BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN TAKVİYELİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özberk ÖZTÜRK

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

EYLÜL 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GRAFEN TAKVİYELİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özberk ÖZTÜRK
19212874008
ORCID:

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Deniz UZUNSOY
ORCID:
Eş Danışman: Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK ÇAKIR
ORCID:

EYLÜL 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 19212874008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Özberk ÖZTÜRK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GRAFEN TAKVİYELİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Deniz UZUNSOY**	.....
	Bursa Teknik Üniversitesi	
Eş Danışman :	**Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK ÇAKIR**	.....
	Yıldız Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK**	.....
	Bursa Teknik Üniversitesi	
	Doç. Dr. Binnur SAĞBAŞ	.....
	Yıldız Teknik Üniversitesi	

Teslim Tarihi : 13/08/2021

Savunma Tarihi : 15/09/2021

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 119M088 numaralı TUBİTAK 1001 projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Özberk ÖZTÜRK

İmzası:

Melek ÖZTÜRK ve Mehmet Zeki ÖZTÜRK'e,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, grafen takviyeli nanokompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu amaçlanmış, endüstriye katkı sağlayacak bir malzeme üretmek hedeflenmiştir.

Tez çalışması boyunca değerli bilgilerini, vaktini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu süreçte akademik anlamda gelişmemde çok büyük payları olan saygıdeğer tez danışmanı hocam; Prof. Dr. Deniz UZUNSOY'a ve saygıdeğer eş danışman hocam; Prof. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimim boyunca desteklerini her zaman gösteren, tecrübelerini benimle paylaşan Arş. Gör. Gökçe BORAND, Arş. Gör. Hurşit Sefa AYDIN, Arş. Gör. Cansu ÇELTİK, Arş. Gör. Cantekin KAYKILARLI, Arş. Gör. Ömer Faruk ÜNSAL, Dr. Öğr. Üyesi Cihan KABOĞLU, Arş. Gör. Burak KÜÇÜKELYAS ve Arş. Gör. Besim Emre BİRKAN'a yardımları için teşekkürlerimi sunarım. Son olarak yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü desteğini gösteren, pandemi dönemi olması sebebiyle de her türlü sabrı gösteren değerli ailem; Melek ÖZTÜRK ve Mehmet Zeki ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2021 Özberk ÖZTÜRK

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Kompozit Malzemeler 2
1.1.1 Polimer matrisli kompozitler 5
1.1.2 Partikül takviyeli kompozitler 6
1.1.3 Nanokompozitler 6
1.2 Epoksi Matrisli Kompozitler 6
1.2.1 Epoksilerin özellikleri ve kullanım alanları 7
1.2.2 Epoksi üretimi ve karakterizasyonu 9
1.3 Takviye Malzemesi: Grafen 10
1.3.1 Grafen üretim yöntemleri 11
1.3.1.1 Eksfoliasyon metodu 12
1.3.1.2 Grafen oksitin indirgenmesi 12
1.3.1.3 Kimyasal buhar biriktirme 13
1.3.1.4 Elektrik ark deşarj metodu 13
1.3.2 Grafenin fonksiyonelleşmesi 15
1.4 Grafen Takviyeli Epoksi Kompozitler 17
1.4.1 Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin üretim yöntemleri 17
1.4.1.1 Ultrasonik karıştırma ardından mekanik karıştırma 18
1.4.1.2 Ultrasonik karıştırma ardından yüksek gerilimde karıştırma 19
1.4.1.3 Ultrasonik karıştırma ardından bilyeli öğütme 19

1.4.1.4 Mekanik karıştırma ardından üç merdaneli hadde ile üretme 20
2. MALZEME VE METOT 22
2.1 Malzeme 22
2.2 Metot 22
2.2.1 Grafen üretimi 23
2.2.2 Grafenin Triton X-100 ile fonksiyonelleştirilmesi 24
2.2.3 Üç merdaneli haddeleme yöntemi ile kompozit üretimi 26
2.3 Karakterizasyon 31
3. BULGULAR 35
3.1 Saf Grafenin Yapısal Karakterizasyonu 35
3.2 Saf Grafen ile Triton X-100/Grafenin Yapısal Karakterizasyonları ve Karşılaştırılması 36
3.2.1 Raman spektroskopisi 36
3.2.2 Termogravimetrik analiz 38
3.2.3 Fouirer dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi 39
3.2.4 X-Işını difraksiyonu 40
3.3 Saf Epoksi ve Grafen Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik Karakterizasyonu 42
3.3.1 Basma testi 42
3.3.1.1 Saf epoksi numunelerin basma testi sonucundaki sem görüntüleri 44
3.3.1.2 Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin basma testi sonucundaki sem görüntüleri 46
3.3.2 Ağırlık düşürme darbe testi 48
3.3.2.1 Ağırlık düşürme darbe testi sonucu oluşan yüzeyin sem analizi 50
3.3.3 Izod darbe testi 53
4. SONUÇLAR 55
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 65

KISALTMALAR

2B : 2 Boyutlu

A : Amper

AE : Absorbe Enerjisi

AFM : Atomik Kuvvet Mikroskobu

BET : Brauner, Emmett ve Teller

BPA : Bisfenol A

CNH : Karbon Nano Boynuz

ÇD-KNT : Çok Duvarlı Karbon Nanotüp

DA : Direkt Akım

DGEBA : Bisfenol A'nın Diglisidil Eteri

ECH : Epiklorohidrin

EMI : Elektro Manyetik Karışım

FT-IR : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi

He : Helyum

GNP : Grafen Nano Plaka

GO : Grafen Oksit

IE : Darbe Enerjisi

KBB : Kimyasal Buhar Biriktirme

KNT : Karbon Nanotüp

MMK : Metal Matrisli Kompozit

N : Azot

PMK : Polimer Matrisli Kompozit

POPE : Polioksietilen Oktil Fenil Eter

RE : Geri Sıçrama Enerjisi

SCN : Küresel Nano Parçacıklar

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SMK : Seramik Matrisli Kompozit

SPHB : Split Hopkinson Bar Test

STM : Taramalı Tünel Mikroskobu

TD-KNT : Tek Duvarlı Karbon Nanotüp

TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu

TGA : Termogravimetrik Analiz

TX-100 : Triton X-100

XRD : X-Işını Difraksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Epoksinin kimyasal grupları. 8

Çizelge 2.1 : Grafen üretimi için kullanılan deneysel parametreler..... 23

Çizelge 3.1: Izod darbe testi sonucunda ortaya çıkan absorplanan enerji ve darbe dayanımı sonuçları. 54

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Malzemelerin gruplandırılma şeması..... 1
Şekil 1.2 : Kompozit malzemelerin sınıflandırılması. 3
Şekil 1.3: Epoksi reçinenin termal ve mekanik özellikleri 8
Şekil 1.4 : Grafenin moleküler dizilimleri ve çeşitleri. 11
Şekil 1.5: Eksfoliyasyon metodunun proses şeması. 12
Şekil 1.6 : Grafitten indirgenmiş grafen oksit eldesi..... 13
Şekil 1.7 : Grafen üretimi yapılan ark reaktörü şeması. 14
Şekil 1.8 : Triton X-100'ün GNP/epoksi nanokompozitine etkisi. 16
Şekil 1.9 : Ultrasonik karıştırmanın ardından mekanik karıştırma prosesinin işleyiş süreci. 19
Şekil 1.10 : Mekanik karıştırma ardından üç merdaneli haddeleme prosesi..... 20
Şekil 2.1 : Grafen üretimi için kullanılan soğutuculu ark reaktörü. 23
Şekil 2.2 : a) Grafen üretiminde kullanılan grafit elektrotlar, b) üretim sonucu anot ve katotun konumu ve GNP'lerin oluşumu, c) üretim sonucu oluşan Grafen Nano Plakalar (GNP). 24
Şekil 2.3 : Grafenin fonksiyonel hale gelmesi için oluturulan proses şeması..... 25
Şekil 2.4: Saf grafen ile fonksiyonelleştirilmiş grafenin gösterimi..... 25
Şekil 2.5: Üç merdaneli haddeleme yöntemi. 26
Şekil 2.6 : Silikon kalıbı dökmek için kullanılan dış kalıp kullanılmaktadır. İçerisindeki kısmda epoksi için oluşuturulan kısım yer almaktadır. 27
Şekil 2.7: Grafen takviyeli epoksi nanokompozitin üç merdaneli haddeleme yardımıyla oluşan üretim yöntemi. 29
Şekil 2.8: a) Saf epoksi, b) saf grafen ile fonksiyonelleştirilmiş epoksi ve c) grafen / Triton X-100 ile fonskiyonelleştirilmiş epoksinin görüntüleri. 30
Şekil 2.9: Saf epoksi ve epoksi kompozitlerin basma testi için oluşturulmuş nihai numuneleri. 30
Şekil 2.10: Saf epoksi ve epoksi kompozitlerin izod darbe testi için hazırlanmış nihai numuneleri. 31
Şekil 2.11: Basma testi cihazı. 33
Şekil 2.12: Ağırlık düşürme darbe testi cihazı. 34
Şekil 3.1 : Grafenin BET analizi sonucu. 35
Şekil 3.2: Saf grafenin Geçirimli Elektron Mikroskobundaki aydınlık alan görüntüleri. 36
Şekil 3.3 : Saf Grafen ile Triton X-100 / Grafenin Raman Spektroskopisi eğrileri... 38
Şekil 3.4 : Saf Grafen ile Triton X-100 / Grafenin TGA eğrileri. 39

Şekil 3.5 : Saf Grafen ile Triton X-100 / Grafenin TGA eğrileri. 40

Şekil 3.6 : a) Grafen ve b) fonksiyonel grafenin XRD eğrileri. 41

Şekil 3.7: Epoksi ve epoksi kompozitlerin basma testi sonucu oluşan gerilme-gerinim eğrileri. 43

Şekil 3.8: Saf epoksi ve epoksi kompozitlerin elastik modülleri ve akma dayanımları. 44

Şekil 3.9 : 0.01 /s şekil değiştirme hızındaki basma test sonucu kırılan epoksinin 100x yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri. 44

Şekil 3.10 : 0.01 /s şekil değiştirme hızındaki basma test sonucunda kırılan epoksinin 500x yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri. 45

Şekil 3.11 : 0.01/s şekil değiştirme hızlarındaki basma test sonucunda kırılan epoksinin 1Kx yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri. 46

Şekil 3.12 : Kütlece 0,5 oranında Grafen/Triton X-100 takviyeli epoksi kompozitin a) 100x, b) 500x, c) 1kx ve d) 1.5kx yakınlaştırmasındaki kırık yüzey incelemesi. 47

Şekil 3.13: a) Kütlece 0,5 oranında Grafen/Triton X-100 takviyeli epoksi kompozit, ve b) saf epoksinin 500x yakınlaştırmada kırık yüzeylerinin görüntüleri. 48

Şekil 3.14: Ağırlık düşürme darbe testi sonucunda oluşan kuvvet-zaman grafiği..... 49

Şekil 3.15: Ağırlık düşürme darbe testi sonucu oluşan enerji-zaman grafiği. 50

Şekil 3.16: a,b) Kütlece %0,5 grafen içeren ve c,d) Kütlece %0,5 fonksiyonelleştirilmiş grafen içeren epoksi nanokompozitlerin SEM analizi görüntüleri. 51

Şekil 3.17: a) GNP / Epoksi 500x yakınlaştırma, b) TX-100 / GNP / Epoksi 500 x yakınlaştırma, c) GNP / Epoksi 1Kx yakınlaştırma ve d) TX-100 / GNP / Epoksi 1kx yakınlaştırmadaki SEM analizi görüntüleri. 52

Şekil 3.18: Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ortaya çıkan GNP takviyeli epoksi kompozitin a)100x ve b)500x yakınlaştırmadaki kırık yüzey görüntüleri. 53

Şekil 3.19: a) GNP / Epoksi ve b) TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitlerin 5kx yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri. 53

GRAFEN TAKVİYELİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin sistematik bir şekilde birleşmesi ile tasarlanan malzeme grubudur. Polimer sistemler ise, üretimi kolay, hafif, uzun ömürlü, kısmen sünek doğası nedeniyle oldukça kullanılan malzemelerdir. Bu özelliklerine rağmen polimerler, metal ve seramiklere kıyasla düşük elastiklik modülü ve mukevemete sahiptirler. Polimer sistemlerde ise yaygın olarak kullanılan iki grup bulunmaktadır; termosetler ve termoplastikler.

Epoksi, termosetler grubundan yapıştırıcı bir reçinedir. Epoksi, reçinenin kürlenmesi sonucunda oluşan ve epoksit fonksiyonel grubunun halk arasındaki adıdır. Epoksi, yüksek sertlik, kısmen yüksek sıcaklık direnci ve iyi kimyasal ve korozyon direnci ile kompozitler için oldukça faydalı bir matris malzemesi sayılmaktadır.

Grafen (GNP), karbonun sp^2 bağı yapan bir allotropudur. Aynı zamanda grafen, bal peteği kristal kafes yapısı içerisinde tek atom kalınlığında düzlemsel bir yüzey oluşturan bir malzemedir. Yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve yüksek yüzey alanı gibi özellikler, grafeni en ilgi çekici takviye malzemesi konumuna getirmektedir. Elektrik ark deşarj metoduyla, grafitten elde edilen grafenin saflığı diğer birçok yönteme göre oldukça yüksektir. Prosesin temeli direkt elektrik akımına dayanmaktadır. Oluşan nanoparçacıklar fiziksel olarak biriktirme yolu ile toplanmaktadır. Diğer metotlara kıyasla; ark deşarj metodu, düşük maliyetli üretim ve herhangi kataliz kullanımı olmadan üretme imkanı gibi avantajları bulunmaktadır. Ancak, grafenin en ciddi dezavantajı ise aglomerasyondur. Bu durum uygulanacak matrisin, istenilen özelliklerine yeterince katkı sağlamayabilmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmanın en mümkün yolu ise yüzey aktif maddesi ile fonksiyonelleştirilmesidir.

Elektrik ark deşarj metodu ile üretilen grafen, Triton X-100 (TX-100) ile beraber saf suda dağıtılarak fonksiyonel hale getirilmiştir. Yine 0,1 gram grafen 100 ml su içerisinde fonksiyonel hale getirilmiştir. 0,1 gram grafen, 0,15 gram TX-100 karışımını 100 ml saf suda başarılı bir şekilde dağıtmak için 1 saat kadar süreyle sonikasyon yapılmıştır. Sonikasyonun ardından 12 saat boyunca karışım, manyetik karıştırıcıda 65°C sıcaklıkta karıştırılmıştır. Ardından filtreleme ve kurutma işlemleri uygulanmıştır.

Üç merdaneli haddeleme birbirine zıt yönlerde ve farklı hızlarda dönen üç merdane kullanılarak, malzeme üzerinde kayma gerilmesi oluşturma prensibi ile çalışır. Bu çalışmada grafenin topaklanmasını önlemek amacıyla üç merdaneli haddeleme yöntemi kullanılmıştır.

TX-100 / GNP için yapılan TGA analizlerinde 200-400°C sıcaklıklarda önemli bir kütle kaybı bulunabilmektedir. Bu da POPE (polioksietilen oktil fenil eter) moleküllerinin tabakaya başarıyla yapıştığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, TX-100 / GNP termal stabilitesi (Grafen oksite (GO) oranla) bozulmamış grafen kadar iyidir. Saflığı ise, 1,22 olarak bulunmuştur. Katman sayısı ise, 5 ile 7 değerleri arasında

çıkmaktadır. Fonksiyonel grafenin Raman değerleri ise, 0,9 olarak hesaplanırken; katman sayısı da 10 ile 13 değerleri arasında bulunmaktadır.

Basma testi verilerine göre basma mukavemetinin GNP takviyesi ile düşüş gösterdiği ancak TX-100 / GNP takviyesi sonucu saf epoksiye oranla % 5.56 artış gözlemlenmiştir. TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitinin elastik modülü ise saf epoksiye oranla %18,21 ve GNP / Epoksi nanokompozitine oranla %1,9 daha yüksek çıkmıştır. GNP / epoksi nanokompozitin akma dayanımı, saf epoksiye göre %14,30 artış gösterirken TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitin akma dayanımı, saf epoksiye %103 oranında artış ile daha yüksek çıkmıştır.

Ağırlık düşürme darbe deneyi sonucunda fonksiyonel hale getirilmiş GNP takviyeli nanokompozitin darbeye karşı kuvvet direnci, GNP takviyeli nanokompozit haline ve saf epoksiye göre neredeyse 2 kat artış göstermektedir. Bununla birlikte, darbe enerjisi ve absorplanan enerji miktarı yine fonksiyonelleştirilmiş GNP takviyeli epoksi nanokompozitin, saf epoksiye ve GNP takviyeli nanokompozite oranla 2 kat daha yüksek olduğu söylenebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ağırlık Düşürme Darbe Testi, Grafen, Grafen Takviyeli Epoksi Kompozitler, Nanokompozitler, Triton X-100, Üç Merdaneli Haddeleme.

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE REINFORCED NANOCOMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

Composite materials are a group of materials designed by systematically combining two or more materials. Polymer systems, on the other hand, are materials that are easy to manufacture, light, durable, and widely used due to their partially ductile nature. Despite these properties, polymers have low modulus and strength compared to metals and ceramics. There are two groups commonly used in polymer systems: Thermosets and thermoplastics.

Epoxy is an adhesive resin from the thermosets group. Epoxy is the popular name of the epoxide functional group, which is formed because of the curing of the resin. Epoxy is considered a very useful matrix material for composites with its high hardness, moderately high temperature resistance and good chemical and corrosion resistance.

Graphene (GNP) is an allotrope of carbon that makes sp^2 bonds. Graphene is the thinnest material that forms a single-atom-thick planar surface in a honeycomb crystal lattice. Properties such as high strength, high modulus of elasticity and high surface area make graphene the most interesting reinforcement material. The purity of graphene obtained from graphite by the electric arc discharge method is quite high compared to many other methods. The basis of the process is directly from the electric current. The resulting nanoparticles are collected by physical deposition. Compared to other methods; arc discharge method has advantages such as low-cost production and the possibility of producing without the use of any catalysis. However, the most serious disadvantage of graphene is agglomeration. This situation may not contribute enough to the desired properties of the matrix to be applied. The most possible way to eliminate this disadvantage is to functionalize it with a surfactant.

Graphene produced by the electric arc discharge method is made functional by mixing it with Triton X-100 in pure water. 0.15 grams of Triton X-100 (TX-100) is required for 0.1 gram of graphene. Graphene produced by the electric arc discharge method is made functional by mixing it with TX-100 in pure water. Sonication is performed for about 1 hour to successfully disperse a mixture of 0.1 grams of graphene and 0.15 grams of TX-100 in 100 ml of distilled water. After sonication, the mixture is stirred at 65°C in a magnetic stirrer for 12 hours. Then filtering and drying processes are applied.

Three-roll milling works with the principle of creating shear stress on the material by using three rollers rotating in opposite directions and at different speeds. In this study, it is planned to use three-roll rolling method to prevent agglomeration of graphene.

For TX-100 / GNP, a significant mass loss can be found at temperatures of 200-400°C. This reveals that POPE (polyoxyethylene octyl phenyl ether) molecules have successfully adhered to the layer. Also, the thermal stability of TX-100 / GNP (compared to graphene oxide (GO)) is as good as pristine graphene. Its purity was found to be 1.22. The numbers of layers are between 5 and 7. When we look at functional graphene. While the Raman values of functional graphene were calculated as 0.9; the number of layers is also between 10 and 13 values.

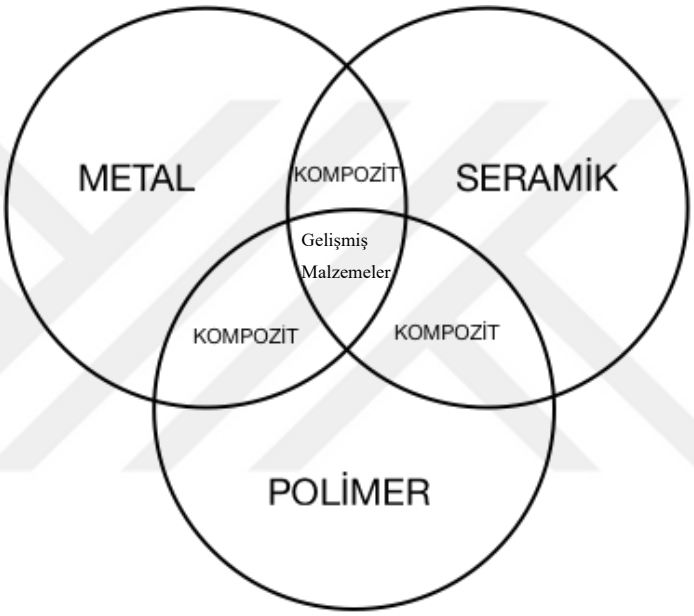
According to the compression test data, it was observed that the compression strength decreased with GNP reinforcement, but increased by 5.56% compared to pure epoxy as a result of TX-100 / GNP reinforcement. The elastic modulus of TX-100 / GNP / Epoxy nanocomposite was 18.21% higher than pure epoxy and 1.9% higher than GNP / Epoxy nanocomposite. The yield strength of GNP / epoxy nanocomposite increased by 14.30% compared to pure epoxy, while the yield strength of TX-100 / GNP / Epoxy nanocomposite was higher with a 103% increase to pure epoxy.

As a result of the weight drop impact test, the strength resistance of the functionalized GNP reinforced nanocomposite shows an almost 2-fold increase compared to the GNP reinforced composite and pure epoxy. However, it can be said that the impact energy and the amount of energy absorbed are 2 times higher for the functional GNP reinforced epoxy nanocomposite compared to pure epoxy and GNP reinforced nanocomposite.

Keywords: Drop Weight Impact Test, Graphene, Graphene Reinforce Epoxy Composites, Nanocomposites, Three Roll Milling, Triton X-100.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile beraber, mevcut ihtiyaçları karşılamak için yeni malzeme arayışı gerekmektedir. Uzun süredir kullanılan metal, seramik ve polimer malzemeler; maliyet, dayanıklılık, ağırlık gibi fiziksel, mekanik ve ekonomik ihtiyaçları her zaman karşılayamamaktadırlar.



Şekil 1.1: Malzemelerin gruplandırılma şeması.

Kompozit malzemeler, endüstride talep edilen ihtiyaçları karşılamak amacı ile yola çıkan iki veya daha fazla malzemenin sistematik bir şekilde birleşmesi ile tasarlanan malzeme grubudur. Bu birleşim sonucunda oluşan kompozitin yeni ve daha başarılı bir özellik göstermesi gerekirken aynı zamanda birleştiği ürünlerin özelliğinin de ortaya çıkması beklenmektedir. Oluşan birleşimin temel öğeleri; metal, seramik veya polimer olurken aynı zamanda karbon atomunun daha iyi anlaşılması ile beraber, karbon da bu temel öğeler içerisinde yer almaktadır (Şekil 1.1).

Bu bağlamda; hazırlanan tez çalışmasında belirtilen fiziksel ve mekanik ihtiyaçları karşılaması amacıyla bir GNP takviyeli ve fonksiyonel hale getirilmiş GNP takviyeli epoksi kompozit malzeme tasarlanması amaçlanmaktadır. Oluşturulacak yeni

kompozit malzemenin özellikleri, mekanik (basma ve ağırlık düşürme darbe testi ve izod darbe testi) ile yapısal karakterizasyonların (taramalı elektron mikroskobu (SEM), Raman spektroskopisi, termogravimetrik analiz (TGA) vs.) ardından belirlenecektir. Amaç doğrultusunda oluşturulan kompozitin, farklı bir teknikle (üç merdaneli haddeleme yöntemi gibi farklı bir teknikle) üretilmesi ardından mekanik ve fiziksel özelliklerinde iyileşme ile beraber maliyeti daha yüksek olan ürünlerin yerine tercih edilebilmesi hedeflenmektedir.

1.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, ilk olarak doğadan türetilebilen ve geliştirilen malzeme grubu olarak gösterilmektedir. Tarihte, bu malzeme grubunun gelişmesi oldukça eski dönemlere dayanmaktadır. Gelişmiş teknoljiye ayak uydurma süreci ise yeni sayılmaktadır.

Kompozit malzemelerin; günümüzde ve gelecekte potansiyel olarak; inşaat endüstrisi, otomativ endüstrisi, havacılık ve sağlık gibi birçok farklı alanda kendisine yer etmesi söz konusudur. Bu malzeme grubunun, önceden belirlenmiş fiziksel, kimyasal, mekanik, termal özellik ve karakteristiklere sahip olacak şekilde üretilebilmesi gibi diğer malzeme türlerine göre benzersiz avantajları vardır. Bu avantajlar ise, birçok endüstride tercih edilmesinin en önemli sebebidir. Üretilen bir kompozit malzemenin nihai özellikleri, bileşenlerin bireysel özelliklerine ve son oluşturdukları birleşimin özellikleriyle ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzemenin nihai özellikleri, son fazın geometrisine ve dağılımına da büyük ölçüde bağlıdır. Dağınık fazın geometrisi, şekillerini ve boyutlarını ifade ederken; dağılımı ise matristeki konumlarını ve yönelimlerini kapsar (Egbo, 2020).

Kompozit malzemeler, tasarımı ve üretiminden kaynaklanan farklı özellik kombinasyonları sergilemektedir. Malzemelerin özellik kombinasyonları oldukça çeşitlidir ve istenildiği gibi değiştirilebilmektedir, ancak tek bir özellik tüm kompozitler için olması gereklidir: Düşük ağırlık-mukavemet oranı. Genel olarak farklılaştırılan özellikler ise:

I. Yüksek korozyon direnci,
II. Yüksek yorulma direnci,
III. Yüksek darbe dayanımı,

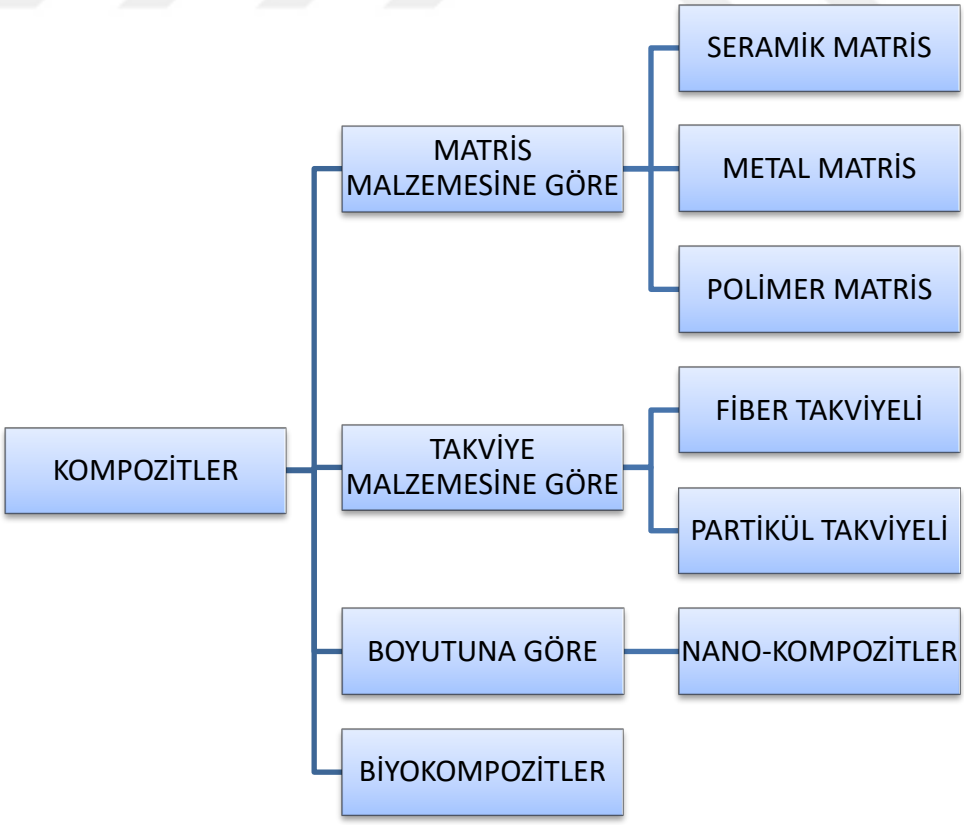
IV. Düşük termal iletkenlik,

V. Düşük elektrik iletkenliği,

VI. Yüksek aşınma direnci,

VII. Sürünme direncidir (Egbo, 2020).

Kompozit malzemelerin malzeme bilimi ve mühendisliğinde bu kadar hızlı büyüyen ve geleceğin en potansiyelli malzeme grubu arasında olmasının sebepleri arasında; sertlik ve mukavemet ile düşük ağırlık ve yüksek korozyon direncinin çok cazip olarak görülmesidir (Rajak ve diğ, 2019). Darbe dayanımı, elektriksel özellikler, aşınma direnci, kimyasal ve termal özellikleri daha başarılı malzeme türü olmasında etkili faktörlerdir. Bu kombinasyonlar kompozit malzemelerin gruplandırılması ve bu grupların özellikleri ile değişiklik göstermektedir. Temel olarak bakıldığı zaman doğada bulunma koşullarına göre kompozitlerin iki farklı grupta yer aldığı belirtilebilir. Bu gruplar doğal kompozitler ve sentetik kompozitler olarak ayrılmaktadırlar. Ayrıca farklı türden gruplandırma da yapmak mümkündür. Bu grupların içerisinde; matris malzemesine göre kompozitler, takviye malzemesine göre kompozitler, boyutuna göre kompozitler ve biyokompozitler bulunmaktadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 : Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

Metal matrisli kompozitler (MMK), temel malzemesi metal ve katkı madddesi seramik veya organik malzemeler olan kompozit türüdür. MMK'lar, yüksek mukavemet, güçlendirilmiş mekanik, termal ve kolay şekil verme özelliklerinden dolayı geniş perspektifte kullanılabilen bir gruptur. Metal olan matris malzemesinin en önemli görevi ise, kompozit malzemede katkı malzemesini homojen şekilde dağıtmak ve yükün yayılmasını sağlamaktır. Genellikle matris olarak hafif metal grupları tercih edilmektedir. En yaygın olarak kullanılanı ise alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyumun kullanılmasının en önemli sebepleri ise; düşük yoğunluğa ve düşük erime noktasına sahip olmasıdır (Öztop ve Gürbüz, 2017). Bu özellikler ile beraber katkı maddesinden doğan güçlü özellikler sayesinde hafif ürünler elde etmek mümkündür. Bu bağlamda metal matrisli malzemelerin uygulama alanları; otomotiv motor gövdesi, piston, kablo ve elektrik bağlantısı, medikal, spor malzemesi, uzay ve havacılık, bağlantı çubuğu, şarj plakasıdır (Rosso, 2006).

Seramik matrisli kompozitler (SMK), temel maddesi seramik ve katkı maddesi metal alaşımları veya karbon temelli yapılardan oluşan malzeme grubudur. SMK'lar; termal şok, korozyona dayanım özellikleri, yüksek sıcaklıklarda sürünme davranışı ve iyi kırılma tokluğunu destekleyen dayanım özellikleri göstermektedir (Bhosale ve diğ, 2014). Takviye malzemesi ise; matrisin kırılmaya karşı gösterdiği direnci (çatlak ilerlemesi) ve stresi dağıtarak geliştirmektedir (Callister, 2001). Böylece bu kompozitler; yüksek sertlikleri ve dayanıklılıları nedeniyle oldukça tercih edilen seramiklerin, kırılganlığının ve mekanik güvensizliğinin de önüne geçmektedirler (Cho ve diğ, 2009). Seramik matrisli kompozitler bu özelliklerinden dolayı otomativ gaz türbinleri, havacılık uygulamaları, kesme aleti uçları, ısı değişim tüpleri ve karbon frenlerde kullanılmaktadır (Rayat ve diğ, 2017).

Fiber kompozit türleri, kompozit grubu içerisinde en çok bilinen gruplardan biridir. Takviye malzemesi olan fiber, tüm matrisi sararak daha başarılı bir malzeme ortaya çıkarmaktadır. Metal, polimer ve seramiğe uygulanabilen fiber malzemeler, mukavemet ve elastiklik modülü gibi yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır. Bu malzeme grubunda ise sadece malzemelerin spesifik özellikleri, oluşan malzemenin özelliklerini belirlemez. Aynı zamanda, fiberin faz durumuna ve fiberin boy-çap oranına bağlı olarak değişmektedir. Fiberin durumundan ve dağılımından kaynaklanan 3 farklı fiber kompozit türü bulunmaktadır. Bunlar; uzun (sürekli) fiberler, kısa (süreksiz) fiberler, rastgele dağılmış fiberlerdir.

1.1.1 Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, temelini doğadan alan malzemelerdir. Doğada bulunmaları bakımından, 2 ayrı grupta yer almaktadırlar. Doğal polimerler; ham maddesi doğada bulunabilen malzemeler iken sentetik polimerlerin ham maddesi ise petrol ve petrol bazlı ürünlerdir. Bu iki malzeme türünün en önemli ayrılan özelliklikleri doğaları ile beraber üretim yöntemleridir.

Polimer malzemeler; üretimi kolay, hafif, uzun ömürlü, kısmen sünek doğası nedeniyle oldukça kullanılan malzemelerdir (DeGarmo ve diğ, 1997). Bu özelliklerine rağmen polimerler, metal ve seramiklere kıyasla düşük modül ve mukevemete sahiptirler. Ancak bu özelliklerini geliştirmek mümkündür. Fiber, partikül, whiskers veya plaka ile takviyelendirerek düşük ağırlık ve süneklik özelliklerini koruyarak diğer özelliklerinin artması beklenmektedir (Jordan ve diğ, 2005). Bu takviye malzemelerine, polimer malzeme ortam oluşturarak ve ev sahipliği yaparak mühendislik alanında talebi karşılayabilecek duruma getirmektedirler.

Polimer matrisli kompozitler (PMK); termoset veya termoplastik polimer matrisinden oluşan ve çeşitli takviyeler ile güçlendirilen malzeme çeşididir (Ray, 2006; Xu ve diğ, 2001). Termoset polimerler, termoplastiklere oranla daha çok tercih edilmektedirler (Dang ve diğ, 2012).

Mühendislik alanındaki genel talepleri karşılayan avantajları; prosesin partikül malzemesinin boyuna, şekline ve cinsine uygun olmasına bağlıdır. Genellikle, partikül, fiber veya nanomalzemeler katkı maddesi olarak kullanıldığı zaman polimer matrisin üretimine açık olmaktadır ve bu katkılar, polimer malzemeye yüksek mekanik performans ve mükemmel işlevsellik tanımaktadır. PMK'ların mekanik özellikleri oldukça düşüktür. Bunun sebebi ise; yapılan çalışmalarda, gerinim oranlarında kompozitlerin mukavemet ve sertlik varyasyonlarıdır (Gurusideswar ve Velmurugan, 2014).

Günümüzde yapılan çalışmalarda, destekleyici olarak karbon nanotüp (KNT) (Balog ve diğ, 2010), GNP (Kuilla ve diğ, 2010) ve grafit (Zheng ve Wong, 2003) ; PMK'nın üretiminde en etkili ve en çok denenen malzemeler olarak yer almaktadırlar (Singh, 2020).

1.1.2 Partikül takviyeli kompozitler

Kompozitler katkı maddelerinin çeşitli yapı ve durumlarına göre gruplandırılmaktadır. Takviyenin morfolojisine ve boyutuna göre ise kompozitler; parçacık ve fiber takviyeli kompozitler olarak ayrılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan GNP, özellikle parçacık takviyeli kompozitlerin içerisinde değerlendirilmektedir.

Kompozit içerisinde, takviye malzemesinin düzenli veya düzensiz bir geometride bulunan matris içerisinde dağıtılması ile oluşan kompozit malzemelere, partikül takviyeli kompozit malzemeler denilmektedir. Partikül takviyeli kompozitler, fiberlere kıyasla daha izotropik özelliklere sahiptir. Başarılı özgül modülleri, rijitlikleri, mukavemetleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşınma dayanıklılığı, daha düşük ısıl genleşme katsayısı ve izotropik özellikleri nedeniyle partikül takviyeli kompozitler endüstride oldukça ilgi çeken malzeme olarak kabul edilebilmektedir. (Kösedağ ve Ekici, 2019).

1.1.3 Nanokompozitler

Geleneksel olarak tanımlanan yöntemlerde, kompozitler mikron boyutlarında takviyeler içermektedirler. Son yıllarda; proses teknikleri, takviye malzemesinin boyutunun nano ölçeğe inmesine izin vermek için geliştirilmiştir. Nano-boyutlu takviyeler, en az bir boyutunun ölçüsü 1-100 nm arasında olan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu ölçü boyutu, malzemenin özelliklerine yeni bir olgu getirerek katkıda bulunmaktadır (Jordan ve diğ, 2005). Nanokompozitlerde en önemli avantaj; skala düştükçe yüzey alanının hacme oranının artması ve bunun sonucunda daha geniş arafaz bölgeleri yaratarak çevresini kaplayan matrisle daha fazla reaksiyon yapmasını sağlamaktadır (Kessler, 2012).

Nanokompozitler, genel olarak; aralıksız, aralıklı ve eksfoliye edilmiş olarak üç farklı grupta incelenirken genel olarak üretim metotları ise; eriyik birleşimi, polimerin aralarına ekleme, kalıp sentezleme ve yerinde (in situ) polimerizasyondur (Hári ve Pukánszky, 2011; Mittal, 2015).

1.2 Epoksi Matrisli Kompozitler

Epoksi, termosetler grubundan yapıştırıcı bir reçinedir. Epoksi, reçinenin kürlenmesi sonucunda oluşan ve epoksit fonksiyonel grubunun halk arasındaki adıdır (Aynı

zamanda polyepoksit olarak adlandırılırken epoksit grubu içeren reaktif prepolimer veya polimer sınıfı olarak tanımlanabilir.). Kendine has benzersiz karakteristik özellikleri ile epoksi, en çok kullanılan termoset polimeridir (Zamanian ve diğ, 2013).

İlk olarak 1934 yılında Paul Schlack (Almanya) tarafından raporlanmış ve patentlenmiştir. Daha sonra ise çalışmalar yapılarak 1943'te Pierre Castan, 1946'da Sylvan Greenlee ve 1990'ların sonunda Huntsman Corporation tarafından farklı formlarla geliştirilmiştir.

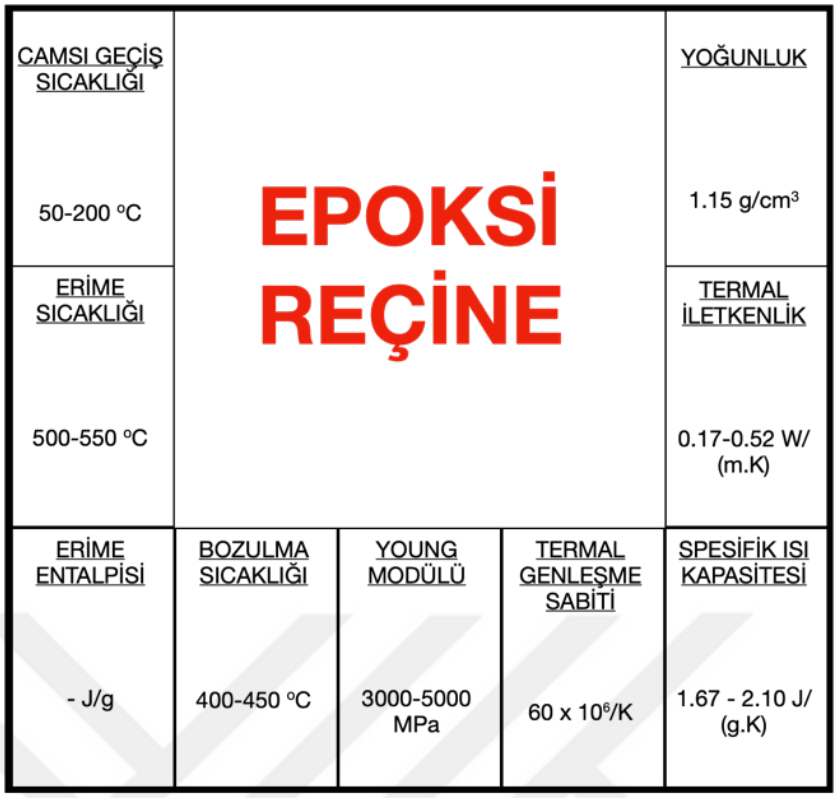
1.2.1 Epoksilerin özellikleri ve kullanım alanları

Epoksi reçineler, iyi mekanik özellikleri ve düşük maliyeti ile çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılan malzeme türüdür (Jin, Li ve Park, 2015). Epoksi; yüksek sertlik, kısmen yüksek sıcaklık direnci, iyi kimyasal ve korozyon direnci ile kompozitler için oldukça faydalı bir matris malzemesi sayılmaktadır. Epoksi matrisinin en temel dezavantajı ise; doğasında olan gevreklik ve bunun sonucunda ortaya çıkan kompozitlerdeki düşük tokluktur (Wong ve diğ, 2010).

Her moleküldeki epoksi grupları ve diğer kimyasal grupların miktarı, epoksi reçinedeki fonksiyonelliği belirlemektedir. Bu molekül grupları sonucunda genel olarak:

a. Mukavemet ve dayanıklılık
b. Düşük kürlenme büzülmesi
c. Adhezyon
d. Elektrik yalıtımı
e. Korozyon ve kimyasal direnç
f. Çok sayıda malzeme ile uyumluluk göstermektedir (Xiang ve Xiao, 2020).

Bu özelliklerin ortaya çıkmasında; spesifik kürleme ajanı, epoksi reçine ve uygulanacak alana uygun olacak şekilde tasarlanan formülasyon etkili olmaktadır. Şekil 1.3'te epoksinin bazı önemli termal ve mekanik özelliklerinin spesifik değerleri verilmiştir.



Şekil 1.3: Epoksi reçinenin termal ve mekanik özellikleri .

Kimyasal doğasına göre bakıldığında; kürlenmemiş epoksi reçinenin beş farklı grubu bulunmaktadır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1 : Epoksinin kimyasal grupları (‘ASTM D1763-00(2013)).

Tip	Ad
Tip 1	Bisfenol A ve epiklorohidrin
Tip 2	Fenol ve Formaldehit (novolac resin) ve epiklorohidrin olarak oluşan reaksiyon ürünleri
Tip 3	Saykloalifatik ve perasit epoksiler
Tip 4	Glisidil esterler
Tip 5	Epiklorohidrin and p- aminofenol reaksiyon ürünleri

En yaygın kullanılan epoksi türü ise bisfenol A'nın diglisidil eteri (DGEBA), tip 1 epoksi türünden gelmektedir (Schwartz ve Goodman, 1982). Epoksi reçinenin ortak formülü, epoksi grupları ve genellikle moleküler zincir uzunluğu boyunca düzenli aralıklarla oluşan hidroksil grupları ile doğrusal bir polieter olarak ifade edilir (Osumi, 1987). Epoksideki kimyasal direnç ve esneklik, ana zincirdeki bağlar arasındaki boşluklardan oluşmaktadır. Mükemmel ısı direnci ve dayanıklılık, benzen halkalarından gelmektedir. Başarılı adhezyon kuvveti ise ikincil hidroksil grubunun ana zincirindeki konumlanmasından oluşmaktadır (Xiang ve Xiao, 2020).

Bu özellikler bağlamında, epoksi reçineye; havacılık, kimya, inşaat mühendisliği, otomotiv, elektrik, denizcilik, basit yapılar gibi uygulama alanları yüksek talep oluşturmaktadırlar.

1.2.2 Epoksi üretimi ve karakterizasyonu

Yaygın olarak kullanılan epoksi türü Tip 1 epoksilerdir. Bisfenol A (BPA) ve epiklorohidrin (ECH) bileşenlerinden oluşan Tip 1, reaktöre girerek işleme başlamaktadır. Kaynama noktasına ulaşınca %20 ile %40 arasındaki oranlarda kostik soda takviyesi yapılmaktadır. İşlemin ardından ECH, reaksiyona girmemektedir ve buharlaştırılarak ortamdan uzaklaştırılmaktadır. ECH'nin uzaklaştırılması ile beraber geriye iki faz kalmıştır. Bu iki faz ise etkisiz bir çözücü eklenerek uzaklaştırılmaktadır. Reaktör içerisindeki reçine, suyla yıkanmanın ardından vakumlama yöntem ile damıtılmaktadır. Reçinenin en önemli özelliklerinden biri olan sertliği elde edebilmek için amin grubu bileşikler eklenmektedir. Reçineler 5°C – 150°C sıcaklıklar arasında kürlenmektedirler. Reaksiyon süresi ortam koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Ankara, 2019).

Üretilen epoksi uygulama alanlarına göre çeşitli karakterizasyon teknikleri aracılığı ile test edilmektedir. Özellikle yakın tarihte; epoksi, kompozitler için oldukça başarılı bir matris olması sebebi ile birçok karşılaştırma amaçları içerisinde kullanılmaktadır. Genel olarak epoksinin karakterizasyonunda mekanik özellikleri temel alan metotlar kullanılmaktadır. En kuvvetli örnekleri ise çekme-basma testleri, split-hopkinson bar testi, eğme-bükme testleri, darbe testleri ve bu testler sonucunda oluşan kırık yüzeyini incelemek amacıyla görüntüleme (Optik mikroskop veya SEM yaygın olarak kullanılmaktadır.) teknikleri kullanılmaktadır.

1.3 Takviye Malzemesi: Grafen

Nobel Fizik ödülünün verilmesi üzerinden geçen yedi yıl ve raporlanması üzerinden geçen on üç yılın ardından bu "eşsiz malzemeye", her geçen yıl artan ilgi ve araştırmaya yapılan yatırım artmaktadır.

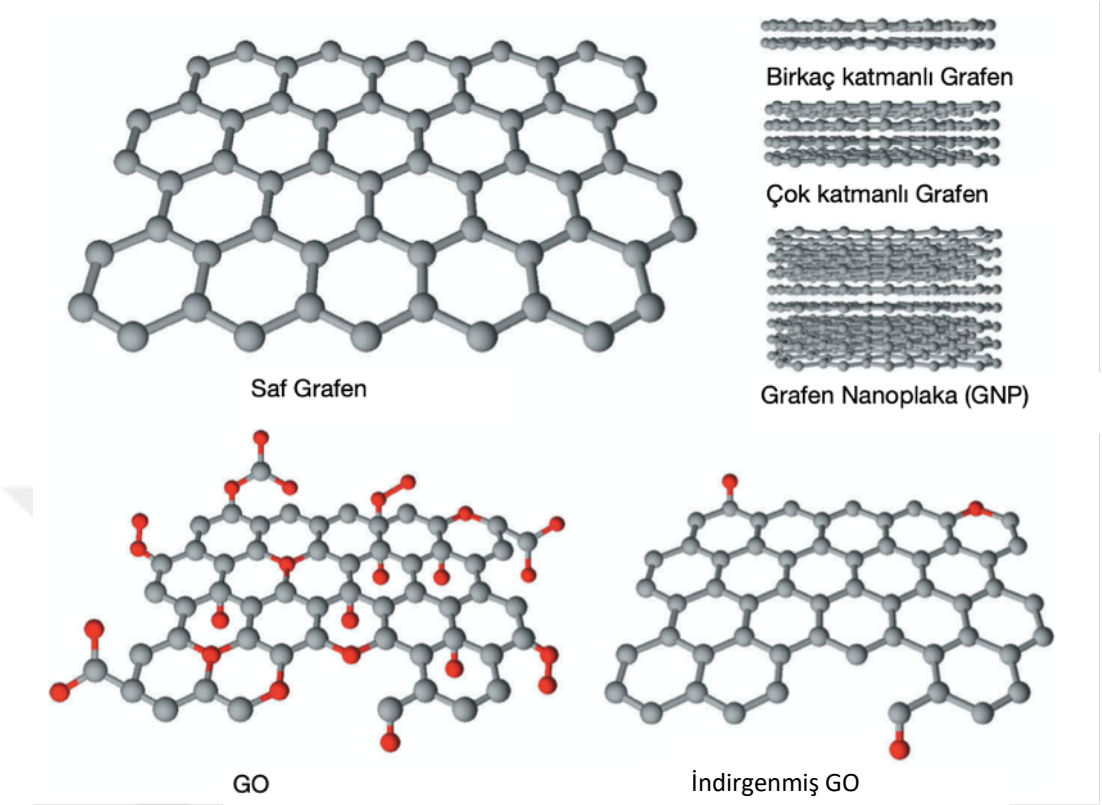
Karbonun; grafit, elmas, fulleren (nanotüp C60) ve grafen gibi birçok allotropu bulunmaktadır (Cotul ve diğ, 2018). Grafen ise, karbonun sp^2 bağı yapan bir allotropudur. Aynı zamanda grafen, bal peteği kristal kafes yapısı içerisinde tek atom kalınlığında düzlemsel bir yüzey oluşturan en ince malzemedir. Grafenin oldukça fazla ilgi çekmesinin birçok nedeni bulunmaktadır. Bu ilgi çekici özellikleri arasında;

- Başarılı elektrik iletkenliği 15000 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ (Sang *ve diğ*, 2019),
- Yüksek elastisite modülü (~ 1 TPa),
- Yüksek yüzey alanı (2630 m^2/g),
- Yüksek termal iletkenlik (5000 W/mK) (Borand ve diğ, 2021),
- Oda sıcaklığında yüksek elektron hareketliliği (250,000 cm^2/Vs),
- Çelikten 100-300 kat daha sağlamlık,
- Son derece sert,
- Oldukça düşük kütle,
- Saydamlık sayılmaktadır.

Bu özellikler sonucunda birçok potansiyel alanda grafene talep oluşmaktadır. Bu potansiyel uygulama alanları; yüksek teknolojili kompozit malzemeler, transistörler, elektromekanik sistemler, elektronikler, süperkapasitörler ve güneş panelleridir (Papageorgiou ve diğ, 2017).

En çok kullanılan alanlardan olan kompozit malzemelere takviye olan bu malzeme, çeşitli şekillerde takviye olarak kullanılabilmektedir ve kullanıldığı takdirde başarılı bir şekilde mekanik ve fiziksel özelliklerde geliştirme göstermektedir. Grafenin yapısı, hazırlama yöntemi, dolgu maddesinin matristeki dağılımı, dolgu-matris etkileşimleri ve dolgunun yönü dahil olmak üzere grafen bazlı nanokompozitlerin mekanik özelliklerini çeşitli parametreler etkileyebilir. Young modülü ve çekme mukavemeti, tokluk ile birlikte çok az miktarda dolgu ile bile önemli artışlar göstermektedir. Bununla birlikte, gerilme mukavemeti, dolgu maddesinin toplanmasından büyük ölçüde etkilenir ve bu nedenle, çoğu zaman, artan dolgu içeriği ile gerilme modülünde doğrusal bir artış olduğu, gerilme mukavemeti ise daha düşük dolgu yüzdelerinde

doyduğu bulunmuştur. Şekil 1.4'te grafenin üretim ve kimyasal yollarla elde edilebilecek farklı kombinasyonları verilmiştir.



Şekil 1.4 : Grafenin moleküler dizilimleri ve çeşitleri.

Grafenin uygulanması hala bir zorluktur ve en önemli sorun; yüksek kaliteli ve iyi tanımlanmış grafenin toplu miktarlarda hazırlanmasıdır. Grafenin benzersiz özelliklerinden yararlanmak için gerekli olan diğer bir parametre, grafenin yeterli dağılımını sağlamadaki zorluktur (Papageorgiou ve diğ, 2017).

1.3.1 Grafen üretim yöntemleri

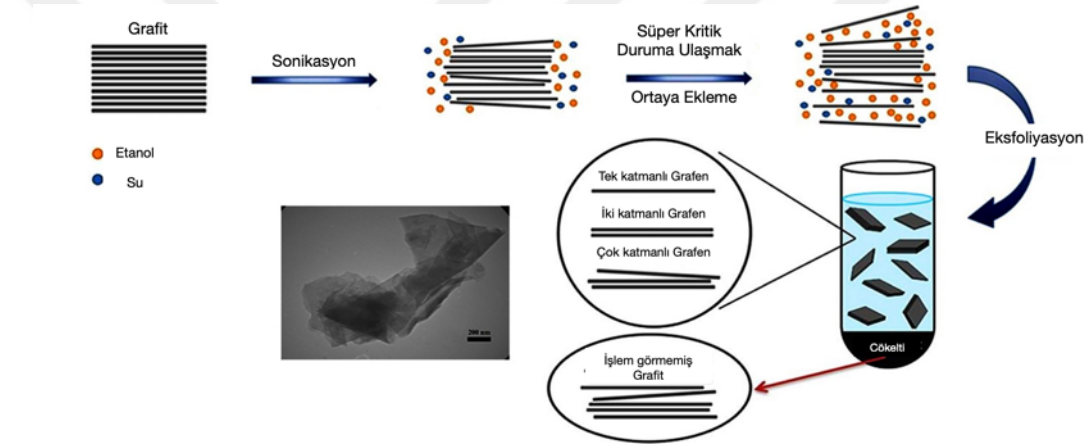
Büyük ölçekte ve yüksek saflıkta grafen üretmek için birçok farklı yol ortaya çıkmaktadır. İki farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar;

1. Yukarıdan aşağıya (top-down) ve
2. Aşağıdan yukarıya (bottom-up) olarak verilmektedir.

Bu yaklaşımlar içerisinde; eksfoliasyon, grafen oksidin indirgenmesi (Hummers' metodu), kimyasal buhar biriktirme (KBB), epitaksiyel büyütme ve elektrik ark deşarj metotları bulunmaktadır (Cotul ve diğ, 2018).

1.3.1.1 Eksfoliasyon metodu

Eksfoliasyon metodu, grafitin küçük miktarlardan grafen üretiminin ilk tekniğidir. 2004 yılında Novoselov tarafından grafit filmlerinden grafen üretimi sağlanmıştır (Geim, 2011). Büyük çapta üretim için pek uygun bir yöntem değildir. Bu metotta, bir parça grafit tekrarlanan bant eksfoliyasyona maruz kalır ve ardından substrata dönüşür. Tabaka sayıları ise optik mikroskop, Raman spektroskopisi, atomik kütle mikroskobu ve/veya taramalı tünel mikroskobu ile hesaplanabilir. Bu metot hala, en yüksek kalitede kristaller yapabilmektedir. Ancak sadece laboratuvarda ve çok düşük miktarlarda üretim yapabilmektedir. Bu sebeplerden ötürü endüstri ve sanayi için uygun bir hazırlama metodu değildir (Papageorgiou ve diğ, 2017). Şekil 1.5'te eksfoliyasyon metodunun proses şemasını ve kimyasal etkileşimini göstermektedir.

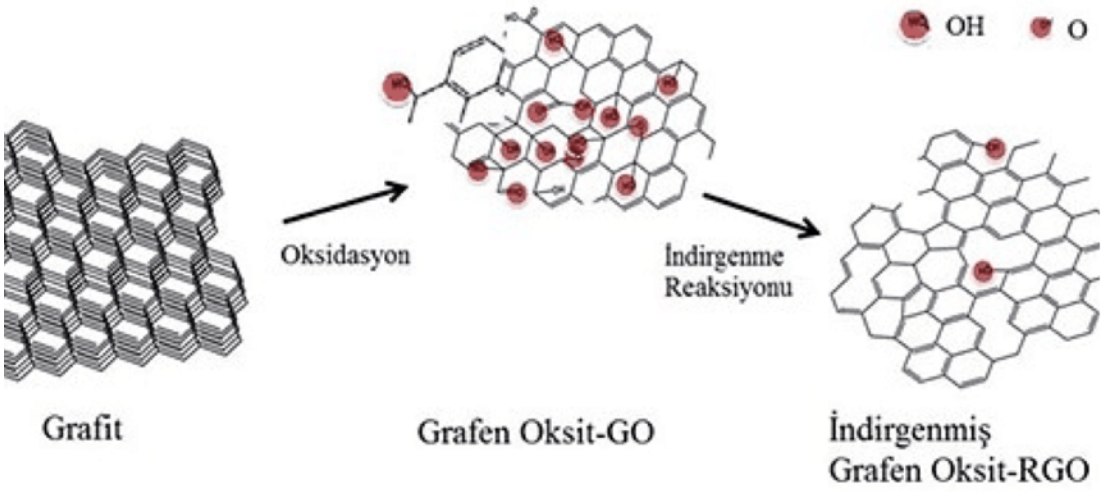


Şekil 1.5: Eksfoliasyon metodunun proses şeması.

1.3.1.2 Grafen oksitin indirgenmesi

Grafen oksit, grafit tabakalarının birbirinden ayrılarak ve oksitlenerek oluşan grafenin tek katmanlı formudur. Karbon ve oksitlerden oluşan fonksiyonel gruplar içeren grafen oksitten, çeşitli yollardan faydalanılarak ve indirgenme reaksiyonu oluşturarak grafen üretimi sağlanmaktadır (BEDELOĞLU ve TAŞ, 2016).

Kimyasal bir proses olan bu metotta, farklı indirgeyici ajanlar kullanılmaktadır. Bunlar; hidrozin, sülfür içeren bileşikler ve yeşil uygulamalar için kullanılan bileşiklerdir. Farklı kimyasal bileşikler kullanılırken aynı zamanda bu bileşikler ile beraber farklı teknikler de kullanılmaktadır. Bu teknikler; termal indirgeme yöntemleri, kimyasal indirgeme yöntemleri ve çok adımlı indirgeme yöntemleridir. Şekil 1.6'da grafitten oksidasyon yolu ile grafen oksite ardından da indirgenme reaksiyonu ile birlikte indirgenmiş grafen oksit (Grafen, RGO) eldesi verilmektedir.



Şekil 1.6 : Grafitten indirgenmiş grafen oksit eldesi (Tiyek ve diğ, 2016).

Ancak bu prosesi etkileyen en önemli faktörler, kararlı bir süspansiyonu korumak için karıştırılacak olan indirgeyici ajan, yüzey aktif maddesi ve çözücü seçimidir. İç kusurlar (Kayma ve deformasyonlar) ve dış kusurlar (O- ve H- içeren gruplar) içermesinden dolayı üretilen malzemenin kalitesinin yüksek olduğu kabul edilememektedir. Bu yüzden üretilen malzemenin kusurlu olup olmadığı tartışmaya açıktır.

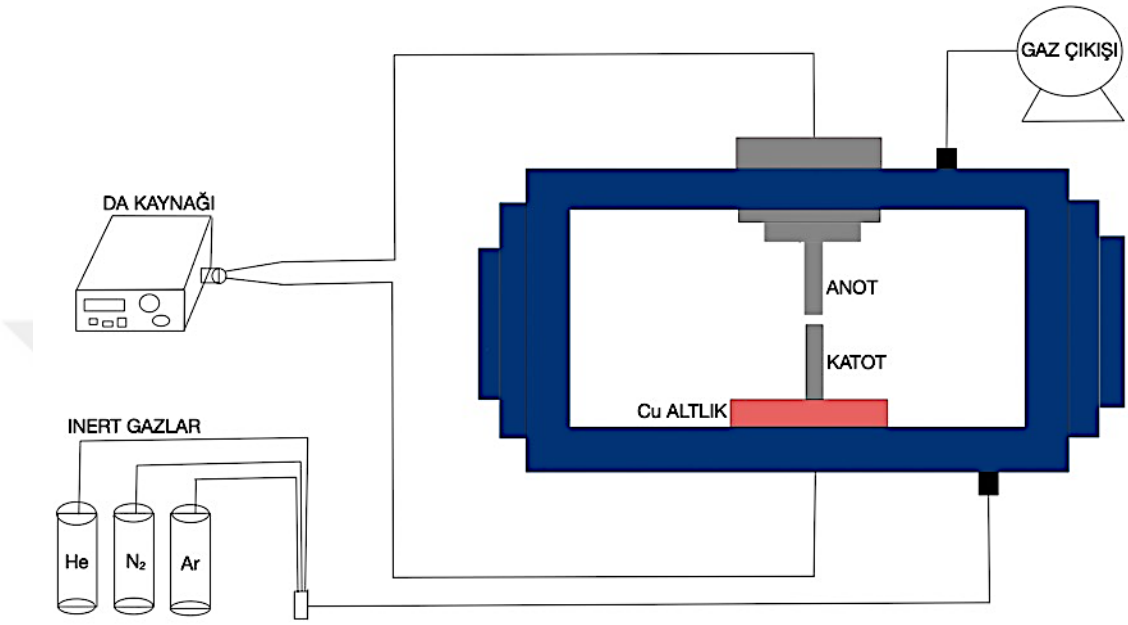
1.3.1.3 Kimyasal buhar biriktirme

KBB metodu, tek yada çoklu tabaka grafen filmlerinin büyük çapta üretimindeki en popüler metottur (Li ve diğ, 2009). Bir metali; farklı hidrokarbon öncülerine, yüksek sıcaklıklarda maruz bırakarak geniş alan numuneleri hazırlanabilir. Bu metodun birçok farklı yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; plazma ile geliştirilmiş KBB, termal KBB ve sıcak/soğuk duvar KBB'dir. Grafen oluşumunun kesin mekanizması, büyüme substratına bağlıdır, ancak tipik olarak hidrokarbonların ayrışmasından sonra metal üzerinde çekirdeklenen karbon atomlarının büyümesiyle başlamaktadır ve çekirdekler daha sonra geniş alanlara doğru büyümektedir (Papageorgiou ve diğ, 2017).

1.3.1.4 Elektrik ark deşarj metodu

Elektrik deşarj metodu fiziksel üretim metodundan bir tanesidir. Yukarıdan aşağıya yaklaşımını benimsemektedir. Prosesin temeli direkt elektrik akımından gelmektedir. Oluşan nanoparçacıklar fiziksel biriktirme yolu ile toplanmaktadır. Diğer metotlara kıyasla; ark deşarj metodu, düşük maliyetli üretim, yüksek saflık ve herhangi kataliz kullanımı olmadan üretme imkanı gibi avantajları bulunmaktadır (Edwards ve

Coleman, 2013). Bu avantajlar, grafenin elektrik ark (DAEA) kullanılarak üretiminin ticari potansiyeli için ciddi bir artı oluşturmuş ve sentezi için ciddi bir dönüm noktası yaratmıştır (Zhang ve diğ, 2019). Şekil 1.7, elektrik ark deşarj metodunun şematik gösterimini vermektedir.



Şekil 1.7 : Grafen üretimi yapılan ark reaktörü şeması.

Bu metotta, grafen ile birlikte çok duvarlı karbon nanotüp (ÇD-KNT) (Liang ve diğ, 2012), tek duvarlı karbon nanotüp (TD-KNT), küresel karbon nanoparçacıklar (SCNs) (Glerup ve diğ, 2004), karbon nanoboynuzlar (CNHs) (Yamaguchi ve diğ, 2004) üretilebilmektedir .

Bu malzemeleri için önemli olan kısım ise, çelik haznenin iç duvarında biriken malzemenin nereden toplanacağıdır. Her bir malzemenin yüksek saflıkta bulunan bölgesi farklıdır. Bu yöntemde bir anot ve bir katot bulunmaktadır. Grafenin en saf hali için, anot ve çevresi geçerlidir. Ayrıca grafenin saflığı için en önemli faktör ise ortamda bulunan gazlardır. Bu yüzden metotta içerisinde bulunan ve sağlanan gaz akışı da oldukça önemlidir. H_2 gazı ile başlayan süreçten günümüze kullanılan gazlarda çeşitlilik oluşmaktadır. H_2 gazı ile beraber N_2, CO ve CO_2 kullanılmaktadır. Bu gazların çeşitli kombinasyonları da geçerlidir.

1.3.2 Grafenin fonksiyonelleşmesi

Grafen, takviye edildiği malzemeye mekanik, dinamik ve elektriksel özelliklerini ileri derecede arttırmaktadır. Çeşitli tekniklerle matrise takviye edilmektedir. Öğütme, sonikasyon, ultrasonikasyon ve manyetik veya fiziksel karıştırma takviye tekniklerine örnek gösterilmektedir. Özellikler PMK'lar için takviye edilirken sorunlar ortaya çıkmaktadır. En büyük sorun ise çoğu solvent içerisinde kolloidal stabilitesini sağlayamamasıdır. Özellikle bu sorun; grafen özelinde, karışım içerisinde topaklanma olması sebebiyle başarılı bir karışım yaratmaması üzerine kompozitin özellikle mekanik özelliklerini beklenilen düzeyde arttıramamasıdır (Qamar ve diğ, 2019).

GNP'nin yüzeyini modifiye etme imkanı çeşitli yollarla mevcuttur. Bu sayede karakteristiğini değiştirerek istenilen duruma erişilmesi sağlanmaktadır. İki farklı bölümde yüzey fonksiyonelleştirmesi mevcuttur. Bunlar;

a) Hidrofilik,

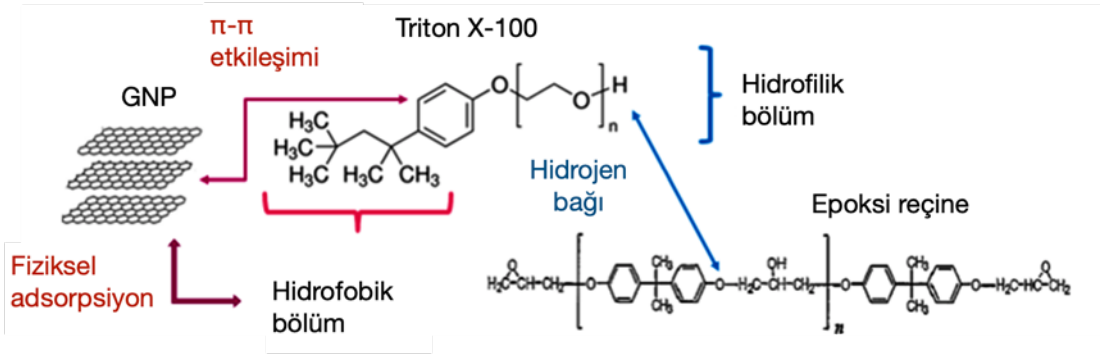
b) Hidrofobiktir.

İki tip yüzey aktif maddesi ortaya çıkmaktadır. Bunlar;

a) İyonik (örn: SDS, NaDDBS)

b) İyonik olmayan (Non-ionic) (örn: Tween 20, Tween 80, Triton X-100 (Poutrel ve diğ, 2017), Triton X-405 ve Lugalvan BNO12 (Qamar ve diğ, 2019).

Rastogi ve arkadaşları, Triton X-100'ün de aralarında bulunduğu çalışmalarda, TX-100, π-π etkileşimi ile nanopartiküller üzerindeki adsorpsiyonu artıran benzen halkası nedeniyle diğer yüzey aktif maddelere göre en yüksek dağılım gücünü belirtmiştir (Rastogi ve diğ, 2008). Şekil 1.8'de TX-100'ün GNP takviyeli epoksi nanokompozite etkisi gösterilmiştir.



Şekil 1.8 : Triton X-100'ün GNP / epoksi nanokompozitine etkisi (Poutrel ve diğ, 2017).

Grafenin karakterizasyonunu inceleyebilmek için birçok farklı teknik bulunmaktadır. Bu karakterizasyon teknikleri genel olarak; kimyasal, termal ve görüntüleme yöntemleri şeklinde ayrılmaktadır.

Grafenin atomik yapısı direkt olarak geçirimli elektron mikroskobu (TEM) tarafından gözlemlenebilmektedir. TEM yardımı ile boşluk kusuru, bağ yönü, dislokasyon sınırları, tane sınırları ve katman istifleri incelenebilmektedir. Taramalı tünel mikroskobu (STM), GNP'yi üç boyutlu halindeki morfolojisi ve elektriksel özelliklerini inceleyebilmektedir. Aynı zamanda; kusurlar, kıvrımlar, frekans gibi karakteristik özellikler detaylı bir biçimde hesaplanabilmektedir. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM), grafenin katmanlarını hesaplamada en çok kullanılan karakterizasyon tekniklerinden biridir. Raman spektroskopisi ise, GNP ve türevlerinin karakterizasyonundaki en önemli tekniktir. Tek tabakalı GNP'den bile yoğun rezonant Raman saçılması malzeme için çok güçlü bir sinyal sağlarken, farklı tabakalı malzemeler arasındaki spektrumlardaki farklılıklar, malzemenin karakterizasyonu için çok uygun bir teknik olarak Raman spektroskopisini ortaya koymuştur. Bu karakterizasyon sonucunda GNP'nin, kusur miktarı veya saflık durumu ile katman sayısı ortaya çıkmaktadır. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (FT-IR) ise Raman Spektroskopisi ile benzer çalışma prensibi içerisindedir. Ancak FT-IR, daha çok grafen ve türevlerine uygulanan fonksiyonelleştirme işlemindeki bileşiklerin tayini hakkında bilgi vermektedir.

TGA, malzemelerin ısı karşısındaki davranışları ve termal stabiliteleri incelenmektedir. GNP yapısı itibarı ile karbon atomlarından oluştuğu için termal stabiliteleri oldukça yüksektir. Bu malzemlere uygulanacak olan iyonik olmayan

organik bileşiklerin termal stabiliteleri düşük olmasından dolayı uzaklaşacaklardır. Bu amaçla TGA uygulanmaktadır.

BET (Braunerr, Emmett ve Teller), gazların atı bir yüzeydeki fiziksel absorpsiyonunu açıklamak ile birlikte malzemelerin spesifik yüzey alanının ölçümü için kullanılmaktadır. Grafenin ise değişken değişken yüzey alanı olması sebebi ile BET analizine ihtiyaç duyulmaktadır.

1.4 Grafen Takviyeli Epoksi Kompozitler

Epoksi, yakın tarihimizde en çok tercih edilen matris malzemeleri arasında konumunu sağlamlaştırmıştır. Bu durumun sebepleri arasında reçine yapısı, kolay kürlenebilmesi ve uyumlu ve başarılı mekanik özellikleri olarak gösterilebilir. Epoksi malzemeye ise farklı türlerde, farklı pozisyonlarda ve farklı boyutlarda takviye yapılabilmektedir. Fiber takviyesi, parçacık takviyesi, nano boyutta parçacık takviyesi gibi örnekler verilebilmektedir. Grafen takviyesi ise nano boyutta parçacık takviyesi olarak kabul görmektedir ve bu malzeme grubunu nanokompozit olarak tanımlamaktadır.

Grafen epoksi kompozitler; kaplama, sensör, anti-korozif ve elektro manyetik (EMI) karışımı koruyucu ve elektrostatik-dağıtıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca grafen epoksi kompozitler, enerji depolama araçları (lityum iyon piller, süper kapasitörler ve iletken elektrotlar) olarak da kendisine alan açmıştır. Yüksek termal iletkenlikleri ile de kendisine kullanım alanları açmıştır. Bu kompozitler, termal arayüz malzemeleri (TIM) olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, spor sektöründe (golf, tenis ve hokey malzemeleri), iç ve dış panellerde, havacılıkta alev geçirmez panellerde, gaz tanklarında, elektronik paketlemede, gaz sensörlerinde, güneş panellerinde ve alan emisyonu cihazlarında kullanılmaktadır.

1.4.1 Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin üretim yöntemleri

Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin üretiminde kullanılan farklı teknikler bulunmaktadır. Nano takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde; solüsyon karışımı, eriyik karıştırma ve yerinde (in-situ) polimerizasyon baz alınarak üç farklı yol bulunmaktadır (Prolongo ve diğ, 2013).

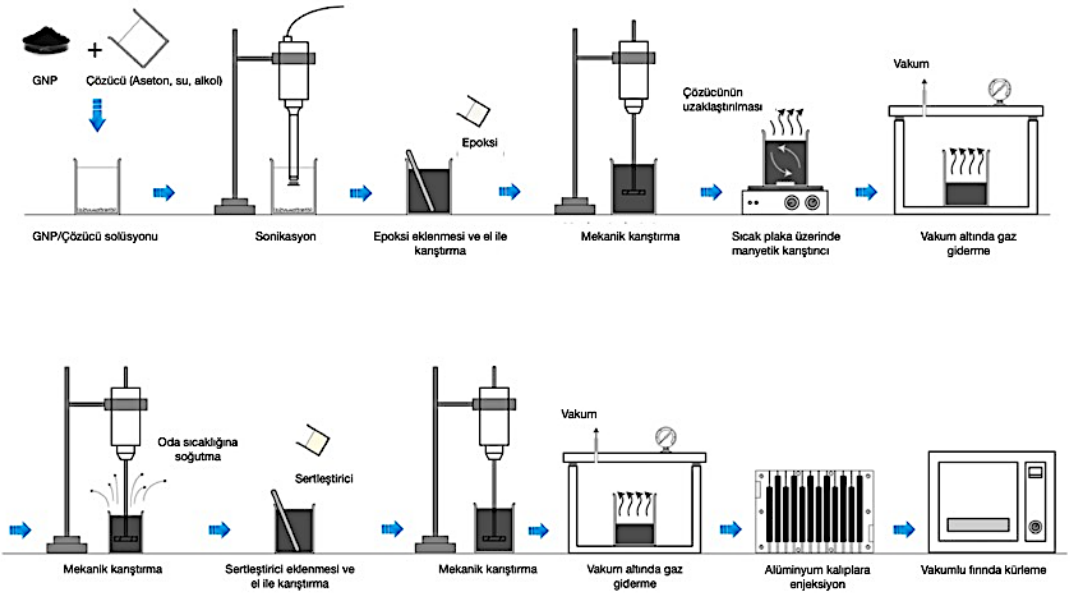
Grafen takviyeli kompozitlerde üretimin sonucunda oluşacak olan ürünün kalitesini belirleyecek olan bazı parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler içerisinde takviye

malzemesinin miktarı, prosesin süresi, yapılacak ek prosesler örnek verilebilmektedir. Ancak üretim süreci sonundaki nihai üründeki en önemli parametre; grafenin epoksi matris içerisinde düzenli ve homojene yakın dağılmasıdır. Bu parametreyi sağlayabilmek için birçok farklı teknikler denenmektedir. Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin üretimi için dört farklı yol ortaya çıkmaktadır. Bunlar;

a. Ultrasonik karıştırma ardından mekanik karıştırma,
b. Ultrasonik karıştırma ardından yüksek hızda gerilimle karıştırma,
c. Ultrasonik karıştırma ardından bilyeli öğütme ve
d. Mekanik karıştırma ardından üç merdaneli hadde ile öğütmedir.

1.4.1.1 Ultrasonik karıştırma ardından mekanik karıştırma

İlk yönetim metodu olan mekanik karıştırma yöntemi temel olarak en kolay kullanım ancak en düşük oranda başarılı sonuç veren yöntemdir. Çözücü (Aseton, saf su veya alkol) içerisine GNP ilave edilip sonikasyon yapıldıktan sonra epoksi ilavesi yapılmaktadır. Ardından manyetik karıştırıcı ile çözücü uzaklaştırılmalıdır. Buradaki en önemli kısım, birden fazla tekrarla prosesi tamamlamak gerekmektedir. Çözücü uçurulduktan sonra asıl mekanik karıştırma işlemi uygulanmaktadır ve sertleştirici (hardener) eklenmektedir. Ultrasonikasyon, aglomerasyonlar arasındaki bağları kırarak topaklanmayı önlemeyi amaçlamıştır. Ancak bu yöntemin en önemli dezavantajı; ultrasonikasyon enerjisi, ultrasonikasyon daha uzun süre boyunca yapıldığında bile tüm GNP aglomerasyonlarını kıramaz (Rana, ve diğ, 2010). Şekil 1.9, epoksi ve grafenin basit ancak uzun bir yöntem olan karıştırma metotlarını vermektedir.



Şekil 1.9 : Ultrasonik karıştırmanın ardından mekanik karıştırma prosesinin işleyiş süreci.

1.4.1.2 Ultrasonik karıştırma ardından yüksek gerilimde karıştırma

Çözelti birleştirme, polimer ve nano dolguyu bir çözücü içinde yüksek kesmeli karıştırma veya ultrasonikasyon yoluyla çözmektedir. Çözücü, nanokompozit elde etmek için çözeltinin bir antisolvent içinde buharlaştırılması veya çökeltilmesiyle çıkarılmaktadır. Çözücü, polimerin viskozitesini önemli ölçüde düşürdüğü için, nano dolgular genellikle polimer içinde çok iyi dağılmıştır. Bununla birlikte, çözücülerin kullanılması çevresel sorunlara neden olabilir ve polimerdeki çözücü kalıntısı da nihai ürünün uygulamalarını sınırlamaktadır.

Nanopartiküllerin en-boy oranı, eriyik karıştırma ile yapılan numunelerden daha yüksektir. Sebebi; düşük başlangıç viskozitesi, nanopartiküllerin dağılmasına ve pul pul dökülmesine yardımcı olmaktadır ve eriyik karıştırma işlemi nanopartikülleri kırma ve en-boy oranlarını azaltma eğilimindedir.

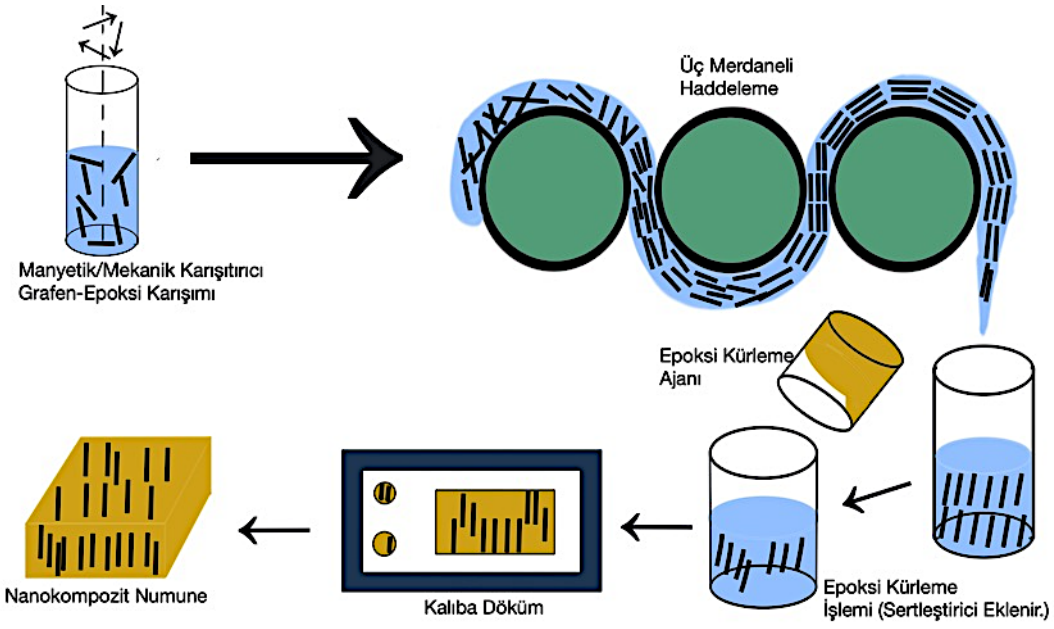
1.4.1.3 Ultrasonik karıştırma ardından bilyeli öğütme

Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin üretiminde bilyeli öğütme; düşük maliyetli, kolay kullanımlı ve yüksek verimlidir. Mekanik karıştırma ve yüksek hızda gerilimle karıştırma ile karşılaştırıldığı zaman daha homojen dağılım sağlamaktadır. Bu özellikleri ile umut vadeden bu yöntem yine de sadece teorik olarak istenen değerlere ulaşmaktadır.

Diğer yöntemlerde olduğu gibi pre-prosese ihtiyaç duymaktadır. Genel olarak öncesinde sonikasyon veya ultrasonik karıştırma yapılmaktadır. Proses öncesinde belirli oranlarda aseton, saf su veya alkol gibi çözücüler içerisinde bir süre uygulanmaktadır. Ardından farklı hızlarda ve farklı ölçütteki bilyeler yardımıyla öğütücünün içerisinde karıştırılmaktadır. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığı olmakla beraber yüksek sıcaklıklara da çıkılabilmektedir. Ardından işlemin verimine ve sonucuna bağlı olarak post-proses olarak sonikasyon uygulanabilmektedir. Ardından çözücü uzaklaştırılmaktadır (Guo ve Chen, 2014).

1.4.1.4 Mekanik karıştırma ardından üç merdaneli hadde ile üretme

Üç merdaneli haddeleme ve silindirden geçirme prosesi, takviye malzemesi olan GNP'yi polimer matrisin (epoksi) içerisine en etkili olarak dağıtabilen yöntemdir. Bu yöntemi yüksek kesme kuvveti ile sağlamaktadır. Ancak tek olarak etkili olamayan bu yöntem, en başarılı şekilde sonikasyon veya mekanik karışıtrma ile sağlanabilmektedir (Atif ve diğ, 2016). Cihaz üzerindeki üç merdane, besleme merdanesi, merkez merdane ve apron merdanesi olarak adlandırılır. Genellikle macun kıvamındaki malzeme besleme merdanesine dökülür merdaneler arası mesafe çok küçük olduğundan malzemenin çoğu besleme bölgesinde kalır. Merdaneler arasından geçebilen malzeme ise merdaneler arası hız farkından dolayı büyük kayma gerilmelerine maruz kalır. Şekil 1.10, merdaneler ile haddeleme ve ek olarak karıştırma proseslerinin genel şemasını sunmaktadır.



Şekil 1.10 : Mekanik karıştırma ardından üç merdaneli haddeleme prosesi.

Grafen takviyeli epoksi kompozitler arzu edilen endüstri alanı için geçerli olabilecek malzeme özellikleri test edilmektedir. Bu doğrultuda bu kompozitler; mekanik ve yapısal karakterizasyon olarak ayrılabilmektedir.

Mekanik testler ihtiyaç duyulan endüstri alanlarına hitap edecebilecek düzeyde planlanmaktadır. GNP takviyeli epoksi nanokompozitlerin çeşitli mekanik testler ve bu testler sonucunda davranışları incelenmektedir. Bu test metotları genel olarak dinamik ve yarı-statik testler olarak ikiye ayrılmaktadır. Dinamik testler yüksek hızlarda uygulanmaktadır ve oluşan davranışları incelemektedir. Bu testler arasında Split Hopkinson Bar Test (SPHB), dinamik mekanik analiz ve yüksek hızlarda uygulanan darbe testleri bulunmaktadır. Yarı-statik testler içerisinde basma, çekme, ve düşük hızlarda gerçekleştirilen darbe testleri bulunmaktadır.

Yapısal karakterizasyon, genel olarak epoksi matrisli kompozitin bazı kimlik bilgilerini ortaya çıkarmaktadır. Yapısal karakterizasyonda, görüntüleme metotları, kimyasal metotlar ve termo davranış metotları uygulanmaktadır. Görüntüleme metotlarında; SEM, TEM ve optik mikroskop ile hem tane yapısı hem yüzey görüntüsü incelenir. Ayrıca mekanik testler sonucu oluşan davranışları ortaya çıkarmak için kullanılan yöntemlerdir. Kimyasal metotlarda ise Raman spektroskopisi, FT-IR, XRD, X-Işını floresansı (XRF) ve görünür ışık spektroskopisi yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde ortaya, kimyasal bağ yapıları, kimyasal formüller, elementlerin kimlikleri, elementlerin dizilimi ile faz ve arafaz oluşumları ortaya çıkmaktadır. Termal metotlarda ise, difransiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı ve TG-DTA kullanılmaktadır. Bu testler sonucunda, epoksi ve grafen takviyeli epoksi kompozitlerin camsı geçiş sıcaklıkları, bozunma sıcaklıkları ve kütle kayıpları ölçülebilinmektedir.

2. MALZEME VE METOT

2.1 Malzeme

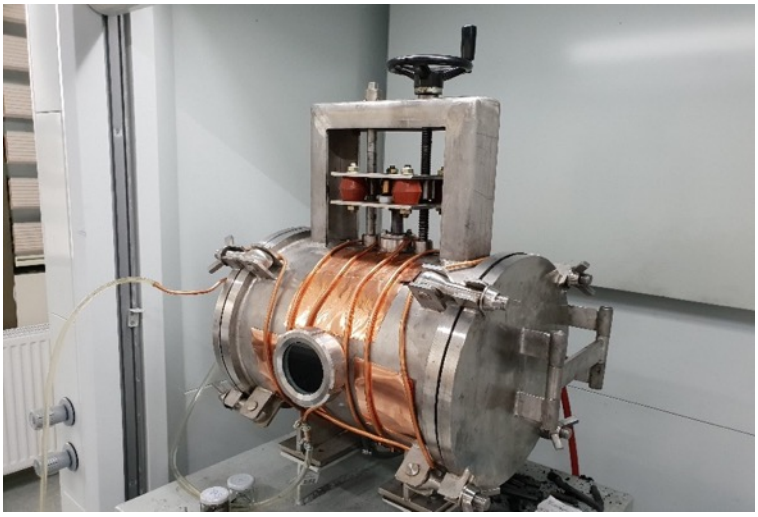
Çalışma kapsamında, düşük viskozite epoksi reçine (Araldite® LY564 , HUNTSMAN, ABD) matris olarak tercih edilmiştir. Bu epoksi, çeşitli proseslere uygun olabilecek işleme davranışları olması, düşük viskoziteyi yüksek sıcaklıklarda uzun kap ömrü ile birleştirmesi ve mükemmel mekanik, dinamik, sıcaklık özellikleri ile yüksek kimyasal direnç göstermesinden dolayı tercih edilmiştir. Sertleştirici olarak sikloalifatik poliamin (Aradur® 2954, HUNTSMAN, ABD), epoksi ile uyumlu olması sebebiyle tercih edilmiştir.

Takviye malzemesi olan grafenin üretimi için yüksek saflıkta (%99.9) grafit çubuklar (Kent Kimya, Türkiye) kullanılmıştır. Grafit çubukların çapları 12 mm iken boyları 100 mm uzunluğundadır. Ağırlıkları ortalama 20 gr. civarındadır. Grafenin üretilmesi sürecindeki ortam için N_2 ve He (%99.999) (Asal Gaz, Türkiye) kullanılmıştır. Grafenin fonksiyonel hale gelmesi için iyonik olmayan yüzey aktif maddesi polioksietilen oktil fenil eter (POPE) (Triton™ X-100 ($C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n(_{n=9-10})$), Merck, Almanya) kullanılmıştır.

2.2 Metot

Bu çalışmada; GNP üretimi, GNP'nin fonksiyonelleştirilmesi ve üç merdaneli haddeleme yöntemi ile nanokompozit üretim prosesleri sırasıyla uygulanmıştır. Ardından her bir proses sonucunda oluşan numunelere çeşitli karakterizasyon yöntemleri uygulanmıştır.

2.2.1 Grafen üretimi



Şekil 2.1 : GNP üretimi için kullanılan soğutuculu ark reaktörü.

Tez çalışmasındaki grafen üretimi, tezin danışmanı Prof. Dr. Deniz Uzunsoy tarafından incelemeli patenti (TR 2014 06045 B) alınan grafen reaktörü ile üretilmiştir. Elektrik ark deşarj yöntemi ile üretilen grafenin, reaktör sistemi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Çapları 12 mm, boyları 100 mm olan yüksek saflıktaki grafit çubuklar (% 99,999), elektrot olarak kullanılmıştır. Grafit çubuklar reaktör içerisinde yuvalarına yerleştirildikten sonra, sıkı bir şekilde bağlanmıştır. Ardından reaktör sistemi güvenli bir şekilde sıkıca kapatılmıştır. Sonrasında reaktöre Azot (N_2) ve Helyum (He) gazları sırasıyla verilmiştir. Arklama sırasında reaktörün atmosferi ve basıncı, elde edilen ürünün kalitesinde ve saflığında önemli bir rol oynamaktadır. Reaktöre bağlı olan doğru akım (DA) kaynağı, optimum koşulların sağlandığı 150 ampere (A) ayarlı bir şekilde çalıştırılmıştır. GNP, üretilebilmesi için gerekli parametreler, Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : GNP üretimi için kullanılan deneysel parametreler**.**

DENEYSEL ŞARTLAR	**PARAMETRELER**
Sistemdeki Gazlar	$He_2 + N_2$
Gaz Basıncı	0,1 bar
Elektrot Çapı	12 mm
Elektrot Boyu	100 mm
Akım	150 A
Üretim Süresi	10-12 dk.

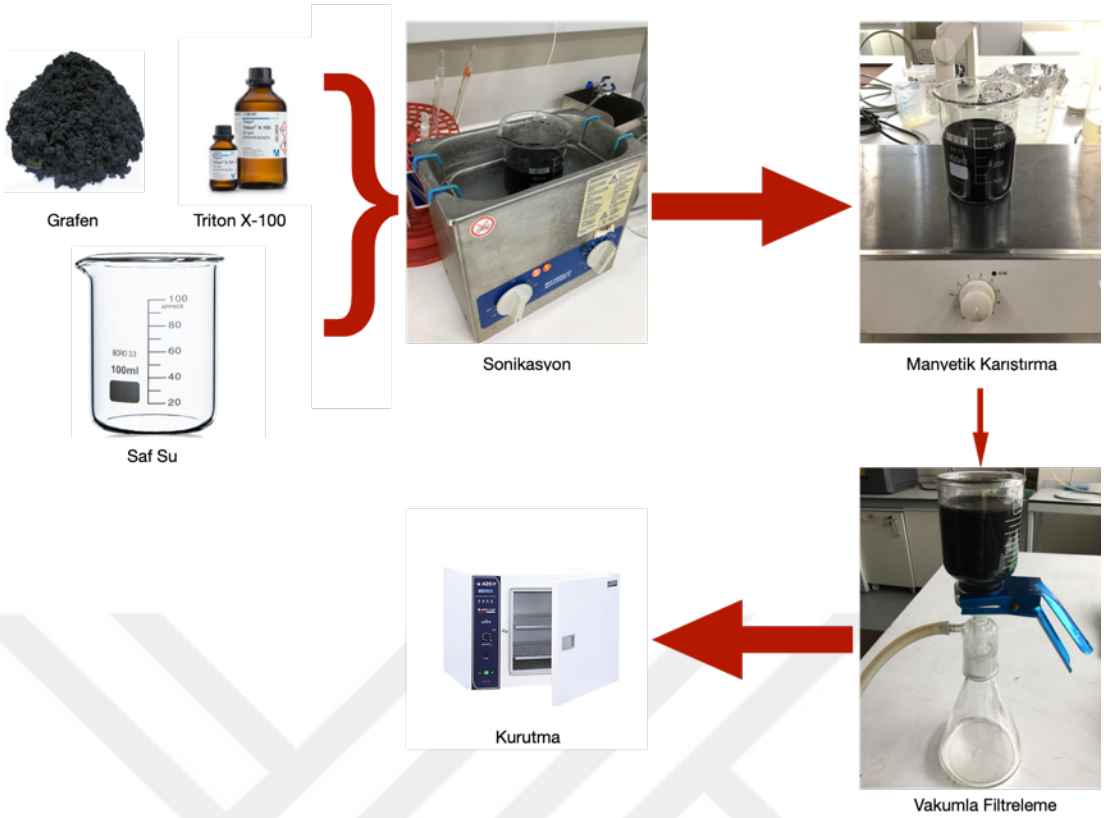
3-4 dakika boyunca, soğutma sistemine bağlı olarak aralıklı bir şekilde arklama işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemi genel olarak üç kez tekrarlanmıştır. 15-20 dakika boyunca reaktör kabı, arklama mekanizması ve DA kaynağının soğuması için beklenmiştir. Arklama işlemi, sona erdiğinde DA kaynağı kapatılmış ve reaktör içerisindeki gaz, tahliye vanası yardımıyla boşaltılmıştır. Elde edilen ürün, arklamanın gerçekleştiği bölüme ait olan anoda yakın bölgeden toplanmıştır. Şekil 2.2'de, grafen üretimindeki elektrotların ilk ve son halinin karşılaştırılması, anot ve katotun son durumları ve oluşan grafen verilmektedir. GNP tükenen anotun üzerinde birikirken, katotun üzerinde sadece cüruf oluşumu gözlenmektedir.



Şekil 2.2 : a) GNP üretiminde kullanılan grafit elektrotlar, b) üretim sonucu anot ve katotun konumu ve GNP'lerin oluşumu, c) üretim sonucu oluşan GNP'ler.

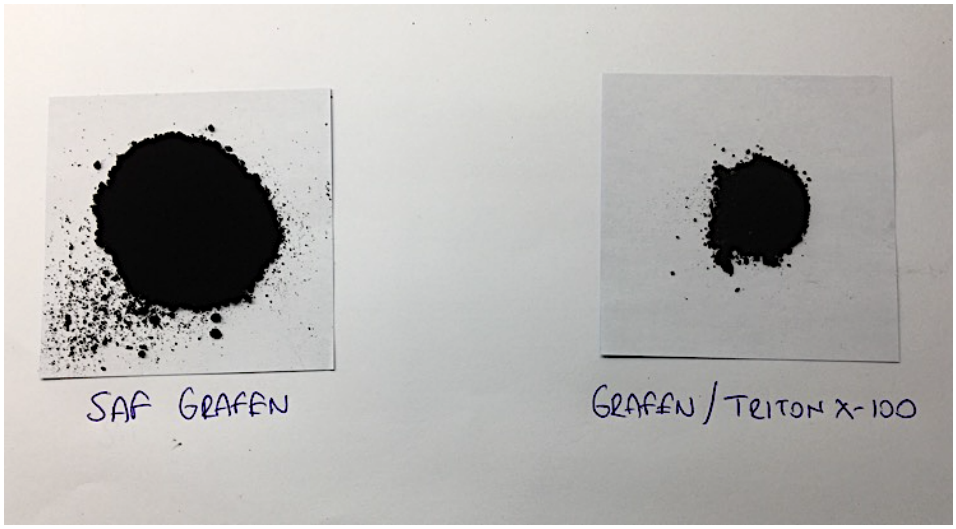
2.2.2 Grafenin Triton X-100 ile fonksiyonelleştirilmesi

Elektrik ark deşarj metodu ile üretilen GNP, TX-100 ile beraber saf suda karıştırılarak fonksiyonel hale getirilmiştir. 0,1 gram grafen için 0,15 gram TX-100 gerekmektedir. Yine 0,1 gram grafen 100 ml su içerinde fonksiyonel hale getirilmiştir. 0,1 gram grafen, 0,15 gram TX-100 karışımını 100 ml saf suda başarılı bir şekilde dağıtmak için 1 saat kadar süreyle sonikasyon yapılmıştır. Sonikasyonun ardından 12 saat boyunca karışım, manyetik karıştırıcıda 65°C sıcaklıkta karıştırılmıştır. 12 saatin sonunda oluşan karışıma bir miktar su ekleyerek seyreltme işlemi uygulanmıştır. Seyreltilen karışım, filtrelenmiş ve bu işlem grafenin tamamı filtrede kalıncaya kadar devam etmiştir. Filtreleme işlemi tamamlandıktan sonra, filtrenin üzerinde kalan grafen vakumlu fırında 80°C sıcaklıkta 12 saat bekletilmiştir. Prosesin sonucunun istenilen düzeyde başarılı olduğunu kanıtlamak amacıyla TGA uygulanmıştır. Şekil 2.3'te grafenin TX-100 ile fonksiyonel hale gelmesi için tasarlanan proses aşamaları verilmektedir.



Şekil 2.3 : GNP'nin fonksiyonel hale gelmesi için oluturulan proses şeması.

Şekil 2.4'te saf GNP ile fonksiyonel hale getirilmiş GNP karşılaştırılması verilmiştir. Kütlece birbirine yakın olan malzemelerin kapladıkları alan arasında ciddi bir fark gözlenmektedir. Bu durumun sebebi ise, fonskiyonelleştirme işleminin başarılı olması ve GNP'nin katman sayısının artmasıdır.



Şekil 2.4: Saf GNP ile fonksiyonelleştirilmiş GNP'nin gösterimi.

2.2.3 Üç merdaneli haddeleme yöntemi ile kompozit üretimi

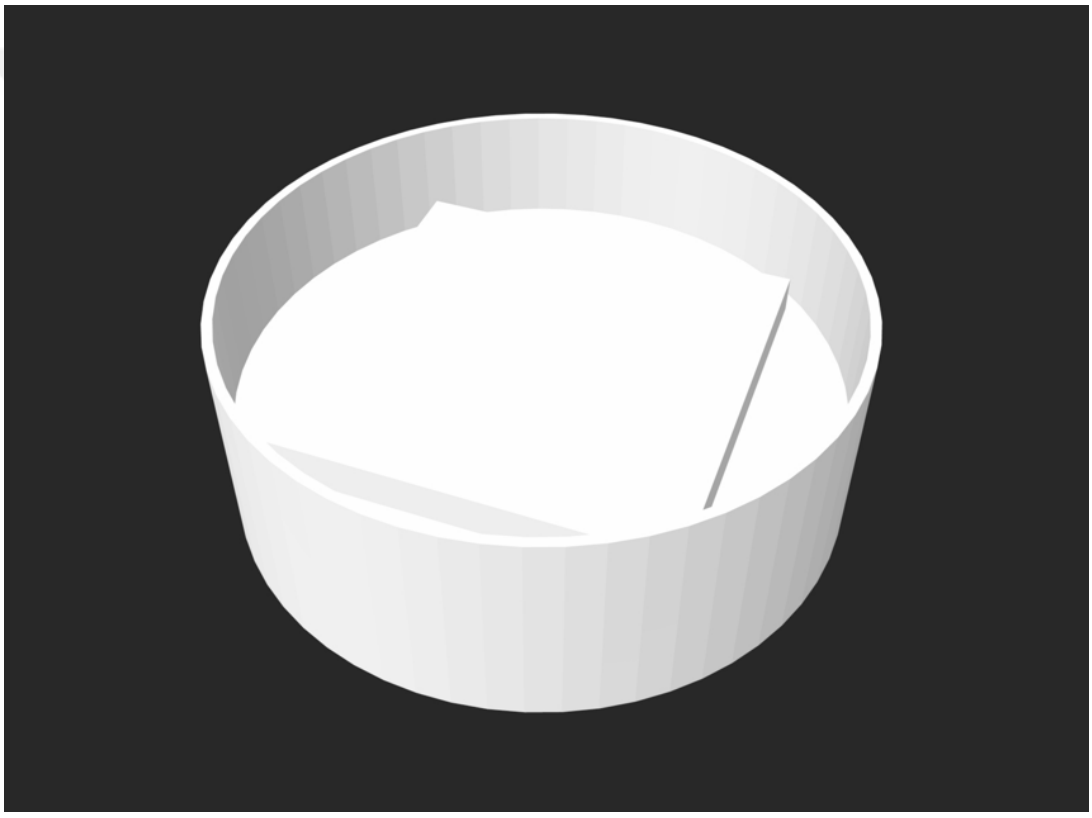
Üç merdaneli haddeleme birbirinden zıt yönlerde ve farklı hızlarda dönen üç merdane kullanılarak, malzeme üzerinde kayma gerilmesi oluşturma prensibi ile çalışır. Grafen takviyeli nanokompozitlerden istenilen mekanik özelliklerin elde edilememesinin ana nedenlerinden biri GNP'nin epoksi içinde aglomerasyonudur. Bu çalışmada GNP'nin topaklanmasını önlemek amacıyla üç merdaneli haddeleme yöntemi kullanılması planlanmıştır. Cihaz üzerindeki üç merdane; besleme merdanesi, merkez merdane ve apron merdanesi olarak adlandırılır. Genellikle macun kıvamındaki malzeme besleme merdanesine dökülür, merdaneler arası mesafe çok küçük olduğundan malzemenin çoğu besleme bölgesinde kalır. Merdaneler arasından geçebilen malzeme ise merdaneler arası hız farkından dolayı büyük kayma gerilmelerine maruz kalır. Merkez merdaneden apron merdanesine geçen malzeme tekrar aradaki hız farkından dolayı çok daha büyük kayma gerilmelerine maruz kalır. Apron merdanesinden sıyırıcı bıçak yardımı ile toplanan macun kıvamındaki malzeme çok iyi karışmış ve topaklanmalardan arınmış durumdadır. Karışımın iyileştirilmesi için bu döngü birkaç kez tekrarlanabilir. Şekil 2.5, üç merdaneli haddeleme yönteminde kullanılan merdaneleri ve proses sonucunda oluşan kompoziti vermektedir.



Şekil 2.5: Üç merdaneli haddeleme yöntemi.

Nanokompozit deney numunelerinin üretiminde, elektrik ark oluşturma yöntemi ile üretilmiş grafen ve Huntsman firması tarafından üretilen Araldite LY564 epoksi reçine / Aradur 2954 sertleştirici ajan seti kullanılmıştır. Deney numunelerinin istenilen

boyutlarda üretimi için RTV2 kalıp silikonundan uygun kalıplar imal edilmiştir. Kalıp üretiminden önce numune şekillerine uygun olacak şekilde 3 boyutlu yazıcıda ters kalıp basılmıştır (Şekil 2.6). Basma testi için uygulanan kalıplar için ayrı, ağırlık düşürme darbe testi için ayrıve izod darbe testi için ayrı üretilmiştir. Basma testi için üretilen kalıplar sonucunda 10 mm çap ve 10 mm boy olarak ayarlanmışıtr. Darbe testi için ise, 100 mm x 100 mm x 10 mm ölçülerinde numune çıkacak şekilde tasarlanmıştır. Izod darbe testi için ise numunelerin ölçüleri 58 mm x 10 mm x 3.8-4 mm olarak ayarlanmıştır. Grafenin epoksi matris malzemesi içinde topaklanmasını engellemek amacıyla üç merdaneli haddeleme yöntemi kullanılmıştır. Saf grafen takviyesi ve fonksiyonel grafen takviye edilerek sonuçlar incelenmiştir.



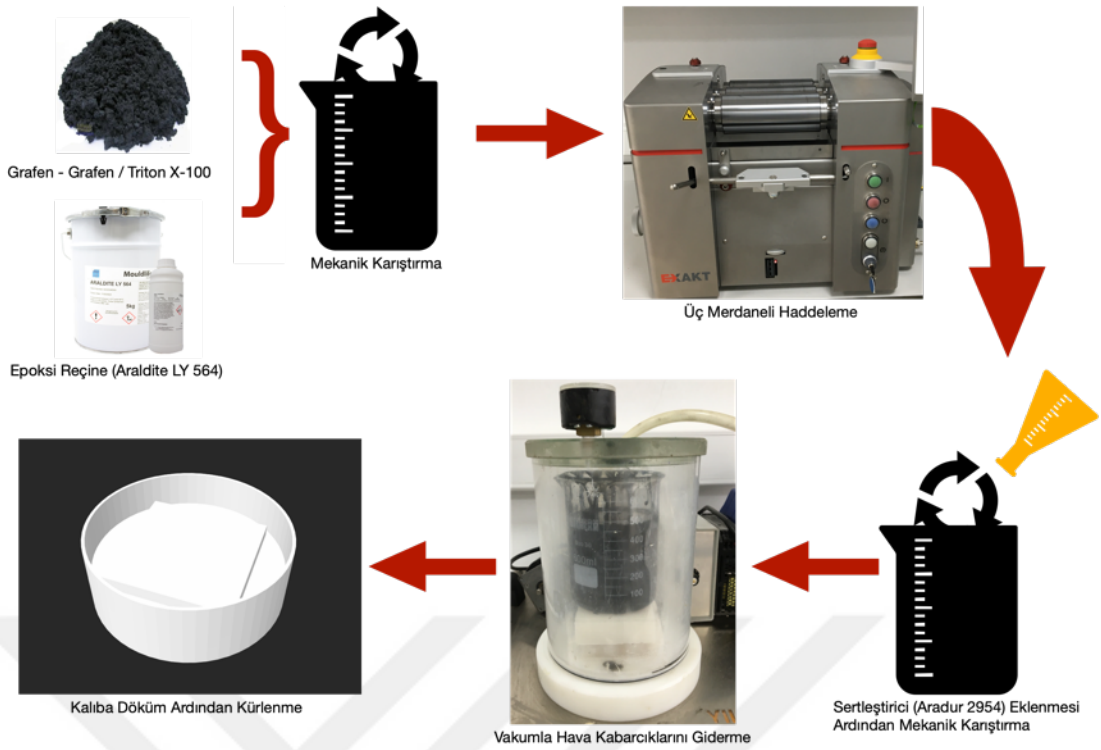
Şekil 2.6 : Silikon kalıbı dökmek için kullanılan dış kalıp kullanılmaktadır. İçerisindeki kısımda epoksi için oluşuturulan kısım yer almaktadır.

Grafen epoksi karışımının nanokompozit deney numunesi üretimi için karıştırılması ve kalıba dökülmesi sırasında karışımın içinde kalan gazlar kürleşme sonrasında istenilmeyen hava baloncukları ve pürüzler oluşturmaktadır. Mekanik özellikleri düşüren bu durumun önüne geçmek amacıyla karıştırma işleminin ve kalıba dökme işleminin ardından ayrı ayrı vakum altında gaz giderme işlemi uygulanmıştır. Son

olarak grafen epoksi reçine ve sertleştirici üreticinin tavsiye ettiği sıcaklık ve süreye göre etüv fırın kullanılarak kürlenmiştir.

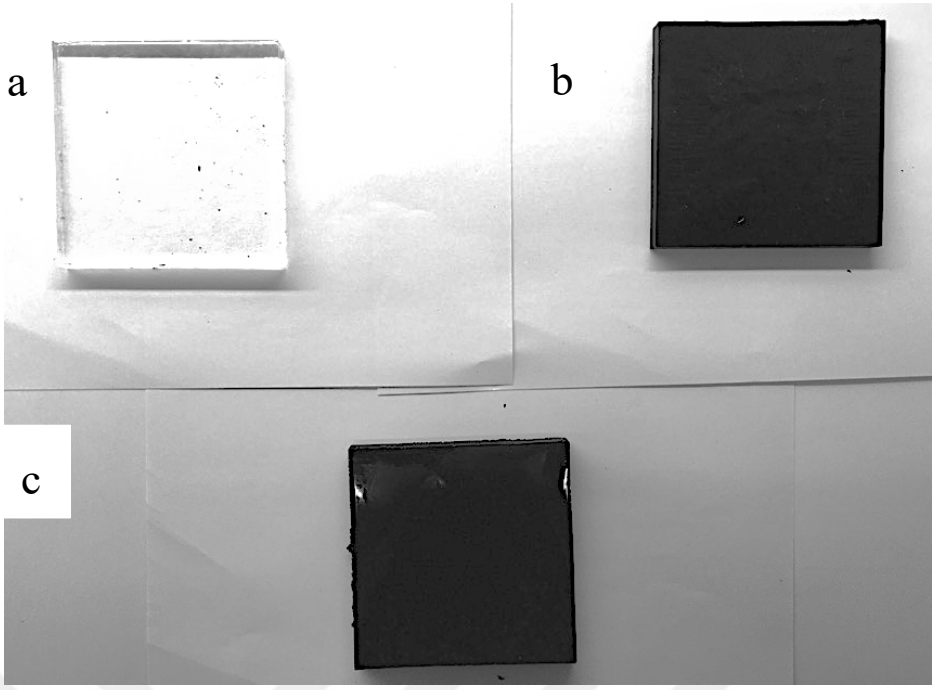
Üretim işlem aşamaları maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Elektrik ark oluşturma yöntemi ile üretilmiş grafen ile TX-100 ile fonksiyonellendirilmiş grafen (Farklı prosesler olarak sırasıyla yapılmak üzere) ve Araldite 564 epoksi reçine aynı beher içine çeşitli ağırlıkça yüzde oranında konulmuştur. Belirlenen ağırlıkça yüzde oran %0.5'dir.
- Grafen ve epoksi reçine 10 dakika boyunca mekanik karıştırma yönetemiyle karıştırılmıştır.
- Üç merdaneli haddenin merdaneleri arası mesafe 5 µm ve merdane dönme hızı 250 d/dk olacak şekilde ayarlanarak karışım 5 defa haddeden geçirilmiştir.
- Grafenin epoksi matris içinde düzgün yayılımı sağlandıktan sonra Aradur 2954 sertleştirici üreticinin önerdiği oranda, 100:35 oranı sağlanacak şekilde karışıma eklenmiştir.
- Sertleştirici eklenen karışım, 10 dakika boyunca mekanik karıştırma yöntemi ile karıştırılmıştır.
- Karışımın içinde bulunduğu beher vakuma konularak 60 dakika boyunca oda sıcaklığında gazsızlaştırma işlemi yapılmıştır.
- Karışımın üst yüzeyine toplanan hava baloncukları pürmüz ile temizlendikten sonra karışım silikon kalıba dökülmüştür.
- Silikon kalıp oluşturulmadan önce 3 Boyutlu yazıcı yardımıyla ters kalıp oluşturulmuştur. Ardından RTV2 silikon kalıp ters kalıba dökülerek istenen epoksi plakanın kalıbı ve basma numune kalıpları oluturulmuştur. Oluşacak numunelerin ölçüleri; ağırlık düşürme darbe testi için 100 x 100 x 10 mm, basma numuneleri için 10 mm çap x 14 mm yükseklik ve izod darbe testi için 58 mm x 10 mm x 3.8-4 mm olarak ayarlanmıştır.
- Oda sıcaklığında, 12 saat boyunca saf epoksi ve kompozitlerin kürlenmesi için bekletilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Grafen takviyeli epoksi nanokompozitin üç merdaneli haddeleme yardımıyla oluşan üretim yöntemi.

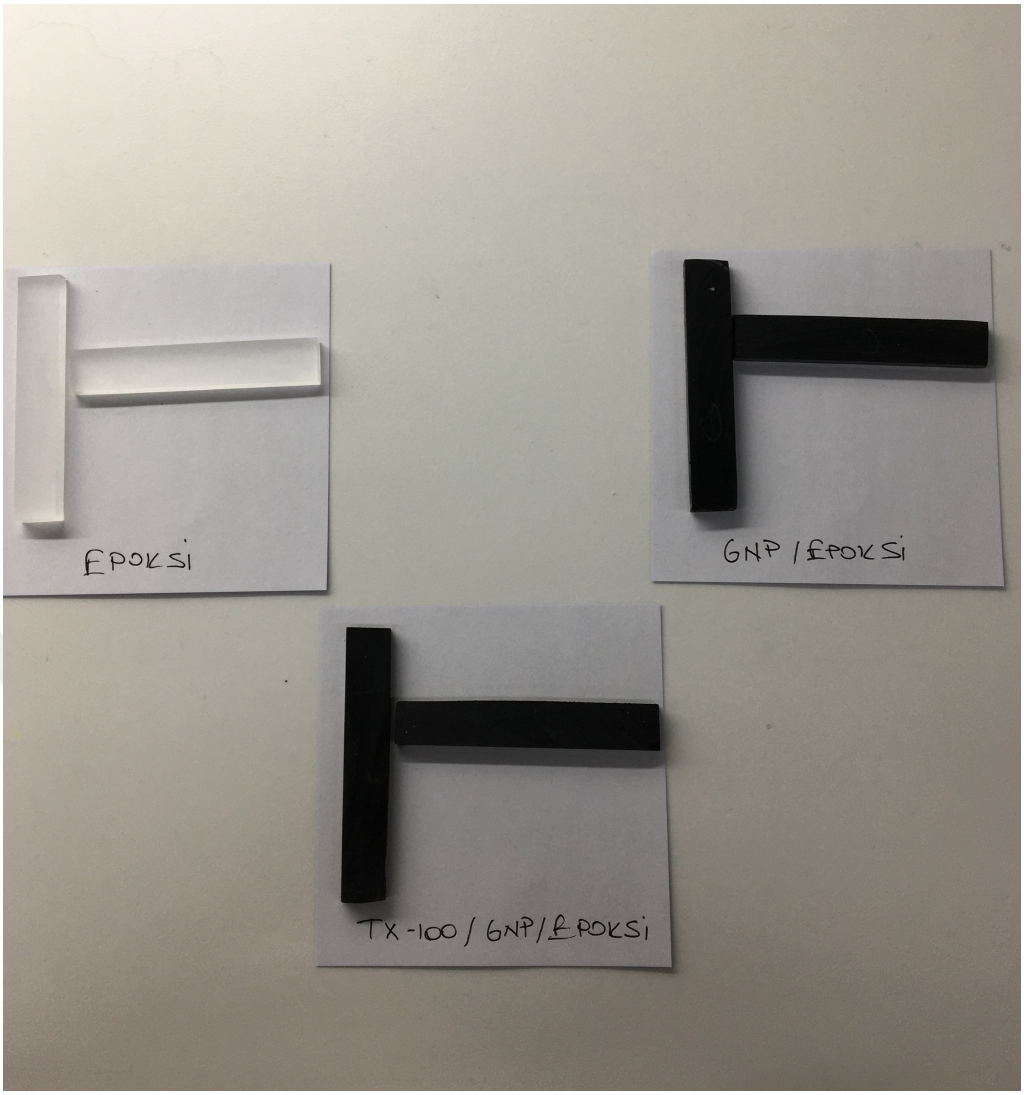
Şekil 2.8 ve 2.9'da Saf epoksi (sol), saf grafen ile fonksiyonelleştirilmiş epoksi (sağ) ve grafen / TX-100 ile fonskiyonelleştirilmiş epoksinin (alt) görüntüleri verilmektedir. Üç merdaneli haddeden çıkışının ardından grafenin saf hali ile fonksiyonel hali arasında bir fark görülememektedir. Başarılı bir şekilde prosesin tamamlandığı söylenebilir. Şekil 2.10'da ise izod darbe testi için hazırlanmış nihai ürünler verilmektedir.



Şekil 2.8: a) Saf epoksi, b) saf grafen ile fonksiyonelleştirilmiş epoksi ve c) grafen / Triton X-100 ile fonskiyonelleştirilmiş epoksinin görüntüleri.



Şekil 2.9: Saf epoksi ve epoksi kompozitlerin basma testi için oluşturulmuş nihai numuneleri.



Şekil 2.10: Saf epoksi ve epoksi nanokompozitlerin izod darbe testi için hazırlanmış nihai numuneleri.

2.3 Karakterizasyon

Deneysel şartlar ve cihaz parametreleri (akım, elektrot boyutu, reaktörde kullanılan gaz tipi), elektrik ark oluşturma yöntemiyle üretilen grafenin saflık, kristalinite ve katman sayısı gibi özelliklerini etkilemektedir. Optimum koşullarda elde edilen grafenin özellikleri; Raman spektroskopisi, TGA, X Işını Kristalografisi (XRD), SEM, ve TEM analizi yapılmıştır. TX-100 ile yüzey fonksiyonelleştirmesi uygulanan grafene ise Raman Spektroskopisi, TGA, XRD, SEM ile görüntülendikten sonra grafen ile karşılaştırılmıştır.

Grafenin tozunun yüzey alanın ölçülmesi için Micrometrics™ Tristar III yüzey tahlil cihazı kullanılarak Brunauer-Emmett-Teller (BET) teorisi kullanılarak incelenmiştir.

Ölçüm, 12 saat boyunca N_2 ortamında 105^0C sıcaklığında gerçekleşirken, gaz alma işlemi -196^0C sıcaklığında He referans ortamında gerçekleşmiştir.

Grafenin yapısı JEOL 2100 JEM yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobunda (HR- TEM) incelenmiştir. Cihazın hızlandırma gerilimi (accelarating voltage) ise 200 kV'dir.

Raman spektroskopisi; Koç Üniversitesi KUYTAM Laboratuvarında, Renishaw Invia Raman spektroskopi cihazında yapılmıştır. 532 nm lazer kullanılan spektrometrede, toz GNP ile TX-100 / GNP malzemeler incelenmiştir.

Bu çalışmada, GNP ve TX-100 ile fonksiyonel hale getirilmiş grafenin termogravimetrik analizi ile kütle kayıpları ile termal stabiliteleri incelenmiştir. Termal analiz, Bursa Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Linseis (LINSEIS Stapt1600, Selb/Almanya) cihazında yapılmıştır. 0,10 mg grafen ile 0,10 mg TX-100 grafen içerikleri azot ortamında, 5^oC/min hızla 900^oC'a kadar çıkarılmaktadır.

FT-IR spektraları, Bursa Teknik Üniversitesi Polimer Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan 500 ile 4000 cm^{-1} arasındaki ve 2 cm^{-1} çözünürlüğündeki Nicolet FT-IR spektrofotometre (Nicolet IS510, Nicolet Instrument Company, Madison, WI, ABD) cihazında ölçülmüştür. Toz halindeki GNP ve TX-100 / GNP'den oluşan iki numune sırasıyla test edilmiştir. Her iki numuneye test esnasında pres uygulanmıştır.

XRD ölçümleri, Bursa Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında bulunan Bruker (Bruker AXS/Discovery D8) XRD cihazından alınmıştır. GNP ve fonksiyonelleştirilmiş GNP, 1.5406 Å dalga boyunda, 35 kV, 40 mA ve 2 Theta'nın $0\text{-}90^o$ aralığında 2^0/dk hızında gerçekleştirilmiştir.

Grafenin karkaterizasyonunun ardından, karşılaştırma amacıyla hem epoksi reçine hem de nanokompozit malzeme karakterize edilmiştir.

Epoksi reçinenin karakterizasyonunda basma testleri yapılmıştır. Oda sıcaklıklığında ve $1x10^{-2}$/s hızında, basma testleri tamamlanmıştır. Basma testlerinin ardından oluşan kırık yüzeyi SEM ile incelenmiştir. GNP takviyeli nanokompozitin karakterizasyonunda ise yine basma testleri önemli rol oynamıştır. Basma testleri Shimadzu AGX Plus 250 kN cihazında yapılmıştır. Bu testlerde, saf GNP ile beraber %0.5 GNP oranı, oda sıcaklıklığında ve $1x10^{-2}$/s hızında, basma testleri

tamamlanmıştır. Yine kırık yüzeyler SEM'de incelenmiştir. Basma Testi cihazı şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11: Basma testi cihazı.

Plaka halindeki epoksi matrisler ile GNP ve fonksiyonel hale getirilmiş GNP takviyeli nanokompozitler ağırlık düşürme darbe testi ile incelenmiş ardından sonuçlar karşılaştırılmıştır. Darbe testi, Instron Ceast 9350 (MA, ABD) ağırlık darbe düşürme cihazında 2 m/s hızda ve 17.930 darbe enerjisinde gerçekleşmiştir. Kırılan üzeyler SEM incelenmiştir. Testin gerçekleştiği ağırlık düşürme darbe testi cihazı görüntüleri Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12: Ağırlık düşürme darbe testi cihazı.

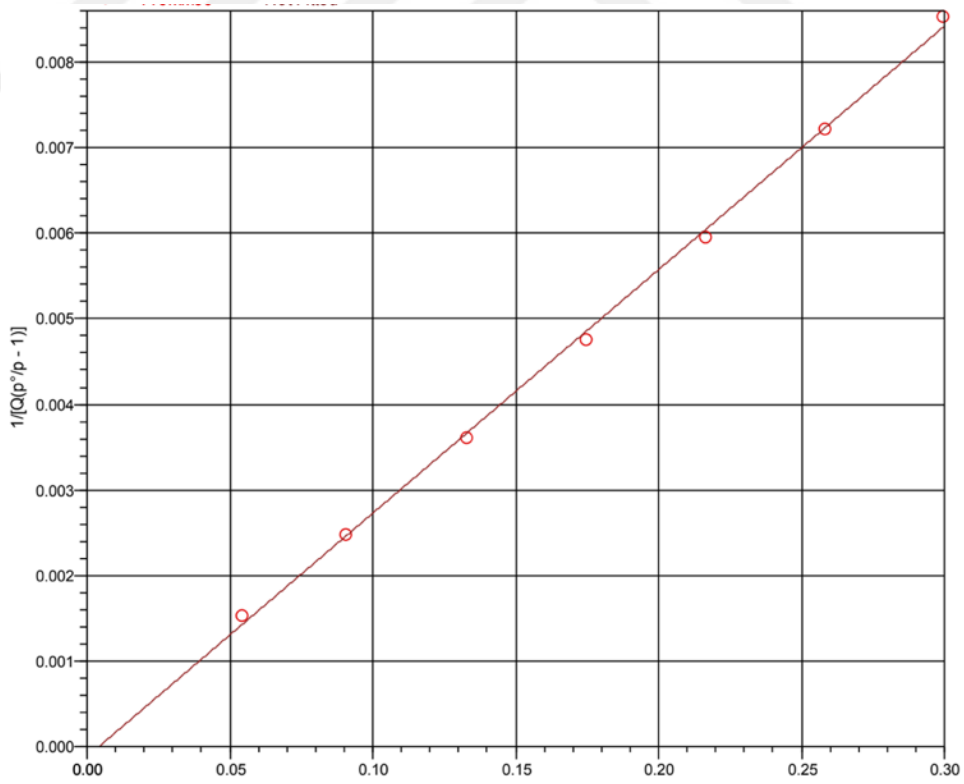
Izod darbe testi, Bursa Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde bulunan Instron Ceast 9050 (MA, ABD) cihazında gerçekleşmiştir. Test, ISO 180 standardında gerçekleştirilmiştir. Uygulama, oda sıcaklığında ve sarkaç ağırlığının en düşük yükünde gerçekleşmiştir.

3. BULGULAR

3.1 Saf Grafenin Yapısal Karakterizasyonu

Saf grafenin yapısal karakterizasyonunda TEM, SEM, Raman spektroskopisi, TGA, FT-IR, XRD ve BET işlemleri uygulanmıştır. Bu kısımda sadece TEM görüntüleri ile beraber BET analizi incelenecektir.

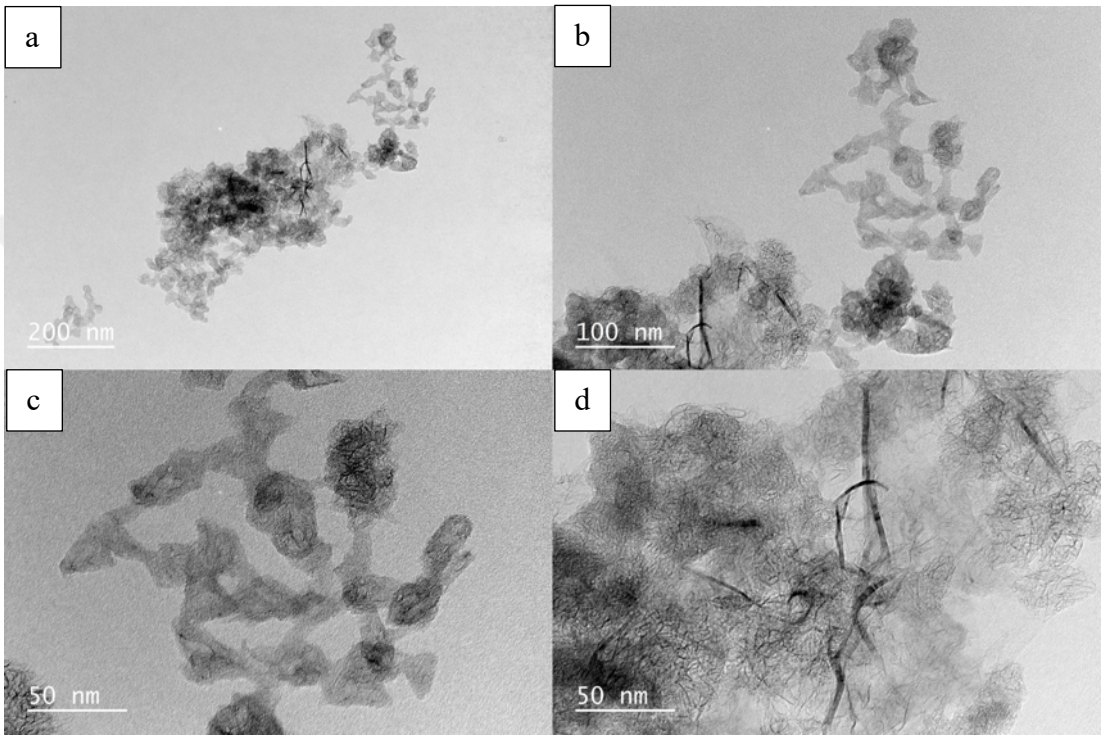
Şekil 3.1'de, grafenin yüzey alanının belirlenmesi için BET (Brauner, Emmett ve Teller, Yüzey Alanı Ölçümü) analizi yapılmıştır. BET teorisi, katı cisimlerin spesifik yüzey alanının bulunmasını hedefleyen önemli bir analiz tekniğidir. Bu tekniğin temeli, gaz moleküllerinin katı cismin yüzeyine tutunmasına dayanmaktadır (Brunauer, Emmett ve Teller, 1938). BET analizi sonucuna grafenin yüzey alanı 153,5236 m^2/g olarak bulunmuştur.



Şekil 3.1 : GNP'nin BET analizi sonucu.

Şekil 3.2'de grafenin HR-TEM cihazında farklı yakınlaştırma oranlarındaki görüntüleri verilmiştir. Toplanmış ve kümelenmiş nanoparçacıkları içeren serbest

aglomeralar, dallanmış bir ağ oluşturmaktadır. TEM görüntülerinde, birbirlerine kümelenmiş ve üst üste binmiş düzensiz kıvrılmış tabakalar olarak görülürler. Bu tabakalar elektrik ark deşarj metoduyla üretimin sonucunda ortaya çıkmaktadır (Borand ve diğ, 2021). İyi düzenlenmiş grafen katmanları, GNP'nin yüksek grafitleşme derecesi şekil 3.2c ve 3.2d'de açıkça gözlemlenebilir. Şekil 3.2a'ya göre ise GNP'nin belirli bölgelerde kümelendiği ve bu kümelerin boyutunun 200 nm'ye kadar dayandığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.2: Saf GNP'nin TEM'deki aydınlık alan görüntüleri.

3.2 Saf Grafen ile Triton X-100 / Grafenin Yapısal Karakterizasyonları ve Karşılaştırılması

3.2.1 Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi, GNP'nin yapısal ve elektronik özelliklerini araştırmak için kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir. D bandı (~1350 cm^{-1}), safsızlık elemanlarının getirdiği kafes distorsiyonu nedeniyle karbon bazlı malzemelerin yapısındaki kusurları göstermektedir (Kaykılarlı ve diğ, 2020). G bandı (~ 1580 cm^{-1}), sıralı bir grafitik kafes üzerindeki sp^2 rezonansıyla ilgilidir ve bu bant da konumu ve şekli doping etkisini; kusurları, grafen katmanlarının sayısını ve gerilimi gösterir

(Kaykılarlı ve diğ, 2020; Zhang ve diğ, 2016). 2D bandı (~ 2670 cm^{-1}) ise, istifleme sırası hakkında faydalı bilgiler sağlamaktadır (Ni ve diğ, 2008).

Mevcut Raman grafiğinden I_D/I_G oranı hesaplanılarak, grafen içindeki düzensizlik seviyesi karakterize edilebilmektedir (Jang, 2013) ve bu değer yaklaşık 0-1 arasında olmalıdır (Cotul ve diğ, 2018). I_G/I_{2D} oranı ise GNP'nin katman sayısı hakkında bilgi vermektedir. Bu oranın yaklaşık 0,25 olduğu durumda grafen tek katmanlıdır ve orandaki artış, katman sayısındaki artışı işaret etmektedir (Cotul ve diğ, 2018; Wu ve diğ, 2010). Daha önce yapılan çalışmalarda, katman sayısı I_G/I_{2D} formülündeki oranda 0,25 veya 0,34 olarak belirtmektedir. I_G/I_{2D} sonucunda çıkan değer buradaki değere bölünmelidir (Kaykılarlı ve diğ, 2020; Wu ve diğ, 2010).

Şekildeki grafiğe bakıldığında grafen yapısına ait, bariz bir şekilde belirgin pikler bulunmaktadır. Piklerden mavi olanı saf GNP'yi (ark reaktöründen direkt olarak anot bölgesinden toplanan) ve sarı olanı TX-100 ile yüzey fonksiyonelleştirilmesi gerçekleştirilmiş GNP'yi ifade etmektedir. Oluşan grafikte Raman değerleri, her iki malzeme türü için 1250 cm^{-1} ile 2750 cm^{-1} arasında oluşmaktadır.

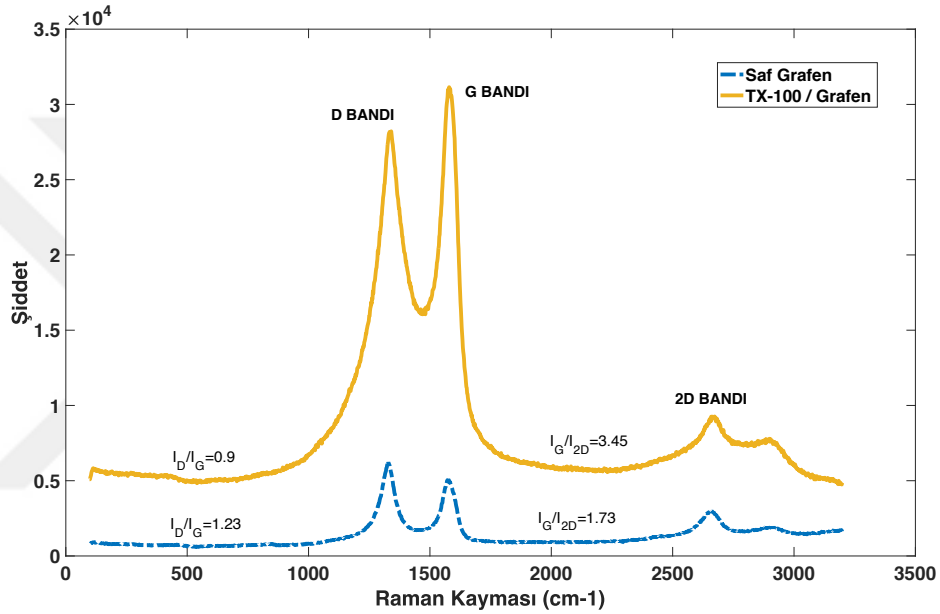
Reaktörden alınan GNP'nin D, G ve 2D bantları sırasıyla; 1328 cm^{-1}, 1575 cm^{-1} ve 2661 cm^{-1} değerlerinde yer almaktadır. Saflığı ise, I_D/I_G oranından hesaplanarak 1,22 olarak bulunmuştur. Katman sayısı ise, I_G/I_{2D} oranından 5 ile 7 değerleri arasında çıkmaktadır. Fonksiyonel GNP'ye baktığımızda D, G ve 2D bantları sırasıyla; 1340 cm^{-1}, 1579 cm^{-1} ve 2672 cm^{-1} değerlerinde konumlanmıştır. Fonksiyonel grafenin Raman değerleri ise, I_D/I_G oranından 0,9 olarak hesaplanırken; katman sayısı da 10 ile 13 değerleri arasında bulunmaktadır.

Bu bağlamda, fonksiyonelleştirilmiş GNP'nin hem saflığı hem katman sayısı belirgin bir şekilde artmaktadır. Katman sayısı, saf GNP'ye oranla neredeyse 2 kat artış gözlemlenmiştir. Saf GNP'nin saflığının (kusur oranı) düşük olmasının sebebi; eksfoliasyon (ark reaksiyonu esnasında oluşan pul pul dökülme) sırasında kafesteki kusurların ve kenarların sayısının arttığını (Çok katmanlı grafen oluşu da bu durumu desteklemektedir.) göstermektedir. Carrasco vd.; şiddetin (intensity) artışını, TX-100'ün GNP'nin yüzeyine etki etmesi olarak açıklamaktadır (Carrasco ve diğ, 2014).

Bununla birlikte; saf GNP 'nin ve fonksiyonel GNP'nin G bandının aynı hizada olmasının nedeni, saf grafenin, fonksiyonel hale geldikten sonra herhangi bir çift bağın olmamasıdır (Örn: GO ile grafitin pikleri aynı hizada olmaması sonucunda GO'daki

çift bağların varlığından bahsedilmektedir.) (Kudin ve diğ, 2008). Q Zhang vd., izole edilmiş çift bağlar grafitin G bandından daha yüksek frekanslarda rezonansa girdiklerini, ancak bildiğimiz kadarıyla böyle bir vites büyütmeye neden olan çift bağların belirli modelleri bilinmediğini belirtmiştir. Bununla birlikte daha zayıf D bandı, kimyasal dönüştürülmüş grafenin çok daha az kusur popülasyonuna veya oksijenli fonksiyonel gruba sahip olduğu anlamına gelmektedir (Zhang ve diğ, 2017).

Şekil 3.3'de hem fonskiyonelleştirilmiş GNP'nin hem de saf GNP'nin Raman spektroskopisi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.3 : Saf GNP ile TX-100 / GNP Raman Spektroskopisi eğrileri.

3.2.2 Termogravimetrik analiz

TGA, GNP'deki karbon (C) ve fonksiyonel hale getirilmiş GNP'nin yapısındaki moleküllerin termal stabilitesini ve stabilite ile alakalı bilgileri incelemek için yapılan bir yöntemdir (Stankovich ve diğ, 2007). Yöntemin genel prensibi ise, deney numunesi sabit bir hızda belirli bir dereceye kadar ısıtılırken kütle değişimi ve sıcaklık parametreleri doğrultusunda incelenmesidir. Numunenin kütle kaybı veya kazancı sonucu istenilen sonuçlar elde edilmektedir.

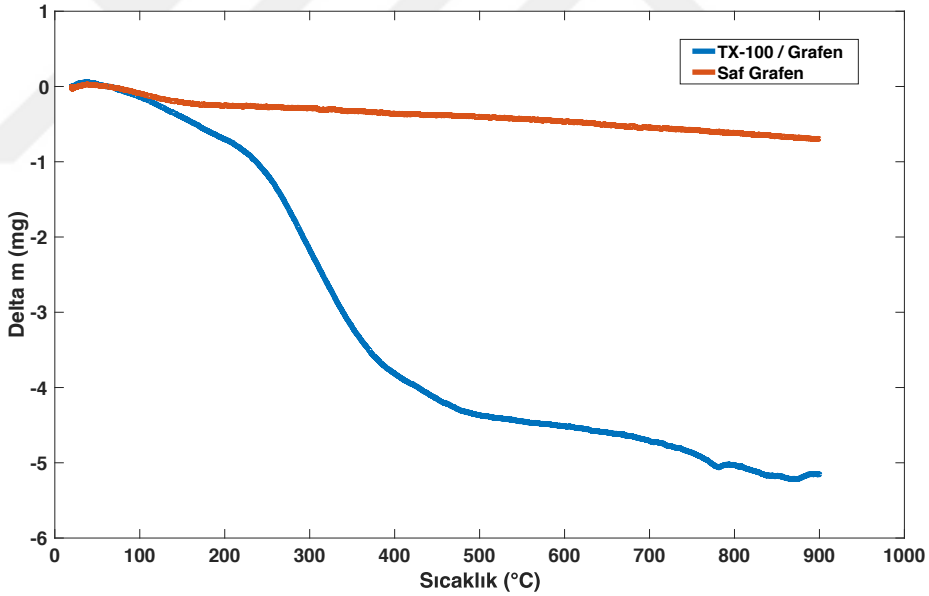
Bilindiği üzere, grafitik yapının oksitlenmesi 800°C ve üzerindeki yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Ancak, GNP'ye uygulanan fonksiyonel malzemelerde bulunan organik moleküller (Özellikle iyonik olmayan TX-100), 200-

400°C arasında termal olarak yapıdan sıyrılarak kendilerini açığa çıkarmaktadırlar (Zhang ve diğ, 2011).

Bu çalışmada, GNP ve TX-100 ile fonksiyonel hale getirilmiş grafenin TGA ile kütle kayıpları ile termal stabiliteleri incelenmiştir.

GNP'ler, 200-400°C arasında belirgin bir kütle kaybı olmaksızın, açıkça arttırılmış bir termal stabilite sergilemektedirler; bu, termal indirgeme işlemi yoluyla grafitik dayanıklılığın geri kazanılmasından sonra artan bir termal stabilite göstermektedir (Şekil 3.4).

TX-100 / GNP için 200-400°C sıcaklıklarda önemli bir kütle kaybı bulunabilmektedir. Bu da POPE (polioksietilen oktil fenil eter) moleküllerinin tabakaya başarıyla yapıştığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, TX-100 / GNP termal stabilitesi (GO'ya oranla) bozulmamış grafen kadar iyidir, bu da GNP'nin yapısının yüzey aktif madde modifikasyonu yoluyla yok edilemeyeceğini göstermektedir (Wan ve diğ, 2013).



Şekil 3.4 : Saf GNP ile TX-100 / GNP'nin TGA eğrileri.

3.2.3 Fouirer dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

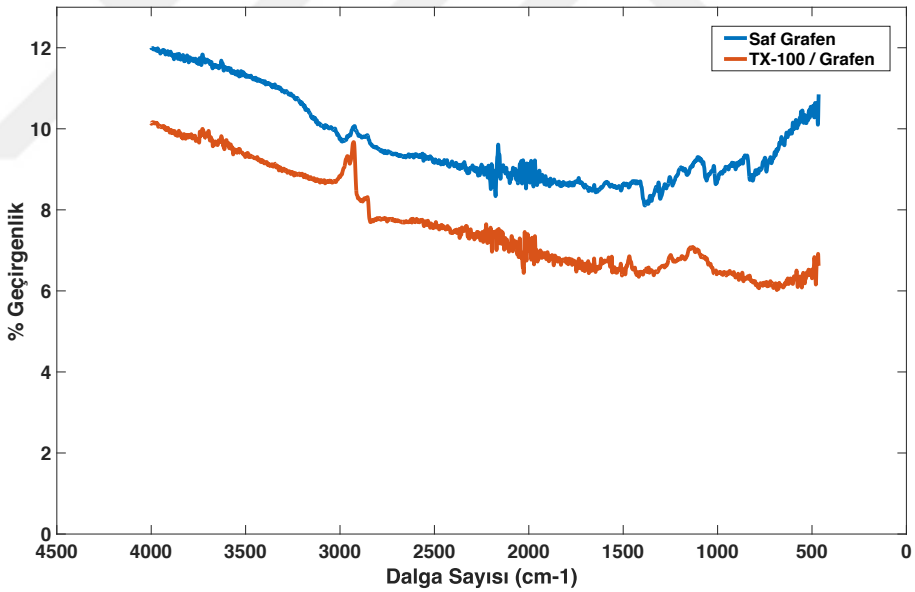
FT-IR spektrumları, polimerik bazlı GNP yapısının moleküler yönelimi ile ilgili bilgi vermektedir (Qamar ve diğ, 2019). Spektrometre ise kızılötesi ışınlarının soğurulması prensibine dayanmaktadır. Kızılötesi ışık ancak değişken dipol bağlı moleküller arasında oluşan soğurma işlemini uygulamaktadır. Prensibi temel olarak Raman spektroskopisine benzemektedir ancak ortaya koyduğu sonuçlardan dolayı (Genel

olarak C, H, O, N gibi organik malzemelerin tayininde kullanılmaktadır.) grafen bazlı malzemelerin ölçümlerin temelinde farklılaşmaktadır.

TX-100 yüzey aktif madde, hidrofobik segmentler yoluyla GNP'nin yüzeyinde fiziksel olarak absorbe edilebilmektedir. GNP'nin yüzeyinde hidrofobik segmentler yoluyla absorbe edilen 1320-1020 cm^{-1}'deki pikler, TX-100 moleküllerini yansıtan C-O germe bantlarına atfedilebilir (Li ve diğ, 2014).

TX-100 ile grafenin piklerindeki titreşim ve etkileşim ise aromatik C-H yapılarından söz edilmesi mümkündür (Geng ve diğ, 2008).

TX-100 / GNP spektrumunda, 1132 cm^{-1}'deki pikler C-O germe bantlarına karşılık gelir. 2800 cm^{-1} ve 3000 cm^{-1}'deki absorpsiyon zirveleri, muhtemelen sırasıyla TX-100'den -CH3 ve -CH2 gruplarının simetrik ve asimetrik gerilme titreşimine dayandırılmaktadır. TX-100 moleküllerinin GNP'nin yüzeyinde adsorbe edildiğini göstermektedir (Li ve diğ, 2014; Wan ve diğ, 2013) (Şekil 3.5).

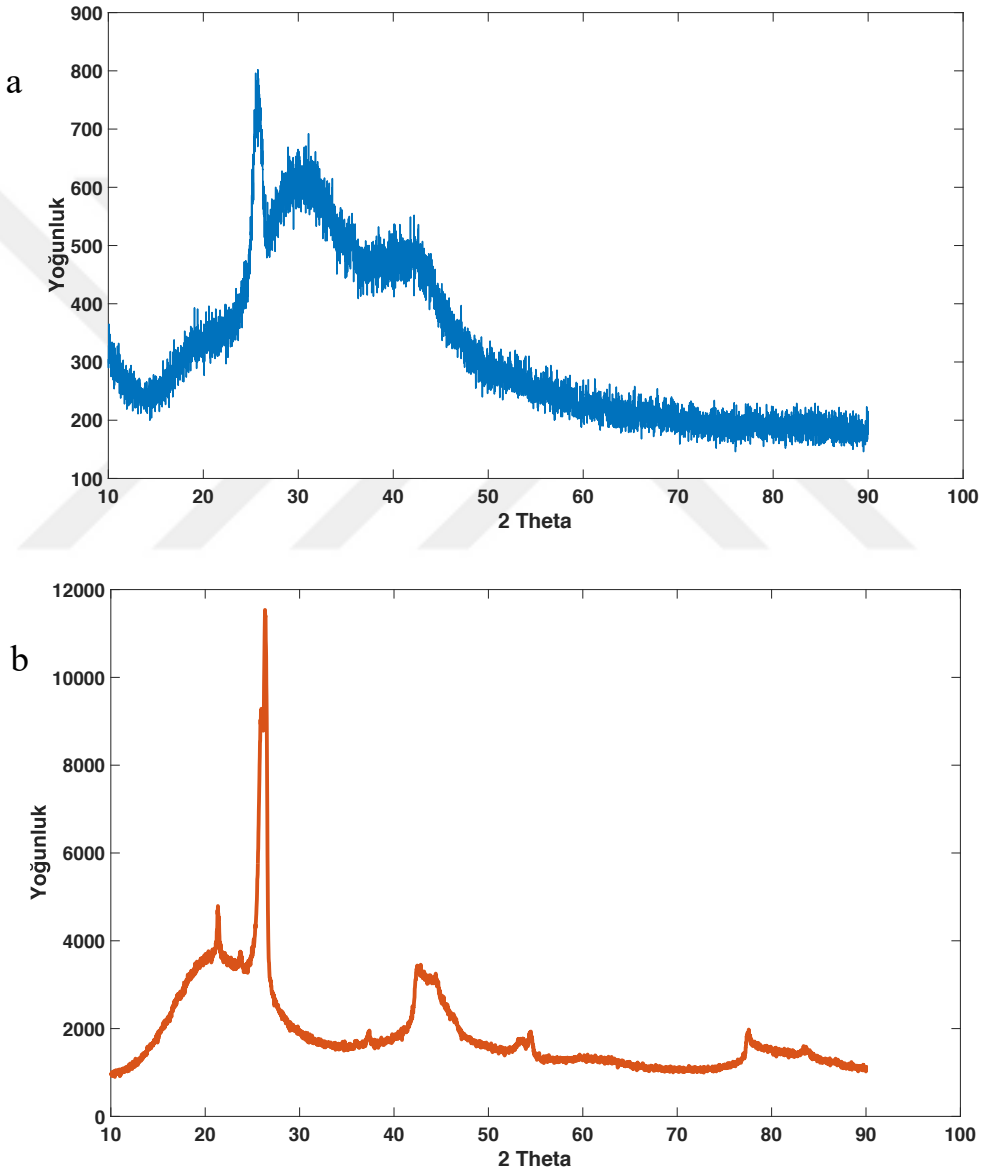


Şekil 3.5 : Saf GNP ile TX-100 / GNP'nin TGA eğrileri.

3.2.4 X-Işını difraksiyonu

X-Işını difraksiyonu; malzemelerin kristal yapılarını, kimyasal kompozisyonlarını ve fiziksel özelliklerini detaylı bir şekilde aktaran tahribatsız bir muayene yöntemidir. Bu metot, Bragg yasasına dayandırılmaktadır. XRD'nin genel prensibi, her bir kristal fazın kendine özgü dizilimleri olduğunu ve bu dizilimlere gelen ışınların kırınımları parmak izi olarak ifade etmektedir.

GNP'nin, karakteristik difraksiyon 2 Θ = 26,5°'de konumlanmaktadır. Bu karakteristik pik grafitin doğasından gelmektedir. TX-100 ile fonksiyonelleştirilmiş GNP'de ise yine GNP'nin doğal pikiyle birlikte 43°'de yeni bir karakteristik difraksiyon piki ortaya çıkmaktadır. GNP ve TX-100 grafenin eksfoliasyon durumu, GNP'nin bazal düzleminde büyük miktarda oksitlenmiş fonksiyonel grupların kaybıyla ilgilidir, bu da levhalar arasındaki h-bağı etkileşimini bozarak gevşek bir şekilde bir araya gelmelerini sağlamaktadır (Wan ve diğ, 2013).

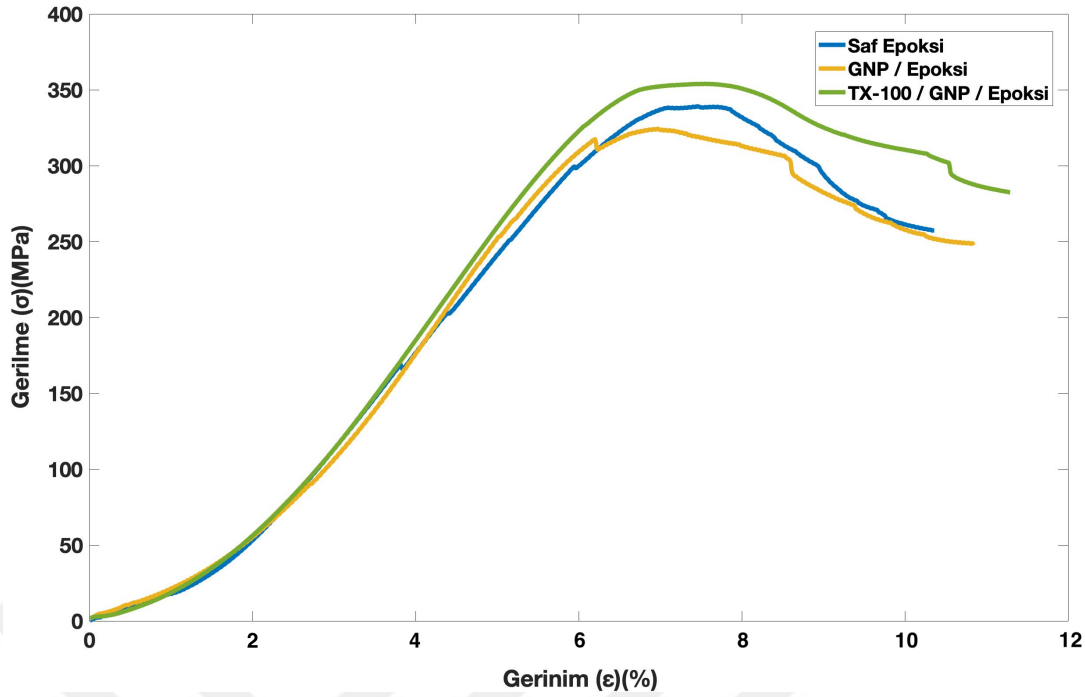


Şekil 3.6 : a) GNP ve b) fonksiyonel GNP'nin XRD eğrileri.

3.3 Saf Epoksi ve GNP Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik Karakterizasyonu

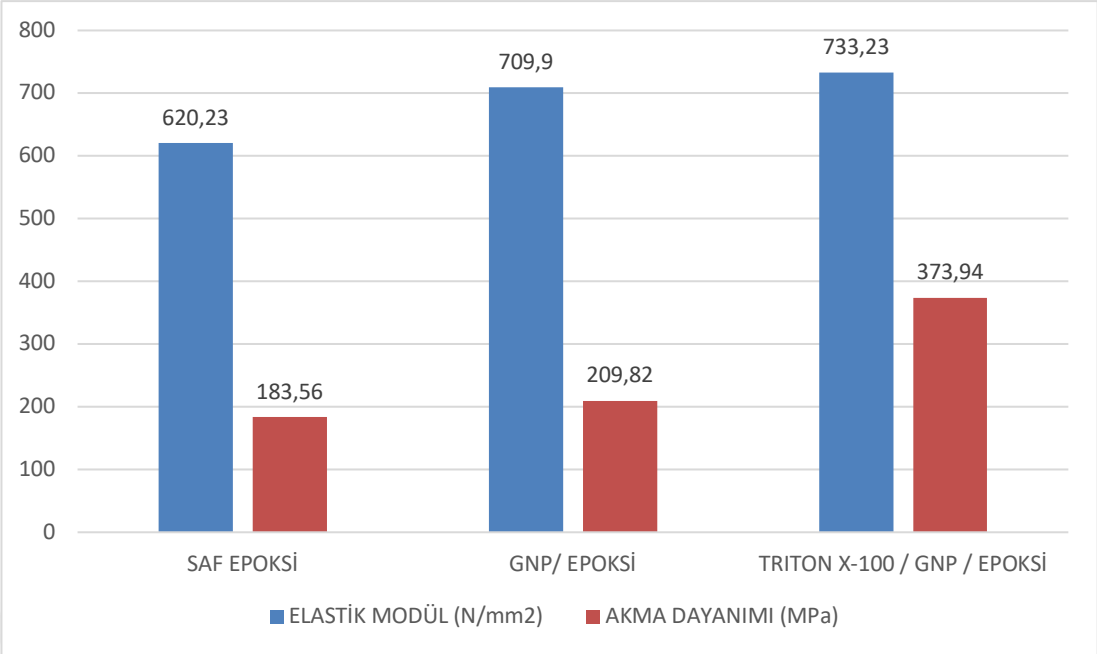
3.3.1 Basma testi

Literatürde yapılmış bir çalışmada, kütlece farklı oranlarda GNP takviye ettiği epoksi nanokompozitlerin mukavemetinde azalma ortaya çıkmaktadır. Takviye edilen GNP miktarı arttıkça mukavemette düşüş gözlemlenmektedir. Ancak GNP'ye, TX-100 ile fonksiyonelleştirme uygulayıp takviye edildikten sonra kütlece %0.5 GNP oranına kadar artış gözlemlenmektedir (Poutrel *ve diğ*, 2017). Bir başka çalışmada ise, farklı üretim metotları denemiştir. GNP takviyesi sonucunda nanokompozitin mukavemeti neredeyse saf epoksi ile aynı çıkmaktadır. Hem TX-100 ile işlenmiş GNP takviyeli nanokompozitte ise hem GNP takviyeli nanokompozit ile hem de saf epoksi ile karşılaştırdığında daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşmaktadır (Pullicino, 2019). Bu tez çalışmasında, üç farklı türden numuneye basma testi uygulanmış, basma testi sonucunda gerilim-gerinme eğrileri (Şekil 3.7) ile elastiklik modülleri ve akma dayanımları (Şekil 3.8) bulunmuştur. Şekil 3.7'ye göre uygulanan maksimum kuvvet değerleri saf epoksi için 10905 N, GNP / Epoksi için 10436 N ve TX-100 / GNP / Epoksi için ise 11511 N'dur. Buna göre GNP takviyesi sonucunda saf epoksiye göre nanokompozitin mukavemetinde düşüş yaşanırken fonksiyonel hale getirilmiş GNP'li nanokompozitin mukavemetinde artış gözlemlenmektedir. Grafik sonucunda ortaya çıkan bir diğer özellik ise akma dayanımı olmuştur. Bu çalışmada elde edilen basma mukavemetlerine bakıldığında, diğer çalışmalardaki sonuçlara benzer örneklerde değerler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.7: Epoksi ve epoksi nanokompozitlerin basma testi sonucu oluşan gerilme-gerinim eğrileri.

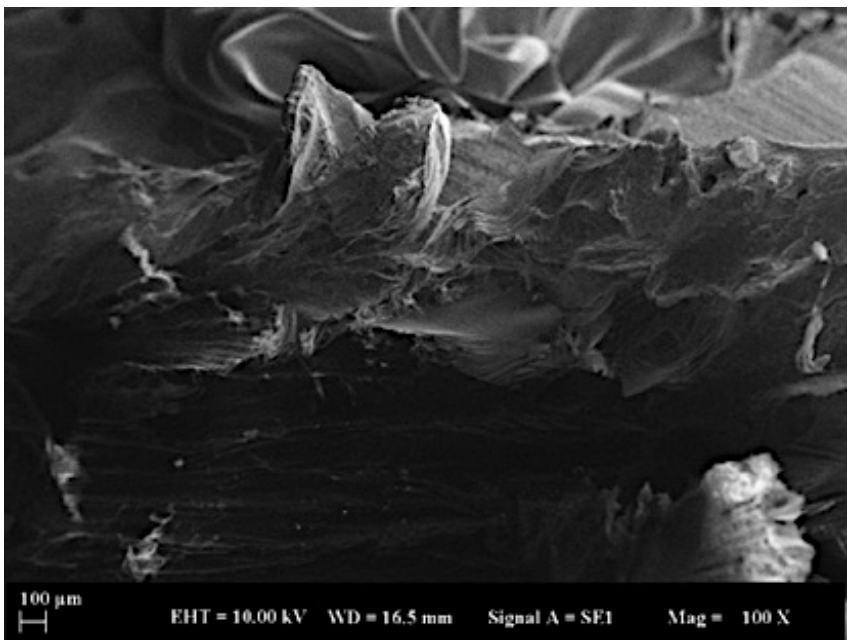
Elastiklik modulünde yapılan çalışmalar arasında olan Poutrel ve Pullicino'nun ayrı çalışmalarında, hem GNP takviyesinde hem de TX-100 / GNP takviyesinde artış görülmektedir. Artış mikarı takviye edilen GNP oranına göre değişmektedir. Ancak TX-100 / GNP takviyesinde maksimum elastiklik modülü %0.5 oranında takviye malzemesi ile olan kompozitlerde çıkmaktadır. Elastiklik modülü ise mukavemette olduğu gibi GNP takviyesi sonucunda literatür verilerine benzer şekilde yükseliş yaşanırken GNP'yi fonksiyonelleştirdikten sonra takviye edildiğinde yine yükseldiği gözlemlenmektedir. Akma dayanımları; saf Epoksi için 183,56 MPa, GNP / Epoksi için 209,82 MPa ve TX-100 / GNP / Epoksi için ise 373,94 MPa'dır. GNP takviyesi sonucu kompozit malzemenin akma dayanımı neredeyse aynı olurken, TX-100 / GNP takviyesi sonucu kompozitin akma dayanımında bir artış gözlemlenmektedir. Bunun en önemli sebebi ise GNP tanelerinin epoksi içerisinde aglomerasyon oluştuğu ön görülmektedir.



Şekil 3.8: Saf epoksi ve epoksi nanokompozitlerin elastik modülleri ve akma dayanımları.

3.3.1.1 Saf epoksi numunelerin basma testi sonucundaki sem görüntüleri

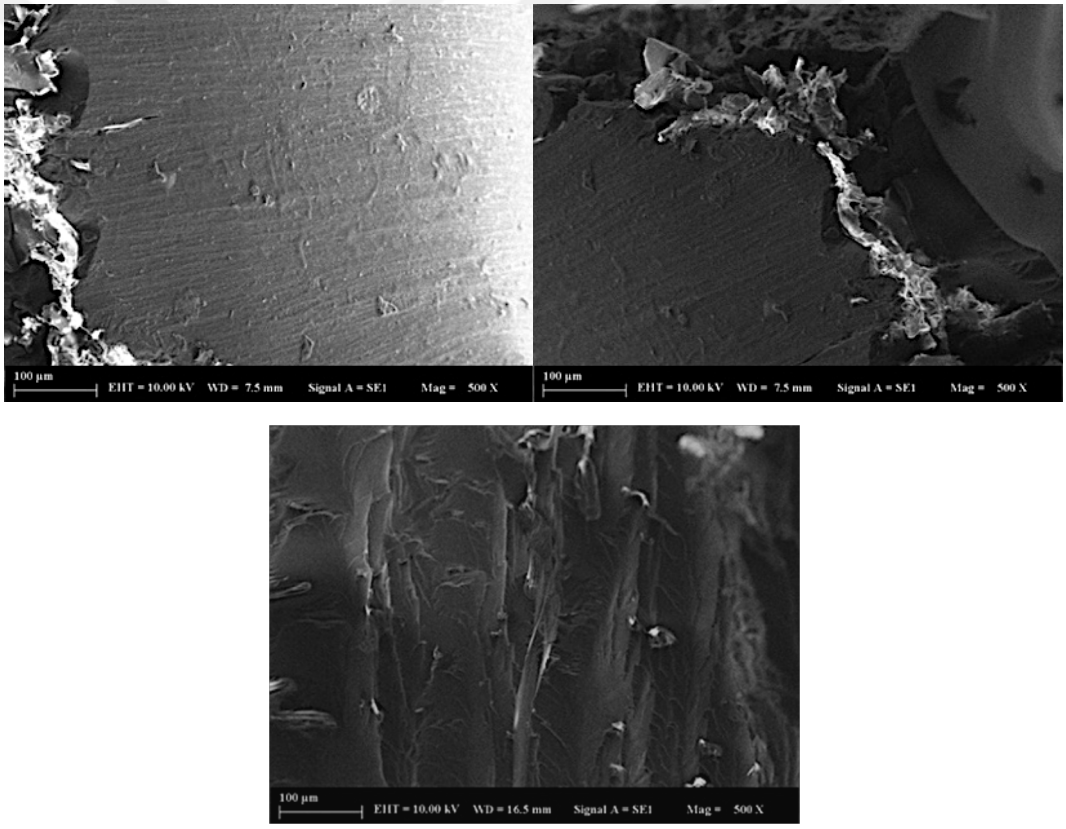
Basma deneylerinde elde edilen numunelerde, kırılma yüzey morfolojisini incelemek amacıyla kırılma yüzeyleri hazırlanmıştır. Şekil 3.9, 3.10 ve 3.11, farklı şekil değiştirme hızlarında yapılan basma testlerinde elde edilen saf epoksinin kırılma yüzeylerinin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.9 : 0.01 /s şekil değiştirme hızındaki basma test sonucu kırılan epoksinin 100x yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri.

Epoksi matrisin kırılma SEM görüntülerinde; epoksinin termoset özelliklerini göstermesi beklenmektedir. Saf epoksiler, kuvvet sonucunda daha az deformasyon sergilemektedirler, bu durum da epoksi numunesinin gevrek bir davranış ortaya koyduğunu göstermektedir (Tian ve diğ, 2016). Şekil 3.9'de, oluşan ani kırılmaların daha net ortaya çıkmasından dolayı, malzemenin gevrek bir yapıda olduğu sonucuna varılmaktadır. Yine Şekil 3.10; bu durumu destekler nitelikte görüntüler sunmaktadır.

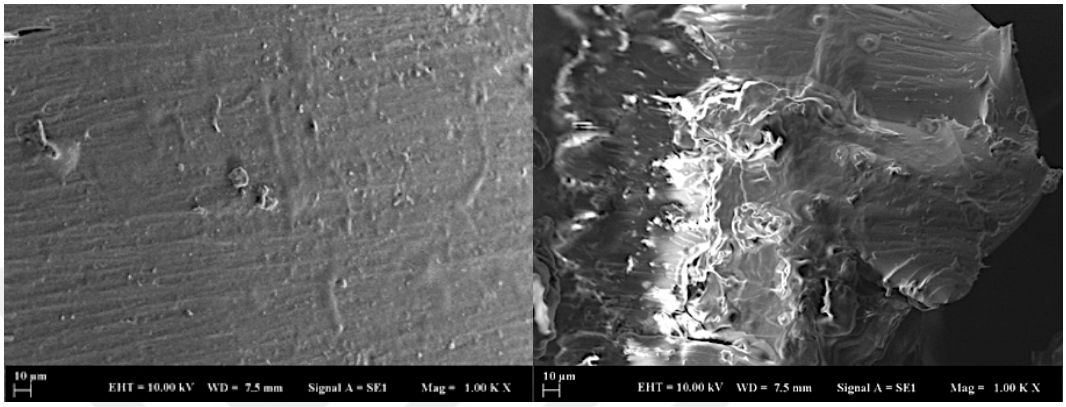
Kırılgan özellik gösteren epoksinin yüzeyinin pürüzsüz olması beklenmektedir (Saha ve diğ, 2015; Zakaria ve diğ, 2016). Şekil 3.10'da; yüzeylerde, pürüzlülüğün az olduğu ancak bir miktar pürüzün bulunduğu görülmektedir. Bu yüzey morfolojisi, saf epoksinin çatlak başlatma ve yük altında yayılmaya karşı zayıf dirence sahip olduğunu göstermektedir (Zakaria ve diğ, 2016).



Şekil 3.10 : 0.01 /s şekil değiştirme hızındaki basma test sonucunda kırılan epoksinin 500x yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri.

Epoksi malzemelerde, gerinim sonucunda üç farklı bölge oluşmaktadır. Bu bölgeler; ilk çatlağın başlamasının yakınında oluşan pürüzsüz veya aynalı bölge, pürüzlülüğün düzensiz olarak arttığı geçiş bölgesi ve düzgün olmayan pürüzlü yüzeye sahip olan ve deformasyonun son aşamasında hızla oluşan son kırılma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Epoksinin kırılma yüzeyindeki ayna bölgesi, gerinim hızı arttıkça

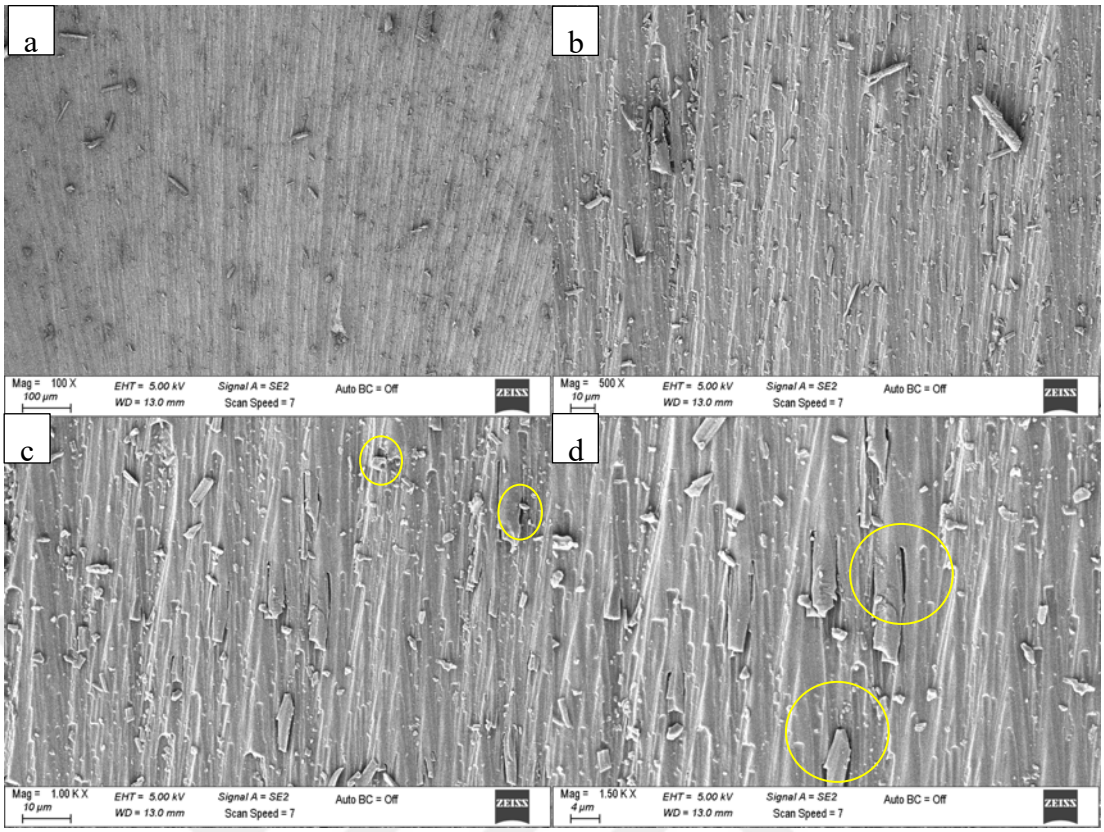
azalmaktadır (Eqra ve Moghim, 2016). Şekil 3.9'da gösterilen bölgeler ayna bölgesini gösterilmektedir. Şekil 3.10'da gösterilen bölgeler ise geçiş bölgeleri örnekleri arasındadır. Geçiş bölgelerindeki alanların faklarından ise gerinim hızının malzemenin kırılma bölgesindeki şekillere etki ettiği ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.11'deki görüntüler ise malzemenin son aşamasındaki son kırılma bölgesi görüntüleri olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.11 : 0.01/s şekil değiştirme hızlarındaki basma test sonucunda kırılan epoksinin 1Kx yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri.

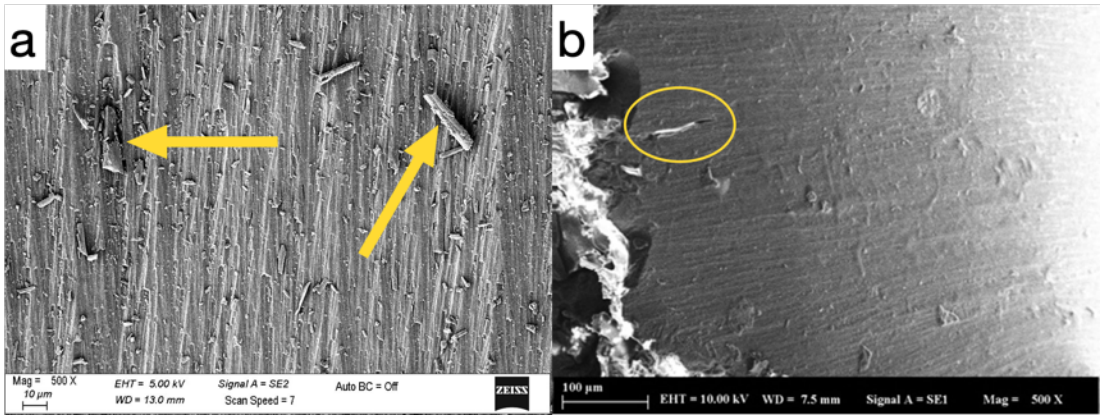
3.3.1.2 Grafen takviyeli epoksi kompozitlerin basma testi sonucundaki sem görüntüleri

Şekil 3.12, test edilen numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Saf epoksi reçinenin kırılma yüzeylerinin aksine, nanokompozitlerin yüzeyleri pürüzlüdür. Isıyla sertleşen reçineler kırılgandır. Sert ve dirençli nano takviyelerin eklenmesi, çatlak sapma kırılma mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum, farklı düzlemlerde büyüyen sayısız kırılma nehirleri (river) oluşturmaktadır. Grafen nanoplakaların, iki boyutlu (2B) yapısı nedeniyle çatlak yayılmasını etkili bir şekilde bozmaktadır ve saptırmaktadır (Wang ve diğ, 2013). Bu kırılma mekanizması, zayıf arayüz nedeniyle kompozitlerin sertleşmesine neden olmamaktadır. Aslında, nanokompozitlerin mikrograflarında bazı oyuklar veya zayıf yapışmaya sahip bölgeler gözlemlenmektedir. Fraktografi, incelenen tüm kompozitler için benzer olsa da kompozitin GNP içeriği ile kırık yüzeylerinin pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemek mümkündür. Bu, nanoplakaların çatlak yayılmasını engelleyen ve çatlak sapmasını indüklediği anlamına gelmektedir (Prolongo ve diğ, 2014). Yapılan mekanik test sonuçları ise SEM görüntülerinden ortaya çıkan çatlak sapma ve çatlak yayılmasını engelleme mekanizmasını doğrulamaktadır.



Şekil 3.12 : Kütlece 0,5 oranında TX-100 / GNP takviyeli epoksi nanokompozitin a) 100x, b) 500x, c) 1kx ve d) 1.5kx yakınlaştırmasındaki kırık yüzey incelemesi.

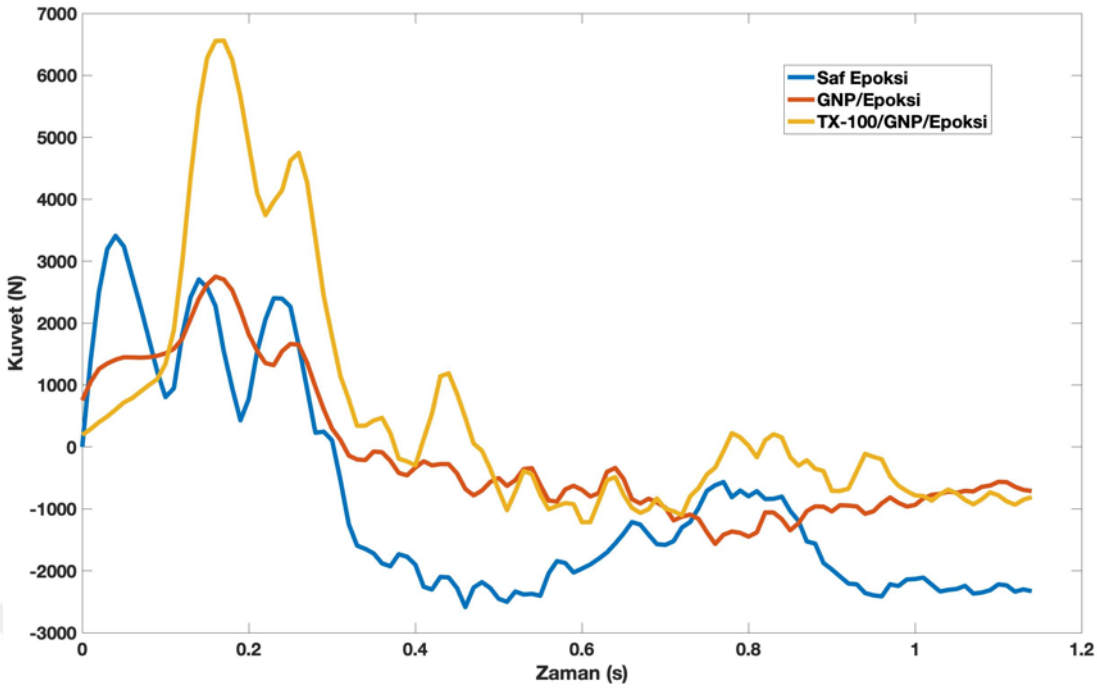
Nanokompozitlerin yüzeylerindeki pürüzlülük, saf epoksinin yüzey pürüzlülüğünden çok net bir şekilde daha fazladır. Nanokompozitler üzerindeki kusurlar derin ve sığ bölünmeler olarak ikiye ayrılmaktadır. Derin yarılmaların modeli, saf epoksi örneklerine oldukça benzerdir. Ancak, nanokompozitlerdeki sığ bölünmelerin yoğunluğu nispeten çok daha yüksektir ve bu durum nanokompozitin matrisinin içerisindeki GNP'lerin baskısı olarak açıklanabilir (Shadlou ve diğ, 2014). Şekil 3.13 d'de saf epoksi numunesinin yüzeyinin pürüzü oldukça az iken GNP eklendikçe (Şekil 3.13 a) yüzeyindeki pürüzün varlığının arttığı söylenebilir. Aslında GNP parçacıkları, kırılma düzleminin yönünü değiştirmenin ve yarılmalar oluşturmanın sebebidir. Kırılma düzlemi ile kesişen GNP parçacıkları, iki kırılma yüzeyi arasında köprü oluşturur ve kırılır veya diğer yüzeyden çekilir, bu da sırayla bir boşluk bırakır (Shadlou ve diğ, 2014).



Şekil 3.13: a) Kütlece 0,5 oranında TX-100 / GNP takviyeli epoksi nanokompozit, ve b) saf epoksinin 500x yakınlaştırmada kırık yüzeylerinin görüntüleri.

3.3.2 Ağırlık düşürme darbe testi

Ağırlık düşürme darbe testi sonucunda oluşan kuvvet – zaman grafiği, şekil 3.14'te verilmiştir. Saf epoksi reçineye darbe esnasında karşılaştığı kuvvet 3490 N olarak bulunmuştur. Saf GNP takviyesinde ise nanokompozitin karşılaştığı enerji yaklaşık 2900 N seviyelerine düşmektedir. Bunun sebebi ise GNP'nin epoksi matris içerisinde yeteri kadar iyi yayılamaması sonucu topaklanmalar oluşturarak yeteri kadar başarılı fiziksel özellikler ortaya çıkaramamasıdır. TX-100 ile fonksiyonel hale getirildikten sonra GNP takviyesi sonucunda oluşan nanokompozitin karşılaştığı kuvvette ise epoksi reçineye oranla iki kat artış gözlemlenmektedir. Bu durum da epoksi içerisinde fonksiyonel grafenin iyi bir şekilde dağıldığı ve yayıldığı bu durum sonucunda mekanik özelliklerinde iyileşme ortaya çıktığı söylenebilmektedir.



Şekil 3.14: Ağırlık düşürme darbe testi sonucunda oluşan kuvvet-zaman grafiği.

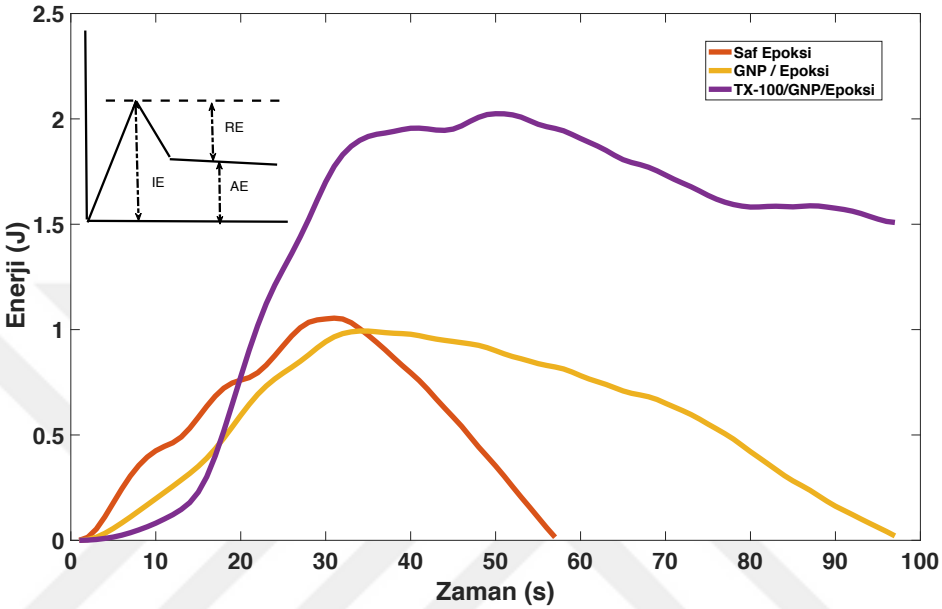
Ağırlık düşürme darbe testi sonucunda 3 temel enerji seviyesi ortaya çıkmaktadır. Bunlar:

a. Darbe enerjisi (IE)
b. Absorbe enerjisi (AE)
c. Geri sıçrama enerjisi (RE) (Veerakumar ve diğ, 2021).

Darbe sırasındaki maksimum kuvvet, emilen enerji ile orantılıdır. GNP'lerin katmanlı yapısı muhtemelen kompozitlerin boşaltma (dumping) özelliklerini iyileştirmeye olanak sağlamaktadır. Darbe testleri sırasında, her numune için emilen enerjinin, nano partiküllerin ayrılmasından dolayı matrisin yapısındaki plastik bölgenin artmasıyla ilişkilidir (Irez ve diğ, 2019). Bu, epoksi matrisindeki daha fazla grafenin, çatlak sapması ve grafen çekilmesi gibi daha fazla enerji absorpsiyon seviyelerine yol açabileceğini gösterir.

Bu temel enerji seviyeleri şekil 3.15'te küçük bir diyagram halinde verilmiştir. Bu diyagram ve test sonucunda oluşan grafikte Epoksi için ortaya çıkan darbe enerjisi 1 J olarak ortya çıkmıştır. Grafen takviyeli epoksi kompozit için ise darbe enerjisi oldukça az bir düşüş gösterip 0.9 J'lik bir enerji açığa çıkmaktadır. TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitinde ise darbe enerjisi 2 kat artış göstererek 2 J'lik enerji ortaya çıkmıştır. Absorbe edilen enerjiye bakıldığı zaman epoksi reçinenin en düşük seviyede çıktığı gözlemlenmiştir. GNP takviyeli nanokompozitte ise ciddi bir artış göstermesine

rağmen fonksiyonel hale getirilmiş GNP takviyesinde yine oldukça yüksek bir artış sergilemiştir. Bu durum grafen ile matris arasındaki arayüzün sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak ortaya grafen takviyesinin enerjiyi absorbe edebildiği ve epoksinin gevrek ve camsı yapısının azaldığı ve daha tok bir yapıya ulaştığı söylenebilmektedir.



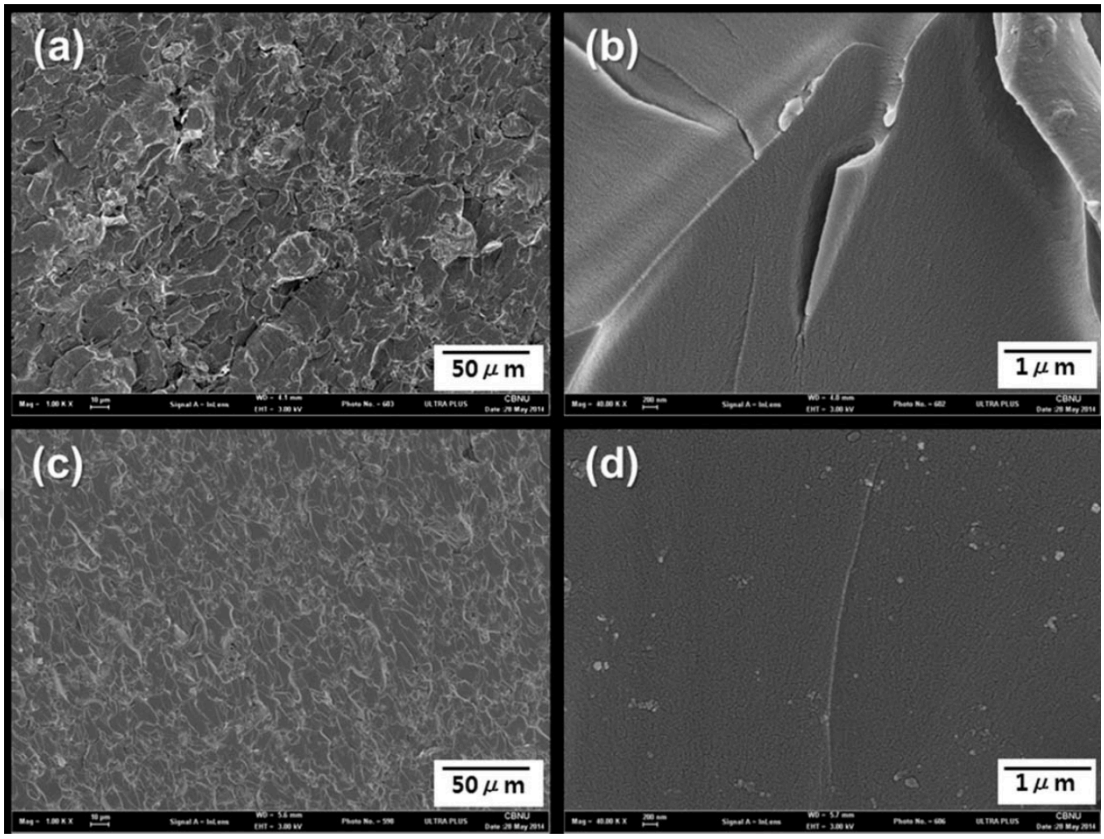
Şekil 3.15: Ağırlık düşürme darbe testi sonucu oluşan enerji-zaman grafiği.

3.3.2.1 Ağırlık düşürme darbe testi sonucu oluşan yüzeyin sem analizi

Ağırlık düşürme darbe testi sonucu oluşan saf epoksi, GNP takviyeli epoksi nanokompozit ve TX-100 / GNP takviyeli epoksi nanokompozitlerin kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiştir.

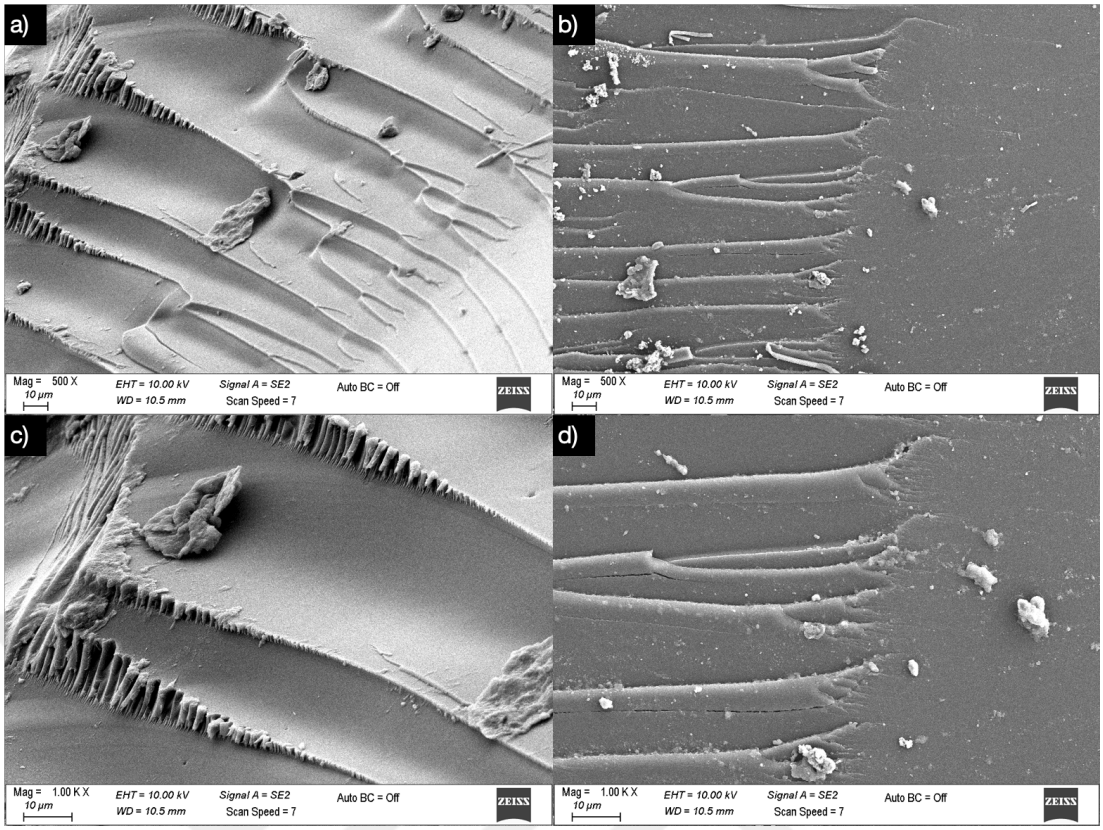
Saf epoksi ile epoksi nanokompozitler karşılaştırıldığında yapıların mekanik özelliklerine etki edebilecek sonuçlar ortaya çıkmıştır. Seong ve Kim yaptığı çalışmada; GNP ve fonksiyonel hale getirilmiş GNP takviyeli nanokompozitleri karşılaştırmıştır ve büyütme oranlarını 1Kx (Şekil 3.16 a, c) ve 40kX (Şekil 3.16 b,d) olarak seçmiştir. GNP takviyeli nanokompozitin, TX-100 / GNP takviyeli nanokompozit ile kıyasladığında; daha sünek ve pürüzlü bir yapıyla karşılaşmaktadır. Bu yapı sonucunda TX-100 fonksiyonelleştirilmesi ile ortaya çıkan GNP - epoksi arayüz etkilişimi daha başarılı olmaktadır (Şekil 3.16) (Seong ve Kim, 2015). Bu kırılma yüzeyi görüntüsü ile TX-100 / GNP takviyesi sonucunda; nanokompozitlerin mükemmel darbe mukavemeti göstermesini desteklemektedir. Darbe testi sonucu

oluşan kırık yüzeylerin görüntüleri 500x ve 1Kx yakınlaştırma oranları ile Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.16: a,b) Kütlece %0,5 grafen içeren ve c,d) Kütlece %0,5 fonksiyonelleştirilmiş grafen içeren epoksi nanokompozitlerin SEM analizi görüntüleri (Seong ve Kim, 2015).

Şekil 3.17'ye bakıldığı zaman, Seong ve Kim'in çalışmasında olduğu gibi GNP ve fonksiyonelleştirilmiş GNP'nin kırık yüzeylerindeki pürüzlülük gözlemlenebilmektedir. GNP takviyeli kompozitin pürüzlülüğün daha az olduğu ve TX-100 takviyesi sonucunda yüzeydeki pürüzün arttığı gözlemlenmektedir.

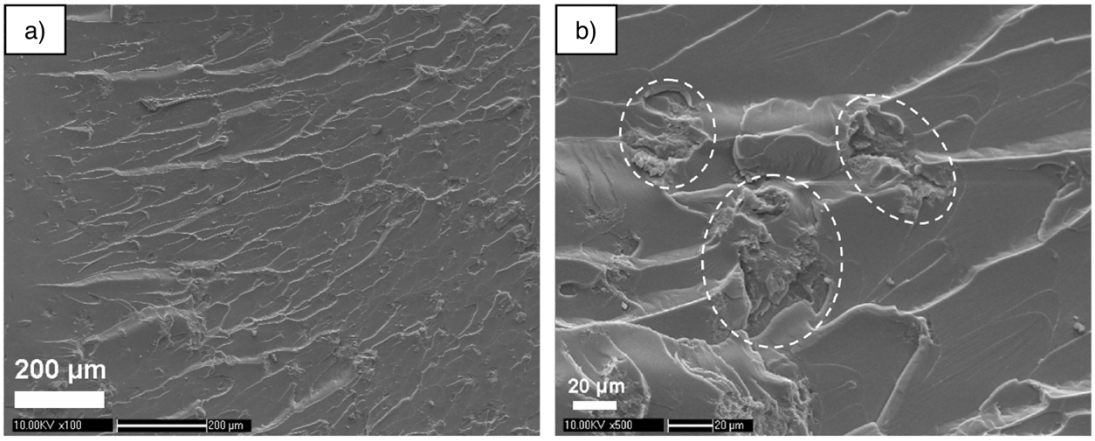


Şekil 3.17: a) GNP / Epoksi 500x yakınlaştırma, b) TX-100 / GNP / Epoksi 500 x yakınlaştırma, c) GNP / Epoksi 1Kx yakınlaştırma ve d) TX-100 / GNP / Epoksi 1kx yakınlaştırmadaki SEM analizi görüntüleri.

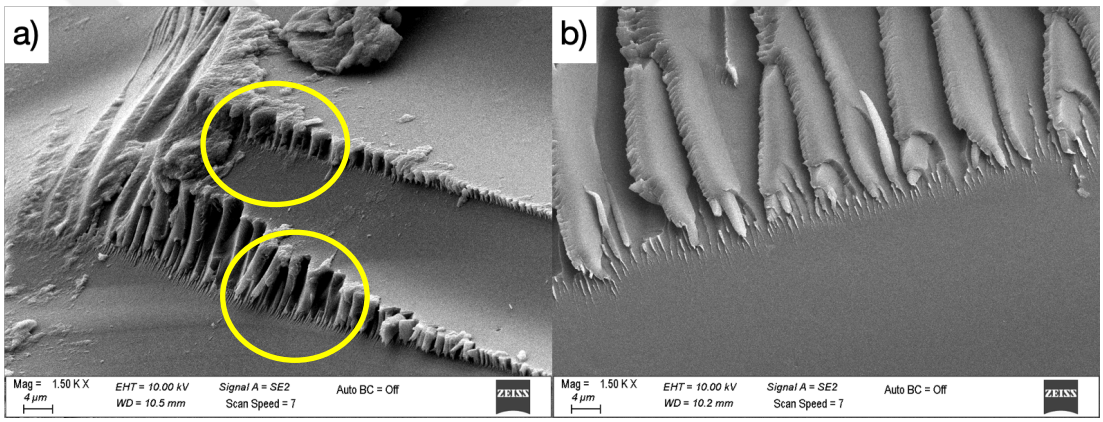
Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışma sonucunda ortaya çıkan kırık yüzey görüntülerinde, GNP takviyeli nanokompozitin aglomerasyonları iyi bir şekilde ortaya çıkardığı gözlemlenmektedir (Wu *ve diğ*, 2017). Arayüz etkileşiminin zayıf olması sebebiyle GNP'nin iyi yayılamaması sonucunda darbe direnci ve darbe enerjisi gibi özelliklerin iyileşmemesi gözlemlenebilmektedir. Aynı zamanda arayüz etkileşiminin az olması sebebiyle yine çeşitli bölgelerde GNP'nin aglomerasyonu ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.18, 100kx ve 500kx yakınlaştırmadaki GNP takviyeli epoksi kompozitin SEM görüntülerini vermektedir. Şekil 3.18 b'de, saf GNP'nin epoksi matris üzerindeki muhtemel aglomerasyonu görülmektedir.

Şekil 19'da ise hem GNP takviyeli epoksi nanokompozitin hem de TX-100 / GNP takviyeli epoksi nanokompozitin 1.5 kx oranındaki yakınlaştırmasını vermektedir. Şekil 19 a'da Wu'nun çalışmasındaki gibi kırık yüzeylerin olduğu kısımlarda aglomerasyon gözlemlenmektedir. Bu durum hem darbe enerjisi hem de darbe mukavemetinde oluşan bulguları açıklamaktadır.

Şekil 19 b'de görüldüğü üzere, TX-100 ile fonksiyonelleştirildikten sonra herhangi bir ciddi aglomerasyona rastlanmadığı söylenebilir.



Şekil 3.18: Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ortaya çıkan GNP takviyeli epoksi kompozitin a)100x ve b)500x yakınlaştırmadaki kırık yüzey görüntüleri.



Şekil 3.19: a) GNP / Epoksi ve b) TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitlerin 5kx yakınlaştırmadaki SEM görüntüleri.

3.3.3 Izod darbe testi

3 farklı numune üzerinde uygulanan izod darbe testi sonucunda ortaya absorplanan enerji ve darbe dayanımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Izod darbe testi sonuçları, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Seong ve Kim yaptığı izod darbe testi çalışmasında, kütlece farklı miktarlarda GNP ve fonksiyonel GNP takviyeleri denemiştir. En düşük darbe dayanımını, beklendiği üzere, saf epokside elde etmiştir. Kütlece % 0.5 GNP takviyesi sonucunda darbe dayanımı %25 artış göstermektedir. GNP'yi fonksiyonel hale getirdikten sonra, epoksi kompozitin darbe dayanımı %50'den fazla artış göstermektedir (Seong ve Kim, 2015). Sumdani ve diğ., ÇD-KNT ile yaptığı çalışmada ise darbe dayanımı için benzer durum

ifade edilebilir. Sumdani, yüzey aktif maddesinin uygun miktarda ilavesi ile darbe dayanımını %125 arttırdığını belirtmektedir (Sumdani ve diğ, 2019). Shen ve diğ. ise Charpy darbe testi sonucunda, kütlece %0.5 GNP takviyeli epoksi nanokompozitin darbe dayanımında düşüş gözlemlemiştir. Bunun nedeni ise, epoksi nanokompozitlerin kırılma direnci iyileştirmesinin, nispeten düşük bir grafen içeriğinde elde edilebilmesidir. En önemli faktör olan GNP'nin matris içerisinde dağılamaması buradaki düşüşü açıklamaktadır (Shen *ve diğ*, 2012).

Saf epoksinin absorpladığı enerji 0.11 J olurken GNP takviyesi ile 0.18 J'e ve TX-100 / GNP takviyesi ile beraber epoksi nanokompozitin absorpladığı enerji 0.23 J'e yükselmiştir. Darbe dayanımı da absorplanan enerji ile aynı trendi göstermektedir. Saf epoksinin darbe dayanımı, 4.48 kJ/m^2 olarak ortaya çıkmıştır. GNP takviyesi, epoksinin darbe dayanımını 7.42 kJ/m^2'ye yükseltirken TX-100 / GNP takviyesi sonucunda epoksinin darbe dayanımını 9,45 kJ/m^2'ye çıkarmıştır. Darbe dayanımı, Seong ve Kim'in çalışmasına benzer trend gösterse de elde edilen değerlerin daha başarılı olduğu söylenebilmektedir.

Çizelge 3.1: Izod darbe testi sonucunda ortaya çıkan absorplanan enerji ve darbe dayanımı sonuçları.

	ENERJİ (J)	D.D. (kJ/m^2)
Saf Epoksi	0,11	4,48
GNP/Epoksi	0,18	7,42
TX-100/GNP/Epoksi	0,23	9,45

4. SONUÇLAR

- Elektrik ark oluşturma yöntemi ile üretilmiş GNP ve TX-100 ile fonksiyonellendirilmiş GNP (Farklı prosesler olarak sırasıyla yapılmak üzere) ve Araldite 564 epoksi reçine aynı beher içine çeşitli ağırlıkça yüzde oranında konulmuştur. GNP için belirlenen ağırlıkça yüzde oran %0.5'tir.
- BET analizi sonucuna göre reaktörden elde edilen GNP'nin yüzey alanı 153,5236 m^2/g olarak bulunmuştur.
- Reaktörden alınan grafenin; saflığı, I_D/I_G oranından hesaplanarak 1,22 olarak bulunmuştur. Katman sayısı ise, I_G/I_{2D} oranından 5 ile 7 değerleri arasında çıkmıştır. Fonksiyonel grafenin Raman değerleri ise, I_D/I_G oranından 0,9 olarak hesaplanırken; katman sayısı da 10 ile 13 değerleri arasında bulunmuştur.
- GNP'nin, karakteristik difraksiyon 2 Θ = 26,5º'de konumlanmaktadır. Bu karakteristik pik grafitin doğasından gelmektedir. TX-100 ile fonksiyonelleştirilmiş grafende ise yine GNP'nin doğal pikiyle birlikte 43º'de yeni bir karakteristik difraksiyon piki ortaya çıkmıştır.
- Grafen levhalar, 200-400ºC arasında belirgin bir kütle kaybı olmaksızın, açıkça arttırılmış bir termal stabilite sergilemektedirler; bu, termal indirgeme işlemi yoluyla grafitik dayanıklılığın geri kazanılmasından sonra artan bir termal stabilite göstergesidir. TX-100 / GNP için 200-400ºC sıcaklıklarda önemli bir kütle kaybı bulunmaktadır. Bu da POPE moleküllerinin tabakaya başarıyla yapıştığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, TX-100 / GNP'nin termal stabilitesi bozulmamış GNP kadar iyidir, bu da grafenin yapısının yüzey aktif madde modifikasyonu yoluyla yok edilemeyeceğini göstermiştir.
- Basma testi sonucunda saf epoksi, GNP takviyeli epoksi nanokompozit ve TX-100 / GNP takviyeli epoksi nanokompozitlerin mukavemet, elastik modülü ve akma dayanımı incelenmiştir. Basma testi verilerine göre basma mukavemetinin GNP takviyesi ile düşüş gösterdiği ancak TX-100 / GNP takviyesi sonucu saf epoksiye oranla % 5.56 artış gözlemlenmiştir. TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitinin

elastik modülü ise saf epoksiye oranla %18,21 ve GNP / Epoksi nanokompozitine oranla %1,9 daha yüksek çıkmıştır. GNP / epoksi nanokompozitin akma dayanımı, saf epoksiye göre %14,30 artış gösterirken TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitin akma dayanımı, saf epoksiye %103 oranında artış ile daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlara göre GNP takviye malzemesi epoksi içerisinde yeteri miktarda homojen dağıtılmadığından aglomerasyona sebep olarak mekanik özelliklerinde gelişme kaydedememiştir. Ancak TX-100 ile fonksiyonelleştirilmesinin iyi dağılım sağlanabildiği için mekanik özelliklerde artışa neden olmaktadır.

- Saf epoksi reçinenin darbe esnasında karşılaştığı kuvvet 3490 N olarak bulunmuştur. Saf GNP takviyesindeki epoksi kompozitin ise karşılaştığı kuvvet yaklaşık 2900 N seviyelerine düşmektedir. Bunun sebebi ise GNP'nin epoksi matris içerisinde yeteri kadar iyi yayılamaması sonucu aglomerasyonlar oluşturarak yeteri kadar başarılı fiziksel özellikler ortaya çıkaramamasıdır. TX-100 ile fonksiyonel hale getirildikten sonra GNP takviyesindeki epoksi nanokompozitin darbe direnci ise epoksi reçineye oranla iki kat artış gözlemlenmektedir. Bu durum da epoksi içerisinde fonksiyonel grafenin iyi bir şekilde dağıldığı ve yayıldığı bu durum sonucunda mekanik özelliklerinde iyileşme ortaya çıktığı söylenebilmektedir. Epoksi için ortaya çıkan darbe enerjisi 1 J olarak ortya çıkmıştır. Grafen takviyeli epoksi nanokompozit için ise darbe enerjisi oldukça az bir düşüş gösterip 0.9 J'lik bir enerji açığa çıkmaktadır. TX-100 / GNP / Epoksi nanokompozitinde ise darbe enerjisi 2 kat artış göstererek 2 J'lik enerji ortaya çıkmıştır. Absorbe edilen enerjiye bakıldığı zaman epoksi reçinenin en düşük seviyede çıktığı gözlemlenmiştir. GNP takviyeli nanokompozitte ise ciddi bir artış göstermesine rağmen fonksiyonel hale getirilmiş GNP takviyesinde yine oldukça yüksek bir artış sergilemiştir. Bu durum sonucunda ortaya grafen takviyesinin enerjiyi absorbe edebildiği ve epoksinin gevrek ve camsı yapısının azaldığı ve daha tok bir yapıya ulaştığı söylenebilmektedir.
- 3 farklı numune üzerinde uygulanan izod darbe testi sonucunda ortaya çıkan absorplanan enerji ve darbe dayanımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Saf epoksinin absorpladığı enerji 0.11 J olurken GNP takviyesi ile %63.6'lık bir artış oluşmuştur ve TX-100 / GNP takviyesi ile beraber de absorplanan enerji, epoksi ile kıyaslandığında 2 katından daha fazla yükselmiştir. Darbe dayanımı da

absorplanan enerji ile aynı trendi göstermiştir. Saf epoksinin darbe dayanımı, 4.48 kJ/m^2 olarak ortaya çıkarken GNP takviyesi ile epoksinin darbe dayanımı %65,63 yükselirken TX-100 / GNP takviyesi sonucunda epoksinin darbe dayanımı %110,94 artmıştır.

KAYNAKLAR

Ankara, E. (2019) *Epoksi Reçine Nasıl Üretilir?*, *epoksiankara.com*.

ASTM D1763-00(2013), Standard Specification for Epoxy Resins, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org' (no date).

Atif, R., Shyha, I. ve Inam, F. (2016) 'Mechanical, thermal, and electrical properties of graphene-epoxy nanocomposites-A review', *Polymers*, 8(8). doi: 10.3390/polym8080281.

Balog, R. ve diğ. (2010) 'Bandgap opening in graphene induced by patterned hydrogen adsorption', *Nature Materials*, 9(4), pp. 315–319. doi: 10.1038/nmat2710.

BEDELOĞLU, A. ve TAŞ, M. (2016) 'Graphene And Its Production Methods', *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 16(3), pp. 544–554. doi: 10.5578/fmbd.32173.

Bhosale, S. B., Pawade, R. S. ve Brahmankar, P. K. (2014) 'Effect of process parameters on MRR, TWR and surface topography in ultrasonic machining of alumina–zirconia ceramic composite', *Ceramics International*, 40(8, Part B), pp. 12831–12836. doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.137.

Borand, G., Akçamlı, N. ve Uzunsoy, D. (2021) 'Structural characterization of graphene nanostructures produced via arc discharge method', *Ceramics International*. Elsevier Ltd, 47(6), pp. 8044–8052. doi: 10.1016/j.ceramint.2020.11.158.

Brunauer, S., Emmett, P. H. ve Teller, E. (1938) 'Adsorption of Gases in Multimolecular Layers', *Journal of the American Chemical Society*. American Chemical Society, 60(2), pp. 309–319. doi: 10.1021/ja01269a023.

Callister, W. D. (2001) 'Fundamentals of Materials Science and Engineering John Wiley & Sons', *Inc., New York, 524p*.

Carrasco, P. M. ve diğ. (2014) 'High-concentration aqueous dispersions of graphene produced by exfoliation of graphite using cellulose nanocrystals', *Carbon*, 70, pp. 157–163. doi: 10.1016/j.carbon.2013.12.086.

Cho, J., Boccaccini, A. R. ve Shaffer, M. S. P. (2009) 'Ceramic matrix composites containing carbon nanotubes', *Journal of Materials Science*, 44(8), pp. 1934–1951. doi: 10.1007/s10853-009-3262-9.

Cotul, U. ve diğ. (2018) 'Development of high purity, few-layer graphene synthesis by electric arc discharge technique', *Acta Physica Polonica A*, 134(1), pp. 289–291. doi: 10.12693/APhysPolA.134.289.

Dang, Z.-M. ve diğ. (2012) 'Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites', *Progress in Materials Science*, 57(4), pp. 660–723. doi: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.08.001.

DeGarmo, E. P. ve diğ. (1997) *Materials and process in manufacturing*. Prentice Hall Upper Saddle River.

Edwards, R. S. ve Coleman, K. S. (2013) 'Graphene synthesis: relationship to applications', *Nanoscale*. Royal Society of Chemistry, 5(1), pp. 38–51.

Egbo, M. K. (2020) 'A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering', *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. The Author, (xxxx). doi: 10.1016/j.jksues.2020.07.007.

Eqra, R. ve Moghim, M. H. (2016) 'Effect of strain rate on the fracture behaviour of epoxy-graphene nanocomposite', *Bulletin of Materials Science*, 39(5), pp. 1197–1204. doi: 10.1007/s12034-016-1257-0.

Geim, A. K. (2011) 'Nobel Lecture: Random walk to graphene', *Reviews of Modern Physics*. APS, 83(3), p. 851.

Geng, Y. ve diğ. (2008) 'Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier, 39(12), pp. 1876–1883.

Glerup, M. ve diğ. (2004) 'Synthesis of N-doped SWNT using the arc-discharge procedure', *Chemical Physics Letters*, 387(1), pp. 193–197. doi: https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.02.005.

Guo, W. ve Chen, G. (2014) 'Fabrication of graphene/epoxy resin composites with much enhanced thermal conductivity via ball milling technique', *Journal of Applied Polymer Science*. John Wiley & Sons, Ltd, 131(15). doi: https://doi.org/10.1002/app.40565.

Gurusideswar, S. ve Velmurugan, R. (2014) 'Strain rate sensitivity of glass/epoxy composites with nanofillers', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 60, pp. 468–478. doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.065.

Hári, J. ve Pukánszky, B. (2011) '8 - Nanocomposites: Preparation, Structure, and Properties', in Kutz, M. B. T.-A. P. E. H. (ed.) *Plastics Design Library*. Oxford: William Andrew Publishing, pp. 109–142. doi: https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10008-X.

Irez, A. B., Bayraktar, E. ve Miskioglu, I. (2019) 'Devulcanized Rubber Based Composite Design Reinforced with Nano Silica, Graphene Nano Platelets (GnPs) and Epoxy for ``Aircraft Wing Spar'' to Withstand Bending Moment', in Thakre, P. R., Singh, R. P., and Slipher, G. (eds) *Mechanics of Composite, Hybrid and Multifunctional Materials, Volume 5*. Cham: Springer International Publishing, pp. 9–22.

Jang, J. I. (2013) *New developments in photon and materials research*. Nova Publishers.

Jin, F.-L., Li, X. ve Park, S.-J. (2015) 'Synthesis and application of epoxy resins: A review', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, pp. 1–11. doi: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026.

Jordan, J. ve diğ. (2005) 'Experimental trends in polymer nanocomposites - A review', *Materials Science and Engineering A*, 393(1–2), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.msea.2004.09.044.

Kaykılarlı, C. ve diğ. (2020) 'Boron and nitrogen doping in graphene: an experimental and density functional theory (DFT) study', *Nano Express*, 1(1), p. 010027. doi: 10.1088/2632-959x/ab89e9.

Kessler, M. R. (2012) 'Polymer matrix composites: A perspective for a special issue of polymer reviews', *Polymer Reviews*, 52(3–4), pp. 229–233. doi: 10.1080/15583724.2012.708004.

Kösedağ, E. ve Ekici, R. (2019) 'PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN DARBE DAVRANIŞLARI ÜZERİNE BİR DERLEME', *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Merkez Yerleşke, Niğde: Ömer Halisdemir Üniversitesi, pp. 384–393. doi: 10.28948/ngumuh.517147.

Kudin, K. N. ve diğ. (2008) 'Raman spectra of graphite oxide and functionalized graphene sheets', *Nano Letters*, 8(1), pp. 36–41. doi: 10.1021/nl071822y.

Kuilla, T. ve diğ. (2010) 'Recent advances in graphene based polymer composites', *Progress in Polymer Science*, 35(11), pp. 1350–1375. doi: https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.07.005.

Li, Q. ve diğ. (2014) 'An improved understanding of the dispersion of multi-walled carbon nanotubes in non-aqueous solvents', *Journal of nanoparticle research*. Springer, 16(7), pp. 1–12.

Li, X. ve diğ. (2009) 'Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils', *science*. American Association for the Advancement of Science, 324(5932), pp. 1312–1314.

Liang, F. ve diğ. (2012) 'Selective preparation of polyhedral graphite particles and multi-wall carbon nanotubes by a transferred arc under atmospheric pressure', *Diamond and Related Materials*, 30, pp. 70–76. doi: https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.09.004.

Mittal, V. (2015) '2 - Nanocomposites with engineering polymers: A review', in Mittal, V. B. T.-M. of N. with E. P. (ed.). Woodhead Publishing, pp. 15–29. doi: https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-308-9.00002-1.

Ni, Z. ve diğ. (2008) 'Raman spectroscopy and imaging of graphene', *Nano Research*. Springer, 1(4), pp. 273–291.

Osumi, Y. (1987) 'One-Part Epoxy Resin', *Three Bond Technical News*, 19(1), pp. 1–10.

Öztop, B. ve Gürbüz, M. (2017) 'Atık Alüminyumdan Elde Edilen Matrise Grafen Takviyesiyle Üretilen Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi', *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 1(1), pp. 4–8. Available at: http://dergipark.gov.tr/download/article-file/372832.

Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A. ve Young, R. J. (2017) 'Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites', *Progress in Materials Science*. The Authors, 90, pp. 75–127. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.07.004.

Poutrel, Q. A. ve diğ. (2017) 'Effect of pre and Post-Dispersion on Electro-Thermo-Mechanical Properties of a Graphene Enhanced Epoxy', *Applied Composite Materials*. Applied Composite Materials, 24(2), pp. 313–336. doi: 10.1007/s10443-016-9541-0.

Prolongo, S. G. ve diğ. (2013) 'In situ processing of epoxy composites reinforced with graphene nanoplatelets', *Composites Science and Technology*, 86, pp. 185–191. doi: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.06.020.

Prolongo, S. G. ve diğ. (2014) 'Advantages and disadvantages of the addition of graphene nanoplatelets to epoxy resins', *European Polymer Journal*. Elsevier Ltd, 61, pp. 206–214. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2014.09.022.

Pullicino, E. (2019) *The Effect of Graphene Nanoplatelets on the Mechanical Properties and Electrical Conductivity of Epoxy Resin Nanocomposites*.

Qamar, S. ve diğ. (2019) 'Preparation of stable dispersion of graphene using copolymers: dispersity and aromaticity analysis', *Soft Materials*. Taylor & Francis, 17(2), pp. 190–202. doi: 10.1080/1539445X.2019.1583673.

Rajak, D. K. ve diğ. (2019) 'Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials', *Journal of Materials Research and Technology*. Korea Institute of Oriental Medicine, 8(6), pp. 6354–6374. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.068.

Rana, S., Alagirusamy, R. ve Joshi, M. (2010) 'Mechanical behavior of carbon nanofibre-reinforced epoxy composites', *Journal of applied polymer science*. Wiley Online Library, 118(4), pp. 2276–2283.

Rastogi, R. ve diğ. (2008) 'Comparative study of carbon nanotube dispersion using surfactants', *Journal of Colloid and Interface Science*, 328(2), pp. 421–428. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.015.

Ray, B. C. (2006) 'Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites', *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(1), pp. 111–117. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.12.023.

Rayat, M. S. ve diğ. (2017) 'Fabrication and machining of ceramic composites — A review on current scenario', *Materials and Manufacturing Processes*. Taylor & Francis, 32(13), pp. 1451–1474. doi: 10.1080/10426914.2017.1279301.

Rosso, M. (2006) 'Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties', *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1), pp. 364–375. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038.

Saha, M. ve diğ. (2015) 'Effect of non-ionic surfactant assisted modification of hexagonal boron nitride nanoplatelets on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites', *Composite Interfaces*. Taylor & Francis, 22(7), pp. 611–627.

Sang, M. ve diğ. (2019) 'Electronic and Thermal Properties of Graphene and Recent Advances in Graphene Based Electronics Applications', *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*. MDPI, 9(3), p. 374. doi: 10.3390/nano9030374.

Schwartz, S. S. ve Goodman, S. H. (1982) *plastics Materials and processes*.

Seong, M. ve Kim, D. S. (2015) 'Effects of facile amine-functionalization on the physical properties of epoxy/graphene nanoplatelets nanocomposites', *Journal of Applied Polymer Science*, 132(28), pp. 1–7. doi: 10.1002/app.42269.

Shadlou, S., Ahmadi-Moghadam, B. ve Taheri, F. (2014) 'The effect of strain-rate on the tensile and compressive behavior of graphene reinforced epoxy/nanocomposites', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 59, pp. 439–477. doi: 10.1016/j.matdes.2014.03.020.

Shen, X.-J. ve diğ. (2012) 'The reinforcing effect of graphene nanosheets on the cryogenic mechanical properties of epoxy resins', *Composites Science and Technology*, 72(13), pp. 1581–1587. doi: https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.06.021.

Singh, S. (2020) '3D Printing of polymer composites : A short review', (May 2019), pp. 1–13. doi: 10.1002/mdp2.97.

Stankovich, S. ve diğ. (2007) 'Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide', *carbon*. Elsevier, 45(7), pp. 1558–1565.

Sumdani, M. G., Islam, M. R. ve Yahaya, A. N. A. (2019) 'The effects of anionic surfactant on the mechanical, thermal, structure and morphological properties of epoxy–MWCNT composites', *Polymer Bulletin*, 76(11), pp. 5919–5938. doi: 10.1007/s00289-019-02695-1.

Tian, Y. ve diğ. (2016) 'High strain rate compression of epoxy based nanocomposites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, pp. 62–70. doi: 10.1016/j.compositesa.2016.06.008.

Tiyek, İ. ve diğ. (2016) 'Kimyasal yöntem ile indirgenmiş grafen oksit sentezi ve karakterizasyonu', *Sakarya University Journal of Science*, 20(2), pp. 349–357.

Veerakumar, V. G. S. ve diğ. (2021) 'The Influence of Graphene Nanoplatelets on the Tensile and Impact Behavior of Glass-Fiber-Reinforced Polymer Composites', *Journal of Materials Engineering and Performance*. Springer US, 30(1), pp. 596–609. doi: 10.1007/s11665-020-05335-2.

Wan, Y.-J. ve diğ. (2013) 'Improved dispersion and interface in the graphene/epoxy composites via a facile surfactant-assisted process', *Composites science and technology*. Elsevier, 82, pp. 60–68.

Wang, X., Jin, J. ve Song, M. (2013) 'An investigation of the mechanism of graphene toughening epoxy', *Carbon*. Elsevier Ltd, 65, pp. 324–333. doi: 10.1016/j.carbon.2013.08.032.

Wong, D. W. Y. ve diğ. (2010) 'Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Elsevier Ltd, 41(6), pp. 759–767. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.02.008.

Wu, Y. ve diğ. (2010) 'Efficient and large-scale synthesis of few-layered graphene using an arc-discharge method and conductivity studies of the resulting films', *Nano Research*, 3(9), pp. 661–669. doi: 10.1007/s12274-010-0027-3.

Wu, Y. ve diğ. (2017) 'The reinforcing effect of polydopamine functionalized graphene nanoplatelets on the mechanical properties of epoxy resins at cryogenic temperature', *Polymer Testing*, 58, pp. 262–269. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.12.021.

Xiang, Q. ve Xiao, F. (2020) 'Applications of epoxy materials in pavement engineering', *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 235, p. 117529. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117529.

Xu, Y., Chung, D. D. L. ve Mroz, C. (2001) 'Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(12), pp. 1749–1757. doi: https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00023-9.

Yamaguchi, T., Bandow, S. ve Iijima, S. (2004) 'Synthesis of carbon nanohorn particles by simple pulsed arc discharge ignited between pre-heated carbon rods', *Chemical Physics Letters*, 389(1), pp. 181–185. doi: https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.03.068.

Zakaria, M. R. ve diğ. (2016) 'Compressive properties and thermal stability of hybrid carbon nanotube-alumina filled epoxy nanocomposites', *Composites Part B: Engineering*. Elsevier, 91, pp. 235–242.

Zamanian, M. ve diğ. (2013) 'Fracture toughness of epoxy polymer modified with nanosilica particles: Particle size effect', *Engineering Fracture Mechanics*, 97(1), pp. 193–206. doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.10.027.

Zhang, D. ve diğ. (2019) 'Controllable synthesis of carbon nanomaterials by direct current arc discharge from the inner wall of the chamber', *Carbon*. Elsevier Ltd, 142, pp. 278–284. doi: 10.1016/j.carbon.2018.10.062.

Zhang, G. ve diğ. (2016) 'Effect of functionalization of graphene nanoplatelets on the mechanical and thermal properties of silicone rubber composites', *Materials*, 9(2). doi: 10.3390/ma9020092.

Zhang, H.-B. ve diğ. (2011) 'Vacuum-assisted synthesis of graphene from thermal exfoliation and reduction of graphite oxide', *Journal of Materials Chemistry*. Royal Society of Chemistry, 21(14), pp. 5392–5397.

Zhang, Q. ve diğ. (2017) 'Mechanically robust and electrically conductive graphene-paper/glass-fibers/epoxy composites for stimuli-responsive sensors and Joule heating deicers', *Carbon*. Elsevier Ltd, 124, pp. 296–307. doi: 10.1016/j.carbon.2017.09.001.

Zheng, W. ve Wong, S.-C. (2003) 'Electrical conductivity and dielectric properties of PMMA/expanded graphite composites', *Composites Science and Technology*, 63(2), pp. 225–235. doi: https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00201-4.

ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ VESİKALIK FOTOĞRAF

Ad-Soyad **: Özberk ÖZTÜRK**

Doğum Tarihi ve Yeri **:**

E-posta **:**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2018, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (İngilizce)