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Elektromanyetik karıştırıcı.

2.4.3 Ultrasonik karıştırıcı

Bahsedildiği gibi, nano ölçekli takviyeler içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin imalat sürecinde kullanılan takviyelerin matris içine homojen bir şekilde dağılması son derece önemlidir. İmal edilecek malzeme çeşidine göre elektromanyetik karıştırıcının yetersiz kaldığı durumlar olmaktadır. Literatür araştırmalarında, kompozit imalatı sürecinde ultrasonik karıştırıcının, elektromanyetik karıştırıcı ile birlikte kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada da imalat sürecinde ultrasonik karıştırıcının kullanılmasına karar verilmiştir.

Ultrasonik karıştırıcı, ucundaki prob yardımıyla malzemeleri yüksek frekansta titreştirerek karıştırma prensibine sahiptir. Probun beraberinde cihazın çalışma frekansını ve genliğini ayarlayabilmek için harici bir elektronik aksam bulunmaktadır. Ultrasonik karıştırıcı kullanılarak, numune imalatı için kullanılacak karışımların homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır ve gözle görülebilir takviye parçacığı kalmadığına emin olunmuştur. Çalışmada, yalnızca HNT takviyeli malzeme grupları için ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. CNF takviyesi içeren malzeme grupları için probun hassasiyetinden dolayı sadece elektromanyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan cihaza ait görsel şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Ultrasonik karıştırıcı.

2.4.4 Kalıp tasarımı

Nano ölçekli takviyeler içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin imalatında döküm yönteminden yararlanılmıştır. Döküm yönteminin gerçekleştirilebilmesi için uygun bir kalıba ihtiyaç vardır. Öncesi bölümlerde de belirtildiği gibi kalıp malzemesi ve ebatları için literatür araştırması yapılmıştır. Araştırmalar sonucunda bu çalışma için kullanılacak kalıp malzemesi olarak teflon seçilmiştir. Numuneler kullanılarak çekme, üç noktadan eğme ve çentik darbe deneyleri yapılması belirlendiği için teflon kalıplar, deneylere uygun numunelerin imalatını gerçekleştirebilecek şekilde kesilmişlerdir. Numune standartlarına göre tasarlanan teflon kalıplar şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5 : Çalışmada kullanılan teflon kalıplar.

2.4.5 Vakumlu etüv

Literatürdeki çalışmalar ve öncesinde tecrübe edilen deneysel çalışma sonuçları incelendiği zaman, imal edilecek nano ölçekli takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin yapılarının içerisinde hava kabarcığı kalmaması oldukça önemlidir. İmalat sürecinden kaynaklanan kabarcık gibi iç yapı kusurları, malzemeleri gevrekleştirir ve dayanım değerlerini düşürür. Elde edilen sonuçların hem kendi içerilerinde hem de birbirleri arasında tutarsız olmasına sebep olur. Bu sebeplerden dolayı imalat aşamasında vakumdan yararlanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Numunelerin imalat süreci için kullanılacak vakumun nasıl sağlanacağı araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda çeşitli vakum odaları veya vakumlu etüvlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışma için laboratuvarındaki vakumlu etüv cihazının, numunelerin imalat sürecinde kullanılması için uygun olduğu anlaşılmıştır. Weightlab Instrument marka vakumlu etüv cihazı kullanılmıştır. Cihaz, vakumun yanı sıra belirli sıcaklık değeri aralığını da sağlayabilmektedir. Zamanlayıcı ile birlikte sıcaklığı ayarlayabilme kapasitesine sahiptir. Vakum için cihaz içerisindeki hava basıncı gösteren bir ibre mevcuttur. Cihaz, vakumu sağlayabilmek için dışarıdan bir hava pompasına ihtiyaç duymaktadır. Dışarıda bulunan pompa yardımıyla, cihaz üzerindeki vana ile birlikte etüvün içerisindeki hava boşaltılabilir duruma gelmektedir. Vakumlu etüve ait görseller şekil 2.6’da verilmiştir. Çalışmadan kullanılacak numunelerin imalat sürecinden önce cihaz test edilmiştir ve vakum değerlerinin kontrolü yapılmıştır. Değerlerin uygun olduğuna karar verilmiştir.

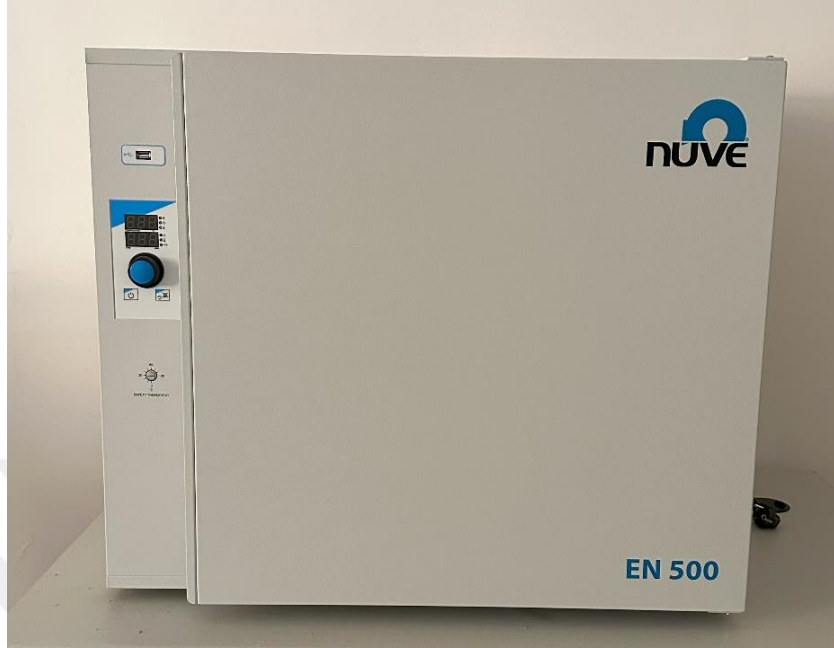


Şekil 2.6 : Vakumlu etüv.

2.4.6 Etüv

Epoksi matrisli nanokompozitlerin imalat sürecinde, döküm aşaması sonrası numunelerin jelleşme ve kürlenme süreçlerin malzemelerin bütünlüğü açısından önem arz etmektedir. Vakum yardımıyla hava kabarcıkları giderilen numunelerin kürlenme süreci nüve etüv vb. kullanıldığı literatürde görülmüştür. Ayrıca numunelerin imalatından önce malzemeler, nemden uzaklaştırılmak için etüvde bekletilmiştir. Nüve etüv, sıcaklık ve süre ayarı yapabilme kapasitesine sahiptir. Üzerindeki elektronik ekran yardımıyla sıcaklık ve süre değerleri incelenebilmektedir.

Laboratuvarında bulunan Nüve marka etüvün süreç için uygun olduğu anlaşılmıştır ve kullanılmıştır. Kullanılan etüve ait fotoğraf şekil 2.7’de verilmiştir



Şekil 2.7 : Kırılma süreci için kullanılan etüv.

2.4.7 Nanokompozitlerin imalat aşamaları

Nano ölçekli takviyeler içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin imalatı hassas süreçler içermektedir. Bütün aşamaların dikkatli bir şekilde, hesaplı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada ilk olarak, numunelerin imalatı için karışımlarda kullanılacak malzeme miktarları hesaplanmıştır. Hesaplanan malzeme miktarlarının düzgün bir şekilde ayarlanması için imalatının öncesinde kullanılacak bütün malzemeler elektronik hassas tartı yardımıyla, beher içerisinde dala alınarak ölçülmüştür.

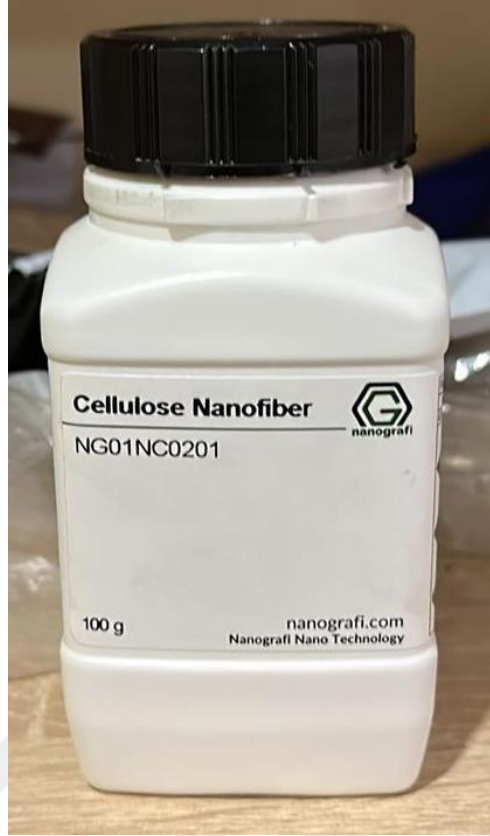
Nanokompozit karışımlarının hepsinde kullanılacak epoksi reçine olarak Hexion firmasına ait MGS® L 285 ve sertleştirici olarak da Hexion firmasına ait MGS® 287 laminasyon seti seçilmiştir. Epoksi reçine, malzeme türü olarak termoset polimerdir. Sertleştirici malzeme ise epoksi reçine için hazırlanmış katalizör ve kür kimyasalıdır.

Çalışmada, belirli malzeme gruplarında epoksi matrise Halloysite nanotüp (HNT) takviyesi yapılmıştır. Halloysit nanotüp takviyesi, çapları 50 ila 60 nm arasında, uzunlukları 0,5 ila 10 µm arasında olan nano ölçekli tüp şeklindeki takviyelerdir. Toz halindeki bu takviye, nemden uzak tutulması için imalat sürecinden önce etüvde 24 saat boyunca 60 °C ‘da bekletilmiştir. Nanografi Nano Technology firmasından satın alınan HNT malzemesinin bulunduğu kutu şekil 2.8’de sunulmuştur.



Şekil 2.8 : HNT takviye malzemesi.

Çalışmada ayrıca kullanılan selüloz nanofibril (CNF) malzemesi de Nanografi Nano Technology firmasından temin edilmiştir. Toz şeklinde bulunan takviye, 10 ila 20 nm arasında genişliğe ve 2 ila 3 µm arasında uzunluğa sahiptir. Yapı olarak dolgulu iğnemsî kristallerden oluşmaktadır. Takviye, nemden uzaklaştırılmak için, HNT takviyesi gibi, etüvde 24 saat boyunca 60 °C ‘da bekletilmiştir. Toz halindeki CNF malzemesinin bulunduğu kutu şekil 2.9’da sunulmuştur.



Şekil 2.9 : CNF takviye malzemesi.

Epoksi matrise ilave edilecek takviyeler ağırlıkça %0,5 ve %1 oranlarında olacak şekilde ayrı ayrı hazırlanmıştır. Malzeme gruplarına göre belirlenen oranlar kullanılarak karıştırma aşamalarına geçilmiştir. Hesaplamalar ve ölçümler, bu oranlara göre gerçekleştirilmiştir.

Malzemelerin imal edilmeye başlanması için ilk olarak CNF veya HNT takviyesi beher içerisinde tartılmıştır. Sonrasında behere epoksi reçine tartılarak ilave edilmiştir. Karıştırılma işlemi için beher içerisine manyetik bilye atılarak beher, elektromanyetik karıştırıcıya yerleştirilmiştir. Sıcaklık ve devir ayarı cihaz üzerinden yapılarak karıştırılma işlemi başlatılmıştır ve yaklaşık 90 dakika boyunca malzemelerin karışması sağlanmıştır. Yalnızca HNT takviyesi içeren malzeme grupları ve takviyelerin bir arada bulunduğu gruplarda HNT takviyesine ait beherler, elektromanyetik karıştırıcının dışında ultrasonik karıştırıcı yardımı ile de karıştırılmıştır. Bu sayede HNT takviyesinin epoksi matris içinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Ultrasonik karıştırıcı, %30 amplitude frekansında 3 dakika boyunca kullanılmıştır ve her 45 saniyede cihazın ısınma durumunun kontrolü için cihaz soğutulmaya bırakılmıştır. CNF takviyesi, ultrasonik karıştırıcı probunun hassaslığı sebebiyle yalnızca elektromanyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

Takviyelerin beraber bulunduğu malzeme grupları için, ayrı ayrı karıştırılan beherlerdeki malzemeler birleştirilip tekrar elektromanyetik karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır.

Karışım işlemleri sırasında malzemelerin içerisine havanın karıştığı ve kabarcık olarak bulunduğu gözlemlenmiştir. Hava kabarcıkları gibi iç yapı kusurları istenmediği için malzemeler, karıştırılma işlemlerinden sonra 2 saat boyunca vakumlu etüvde bekletilmiştir. Vakumlu etüv içerisindeki malzemelerden hava kabarcıklarının çıktığı gözlemlenmiştir ve malzeme içerisindeki kabarcıkların minimum seviyeye düşürüldüğüne emin olunmuştur. Vakumlu etüv sürecinde kalıp, kalıp ayırıcı sürülerek hazırlanmıştır. Böylece numunelerin kalıptan çıkarılma aşamasında herhangi bir hasara uğramadan rahat bir şekilde kalıptan ayrılması sağlanmıştır.

Vakumlu etüvden çıkarılan malzemeler, sertleştirici malzeme ilavesine hazır duruma gelmişlerdir. Belirlenen ağırlıkça oranlar sağlanacak şekilde hesaplanıp tartılan sertleştirici malzeme, karışımlarla birleştirilmiştir. Karışım renginin homojenliğinin sağlanması için el ile çubuk yardımıyla karıştırılmıştır. Bütün karışım, kalıp tasarlanırken numuneler için belirlenen kalınlık dikkate alınarak hazırlanan teflon kalıba dökülmüştür. Döküm işlemi sırasında hava ile temas olmasından dolayı dökümün gerçekleştirildiği teflon kalıp tekrar vakumlu etüve yerleştirilmiştir. Kalıba dökülmüş halde olan malzemeler, 2 saat boyunca vakumlu etüvde bekletilmiştir.

Kalıpta bulunan malzemelerin son vakumlu etüv sürecinden sonra kalıp, oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Sonrasında post – kür işlemi için kalıp etüvde 60 °C sıcaklıkta 15 saat tutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneleri, kalıptan ayrılmıştır ve deneylerin gerçekleştirilmesi öncesi 10 gün bekletilmişlerdir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın amacı, CNF ve HNT parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mekanik olarak incelenmesi ve sonuçların araştırılmasıdır. Araştırmanın yapılabilmesi için mekanik deneyler, sayısal çalışmalar yürütülmüş ve taramalı elektron mikroskobu yardımı ile iç yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bütün çalışmalara ait sonuçlara bu bölümde yer verilmiştir.

3.1 DeneySEL Sonuçlar

Çalışmada, ağırlıkça farklı takviye oranlarına sahip olan numuneler ile çekme, üç noktadan eğme, çentik darbe deneyleri gibi mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma grubu olarak takviyesiz epoksi (saf epoksi) içeren numuneler referans alınmıştır ve deney sonuçları bu grupla birlikte incelenmiştir. Bu sayede, numunelerde farklı oranlarda bulunan takviyelerin epoksi matrise olan mekanik özellik etkisi gözlemlenebilmiştir.

3.1.1 Çekme deneyi sonuçları

Farklı oranlarda takviye içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin çekme deneyi sonuçları, karşılaştırmalı olarak bu bölümde verilmiştir. Deneyler statik olarak kabul edilen hızda (%1 birim şekil değiştirme/dakika) gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen elastisite modülü (E), çekme mukavemeti (σ_c) ve kopma uzaması (ϵ_k) değerlerinin incelenmesi bu bölümün kapsamındadır.

Deneyler sonucunda elde edilen değerler incelendiğinde HNT ve CNF takviyesinin yapıda ayrı ayrı bulunduğu malzemenin rijitliğini artırdığı, elastisite modülü değerlerine bakılarak gözlemlenmiştir. Farklı yüzdelerde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, çalışmada numuneler için belirlenen ağırlıkça takviye yüzdeleri artığında malzemenin mekanik özelliklerinin de iyileştiği görülmüştür. Literatüre bakıldığında, takviyelerin ayrı ayrı bulunma durumları için değerlerin birbirlerini doğruladığı anlaşılmıştır. Takviyelerin birlikte bulunma durumları da sonuçlarda

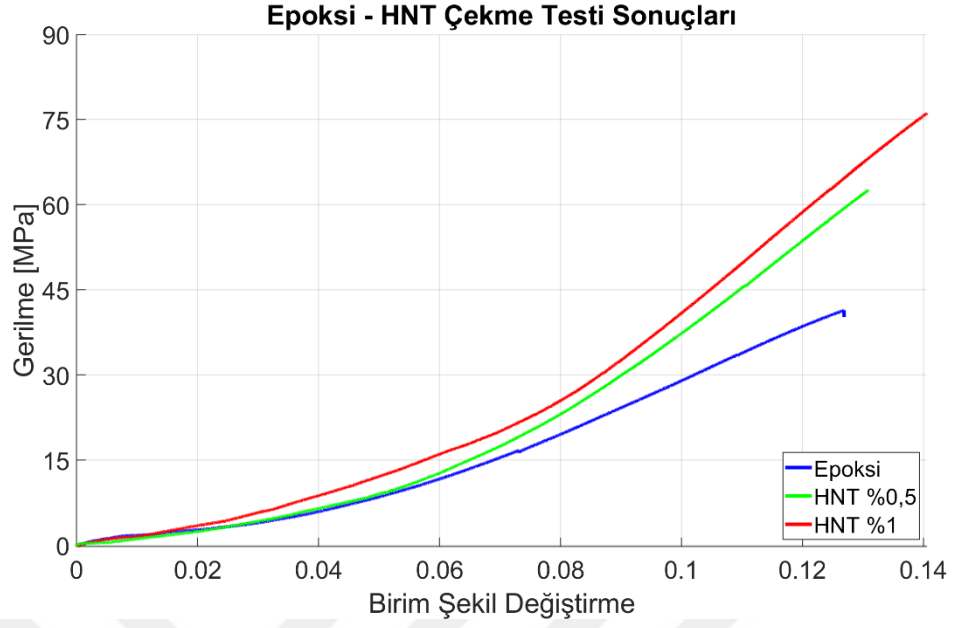
karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. HNT takviyesinin, CNF takviyesine göre malzemenin rijitliğinde çekme testi sonucunda daha etkili olduğu görülmüştür. Sonuçların, statik çekme zorlanması durumunda elde edildiği göz önünde bulundurulmuştur.

HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuçları çizelge 3.1 ve şekil 3.1 olarak sunulmuştur. Sonuçlar incelendiği zaman HNT takviyesinin ve takviye miktarının ağırlıkça yüzdesinin artmasının, yapının mekanik özelliklerini iyileştirdiği anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında malzemenin elastisite modülünün, çekme mukavemetinin ve kopmaya kadar gerçekleştirdiği birim şekil değiştirmenin artmış olduğu değerler yardımıyla gözlemlenmiştir. Kopma uzamasının artmış olması, malzemenin sünekliğinin artarak daha tok bir duruma geldiğini göstermektedir. Aynı zamanda malzemenin çekme zorlanmasına karşı daha dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.1’de HNT takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu malzeme grupları, takviyesiz epoksi ile birlikte gösterilmiştir. Elastik birim şekil değiştirmenin gerçekleştiği bölgeler dikkate alındığında, takviye oranının artışı ile birlikte grafikteki lineer bölgenin eğiminin arttığı gözlemlenmiştir. Malzemenin rijitliğini ifade eden lineer eğim, sayısal anlamda da elastisite modülü olarak çizelgede sunulmuştur ve değerlerin arttığı görülmüştür. Çizelge 3.1 incelendiğinde HNT takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda elastisite modülü değerleri sırasıyla %49,87 ve %62,28 oranında arttığı, çekme mukavemeti değerlerinin sırasıyla %51,16 ve %83,49 oranında arttığı görülmektedir. Aynı zamanda HNT takviyesiyle birlikte kopma uzaması değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu durum nanopartikül takviyelerinin malzemenin mekanik özelliklerini arttırıcı yönde etkilediğini fakat bu etkinin ağırlıkça bulunma oranı ile lineer bir ilişki olmadığını, matris-nanopartikül arası etkileşime bağlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuç değerleri.

Takviye Oranı	%0	%0,5	%1
Elastisite Modülü (E) [MPa]	483,76	725,01	785,04
Çekme Mukavemeti (σ_c) [MPa]	41,38	62,55	75,93
Kopma Uzaması (ϵ_k)	0,1269	0,1309	0,1404



Şekil 3.1 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

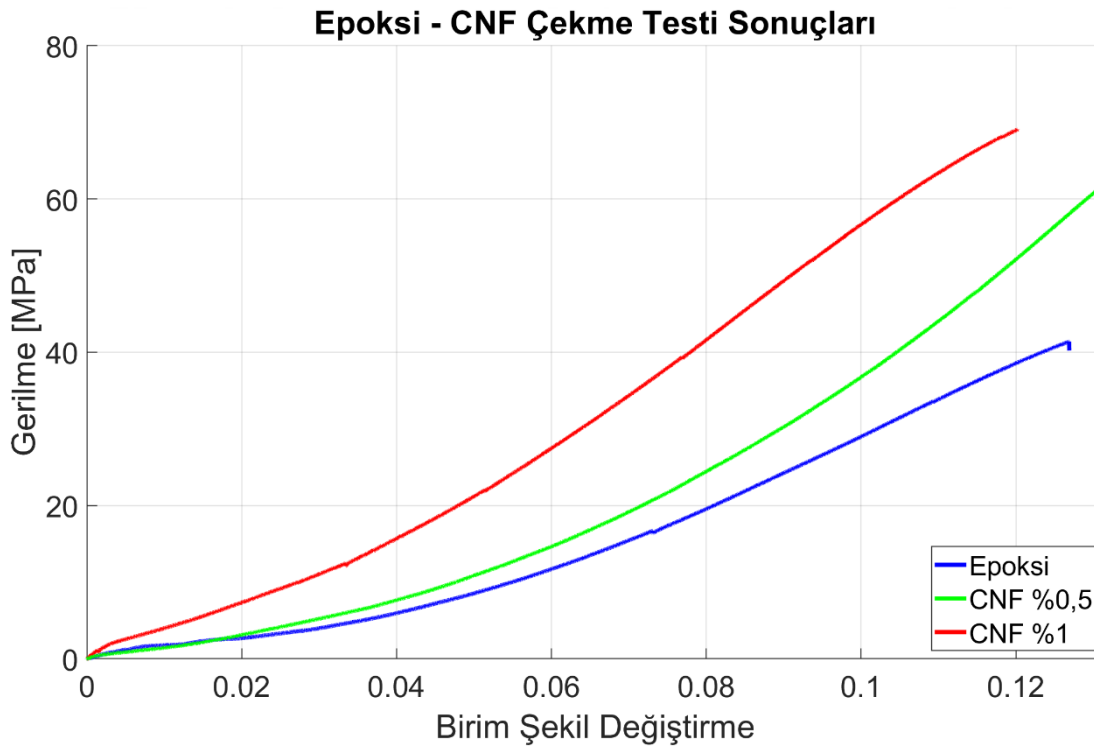
CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuçları çizelge 3.2 ve şekil 3.2 olarak sunulmuştur. Sonuçlar incelendiği zaman, CNF takviyesinin malzemenin rijitliğini artırdığı elastisite modülünün artmasıyla anlaşılmıştır. Ayrıca, malzemenin çekme mukavemeti değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

Şekil 3.2 incelendiği zaman CNF takviye oranının arttığı malzeme gruplarında, elastik birim şekil değişiminin gerçekleştiği bölgedeki lineer eğimin arttığı gözlemlenmiştir. Sayısal olarak da çizelgedeki elastisite modülü değerlerine bakılarak aynı şekilde yorumlanmıştır. CNF takviyesinin, aynı ağırlıkça takviye oranlarında karşılaştırıldığında HNT takviyesine göre malzemenin rijitliğini çekme zorlanması durumu için daha az artırdığı sayısal olarak görülmüştür. Çizelge 3.2 incelendiğinde CNF takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda elastisite modülü değerleri sırasıyla %19,87 ve %52,99 oranında arttığı, çekme mukavemeti değerlerinin sırasıyla %49,37 ve %66,8 oranında arttığı görülmektedir. CNF takviyesinin, malzemenin kopma uzaması değerlerine bakılarak bir çıkarım yapılabilmesi için yeterli sonuç bulunamamıştır. Her bir takviye durumu için kopma uzaması değerleri değişmekte olup ihtiyaca göre kompozit malzeme şekillendirilebilir. Ayrıca HNT takviyesine benzer olarak CNF takviyesinde de nanopartikül takviyelerinin malzemenin mekanik

özelliklerini arttırıcı yönde etkilediğini fakat bu etkinin ağırlıkça bulunma oranı ile lineer bir ilişki olmadığı görülmüştür.

Çizelge 3.2 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuç değerleri.

Takviye Oranı	%0	%0,5	%1
Elastisite Modülü (E) [MPa]	483,76	579,86	740,13
Çekme Mukavemeti (σ_c) [MPa]	41,38	61,81	69,02
Kopma Uzaması (ϵ_k)	0,1269	0,1312	0,1201



Şekil 3.2 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

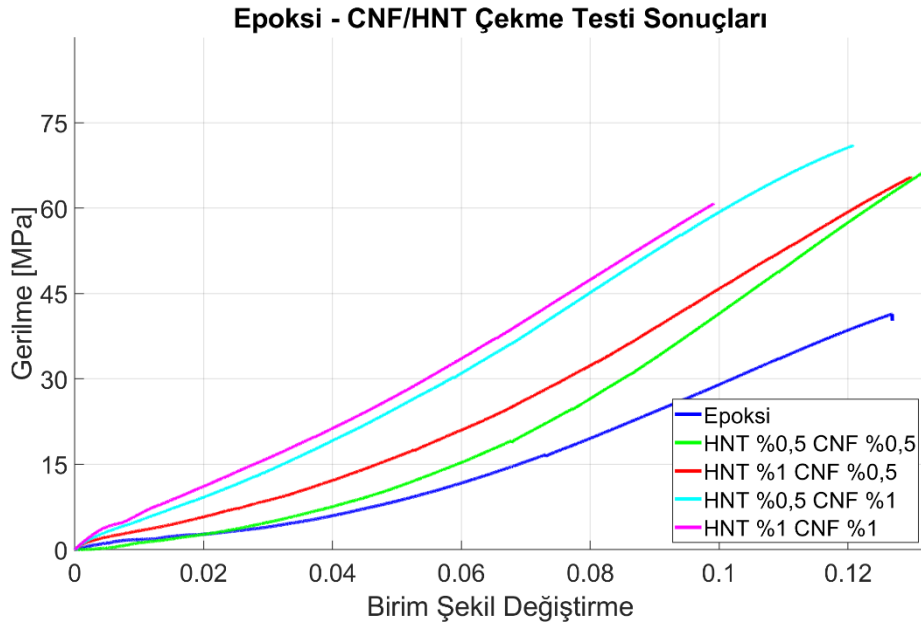
Çalışma kapsamında, HNT ve CNF takviyelerinin malzeme içerisinde birlikte ve farklı oranlarda bulunma durumu da incelenmiştir. Takviyelerin ayrı ayrı bulunma durumunda malzemeye kattığı özellikler, birlikte bulunma durumunda her zaman aynı etkiye sebebiyet vermemektedir. Takviyelerin birlikte bulunma durumunda verdiği sonuçlara bakılarak, kopma uzaması değerindeki artışın HNT takviyesinden kaynaklandığı yorumlanabilmektedir.

CNF ve HNT takviyelerinin birlikte bulunduğu epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuçları çizelge 3.3 ve şekil 3.3 olarak sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, HNT ve CNF takviyesinin birlikte olduğu durumda da malzemenin rijitliğinin artmış olduğu, elastisite modülü değerlerinden anlaşılmaktadır. Birlikte bulunma durumundaki sonuçların, CNF takviyesinin Takviyelerin malzemedeki oranlarına göre karşılaştırma yapıldığı zaman, CNF takviyesinin malzeme rijitliği üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Takviyelerin birlikte, sırasıyla ağırlıkça %0,5 oranda bulunacak şekilde matris içerisinde dağıldığı durumdaki değerlerin, matriste yalnızca ağırlıkça %1 oranda bulunan CNF takviyesi durumuna göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir ve takviyelerin malzeme içerisindeki dağılımlarının yeterince homojen olarak bulunmadığı ve birbirlerinden kaynaklanan topaklanmanın gerçekleşerek malzeme özelliklerinin etkilediği yorumu yapılmıştır. Şekil 3.3 incelendiği zaman özellikle CNF takviyesinin ağırlıkça oranının arttığı malzeme grupları için elastik şekil değişiminin gerçekleştiği bölgedeki lineer eğimin artışı daha net bir şekilde görülmektedir. Çizelge 3.3'teki sayısal değerler ile birlikte grafikler aynı şekilde yorumlanmıştır.

Çizelge 3.3 incelendiğinde CNF ve HNT takviyesinin birlikte bulundukları kombinasyonlarda malzemenin çekme zorlanması durumu için rijitliği artırdığı sayısal olarak görülmektedir. Takviyelerin birlikte bulunma durumu için sinerjik etkilerin her zaman beklendiği şekilde artışlara sebep olmadığı, kompozit yapısının içindeki dağılımlarının malzeme için etkili olduğu yorumu yapılmıştır. Deney sonuçları sayısal olarak incelendiğinde çizelge 3.3'deki takviye kombinasyonlarına göre elastisite modülü değerlerinde sırasıyla %6,97 , %15,44 , %25,2 , %29,59 oranında artış olduğu ve çekme mukavemeti değerlerinde sırasıyla %60,8 , %58,05 , %71,41 , %46,81 oranında artış olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.3 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi sonuç değerleri.

Takviye Oranı	%0	%0,5 HNT ve %0,5 CNF	%1 HNT ve %0,5 CNF	%0,5 HNT ve %1 CNF	%1 HNT ve %1 CNF
Elastisite Modülü E [MPa]	483,76	517,45	558,46	605,66	626,92
Çekme Mukavemeti (σ_c) [MPa]	41,38	66,54	65,4	70,93	60,75
Kopma Uzaması (ϵ_k)	0,1269	0,1320	0,1297	0,1206	0,099



Şekil 3.3 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin çekme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

3.1.2 Üç noktadan eğme deneyi sonuçları

Bu çalışma için imal edilen, epoksi matrisli HNT ve CNF takviyeli kompozit malzemelerin üç noktadan eğme deneyleri yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar bu bölümde paylaşılmıştır. Malzemelere ait eğilme modülü (E), eğilme mukavemeti (σ_e) ve kopma uzaması (ϵ_k) değerleri sunulmuştur. Takviyelerin farklı oranlarda ayrı ayrı ve birlikte bulunma durumları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen değerler incelendiğinde HNT ve CNF takviyesinin yapıda ayrı ayrı bulunduğu malzemenin rijitliğini artırdığı, eğilme modülü değerlerine bakılarak gözlemlenmiştir. Farklı yüzdelerde elde edilen sonuçlar

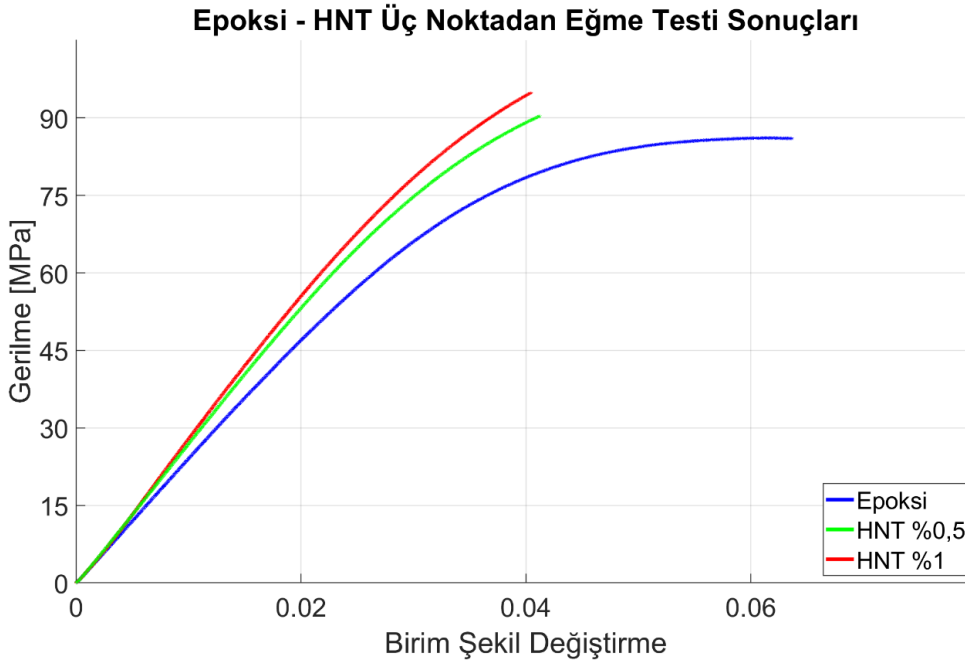
karşılaştırıldığında, çalışmada numuneler için belirlenen ağırlıkça takviye yüzdeleri arttığında malzemenin mekanik özelliklerinin de iyileştiği görülmüştür. Literatüre bakıldığında, takviyelerin ayrı ayrı bulunma durumları için değerlerin birbirlerini doğruladığı anlaşılmıştır. Takviyelerin birlikte bulunma durumları da sonuçlarda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. CNF takviyesinin, HNT takviyesine göre malzemenin rijitliğinde üç noktadan eğme testi sonucunda daha etkili olduğu görülmüştür. Sonuçların, statik hızda gerçekleştirilen üç noktadan eğme zorlanması durumunda elde edildiği göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 3.4 ve şekil 3.4'te HNT takviyesinin malzeme içerisinde ağırlıkça oranının %0,5 ve %1 olarak bulunduğu malzeme gruplarının deney sonuçları takviyesiz epoksi ile birlikte verilmiştir. Eğilme modülündeki artışa bakılarak, HNT takviyesinin malzemenin rijitliğini artırdığı yorumlanabilmektedir. Fakat takviyenin bulunması ve ağırlıkça oranının artması, malzemenin kopma uzaması değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. HNT takviye oranının artması ile birlikte iç yapıdaki çatlak oluşumları daha geç meydana gelmiştir ve malzemenin yük taşıma kapasitesi artmıştır.

Çizelge 3.4 incelendiğinde HNT takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda eğilme modülü değerleri sırasıyla %14,42 ve %20,94 oranında arttığı, eğilme mukavemeti değerlerinin sırasıyla %5,02 ve %10,11 oranında arttığı görülmektedir. HNT takviyesinin kopma uzaması değerleri incelendiğinde, ağırlıkça HNT takviyesinin artmasıyla birlikte malzemenin gevrekleştiği sayısal olarak görülmüştür.

Çizelge 3.4 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme sonuç değerleri.

Takviye Oranı	%0	%0,5	%1
Eğilme Modülü (E) [MPa]	2211,54	2530,41	2674,59
Eğilme Mukavemeti (σ_{Ult}) [MPa]	86,03	90,35	94,73
Kopma Uzaması (ϵ_k)	0,0636	0,0412	0,0403



Şekil 3.4 : HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

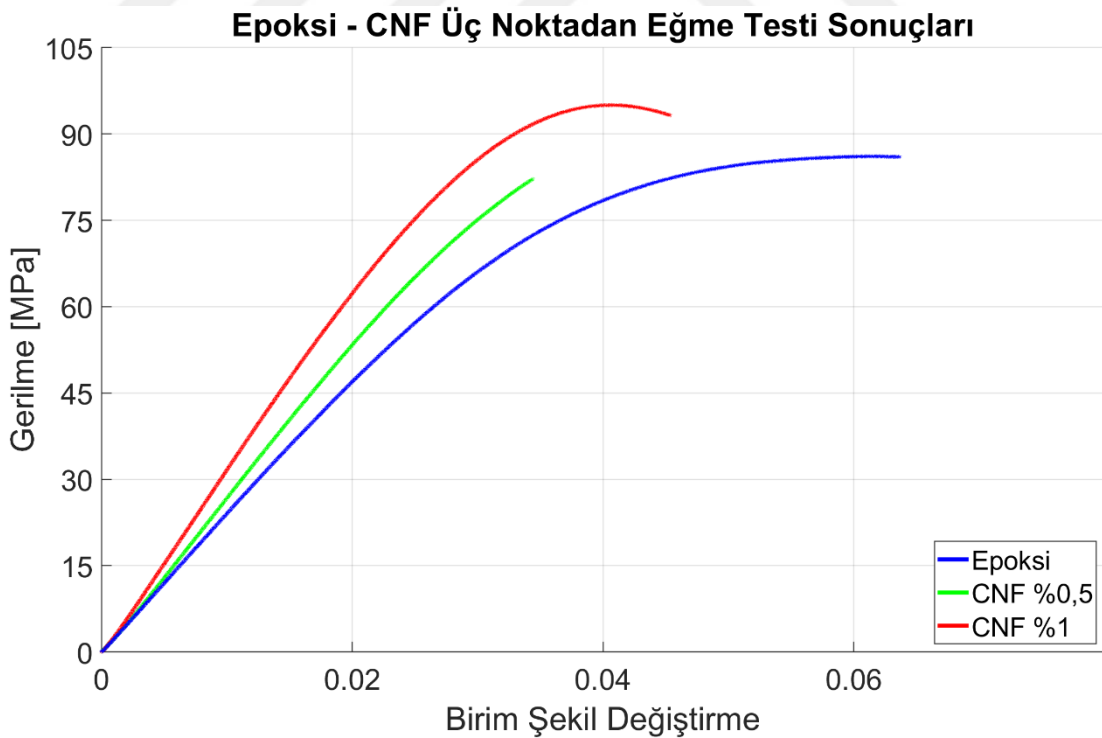
CNF takviyeli epoksi matrisli nanokompozit numunelerin üç noktadan eğme deneyi sonuçları Çizelge 3.5 ve şekil 3.5 olarak sunulmuştur. Çalışmada ilave edilen düşük takviye oranlarında CNF'nin, malzemenin eğilme mukavemetini artırdığı sonucuna varılmıştır. Kopma uzaması değerlerine bakıldığında zaman zaman ise takviyenin malzemenin sünekliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Takviye miktarının artması ile birlikte takviyenin iç yapıya yerleşme durumunun, malzemenin şekil değiştirme kapasitesini azalttığı ve bu yüzden malzemeyi daha gevrek bir hale getirdiği yorumlanmıştır. CNF takviyesinin malzemedeki ağırlıkça oranı ayarlanarak, malzemenin özelliklerinin istenen değerlere ulaşması sağlanabilir.

Çizelge 3.5 incelendiğinde CNF takviyesinin ağırlıkça %0,5 ve %1 olduğu durumlarda eğilme modülü değerleri sırasıyla %20,59 ve %39,04 oranında arttığı, eğilme

mukavemeti değerlerinde sırasıyla %4,45 oranında düşüş ve %10,4 oranında artış görülmektedir. CNF takviyesinin kopma uzaması değerleri incelendiğinde, ağırlıkça CNF takviyesinin, malzemenin kopma uzaması değerlerine bakılarak bir çıkarım yapılabilmesi için yeterli sonuç bulunamamıştır. CNF takviyesi ile birlikte kompozit malzemenin elastisite modülünün arttığı görülse de eğilme mukavemeti değerlerinde her bir kombinasyon için farklı değerler kaydedilmiştir. Bu durum nanomalzemenin çeşitli ağırlıkça yüzdelerde irdelenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Çizelge 3.5 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme sonuç değerleri.

Takviye Oranı	%0	%0,5	%1
Eğilme Modülü (E) [MPa]	2211,54	2666,88	3075
Eğilme Mukavemeti (σ_{ult}) [MPa]	86,03	82,2	94,98
Kopma Uzaması (ϵ_k)	0,0636	0,0344	0,0454



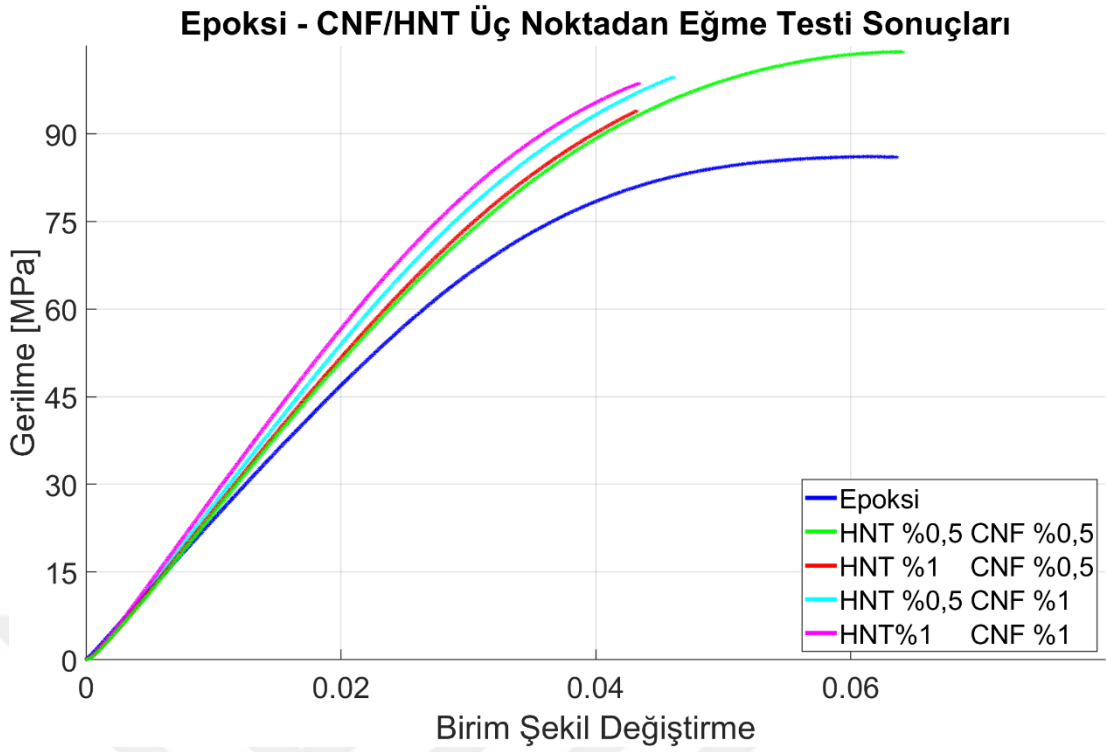
Şekil 3.5 : CNF takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Çalışmada, HNT ve CNF takviyelerinin farklı oranlarda birlikte bulunduğu numuneler ile de üç noktadan eğme deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 3.6 ve şekil 3.6 olarak verilmiştir. Takviyelerin beraber bulunma durumu, malzeme davranışını beklenenden farklı şekilde etkilemektedir. Takviyelerin ayrı olarak bulunmaları durumunda gözlemlenen sonuçlar daha makul olmaktadır. Ancak takviyelerin malzeme içinde bir arada yayılmış durumda olması mekanik özelliklerin öngörülmesini zorlaştırmaktadır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, takviyelerin beraber bulunması malzemenin eğilme modülünü artırmıştır.

Çizelge 3.6 incelendiğinde CNF ve HNT takviyesinin birlikte bulundukları kombinasyonlarda malzemenin çekme zorlanması durumu için rijitliği artırdığı sayısal olarak görülmektedir. Takviyelerin birlikte bulunma durumu için sinerjik etkilerin her zaman beklendiği şekilde artışlara sebep olmadığı, kompozit yapısının içindeki dağılımlarının malzeme için etkili olduğu yorumu yapılmıştır. Deney sonuçları sayısal olarak incelendiğinde Çizelge 3.6'daki takviye kombinasyonlarına göre elastisite modülü değerlerinde sırasıyla %11,58 , %12,94 , %15,23 , %25,31 oranında artış olduğu ve çekme mukavemeti değerlerinde sırasıyla %20,98 , %9,25 , %15,94 , %14,67 oranında artış olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.6 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme sonuç değerleri.

Takviye Oranı	%0	%0,5 HNT ve %0,5 CNF	%1 HNT ve %0,5 CNF	%0,5 HNT ve %1 CNF	%1 HNT ve %1 CNF
Eğilme Modülü (E) [MPa]	2211,54	2467,72	2497,65	2548,35	2771,28
Çekme Mukavemeti (σ_c) [MPa]	86,03	104,08	93,99	99,74	98,65
Kopma Uzaması (ϵ_k)	0,0636	0,0639	0,0432	0,0461	0,0434

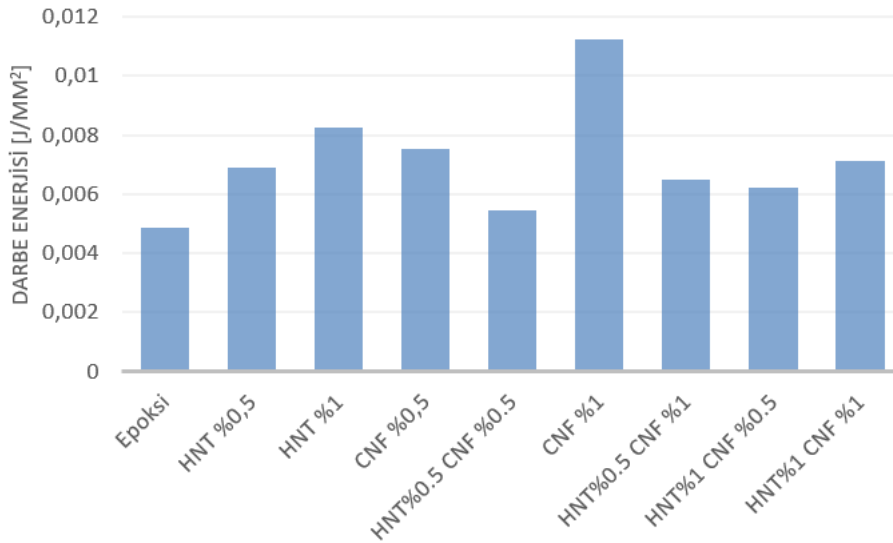


Şekil 3.6 : CNF/HNT takviyeli epoksi kompozit numunelerinin üç noktadan eğme deneyi gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Üç noktadan eğme deneyinin sonuçları, çekme deneyi sonuçları ile karşılaştırıldığı zaman sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Bu deneyler sonucunda elde edilen değerlerin birbirlerine yakın olmamasının temel sebebi, numunelerin deneylerde farklı zorlanmalara maruz kalmasıdır. Üç noktadan eğme deneyinde numunenin makinaya temas eden yüzeyi basma zorlanmasına maruz kalırken diğer yüzeyi çekme zorlanmasına maruz kalmaktadır. Çekme deneyinde ise numuneler tek eksenli bir zorlanmaya maruz kalmaktadır. Farklı zorlanma durumlarının bir arada bulunması, sonuçların oldukça farklı çıkmasına sebep olmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen değerler, kendi içlerinde malzemelerin mantıklı bir şekilde gruplandırılması ile karşılaştırılmalıdır.

3.1.3 Çentik darbe deneyi sonuçları

HNT ve CNF takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin çekme ve üç noktadan eğme deneyleri yapıldıktan sonra, malzemelerin kırılma davranışının dinamik tokluk değerlerine bağlı olarak incelenmesi için çentik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her takviye grubu için üç farklı numune ile deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar bu bölümde şekil 3.6’da sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, HNT takviyesinin ve CNF takviyesinin ayrı ayrı bulunmasının malzemenin dinamik tokluğunu artırdığı sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda, takviyelerin ağırlıkça oranının %0,5 ‘ten %1 ‘e çıkmasının dinamik tokluk üzerinde büyük bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Takviyelerin malzemede birlikte bulunma durumlarının da paralel sonuçlar verdiği görülmüştür. Takviyelerin birbirlerini etkileyerek olağan dışı bir sonuç vermediği yorumlanmıştır. Kırılma enerjisindeki en büyük artış CNF takviyesinin %1 ilave oranında gerçekleşmiştir. Takviye oranları ayarlanarak malzemenin darbe enerjisi istenilen değerlere ulaştırılabilir.



Şekil 3.7 : Takviye kombinasyonlarına göre darbe enerjisi.

3.2 Sayısal Analiz ile Modelleme Sonuçları

Malzemelerin rijitliği, malzemeye özgü bir özellik olan elastisite modülü ile ifade edilir. Belirli bir yük altındaki malzemelerin zorlanması sonucunda göstereceği davranışı, malzemenin rijitliği etkiler. Elastik şekil değiştirme durumunda gösterdiği lineer sonuca göre hesaplanan elastisite modülü, birim şekilde değiştirme için

uygulanacak kuvvet ile birlikte oluşan gerilme değerlerinin oranını temsil eder. Malzemenin rijitliğinin artması durumunda aynı birim şekil değiştirme değeri için daha fazla yük uygulanması gerekmektedir. Kompozit malzemelerde kullanılan takviyeler, malzemenin rijitliğini etkilemektedir. Çalışmada; saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit malzemelerin Mori-Tanaka ve sonlu elemanlar yöntemleri ile sayısal olarak modellemeleri yapılmıştır. Çekme deneyine göre sayısal modelleme yöntemleri ile elde edilen değerler, yüksek hata oranlarına sahiptir. Bu yüzden üç noktadan eğme deneyine göre sayısal modellemeler ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.7 ‘ de sunulmuştur.

Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen, malzemelerin üç noktadan eğilme modülü değerleri çizelge 3.7’de sunulmuştur. Çizelgedeki değerler incelendiği zaman, takviyelerin ikisinin de malzemelerin üç noktadan eğilme modülü değerlerini artırdığı ancak CNF takviyesinin etkisinin HNT takviyesine göre daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Çizelgede sunulan değerler sırasıyla takviyesiz epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit malzemelerine aittir. Takviyelerin birlikte bulunma durumunun, üç noktadan eğilme modülü değerlerindeki artışı daha fazla etkilediği ve takviyelerin ağırlıkça oranlarına göre artışın farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.7 incelendiği zaman HNT ve CNF takviyelerinin tek başlarına ağırlıkça %0,5 ve %1 oranında bulunma durumları karşılaştırıldığında, CNF takviyesinin malzemenin eğilme modülünde daha fazla artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda takviyelerin birlikte bulunduğu malzeme kombinasyonlarının hesaplanan sayısal değerleri de karşılaştırıldığında, sinerjik etkilerin de yanı sıra CNF takviyesinin malzemenin eğilme modülündeki artışı daha fazla etkilediği görülmüştür. Mori – Tanaka homojenleştirme yöntemi ile elde edilen sonuçlarda, CNF takviyesinin malzeme rijitliğindeki artış etkisinin daha net bir şekilde gözlemlendiği yorumlanmıştır. Çizelge 3.7’deki takviye kombinasyonlarında, eğilme modülü değerlerinde sırasıyla %5,56 , %11,1 , %9,21 , %18,41 , %14,77 , %23,97 , %20,33 , %29,53 oranlarında artış olduğu görülmüştür. Hesaplama sonuçları karşılaştırıldığında

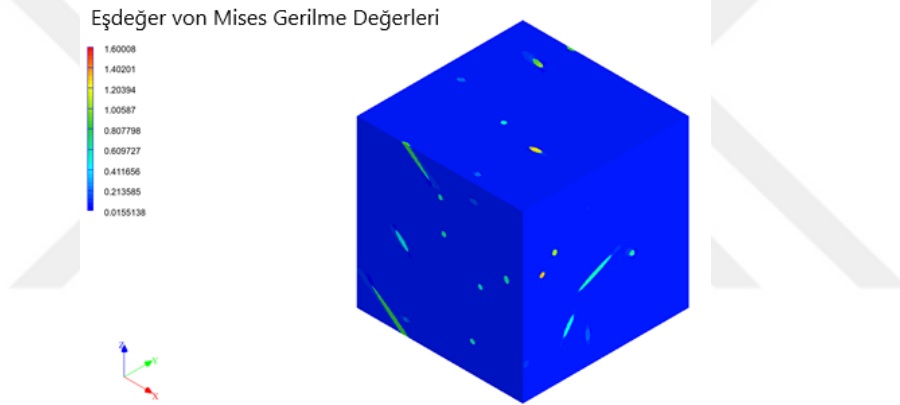
bahsedildiği gibi CNF takviyesinin etkisinin daha fazla olduğu sayısal olarak anlaşılmıştır.



Çizelge 3.7 : Sayısal yöntemler ile analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar.

Takviye Oranı	%0	%0,5 HNT	%1 HNT	%0,5 CNF	%1 CNF	%0,5 HNT ve %0,5 CNF	%0,5 HNT ve %1 CNF	%1 HNT ve %0,5 CNF	%1 HNT ve %1 CNF
Eğilme Modülü (E) [MPa]									
Mori - Tanaka	2400	2533,4	2666,7	2621	2841,8	2754,43	2975,2	2887,9	3108,73
Sonlu Elemanlar	2400	2660,07	2885,37	2804,47	2898,64	2952,75	3094,21	3118,93	3264,17
Deneysel Sonuçlar	2211,54	2530,41	2674,59	2666,88	3075	2467,72	2548,35	2497,65	2771,28

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen eğilme modülü değerleri çizelge 3.7’de sunulmuştur. Mori-Tanaka homojenleştirme yönteminde gözlemlenen artışın, sonlu elemanlar için de geçerli olduğu ve takviyelerin malzemelerin üç noktadan eğme elastisite değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Çizelgede sunulan değerler sırasıyla saf epoksi, %0,5 HNT, %1 HNT, %0,5 CNF, %1 CNF , %0,5 HNT ve %0,5 CNF, %0,5 HNT ve %1 CNF, %1 HNT ve %0,5 CNF, %1 HNT ve %1 CNF ağırlıkça oranlarda takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit malzemelerine aittir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların, Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, sonlu elemanlar yönteminde gerçekleştirilen hesaplamaların daha detaylı olduğu ve takviyelerin yapı içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmış olmasının kabulünün yapılması olarak yorumlanmıştır.



Şekil 3.8 : Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eşdeğer von Mises gerilme değerlerinin hacim elemanı üzerinde görünümü.

Çizelge 3.7 incelendiği zaman HNT ve CNF takviyelerinin tek başlarına ağırlıkça %0,5 ve %1 oranında bulunma durumları karşılaştırıldığında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalarda da CNF takviyesinin malzemenin eğilme modülünde daha fazla artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda takviyelerin birlikte bulunduğu malzeme kombinasyonlarının hesaplanan sayısal değerlerdeki artışlar da Mori – Tanaka homojenleştirme yöntemi ile elde edilen sonuçlara benzemektedir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak hesaplanan değerler incelendiğinde, HNT takviyesinin eğilme modülü değerlerindeki artışın Mori – Tanaka homojenleştirme yöntemine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 3.7’deki takviye kombinasyonlarında, eğilme modülü değerlerinde sırasıyla %10,84 , %20,22 , %16,85 , %20,78 , %23,03 , %28,93 , %29,96 , %36 oranlarında artış olduğu

görülmüştür. Hesaplama sonuçları karşılaştırıldığında bahsedildiği gibi CNF takviyesinin etkisinin daha fazla olduğu sayısal olarak anlaşılmıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal modelleme sonuçları eğilme modülü değerleri üzerinden incelendiğinde, epoksi matrisli kompozit yapısında CNF takviyesinin bulunması, HNT takviyesinin bulunmasına göre malzemenin rijitliğini üç noktadan eğilme durumu için daha fazla artırmaktadır. Literatürdeki çalışmalar incelendiği zaman, sonuçların kendi içlerinde ve aralarında tutarlı olduğu görülmüştür ve CNF takviyesinin en boy oranının, HNT takviyesinin en boy oranına göre daha büyük olmasından kaynaklandığı yorumu yapılmıştır.

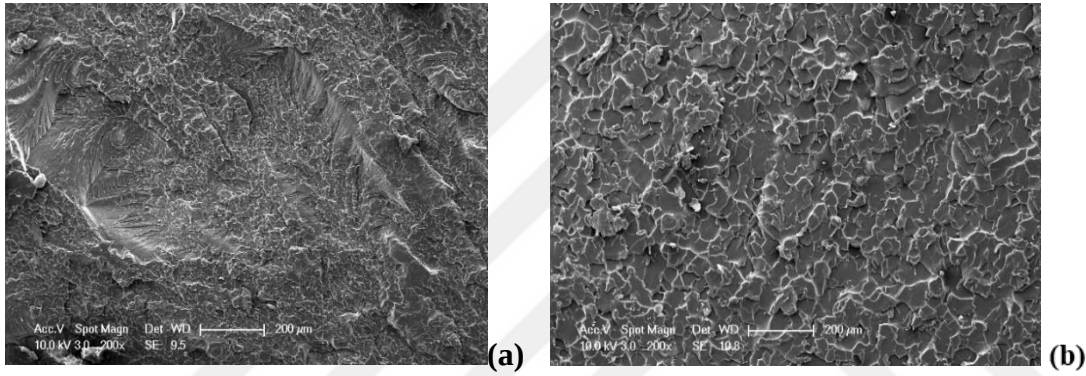
3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

Çalışmada SEM görüntülerinin alınması için FI Philips marka, 10kV potansiyele sahip cihaz kullanılmıştır. Görüntü alınmadan önce numunelerin üstüne hava püskürtülerek herhangi bir dış maddenin numunelerin üzerinde kalmadığına emin olunmuştur. Görüntünün alınabilmesi için numuneler platin ile kaplanmıştır. Kaplamanın yanı sıra numunelere iletken bantlar takılarak numuneler üstündeki elektrik yükünün daha kolay dağılması sağlanmıştır ve görüntü almak kolaylaşmıştır.

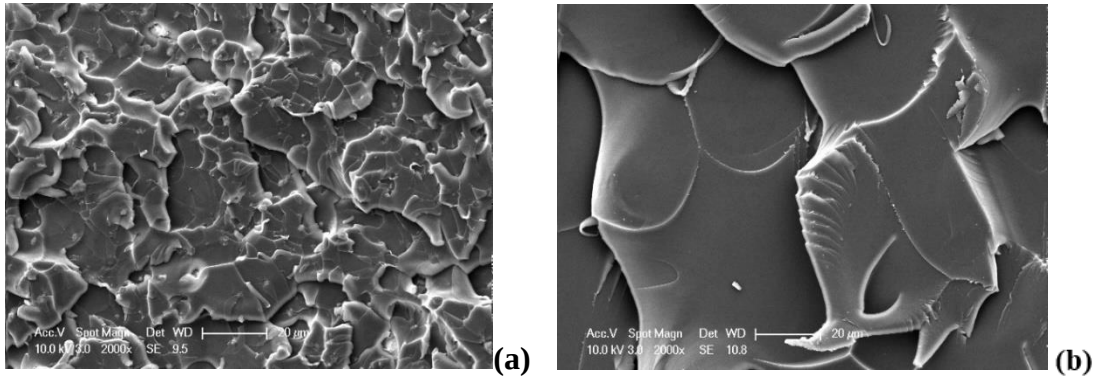
Numunelerin yüzeyi makroskopik olarak pürüzsüzdür. İç yapıların incelenmesi ve daha bilimsel sonuçların görsel olarak elde edilmesi için numuneler büyütme yapıları ile incelenmişlerdir. Numune setlerinden, takviyesiz olan epoksi ile görüntü alınmaya başlanmıştır. Farklı oranlarda takviye içeren numuneler, takviyesiz epoksi referans alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Her numune düşük ve yüksek kabul edilebilecek farklı büyütme oranları ile incelenmiştir. İncelemeler sonucunda malzemelerin iç yapısının yeterince homojen olduğu ve numune imalatının homojenliği sağlamak için düzgün bir şekilde yapıldığı anlaşılmıştır. Bundan dolayı yapılacak deneylerin sonucunda çatlak, boşluk gibi unsurların malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemesi beklenmemektedir.

3.3.1 Epoksi / HNT numunelerinin SEM görüntüleri

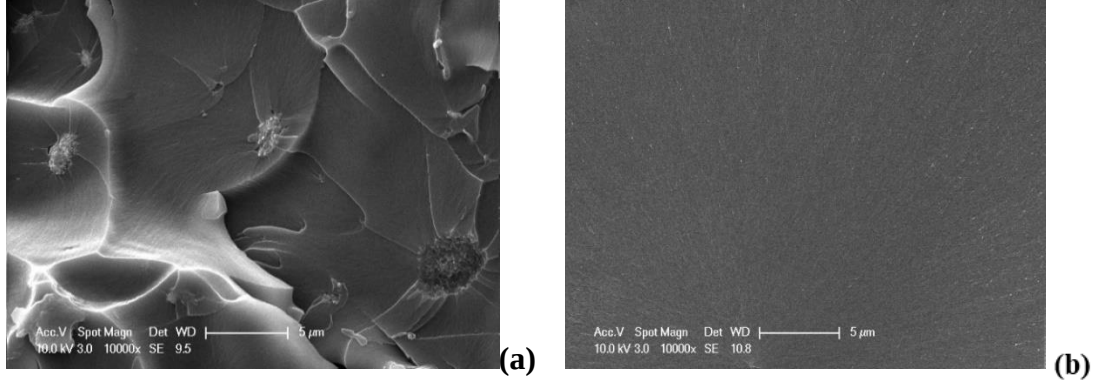
HNT takviyesi içeren epoksi ile birlikte iç yapı incelemesi devam etmiştir. İlk olarak 200 kat büyütme yapılarak geniş bir görüntü alınmıştır. Numune üzerindeki uygun noktalarda 2000 kat büyütme yapılarak incelenmeye devam edilmiştir. HNT partikülleri numunenin içinde dağılmış topaklar olarak gözlemlenmiştir. Topakların boyutlarının ve dağılımlarının homojen olduğu ve malzeme için olumsuz sonuç yaratmadıkları anlaşılmıştır. 5000 kat büyütülerek elde edilen genel bir görüntüde polimerin HNT takviye parçacıkları ile düzgün bir şekilde birleştiği ve HNT parçacıklarının malzemenin mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir. 100000 kat büyütme yapılarak da incelenen numune için benzer sonuçlar gözlemlenmiştir.



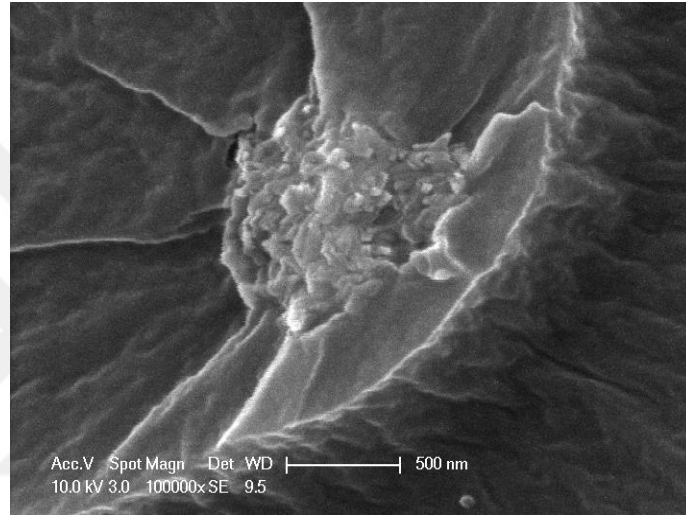
Şekil 3.9 : HNT ve epoksinin 200 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) HNT takviyesi, (b) Epoksi.



Şekil 3.10 : HNT ve epoksinin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) HNT takviyesi, (b) Epoksi.



Şekil 3.11 : HNT ve epoksinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) HNT takviyesi, (b) Epoksi.

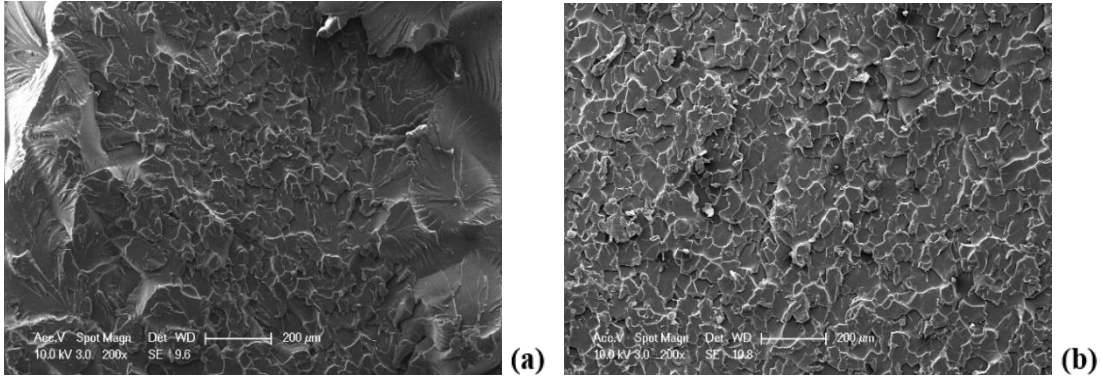


Şekil 3.12 : HNT'nin 100000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.

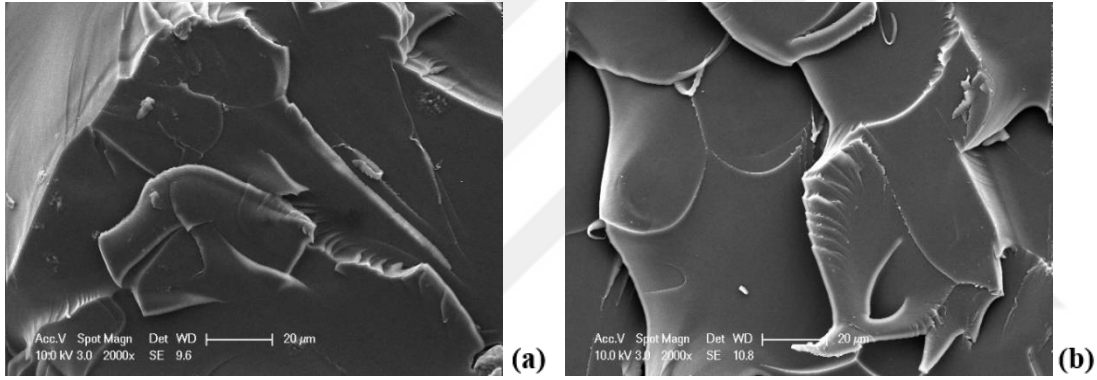
3.3.2 Epoksi / CNF numunelerinin SEM görüntüleri

CNF takviyesi içeren epoksi farklı oranlarda büyütülerek incelenmiştir. 10000 kat büyütme yapılarak incelenen numunede polimerin CNF parçacıklarını kaplayarak topçuk oluşturduğu gözlemlenmiştir. İncelenen önceki numunedeki HNT partiküllerinin oluşturduğu topçuklarının ebatlarının çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. 50000 kat büyütme yapılarak numunenin farklı bölgeleri de incelenmiştir. Oluşmuş topakların iç kısımlarında polimere rastlanmıştır. Takviyeler ile polimerin imalat sırasında homojen bir şekilde karıştığı sonucuna varılmıştır. Kırılmaların fiberlerden, topakların merkezinden olduğu gözlemlenmiştir. 50000 kat

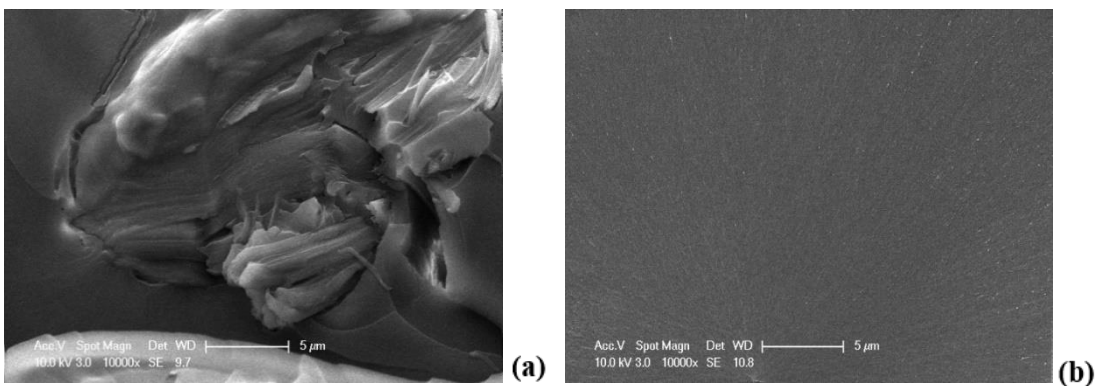
büyütme yapılarak numune içerisinde fiberlerin ve polimerin düzgün ve homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir.



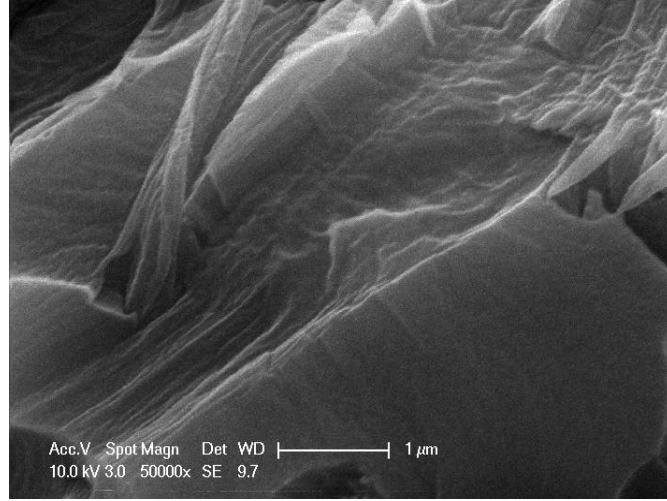
Şekil 3.13 : CNF ve epoksinin 200 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) CNF takviyesi, (b) Epoksi.



Şekil 3.14 : CNF ve epoksinin 2000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) CNF takviyesi, (b) Epoksi.



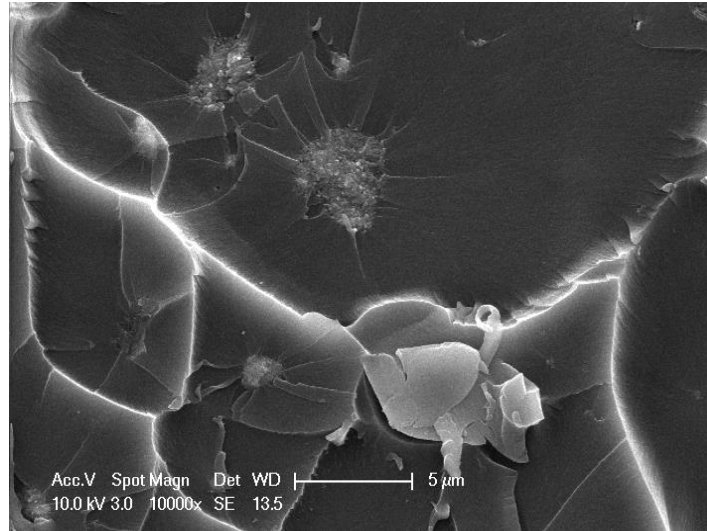
Şekil 3.15 : CNF ve epoksinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri, (a) CNF takviyesi, (b) Epoksi.



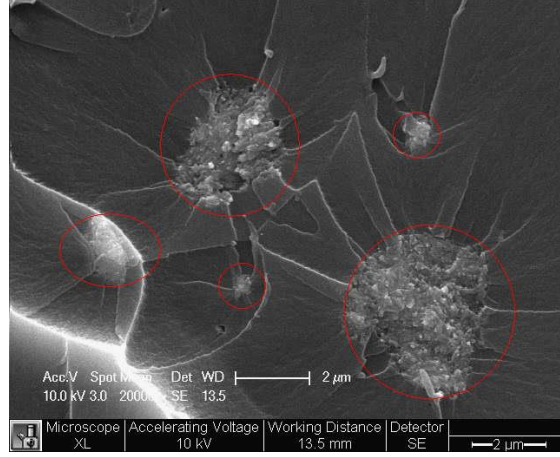
Şekil 3.16 : CNF'nin 50000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.

3.3.3 Epoksi / HNT / CNF ağırlıkça %0,5 numunelerinin SEM görüntüleri

HNT ve CNF takviyelerinin ağırlıkça oranı ayrı ayrı %0,5 olarak birlikte bulunduğu numuneler farklı büyütmelerde incelenmiştir. Kırık çukurların durumu, mukavemetin iyi olduğunu ve malzemenin dayanıklı olduğunu göstermiştir. 10000 büyütme ile alınan görüntüde HNT toparlarının düzgün dağıldığı gözlemlenmiştir. 20000 büyütmede incelenen farklı bir bölgede HNT ve CNF partiküllerinin dağılımları görülmüştür ve incelenmiştir. Şekil 3.18'deki kırmızı küçük çemberler içerisine alınan partiküller CNF partikülleridir. Büyük iki çember içerisinde HNT partikülleri gözlenmektedir.



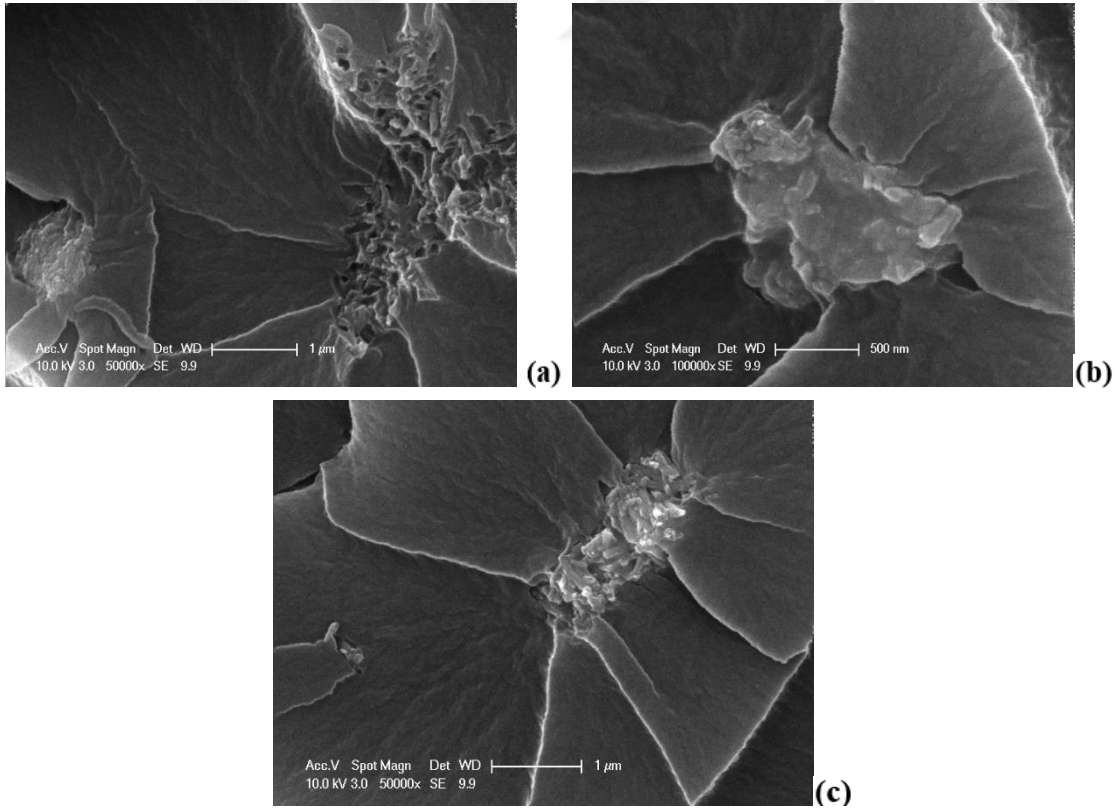
Şekil 3.17 : HNT/CNF takviyelerinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.



Şekil 3.18 : HNT/CNF takviyelerinin 20000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.

3.3.4 Epoksi / HNT / CNF ağırlıkça %1 / %0,5 numunelerinin SEM görüntüleri

Farklı malzeme miktarlarında malzemelerin iç yapılarının incelenmesi için HNT'nin ağırlıkça oranı %1, CNF'nin ağırlıkça oranı %0,5 olarak birlikte bulunduğu numuneler de gözlemlenmiştir. Şekil 3.19'da takviyelerin bir arada olduğu gözlemlenmiştir. Değişik büyütme oranlarında incelenen numunede HNT takviye partiküllerinin uzun çubuklar olarak daha belirgin halde olduğu anlaşılmıştır. Kırıkların genel olarak takviye üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.19 : HNT/CNF takviyelerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri, (a) 50000 kat büyütülmüş, (b) 100000 kat büyütülmüş, (c) 50000 kat büyütülmüş.

3.3.5 SEM görüntüleri genel sonuçlar

SEM sonuçlarının incelenmesi sonucunda yapılan analizlerde, takviyeli epoksi numunelerinin imalatının düzgün bir şekilde gerçekleştirildiği, takviye parçacıklarının numune içerisine uniform ve homojen bir şekilde dağıldığı sonucuna varmıştır. Numunelerde, morfolojik olarak herhangi bir anormal durum saptanmamıştır ve yapılacak mekanik deneylerde sonuçlarının karşılaştırılarak incelenmesi uygun bulunmuştur.





4. SONUÇLAR VE KAPANIŞ

Çalışmada, polimer matrisli kompozite nanopartikül takviyesi yapılarak kompozit malzeme imalatının detaylı bir şekilde yapılması ve malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel yöntemlerin yanı sıra matematiksel modellemelerden faydalanılarak sayısal çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve tutarlılıkları gözlemlenmiştir. Epoksi reçine matrisli kompozitlere ayrı ayrı ve birlikte olmak üzere ağırlıkça farklı oranlarda CNF ve HNT takviyeleri ilave edilmiştir. Takviyelere uygun olan imalat yöntemi belirlenmiş ve imalat dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Takviye ilavesi olmayan, yalnızca saf epoksi kullanılarak imal edilen numuneler, takviye ilavesi olan numuneler ile karşılaştırmalı olarak incelenmek üzere kontrol grubu olarak belirlenmiştir. İmal edilen numuneler çekme, üç noktadan eğme ve çentik darbe deneylerine tabi tutulmuştur. Aynı zamanda numunelerin iç yapısı, taramalı elektron mikroskobu yardımı ile gözlemlenmiştir. Saf epoksi içeren numunelerin deney sonuçlarından faydalanarak kullanılan matematiksel modeller ile elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde, çekme deneyi sonuçlarında saf epoksi numunelerinin çekme zorlanmasına maruz kaldıklarında gösterebildikleri direncin kullanılan geleneksel malzemelere göre düşük olduğu ve rijitliklerinin kullanılabilecekleri uygulamalar için yetersiz olduğu görülmüştür. CNF ve HNT takviyesinin birlikte ve ayrı olacak şekilde ağırlıkça farklı oranlarda epoksi matrisin içinde bulunmalarının, malzemenin rijitliğini ve çekme dayanımını artırdığı sayısal deney sonuçları yardımı ile incelenmiştir. Topaklanmanın minimum olduğu durumlarda malzemelerin, çekme zorlanmasına karşı gösterdiği direncin kayda değer bir şekilde artırdığı gözlemlenmiştir.

Üç noktadan eğme deneyleri sonuçları incelendiği zaman, çekme deneyi sonuçlarında olduğu gibi, saf epoksinin kullanıldığı takviye ilavesi olmayan numunelerin eğilme zorlanmasına karşı gösterdiği direncin de geleneksel malzemelere göre yetersiz olduğu görülmüştür. Ancak üç noktadan eğme deneyinin sonuçlarının, yükün yönünün ve

tipinin değişmesinden dolayı çekme deneyi sonuçlarına göre daha yüksek değerlere ulaştığı bütün malzeme grupları için gözlemlenmiştir. Eğilme zorlanmasına maruz kalan ve yetersiz olan saf epoksiye, CNF ve HNT takviyelerinin beraber ve ayrı ayrı ağırlıkça farklı oranlarda ilave edilmesinin malzemelerin eğilme modülü değerlerini artırarak daha rijit olmalarını sağlamıştır. Deneysel sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, CNF takviyesinin HNT takviyesine göre malzemenin rijitliği üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu görölmüştür.

Çalışmada, deneysel sonuçların kendi aralarında karşılaştırılmasının yanı sıra sayısal modelleme yapılarak matematiksel olarak karşılaştırılması ve sonuçların tutarlılığının kontrol edilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ve Mori–Tanaka homojenleştirme yöntemi kullanılmıştır. Sayısal modellemelerin geliştirilmesi için saf epoksi içeren, takviye bulundurmayan, numunelerin deneysel sonuçları kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ve Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi kullanılarak takviye içeren malzemelerin etkin mekanik özellikleri hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçların kendi içerisinde kabul edilebilir tutarlılıkta olduğu ve aynı zamanda literatürdeki çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görölmüştür. Deneyler sonucunda kırılan numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, takviyelerin malzeme içerisindeki dağılımının homojen olduğu ve deney sonuçlarında beklenmedik sonuçlara sebep olmadığı anlaşılmıştır.

Çalışmaların sonucunda, epoksi matris içeren kompozit malzemelerde takviye olarak kullanılacak malzemelerin seçilerek beraber veya ayrı kullanılması durumunda malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği ve geleneksel malzemelere göre üstün özelliklere sahip olan malzemelerin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Rijitlik başta olmak üzere mekanik özelliklerin takviyelerle iyileştirildiği ve takviyelerin bir arada kullanılmasının birbirlerinin olumsuz özelliklerini dengeleyebildiği gözlemlenmiştir.

Gelecekte, nano takviyeler içeren kompozit üretiminin zorunluluk haline gelmesiyle birlikte, çalışmada kullanılan veya benzer malzemelerin takviye olarak tercih edilmesi, çeşitli uygulamalarda önemli ölçüde fark yaratacaktır. Aynı zamanda doğa için uygun olan sürdürülebilir malzemeler, kompozitlerin üretimi için kritik bir hale gelecektir. Bütün bu sebeplerden dolayı, malzeme teknolojisi için gerçekteştirilecek çalışmalarda bahsedilen konulara değinilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abadyan, M., Khademi, V., Bagheri, R., Motamedi, P., Kouchakzadeh, M. A., & Haddadpour, H.** (2010). Loading rate-induced transition in toughening mechanism of rubber-modified epoxy. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 49(3), 602–614. <https://doi.org/10.1080/00222341003595253>
- Abdellaoui, H., Raji, M., Bouhfid, R., & Qaiss, A. el kacem.** (2018). Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 29–49. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>
- Abdullah, A., & Mohammed, A.** (2019). Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX*, 77–85.
- Acarer, S., Pir, I., Tüfekci, M., Türkoglu Demirkol, G., & Tüfekci, N. N.** (2021). Manufacturing and Characterisation of Polymeric Membranes for Water Treatment and Numerical Investigation of Mechanics of Nanocomposite Membranes. <https://doi.org/10.3390/polym>
- Akgöl, S., Ulucan-Karnak, F., kuru, C. İ., & Kuşat, K.** (2021). The usage of composite nanomaterials in biomedical engineering applications. *Biotechnology and Bioengineering*, 118(8), 2906–2922. <https://doi.org/10.1002/bit.27843>
- Alpatova, A., Kim, E. S., Sun, X., Hwang, G., Liu, Y., & Gamal El-Din, M.** (2013). Fabrication of porous polymeric nanocomposite membranes with enhanced anti-fouling properties: Effect of casting composition. *Journal of Membrane Science*, 444, 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.05.034>
- Ansari, F., Galland, S., Johansson, M., Plummer, C. J. G., & Berglund, L. A.** (2014). Cellulose nanofiber network for moisture stable, strong and ductile biocomposites and increased epoxy curing rate. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 63, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.017>
- 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., & Thumu, U.** (2021). A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 44(xxxx), 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.742>
- Bashar, M., Sundararaj, U., & Mertiny, P.** (2012). Microstructure and mechanical properties of epoxy hybrid nanocomposites modified with acrylic tri-block-copolymer and layered-silicate nanoclay. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(6), 945–954. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.010>
- Battistella, M., Cascione, M., Fiedler, B., Wichmann, M. H. G., Quaresimin, M., & Schulte, K.** (2008). Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(12), 1851–1858. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.010>
- Bello, S. A., Agunsoye, J. O., Hassan, S. B., Kana, M. G. Z., & Raheem, I. A.** (2015). Epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties: A review. *Tribology in Industry*, 37(4), 500–524.
- Bhatnagar, A., & Sain, M.** (2005). Processing of cellulose nanofiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24(12), 1259–1268. <https://doi.org/10.1177/0731684405049864>
- Bisoi, A., Tüfekci, M., Öztekin, V., Denimal Goy, E., & Salles, L.** (2024). Experimental Investigation of Mechanical Properties of Additively Manufactured Fibre-Reinforced Composite Structures for Robotic Applications. *Applied Composite Materials*, 31(2), 421–446. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10179-9>
- Bourchak, M., Kada, B., Alharbi, M., & Aljuhany, K.** (2009). Nanocomposites damage characterisation using finite element analysis. *International Journal of Nanoparticles*, 2(1–6), 467–475. <https://doi.org/10.1504/ijnp.2009.028782>
- Brassart, L., Doghri, I., & Delannay, L.** (2010). Homogenization of elasto-plastic composites coupled with a nonlinear finite element analysis of the equivalent inclusion problem. *International Journal of Solids and Structures*, 47(5), 716–729. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.11.013>
- Bray, D. J., Dittanet, P., Guild, F. J., Kinloch, A. J., Masania, K., Pearson, R. A., & Taylor, A. C.** (2013). The modelling of the toughening of epoxy polymers via silica nanoparticles: The effects of volume fraction and particle size. *Polymer*, 54(26), 7022–7032. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.10.034>
- Carolan, D., Ivankovic, A., Kinloch, A. J., Sprenger, S., & Taylor, A. C.** (2017). Toughened carbon fibre-reinforced polymer composites with nanoparticle-modified epoxy matrices. *Journal of Materials Science*, 52(3), 1767–1788. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0468-5>
- Catalanotti, G.** (2016). On the generation of RVE-based models of composites reinforced with long fibres or spherical particles. *Composite Structures*, 138, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.039>

- Celentano, D. J., Cabezas, E. E., García, C. M., & Monsalve, A. E.** (2004). Characterization of the mechanical behaviour of materials in the tensile test: Experiments and simulation. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12(4). <https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/4/S09>
- 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
- Drugan, W. J.** (2003). Two exact micromechanics-based nonlocal constitutive equations for random linear elastic composite materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51(9), 1745–1772. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(03\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(03)00049-8)
- Du, M., Guo, B., & Jia, D.** (2010). Newly emerging applications of halloysite nanotubes: A review. *Polymer International*, 59(5), 574–582. <https://doi.org/10.1002/pi.2754>
- Evci, C., & Gülgeç, M.** (2012). An experimental investigation on the impact response of composite materials. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.009>
- Fidelus, J. D., Wiesel, E., Gojny, F. H., Schulte, K., & Wagner, H. D.** (2005). Thermo-mechanical properties of randomly oriented carbon/epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(11), 1555–1561. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.02.006>
- 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
- Guven, I., & Cinar, K.** (2019). Micromechanical modeling of particulate-filled composites using micro-CT to create representative volume elements. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 15(4), 695–714. <https://doi.org/10.1007/s10999-018-09438-6>
- Hagnell, M. K., & Åkermo, M.** (2019). The economic and mechanical potential of closed loop material usage and recycling of fibre-reinforced composite materials. *Journal of Cleaner Production*, 223, 957–968. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.156>
- Hassanzadeh-Aghdam, M. K.** (2021). Evaluating the effective creep properties of graphene-reinforced polymer nanocomposites by a homogenization approach. *Composites Science and Technology*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108791>
- Hsieh, T. H., Kinloch, A. J., Masania, K., Taylor, A. C., & Sprenger, S.** (2010). The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymers modified with silica nanoparticles. *Polymer*, 51(26), 6284–6294. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.10.048>
- Hu, H., Onyebueke, L., & 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. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2010.94022>

- Ishikawa, T., & Chou, T. W.** (1983). Nonlinear Behavior of Woven Fabric Composites. *Journal of Composite Materials*, 17(5), 399–413. <https://doi.org/10.1177/002199838301700502>
- Isogai, A., & Bergström, L.** (2018). Preparation of cellulose nanofibers using green and sustainable chemistry. In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* (Vol. 12, pp. 15–21). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.008>
- 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01865)
- Jrad, H., Dion, J. L., Renaud, F., Tawfiq, I., & Haddar, M.** (2013). Experimental characterization, modeling and parametric identification of the non linear dynamic behavior of viscoelastic components. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 42, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.05.004>
- Kamble, R., Ghag, M., Gaikawad, S., & Panda, B. K.** (2012). Review article halloysite nanotubes and applications : A review. *Journal of Advanced Scientific Research*, 3(2), 25–29.
- Kaw, A. K.** (2005). *Mechanics of Composite Materials*. National SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings). CRC Press. [doi:10.1201/9781420058291](https://doi.org/10.1201/9781420058291)
- Khaskhanova, L. M., Razumova, S. N., Serebrov, D. M., Gureva, Z. A., Vetchinkin, A. V., Rebrii, A. V., & Said, O. M. H. B.** (2022). Scanning Electron Microscopy. *Journal of International Dental and Medical Research*, 15(1), 107–110. <https://doi.org/10.21273/hortsci.9.5.414>
- Kırış, A.** (2007). *Hasarlı Malzemelerin Mikro Elastik Teorilerle Modellenmesi Ve Eshelby Tansörleri*. Istanbul Technical University.
- Kim, B., Choi, J., Yang, S., Yu, S., & Cho, M.** (2017). Multiscale modeling of interphase in crosslinked epoxy nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 120, 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.059>
- Kliem, M., Høgsberg, J., Vanwalleghem, J., Filippatos, A., Hoschützky, S., Fotsing, E. R., & Berggreen, C.** (2019). Damping Analysis of Cylindrical Composite Structures with Enhanced Viscoelastic Properties. *Applied Composite Materials*, 26(1), 85–113. <https://doi.org/10.1007/s10443-018-9684-2>

- Krop, S., Meijer, H. E. H., & Van Breemen, L. C. A.** (2016). Multi-mode modeling of global and local deformation, and failure, in particle filled epoxy systems. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.012>
- Lam, W. S., Lee, P. F., & Lam, W. H.** (2022). Cellulose nanofiber for sustainable production: A bibliometric analysis. *Materials Today: Proceedings*, 62(P12), 6460–6467. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.198>
- Luo, J. J., & Daniel, I. M.** (2003). Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(11), 1607–1616. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00060-5)
- Ma, H., Burger, C., Hsiao, B. S., & Chu, B.** (2014). Fabrication and characterization of cellulose nanofiber based thin-film nanofibrous composite membranes. *Journal of Membrane Science*, 454, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.11.055>
- Mangalgiri, P. D.** (1999). Composite materials for aerospace applications. *Bulletin of Materials Science*, 22(3), 657–664. <https://doi.org/10.1007/BF02749982>
- Masoodi, R., El-Hajjar, R. F., Pillai, K. M., & Sabo, R.** (2012). Mechanical characterization of cellulose nanofiber and bio-based epoxy composite. *Materials and Design*, 36, 570–576. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.042>
- Mirkhalaf, S. M., Eggels, E. H., van Beurden, T. J. H., Larsson, F., & Fagerström, M.** (2020). A finite element based orientation averaging method for predicting elastic properties of short fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108388>
- Moon, D., Sagisaka, M., Tahara, K., & Tsukahara, K.** (2017). Progress towards sustainable production: Environmental, economic, and social assessments of the cellulose nanofiber production process. *Sustainability (Switzerland)*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/su9122368>
- 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
- Müzel, S. D., Bonhin, E. P., Guimarães, N. M., & Guidi, E. S.** (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/POLYM12040818>
- Nakamura, R., Netravali, A. N., & Hosur, M. V.** (2012). Effect of halloysite nanotube incorporation in epoxy resin and carbon fiber ethylene/ammonia plasma treatment on their interfacial property. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 26(8–9), 1295–1312. <https://doi.org/10.1163/156856111X593612>
- Nayak, B., & Sahu, R. K.** (2019). Experimental and Digimat-FE based representative volume element analysis of exceptional graphene flakes/aluminium

- alloy nanocomposite characteristics. *Materials Research Express*, 6(11), 0–13. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4bb7>
- Nissilä, T., Hietala, M., & Oksman, K.** (2019). A method for preparing epoxy-cellulose nanofiber composites with an oriented structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105515>
- Odegard, G. M., Clancy, T. C., & Gates, T. S.** (2005). Modeling of the mechanical properties of nanoparticle/polymer composites. *Polymer*, 46(2), 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.022>
- 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.
- Omran, A., Simon, L. C., & Rostami, A. A.** (2008). Influences of cellulose nanofiber on the epoxy network formation. *Materials Science and Engineering: A*, 490(1–2), 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.01.012>
- Onaran, K.** (2000). *Malzeme Bilimi* (8. bs.). Istanbul: Bilim Teknik Yayınevi.
- Pucha, R. V., & Worthy, J.** (2014). Representative volume element-based design and analysis tools for composite materials with nanofillers. *Journal of Composite Materials*, 48(17), 2117–2129. <https://doi.org/10.1177/0021998313494916>
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E.** (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
- Ravichandran, G., Rathnakar, G., Santhosh, N., Chennakeshava, R., & Hashmi, M. A.** (2019). Enhancement of mechanical properties of epoxy/halloysite nanotube (HNT) nanocomposites. *SN Applied Sciences*, 1(4). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0323-9>
- Rawtani, D., & Agrawal, Y. K.** (2012). Multifarious applications of halloysite nanotubes: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 30(3), 282–295.
- Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H.** (2018). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. In *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
- Shin, H., Chang, S., Yang, S., Youn, B. D., & Cho, M.** (2016). Statistical multiscale homogenization approach for analyzing polymer nanocomposites that include model inherent uncertainties of molecular dynamics simulations. *Composites Part B: Engineering*, 87, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.043>
- Singh, I. V., Shedbale, A. S., & Mishra, B. K.** (2016). Material property evaluation of particle reinforced composites using finite element approach. *Journal of Composite Materials*, 50(20), 2757–2771. <https://doi.org/10.1177/0021998315612539>

- Sprenger, S.** (2020). Nanosilica-toughened epoxy resins. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym12081777>
- Sutherland, L. S.** (2018). A review of impact testing on marine composite materials: Part II – Impact event and material parameters. *Composite Structures*, 188, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.041>
- Thirumalai, R., Prakash, R., Ragunath, R., & Senthilkumar, K. M.** (2019). Experimental investigation of mechanical properties of epoxy based composites. *Materials Research Express*, 6(7). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab10f7>
- Thostenson, E. T., Li, C., & Chou, T. W.** (2005). Nanocomposites in context. In *Composites Science and Technology* (Vol. 65, Issues 3–4, pp. 491–516). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.11.003>
- Trzepieciński, T., Rzyńska, G., Biglar, M., & Gromada, M.** (2017). Modelling of multilayer actuator layers by homogenisation technique using Digimat software. *Ceramics International*, 43(3), 3259–3266. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.11.157>
- Tucker III, C. L. ve Liang, E.** (1999). Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites: Review and evaluation. *Composites Science and Technology*, 59(5), 655–671. doi:[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00120-1)
- Tüfekci, M.** (2023). Performance evaluation analysis of Ti-6Al-4V foam fan blades in aircraft engines: A numerical study. *Composites Part C: Open Access*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100414>
- Tüfekci, M., Durak, S. G., Pir, İ., Acar, T. O., Demirkol, G. T., & Tüfekci, N.** (2020). Manufacturing, characterisation and mechanical analysis of polyacrylonitrile membranes. *Polymers*, 12(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/polym12102378>
- Tüfekci, M., Özkal, B., Maharaj, C., Liu, H., Dear, J. P., & Salles, L.** (2023). Strain-rate-dependent mechanics and impact performance of epoxy-based nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109870>
- Velmurugan, G., Vadivel, D., Arravind, R., Mathiazhagan, A., & Vengatesan, S. P.** (2014). Tensile Test Analysis of Natural Fiber Reinforced Composite. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, May, 148–152. <https://doi.org/10.47893/ijmie.2014.1145>
- Wang, K., Abdala, A. A., Hilal, N., & Khraisheh, M. K.** (2017). Mechanical Characterization of Membranes. In *Membrane Characterization*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00013-9>
- Yasim-Anuar, T. A. T., Ariffin, H., Norrrahim, M. N. F., Hassan, M. A., Tsukegi, T., & Nishida, H.** (2019). Sustainable one-pot process for the production of cellulose nanofiber and polyethylene / cellulose nanofiber composites. *Journal of Cleaner Production*, 207, 590–599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.266>
- Yuan, P., Tan, D., & Annabi-Bergaya, F.** (2015). Properties and applications of halloysite nanotubes: Recent research advances and future prospects.

Applied Clay Science, 112–113, 75–93.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.001>

Zappalorto, M., Pontefisso, A., Fabrizi, A., & Quaresimin, M. (2015). Mechanical behaviour of epoxy/silica nanocomposites: Experiments and modelling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 72, 58–64.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.01.027>

Zheng, P., Chen, R., Liu, H., Chen, J., Zhang, Z., Liu, X., & Shen, Y. (2020). On the standards and practices for miniaturized tensile test – A review. *Fusion Engineering and Design*, 161(May), 112006.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112006>

Zhou, W., Apkarian, R., Wang, Z. L., & Joy, D. (2007). Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM). *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, 1–40.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Can Dikicioğlu

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans: 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Dikicioğlu, C., Pir, İ., Tüfekci, M., Tüfekci, E. 2024. Modelling the Mechanical Properties of Epoxy Composites Reinforced with Cellulose Nanofiber and Halloysite Nanotube. 3rd International Graduate Research Symposium – IGRS'24 May 8-10,2024 İstanbul, Türkiye