



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**PARÇACIK VE FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

Furkan YENİLMEZ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlven MUTLU**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Doktora Programı**

Mart, 2025

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan YENİLMEZ tarafından, **Prof. Dr. İlven MUTLU** danışmanlığında hazırlanan "**PARÇACIK VE FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **14/03/2025** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

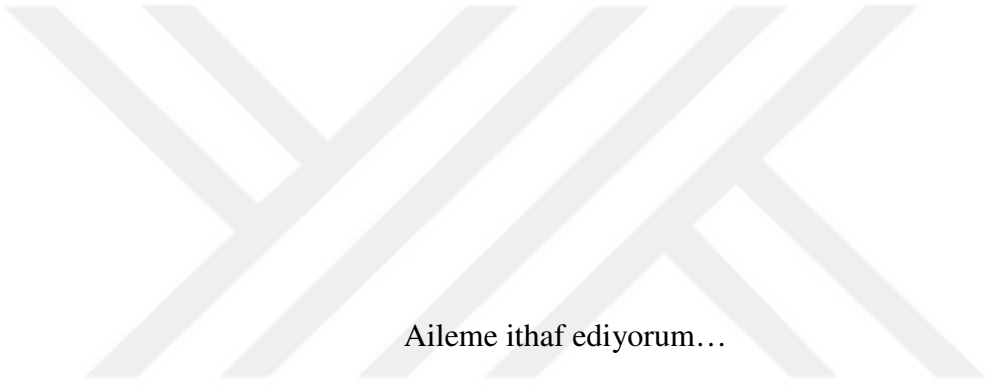
Tez Jürisi

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Furkan YENİLMEZ

(İmza)



Aileme ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

PARÇACIK VE FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon

Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 35626

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca akademik kariyer hedeflerime olan çabalarımda beni sürekli motive eden, maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen ve her zaman sabırla yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mart 2025

Furkan YENİLMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	2
2.1. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	2
2.2. KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.3. ANTİKOROZİF KAPLAMALAR.....	11
2.4. KENDİ KENDİNİ ONARAN MALZEMELER.....	13
2.5. VİSKOELASTİKLİK.....	15
2.6. LİTERATÜR TARAMASI	21
3. YÖNTEM	28
3.1. KOMPOZİT ÜRETİMİ	28
3.2. KARAKTERİZASYON	43
3.3. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ.....	55
4. BULGULAR	56
4.1. MİKROYAPI.....	56
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER	69
4.3. MİKRODALGA ABSORBLAMA SONUÇLARI	81
4.4. KOROZYON SONUÇLARI	83
4.5. KENDİ KENDİNİ ONARMA SONUÇLARI.....	86

4.6. HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ SONUÇLARI.....	89
5. TARTIŞMA.....	101
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR.....	111
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	114
ETİK KURUL İZİN YAZISI	115
KURUM İZNİ YAZILARI.....	116
ÖZGEÇMİŞ	117



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Rüzgar türbini çalışma prensibi.....	2
Şekil 2.2 Rüzgar türbünü komponentleri.....	3
Şekil 2.3. Yatay eksenli türbin (HAWT) ve dikey rüzgar türbini [1].....	4
Şekil 2.4. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatçık tipleri [1].....	4
Şekil 2.5. Tek destekli ve iki destekli rüzgar türbini kanatçığının imalatı.....	5
Şekil 2.6. Türbin kanatçığının kesiti	6
Şekil 2.7. Kompozit malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması	7
Şekil 2.8. Takviye türüne göre kompozit malzeme çeşitleri.....	8
Şekil 2.9. Fiber türüne göre kompozit malzeme çeşitleri.....	8
Şekil 2.10. Kompozit malzemelerde elastisite modülü hesabı.....	9
Şekil 2.11. Termoset reçinenin kürlenme mekanizması aşamaları	10
Şekil 2.12. İki boyutlu malzemeler	11
Şekil 2.13. h-BN kristal yapısı	12
Şekil 2.14. Kaplamanın korozyon önlemede bariyer etkisi	12
Şekil 2.15. Mikro kapsül tekniği ile kendi kendini onarma mekanizması	13
Şekil 2.16. İçi boş fiber tekniği ile kendi kendini onarma mekanizması	15
Şekil 2.17. a) Maxwell ve Kelvin elementleri ve b) sürünme davranışı.....	15
Şekil 2.18. Dört-elementli viskoelastik model.....	16
Şekil 2.19. Sürünme-gevşeme davranışının incelenmesinde kullanılan modeller.....	16
Şekil 2.20. Dinamik mekanik analiz ve osilasyon.....	17
Şekil 2.21. a) Elastik, b) viskoz, c) viskoelastik, d) elastik sabitler ve faz açısı	18
Şekil 2.22. Şematik bir idealize edilmiş DMA taraması.....	19
Şekil 2.23. Tg değerine göre çalışma aralığı a) epoksi, b) PP.....	20
Şekil 3.1. Üretilen malzemelerin hedeflerine göre sınıflandırılması.....	28
Şekil 3.2. Epoksi sentezi.....	29
Şekil 3.3. Homojenizatör.....	30
Şekil 3.4. Damlacık esaslı kendini-kendini onaran kompozit üretimi	31

Şekil 3.5. BPO parçalanması, MMA polimerizasyonu ve hidrokinon.....	32
Şekil 3.6. Damlacık (mikrokapsül) esaslı kendini-kendini onarma mekanizması.....	33
Şekil 3.7. Dönüşüm toklaşması esaslı kendini-kendini onarma mekanizması.....	34
Şekil 1.8: Bilyeli değirmen.....	35
Şekil 3.9. Amaçlanan radar absorban malzeme mekanizması.....	35
Şekil 3.10. Amaçlanan radar absorban malzeme yapısı	37
Şekil 1.11: Stereolitografi cihazı	38
Şekil 1.12: Replika tekniği aşamaları.....	38
Şekil 1.13: h-BN katkısının korozyona etkisi.....	40
Şekil 3.14: Sentetik fiberler a) karbon fiber, b) cam fiber.....	41
Şekil 1.15: Kenevir yapısı.....	42
Şekil 3.16: Mekanik testler a) Sertlik, b) çekme cihazları.....	43
Şekil 3.17: Düşen ağırlık darbe cihazı.....	44
Şekil 1.18: Ultrasonik muayene cihazı.....	45
Şekil 3.19: Girdap (eddy) akımları cihazı.....	45
Şekil 1.20 Termal kamera.....	47
Şekil 3.21: Kendi-kendini onaran numune ölçüleri.....	47
Şekil 1.22 Gaussmetre.....	48
Şekil 1.23 VNA cihazı.....	49
Şekil 1.24 VNA cihazı çalışma prensibi.....	50
Şekil 1.25 Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi.....	49
Şekil 3.26. EIS verilerinin yorumu için kullanılan eşdeğer elektrik devre modeli.....	52
Şekil 3.27. Alternatif eşdeğer elektrik devre modelleri.....	53
Şekil 3.28: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Cihazı	54
Şekil 4.1 Karbon nano tüp SEM fotoğrafları.....	56
Şekil 1.2 PMMA tozu SEM fotoğrafları.....	57
Şekil 4.3: Metal tozları SEM fotoğrafları a) Fe-Ni-Co, b) Fe-Mn-Si.....	58
Şekil 4.4: hBN tozu SEM fotoğrafı ve XRD grafiği.....	59
Şekil 4.5: PMMA/MMMA ve BPO katkılı numunenin SEM fotoğrafı.....	60
Şekil 4.6: PMMA/MMMA ve BPO katkılı numunenin optik mikroskop fotoğrafları.....	60
Şekil 4.6: Kompozitlerin SEM fotoğrafları a) FeMnSi katkılı, b) FeNiCo katkılı.....	61
Şekil 4.7: Kompozitlerin optik mikroskop fotoğrafları a) FeMnSi, b) FeNiCo katkılı.....	61
Şekil 4.8: CNT ve FeMnSi tozu katkılı radar absorban malzeme.....	60

Şekil 4.10. FeMnSi ve CNT katkılı kompozitin optik mikroskop fotoğrafı.....	61
Şekil 4.11: Farklı oranlarda CNT içeren kompozitler a) % 1, b) % 2, c) % 3.....	62
Şekil 4.12: h-BN katkılı antikoroziyon kompozit SEM fotoğrafları.....	65
Şekil 4.13: h-BN katkılı antikoroziyon kompozit optik mikroskop fotoğrafı.....	65
Şekil 4.14: Sentetik fiberli numunelerin SEM görüntüleri a) karbon fiber, b) cam fiber.....	66
Şekil 4.15: Sentetik fiberli numunelerin optik fotoğrafları a) karbon fiber, b) cam fiber.....	66
Şekil 4.16: Doğal fiber (kenevir) katkılı numunelerin optik mikroskop fotoğrafları.....	67
Şekil 4.17. Prototip üretimi aşamaları.....	67
Şekil 4.23. Kendi-kendini onaran malzemenin termal kamera görüntüleri (çentik).....	86
Şekil 4.24. Kendi-kendini onarma optik mikroskop görüntüleri (çentik).....	87
Şekil 4.25. Kendi-kendini onarma optik mikroskop görüntüleri (yüzeysel çizik).....	87
Şekil 4.26. Vickers izi (a) 0 saat, b) 24 saat, c) 48 saat.....	88
Şekil 4.27. Şekil bellekli tozların kristal yapıları a) FeMnSi, b) FeNiCo.....	90
Şekil 4.28. Şekil bellekli tozların band yapıları a) FeMnSi, b) FeNiCo.....	91
Şekil 4.29. Epoksi yapısı a) DGEBA, b) DETA.....	92
Şekil 4.30. MMA ve PMMA yapıları	93
Şekil 4.31. Tek duvarlı karbon nanotüp yapıları	94
Şekil 4.32. h-BN yapısı	95
Şekil 4.33. Grafen yapısı	96
Şekil 4.34. Yüzeyler a) epoksi, b) karbon nanotüp, c) h-BN, d) FeMnSi/FeNiCo tozu.....	97
Şekil 4.35. Katkılama a) MMA, b) h-BN, c) CNT, d) CNT-FeMnSi	98
Şekil 4.36. Tabakalı kompozitler a) Fe, b) CNT, c) hBN, d) Fe-CNT, e) MMA.....	99

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Antikorozif kompozit malzemeler.....	68
Tablo 4.2. Radar absorban kompozit malzemeler.....	69
Tablo 4.3. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitler.....	71
Tablo 4.4. Damlacık katkılı kendi-kendini onaran kompozitler.....	71
Tablo 4.5. Fiber katkılı kompozitler.....	71
Tablo 4.6. Antikorozif kompozit malzemelerin DMA sonuçları.....	75
Tablo 4.7. Radar absorban kompozit malzemelerin DMA sonuçları.....	76
Tablo 4.8. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitlerin DMA sonuçları.....	77
Tablo 4.9. Damlacık katkılı kendi-kendini onaran kompozitlerin DMA sonuçları.....	77
Tablo 4.10. Fiber katkılı kompozitlerin DMA sonuçları.....	77
Tablo 4.11. Antikorozif kompozit malzemeler.....	79
Tablo 4.12. Radar absorban kompozit malzemeler.....	77
Tablo 4.13. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitler.....	80
Tablo 4.14. Damlacık katkılı kendi-kendini onaran kompozitler.....	80
Tablo 4.15. Fiber katkılı kompozitler.....	80
Tablo 4.16. Radar absorban kompozit malzemelerin VNA sonuçları.....	82
Tablo 4.17. Antikorozif kompozit malzemelerin korozyon sonuçları.....	84
Tablo 4.18. Radar absorban kompozit malzemelerin korozyon sonuçları.....	85
Tablo 4.19. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitlerin korozyon sonuçları.....	85
Tablo 4.20. Antikorozif kompozitlerin hesaplanan elastisite modülleri.....	100
Tablo 4.21. Radar absorban kompozitlerin hesaplanan elastisite modülleri	100
Tablo 5.1. Antikorozif kompozitlerin teorik ve deneysel elastisite modülleri.....	105
Tablo 5.2. Radar absorban kompozitlerin teorik ve deneysel elastisite modülleri.....	105
Tablo 6.1. Katkı maddelerinin etkilerinin karşılaştırılması.....	109

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
----------	----------

C	: Celsius
---	-----------

Ω	: Ohm
----------	-------

Kısaltmalar	Açıklama
-------------	----------

BPO	: Benzoil Peroksit
-----	--------------------

CNT	: Karbon nano tüp
-----	-------------------

DMA	: Diferansiyel mekanik analiz
-----	-------------------------------

DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
-----	-------------------------------------

EIS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
-----	---

E'	: Depolama modülü
----	-------------------

E''	: Kayıp modülü
-----	----------------

E*	: Kompleks modül
----	------------------

Fe	: Demir
----	---------

IACS	: Uluslararası tavllanmış bakır standardı
------	---

PMMA	: Poli metil metakrilat
------	-------------------------

RAM	: Radar absorban malzeme
-----	--------------------------

MMA	: Metil metakrilat
-----	--------------------

GPa	: Giga Pascal
-----	---------------

VNA	: Vektör ağ analizörü
-----	-----------------------

ÖZET

DOKTORA TEZİ

PARÇACIK VE FİBER TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

FURKAN YENİLMEZ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman : Prof. Dr. İlven MUTLU Bir öğe seçin.

Bu tez çalışmasında, kendi kendini onarma kabiliyeti, radar (mikrodalga) absorban özelliği ve antikorozyon özellik gösteren parçacık ve fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen polimer matrisli kompozit malzemelerin havacılık ve özellikle rüzgar türbini kanatçığı üretimine yönelik olması amaçlanmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde öncelikle mikrokapsül tekniği esaslı yöntem kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak termoset esaslı epoksi kullanılmıştır. İyileştirme maddesi olarak metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) kullanılmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde ayrıca, şekil bellekli FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozların epoksi matris içerisine ilavesi ile faz dönüşüm toklaşması ile kendi kendini onaran kompozit malzeme üretilmiştir. Fe-Mn-Si ve Fe-Ni-Co esaslı tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Antikorozyon kaplama olarak hekzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı epoksi matrisli kaplamalar üretilmiş ve h-BN ilavesinin altlık metalin elektrokimyasal korozyon direncine etkileri araştırılmıştır. Radar absorban malzeme kapsamında Fe alaşımı toz ve karbon nanotüp ilaveli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve mikrodalga absorpsiyon özellikleri incelenmiştir. Fiber takviyesi olarak kırılmış ve örgülü cam fiber ve karbon fiber

kullanılmıştır. Ayrıca, doğal polimer kullanımı kapsamında takviye malzemesi olarak kırılmış ve örgülü kenevir ve matris malzemesi olarak epoksi esaslı numuneler üretilmiş ve çeşitli özellikleri incelenmiştir. Polimer matrisli kompozit numuneler el yatırma (döküm) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, replika tekniği ile metamalzeme esaslı malzemeler üretilmiştir. Replika tekniğinde, eklemeli imalat ile model üretilmiş ve aljinat kalıba döküm ile kompozit parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme davranışı, sertliği, elastisite modülü, enerji absorblama kapasitesi gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin iletkenlikleri tahribatsız girdap akımları (eddy current) testi ile araştırılmıştır. Ayrıca numuneler tahribatsız ultrasonik muayene ile incelenmiştir. Numunelerin mikrodalga absorpsiyon özellikleri VNA cihazı ile belirlenmiştir. Numunelerin antikorozyon özellikleri elektrokimyasal empedans spektroskopisi testi ile NaCl ortamında araştırılmıştır. |

Mart 2025 , |134| sayfa.

Anahtar kelimeler: | FeMnSi, FeNiCo, hBN, Kendi kendini onarma, epoksi, kompozit |

ABSTRACT

[Ph.D. THESIS]

[PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF PARTICLE AND FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIALS]

[FURKAN YENİLMEZ]

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Metalurgical and Materials Engineering

[Supervisor : Prof. Dr. İlven MUTLU]

[In this thesis production of particle and fiber reinforced polymer matrix composite materials with self healing properties, radar absorbtion properties and anticorrosive properties were carried out for aircraft and turbine wind blade applications. Thermoset based epoxy was used as a matrix material. Microcapsule method was selected for self healing material production. Methymetacrylathe (MMA) monomer abd benzoilperoxide (BPO) were used as a self healing agent. In addition, shape memory FeMnSi and FeNiCo based powders were added in order to produce transformation toughened self healing materials. FeMnSi and FeNiCo based powders were produced by mechanical alloying method. Hegzagonal boron nitride (h-BN) added epoxy matrix composites were produced for anticorrosive coating on the metal base. Radar absorbing materials were produced fom Fe alloy based powder added and carbon nanotube added epoxy matrix composites. Microwave absorbtion properties of the radar absorbing materials were investigated. Carbon fiber and glass fiber were used as a fiber reinforcement. Natural polymer based hemp fiber reinforced epoxy matrix based composites were produced and investigated. Poymer matrix composite materials were produced by using hand lay up method. In additon,

metamaterial based materials were produced by using replica method. Model was produced by additive manufacturing method and then composite was poured into alginate mould. Microstructure and mechanical properties of the materials were investigated. Electrical conduction of the composites were studied by eddy current device. In addition, composites were characterized by ultrasonic test. Microwave absorbtion properties of the specimens were studied by VNA (vector network analyser) device. Anticorrosive properties of the speciemens were studied by electrochemical impedance spectrpscopy (EIS) method. | |

March 2025, |134| pages.

Keywords: |FeMnSi, FeNiCo, hBN, self healing, epoxy, composite|



1. GİRİŞ

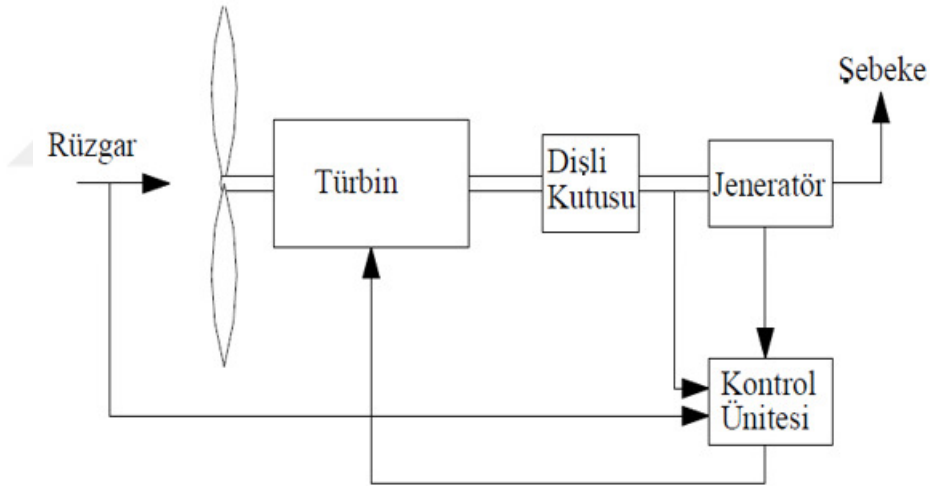
Bu tez çalışmasında, kendi kendini onarma kabiliyeti, radar absorban özelliği ve antikorozyon özellik gösteren parçacık ve fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen polimer matrisli kompozit malzemelerin havacılık ve özellikle rüzgar türbini kanatçığı üretimine yönelik olması amaçlanmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde öncelikle mikrokapsül tekniği esaslı yöntem kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak termoset esaslı epoksi kullanılmıştır. İyileştirme maddesi olarak metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) kullanılmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde ayrıca, şekil bellekli FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozların epoksi matris içerisine ilavesi ile faz dönüşüm toklaşması ile kendi kendini onaran kompozit malzeme üretilmiştir. FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Antikorozyon kaplama olarak hekzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı epoksi matrisli kaplamalar üretilmiş ve h-BN ilavesinin altlık metalin elektrokimyasal korozyon direncine etkileri araştırılmıştır. Radar absorban malzeme kapsamında Fe alaşımı toz ve karbon nanotüp ilaveli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve mikrodalga absorpsiyon özellikleri incelenmiştir. Fiber takviyesi olarak kırılmış ve örgülü cam fiber ve karbon fiber kullanılmıştır. Ayrıca, doğal polimer kullanımı kapsamında takviye malzemesi olarak kırılmış ve örgülü kenevir ve matris malzemesi olarak epoksi esaslı numuneler üretilmiş ve çeşitli özellikleri incelenmiştir. Polimer matrisli kompozit numuneler el yatırma (döküm) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, replika tekniği ile metamalzeme esaslı malzemeler üretilmiştir. Replika tekniğinde, eklemeli imalat ile model üretilmiş ve aljinat kalıba döküm ile kompozit parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Malzemelerin çekme davranışı, sertliği, elastisite modülü, enerji absorblama kapasitesi gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin iletkenlikleri tahribatsız girdap akımları (eddy current) testi ile araştırılmıştır. Ayrıca numuneler tahribatsız ultrasonik muayene ile incelenmiştir. Numunelerin mikrodalga absorpsiyon özellikleri VNA cihazı ile belirlenmiştir. Numunelerin antikorozyon özellikleri elektrokimyasal empedans spektroskopisi testi ile NaCl ortamında araştırılmıştır. |

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1 RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Genel olarak, rüzgarlarda bulunan kinetik enerjiyi insanların kullanabilmesi amacıyla elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklere rüzgar türbini denilmektedir. Rüzgar türbinleri yenilenebilir enerji açısından önem taşımaktadır.

Rüzgar türbinlerinde havanın kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti önem taşımaktadır. Genel olarak rüzgar türbinleri kule, kanatçıklar, dişli kutusu, rotor, jeneratör, kontrol ünitesi kısımlarından oluşmaktadır. Rotor kinetik enerjiyi (rüzgardan elde edilen) döme kinetik enerjisine dönüştürmektedir. Rotor ise mili vasıtası ile jeneratörü döndürmektedir.



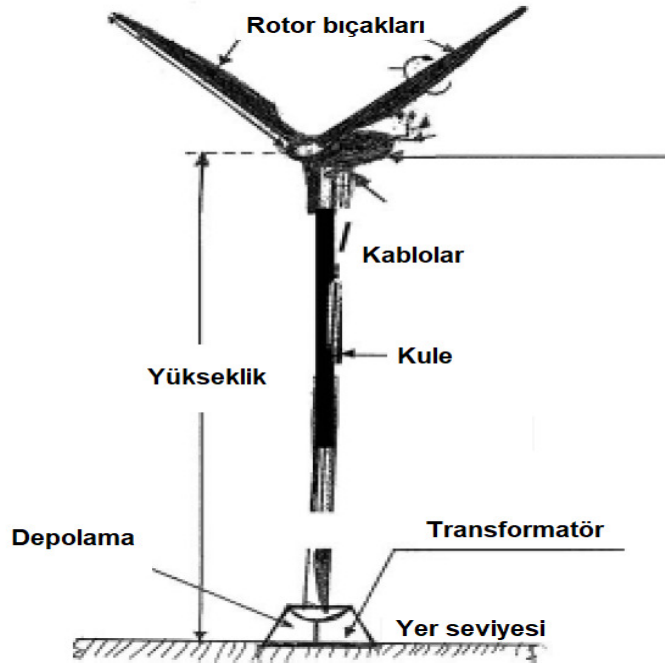
Şekil 2.1 Rüzgar türbini çalışma prensibi [5]

Rüzgâr türbinleri

- Yatay eksenli (rüzgar arkadan ve önden yatay olarak alınmaktadır).
- Eğik eksenli (türbin dönüş yönü ile rüzgar yönü arasında belirli bir açı bulunmaktadır, yaygın değildir)
- Dikey eksenli (rüzgar yönü türbin dönme yönüne diktir, her yönden rüzgar alabilmeleri avantaj sağlamaktadır).

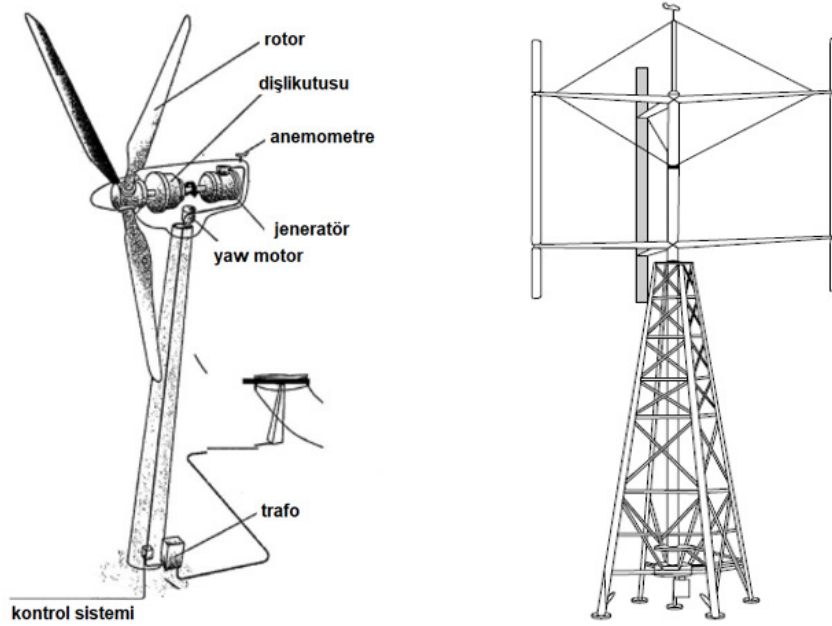
Rüzgar türbini belirli görevleri gerçekleştiren çeşitli kısımlardan oluşmaktadır. Aşağıdaki şekilde rüzgar türbini ve temel kısımları (komponentleri) görülmektedir.

- Anemometre rüzgar yönünü ve rüzgar hızını belirlemekte kullanılmaktadır
- Jeneratör, mekanik enerjiyi elektriğe dönüştürmekte kullanılmaktadır.
- Döndürme (yaw) motoru, rüzgar türbininin kanatlarını döndürmektedir.
- Transformatör (trafo), voltajı ayarlamakta kullanılmaktadır
- Dişli kutusu, pervane ve jeneratör arasında jeneratörün ihtiyacına göre gerekli devir sayısı uyumunu sağlamaktadır



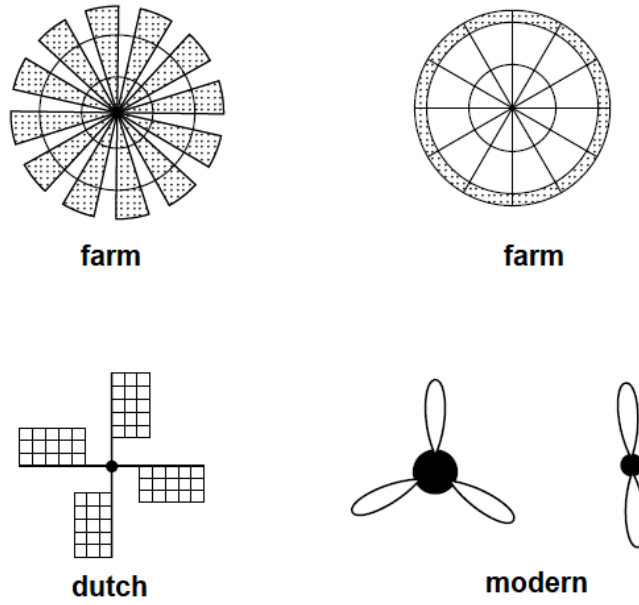
Şekil 2.2 Rüzgar türbünü komponentleri [1]

Aşağıdaki şekilde yatay eksenli rüzgar türbini ve dikey rüzgar türbini görülmektedir.

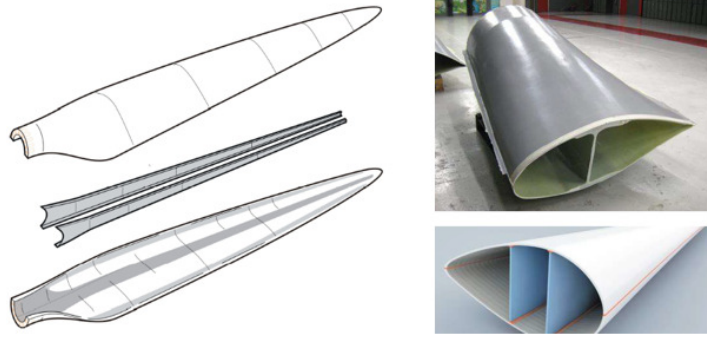


Şekil 2.3. Yatay eksenli türbin (HAWT) ve dikey rüzgar türbini [1]

Aşağıdaki şekilde rüzgar türbinlerinde kullanılan başlıca kanatçık tipleri görülmektedir.



Şekil 2.4. Rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatçık tipleri [1]

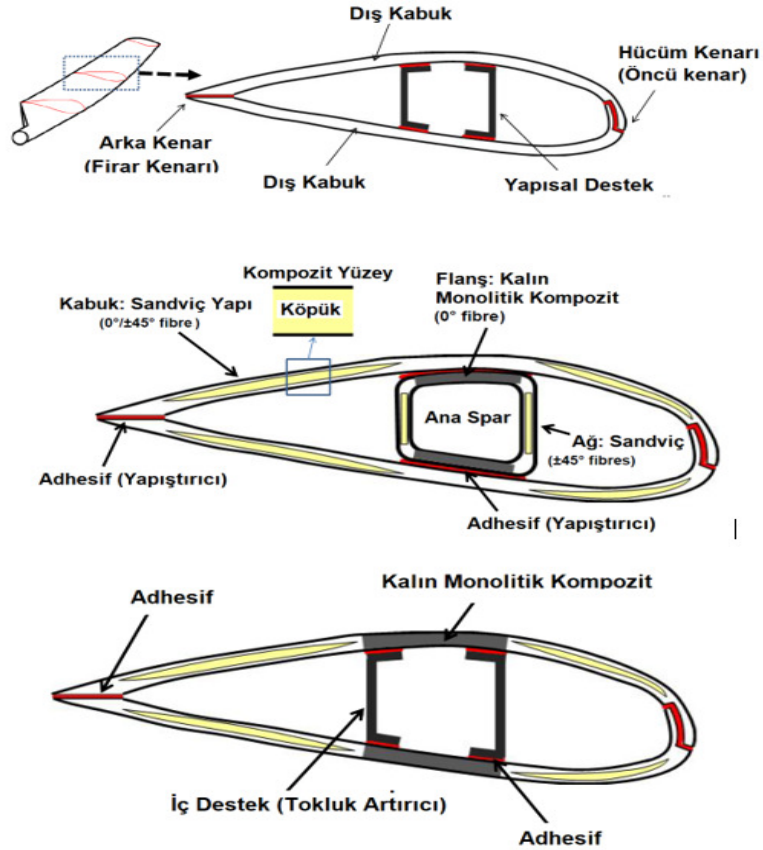


Şekil 2.5. Tek destekli ve iki destekli rüzgar türbini kanatçığının imalatı [4]

Türbin kanatçıkları üzerindeki temel kuvvetler

- Rüzgar (statik ve dinamik bileşenleri yer alır)
- Yer çekimi (kanatçık yatay ise eğilme temellidir)

Genel olarak bir rüzgar türbini kanatçığı hücum (öncü) kenarı (leading edge) ve arka (fırar) kenar (trailing edge) kısımlarından oluşmaktadır [2].



Şekil 2.6. Türbin kanatçığının kesiti [2]

Rüzgar türbini için temel yapısal tasarım kriterleri

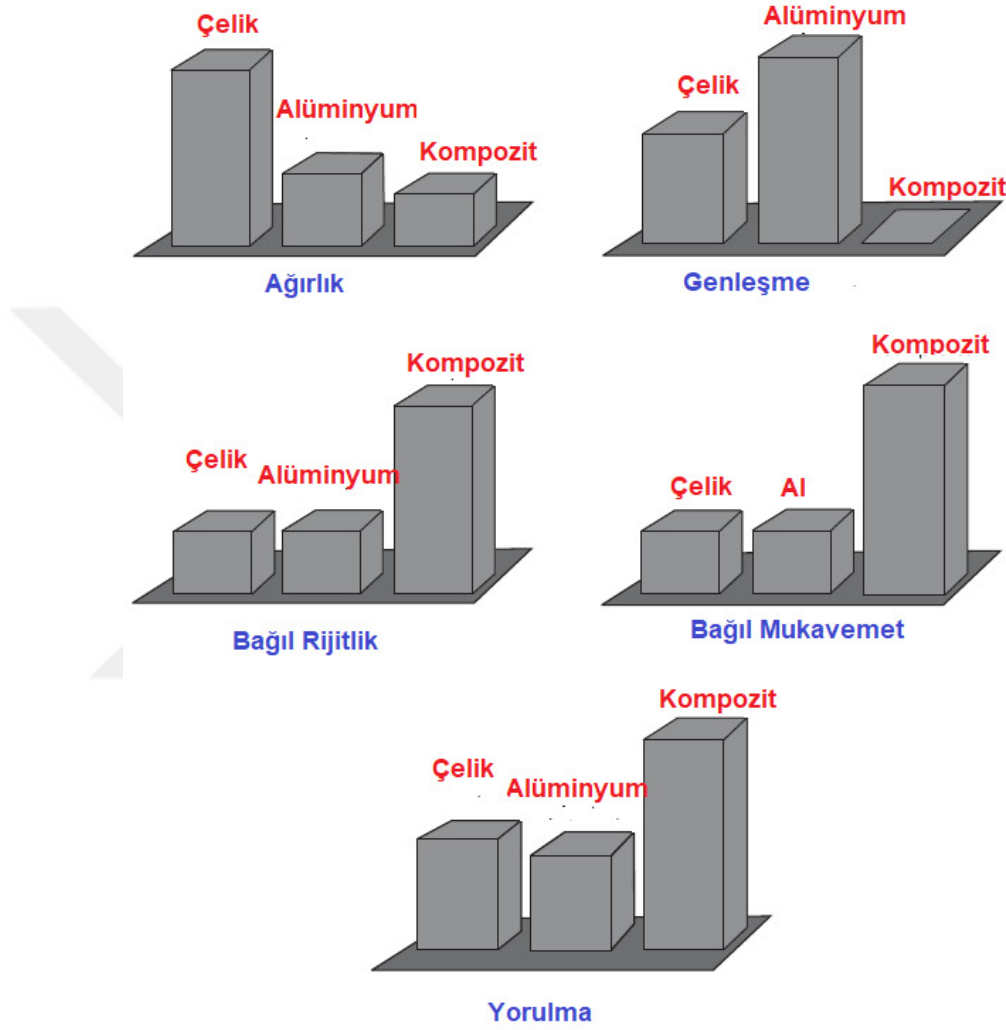
- Rüzgar türbini aşırı yüklemelere yeterli dayanıklılığa sahip olmalı
- Rüzgar türbini değişken yükleme koşullarına ve salınan yüklere karşı dayanıklı olmalı
- Rezonansı engellemek amacıyla rijit ve hafif olmalıdır
- Rüzgar türbininin çökmesini engellemek amacıyla yeterli rijitlik göstermelidir
- Yer çekimi kuvvetlerini azaltmak ve enerjinin birim maliyetini düşürmek amacıyla mümkün olduğu kadar hafif olmalıdır [2]

Rüzgar türbini için temel malzeme seçim kriterleri

- Yüksek akma mukavemeti
- Yüksek yorulma mukavemeti
- Yüksek rijitlik
- Düşük yoğunluk
- Enerjinin birim maliyetini düşürmek amacıyla mümkün olduğu kadar hafif olmalıdır [2]

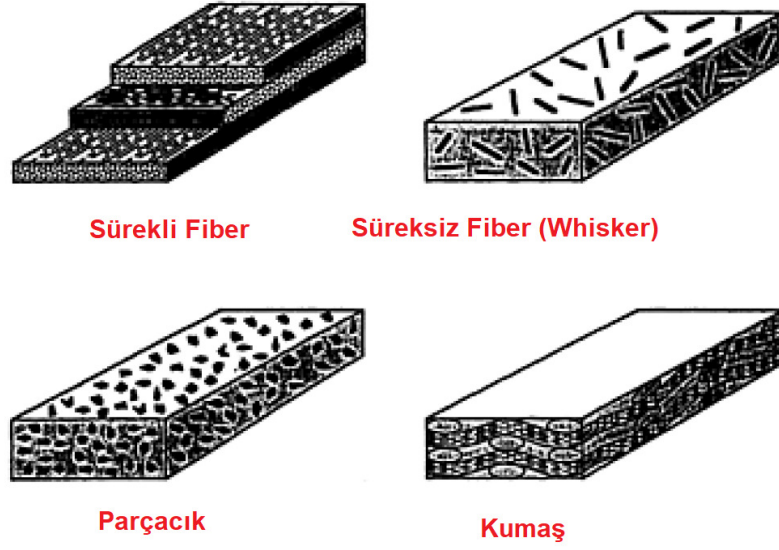
2.2 KOMPOZİT MALZEMELER

Aşağıdaki şekilde kompozit malzemelerin yoğunluk, termal genleşme katsayısı, spesifik (bağıl) rijitlik, spesifik (bağıl) mukavemet ve yorulma özelliklerinin çelik ve alüminyum ile karşılaştırılması görülmektedir.



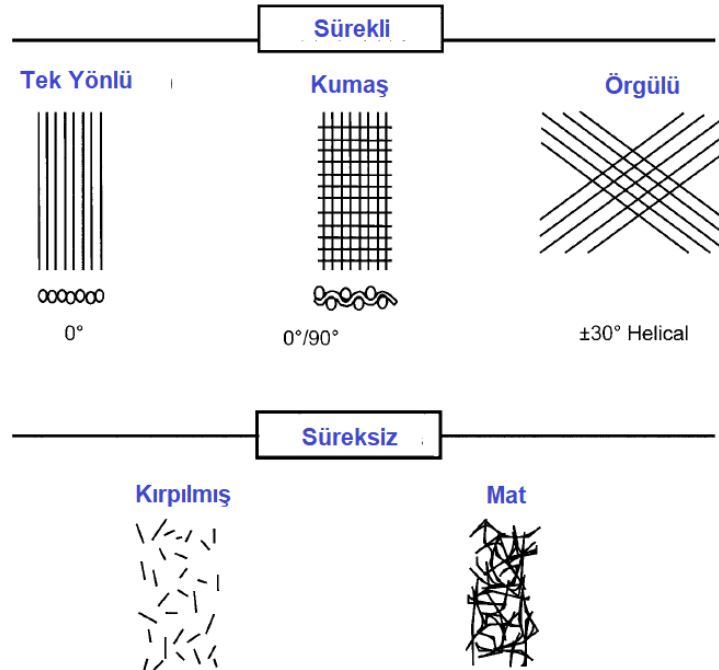
Şekil 2.7. Kompozit malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması [7]

Aşağıdaki şekilde matrise ilave edilen takviye türlerine göre kompozit malzeme çeşitleri görülmektedir.



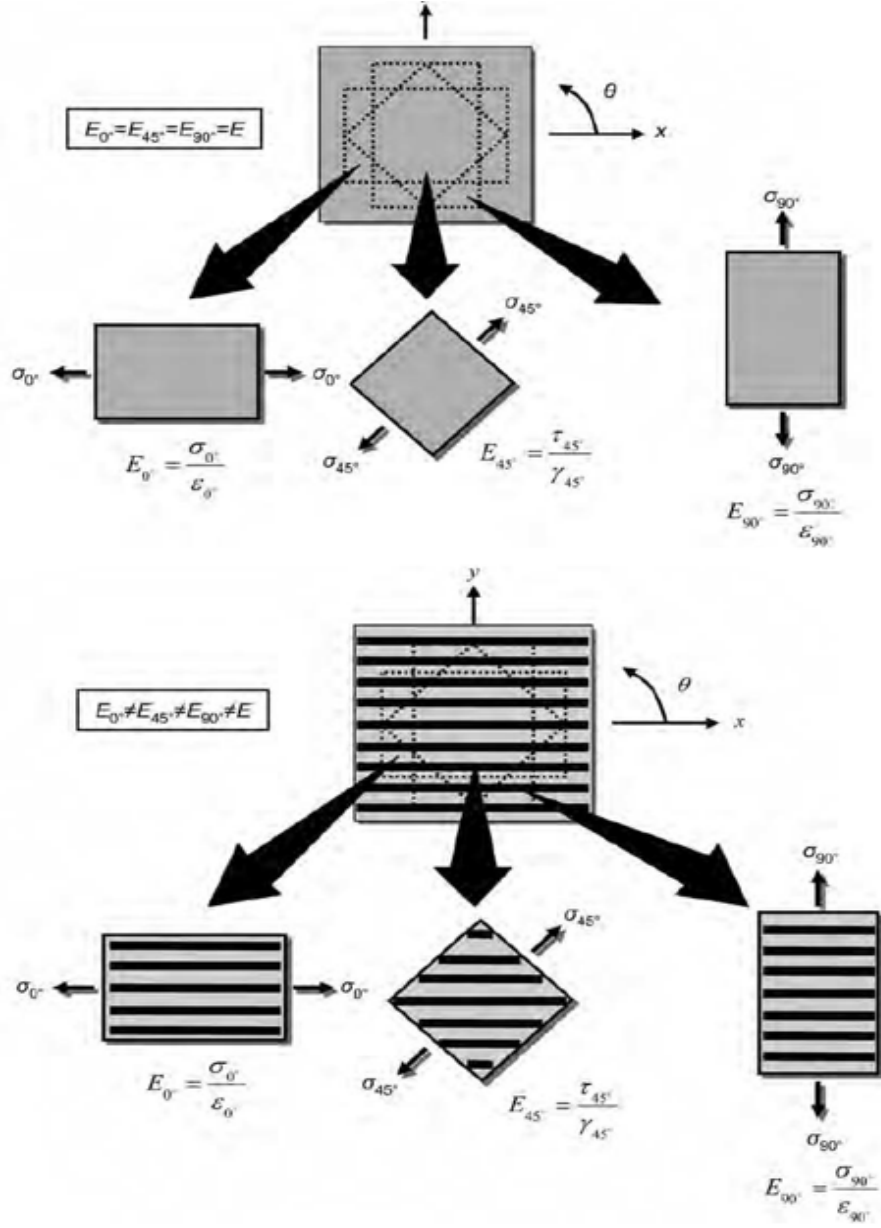
Şekil 2.8. Takviye türüne göre kompozit malzeme çeşitleri [9]

Aşağıdaki şekilde fiber türüne göre kompozit malzeme çeşitleri görülmektedir.



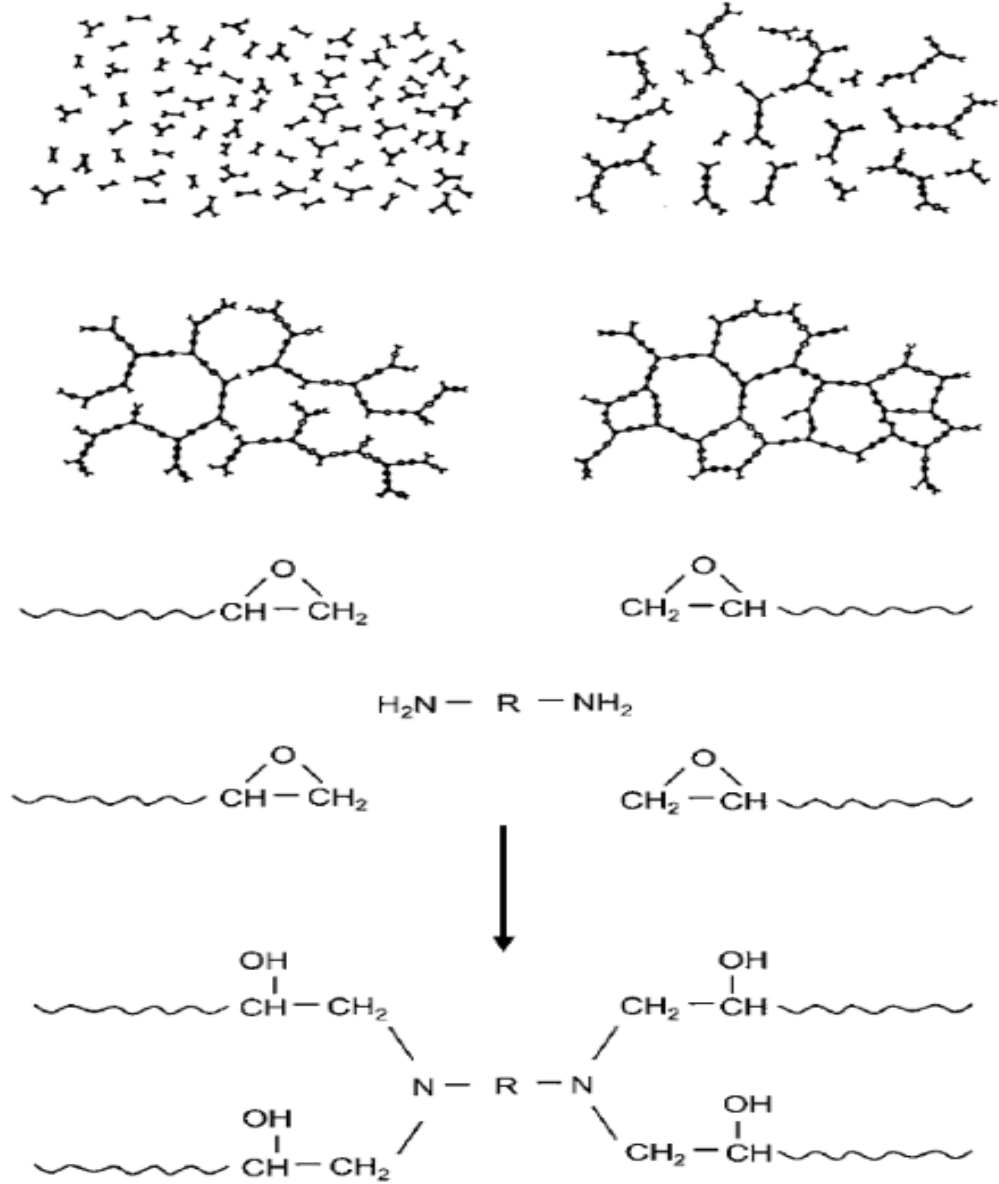
Şekil 2.9. Fiber türüne göre kompozit malzeme çeşitleri [8]

Aşağıdaki şekilde fiber yönelmesinin farklı olduğu çeşitli kompozit malzemelerde elastisite modülünün hesaplanmasının temelleri görülmektedir.



Şekil 2.10. Kompozit malzemelerde elastisite modülü hesabı [8]

Genel olarak polimer matrisli kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak genellikle termoset esaslı polimer malzemeler kullanılmaktadır. Termoset esaslı malzemeler oda sıcaklığında sıvı olmaları, düşük viskozite değerlerine sahip olmaları, yüksek ıslatma kabiliyetlerine sahip olmaları, ucuz olmaları gibi sebeplerden dolayı kompozit üretiminde matris malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Aşağıdaki şekilde termoset esaslı epoksi reçinenin kurlenme mekanizmasının temel aşamaları görülmektedir.

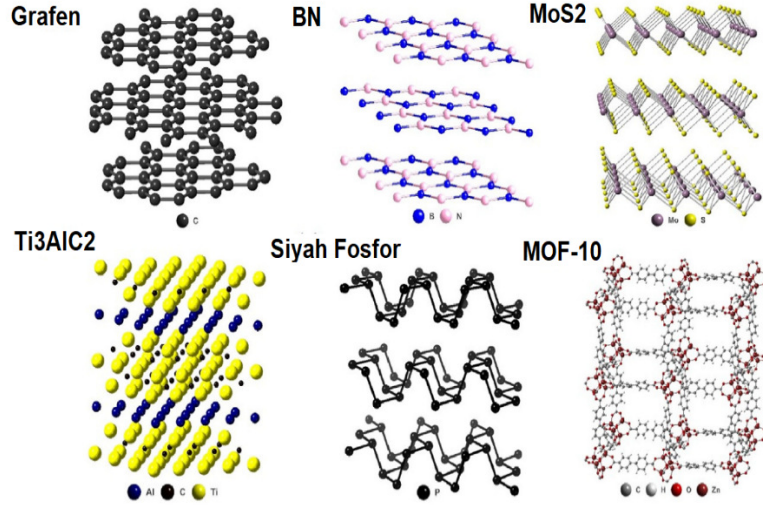


Şekil 2.11. Termoset reçinenin kurlenme mekanizması aşamaları [8]

2.3 ANTİKOROZİF KAPLAMALAR

İki-Boyutlu Malzemeler

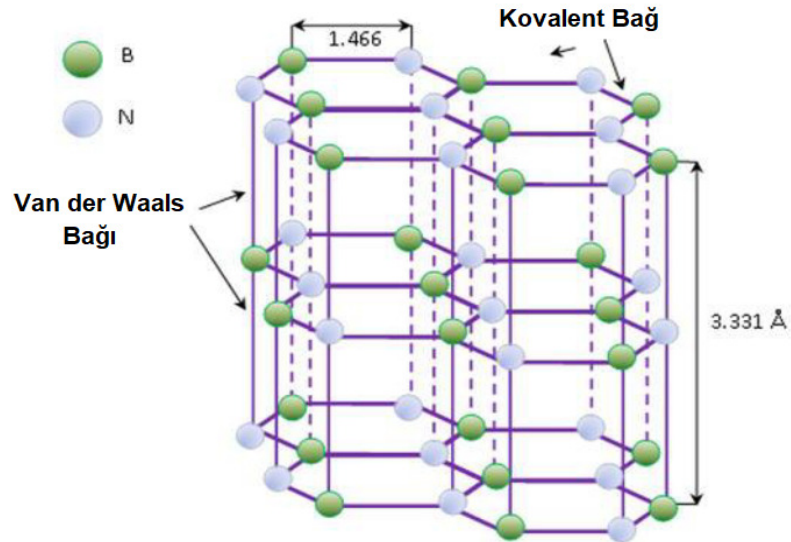
Aşağıdaki şekilde grafen, BN, MoS₂, Ti₃AlC₂, siyah fosfor ve MOF-10 gibi çeşitli iki-boyutlu malzemeler görülmektedir.



Şekil 2.12. İki boyutlu malzemeler [10]

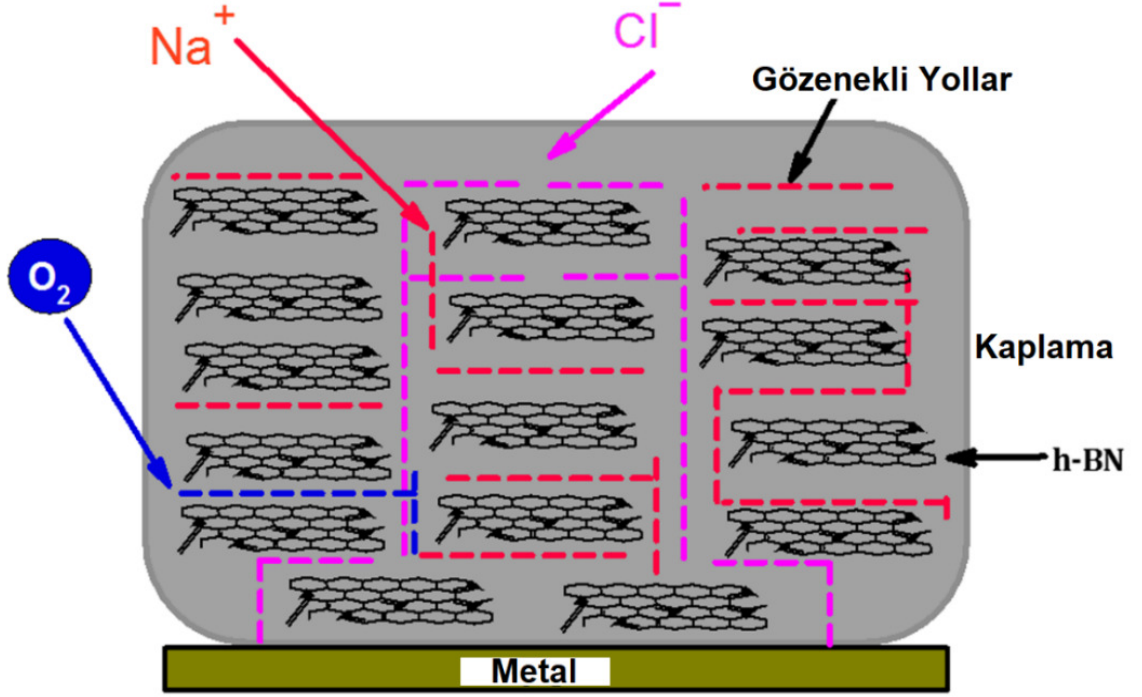
Hekzagonal Bor Nitrür (h-BN)

Aşağıdaki şekilde hegzagonal bor nitrür (h-BN) kristal yapısı görülmektedir. Görüldüğü gibi h-BN grafitte benzer bir yapıdadır.



Şekil 2.13. h-BN kristal yapısı [11]

Aşağıdaki şekilde h-BN katkısı içeren polimer matrisli kompozit kaplamanın metal altlığın korozyon direncini artırma (korozyon hızını azaltma) mekanizması görülmektedir. h-BN katkılı kaplama metal altlık malzemede korozyon önlemede bariyer etkisi ile metalin korozyon direncini arttırmakta ve korozyon hızını azaltmaktadır. Görüldüğü gibi artan katkı miktarı ile korozif sıvının (elektrolitin) metale ulaşması için gideceği yol uzamakta, korozyon direnci artmaktadır.

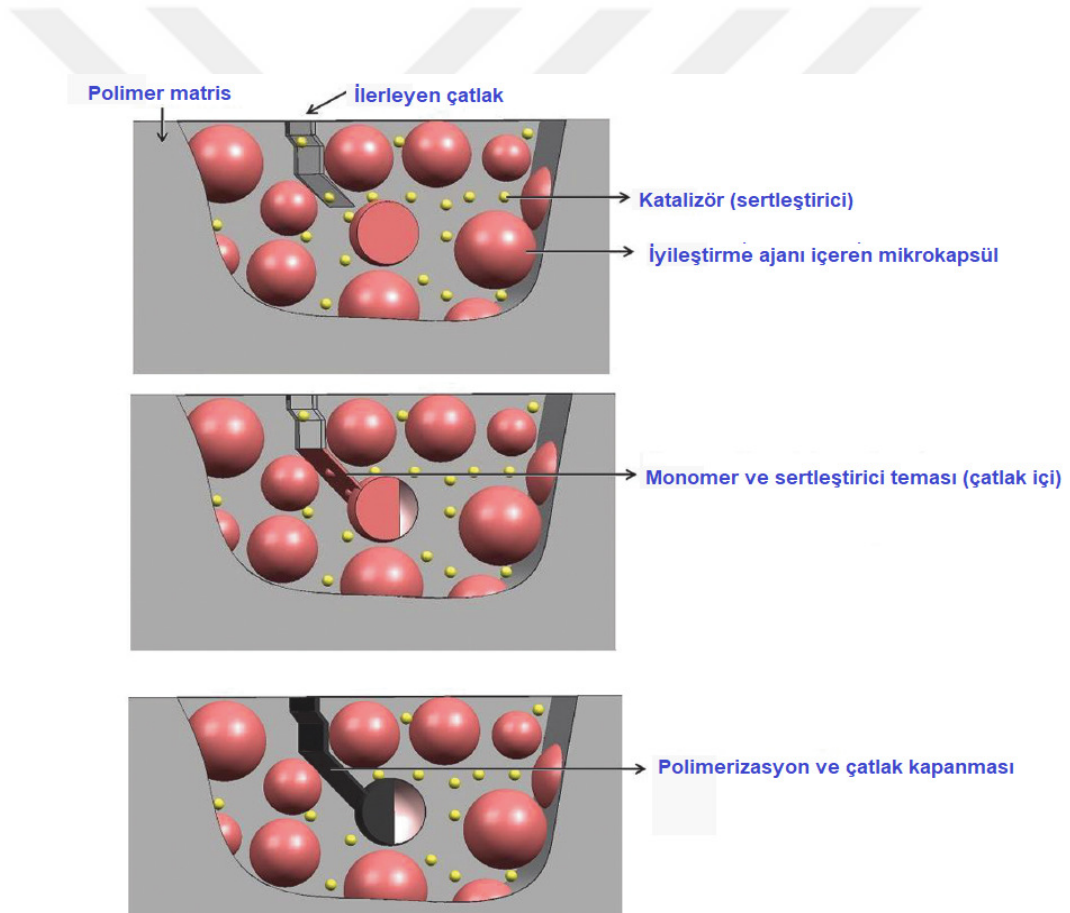


Şekil 2.14. Kaplamanın korozyon önlemede bariyer etkisi [12]

2.4 KENDİ-KENDİNİ ONARAN MALZEMELER

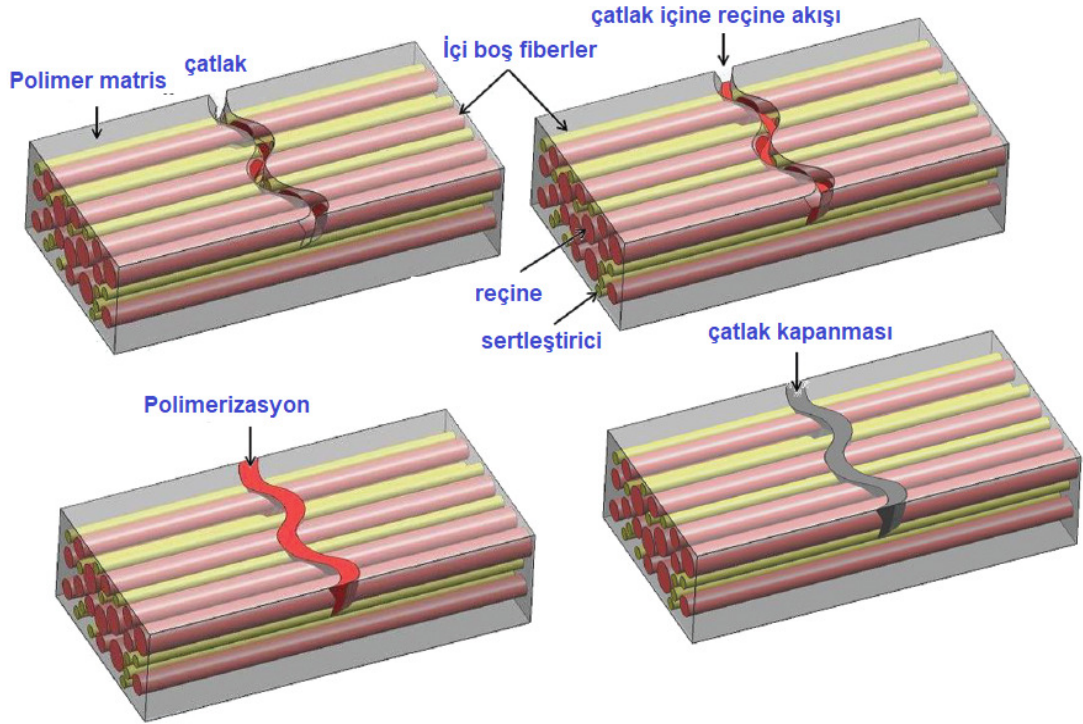
Mikrokapsül (Damlacık) Yöntemi

Aşağıdaki şekilde mikrokapsül (damlacık) tekniği ile kendi kendini onarma mekanizması şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi içinde sıvı monomer olan içi boş mikrokapsüller ve içinde sıvı sertleştirici (katalizör) olan damlacıklar bulunmaktadır. Malzemede bir çatlak oluşması durumunda ve çatlağın ilerlemesi durumunda mikrokapsüllerin içinde bulunan sıvı monomer ve sıvı sertleştirici çatlak içerisine akmakta, burada monomer ile katalizör arasında reaksiyon meydana gelmekte (katılaşma/sertleşme) ve çatlak kapanmaktadır (kendi kendini onarma).



Şekil 2.15. Mikro kapsül tekniği ile kendi kendini onarma mekanizması [14]

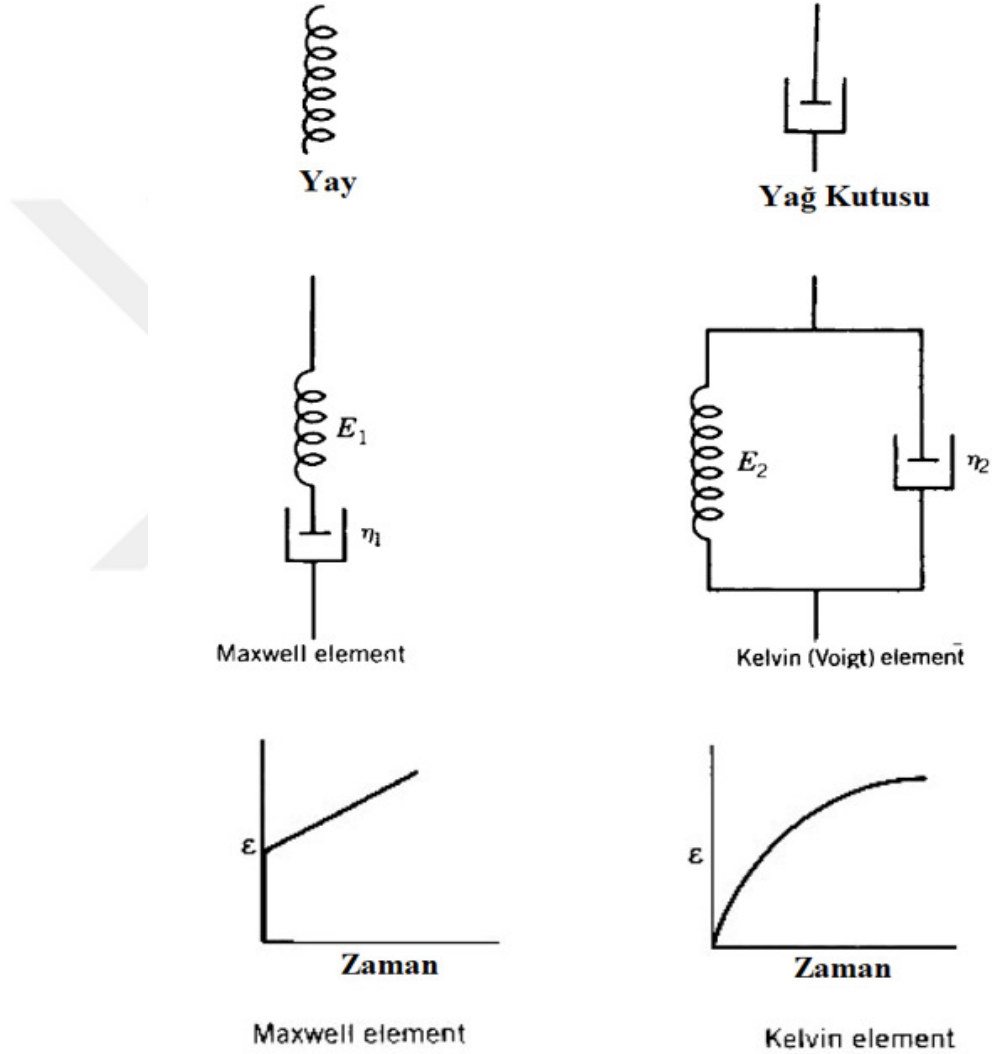
Aşağıdaki şekilde içi boş fiber tekniği ile kendi kendini onarma mekanizması şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi içinde sıvı reçine olan içi boş fiberler ve içinde sıvı sertleştirici (katalizör) olan içi boş fiberler bulunmaktadır. Malzemede bir çatlak oluşması durumunda ve çatlağın ilerlemesi durumunda fiberlerin içinde bulunan sıvı reçine ve sıvı sertleştirici çatlak içerisine akmakta, burada reçine ile katalizör arasında reaksiyon meydana gelmekte (katılaşma/sertleşme) ve çatlak kapanmaktadır (kendi kendini onarma).



Şekil 2.16. İçi boş fiber tekniği ile kendi kendini onarma mekanizması [14]

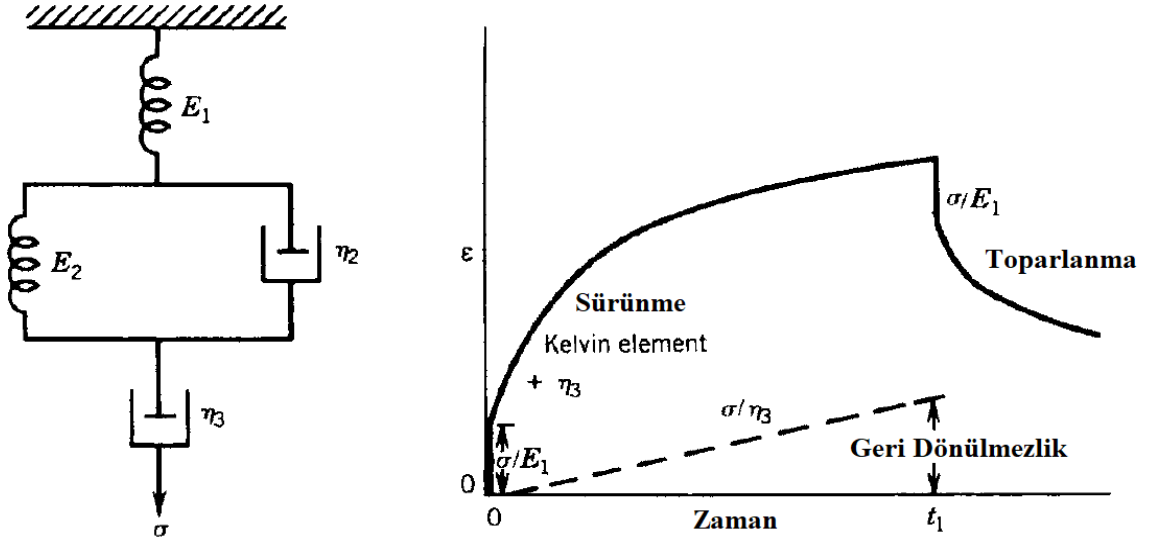
2.5 VİSKOELASTİKLİK

Polimer malzemeler elastik metal malzemeler ve viskoz sıvı malzemelerin arasında yer alan viskoelastiklik özelliği göstermektedir. Aşağıdaki şekilde elastik davranışı modellemede kullanılan yay, viskoz davranışı modellemede kullanılan yağ kutusu, Maxwell elementi (modeli), Kelvin elementi (modeli), Maxwell elementi sürünme davranışı, Kelvin elementi sürünme davranışı görülmektedir.

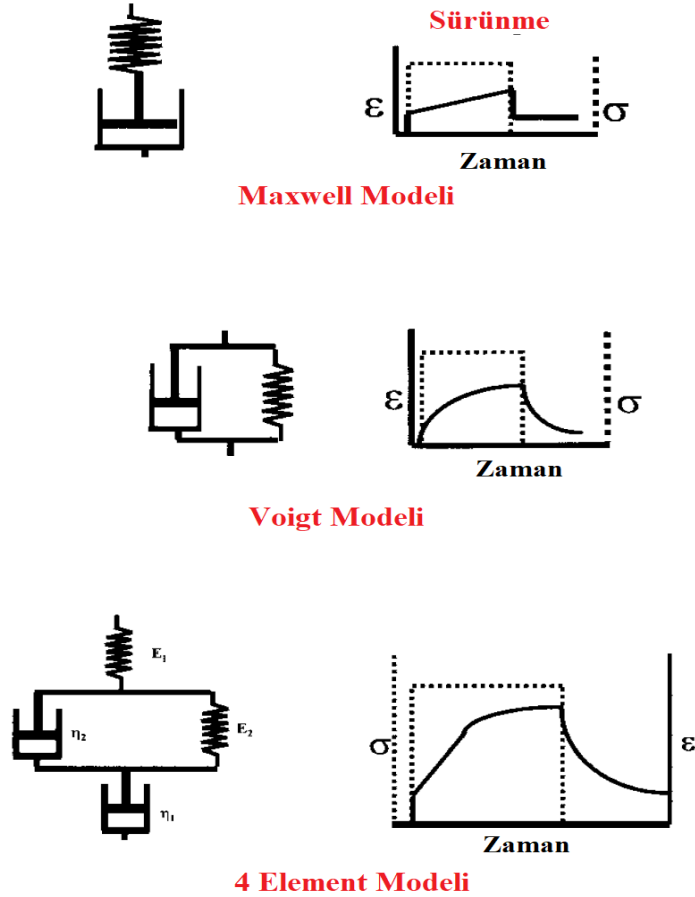


Şekil 2.17. a) Maxwell ve Kelvin elementleri ve b) sürünme davranışı [17]

Aşağıdaki şekilde viskoelastik polimer malzemeleri modellemede kullanılan dört-elementli viskoelastik model ve ε -zaman grafiği görülmektedir.

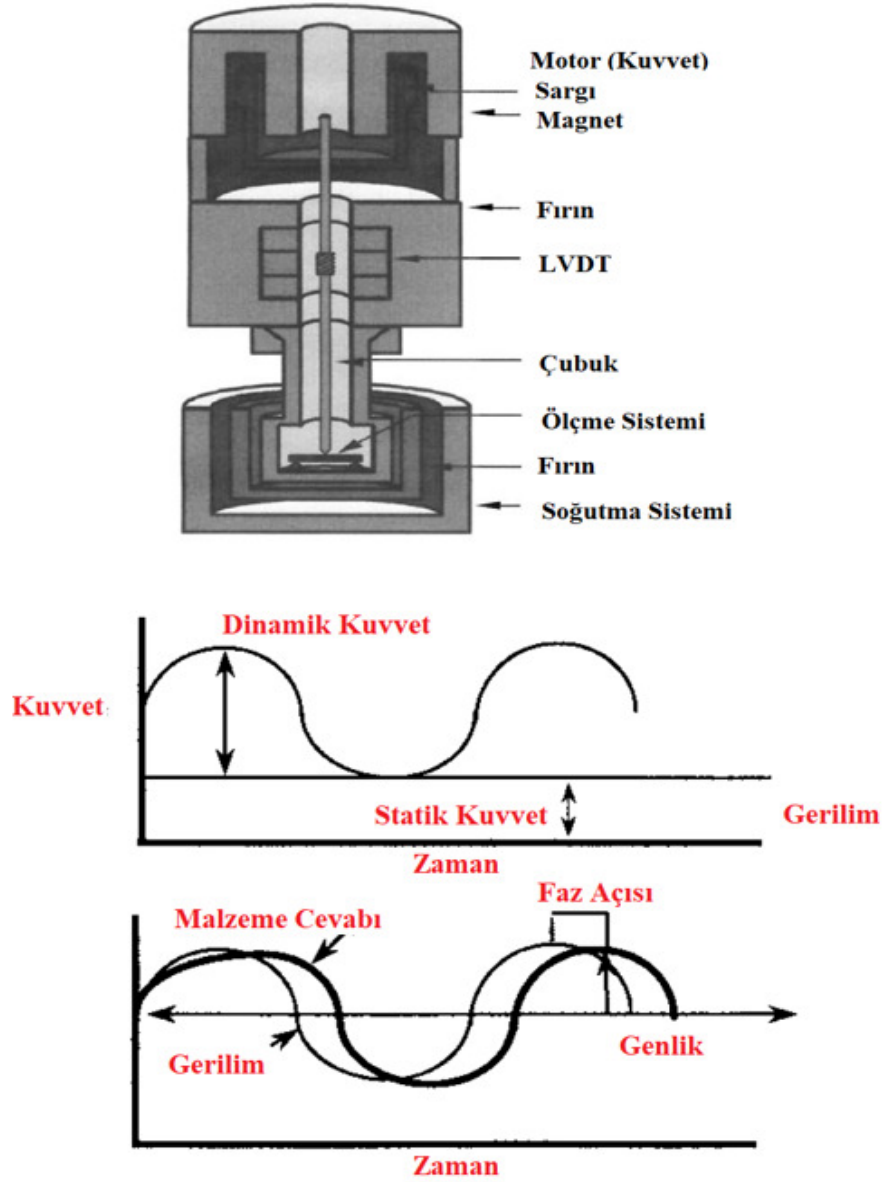


Şekil 2.18. Dört-elementli viskoelastik model [17]



Şekil 2.19. Sürünme-gevşeme davranışının incelenmesinde kullanılan modeller [16]

Dinamik mekanik analiz (DMA) polimerlerin viskoelastik davranışlarını sıcaklığın, frekansın, zamanın fonksiyonu olarak tespit eder. Dinamik mekanik analiz polimerlerin elastiklik modüllerini, sönümlenme davranışlarını, sünme ve gevşeme özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. Dinamik mekanik analiz (DMA), camsı geçiş sıcaklığı (T_g), faz dönüşümleri, katkıların özelliklere etkilerini incelemeye kullanılmaktadır.



Şekil 2.20. Dinamik mekanik analiz ve osilasyon [16]

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$$

$$d\sigma / dt = \omega \sigma_0 \cos \omega t$$

$$\varepsilon(t) = E \sigma_0 \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t)$$

$$\varepsilon(t) = \eta d\sigma_0 / dt = \eta \omega \sigma_0 \cos(\omega t)$$

$$\varepsilon(t) = \eta \omega \sigma_0 \sin(\omega t + \pi / 2)$$

$$\varepsilon(t) = \omega \varepsilon_0 \cos(\omega t) = \omega \varepsilon_0 \sin(\omega t + \pi / 2)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \delta)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 [\sin(\omega t) \cos \delta + \cos(\omega t) \sin \delta]$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 \sin(\delta)$$

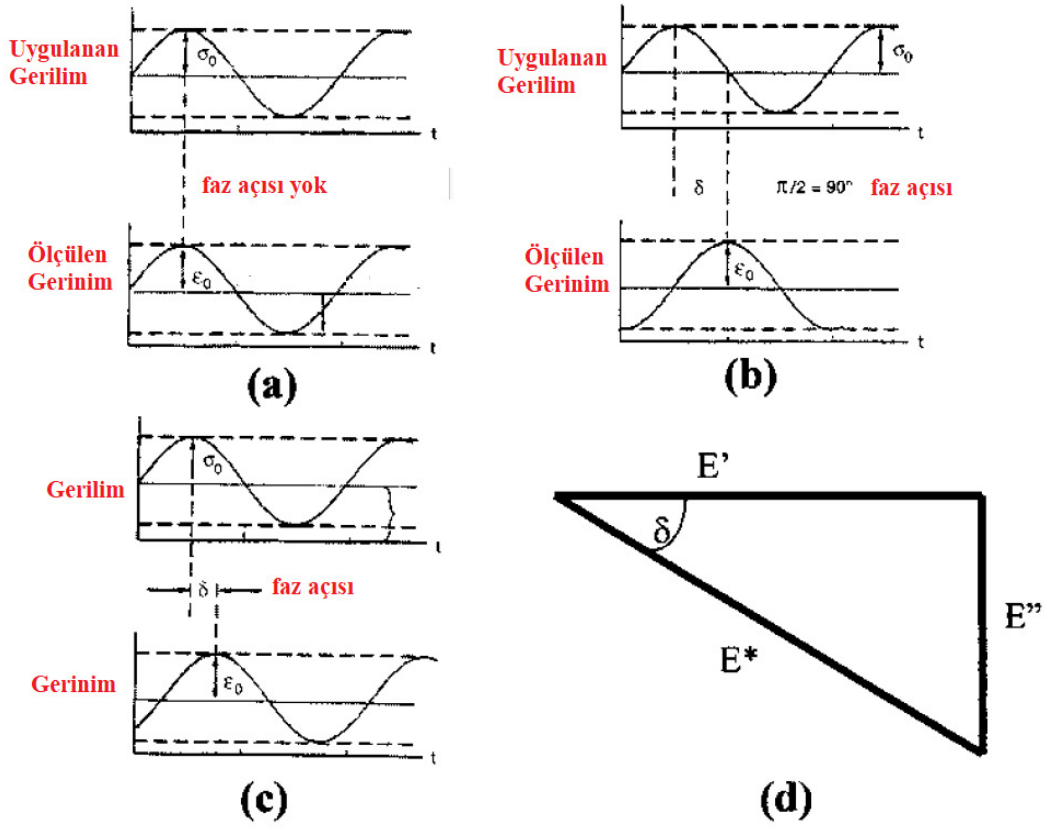
$$\varepsilon'' = \varepsilon_0 \cos(\delta)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon''$$

$$E' = (\sigma^0 / \varepsilon^0) \cos \delta = (f_0 / b\mathbf{k}) \cos \delta$$

$$E'' = (\sigma^0 / \varepsilon^0) \sin \delta = (f_0 / b\mathbf{k}) \sin \delta$$

$$\tan \delta = E'' / E' = \eta' / \eta'' = \varepsilon'' / \varepsilon'$$



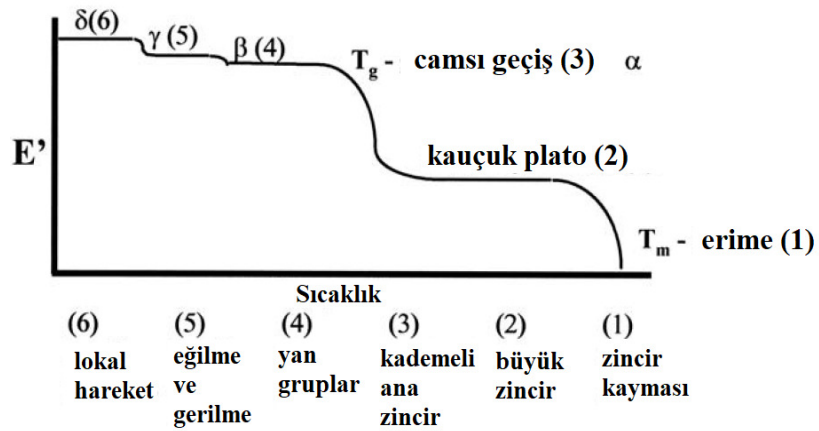
Şekil 2.21. a) Elastik, b) viskoz, c) viskoelastik, d) elastik sabitler ve faz açısı [16]

E^* : Kompleks modül (maksimum gerilmenin maksimum genlemeye oranı)

E' : depolama modülü (faz farkı olmayan component)

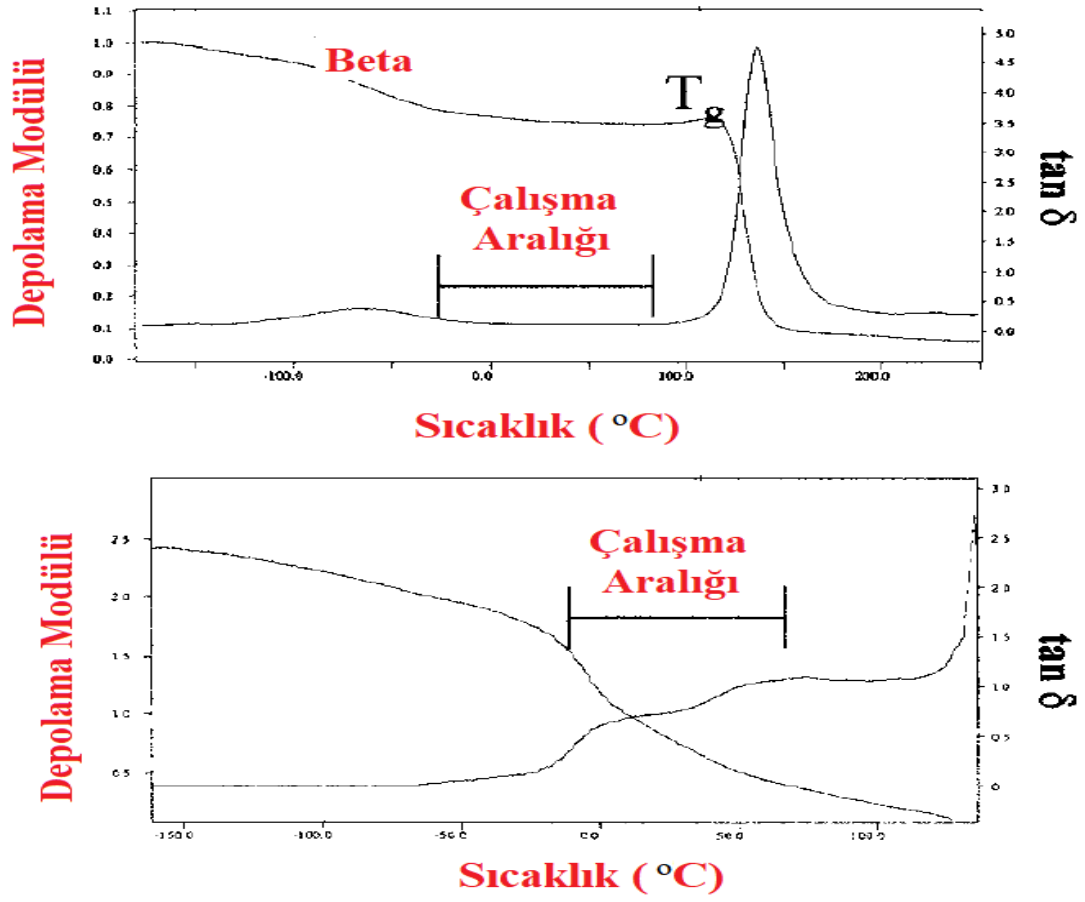
E'' : kayıp modülü (90° faz farkı olan component)

Tan delta ($\tan \delta$): mekanik kayıp faktörü



Şekil 2.22. Şematik bir idealize edilmiş DMA taraması [16]

Aşağıdaki şekilde epoksi ve PP polimerlerinin dinamik mekanik analiz sonucu görülmektedir.



Şekil 2.23. T_g değerine göre çalışma aralığı a) epoksi, b) PP [16]

2.6 LİTERATÜR TARAMASI

Erbayrak [20], doktora tezinde, yapıştırıcı bünyesinde bulunan hatalara (boşluk, mikro çatlak) karşı hassasiyeti yüksek olan gevrek ve sünek yapıştırıcılarda oluşacak hasarların yapıştırıcının kendi-kendini onarmasını sağlayan bir mekanizma yardımı ile tamir edilmesini amaçlamıştır. Deneysel yaklaşımda, epoksi içerisine termoplastik partiküller katılmıştır. Yapıştırıcının, termoplastik malzemenin erime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta kendi-kendini onarması amaçlanmıştır. Yapıştırıcı içerisine eklenecek termoplastik partiküllerin, yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığına etkisi irdelenmiştir. Kendi-kendini onarma verimliliği, onarma öncesi ve sonrasındaki kırılma enerjisinin karşılaştırılmasına dayandırılmıştır.

Berkem [21], Doktora tez çalışmasında grafen oksit ve vanadyum pentoksit nanofiber katkılı kendi kendini onaran kompozitlerin üretilmesi üzerine çalışmıştır. V2O5 nanofiberleri polikondensasyon reaksiyonları kullanılarak sentezlenmiştir. İndirgenmiş grafen oksit (RGO) katkısı Hummer metodu kullanılarak sentezlenmiştir ve hidrazin hidrat kullanılarak indirgenmiştir. PDMS-g-PUR'un hazırlanması için, bir ucu -COOH fonksiyonel grubuna sahip lineer alifatik poliüretan (PURCOOH) sentezlenmiştir ve EDC/HCl birleştirme reaksiyonu ile PDMS'e aşılanmıştır. PURCOOH ve PDMS-g-PUR, ¹H NMR, FTIR ile karakterize edilmiştir. PDMS-g-PUR ve kompozitlerin kendi kendini iyileştirme yeteneği, mekanik testler ve optik mikroskop ile belirlenmiştir. PDMS-g-PUR/V2O5, PDMS-g-PUR/GO ve PDMS-g-PUR/GO-V2O5 kompozitleri hazırlanmıştır. Kompozitlere DSC/TGA, DMA, çekme testleri ve reoloji testleri yapılmıştır. Mekanik testlerden elde edilen çekme dayanımı verileri sonucunda, PDMS-g-PUR'un iyileşme verimi % 85 olarak bulunmuştur. V2O5 nanofiberler ve RGO eklenmesiyle, PDMSg- PUR'un mekanik özelliklerinde ve iyileşme veriminde artış meydana gelmiştir. Polimere % 50 V2O5 nanofiber veya %5 0 RGO eklendikten sonra diğer kompozitlerle kıyaslandığında iyileşme veriminde düşüş meydana gelmiştir. Bu durum reolojik modeller kullanılarak açıklanmıştır. PDMS-g-PUR/GO kompozitlerine mekanik kuvvet uygulanarak kompozitlerde meydana gelen elektriksel değişimler ölçülmüştür. Artan kuvvet ile RGO katkılı kompozitlerde elektriksel tepkiler artmıştır. Ayrıca bu kompozitlere, iyileşme sonrasında da aynı testler yapılmıştır ve kuvvette duyarlı elektriksel tepkiler alınmıştır. PDMS-g- PUR/G30 kompozitlerinin elektromekanik uygulamalar için daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Görür [22], Yüksek Lisans tezinde, nanokompozit üretimi için, polilaktik asit (PLA) matriksinin içinde katkı olarak h-BN nanolevhaları kullanmıştır. 3B baskıya uygun h-BN nanolevhaları/PLA nanokompozit filamentler hazırlanmış ve elektronik cihazların termal yönetimi için ısı dağıtan cihazların 3B baskısında kullanılmıştır. Hem bilyalı öğütme hem de kesme eksfoliasyonu yöntemleriyle h-BN eksfoliye edilmiştir. Her iki yöntemde de suda bir aydan fazla stabil olan birkaç katmanlı h-BN nanolevhalar elde edilmiştir. Daha sonra, h-BN/PLA filamenti üretilmiş ve termal yönetim uygulamaları için ısı soğurucu ve LED ampul tutucu cihazları basılmıştır. 3B baskılı h-BN/PLA ısı soğurucunun üst yüzeyinin sıcaklığı, 3B baskılı PLA'dan 6.3 °C daha yüksek ve alüminyum (Al) ısı soğurucudan 1.4 °C daha düşüktür. PLA'nın ısı yayma oranı, %40 h-BN eklemesi ile %320 artırılmıştır. İkinci uygulamada, 3B baskılı LED ampul tutucular, LED ampuller ile montajlanmış ve LED çiplerinin sıcaklıkları görüntülenmiştir.

Mudu [23], Doktora tez çalışmasında farklı yöntemler kullanılarak bor nitrür esaslı nano tanecikler sentezlemiştir. İlk adımda mikro hegzagonal bor nitrür, solventsiz bir yöntem olan bazık ergitme ile nano sayfalar (h-BNN) ayrılmıştır. İkinci adımda iki basamaklı Kurban Destekli Yöntem (SST) ile borik asit ve melamin kullanılarak boron nitrit nano kurdeleleri hazırlanmıştır. Hegzagonal bor nitrür nano sayfalarının özelliklerini kıyaslamak için benzer yapısal özellikler sergileyen karbon nitrür nano tanecikleri ile nano tüpleri sentezlenmiştir. Sentezlenen nano partiküller eriyik karıştırma yoluyla polipropilen matrise dahil etmek için Masterbatch (MB) yöntemi kullanılmış, seyreltme ve film üretim işlemleri ekstrüderle gerçekleştirilmiştir. Böylece % 1, % 2, % 3 ve % 5 dolgulama oranına sahip nanokompozit filmler hazırlanmıştır. Sonuçlarda dolgulama oranının artmasıyla kristalizasyon (T_c) sıcaklıklarının arttığı ve partiküllerin çoğunlukla PP kristalizasyonu üzerinde çekirdekletirici ajan davranışı sergiledikleri gözlemlenmiştir. Çalışılan nanokompozitlerin termo-oksidatif stabilitesi üzerinde dolgulama oranının etkili olduğu ve artan dolgu miktarına bağlı olarak termal stabilitenin arttığı bulunmuştur. En iyi özellikleri sağlayan optimum partikül içeriği, %3 olarak bulunmuştur.

Öztürkmen [24], yüksek lisans tezi kapsamında, 2 boyutlu malzeme sınıfından grafen (GNP) ve grafen benzeri özelliklere sahip nano malzeme olan hegzagonal bor nitrür (h-BN) kullanılarak elde edilen hibrit karışımın epoksi reçine içerisine katkılандırılarak epoksi

reçinenin iletken hale getirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında %0,1, %0,25, %0,5 ve %1 nanomalzemeler epoksi reçine içerisine üç merdaneli değirmen kullanılarak karıştırılarak, kürlendirilmiştir. Üretilen GNP/epoksi, h-BN/epoksi ve GNP/h-BN/epoksi nanokompozitlerinin SEM, FTIR, TGA, DSC, Termal iletkenlik, Elektriksel İletkenlik ve Üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Termal iletkenliğin %1 GNP ve %1 h-BN takviye edilmiş hibrit nanokompozitte %9,3 arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel özellikler incelendiğinde düşük katkılama oranlarında (%0,1 ve %0,25) eşik değerine ulaşılmıştır. GNP takviyesinin artmasıyla elektriksel iletkenlik değerlerinde kayda değer artış olduğu gözlemlenmiştir, yaklaşık 103 S/m olarak bu değer belirlenmiştir. Bununla birlikte, katkılama oranının yüzdesine eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi de büyük öneme sahip olup, saf epoksiye kıyasla %0,1 h-BN/epoksi nanokompozitinde %58 artış gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen hem saf hem hibrit nanokompozitlerin iyileştirilmiş özellikleri ile zorlu ortamlarda ve elektrostatik yayılım, elektrostatik boyama, elektromanyetik kalkanlama, yalıtım malzemeleri, yapısal parçalar vb. çeşitli havacılık uygulamaları için kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Seydioğlu [25], yüksek lisans tezinde, poli-3-hidroksibütirat-ko-3-hidroksivalerat (PHBV) kopolimeri kullanılmıştır. PHBV'nin gaz bariyer, mekanik ve termal özelliklerini geliştirmek için yüksek termal stabilite, yüksek mekanik dayanım, yüksek termal iletkenlik gibi üstün özelliklere sahip nano hekzagonal bor nitrür (h-BN) kullanılarak PHBV biyonanokompozitleri geliştirilmiştir. Kompozit hazırlanmadan önce h-BN eksfoliye edilmiş ve oktil(trietoksi)silan (OTES) kullanılarak yüzey geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Modifiye edilen h-BN'nin daha sonra XRD, FTIR, TGA, DSC ile karakterizasyonu yapılmış ve belirlenen yükleme yüzdelere göre, eriyik harmanlama yöntemi kullanılarak PHBV ile birleştirilmiştir. Hazırlanan nanokompozitler XRD, SEM, FTIR, TGA, DSC analizleri ile karakterize edilmiş, oksijen geçirgenliği ve mekanik özellikleri ölçülmüştür. PHBV/BN nanokompozitleri için %0.05'den %1'e dolgu yüklemesi ile oksijen geçirgenliği, difüzivitesi ve çözünürlüğü belirlenmiştir. BN nanoparçacıklarının %0.5'e kadar polimere eklenmesiyle gaz bariyer özelliğinde artış gözlemlenmiştir. Silanla muamele edilen h-BN ile hazırlanan nanokompozitlerin silansız numunelere göre daha başarılı olduğu görülmüştür. En iyi bariyer özellikleri, katkısız PHBV'ye kıyasla oksijen geçirgenliğinin (OP) %27.4 düşürdüğü görülen %0.5 oranında silanlı BN içeren nanokompozit numunesi için elde edilmiştir. Kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin de BN'nin biyopolimere ilavesiyle geliştirildiği gösterilmiştir. TGA, bileşiklerin termal stabilitesinin katkısız PHBV'den daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kompozitin Young

modülü, %0.5 oranında silanlı BN varlığında % 12.7 oranında artmıştır. Daha yüksek yüklemde, PHBV matrisi içinde BN aglomerasyonu oluşmakta ve matris ile BN arasında uygun yapışmanın eksikliği yetersiz gerilim transferine neden olmaktadır.

Ertuş [26] yüksek lisans tezi kapsamında baryum hegzaferrit tozları sol-jel yöntemiyle sentezlenmiştir. Ti ve La doplanmış baryum hegzaferrit üretilmesi amacıyla uygun stokiometrik oranlarda yapıya katılmıştır. Üretilen kserojeller ön ısıtılardan sonra kimyasal bağ yapılarının araştırılması ve termal davranışlarının belirlenmesi amacıyla FTIR ve DTA/TG cihazıyla karakterize edilmiştir. Sinterleme işleminden sonra üretilen tozların XRD ve XPS ile sırasıyla faz yapıları belirlenmiş ve elemental analizi yapılmıştır. Son olarak baryum hegzaferrit tozlarının manyetik özellikleri Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile belirlenmiştir. Tozlar karakterizasyon işlemlerinden sonra kütlece yüzde elli oranında polyester reçine ile karıştırılmıştır. Reçine döküm yöntemi ile 4,5 mm kompozit numuneler üretilmiştir. Kompozit numunelerin mikrodalga absorblama özellikleri Vektörel Ağ Analizörü (VNA) yardımıyla 8-12 GHz aralığında karakterize edilmiştir. Kompozit numunelerin elektromanyetik dalga absorblama özelliklerinin tatmin edici düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaşgöz [27] Doktora tez çalışmasında elektromanyetik dalga kalkanlama ve RADAR sistemlerinden gizlenme uygulamalarına yönelik yüksek performansa ve özgün bir içeriğe sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi amaçlamıştır. Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda, kompozit yapıyı oluşturan taşıyıcı polimer bileşen olarak termoplastik poliüretan (TPU), dolgu bileşeni olarak ise; (i) farklı fiziksel özelliklere sahip karbon malzemeler, (ii) manyetik özellikli inorganik bileşikler ve (iii) özel olarak tasarlanan karbon-inorganik yapıları hibrit malzemeler kullanılmıştır. Eriyik harmanlama ve çözeltide karıştırma gibi farklı proses yöntemleri ile hazırlanan tek katmanlı kompozitlerin mikro-yapısal ve mekanik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve dinamik-mekanik analiz (DMA) cihazında gerçekleştirilen test/analiz çalışmaları ile belirlenmiştir. Örneklerin doğrusal akım altında elektriksel iletkenlik değerlerinin de incelendiği çalışmada kompozitlerin elektromanyetik özelliklerine ilişkin parametreler koaksiyel hat yöntemine göre vektör network analiz cihazında (VNA) ölçülmüş ve 2-14 GHz arasındaki elektromanyetik kalkanlama etkinlikleri (*Shielding Effectiveness, SET*) ve yansıma kaybı (*Reflection Loss, RL*) değerleri hesaplanmıştır.

Gökçe [8] yüksek lisans tezinde, yankısız oda kaplamasında gerekli RAM malzemeleri geliştirmek için, PMMA polimerli nanoparçacıklar, farklı karışımlara sahip mikroparçacıklar ve piramit soğurucular çalışılmıştır. Yüksek manyetik kristal anizotropiye sahip Baryum ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$), Stronsiyum ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) ve Kurşun ($\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$) nanoparçacıkları sol-gel metodu kullanılarak senetizlenmiştir. Daha sonra, bu parçacıklar 20/80, 40/60, 60/40 stokiometrik oranlarda PMMA polimeri ile karıştırılmıştır. Bu yeni malzemeler toroidal şekillerde üretilmiştir. Bu kompozit malzemelerin dielektrik, manyetik özellikleri ve saçılma parametreleri (S_{11}, S_{21}) 2-18 GHz frekans aralığında incelenmiştir. Mikro boyutlu parçacıklar dikdörtgensel ve toroidal şekillerde üretilmiştir. Bu numunelere ait dielektrik permitivite, manyetik permabilite, tanjant kayıpları, saçılma parametreleri ve mikrodalga soğurma oranları 12.4-18 GHz aralığında incelenmiştir. Toroidal şekilli mikrodalga soğurucuların sonuçlarına 2-18 GHz frekans aralığında yansıma kaybı-YK analiz tekniği uygulanmıştır. Mikroparçacık temelli geleneksel ve duble mikrodalga piramit soğurucular üretilmiştir. Bu çalışmada imal edilen “NRL yay test düzeneği” ile P bantta yansınabilirlik değerleri ölçülmüştür. Mikro ve nano yapıları parçacıkların simülasyon ve ölçüm değerlerini karşılaştırmak için dikdörtgensel ve dairesel dalga kılavuzu tekniği kullanılarak simülasyonları yapılmıştır. Nano hekzaferritten oluşan çok katmanlı soğurucuların simülasyonu katman kalınlıklarını değiştirerek yapılmıştır. Tek piramitlerin güç kayıp yoğunluğu incelendi. Sonuç olarak, %99 soğurma oranlarına sahip mikrodalga/radar soğurucu malzemeler geliştirilmiştir.

Kavas [29] Doktora tez çalışmasında Nano boyutlu manyetik hexaferritler ile metal kaplanmış Poliakrilinitrile (PAN) bezlerin elektromanyetik dalga yansıtma ve geçirme özellikleri incelenmiştir. Manyetik hexaferrit olarak yüksek şekil anisotropisi ve kristal anizotropiye sahip $\text{Ba}+2\text{Fe}^{+3}_{10}(\text{Mn}+2\text{X}+2\text{Zn}+2)\text{O}^{-2}_{19}$ nano çubukları (X: $\text{Mn}+2, \text{Co}+2, \text{Ni}+2, \text{Cu}+2$ and $\text{Zn}+2$) nano çubukları üretilmiş ve metal kaplama olarak PAN bezleri Ni-Co-Cr metallerinin ikili alaşım banyosunda kaplanmıştır. Üretilen kompozitlerin dielektrik ve manyetik özellikleri deneysel olarak bulunmuştur. Bu kompozitlerin Yansıma Kayıp (RL) eğrileri, tek ve çok katmanlı olarak modellenmiştir. Ayrıca FDTD metodu ile de ortam içerisinde elektromanyetik dalganın ilerlemesi modellenerek bütün modellemeler kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak MEDAN adı verilen 152//122//M kompozitinin 8.2-26.6 GHz aralığında en düşük yansıma kayıp veren tasarım olduğu bulunmuştur.

Toraman [30] tez çalışmasında karbon nanotüplerin ve poli eter eter keton (PEEK) polimerinin mekanik özelliklerine, CNT/PEEK arayüzüne etkileri, yoğunluk fonksiyoneli teorisi (DFT) kullanarak incelemiştir. PEEK polimeri 3.6 GPa seviyelerinde yüksek elastisite modülüne ve 370 °C gibi yüksek erime sıcaklığına sahip olduğu ifade edilmiştir. (CNT ilavesi ile takviye edildiğinde 390 °C seviyelerine artmaktadır. PEEK termoplastik bir polimer olup, uzay araçları, nükleer reaktörler, petrol kuyuları gibi zorlu şartlara uygundur.

Duran [31], tez çalışmasında 7-metakriloksi kumarin, metil metakrilat, etil metakrilat ve izobütil metakrilat monomerleri ile 7-metakriloksi kumarin homopolimeri, 7-metakriloksi-ko-metil metakrilat, 7-metakriloksi-ko-etil metakrilat ve 7-metakriloksi-ko-izobütil metakrilat polimerleri yoğunluk fonksiyonel metodu (DFT) kullanılarak incelemiştir. İlk olarak, moleküler geometrileri, bağ uzunluğu, bağ açısı ve dihedral açısı gibi optimize edilmiş geometrik parametreleri ve Mulliken yük dağılımları DFT metodunun 6-311G+(d,p) temel setinde optimize edilmiş yapılar vasıtasıyla hesaplanmıştır. Titreşim frekansları aynı metot kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar deneysel FT-IR spektrumu ile karşılaştırılmıştır. Monomer ve polimerlerin ¹H-NMR kimyasal kaymaları, gauge-including atomik orbital (GIAO) metodu kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Dahası, HOMO-LUMO enerjisi, dipol moment, iyonlaşma enerjisi, elektron ilgisi, kimyasal potansiyel, elektronegatiflik, sertlik, küresel yumuşaklık ve küresel elektrofillik gibi elektronik özellikleri DFT metodu ile hesaplanmıştır. Son olarak, monomer ve polimerlerin reaktif bölgelerini tahmin etmek için moleküler elektrostatik potansiyel (MEP) ve elektrostatik potansiyel (ESP) yüzey analizi yapılmıştır. Sonuçlar, monomer ve polimerlerin teorik verilerinin, deneysel verilerle ve birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Kalaycı [32] gerçekleştirdiği tez kapsamında havacılık uygulamalarında kullanılan termoset kompozit malzemelerin birleştirme yöntemlerinde bor katkısı araştırılmıştır. Birleştirme yöntemi olarak yapıştırırmalı birleştirme yöntemi seçilmiştir. Yapıştırırmalı birleştirme yönteminde havacılık uygulamalarında da kullanılan cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli termoset kompozit malzemeler ile hegzagonal bor nitrür (hBN) kullanılmıştır. Kullanılan cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Yapıştırırmalı birleştirme yönteminde yapıştırıcıya % 0, 1, 2 ve 3 hBN katkısı yapılmıştır. Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkılı yapıştırıcının cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozit malzemelere olan etkisi incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda termoset kompozit malzemelerin yapıştırırmalı birleştirmesinde yapıştırıcıya katılan hBN katkısının % 2 oranında olduğu durumda en iyi tek bindirmeli çekme gerilmesine sahip olduğu

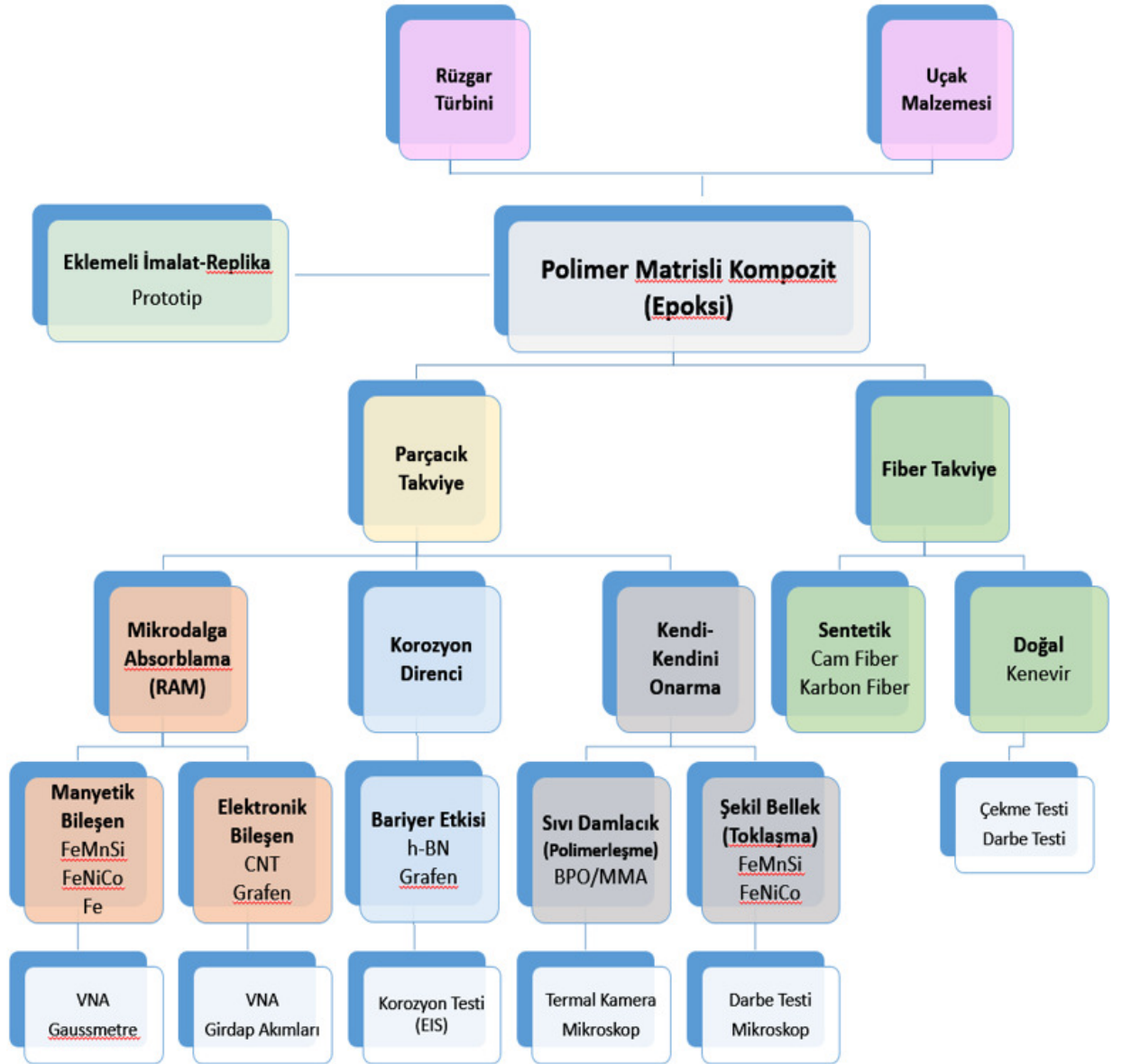
anlaşılmıştır. Bu araştırma sonucunda termoset kompozit malzemelerin yapıştırıcıya birleştirmesinde yapıştırıcıya katılan hBN katkısının % 2 oranında olduğu durumda en iyi tek bindirmeli çekme gerilmesine sahip olduğu anlaşılmıştır. Hegzagonal bor nitrür (hBN) katkısının, karbon elyaf takviyeli numunelerde, cam elyaf takviyeli numunelere göre daha çok etki gösterdiği anlaşılmıştır.

Kemaloğlu [33] tez çalışmasında, ekstrüzyon ve sıcak presleme gibi termoplastik işleme teknikleri ile hekzagonal bor nitrür (hBN) takviyeli termoplastik elastomer polimer kompozitlerden termal arayüzey malzemeleri (TAM)'ın geliştirilmesidir. Çalışmada farklı tane boyutu ve yapısında 5 farklı hBN kullanılmıştır. Matris olarak stiren-etilen-bütilen-stiren blok kopolimeri (SEBS) ile etilen-ko-vinil asetat kopolimerinin (EVA) farklı oranlarda karışımları kullanılmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelerin morfolojik, termal, mekanik ve elektriksel özellikleri hBN yükleme oranı, hBN türü ve SEBS/EVA oranının fonksiyonu olarak incelenmiştir. Bulgular, yüksek termal iletkenlikte hBN'nin tane boyutu ve tane yapısının kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca matris ile hBN arasındaki etkileşim de hem mekanik özellikler hem de termal iletkenlik açısından etkili olduğu bulunmuştur. Çalışmanın ikinci kısmında, hBN'nin polimer matriste dağılımını iyileştirmek ve ara yüzeydeki etkileşimi arttırmak amacıyla ilk kısımda en yüksek termal iletkenliğin elde edildiği hBN türü iki farklı silan bağlayıcı ile muamele edilmiştir. Bulgular, silan bağlayıcı modifikasyonunun kompozitlerin termal iletkenliğini geliştirdiğini göstermiştir.

3. YÖNTEM

3.1 KOMPOZİT ÜRETİMİ

Aşağıdaki şekilde tez kapsamında üretilen malzemelerin hedeflerine göre sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.1. Üretilen malzemelerin hedeflerine göre sınıflandırılması

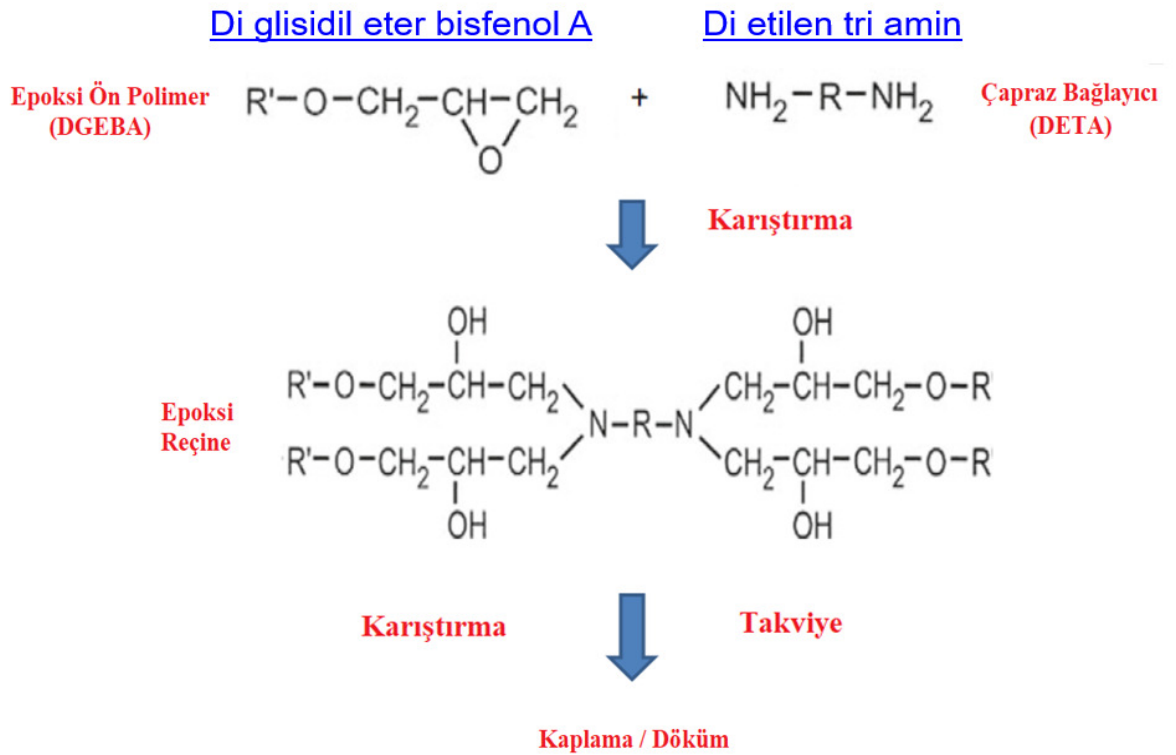
Matris Malzemesi Olarak Epoksi Sentezi

Tez kapsamında, termoset esaslı epoksi matrisli kompozitlerin üretiminde, öncelikle ağırlıkça % 65 sıvı epoksi ön polimer *diglisidil-eter-bisfenol-A* (DGEBA) ve ağırlıkça % 35 çapraz bağlayıcı (kürleme ajanı) sıvı epoksi sertleştirici malzeme *dietilentriamin* (DETA) karıştırılmıştır.

Karışım homojen oluncaya kadar ve viskozitesi artmaya başlayana kadar karıştırılmıştır.

Epoksit gruplarının reaksiyonları (çağraz bağlanma reaksiyonları) sonucu viskozitede artış yaşanmaya başladığında planlanan takviye malzemeleri (parçacık veya fiber) sıvı içerisine ilave edilmiş mekanik/fiziksel karıştırma işlemi sürdürülmüştür.

Son olarak elde edilen viskoz epoksi matrisli kompozit malzeme uygun kalıp içerisine dökülmüştür. Ardından porozite ve gaz boşluklarının giderilmesi amacıyla şeffaf film yardımı ile basınç uygulayarak epoksi matrisli polimer kompozit içerisindeki gaz boşlukları ve porozite giderilmiştir.



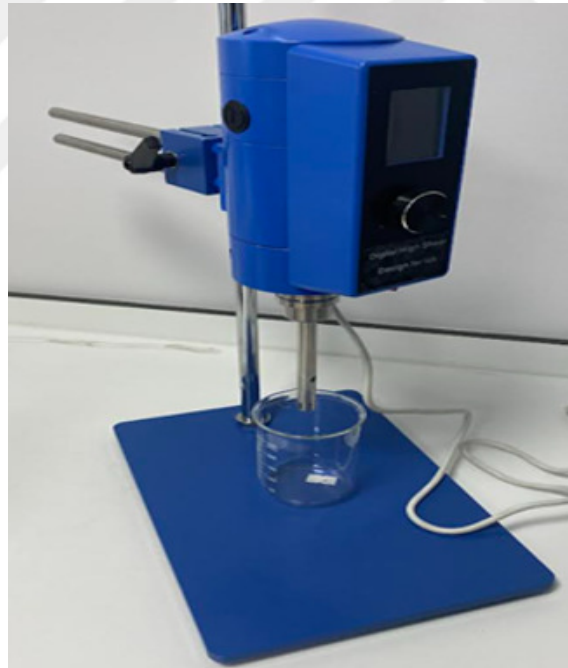
Şekil 3.2. Epoksi sentezi

Damlacık (Mikrokapsül) Esaslı Kendi-Kendini Onaran Polimer Matrisli Kompozit Üretimi

Aşama 1: Kendi kendini onarma kabiliyetine sahip epoksi reçine matrisli polimer kompozit üretiminde, ağırlıkça % 65 epoksi ön reçine ve ağırlıkça % 35 çapraz bağlayıcı ajan mekanik/fiziksel olarak karıştırılmış ve ağırlıkça iki kısma bölünmüştür.

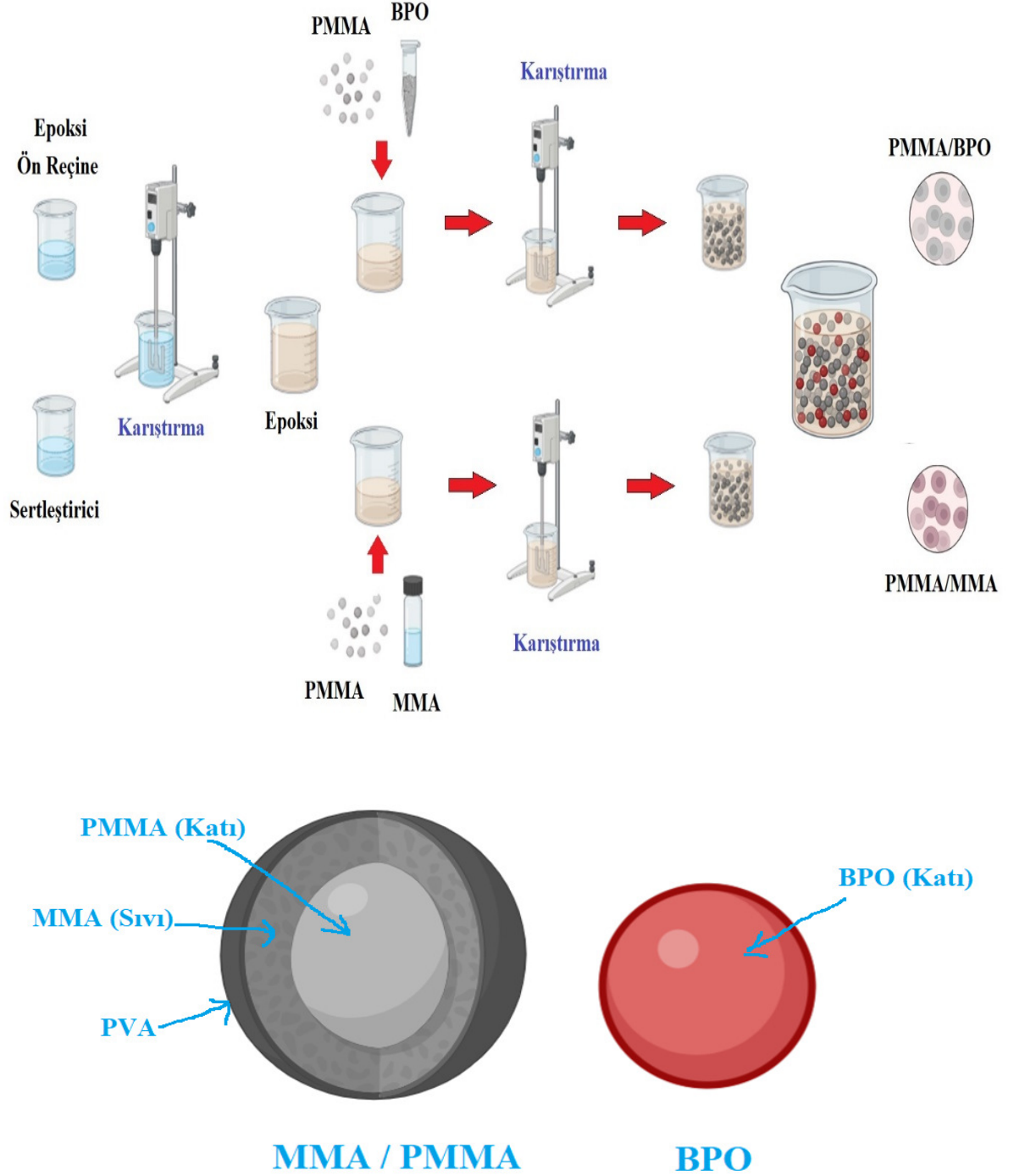
Aşama 2: Vizkozitede artış yaşanmaya başladığında, bir karışıma ağırlıkça % 6 sıvı metilmetakrilat (MMA) damlacıkları ve bir miktar polivinilalkol (PVA), diğer karışıma ise ağırlıkça % 2 benzoilperoksit (BPO) tozu ilave edilmiştir. Ayrıca ağırlıkça % 0.5 hidrokinon ilave edilmiştir.

Aşama 3: Son olarak, her iki karışım birleştirilmiş, mekanik olarak karıştırılmış ve kalıp içerisine dökülmüştür.



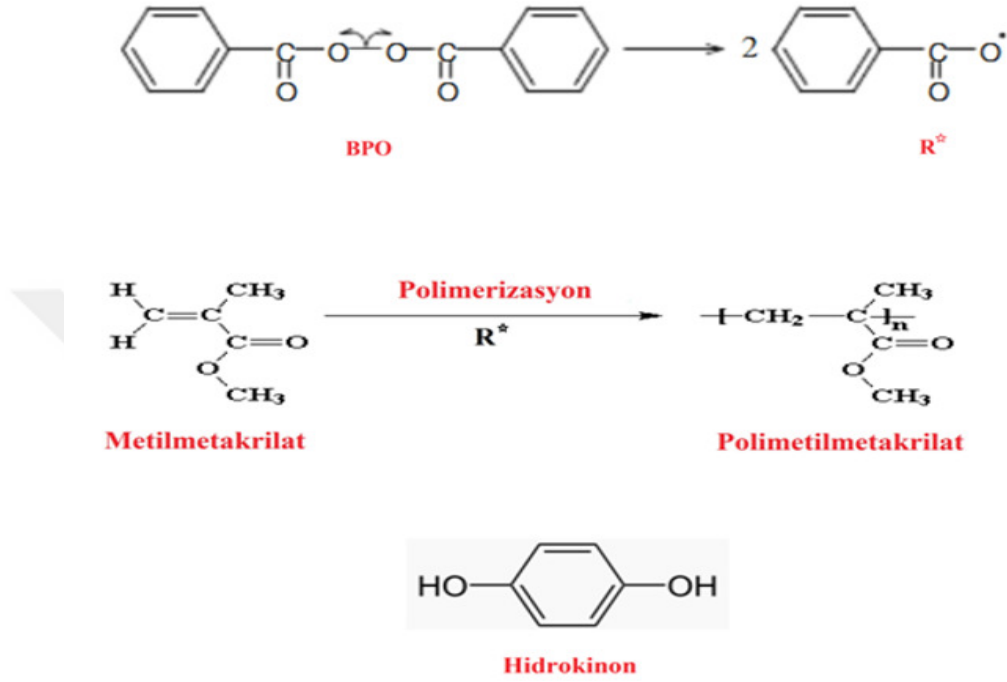
Şekil 3.3. Ultrasonik homojenizatör

Aşağıdaki şekilde damlacık (mikrokapsül) esaslı kendini-kendini onaran polimer matrisli kompozit üretiminin temel aşamaları şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.4. Damlacık esaslı kendini-kendini onaran kompozit üretimi

Aşağıdaki şekilde başlatıcı/katalizör olarak kullanılan benzoilperoksit (BPO) molekülünün parçalanma mekanizması, katı ürün hammadde olarak kullanılan metilmetakrilat (MMA) monomerinin polimerizasyon reaksiyonu ve reaksiyon kontrol ajanı olarak kullanılan hidrokinon molekülünün yapısı görülmektedir.



Şekil 3.5. BPO parçalanması, MMA polimerizasyonu ve hidrokinon

Polimetilmetakrilat (PMMA), sıvı metil-metakrilat (MMA) monomerinin, radikal (zincir) polimerizasyonu tekniği ile sentezlenmektedir. PMMA zincir yapısı sindiyotaktik özellikte olmasına rağmen, yapıda bulunmakta olan metakrilat gruplarının oldukça iri olması nedeniyle PMMA kristalleşemez ve bu nedenle amorfür (şeffaftır).

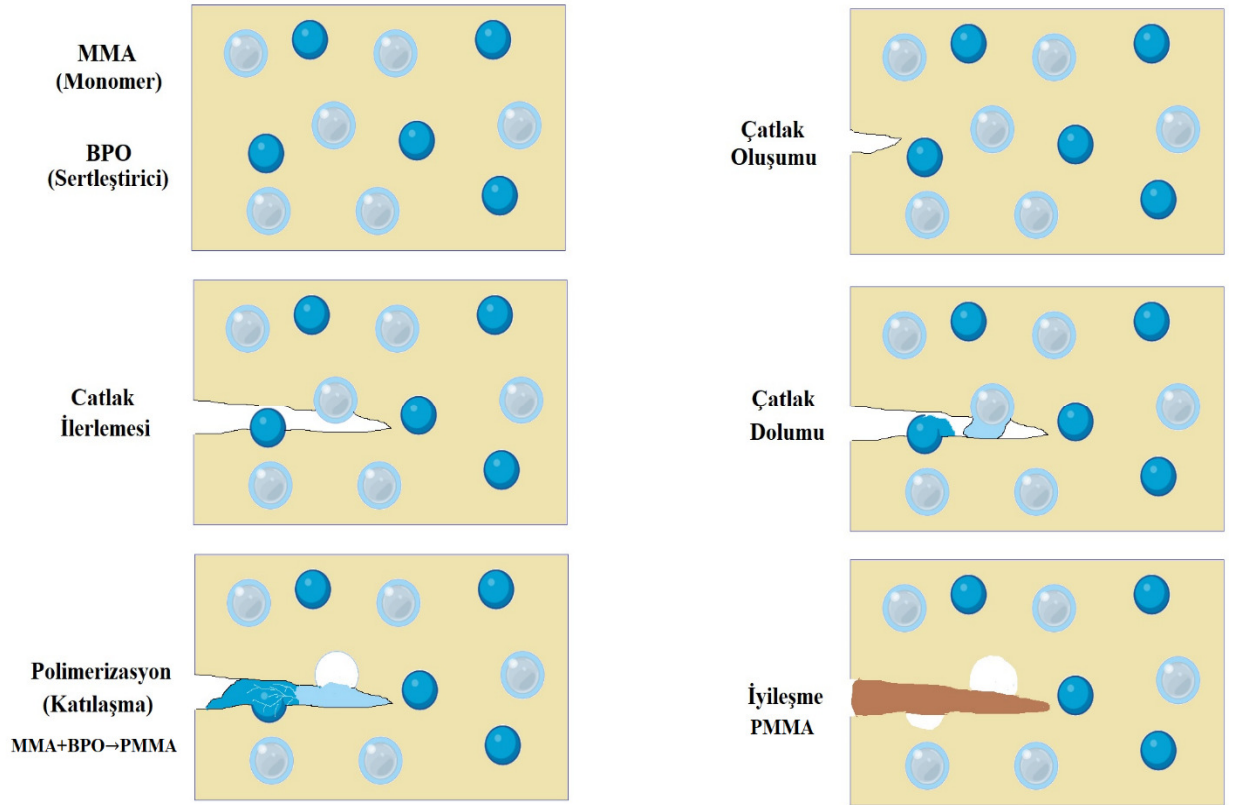
Benzoil peroksit (BPO) molekülü, peroksit bağıyla birbirine bağlanmış iki benzoil grubu içermektedir. BPO molekülü parçalandığında aktif bir merkez ortaya çıkmaktadır. MMA monomerinden, radikal (zincir) polimerizasyonu tekniği ile PMMA üretimi sırasında, katalizör (başlatıcı veya hızlandırıcı) olarak BPO kullanılmaktadır.

Genel olarak sıvı metil-metakrilat, oksijen veya ışık yoluyla kendiliğinden polimerizasyona uğrayabilir. Bundan dolayı polimerizasyon hızını kontrol etmek için hidrokinon katılır.

Tez kapsamında damlacık tipi kendi kendini onarma ajanı olarak PMMA-MMA/PMMA-BPO katkı ve bir miktar PVA içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin kendi-kendini onarma özelliği kazanmaları amaçlanmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzeme içerisinde yapay olarak oluşturulmuş çok ince çentik/kanalın zamanla incilmesi beklenmektedir.

Kendi-kendini onarma sırasında çatlak içerisinde metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) damlacıklarının reaksiyona girecekleri ve meydana gelen polimerizasyon sonucu çatlak kapanması (kendi kendini onarma) yaşanacağı söylenebilir.

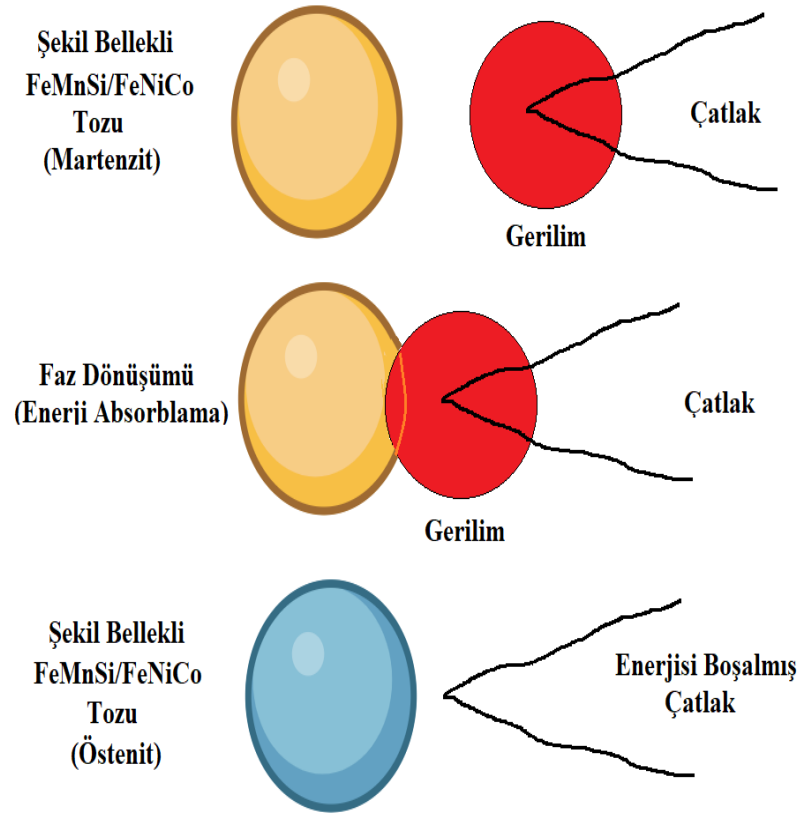
Kendi kendini onarma işlemi termal kamera, optik mikroskop ve Vickers sertlik izi yöntemleri ile karakterize edilmiştir.



Şekil 3.6. Damlacık (mikrokapsül) esaslı kendi-kendini onarma mekanizması

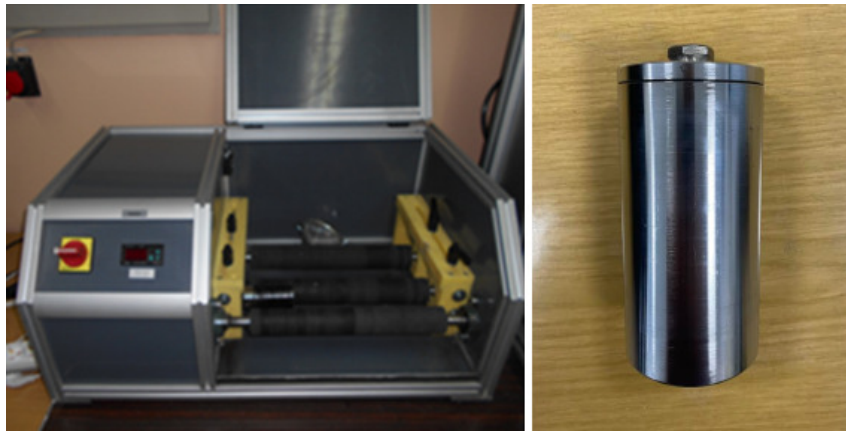
Dönüşüm Toklaşması Esaslı Şekil Bellekli Toz Takviyeli Kendi-Kendini Onaran Kompozit

Dönüşüm toklaşması esaslı kendi kendini onarma kabiliyetine sahip termoset epoksi matrslili polimer kompozit üretiminde, ağırlıkça % 65 epoksi ön reçine ve ağırlıkça % 35 çapraz bağlayıcı ajan mekanik/fiziksel olarak karıştırılmıştır. Vizkozitede artış yaşanmaya başladığında ağırlıkça % 5 şekil bellekli metal tozu ilave edilmiştir. Daha sonra sıvı karışım mekanik/fiziksel olarak karıştırılmış ve uygun kalıp içerisine dökülmüştür. Çatlak ile karşılaşım şekil bellekli metal tozları östenit-martenzit faz dönüşümüne uğramakta ve ilerleyen çatlağın enerjisini absorbe etmekte ve böylelikle çatlak ilerlemesi yavaşlatılmakta veya tamamen durdurulmaktadır. Şekil bellekli toz olarak ortalama mekanik alaşımlama ile hazırlanmış 30-40 μm boyutlu Fe-Mn-Si esaslı tozlar ve Fe-Ni-Co esaslı tozlar kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Dönüşüm toklaşması esaslı kendini-kendini onarma mekanizması

Şekil bellekli Fe-Mn-Si esaslı tozlar ve Fe-Ni-Co esaslı tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile bilyeli değirmende hazırlanmıştır. Mekanik alaşımlamada, ince metal toz karışımları planlanan alaşımların (Fe-Mn-Si, Fe-Ni-Co) kimyasal bileşimine göre belirlenen miktarlarda hassas teraziyle tartılmıştır. Mekanik alaşımlama yapabilmek için bilyeli değirmen ve öğütücü olarak 6 mm çapında zirkonya bilyeler kullanılmıştır. Metal tozu/zirkonya bilye oranı tüm karışımlarda 1/10 olacak şekilde yükleme yapılmıştır. Numuneler bilyeli değirmende 30 saat boyunca 400 rpm dönme hızında çalıştırılmıştır. Ağır bilyeler daha fazla çarpışma enerjisini tozlara ileteceğinden, öğütme ve mekanik alaşımlamada büyük boyutlu bilyelerin kullanılması daha avantajlıdır. Küçük bilyelerin, sürtünme kuvveti meydana getirdiği için amorf faz oluşumunu artırdığı bilinmektedir. Yumuşak mekanik alaşımlama şartlarının (küçük bilye, düşük enerjili ve düşük bilye-toz oranı) amorflaşma oluşumunu artırdığı bilinmektedir. 400 devir/dakika dönme hızının optimum olduğuna karar verilmiştir. Daha yüksek hızlarda aşırı yüksek merkezkaç kuvvetinin oluştuğu ve istenilen seviyede bilye-toz çarpışmasının meydana gelmediği görülmüştür. Düşük dönme hızlarında bilyelerin yeterli enerji kazanamadıkları ve yeterli bilye-toz çarpışmasının meydana gelmediği anlaşılmıştır. Döndürme hızının çok artmasıyla bilyelerin hareket hızı da artmakta, bilyeler kavanozun iç duvarlarına çivilenmekte ve aşağıya düşmediklerinden istenilen bilye-toz çarpışmaları meydana gelmemektedir. Dönme hızının, maksimum yükseklikten düşerek maksimum çarpışma enerjisi meydana getirebilmesi için kritik hız değerinin altında olması gerekir. Yüksek hızlar için bir diğer sınırlama ise kavanoz sıcaklığının yüksek hızlara çıkıldıkça artmasıdır. Yüksek sıcaklıklar da tozlardaki kirlenme oranı artabilir. Ayrıca çok yüksek hızlarda olumsuz sonuçlara yol açabilecek aşırı titreşim meydana gelebilmektedir.



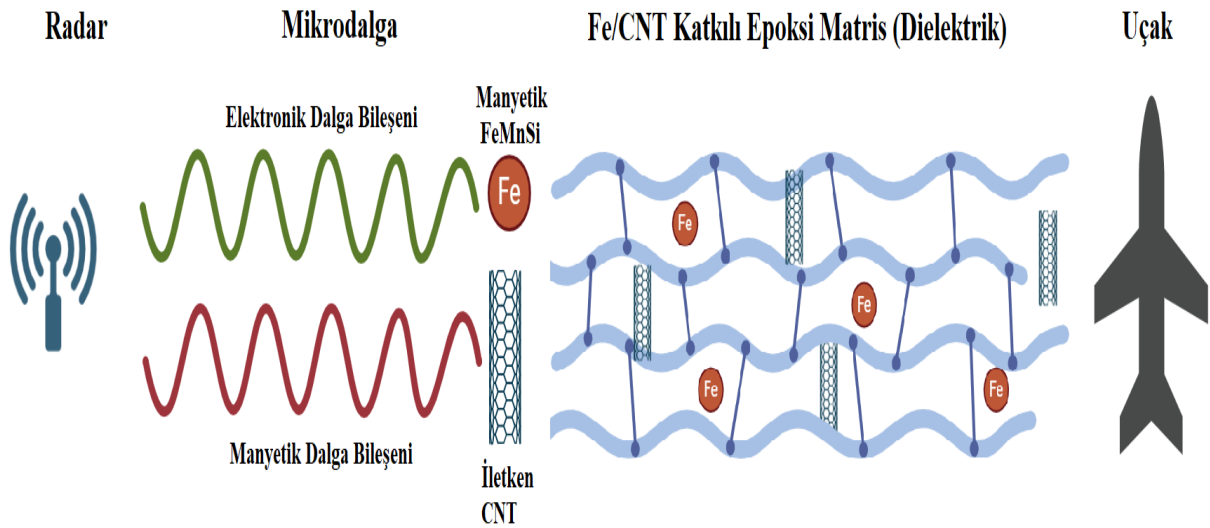
Şekil 3.8: Bilyeli değirmen.

Radar Absorban Malzeme (RAM) Sentezi

Radar (mikrodalga) absorban malzeme üretimi kapsamında polimer matris içerisine Fe-Mn-Si tozu, Fe-Ni-Co tozu, grafen ve karbon nanotüp (CNT) tozu ilave edilmiştir. Karbon nanotüp (CNT) veya grafenden tozlarından oluşan çok ince yollar meydana getirmekte ve elektriksel iletkenlik sağlamaktadır.

İlave edilen şekil bellekli ince Fe-Mn-Si tozu ve Fe-Ni-Co tozu iki farklı görev üstlenmektedir. Öncelikle ilave edilen şekil bellekli ferromanyetik ince Fe esaslı toz mikrodalgaların manyetik bileşeninin absorblanmasını sağlamakta ve polimer matrisli kompozit malzemeye radar (mikrodalga) absorblama özelliği sağlamaktadır.

İkinci olarak şekil bellekli ince Fe-Mn-Si tozu malzeme içerisinde ilerleyen bir çatlak ile karşılaştığında östenit-martenzit faz dönüşümü göstermekte ve faz dönüşümü ile çatlak ucunda birikmiş olan enerjiyi absorblamaktadır. Böylece şekil bellekli ince Fe-Mn-Si tozu ilavesi dönüşüm toklaşması mekanizması ile epoksi matrisli kompozit malzemenin tokluk (darbe absorblama) değerlerini arttırmakta ve kendi-kendini onarma kabiliyeti (çatlak durdurukması) kazandırmaktadır.

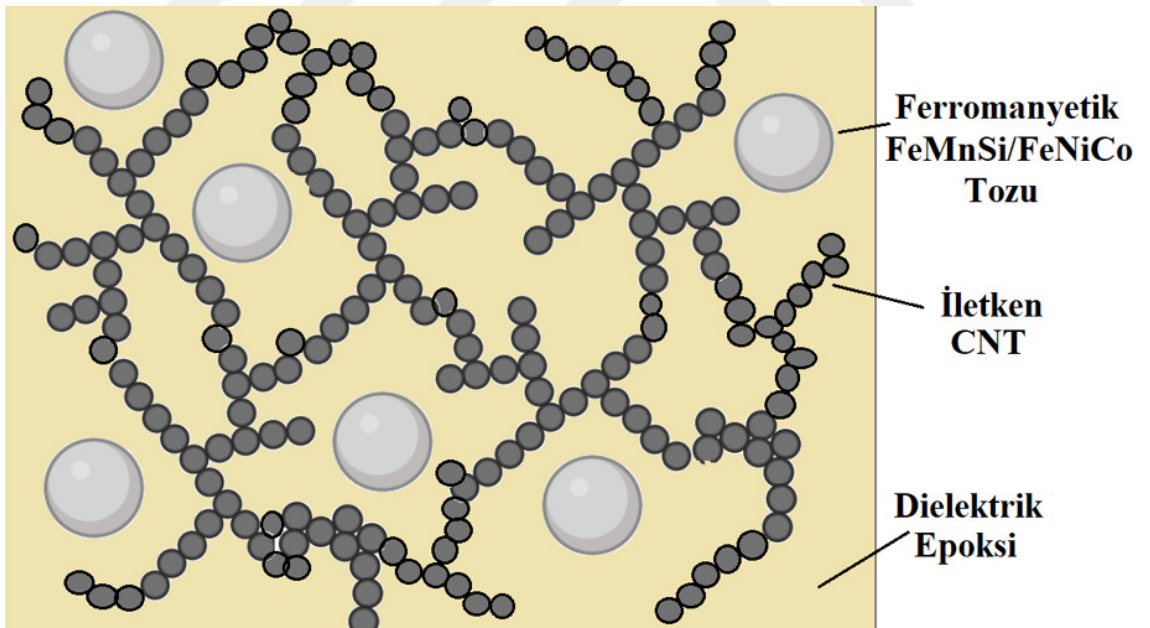


Şekil 3.9. Amaçlanan radar absorban malzeme mekanizması

Radar absorban malzemesinin hedefleri düşük görünürlük, elektromanyetik kalkanlama ve yıldırım çarpmasına dayanıklılıktır. Radar dalgası (mikroda) dik olarak yayılan elektrik ve manyetik alan komponentlerinden meydana gelen elektromanyetik dalgadır. Radar absorblama malzemeleri radar dalgasının elektrik ve manyetik komponentlerini absorblayan (ısıya dönüştüren) malzemelerdir. Radar absorban malzemeler, elektromanyetik dalganın elektrik alanı ile etkileşime giren dielektrik malzeme bileşeni ve elektromanyetik dalganın manyetik alanı ile etkileşime giren manyetik kayıpları olan ferromanyetik malzeme bileşeni içermektedir. *Radar kesit alanı (RSC)* bir malzemenin yüzeyinden radar sinyalinin yansıtma miktarı veya radar cihazında görünürlüğü olarak ifade edilebilir. Kısaca, malzemenin radardan aldığı sinyal (mikrodalga) miktarının yansıttığı sinyal miktarına oranıdır.

Tez kapsamında üretilen radar absorban malzemelerin temel komponentleri:

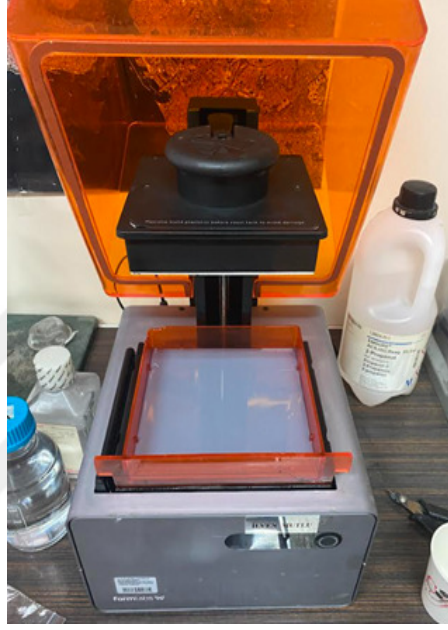
- Ferromanyetik demir esaslı toz - FeMnSi veya FeNiCo
- Dielektrik kayıp gösteren polimer matris - epoksi
- Elektriksel iletken toz – CNT veya grafen



Şekil 3.10. Amaçlanan radar absorban malzeme yapısı

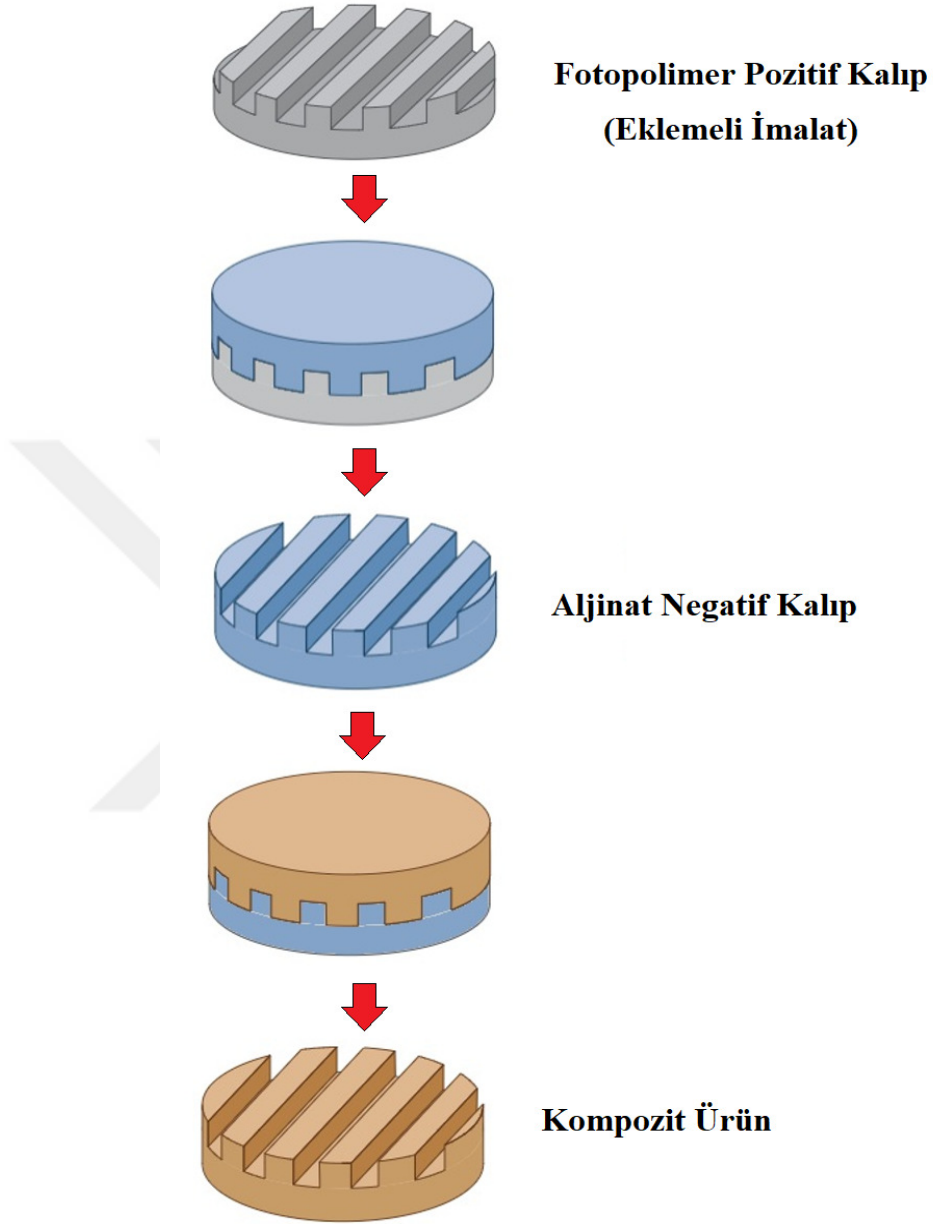
Eklemeli İmalat-Replika Tekniği ile Prototip veya Nihai Ürün Üretilmesi

Tez kapsamında CNT tozu ve şekil bellekli Fe-Mn-Si veya Fe-Ni-Co tozu takviyeli polimer matrisli kompozitlerden nihai ürün veya prototip üretilmesi için gereken kalıplar stereolitografi teknolojisi temelli eklemeli imalat cihazı ile üretilmiştir (Formlabs). Eklemeli üretim cihazı ile üretilen kalıp (pozitif), aljinat kullanılarak negatif kalıba dönüştürülmüştür.



Şekil 3.11: Stereolitografi cihazı

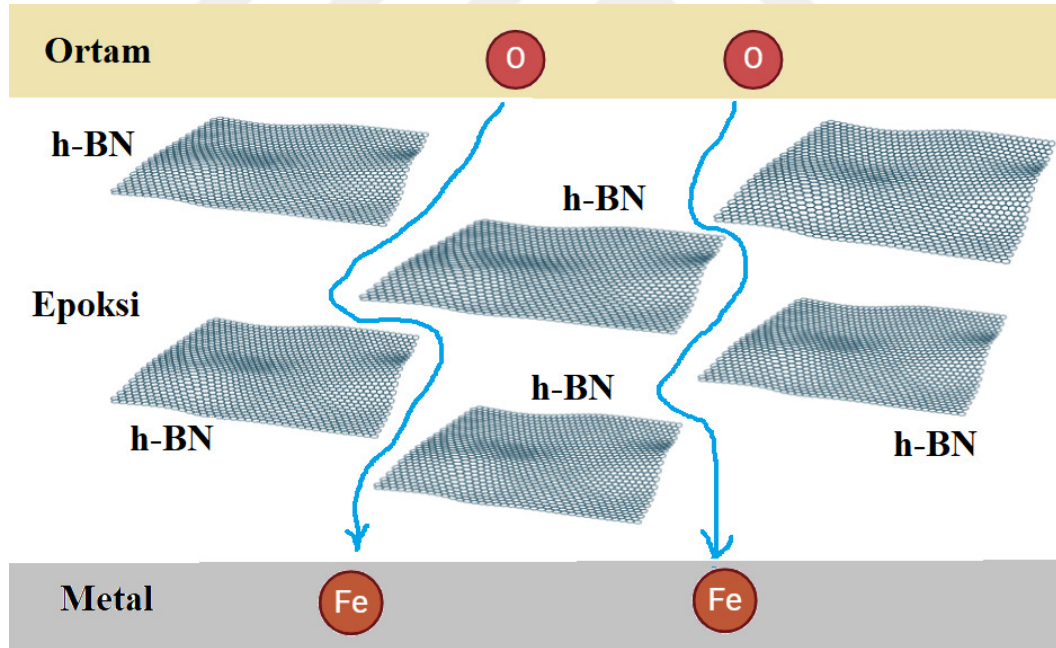
Aşağıdaki şekilde replika tekniği ile aljinat kalıp kullanılarak nihai ürün veya prototoip üretimi aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.12: Replika tekniği aşamaları

h-BN Katkılı Epoksi Matrisli Antikoroziy Kompozit

Tez kapsamında, epoksi matrisli polimer kompozitlerin üretiminde, öncelikle epoksi ön polimer (ağırlıkça % 65) ve çapraz bağlayıcı (kürleme ajanı) sıvı epoksi sertleştirici malzeme (ağırlıkça % 35) karıştırılmıştır. Karışım homojen oluncaya kadar ve viskozitesi artmaya başlayana kadar karıştırılmıştır. Epoksit gruplarının reaksiyonları (çağraz bağlanma reaksiyonları) sonucu viskozitede artış yaşanmaya başladığında kapladığı malzemenin elektrokimyasal korozyon direncini geliştirmek amacıyla planlanan oranlarda hegzagonal bor nitrür (h-BN) tozu ilave edilmiş mekanik/fiziksel karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Son olarak elde edilen viskoz epoksi matrisli kompozit malzeme uygun kalıp içerisine alüminyum yüzey üzerine kaplama kalınlığı 1.0-1.5 mm olacak şekilde dökülmüştür. Ardından porozite ve gaz boşluklarının giderilmesi amacıyla şeffaf film yardımı ile basınç uygulayarak epoksi matrisli polimer kompozit içerisindeki gaz boşlukları ve porozite giderilmiştir. Alfa Aeser firmasından temin edilen hegzagonal bor nitrür polimer matris içerisine ağırlıkça % 0-5 aralığında takviye edilmiştir.

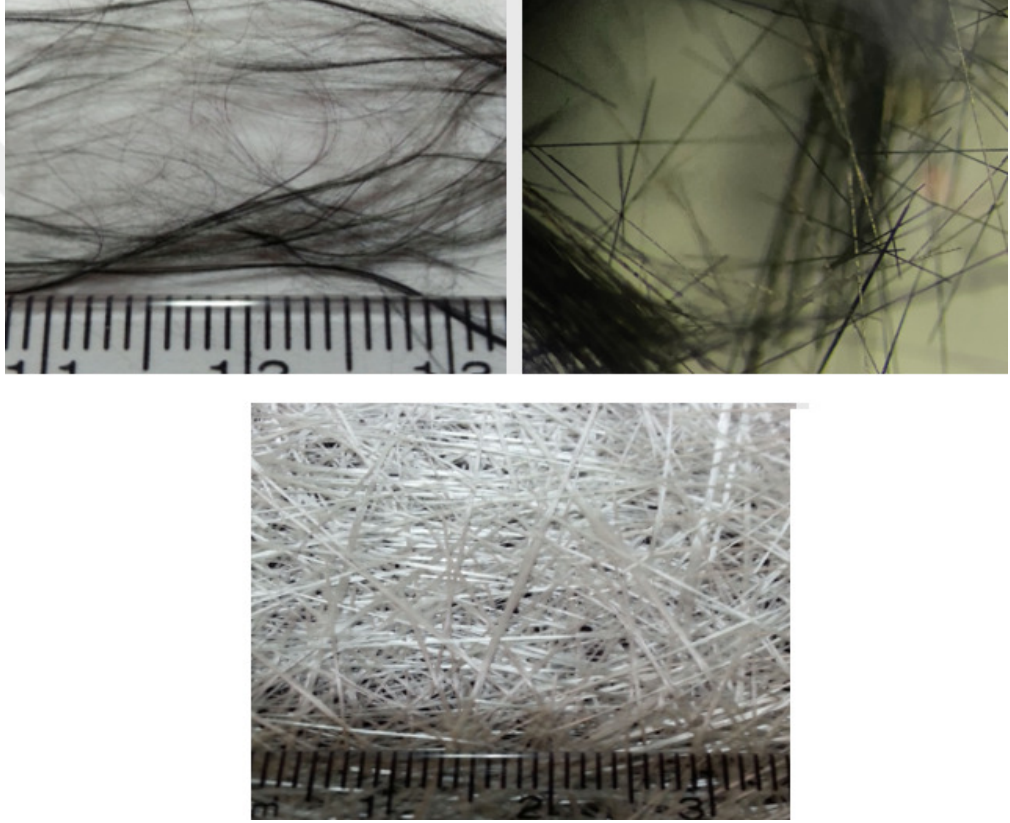


Şekil 3.13: h-BN katkısının korozyona etkisi

Sentetik Fiber Katkılı Kompozitler

Karbon Fiber: 200 g/m² olacak şekilde örgülü olarak satın alınmıştır (Dost Kimya, Türkiye). Ayrıca, örgülü fiberler kırılarak, kırılmış fiber elde edilmiştir.

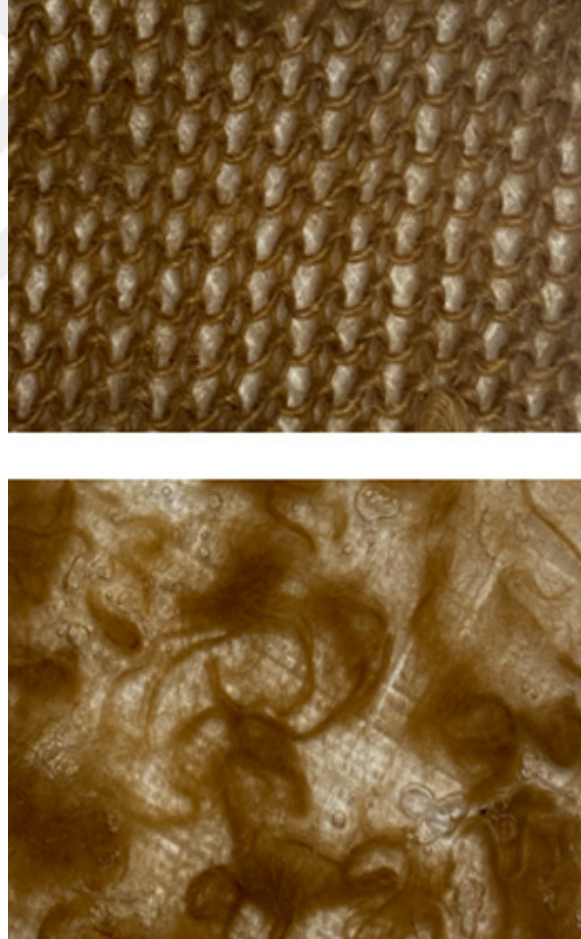
Cam Fiber: E-camı kalitesinde kırılmış cam elyaf keçe (CSM) formunda ince silan tipi bağlayıcı emülsiyonu ile kaplı hade satın alınmıştır (ECM 225, ACM, Tailand).



Şekil 3.14: Sentetik fiberler a) karbon fiber, b) cam fiber

Doğal Fiber (Kenevir) Katkılı Kompozitler

Bileşenlerinden en az bir adedinin yenilenebilir ve doğal olduğu kompozitlere “*biyokompozitler*” denilebilir. Kenevir fiberler çevre dostu malzeme olduğundan, cam fiber, karbon fiber gibi sentetik fiberlere önemli bir alternatiftir. Genel olarak kenevir, en sert doğal liflerden olan cannabis-sativa bitkisinin bir çeşididir. Kenevir bitkisindeki lifler, genel olarak kenevirin sapında bulunmaktadır. Kenevir liflerinde lignin, selüloz, hemiselüloz, pektin ve az miktarda yağlar bulunmaktadır. Selüloz, kenevir liflerinde yer alan sertliği en yüksek maddedir. Kenevir liflerinde lignin arttığında esneklik miktarı azalmaktadır. Genel olarak doğal fiberler, cam fiberlere göre daha düşük yoğunluk ve daha büyük spesifik elastiklik modülüne sahiptirler [19].



Şekil 3.15: Kenevir fiber

3.2 KARAKTERİZASYON

Tez kapsamında üretilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskop (Olympus) ve taramalı electron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir.

Numunelerin yoğunlukları geometrik yöntem ile belirlenmiştir.

Numunelerin mekanik özellikleri (elastisite modülü) tahribatlı basma testi (Devotrans, Türkiye) ve tahribatsız ultrasonik test (General Electric, USM Go) ile incelenmiştir.

Alaşımların sertlikleri mikro Vickers sertlik yöntemiyle belirlenmiştir (Zwick Roell).



Şekil 3.16: Mekanik testler a) Sertlik, b) çekme cihazları

Darbe Testi

Ağırlık düşürmeli darbe testi, numunenin üzerine belirli yükseklikten ağırlık düşürülerek numunenin absorbe ettiği enerjinin ölçülmesi için kullanılan bir yöntemdir. Ağırlık arttırılarak malzemenin hangi ağırlıkta kırıldığı belirlenir. Testler Devotrans marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. 150 cm düşme yüksekliğinden 180-400 g arasında 45 g artışla değişen yükler uygulanmıştır.



Şekil 3.17: Düşen ağırlık darbe cihazı

Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesinde dinamik mekanik analiz kullanılmıştır. Dinamik mekanik analiz (DMA) polimerlerin viskoelastik davranışlarını sıcaklığın, frekansın, zamanın fonksiyonu olarak inceler. Dinamik mekanik analiz polimerlerin elastiklik modüllerini, sönümleme davranışlarını, sünme ve gevşeme özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. Dinamik mekanik analiz (DMA), camsı geçiş sıcaklığı (T_g), faz dönüşümleri, katkıların özelliklere etkilerini incelemeye kullanılmaktadır.

Belirlenen parametreler

E^* : Kompleks modül (maksimum gerilmenin maksimum genlemeye oranı)

E' : Depolama modülü (faz farkı olmayan komponent)

E'' : Kayıp modülü (90° faz farkı olan komponent)

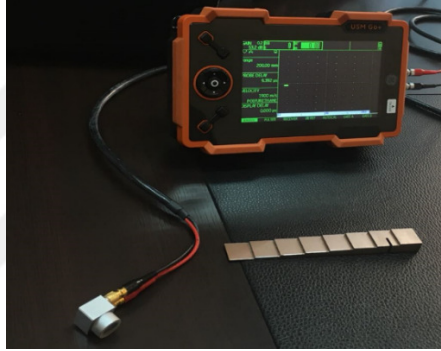
Tanjant delta ($\tan \delta$): mekanik kayıp faktörü

T_g (camsı geçiş): en büyük $\tan \delta$ değerindeki sıcaklık

Ultrasonik Hız Ölçümü

Tez kapsamında üretilen şekil bellekli alaşımların numunelerin elastisite modüllerini (Young's modülü) belirlemek için her bir alaşımda tahribatsız muayene esaslı ultrasonik hız ölçümü yapılmıştır (General Electric, USM Go). Sinterlenmiş şekil bellekli alaşımların elastisite modülü değerleri aşağıdaki eşitlik ile kullanılarak. Eşitlikte yer alan E elastisite modülünü, V_T ultrasonik boyuna hızı, V_L ultrasonik enine hızı, ρ yoğunluğu ifade etmektedir.

$$E = \rho V_T^2 \frac{3V_L^2 - 4V_T^2}{V_L^2 - V_T^2}$$



Şekil 3.18: Ultrasonik muayene cihazı

Girdap Akımları İletkenlik Testi

Tez kapsamında üretilen şekil bellekli alaşımların elektirksel iletkenlikleri % IACS (uluslararası tavlanmış bakır standardı) biriminden tahribatsız muayene esaslı girdap akımları cihazı kullanılarak (EtherCheck, Ether NDE) tespit edilmiştir.



Şekil 3.19: Girdap (eddy) akımları cihazı

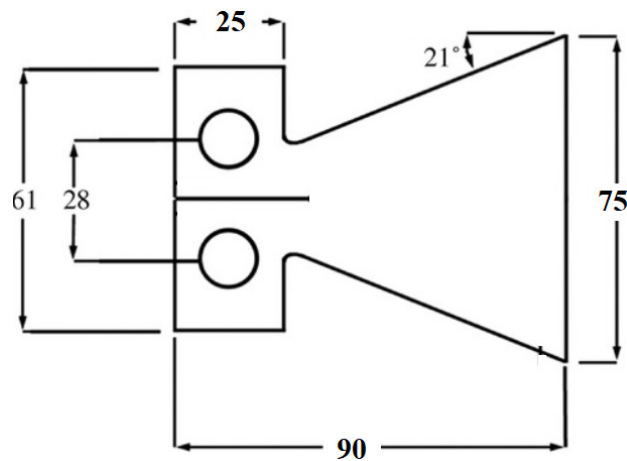
Termal Kamera Cihazı ile İnceleme

Tez kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numuneler ek olarak aşağıdaki şekilde görülen termal kamera ile karakterize edilmiştir (Bosch GTC 400 C). Termal kamera cihazı ile özellikle polimer matrisli kompozit numunelerde oluşturulan yapay hataların kapanma olayları (kendi kendini onarma kabiliyeti), ısı iletimi ve özellikle iç yapı kusurları araştırılmıştır.



Şekil 3.20 Termal kamera

Üretilen kompozit numune üzerine 1 mm eninde 10-15 mm uzunluğunda çentik/çizik açılmış ve oluşturulan yapay hatanın (çizik/çentik) zamanla kapanma (kendi-kendini onarma) davranışı optik mikroskop ve termal kamera ile izlenmiştir.



Şekil 3.21: Kendi-kendini onaran numune ölçüleri

Gaussmetre (Hall Effect) ile Manyetik Alan Ölçümü

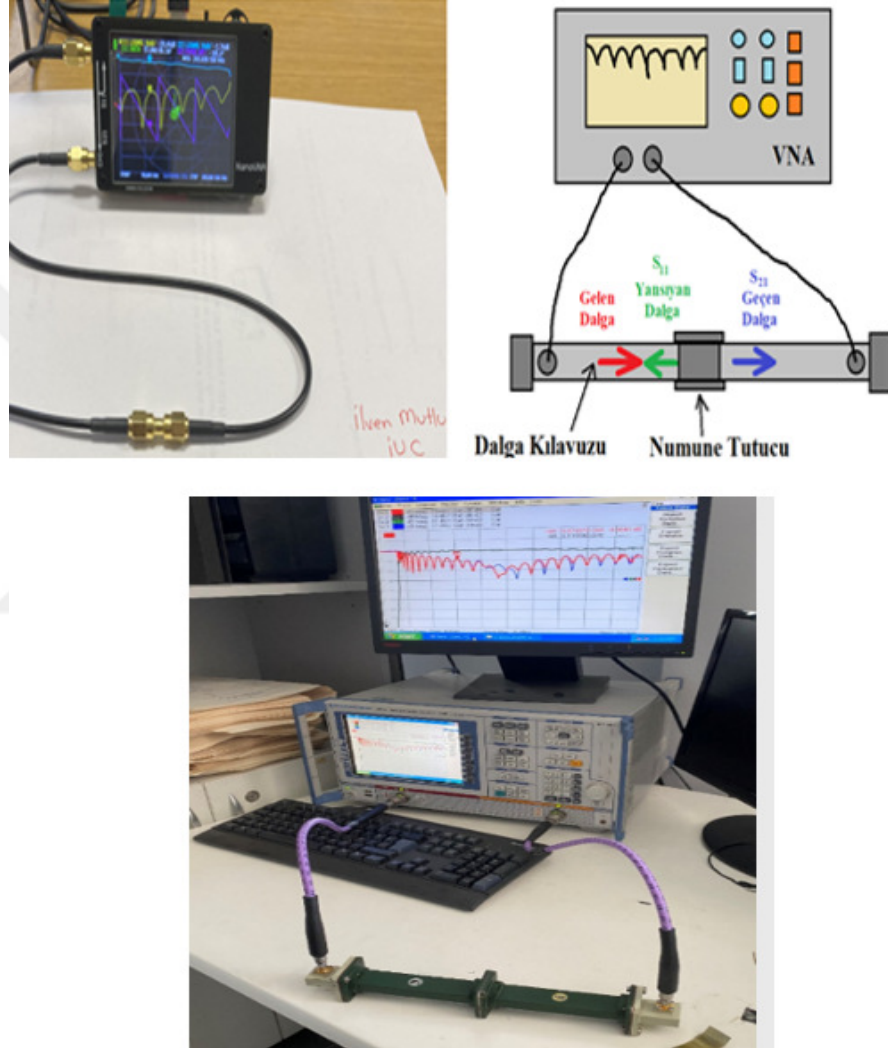
Tez kapsamında üretilen polimer matrisli kompozit numunelerin manyetik özellikleri gaussmetre (GM07, HIRST) cihazı ile incelenmiştir. Genel olarak, cihaz hall etkisi prensibi ile çalışan bir yarıiletken bir proba sahiptir. Aşağıdaki şekilde kullanılan gaussmetre cihazının şematik yapısı görülmektedir.



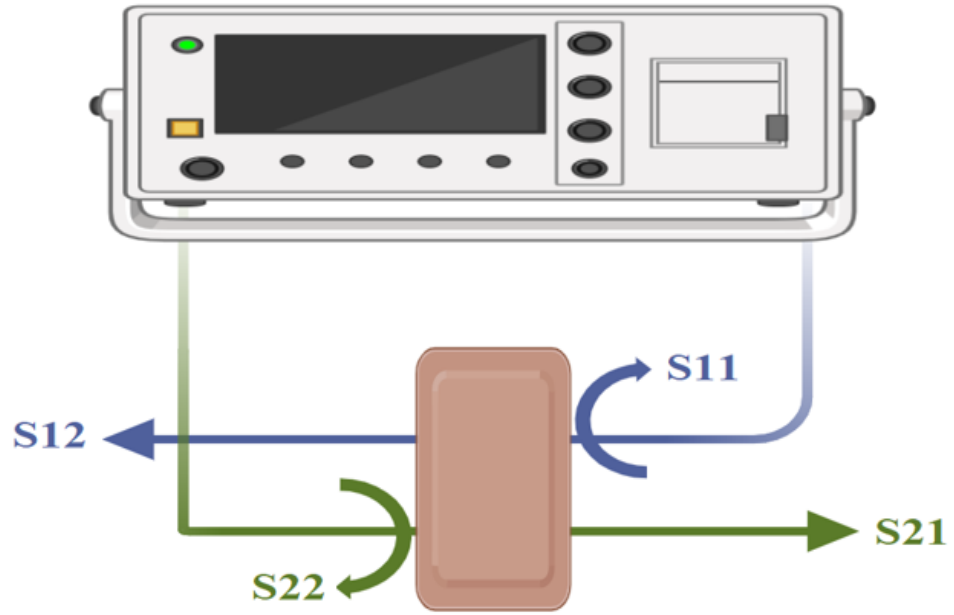
Şekil 3.22 Gaussmetre

VNA Cihazı ile Mikrodalga Absorbanı Ölçümü

Polimer matrisli kompozit numunelerin radar absorpsiyon özellikleri vektör ağ analizörü (vector network analyser, VNA) cihazı ile incelenmiştir (Nano VNA-F, China). Aşağıdaki şekilde kullanılan vektör ağ analizörü (VNA) cihazının şematik yapısı görülmektedir.



Şekil 3.23 VNA cihazları



Şekil 3.24 VNA cihazı çalışma prensibi

Ölçümler, numuneler wr-90 dalga kılavuzu içerisine yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir.

Zayıflatma ve Absorbans hesabında boş dalga kılavuzuna ait ölçümler referans alınmıştır:

$$\text{Zayıflatma Miktarı} = S21_{\text{dB}} (\text{numune}) - S21_{\text{dB}} (\text{referans})$$

$$\text{Absorbans Miktarı} = S11_{\text{dB}} (\text{referans}) - S11_{\text{dB}} (\text{numune})$$

S11 forward reflection (yansıyan güç)

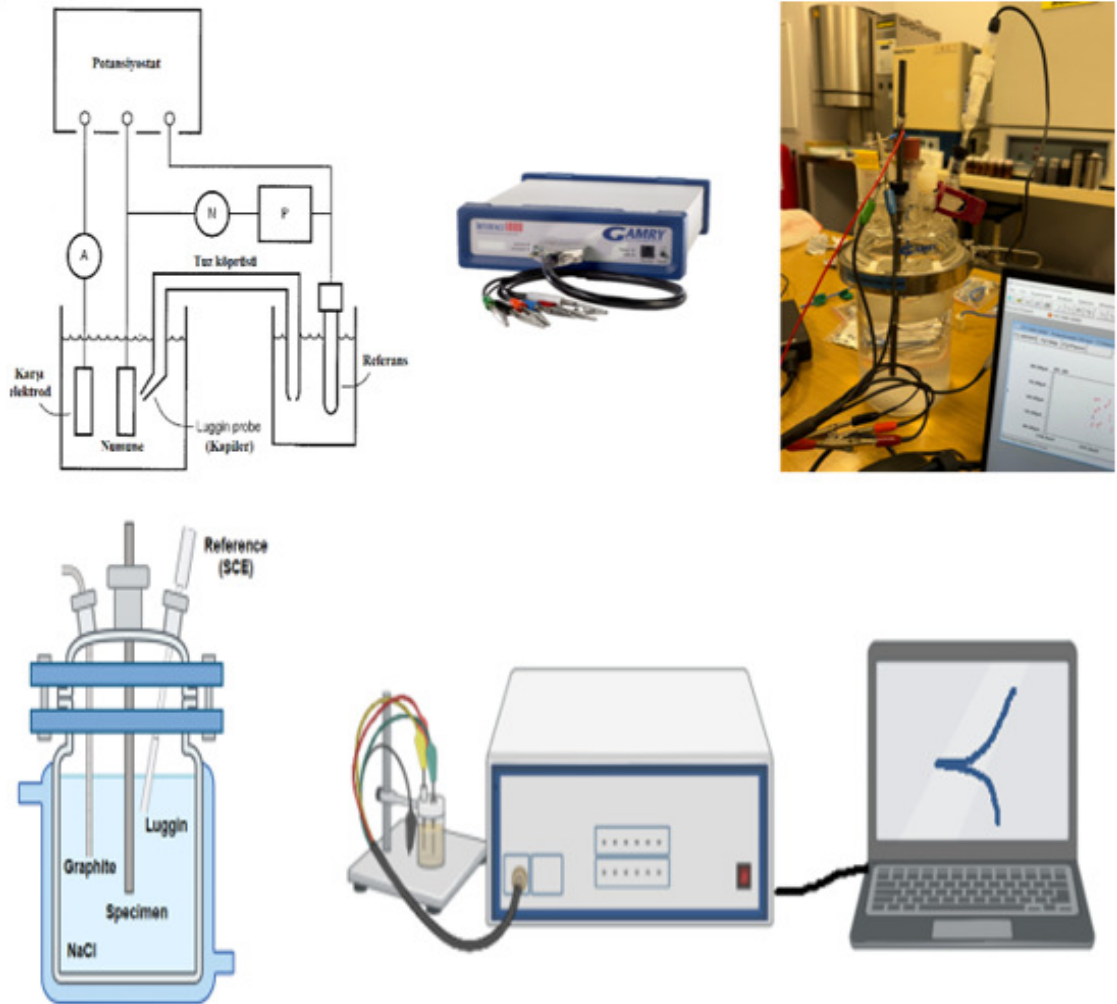
S12 forward transmission (port 2 den port 1 e iletilen güç)

S21 backward transmission (port 1 den port 2 ye iletilen güç)

S22 backward reflection (yansıyan güç)

Elektrokimyasal Korozyon Testleri

Tez kapsamında üretilen antikoroziv h-BN katkılı polimer matrisli kompozit kaplamanın alüminyum malzemelerin korozyon direncine etkileri elektrokimyasal korozyon deneyleri yapay % 3.5 NaCl çözeltisi içerisinde (pH 6.6) gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon deneyleri 1litre hacimli korozyon hücresi içinde potansiyostat (Interface 1000, Gamry) ile yapılmıştır. Referans elektrod olarak kalomel elektrot, inert elektrot olarak grafit kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak incelenen numune kullanılmıştır. Deneyler ve analizler yazılım yardımıyla yapılmıştır (Gamry Framework, Analyst).

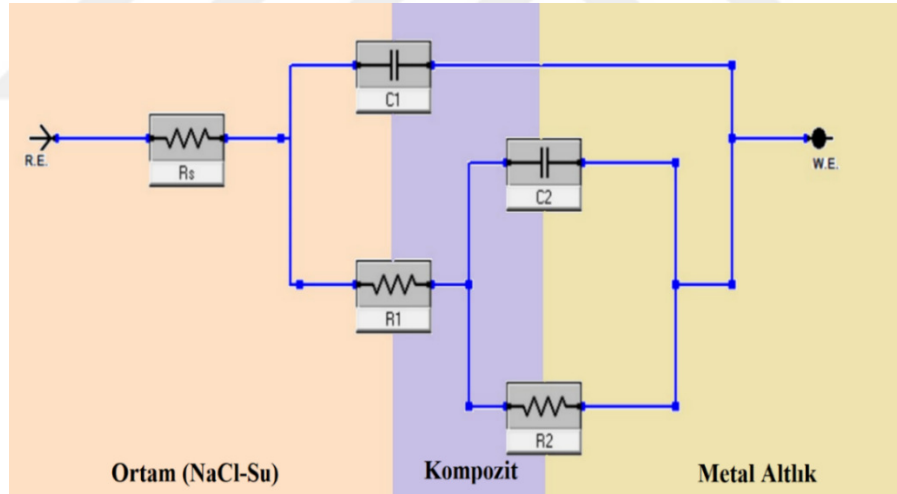


Şekil 3.25 Elektrokimyasal korozyon testi çalışma prensibi ve korozyon hücresi

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)

Eşdeğer elektriksel devre modelleri, elektrokimyasal empedans spektroskopisi sonuçlarını yorumlamak ve değerlendirme için kullanılmıştır. Tez kapsamında, alüminyum üzerine yapılan h-BN katkılı epoksi matrisli kompozit kaplamanın değerlendirilmesi için kullanılan eşdeğer elektrik devre modeli aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

Aşağıdaki şekilde görülen modelde R_s kullanılan çözeltinin direncini ifade eder. R_1 polimer matrisli kompozit kaplamanın şarj/yük transferi sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. R_2 metal (alüminyum) yüzeyinin kinetik olarak kontrol edilen şarj/yük transferi sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. Elektrokimyasal reaksiyonların mekanizmasının aydınlatılması açısından faydalı bilgiler sunar. C_1 polimer matrisli kompozit kaplamanın çift tabaka oluşumu sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. C_2 metal yüzeyinin kinetik olarak kontrol edilen çift tabaka oluşumu sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder.



Şekil 3.26. EIS verilerinin yorumu için kullanılan eşdeğer elektrik devre modeli

R_s Çözelti direnci

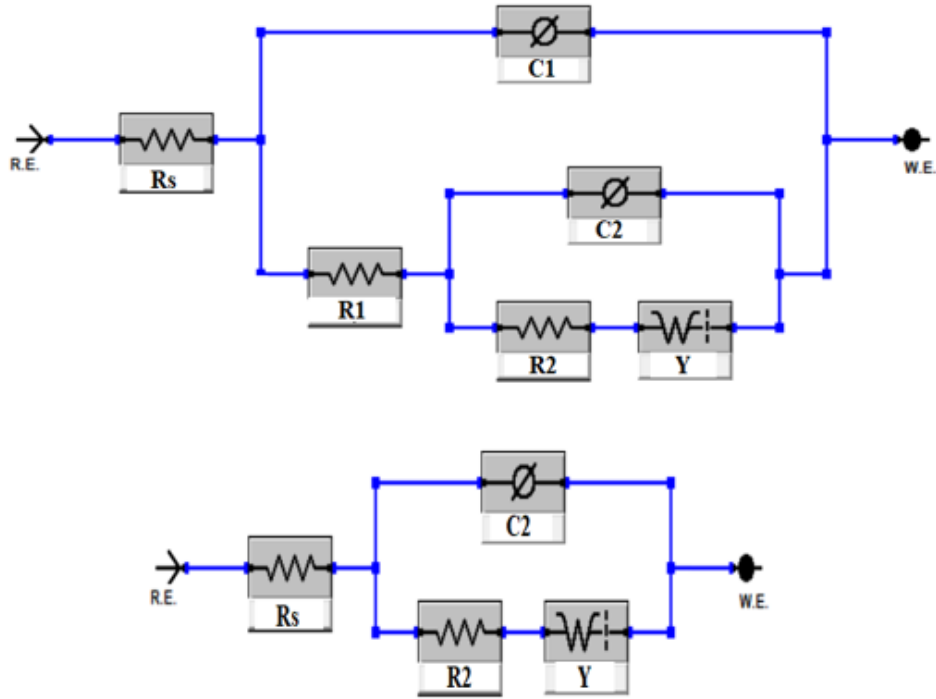
R_1 Kaplamanın polarizasyon direnci (şarj transferi sonucu)

R_2 Metal yüzeyi polarizasyon direnci (şarj transferi sonucu)

C_1 Kaplamanın kapasitansı (çift tabaka oluşumu sonucu)

C_2 Metal yüzeyinin kapasitansı (çift tabaka oluşumu sonucu)

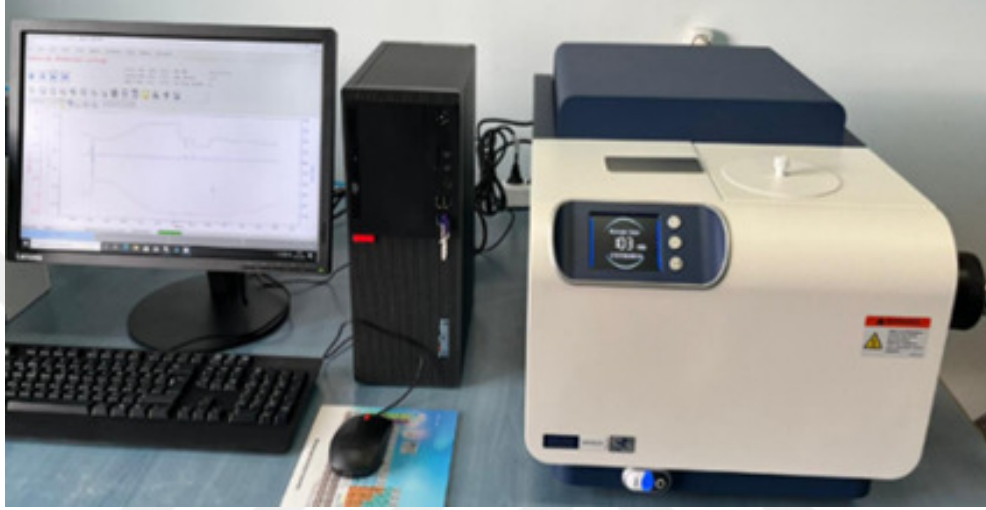
Aşağıdaki şekilde h-BN katkılı epoksi matrisli kompozit numunelerin elektrokimyasal korozyon davranışını incelemeye kullanılan alternatif eşdeğer elektrik devre modelleri görülmektedir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS); korozyon analizi, adsorpsiyon, moleküllerin özellikleri, pillerin ve yakıt hücrelerinin çalışmasını izlemek, boya karakterizasyonu ve sensör üretimi gibi geniş uygulama alanına sahip elektrokimyasal bir tekniktir. Empedans bir elektrik devresindeki akıma karşı direnci ifade etmekte olup ohm (Ω) birimi ile ifade edilir. Empedans ve direnç arasında fark bulunmaktadır. Genel olarak direnç ohm yasasına tabidir. Genel olarak direnç sıfır faz açısına sahip empedans olarak tanımlanabilir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi çalışmalarında, devreye bağlı potansiyostat tarafından sıvı elektrolit içeren korozyon hücresine belirli bir frekans aralığında bir AC voltajı uygulanır ve reel ve imajiner bileşenlere sahip empedans değeri belirlenir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi çalışmalarında, eşdeğer devre modelleri, elektrokimyasal empedans spektroskopis, datalarını yorumlamak ve değerlendirme için kullanılır.



Şekil 3.27. Alternatif eşdeğer elektrik devre modelleri

DSC/TG Analizi

Tez kapsamında alaşımların dönüşüm sıcaklıkları diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC) ile belirlenmiştir ((Hitachi, Nexta DSC200). DSC cihazı, alaşım ısıtılırken alınan veya verilen enerji miktarını tespit eder. DSC cihazı, ısı akışı esaslı ölçüm yapar.



Şekil 3.28: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Cihazı

3.3 HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ

Hesaplama malzeme bilimi kapsamında ilk prensipler esaslı Cambridge sıralı toplam enerji paketi (CASTEP) hesaplama malzeme bilimi yazılımı ve Python yazılımı kullanılmıştır.

Malzemelerin fiziksel, mekanik, elektronik ve manyetik özellikleri incelenmiştir.

Teorik hesaplamalarda ilk prensipler (ab initio) esaslı yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) yaklaşımı kullanılmıştır.

Pseudo-potansiyellerin hesaplanması Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) temelli “Genelleştirilmiş Gradyan Yaklaşımı (GGA)” kullanılarak yapılmıştır.

Elektron-iyon etkileşimleri için ultrasoft pseudo-potansiyeller kullanılmıştır.

Kullanılan kesilim enerjisi (cut-off) 500-600 eV değerindedir.

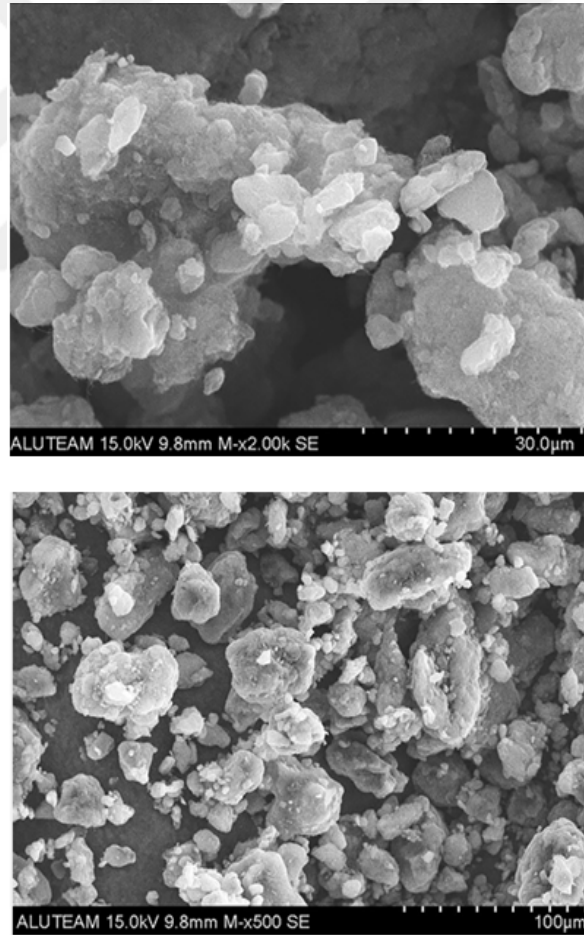
Kullanılan k-noktaları: 8x8x8, ve 12x12x12 *değerindedir*

4 BULGULAR

4.1 MİKROYAPI

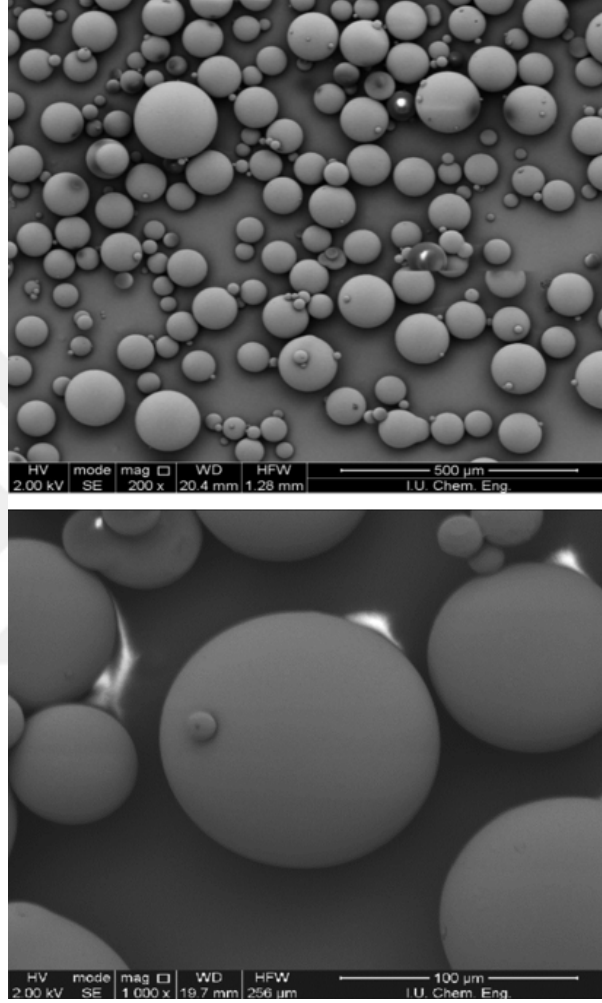
Hammaddeler

Aşağıdaki şekilde numune üretiminde başlangıç malzemesi olarak kullanılan karbon nanotüp (CNT) tozları görülmektedir. Genel olarak kullanılan karbon nanotüp (CNT) tozlarının homojen boyut dağılımına sahip oldukları ve safsızlık çermekler söylenebilir.



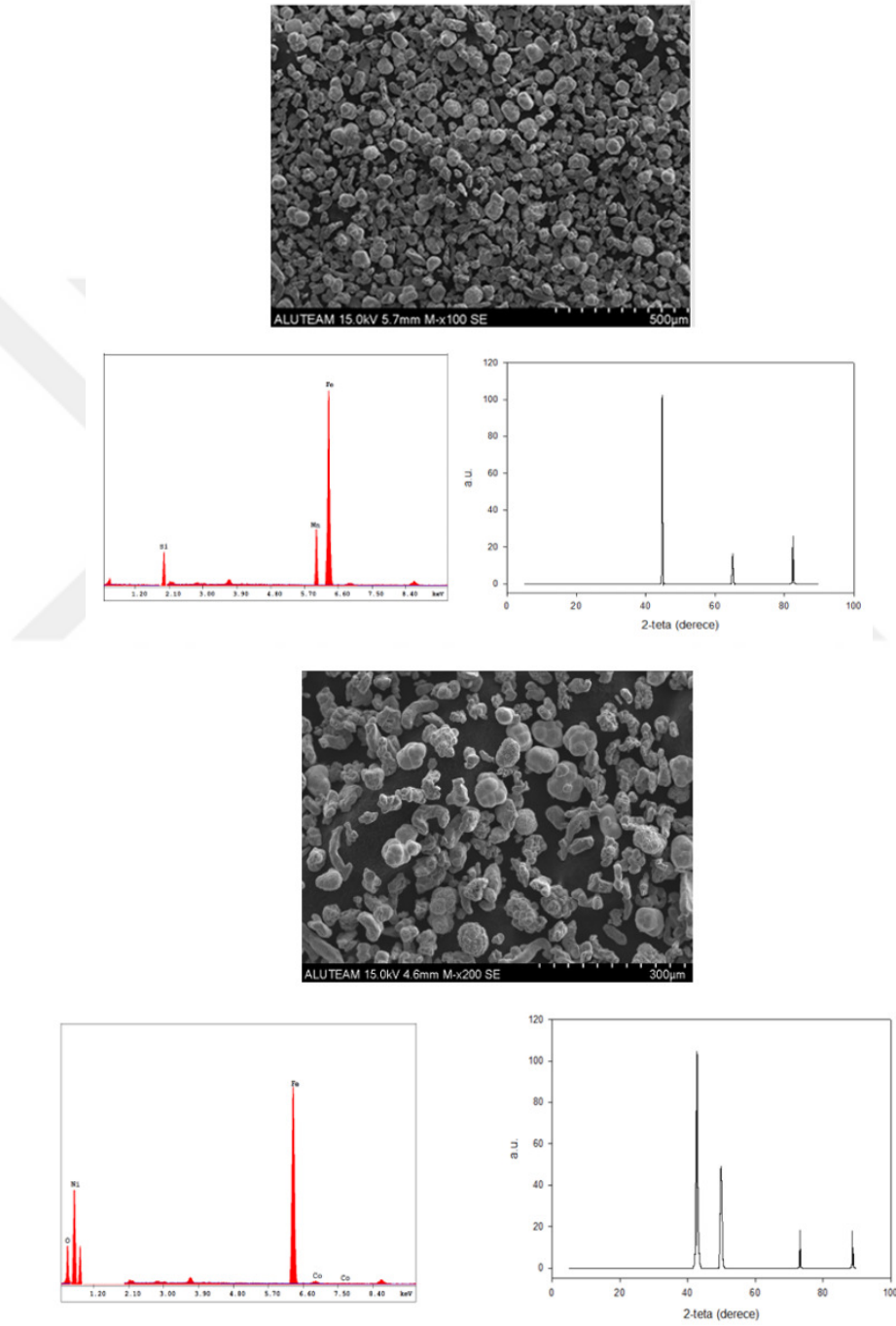
Şekil 4.1 Karbon nano tüp SEM fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde kendi kendini onaran kompozit numune üretiminde kullanılan polimetilmetakrilat (PMMA) tozları görülmektedir. Genel olarak kullanılan polimetilmetakrilat (PMMA) tozlarının homojen boyut dağılımına sahip oldukları söylenebilir. Polimetilmetakrilat (PMMA) tozları görüldüğü gibi boncuk polimerizasyon tekniği ile üretildiklerinden olayı küresel morfolojiye sahiptir.



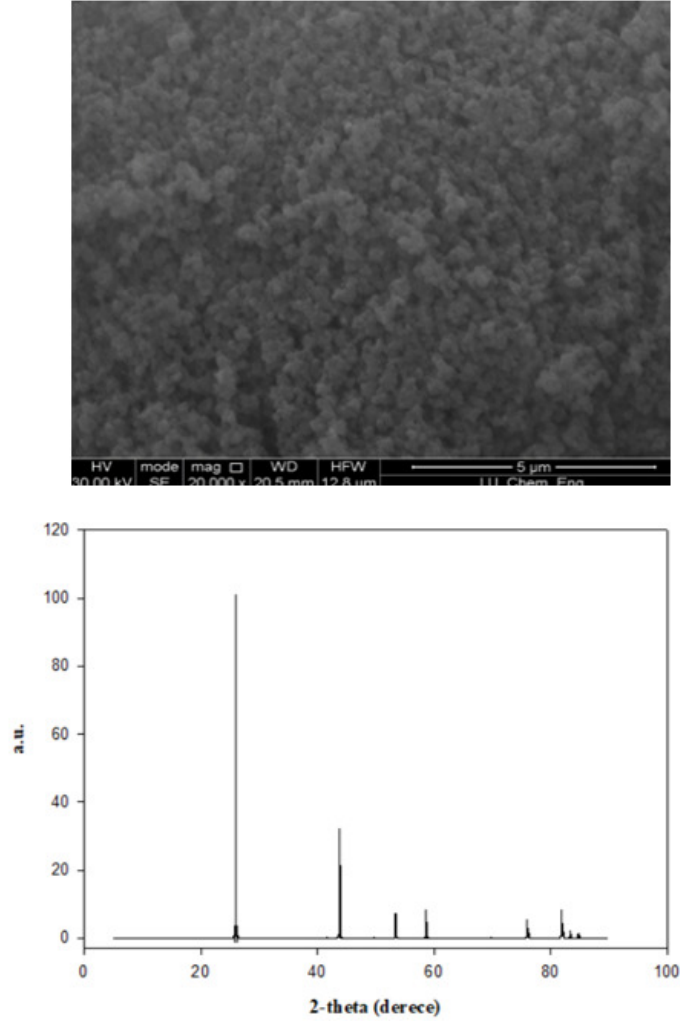
Şekil 4.2 PMMA tozu SEM fotoğrafları

Aşağıdaki şekilde mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) işlemi sonrası şekil bellekli Fe-Ni-Co ve Fe-Mn-Si toz karışımlarının SEM fotoğrafı, EDS ve XRD sonuçları görülmektedir. Bilyeli değirmen içerisinde gerçekleştirilen mekanik alaşımlama işlemi sonucu homojen boyutlu tozların elde edildiği söylenebilir. Oksitlenme ve safsızlık gözlenmemiştir.



Şekil 4.3: Metal tozları SEM fotoğrafları a) Fe-Ni-Co, b) Fe-Mn-Si

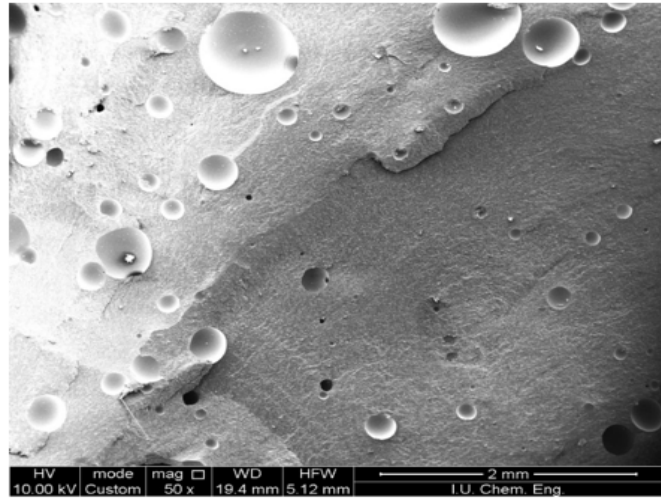
Aşağıdaki şekilde kompozit numunelerin elektrokimyasal korozyon direncini bariyer etkisi ile artırmak için matris içerisine ilave edilen h-BN tozları görülmektedir. Genel olarak kullanılan h-BN tozlarının homojen boyut dağılımına sahip oldukları söylenebilir.



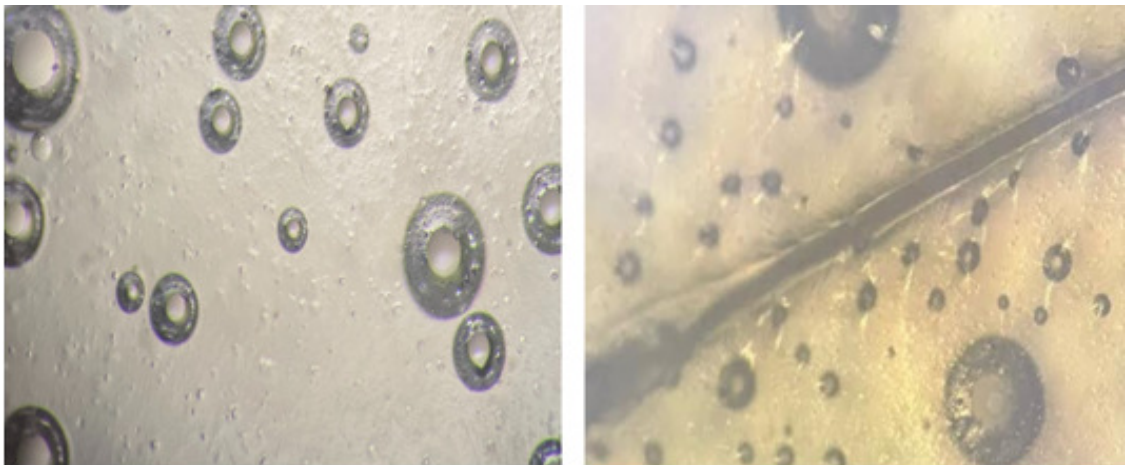
Şekil 4.4: h-BN tozu SEM fotoğrafı ve XRD grafiği

Damlacık (MMA/BPO) Katkılı Kendi-Kendini Onaran Epoksi

Aşağıdaki şekilde sıvı monomer katkılı kendi-kendini onaran PMMA/MMA/BPO takviyeli epoksi matrisli kompozitin SEM fotoğrafları görülmektedir. Sıvı MMA monomerin matris içerisinde PMMA tozları yardımı ile homojen dağıldığı söylenebilir. Ayrıca, BPO başlatıcının epoksi matris içerisinde homojen olarak dağıldığı söylenebilir. Takviyelerin epoksi içerisinde katılması esnasında ilave edilen PVA etkisi ile MMA/PMMA ve BPO parçacıklarının homojen olarak dağıldığı, topaklanma, aglomerasyon ve çökme yaşanmadığı söylenebilir.



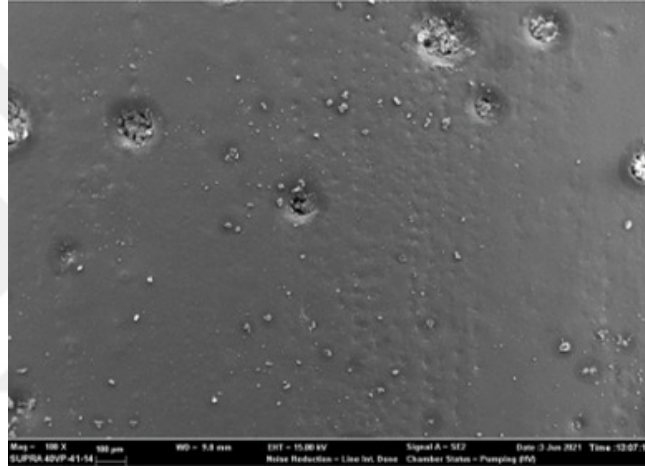
Şekil 4.5: PMMA/MMMA ve BPO katkılı numunenin SEM fotoğrafı



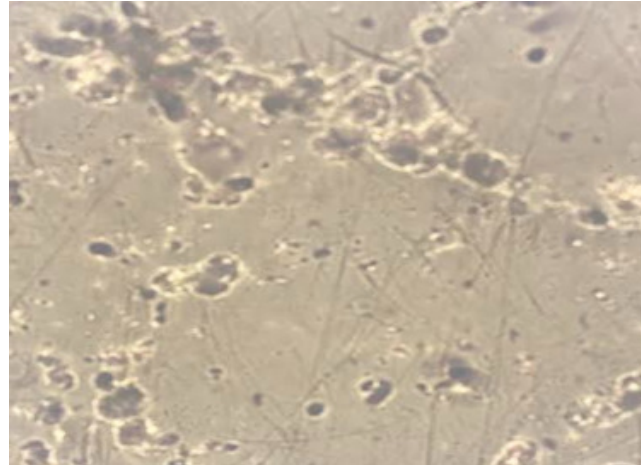
Şekil 4.6: PMMA/MMMA ve BPO katkılı numunenin optik mikroskop fotoğrafları

Dönüşüm Toklaşmalı Demir Tozu Katkılı Kendi-Kendini Onaran Numuneler

Aşağıdaki şekilde östenit-martenzit faz dönüşüm toklaşması mekanizması ile kendi-kendini onaran şekil bellekli metal tozu (Fe-Mn-Si veya Fe-Ni-Co) takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Fe-Mn-Si veya Fe-Ni-Co metal tozlarının epoksi matris içerisinde homojen dağıldığı söylenebilir. Metal tozlarının yüksek yoğunluklarından dolayı, metal tozları viskozitenin en yüksek değerlerde olduğu epoksi reçine oluşumunun (jelleşme) son aşamasında ilave edilmiştir.



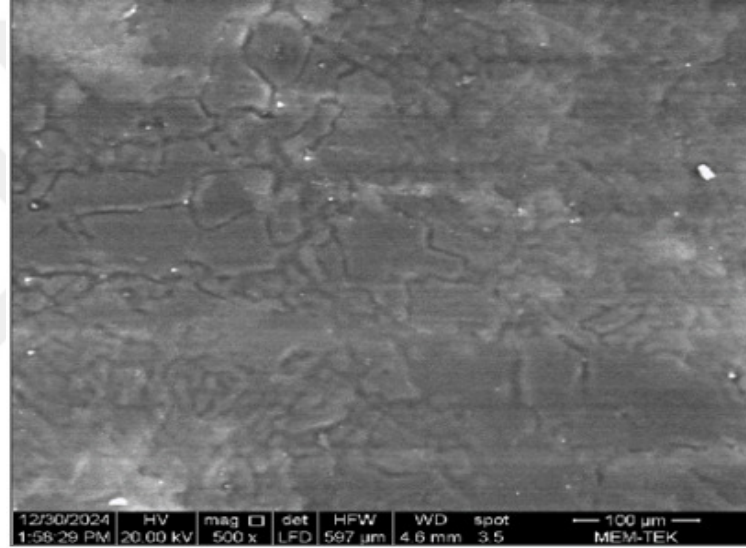
Şekil 4.7: Kompozitlerin SEM fotoğrafları a) FeMnSi katkılı, b) FeNiCo katkılı



Şekil 4.8: Kompozitlerin optik mikroskop fotoğrafları a) FeMnSi katkılı, b) FeNiCo katkılı

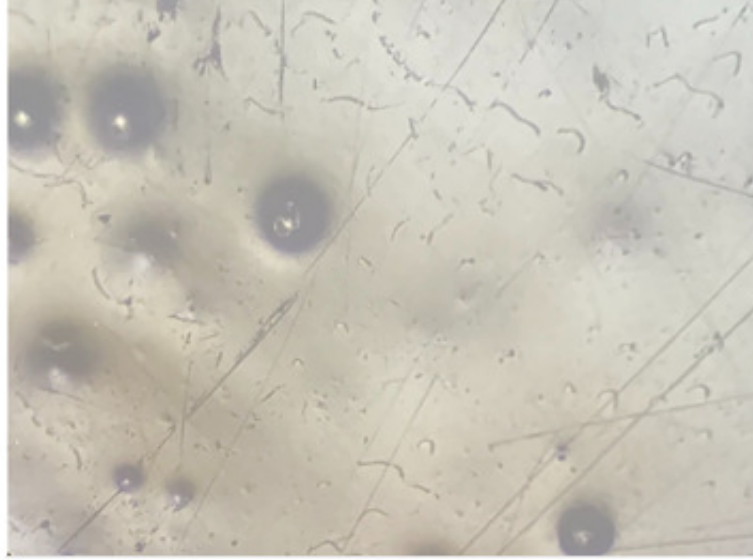
Radar (Mikrodalga) Absorban Malzeme Esaslı Numuneler

Aşağıdaki şekilde radar absorban malzeme (RAM) esaslı şekil bellekli metal tozu (Fe-Mn-Si veya Fe-Ni-Co) ve karbon nanotüp tozu takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları görülmektedir. Metal tozlarının epoksi matris içerisinde homojen dağıldığı söylenebilir. Metal tozlarının yüksek yoğunluklarından dolayı, metal tozları viskozitenin en yüksek değerlerde olduğu epoksi reçine oluşumunun (jelleşme) son aşamasında ilave edilmiştir. Karbon nanotüp tozlarında aglomerasyonun önlenmesi için ultrasonik homojenizatörde hazırlanmış ve ardından epoksiye ilave edilmiştir.



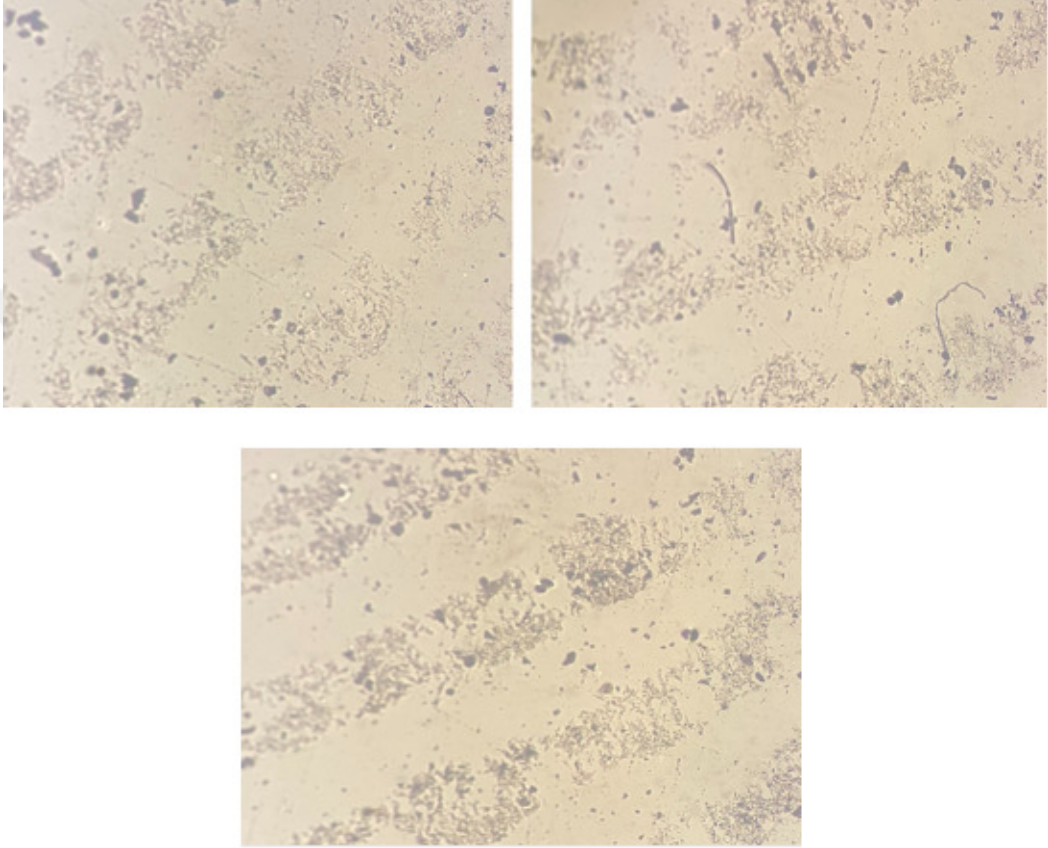
Şekil 4.9: CNT ve FeMnSi tozu katkılı radar absorban malzeme

Aşağıdaki şekilde şekil bellekli ince FeMnSi tozu ve karbon nanotüp (CNT) tozu katkı polimer (epoksi) matrisli kompozit malzemelerin optik mikroskop ile çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflardan da görüldüğü gibi, amaçlandığı gibi elektrik iletkenliği sağlayan karbon nanotüp (CNT) tozlarından oluşan çok ince yollar meydana gelmiştir. Belirli bir miktardan sonra karbon nanotüp (CNT) tozlarından oluşan yollar tozların birbiri ile teması sonucu oluşmakta ve sonuç olarak polimer matrisli kompozit malzeme elektriksel iletkenlik kazanmaktadır. İlave edilen şekil bellekli ince FeMnSi tozu iki farklı görev üstlenmektedir. Öncelikle ilave edilen şekil bellekli ferromanyetik ince FeMnSi tozu mikrodalgaların manyetik bileşeninin absorblanmasını sağlamakta ve polimer matrisli kompozit malzemeye radar absorblama özelliği sağlamaktadır. İkinci olarak şekil bellekli FeMnSi tozu malzeme içerisinde ilerleyen bir çatlak ile karşılaştığında östenit-martenzit faz dönüşümü göstermekte ve faz dönüşümü ile çatlağın ucunda birikmiş olan enerjiyi absorblamaktadır. Böylece şekil bellekli FeMnSi tozu dönüşüm toklaşması mekanizması ile kompozit malzemenin tokluk (darbe absorblama) değerlerini arttırmakta ve kendi-kendini onarma kabiliyeti kazandırmaktadır.



Şekil 4.10. FeMnSi ve CNT katkıli kompozitin optik mikroskop fotoğrafları

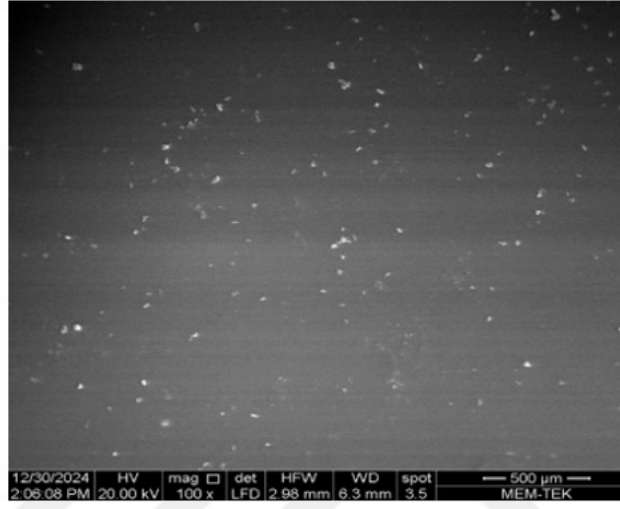
Aşağıdaki şekilde a) % 1, b) % 2, c) % 3 olacak şekilde farklı oranlarda CNT içeren epoksi matrisli kompozitlerin optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Belirli bir oranda karbon nanotüp (CNT) katkısı parçacıklar arasında temas meydana gelmekte ve bunun sonucucu elektriksel iletken yollar (patikalar) oluşmaktadır.



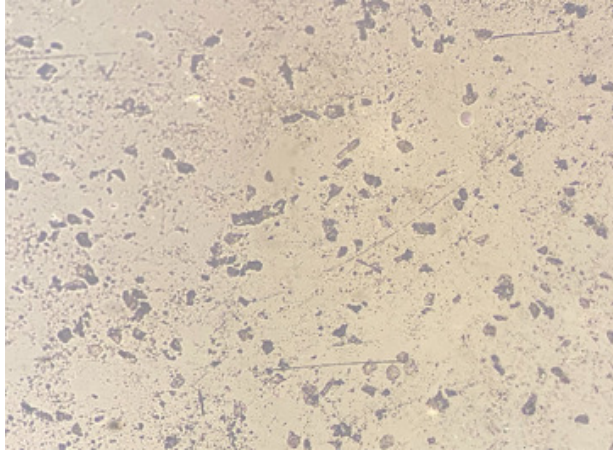
Şekil 4.11: Farklı oranlarda CNT içeren kompozitler a) % 1, b) % 2, c) % 3

h-BN katkılı Antikorozyf Kompozit Numuneler

Aşağıdaki şekilde antikorozyf kaplama amaçlı h-BN tozu takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemenin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları ve optik mikroskop fotoğrafı görülmektedir. Nispeten düşük olan yoğunluğundan dolayı h-BN tozları epoksi matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır.



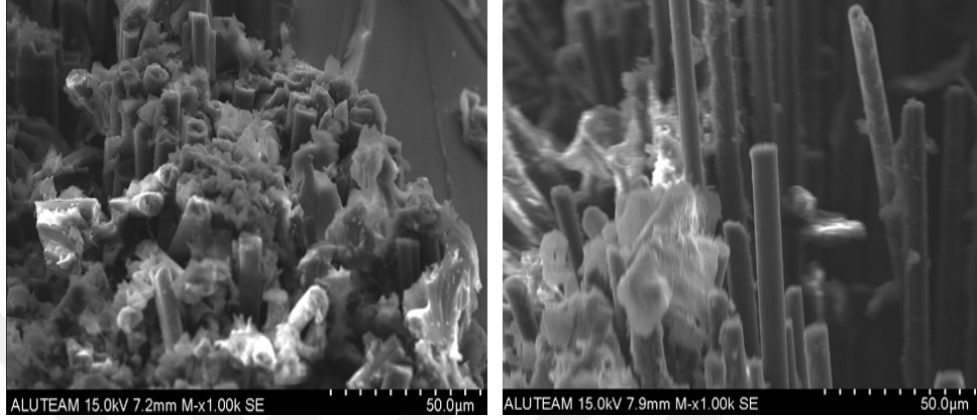
Şekil 4.12: h-BN katkılı antikorozyf kompozit SEM fotoğrafları



Şekil 4.13: h-BN katkılı antikorozyf kompozit optik mikroskop fotoğrafı

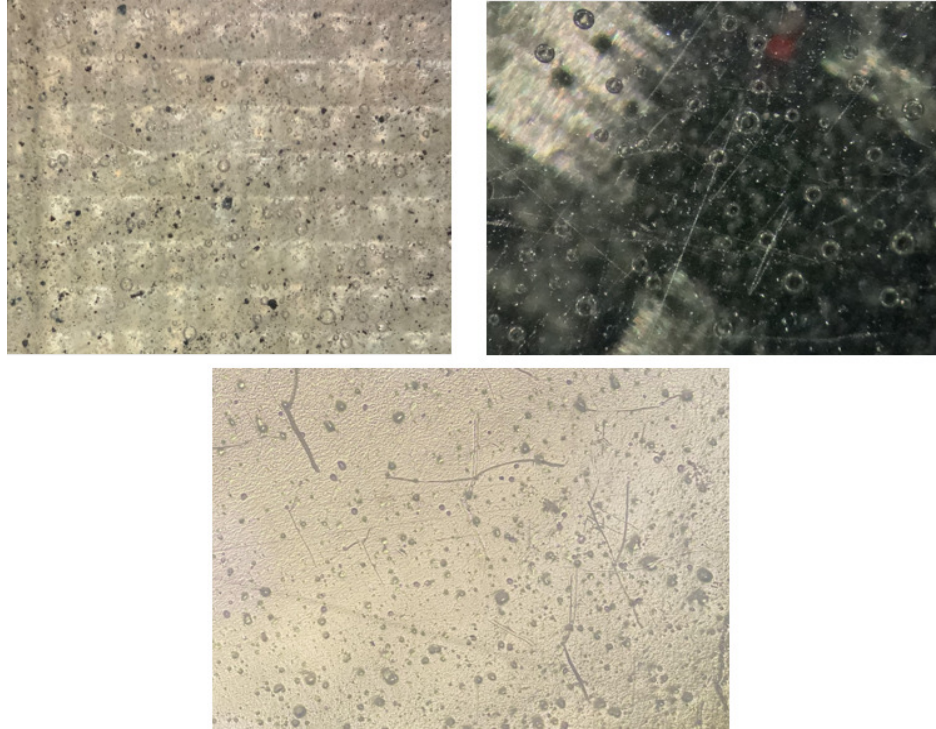
Sentetik Fiber Katkılı Kompozitler

Aşağıdaki şekilde a) karbon fiber katkı, b) cam fiber katkı epoksi matrisli kompozit numunelerin SEM mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Cam fiber ve karbon fiberler epoksi matris tarafından ıslatılmıştır.



Şekil 4.14: Sentetik fiber katkıli numunelerin SEM görüntüleri a) karbon fiber, b) cam fiber

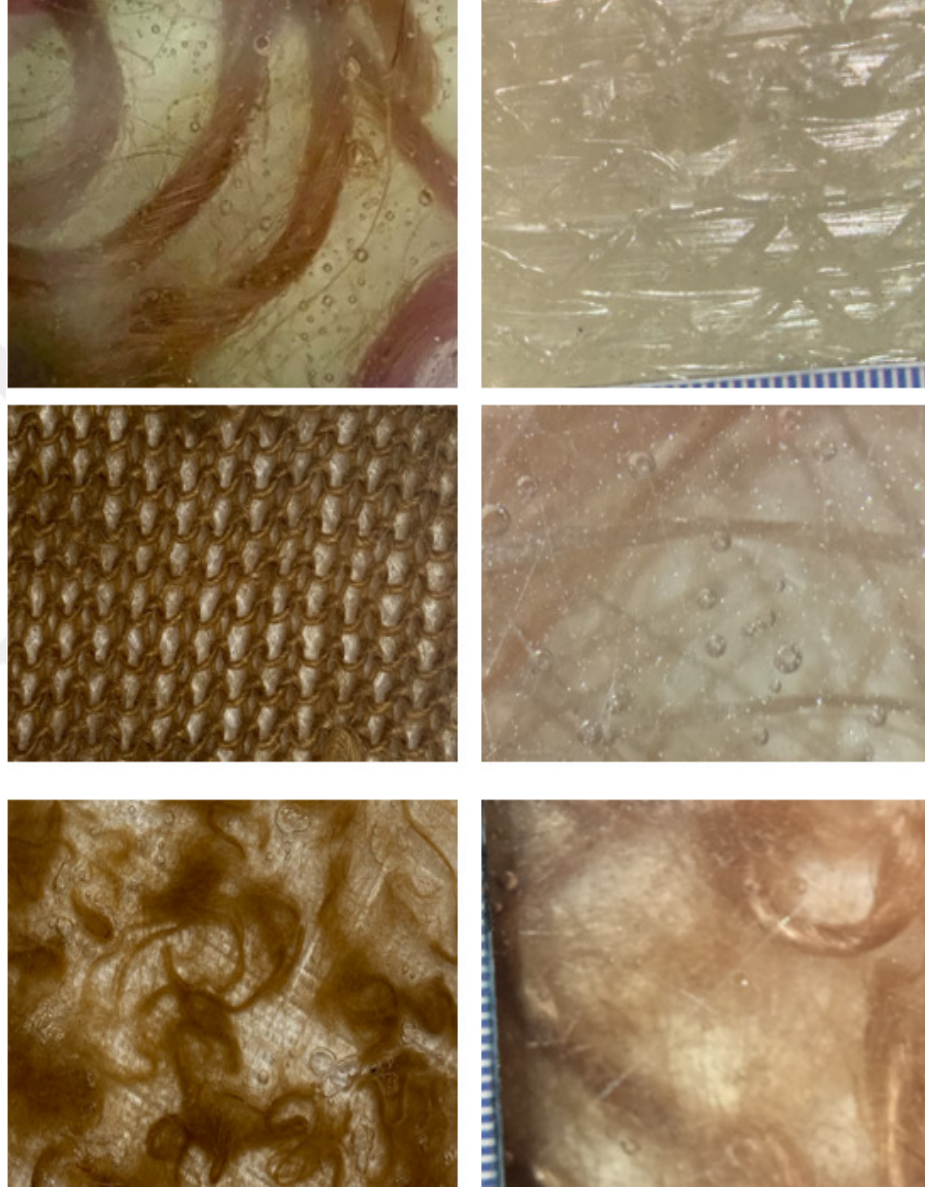
Aşağıdaki şekilde a) karbon fiber katkı, b) cam fiber katkı epoksi matrisli kompozit numunelerin optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.15: Sentetik fiber katkıli numunelerin fotoğrafları a) örgülü karbon, b) kırılmış cam

Doğal Fiber Katkılı Kompozitler

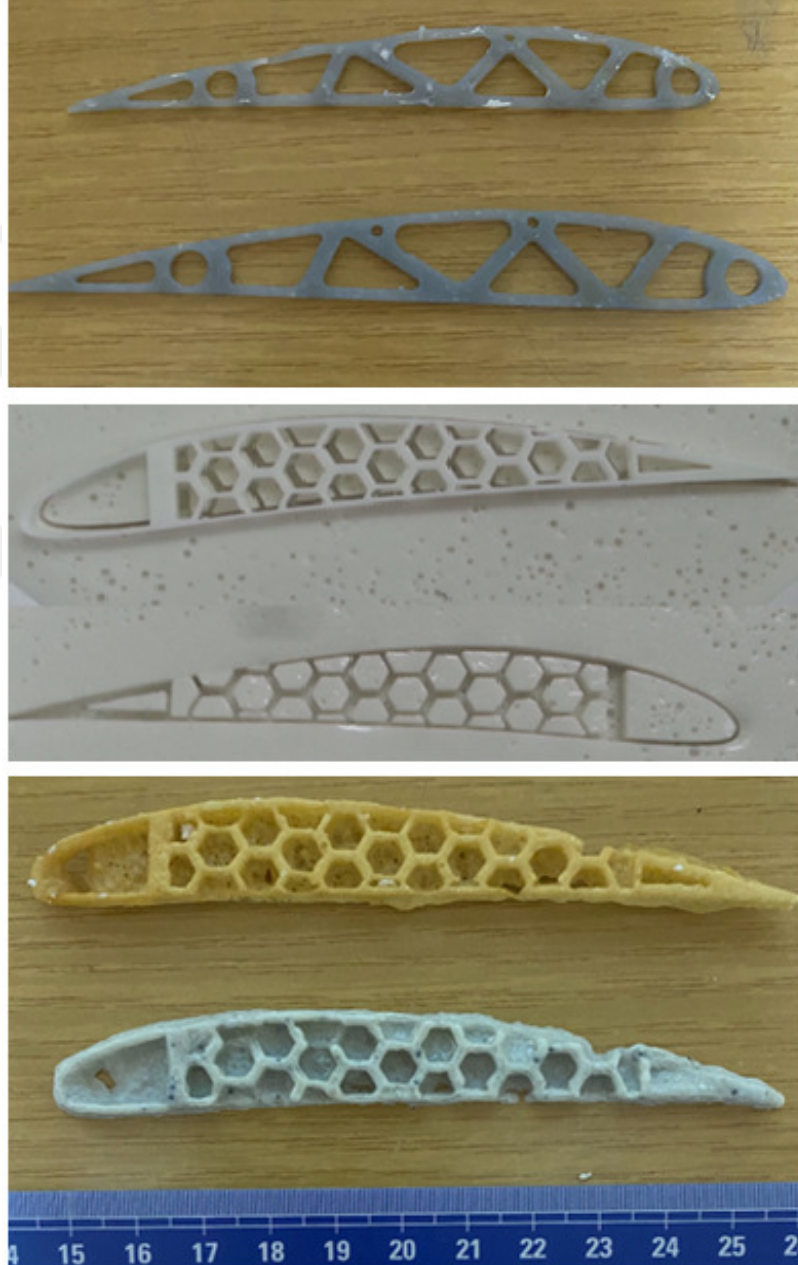
Aşağıdaki şekilde doğal fiber (kenevir) katkılı epoksi matrisli kompozit numunelerin optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.16: Doğal fiber (kenevir) katkılı numunelerin optik mikroskop fotoğrafları

Eklemeli İmalat-Replika Tekniği ile Üretilen Prototipler

Aşağıdaki şekilde üretilen eklemeli imalat-replika tekniğ ile üretilen prototiplerin fotoğrafları görölmektedir. Şekilde a) eklemeli imalat ile üretilmiş modeller, b) aljinat kalıp, c) takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme görölmektedir.



Şekil 4.17. Prototip üretimi aşamaları

4.2 MEKANİK ÖZELLİKLER

Artan grafen ve karbon nanotüp (CNT) miktarı ile epoksi matrisli kompozitlerin elastisite modülü değerleri, sertlik değerleri ve darbe enerjisi absorblama değerleri artmıştır. Elastisite modülündeki ve sertlikteki artış CNT ve grafenin yüksek elastisite modülü ve sertlik değerlerine bağlanmıştır. CNT ve grafen katkısı sonucu darbe enerjisindeki artış h-BN katkılı numunelerde gerçekleşmemiştir. Aşağıdaki şekilde antikorozyon kompozit malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 4.1. Antikorozyon kompozit malzemeler

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV3)	Darbe Direnci (kJ/m ²)
Epoksi	3.4	20	40
Epoksi-1 h-BN	3.4	21	41
Epoksi-2 h-BN	3.5	22	41
Epoksi-3 h-BN	3.5	22	40
Epoksi-4 h-BN	3.5	24	39
Epoksi-1 Grafen	3.6	22	40
Epoksi-2 Grafen	3.7	24	42
Epoksi-3 Grafen	3.7	25	45
Epoksi-4 Grafen	4.2	26	52
Epoksi-1CNT-1 h-BN	3.5	23	44
Epoksi-1CNT-2 h-BN	3.5	23	43
Epoksi-1CNT-3 h-BN	3.6	24	43
Epoksi-1CNT-4 h-BN	3.6	25	42
Epoksi-1CNT-1Fe-1 h-BN	3.5	24	44
Epoksi-1CNT-1Fe-2 h-BN	3.5	25	44
Epoksi-1CNT-1Fe-3 h-BN	3.5	26	43
Epoksi-1CNT-1Fe-4 h-BN	3.5	26	42

Aşağıdaki şekilde radar (mikrodalga) absorban amaçlı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir. FeMnSi ve FeNiCo tozu ilavesi elastisite modülü, sertlik ve darbe direnci değerlerini artırmıştır. CNT tozu ve grafen tozu ilavesi elastisite modülü, sertlik ve darbe direnci değerlerini artırmıştır.

Tablo 4.2. Radar absorban kompozit malzemeler

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV3)	Darbe Direnci (kJ/m ²)
Epoksi	3.4	20	40
Epoksi -1CNT	3.6	23	41
Epoksi -1Grafen	3.6	22	40
Epoksi -1FeMnSi	3.5	23	42
Epoksi -1FeNiCo	3.5	23	42
Epoksi -1Fe	3.4	21	40
Epoksi -1 CNT - 1FeMnSi	3.5	24	41
Epoksi -2 CNT - 1FeMnSi	3.5	24	41
Epoksi -3 CNT - 1FeMnSi	3.6	25	42
Epoksi -4 CNT - 1FeMnSi	3.6	25	42
Epoksi -1 CNT - 1FeNiCo	3.4	24	42
Epoksi -2 CNT - 1FeNiCo	3.5	24	42
Epoksi -3 CNT - 1FeNiCo	3.7	24	42
Epoksi -4 CNT - 1FeNiCo	3.8	25	43
Epoksi -1 Grafen - 1FeMnSi	3.5	23	41
Epoksi -2 Grafen - 1FeMnSi	3.5	24	41
Epoksi -3 Grafen - 1FeMnSi	3.6	24	42
Epoksi -4 Grafen - 1FeMnSi	3.8	24	44
Epoksi -1 Grafen - 1FeNiCo	3.4	24	42
Epoksi -2 Grafen - 1FeNiCo	3.6	24	42
Epoksi -3 Grafen - 1FeNiCo	3.6	25	42
Epoksi -4 Grafen - 1FeNiCo	3.9	25	43
Epoksi -1CNT - 1Fe	3.5	22	39
Epoksi -1Grafen -1Fe	3.5	21	40

Aşağıdaki şekilde faz dönüşümlü şekil bellekli toz takviyeli ve damlacık takviyeli kendi-kendini onaran kompozit malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir. Şekil bellekli FeMnSi ve FeNiCo tozu ilavesi epoksi matrisli kompozitin elastisite modülü, sertlik ve darbe direnci değerlerini artırmıştır. Özellikle darbe direncinde yaşanan yüksek artış faz dönüşüm etkisine bağlanmıştır. Ayrıca, artan FeMnSi ve FeNiCo tozu miktarı ile mekanik özelliklerde artış meydana gelmiştir.

Sıvı monomer (damlacık) katkılı kendi-kendini onaran kompozitlerde elastisite modülü ve sertlikte az da olsa bir düşüş meydana gelmiş, darbe enerjisinde önemli bir değişim yaşanmamıştır. Sıvı monomer (damlacık) katkılı kendi-kendini onaran kompozitlerde onarma mekanizmasının uzun bir süreç almasından dolayı darbe direnci ve mekanik özelliklerde artış gerçekleşmemiştir.

Tablo 4.3. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitler

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV3)	Darbe Direnci (kJ/m ²)
Epoksi	3.4	20	40
Epoksi-0.5FeMnSi	3.4	20	40
Epoksi-1.0FeMnSi	3.4	22	42
Epoksi-1.5FeMnSi	3.6	24	45
Epoksi-2.0FeMnSi	3.5	25	49
Epoksi-0.5FeNiCo	3.4	21	41
Epoksi-1.0FeNiCo	3.5	23	43
Epoksi-1.5FeNiCo	3.6	25	47
Epoksi-2.0FeNiCo	3.6	28	52

Tablo 4.4. Damlacık katkılı kendi-kendini onaran kompozitler

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV3)	Darbe Direnci (kJ/m ²)
Epoksi	3.4	20	40
Epoksi-1MMA/BPO	3.4	20	40
Epoksi-2MMA/BPO	3.3	19	41
Epoksi-6MMA/BPO	3.3	18	42
Epoksi-8MMA/BPO	3.1	19	42

Aşağıdaki şekilde örgülü ve kırılmış sentetik ve doğal fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir. Cam fiber ve karbon fiber ilavesi elastisite modülü, sertlik ve darbe direnci değerlerini artırmıştır.

Tablo 4.5. Fiber katkılı kompozitler

	Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (HV3)	Darbe Direnci (kJ/m ²)
Sentetik Fiber	Epoksi	3.4	20	40
	Epoksi-4Cam fiber (kırılmış)	3.6	22	64
	Epoksi-8Cam fiber (kırılmış)	3.5	20	71
	Epoksi-8Cam fiber (örgülü)	3.6	23	89
	Epoksi-4Karbon fiber (kırılmış)	3.5	23	55
	Epoksi-8Karbon fiber (kırılmış)	3.5	24	62
	Epoksi-8Karbon fiber (örgülü)	3.5	20	77
	Epoksi-4Kenevir (kırılmış)	3.4	22	50
Doğal Fiber	Epoksi-8Kenevir (kırılmış)	3.5	22	58
	Epoksi-8Kenevir (örgülü)	3.5	22	65
	Epoksi-1CNT-1Fe-8Kenevir (kırılmış)	3.5	22	55
	Epoksi-1CNT-1Fe-8Kenevir (örgülü)	3.5	22	60

Dinamik Mekanik Analiz (DMA) Sonuçları

Dinamik mekanik analiz polimer veya polimer matrisli kompozit malzemelerin viskoelastik özelliklerini zamana, sıcaklığa, frekansa veya bunların kombinasyonuna bağlı olarak belirlenmesinde kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir.

Tez kapsamında çeşitli katkıların (CNT, grafen, h-BN, FeMnSi tozu, FeNiCo tozu) polimer matrisli kompozit numunelerin depolama modülü (storage modulus, E^I) ve kayıp modülü (loss modulus, E^{II}) değerlerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, katkıların polimer matrisli kompozit numunelerin camsı geçiş sıcaklığı ve tan delta (faz farkı) değerlerine etkileri araştırılmıştır.

Genel olarak, depolama modülü (E^I) elastik gerilmenin elastik genlemeye oranı olarak tanımlanabilir. Depolama modülü bir malzemenin rijitliğinin ölçüsüdür. Depolama modülü polimerlerin elastik karakterlerinin ölçüsüdür.

Kayıp modülü (E^{II}) malzeme içerisinde genellikle sürtünme yoluyla kaybedilen (harcanan) enerjiyi temsil etmektedir. Kayıp modülü polimerlerin viskoz karakterlerinin ölçüsüdür.

Faz farkı (tan delta), kayıp modülünün (E^{II}) depolama modülüne (E^I) oranıdır ve malzeme uyumunu ifade eder.

Faz farkının en yüksek değerde olduğu sıcaklık seviyesine polimer malzemenin camsı geçiş sıcaklığı denir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g), polimerin malzemelerin gevrek/kırılgan fazdan yumuşak/sünek faza geçiş yaptığı sıcaklıktır. Kırılgan olan amorf fazında yumuşak kauçuk karakterli faza dönüştüğü sıcaklıktır.

Aşağıdaki antikorozyf kompozitlere ait DMA verilerini içeren tabloda görüldüğü gibi, artan grafen, hBN miktarı ile beraber depolama modülü (E^I) ve kayıp modülünde (E^{II}) artış faz farkında ($\tan \delta$) azalış meydana gelmiştir. Ayrıca camı geçiş sıcaklığında artış yaşanmıştır.

Tablo 4.6. Antikorozyf kompozit malzemelerin DMA sonuçları

Malzeme	Depolama Modülü, E^I (GPa)	Kayıp Modülü, E^{II} (MPa)	T _g (°C)
Epoksi	1.6	180	37
Epoksi-1 h-BN	2.1	200	40
Epoksi-2 h-BN	3.0	320	45
Epoksi-3 h-BN	5.4	480	52
Epoksi-4 h-BN	7.2	560	59
Epoksi-1 Grafen	2.3	240	42
Epoksi-2 Grafen	3.2	370	48
Epoksi-3 Grafen	5.7	520	54
Epoksi-4 Grafen	7.8	580	65
Epoksi-1CNT-1 h-BN	2.4	220	43
Epoksi-1CNT-2 h-BN	3.3	330	48
Epoksi-1CNT-3 h-BN	5.8	489	55
Epoksi-1CNT-4 h-BN	7.4	570	63
Epoksi-1CNT-1Fe-1 h-BN	2.4	220	44
Epoksi-1CNT-1Fe-2 h-BN	3.3	331	48
Epoksi-1CNT-1Fe-3 h-BN	5.8	488	56
Epoksi-1CNT-1Fe-4 h-BN	7.5	570	65

Aşağıdaki radar absorban amaçlı kompozitlere ait DMA verilerini içeren tabloda görüldüğü gibi, artan grafen ve CNT miktarı ile beraber depolama modülü (E^I) ve kayıp modülünde (E^{II}) artış faz farkında (tan delta) azalış meydana gelmiştir. Ayrıca camı geçiş sıcaklığında artış yaşanmıştır. Ek olarak FeMnSi ve FeNiCo tozu ilavesi depolama modülü (E^I) ve kayıp modülünde (E^{II}) artış faz farkında (tan delta) azalış meydana getirmiştir.

Tablo 4.7. Radar absorban kompozit malzemelerin DMA sonuçları

Malzeme	Depolama Modülü, E^I (GPa)	Kayıp Modülü, E^{II} (GPa)	Tg (°C)
Epoksi	1.6	180	37
Epoksi-1CNT	2.4	258	44
Epoksi-1Grafen	2.3	240	42
Epoksi-1FeMnSi	1.7	199	39
Epoksi-1FeNiCo	1.8	201	39
Epoksi-1Fe	1.6	187	38
Epoksi-1 CNT- 1FeMnSi	1.2	182	37
Epoksi-2 CNT- 1FeMnSi	2.0	187	41
Epoksi-3 CNT- 1FeMnSi	2.0	191	44
Epoksi-4 CNT- 1FeMnSi	2.4	199	46
Epoksi-1 CNT- 1FeNiCo	1.9	188	39
Epoksi-2 CNT- 1FeNiCo	2.1	191	43
Epoksi-3 CNT- 1FeNiCo	2.3	199	48
Epoksi-4 CNT- 1FeNiCo	2.6	213	50
Epoksi-1 Grafen-1FeMnSi	1.1	180	36
Epoksi-2 Grafen-1FeMnSi	2.0	185	41
Epoksi-3 Grafen-1FeMnSi	2.1	190	43
Epoksi-4 Grafen-1FeMnSi	2.1	196	44
Epoksi-1 Grafen-1FeNiCo	1.8	187	40
Epoksi-2 Grafen-1FeNiCo	2.0	189	42
Epoksi-3 Grafen-1FeNiCo	2.2	196	48
Epoksi-4 Grafen-1FeNiCo	2.4	210	50
Epoksi-1CNT-1Fe	2.4	266	49
Epoksi-1Grafen-1Fe	2.4	243	45

Aşağıdaki şekil bellekli metal tozu katkılı kompozitlere ait DMA verilerini içeren tabloda görüldüğü gibi, artan FeMnSi ve FeNiCo tozu miktarı ile beraber depolama modülü (E^I) ve kayıp modülünde (E^{II}) artış faz farkında (tan delta) azalış meydana gelmiştir. Ayrıca camı geçiş sıcaklığında artış yaşanmıştır.

Tablo 4.8. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitlerin DMA sonuçları

Malzeme	Depolama Modülü, E^I (GPa)	Kayıp Modülü, E^{II} (GPa)	Tg (°C)
Epoksi	1.6	180	37
Epoksi-0.5FeMnSi	1.6	181	37
Epoksi-1.0FeMnSi	1.7	184	40
Epoksi-1.5FeMnSi	1.9	190	42
Epoksi-2.0FeMnSi	2.0	197	45
Epoksi-0.5FeNiCo	1.7	181	37
Epoksi-1.0FeNiCo	1.9	185	40
Epoksi-1.5FeNiCo	2.0	192	44
Epoksi-2.0FeNiCo	2.0	202	47

Tablo 4.9. Damlacık katkılı kendi-kendini onaran kompozitlerin DMA sonuçları

Malzeme	Depolama Modülü, E^I (GPa)	Kayıp Modülü, E^{II} (GPa)	Tg (°C)
Epoksi	1.6	180	37
Epoksi-1MMA/BPO	1.6	179	38
Epoksi-2MMA/BPO	1.5	177	38
Epoksi-6MMA/BPO	1.5	176	38
Epoksi-8MMA/BPO	1.2	170	37

Tablo 4.10. Fiber katkılı kompozitlerin DMA sonuçları

	Malzeme	Depolama Modülü, E^I (GPa)	Kayıp Modülü, E^{II} (GPa)	Tg (°C)
Sentetik	Epoksi	1.6	180	37
	Epoksi-4Cam fiber (kırılmış)	7.7	600	65
	Epoksi-8Cam fiber (kırılmış)	8.1	670	66
	Epoksi-8Cam fiber (örgülü)	8.8	700	66
	Epoksi-4Karbon fiber (kırılmış)	7.7	680	65
	Epoksi-8Karbon fiber (kırılmış)	8.9	720	66
	Epoksi-8Karbon fiber (örgülü)	9.6	789	67
	Epoksi-4Kenevir (kırılmış)	4.9	390	49
Doğal Fiber	Epoksi-8Kenevir (kırılmış)	5.2	419	52
	Epoksi-8Kenevir (örgülü)	5.5	449	55
	Epoksi-1CNT-1Fe-8Kenevir (kırılmış)	5.7	480	54
	Epoksi-1CNT-1Fe-8Kenevir (örgülü)	5.9	498	58

DSC Sonuçları

Aşağıdaki tablolarda katkı oranının epoksi matrisli kompozit numunelerin DSC grafiklerine etkisi görülmektedir. Karbon nanotüp (CNT), grafen, hBN ve FeMnSi/FeNiCo tozu katkısının camısı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığının (T_m) artmasına neden olduğu görülmektedir. Artışın nedeninin karbon nanotüp (CNT), grafen, hBN ve FeMnSi/FeNiCo tozu yüksek erime sıcaklığı olduğu düşünülmektedir. Genel olarak tüm katkılar epoksinin T_g ve T_m sıcaklıklarının artmasına neden olmuştur.

Tablo 4.11. Antikorozyf kompozit malzemeler

Malzeme	T_g (°C)	T_m (°C)
Epoksi	37	119
Epoksi-1 h-BN	41	120
Epoksi-2 h-BN	47	122
Epoksi-3 h-BN	55	124
Epoksi-4 h-BN	61	125
Epoksi-1 Grafen	46	121
Epoksi-2 Grafen	49	124
Epoksi-3 Grafen	56	125
Epoksi-4 Grafen	69	126
Epoksi-1CNT-1 h-BN	44	122
Epoksi-1CNT-2 h-BN	49	123
Epoksi-1CNT-3 h-BN	57	123
Epoksi-1CNT-4 h-BN	65	124
Epoksi-1CNT-1Fe-1 h-BN	45	123
Epoksi-1CNT-1Fe-2 h-BN	48	125
Epoksi-1CNT-1Fe-3 h-BN	57	126
Epoksi-1CNT-1Fe-4 h-BN	67	126

Tablo 4.12. Radar absorban kompozit malzemeler

Malzeme	T _g (°C)	T _m (°C)
Epoksi	37	119
Epoksi-1CNT	45	122
Epoksi-1Grafen	42	122
Epoksi-1FeMnSi	40	123
Epoksi-1FeNiCo	39	123
Epoksi-1Fe	38	123
Epoksi-1 CNT- 1FeMnSi	39	124
Epoksi-2 CNT- 1FeMnSi	41	124
Epoksi-3 CNT- 1FeMnSi	45	125
Epoksi-4 CNT- 1FeMnSi	49	126
Epoksi-1 CNT-1FeNiCo	41	122
Epoksi-2 CNT- 1FeNiCo	42	124
Epoksi-3 CNT- 1FeNiCo	49	124
Epoksi-4 CNT- 1FeNiCo	51	127
Epoksi-1 Grafen- 1FeMnSi	38	125
Epoksi-2 Grafen- 1FeMnSi	43	125
Epoksi-3 Grafen- 1FeMnSi	44	126
Epoksi-4 Grafen- 1FeMnSi	48	126
Epoksi-1 Grafen- 1FeNiCo	42	123
Epoksi-2 Grafen- 1FeNiCo	46	124
Epoksi-3 Grafen- 1FeNiCo	50	124
Epoksi-4 Grafen- 1FeNiCo	53	126
Epoksi-1CNT-1Fe	49	123
Epoksi-1Grafen-1Fe	47	123

Tablo 4.13. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitler

Malzeme	T _g (°C)	T _m (°C)
Epoksi	37	119
Epoksi-0.5FeMnSi	38	119
Epoksi-1.0FeMnSi	40	120
Epoksi-1.5FeMnSi	43	120
Epoksi-2.0FeMnSi	44	122
Epoksi-0.5FeNiCo	37	120
Epoksi-1.0FeNiCo	41	120
Epoksi-1.5FeNiCo	44	122
Epoksi-2.0FeNiCo	48	124

Tablo 4.14. Damlacık katkılı kendi-kendini onaran kompozitler

Malzeme	T _g (°C)	T _m (°C)
Epoksi	37	119
Epoksi-1MMA/BPO	39	119
Epoksi-2MMA/BPO	39	120
Epoksi-6MMA/BPO	39	122
Epoksi-8MMA/BPO	37	126

Tablo 4.15. Fiber katkılı kompozitler

	Malzeme	T _g (°C)	T _m (°C)
	Epoksi	37	119
Sentetik Fiber	Epoksi-4Cam fiber (kırpılmış)	65	123
	Epoksi-8Cam fiber (kırpılmış)	67	124
	Epoksi-8Cam fiber (örgülü)	67	-
	Epoksi-4Karbon fiber (kırpılmış)	66	125
	Epoksi-8Karbon fiber (kırpılmış)	67	126
	Epoksi-8Karbon fiber (örgülü)	69	-
Doğal Fiber	Epoksi-4Kenevir (kırpılmış)	50	122
	Epoksi-8Kenevir (kırpılmış)	53	123
	Epoksi-8Kenevir (örgülü)	55	-
	Epoksi-1CNT-1Fe-8Kenevir (kırpılmış)	54	125
	Epoksi-1CNT-1Fe-8Kenevir (örgülü)	58	-

4.3 MİKRODALGA ABSORBLAMA SONUÇLARI

Aşağıdaki tablolarda katkılı epoksi matrisli kompozitlerin VNA cihazı ile ölçülmüş mikrodalga zayıflama (kayıp) ve absorbands değerlerinin ilave miktarına göre değişimi görülmektedir. Ayrıca gaussmetre ile ölçülen manyetiklik ve girdap akımları cihazı ile ölçülen elektriksel iletkenlik değerleri de verilmektedir. Artan karbon nanotüp tozu miktarı ile epoksi matrisli kompozitlerin mikrodalga zayıflama değerleri (insertion loss, dB) ve mikrodalga absorbands değerleri (absorbance, dB) beklenildiği gibi artış göstermiştir. Şekil bellekli FeMnSi/FeNiCo tozu ilavesi de epoksi matrisli kompozitlerin zayıflama ve absorbands değerlerini daha da artırmıştır. CNT ve grafen katkıları mikrodalga zayıflama ve absorbands açısından birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Grafen ilavesi ile karbon nanotüp (CNT) tozlarına kıyasla bir miktar daha fazla elektriksel iletkenlik elde edilmiştir. FeNiCo tozlarının zayıflama ve absorbands değerleri FeMnSi tozlarına göre bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. FeNiCo tozlarının manyetiklik değerleri de FeMnSi tozlarına göre daha yüksektir.

Tablo 4.16. Radar absorban kompozit malzemelerin VNA sonuçları

Malzeme	Kayıp (dB)	Absorbans (dB)	Manyetiklik (mT)	İletkenlik (IACS)
Epoksi	-	-	-	-
Epoksi-1CNT	11	5	51	0.7
Epoksi-1Grafen	10	6	55	0.9
Epoksi-1FeMnSi	3	2	69	0.1
Epoksi-1FeNiCo	4	2	70	0.1
Epoksi-1Fe	3	1	77	0.1
Epoksi-1 CNT-1FeMnSi	63	32	90	0.7
Epoksi-2 CNT- 1FeMnSi	64	33	91	0.9
Epoksi-3 CNT- 1FeMnSi	66	34	99	1.1
Epoksi-4 CNT- 1FeMnSi	72	38	102	1.2
Epoksi-1 CNT-1FeNiCo	64	34	92	0.7
Epoksi-2 CNT- 1FeNiCo	66	34	98	0.9
Epoksi-3 CNT- 1FeNiCo	69	37	108	1.1
Epoksi-4 CNT- 1FeNiCo	74	41	114	1.3
Epoksi-1 Grafen-1FeMnSi	60	31	90	1.0
Epoksi-2 Grafen-1FeMnSi	63	33	93	1.1
Epoksi-3 Grafen-1FeMnSi	64	33	100	1.4
Epoksi-4 Grafen-1FeMnSi	71	36	106	1.5
Epoksi-1 Grafen-1FeNiCo	63	32	91	1.0
Epoksi-2 Grafen-1FeNiCo	64	33	96	1.5
Epoksi-3 Grafen-1FeNiCo	67	35	105	1.5
Epoksi-4 Grafen-1FeNiCo	74	40	112	1.6
Epoksi-1CNT-1Fe	63	32	85	0.7
Epoksi-1Grafen-1Fe	60	31	88	0.9

4.4 KOROZYON SONUÇLARI

Aşağıdaki tablolarda katkı miktarının EIS testi ile belirlenmiş korozyon parametrelerine (R_1 , C_1 , R_2 , C_2) ve Tafel testi ile belirlenmiş korozyon hızına etkisi görülmektedir. EIS testinde kullanılan eşdeğer elektrik devre modelinde R_s kullanılan çözeltinin direncini ifade eder. R_1 polimer matrisli kompoit kaplamanın şarj/yük transferi sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. R_2 metal (alüminyum) yüzeyinin kinetik olarak kontrol edilen şarj/yük transferi sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. Elektrokimyasal reaksiyonların mekanizmasının aydınlatılması açısından faydalı bilgiler sunar. C_1 polimer matrisli kompoit kaplamanın çift tabaka oluşumu sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. C_2 metal (alüminyum) yüzeyinin kinetik olarak kontrol edilen çift tabaka oluşumu sonucu oluşan polarizasyon direncini ifade eder. Elektrokimyasal korozyon testi sonuçlarına göre artan hBN katkısı EIS testine göre korozyon dirençlerini (R_1 , R_2) artırmış ve Tafel testine göre korozyon hızını azaltmıştır. Aynı şekilde artan grafen katkısı EIS testine göre korozyon dirençlerini (R_1 , R_2) artırmış ve Tafel testine göre korozyon hızını azaltmıştır. Kompozitlere Fe tozu ilavesi sonucu korozyon direncinde bir miktar düşüş ve korozyon hızında bir miktar artış gerçekleşmiştir.

Tablo 4.17. Antikorozyf kompozit malzemelerin korozyon sonuçları

Malzeme	R_1 (Ωcm^2)	C_1 (Ss^a/cm^2)	R_2 (Ωcm^2)	C_2 (Ss^a/cm^2)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
Epoksi	-	-	-	-	-
Epoksi-1 h-BN	140	0.011	590	0.026	0.010
Epoksi-2 h-BN	188	0.012	680	0.029	0.009
Epoksi-3 h-BN	234	0.018	780	0.035	0.007
Epoksi-4 h-BN	261	0.020	843	0.035	0.005
Epoksi-1 Grafen	137	0.010	588	0.026	0.013
Epoksi-2 Grafen	191	0.014	688	0.030	0.012
Epoksi-3 Grafen	230	0.018	786	0.031	0.012
Epoksi-4 Grafen	276	0.021	837	0.033	0.011
Epoksi-1CNT-1 h-BN	141	0.011	591	0.025	0.011
Epoksi-1CNT-2 h-BN	187	0.012	677	0.029	0.011
Epoksi-1CNT-3 h-BN	236	0.019	782	0.033	0.010
Epoksi-1CNT-4 h-BN	262	0.020	846	0.036	0.010
Epoksi-1CNT-1Fe-1 h-BN	140	0.011	591	0.025	0.012
Epoksi-1CNT-1Fe-2 h-BN	189	0.013	680	0.029	0.011
Epoksi-1CNT-1Fe-3 h-BN	238	0.019	783	0.034	0.011
Epoksi-1CNT-1Fe-4 h-BN	251	0.021	830	0.037	0.010

Tablo 4.18. Radar absorban kompozit malzemelerin korozyon sonuçları

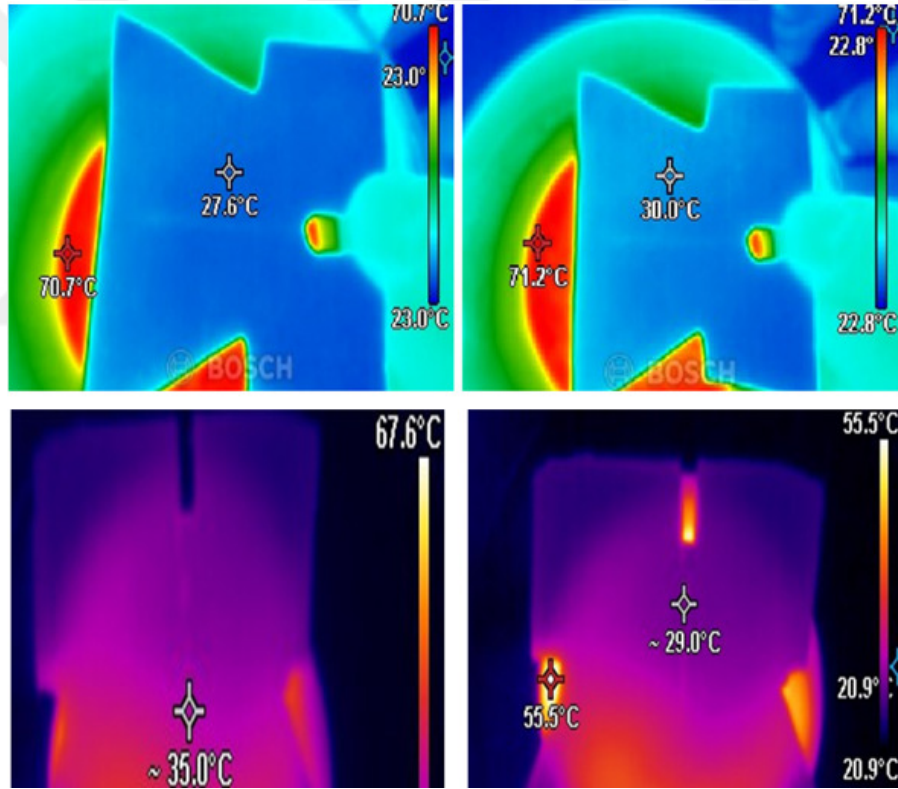
Malzeme	R_1 (Ωcm^2)	C_1 (Ss^a/cm^2)	R_2 (Ωcm^2)	C_2 (Ss^a/cm^2)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
Epoksi	-	-	-	-	-
Epoksi-1CNT	135	0.009	585	0.027	0.015
Epoksi-1Grafen	137	0.010	588	0.026	0.013
Epoksi-1FeMnSi	102	0.007	500	0.011	0.111
Epoksi-1FeNiCo	107	0.007	490	0.012	0.109
Epoksi-1Fe	100	0.07	450	0.012	0.119
Epoksi-1 CNT-1FeMnSi	138	0.011	591	0.026	0.012
Epoksi-2 CNT- 1FeMnSi	190	0.015	690	0.031	0.012
Epoksi-3 CNT- 1FeMnSi	232	0.017	791	0.031	0.012
Epoksi-4 CNT- 1FeMnSi	243	0.022	800	0.034	0.012
Epoksi-1 CNT-1FeNiCo	135	0.012	588	0.026	0.012
Epoksi-2 CNT- 1FeNiCo	191	0.015	693	0.031	0.012
Epoksi-3 CNT- 1FeNiCo	234	0.018	790	0.031	0.011
Epoksi-4 CNT- 1FeNiCo	257	0.022	803	0.034	0.012
Epoksi-1 Grafen-1FeMnSi	141	0.012	600	0.026	0.013
Epoksi-2 Grafen-1FeMnSi	194	0.017	693	0.031	0.011
Epoksi-3 Grafen-1FeMnSi	238	0.017	790	0.032	0.011
Epoksi-4 Grafen-1FeMnSi	255	0.024	821	0.035	0.011
Epoksi-1 Grafen-1FeNiCo	144	0.013	600	0.026	0.012
Epoksi-2 Grafen-1FeNiCo	200	0.016	700	0.031	0.012
Epoksi-3 Grafen-1FeNiCo	244	0.021	794	0.033	0.011
Epoksi-4 Grafen-1FeNiCo	250	0.025	817	0.037	0.011
Epoksi-1CNT-1Fe	136	0.011	593	0.026	0.012
Epoksi-1Grafen-1Fe	142	0.012	602	0.025	0.013

Tablo 4.19. Faz dönüşümlü kendi-kendini onaran kompozitlerin korozyon sonuçları

Malzeme	R_1 (Ωcm^2)	C_1 (Ss^a/cm^2)	R_2 (Ωcm^2)	C_2 (Ss^a/cm^2)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
Epoksi	-	-	-	-	-
Epoksi-0.5FeMnSi	100	0.007	491	0.011	0.113
Epoksi-1.0FeMnSi	102	0.007	500	0.011	0.111
Epoksi-1.5FeMnSi	102	0.008	501	0.011	0.110
Epoksi-2.0FeMnSi	105	0.008	503	0.012	0.110
Epoksi-0.5FeNiCo	107	0.006	488	0.012	0.110
Epoksi-1.0FeNiCo	107	0.007	490	0.012	0.109
Epoksi-1.5FeNiCo	110	0.007	500	0.013	0.109
Epoksi-2.0FeNiCo	111	0.009	502	0.014	0.108

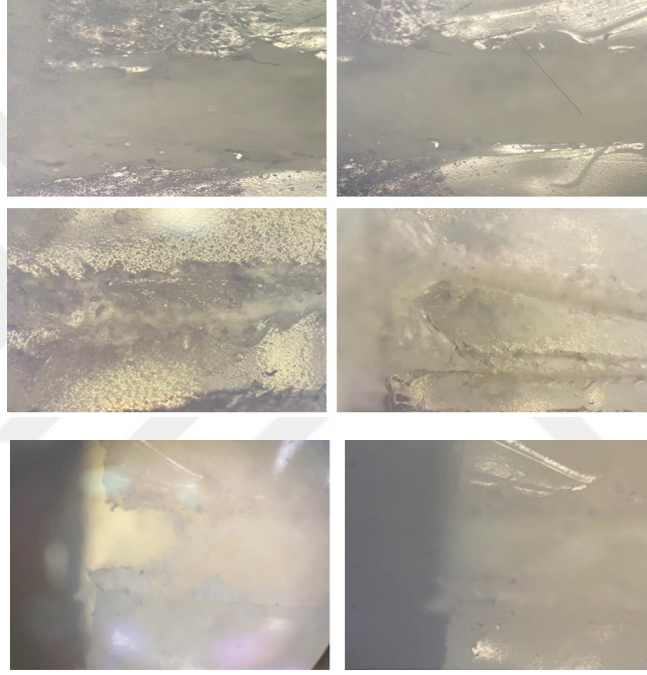
4.5 KENDİ-KENDİNİ ONARMA SONUÇLARI

Aşağıdaki şekilde damlacık tipi kendi kendini onarma ajanı olarak PMMA-MMA/PMMA-BPO katkılı ve bir miktar PVA içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin termal kamera fotoğrafları ile takip edilen kendi-kendini onarma süreci görülmektedir. Termal kamera fotoğraflarından görüldüğü gibi polimer matrisli kompozit malzeme içerisinde bulunan yapay olarak oluşturulmuş çok ince çentik/kanal zamanla incelmektedir. Onarma sırasında çatlak içerisinde metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) damlacıklarının reaksiyona girdikleri ve meydana gelen polimerizasyon sonucu çatlak kapanması (kendi kendini onarma) gözlemlendiği söylenebilir.

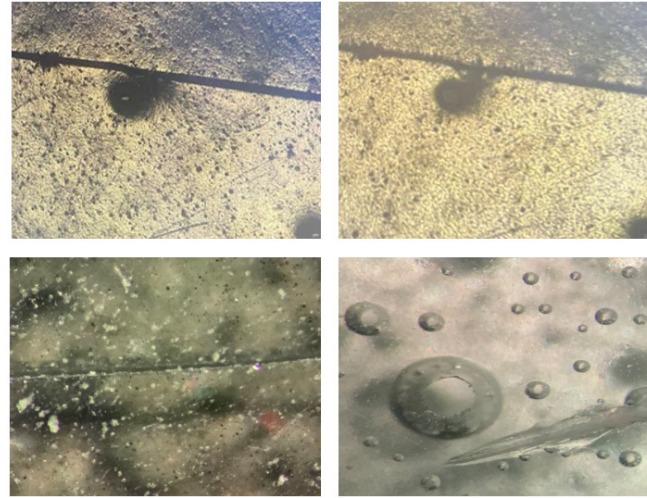


Şekil 4.18. Kendi-kendini onaran malzemenin termal kamera görüntüleri (çentik)

Aşağıdaki şekilde damlacık tipi kendi kendini onarma ajanı olarak PMMA-MMA/PMMA-BPO katkı ve bir miktar PVA içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin optik mikroskop fotoğrafları ile takip edilen kendi-kendini onarma süreci (çentik ucu) görülmektedir. Çentik ucundan çekilmiş optik mikroskop fotoğraflarından görüldüğü gibi polimer matrisli kompozit malzeme içerisinde bulunan yapay olarak oluşturulmuş çok ince çentik/kanal zamanla incelmektedir/kapanmaktadır. Kendi kendini onarma sırasında çatlak içerisinde metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) damlacıklarının reaksiyona girdikleri ve meydana gelen polimerizasyon sonucu çatlak kapanması (kendi kendini onarma) gözlemlendiği söylenebilir.

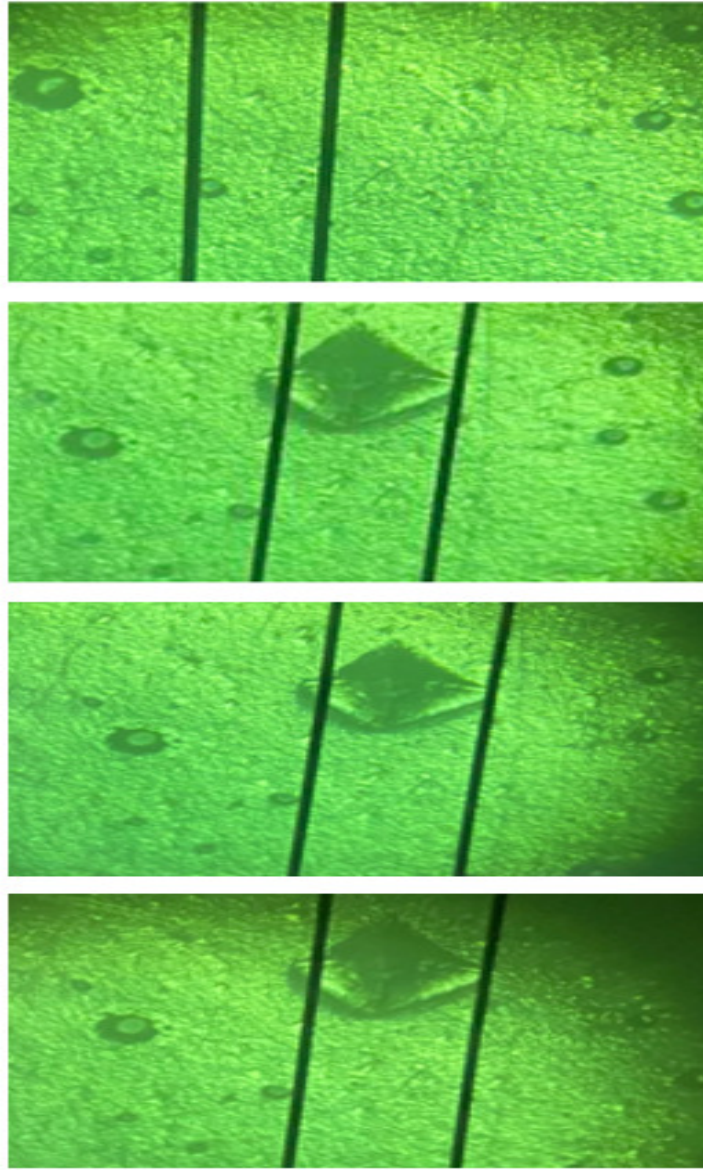


Şekil 4.19. Kendi-kendini onarma optik mikroskop görüntüleri (çentik)



Şekil 4.20. Kendi-kendini onarma optik mikroskop görüntüleri (yüzeysel çizik)

Aşağıdaki şekilde damlacık tipi kendi kendini onarma ajanı olarak PMMA-MMA/PMMA-BPO katkı ve bir miktar PVA içeren epoksi matrisli kompozit malzemelerin Vickers sertlik cihazı ile elde edilmiş izin boyutu ile takip edilen kendi-kendini onarma süreci görülmektedir. Batıcı elmas ucun oluşturduğu izin fotoğraflarından da görüldüğü gibi polimer matrisli kompozit malzeme içerisinde bulunan iz (indentasyon) zamanla küçülmektedir (izin köşegenlerinin zamanla daraldığı görülmektedir). Kendi kendini onarma sırasında iz içerisinde metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) damlacıklarının reaksiyona girdikleri ve meydana gelen polimerizasyon sonucu çatlak kapanması (kendi kendini onarma) gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 4.21. Vickers izi a) iz yok, b) iz 0 saat, c) iz 24 saat, d) iz 48 saat

4.6 HESAPLAMALI MALZEME BİLİMİ SONUÇLARI

CASTEP programında yoğunluk fonksiyon teorisi (DFT) kullanılarak; bir malzemenin fiziksel büyüklükleri hesaplanmaktadır.

Bu yöntemde pseudo potansiyelleri kullanılmaktadır. Bu potansiyel sadece valans elektronlarında etkin olan bir potansiyeldir. Enerjinin koordinata göre birinci türevi sisteme etki eden kuvveti verir. Kuvvetler sıfır olduğunda sistemin denge durumunu elde edilir. Enerjinin birinci türevinden sistem geometrisi elde edilir (geometrik optimizasyonu).

Atomların yer (pozisyon) tercihleri yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) ile incelenmiştir.

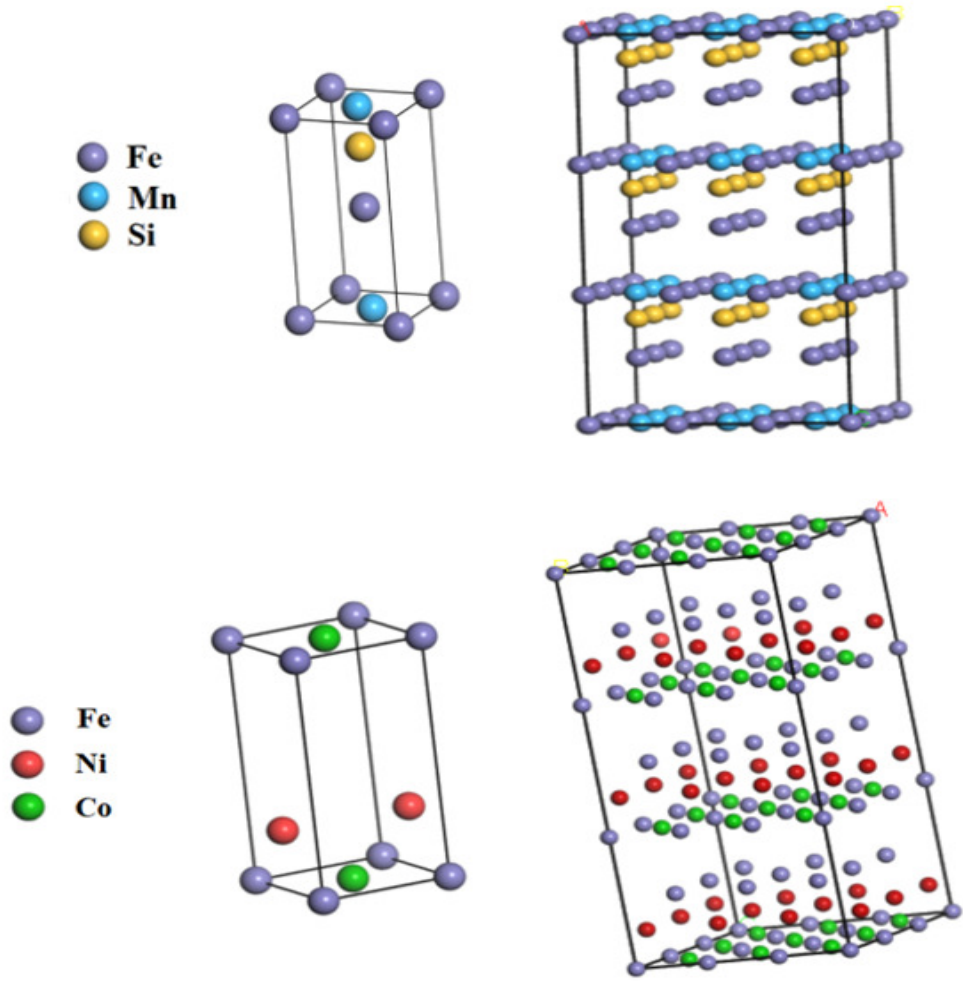
Pseudo-potansiyellerin hesaplanması Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) temelli “Genelleştirilmiş Gradyan Yaklaşımı (GGA)” kullanılarak yapılmıştır.

Elektron-iyon etkileşimleri için ultrasoft pseudo-potansiyeller kullanılmıştır.

Geometrik optimize k noktaları ve kesilim kinetik enerjisi kullanılmıştır. CASTEP yazılımında elde edilen sonuç dosyası “Materials Studio” programı ile görselleştirilmiştir.

Fe-Mn-Si ve Fe-Ni-Co Esaslı Ferromanyetik ve Şekil Bellekli Tozlar

Aşağıdaki şekilde incelenen alaşımların birim kafesi ve hesaplamaların yapıldığı süperkafes görülmektedir. CASTEP yazılımı ile gerçekleştirilen ilk prensipler esaslı hesaplamalar için aşağıda görülen kafes yapıları oluşturulmuş ve ardından hesaplamalar süperkafes üzerinde gerçekleştirilmiştir.

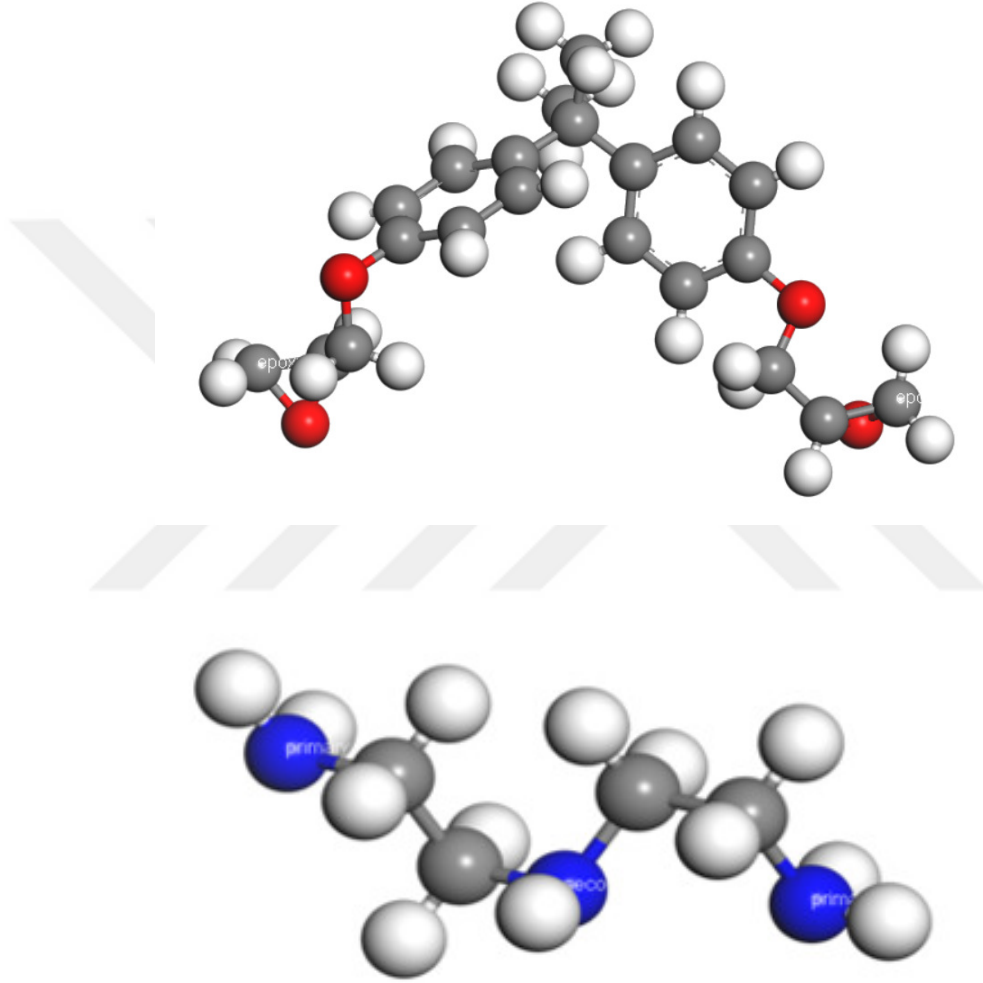


Alaşıım	a (Å)	b (Å)	c (Å)	α (°)	β (°)	γ (°)	Hacim (Å ³)
Fe15Mn5Si	3,44687	3,44687	3,44687	90	90	90	40,95196
Fe10Ni5Co	3,454297	3,454297	3,454297	90	90	90	41,21725

Şekil 4.22. Şekil bellekli tozların kristal yapıları a) FeMnSi, b) FeNiCo

Epoksi

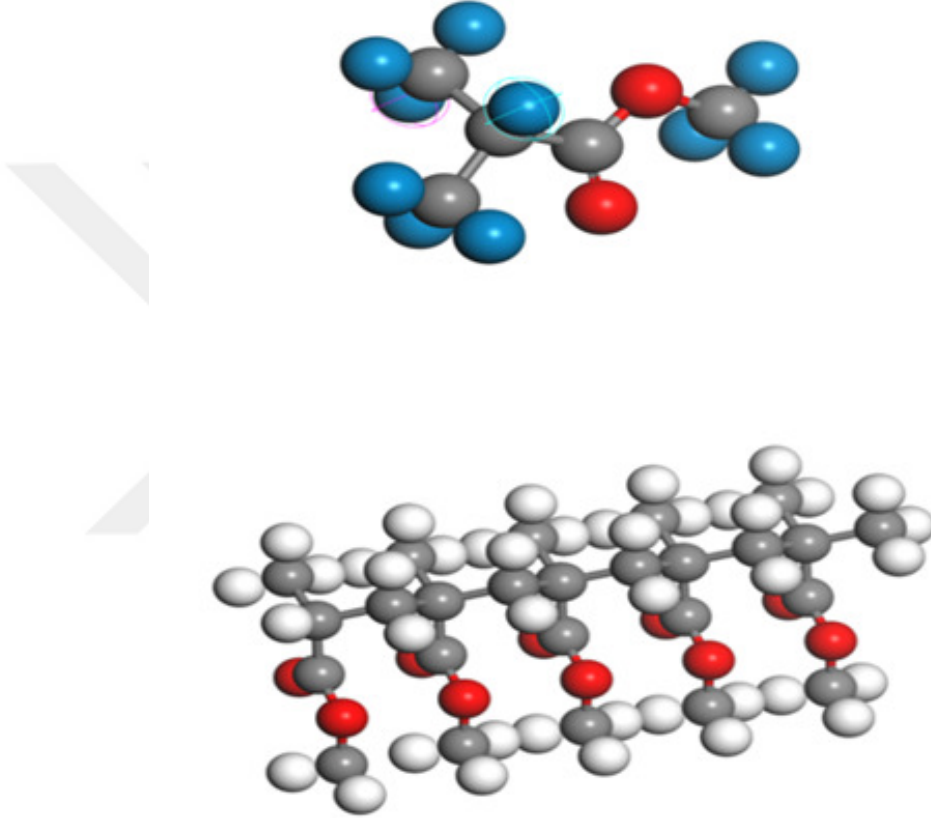
Aşağıdaki şekilde epoksi reçine hammaddelerinin yapıları ve durum yoğunlukları görülmektedir. a) diglisidil-eter bisfenol-A (DGEBA), b) dietilen-triamin (DETA). Öncelikle geometri optimizasyonu gerçekleştirilmiş ardından hesaplama ve analizler yapılmıştır.



Şekil 4.29. Epoksi yapısı a) DGEBA, b) DETA

Metil Metakrilat (MMA) ve Polimetilmetakrilat (PMMA)

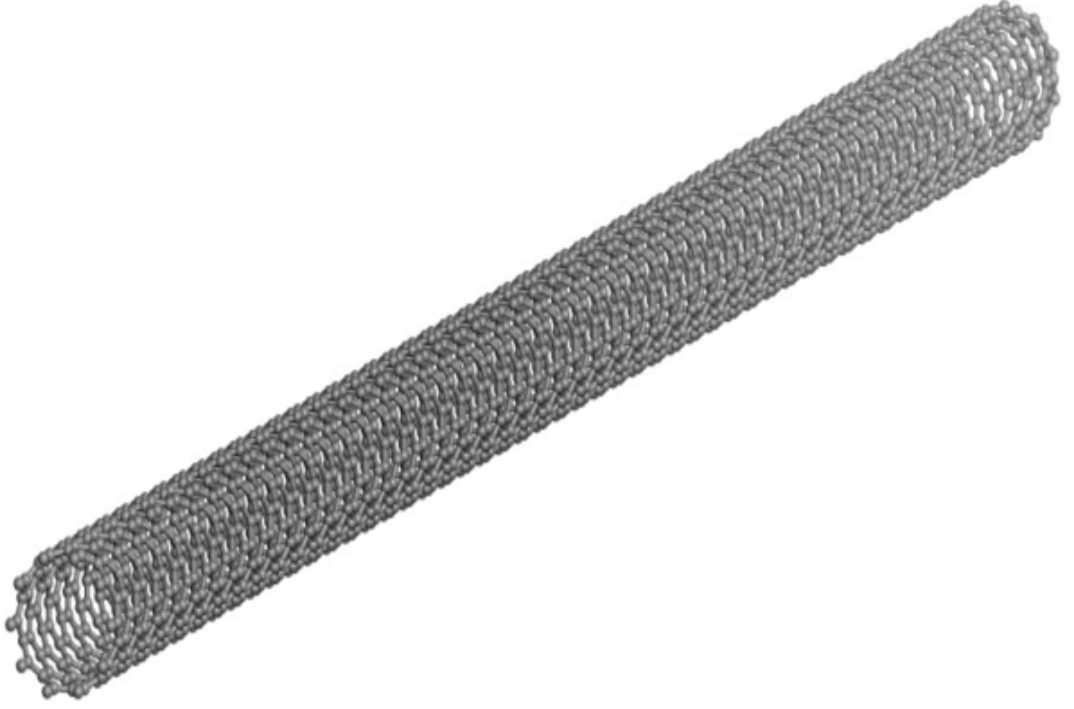
Aşağıdaki şekilde polimetilmetakrilat (PMMA) ve metilmetakrilat (MMA) yapıları görülmektedir. a) metilmetakrilat molekülü, b) beş adet metilmetakrilat molekülünden oluşan molekül, c) polimetilmetakrilat (PMMA), d) hesaplamalarda kullanılan üç boyutlu yapı.



Şekil 4.30. MMA ve PMMA yapıları

Karbon Nanotüp (CNT)

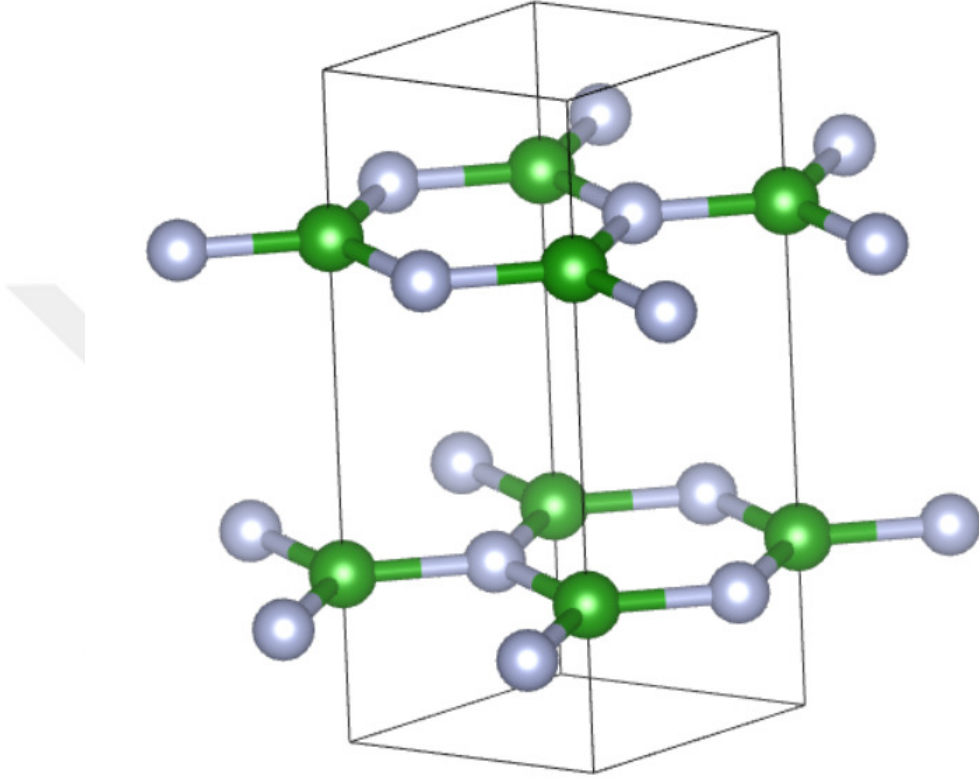
Aşağıdaki şekilde karbon nanotüp (CNT) yapıları ve durum yoğunlukları görülmektedir. a) karbon halka (6-C) molekülü, b) tek duvarlı karbon nanotüp (CNT), c) spin-antispin grafiği, d) durum yoğunluğu ve bant yapısı, e) mekanik özellikler



Şekil 4.31. Tek duvarlı karbon nanotüp yapıları

h-BN

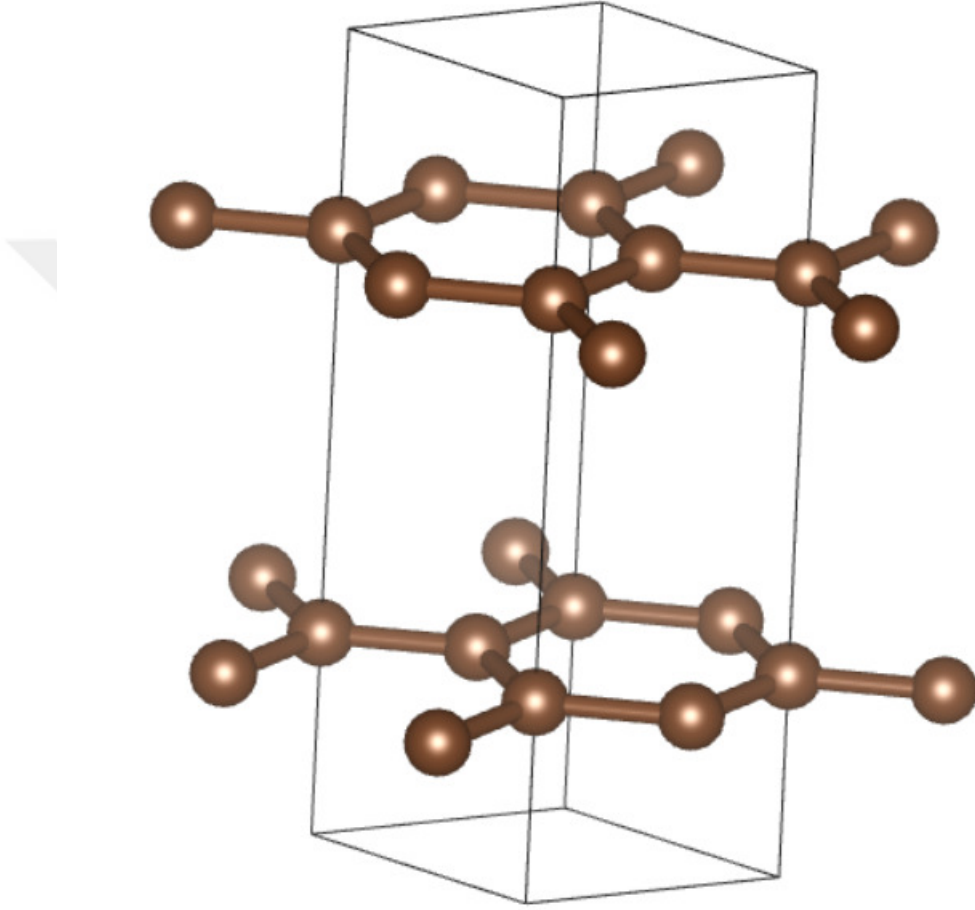
Aşağıdaki şekilde h-BN yapısı ve durum yoğunlukları görülmektedir. a) h-BN yapısı, b) spin-antispin grafiği, d) durum yoğunluğu ve bant yapısı, e) mekanik özellikler.



Şekil 4.32. h-BN yapısı

Grafen

Aşağıdaki şekilde grafen yapıları ve durum yoğunlukları görülmektedir. a) grafen, b) durum yoğunluğu ve bant yapısı, c) mekanik özellikler



Şekil 4.33. Grafen yapısı

Aşağıdaki tablolarda antikoroziif kompozitlerin ve radar absorban kompozitlerin hesaplanan elastisite modülleri değeri görülmektedir.

Tablo 4.20. Antikoroziif kompozitlerin hesaplanan elastisite modülleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)
Epoksi-1 hBN	5.01
Epoksi-2 hBN	5.49
Epoksi-3 hBN	5.55
Epoksi-4 hBN	6.50
Epoksi-1 Grafen	5.88
Epoksi-2 Grafen	6.04
Epoksi-3 Grafen	6.19
Epoksi-4 Grafen	6.73
Epoksi-1CNT-1 hBN	5.66
Epoksi-1CNT-2 hBN	5.79
Epoksi-1CNT-3 hBN	6.00
Epoksi-1CNT-4 hBN	6.22

Tablo 4.21. Radar absorban kompozitlerin hesaplanan elastisite modülleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)
Epoksi -1 CNT - 1FeMnSi	4.80
Epoksi -2 CNT - 1FeMnSi	5.22
Epoksi -3 CNT - 1FeMnSi	5.33
Epoksi -4 CNT - 1FeMnSi	6.12
Epoksi -1 CNT - 1FeNiCo	5.00
Epoksi -2 CNT - 1FeNiCo	5.09
Epoksi -3 CNT - 1FeNiCo	5.50
Epoksi -4 CNT - 1FeNiCo	5.58
Epoksi -1 Grafen - 1FeMnSi	4,97
Epoksi -2 Grafen - 1FeMnSi	5.13
Epoksi -3 Grafen - 1FeMnSi	5.19
Epoksi -4 Grafen - 1FeMnSi	5.52
Epoksi -1 Grafen - 1FeNiCo	4.99
Epoksi -2 Grafen - 1FeNiCo	5.22
Epoksi -3 Grafen - 1FeNiCo	5.25
Epoksi -4 Grafen - 1FeNiCo	6.77

5 TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, kendi kendini onarma kabiliyeti, radar absorban özelliği ve antikorozyon özellik gösteren polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen polimer matrisli kompozit malzemelerin havacılık ve özellikle rüzgar türbini kanatçığı üretimine yönelik olması amaçlanmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde öncelikle mikrokapsül tekniği esaslı yöntem kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak termoset esaslı epoksi kullanılmıştır. İyileştirme maddesi olarak metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) kullanılmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde ayrıca, şekil bellekli FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozların epoksi matris içerisine ilavesi ile faz dönüşüm toklaşması ile kendi kendini onaran kompozit malzeme üretilmiştir. FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Antikorozyon kaplama olarak hekzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı epoksi matrisli kaplamalar üretilmiş ve h-BN ilavesinin altlık metalin elektrokimyasal korozyon direncine etkileri araştırılmıştır. Radar absorban malzeme kapsamında Fe alaşımı toz ve karbon nanotüp ilaveli epoksi matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve mikrodalga absorpsiyon özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, doğal polimer kullanımı kapsamında takviye malzemesi olarak kırpılmış ve örgülü kenevir ve matris malzemesi olarak epoksi esaslı numuneler üretilmiş ve çeşitli özellikleri incelenmiştir.

Genel olarak, rüzgarlarda bulunan kinetik enerjiyi insanların kullanabilmesi amacıyla elektrik enerjisine dönüştüren düzeneklere rüzgar türbini denilmektedir. Rüzgar türbinleri yenilenebilir enerji açısından önem taşımaktadır. Rüzgar türbini malzemeleri, akma mukavemeti, yorulma mukavemeti, rijitlik, düşük yoğunluk göstermelidir.

Genel olarak polimer matrisli kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak genellikle termoset esaslı polimer malzemeler kullanılmaktadır. Termoset esaslı malzemeler oda sıcaklığında sıvı olmaları, düşük viskozite değerlerine sahip olmaları, yüksek ısılatma kabiliyetlerine sahip olmaları, ucuz olmaları gibi sebeplerden dolayı kompozit üretiminde matris malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir.

PMMA/MMA/BPO takviyeli kendi-kendini onaran epoksi matrisli kompozit malzemede, sıvı MMA monomerin matris içerisinde PMMA tozları yardımı ile homojen dağıldığı söylenebilir. Ayrıca, BPO başlatıcının epoksi matris içerisinde homojen olarak dağıldığı söylenebilir. Takviyelerin epoksi içerisinde katılması esnasında ilave edilen PVA etkisi ile MMA/PMMA ve BPO parçacıklarının homojen olarak dağıldığı, topaklanma, aglomerasyon ve çökme yaşanmadığı söylenebilir.

Faz dönüşüm toklaşması mekanizması ile kendi-kendini onaran şekil bellekli metal tozu (Fe-Mn-Si veya Fe-Ni-Co) takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemede metal tozlarının epoksi matris içerisinde homojen dağıldığı söylenebilir. Metal tozlarının yüksek yoğunluklarından dolayı, metal tozları viskozitenin en yüksek değerlerde olduğu epoksi reçine oluşumunun (jelleşme) son aşamasında ilave edilmiştir.

Radar absorban malzeme (RAM) esaslı şekil bellekli metal tozu (Fe-Mn-Si veya Fe-Ni-Co) ve karbon nanotüp tozu takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde, metal tozlarının yüksek yoğunluklarından dolayı, metal tozları viskozitenin en yüksek değerlerde olduğu epoksi reçine oluşumunun (jelleşme) son aşamasında ilave edilmiştir. Karbon nanotüp tozlarında aglomerasyonun önlenmesi için ultrasonik homojenizatörde hazırlanmış ve ardından epoksiye ilave edilmiştir. Amaçlandığı gibi elektrik iletkenliği sağlayan karbon nanotüp (CNT) tozlarından oluşan çok ince yollar meydana gelmiştir. Belirli bir miktardan sonra karbon nanotüp (CNT) tozlarından oluşan yollar tozların birbiri ile teması sonucu oluşmakta ve sonuç olarak polimer matrisli kompozit malzeme elektriksel iletkenlik kazanmıştır.

Antikorozyon kaplama amaçlı h-BN tozu takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerde nispeten düşük olan yoğunluğundan dolayı h-BN tozları epoksi matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır.

Artan grafen ve karbon nanotüp (CNT) miktarı ile epoksi matrisli kompozitlerin elastisite modülü değerleri, sertlik değerleri ve darbe enerjisi absorblama değerleri artmıştır. Elastisite modülündeki ve sertlikteki artış CNT ve grafenin yüksek elastisite modülü ve sertlik değerlerine bağlanmıştır. CNT ve grafen katkısı sonucu darbe enerjisindeki artış h-BN katkılı numunelerde gerçekleşmemiştir.

FeMnSi ve FeNiCo tozu ilavesi elastisite modülü, sertlik ve darbe direnci değerlerini artırmıştır.

Şekil bellekli FeMnSi ve FeNiCo tozu ilavesi epoksi matrisli kompozitin elastisite modülü, sertlik ve darbe direnci değerlerini artırmıştır. Özellikle darbe direncinde yaşanan yüksek artış faz dönüşüm etkisine bağlanmıştır. Ayrıca, artan FeMnSi ve FeNiCo tozu miktarı ile mekanik özelliklerde artış meydana gelmiştir.

Sıvı monomer (damlacık) katkılı kendi-kendini onaran kompozitlerde elastisite modülü ve sertlikte az da olsa bir düşüş meydana gelmiş, darbe enerjisinde önemli bir değişim yaşanmamıştır. Sıvı monomer (damlacık) katkılı kendi-kendini onaran kompozitlerde onarma mekanizmasının uzun bir süreç almasından dolayı darbe direnci ve mekanik özelliklerde artış gerçekleşmemiştir.

Antikorozyon kompozitlere ait DMA verilerine göre, artan grafen, hBN miktarı ile beraber depolama modülü (E') ve kayıp modülünde (E'') artış faz farkında ($\tan \delta$) azalış meydana gelmiştir. Ayrıca camısı geçiş sıcaklığında artış yaşanmıştır.

Radar absorban amaçlı kompozitlere ait DMA verilerine göre, artan grafen ve CNT miktarı ile beraber depolama modülü (E') ve kayıp modülünde (E'') artış faz farkında ($\tan \delta$) azalış meydana gelmiştir. Ayrıca camısı geçiş sıcaklığında artış yaşanmıştır. Ek olarak FeMnSi ve FeNiCo tozu ilavesi depolama modülü (E') ve kayıp modülünde (E'') artış faz farkında ($\tan \delta$) azalış meydana getirmiştir.

DSC grafiklerine göre, karbon nanotüp (CNT), grafen, hBN ve FeMnSi/FeNiCo tozu katkısının camısı geçiş sıcaklığı (T_g) ve erime sıcaklığının (T_m) artmasına neden olduğu görülmektedir. Artışın nedeninin karbon nanotüp (CNT), grafen, hBN ve FeMnSi/FeNiCo tozu yüksek erime sıcaklığı olduğu düşünülmektedir. Genel olarak tüm katkıları epoksinin T_g ve T_m sıcaklıklarının artmasına neden olmuştur.

Kompozitlerin VNA cihazı ile ölçülmüş mikrodalga zayıflama (kayıp) ve absorban değerlerine göre artan karbon nanotüp (CNT) tozu miktarı ile epoksi matrisli kompozitlerin mikrodalga zayıflama değerleri (insertion loss, dB) ve mikrodalga absorban değerleri (absorbance, dB) beklenildiği gibi artış göstermiştir. Şekil bellekli FeMnSi/FeNiCo tozu ilavesi de epoksi

matrisli kompozitlerin zayıflama ve absorbands değerlerini daha da artırmıştır. CNT ve grafen katkıları mikrodalga zayıflama ve absorbands açısından birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Grafen ilavesi ile karbon nanotüp (CNT) tozlarına kıyasla bir miktar daha fazla elektirksel iletkenlik elde edilmiştir. FeNiCo tozlarının zayıflama ve absorbands değerleri FeMnSi tozlarına göre bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. FeNiCo tozlarının manyetiklik değerleri de FeMnSi tozlarına göre daha yüksektir.

Epoksi matrisli kompozitlerde katkı miktarının korozyon davranışına etkisi EIS ve Tafel testleri ile incelenmiş olup, EIS testi ile korozyon parametreleri (R_1 , C_1 , R_2 , C_2) ve Tafel testi ile korozyon hızı ölçülmüştür. Elektrokimyasal korozyon testi sonuçlarına göre artan hBN katkısı EIS testine göre korozyon dirençlerini (R_1 , R_2) artırmış ve Tafel testine göre korozyon hızını azaltmıştır. Aynı şekilde artan grafen katkısı EIS testine göre korozyon dirençlerini (R_1 , R_2) artırmış ve Tafel testine göre korozyon hızını azaltmıştır. Kompozitlere Fe tozu ilavesi sonucu korozyon drencinde bir miktar düşüş ve korozyon hızında bir miktar artış gerçekleşmiştir.

Aşağıdaki tablolarda antikorozyif kompozitlerin ve radar absorban kompozitlerin deneysel tespit edilmiş ve teorik olarak hesaplanan elastisite modülleri görülmektedir. Teorik elastisite modülleri ile deneysel belirlenmiş elastisite modülleri arasında % 40-70 arasında değişen farklar oluşmuştur. Genel olarak mevcut bilgisayar kapasitesinden dolayı belirli boyutta yapı üretilmesi ve hesaplamaların orta hassasiyet modunda gerçekleştirilmesi sonucu teorik ve deneysel veriler arasında fark oluşmuştur. Ayrıca deneysel malzemelerde mikroyapıda tamamen homojen yapı olmaması ve hataların bulunmasının sonuçları etkilediği söylenebilir.

Tablo 5.1. Antikorozyif kompozitlerin teorik ve deneysel elastisite modülleri

Malzeme	Deneysel Elastisite Modülü (GPa)	CASTEP Elastisite Modülü (GPa)	Fark (%)
Epoksi-1 hBN	3.4	5.01	47
Epoksi-2 hBN	3.5	5.49	56
Epoksi-3 hBN	3.5	5.55	58
Epoksi-4 hBN	3.5	6.50	85
Epoksi-1 Grafen	3.6	5.88	63
Epoksi-2 Grafen	3.7	6.04	63
Epoksi-3 Grafen	3.7	6.19	67
Epoksi-4 Grafen	4.2	6.73	60
Epoksi-1CNT-1 hBN	3.5	5.66	61
Epoksi-1CNT-2 hBN	3.5	5.79	65
Epoksi-1CNT-3 hBN	3.6	6.00	66
Epoksi-1CNT-4 hBN	3.6	6.22	72

Tablo 5.2. Radar absorban kompozitlerin teorik ve deneysel elastisite modülleri

Malzeme	Deneysel Elastisite Modülü (GPa)	CASTEP Elastisite Modülü (GPa)	Fark (%)
Epoksi -1 CNT - 1FeMnSi	3.5	4.80	37
Epoksi -2 CNT - 1FeMnSi	3.5	5.22	48
Epoksi -3 CNT - 1FeMnSi	3.6	5.33	48
Epoksi -4 CNT - 1FeMnSi	3.6	6.12	70
Epoksi -1 CNT - 1FeNiCo	3.4	5.00	47
Epoksi -2 CNT - 1FeNiCo	3.5	5.09	45
Epoksi -3 CNT - 1FeNiCo	3.7	5.50	48
Epoksi -4 CNT - 1FeNiCo	3.8	5.58	46
Epoksi -1 Grafen - 1FeMnSi	3.5	4.97	42
Epoksi -2 Grafen - 1FeMnSi	3.5	5.13	46
Epoksi -3 Grafen - 1FeMnSi	3.6	5.19	44
Epoksi -4 Grafen - 1FeMnSi	3.8	5.52	45
Epoksi -1 Grafen - 1FeNiCo	3.4	4.99	27
Epoksi -2 Grafen - 1FeNiCo	3.6	5.22	45
Epoksi -3 Grafen - 1FeNiCo	3.6	5.25	45
Epoksi -4 Grafen - 1FeNiCo	3.9	6.77	73

6 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kendi kendini onarma kabiliyeti, radar absorban özelliği ve antikorozyon özellik gösteren polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Geliştirilen polimer matrisli kompozit malzemelerin havacılık ve özellikle rüzgar türbini kanatçığı üretimine yönelik olması amaçlanmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde öncelikle mikrokapsül tekniği esaslı yöntem kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak termoset esaslı epoksi kullanılmıştır. İyileştirme maddesi olarak metilmetakrilat (MMA) ve benzoilperoksit (BPO) kullanılmıştır. Kendi kendini onaran malzeme üretiminde ayrıca, şekil bellekli FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozların epoksi matris içerisine ilavesi ile faz dönüşüm toklaşması ile kendi kendini onaran kompozit malzeme üretilmiştir. FeMnSi ve FeNiCo esaslı tozlar mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Antikorozyon kaplama olarak hekzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı epoksi matrisli kaplamalar üretilmiş ve h-BN ilavesinin altlık metalin elektrokimyasal korozyon direncine etkileri araştırılmıştır.

Genel Sonuçlar:

- (1) Havacılık uygulamalarında h-BN tozu katkılı polimer matrisli kompozit malzeme kullanımı metal (alüminyum alaşımı) altlığın elektrokimyasal korozyon direncini arttırmış, korozyon hızını azaltmıştır.
- (2) Grafen tozu katkılı polimer matrisli kompozit malzeme kullanımı metal (alüminyum alaşımı) altlığın elektrokimyasal korozyon direncini arttırmış, korozyon hızını azaltmıştır.
- (3) Karbon nanotüp (CNT) ve grafen ilavesi epoksi matrisli kompozitlerde elektriksel iletkenlikte artışa neden olmuştur.
- (4) Karbon nanotüp (CNT) ve FeMnSi/FeNiCo tozu ilavesi epoksi matrisli kompozitlerde mikrodalga zayıflama ve absorpsiyon özelliğinde artışa neden olmuştur.
- (5) FeMnSi ve FeNiCo tozu katkısı epoksi matrisli kompozit malzemelerde darbe direncini arttırmıştır.
- (6) FeMnSi/FeNiCo katkılı epoksi matrisli kompozitlerde belirli düzeyde kendi kendini onarma özelliği (darbe direncinde artış) tespit edilmiştir.
- (7) MMA/BPO katkılı epoksi matrisli kompozitlerde termal kamera görüntüleri ve optik mikroskop fotoğraflarına göre yapay çatlak/çiziklerde belirli bir süre sonra (2-3 gün) belirli düzeyde kendi kendini onarma özelliği tespit edilmiştir.
- (8) MMA/BPO katkılı epoksi matrisli kendi-kendini onaran kompozitlerin yavaş onarma özelliğinden dolayı zorlu koşulların olduğu değişken yüklemeler altında çalışan parçalar için uygun olmadığı, çok zorlu koşulların olmadığı, nispeten statik yükleme şartlarında kendi-kendine onarma gösterebileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca kendi-kendini onarma ömrünün kısıtlı olma sorunu mevcuttur.
- (8) Cam fiber ve karbon fiber kullanımı mekanik özellikleri geliştirmiştir. Kenevir fiber kullanımı mekanik özellikleri geliştirmiştir. Doğal polimer esaslı kenevir fiber kullanımı sentetik cam fiber ve karbon fiber kullanımına bir alternatif olabilir.
- (9) DSC grafiklerine göre, CNT, grafen, hBN ve FeMnSi/FeNiCo tozu katkısının camsı geçiş (T_g) ve erime (T_m) sıcaklıklarının artmasına neden olmuştur.
- (10) DMA verilerine göre, artan grafen, CNT, hBN, FeMnSi/FeNiCo tozu miktarı ile beraber depolama modülü (E') ve kayıp modülünde (E'') artış faz farkında ($\tan \delta$) azalış meydana gelmiştir. Ayrıca camsı geçiş sıcaklığında artış yaşanmıştır.
- (11) Genel olarak üretilen tüm malzemeler içerisinde epoksi-2grafen-1FeNiCo kompozitinin radar absorblama, antikorozyon, kendi-kendini onarma özelliklerinin üçünü beraber

gösterdiğinden optimum malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Grafen ve FeNiCo katkısı sonucu radar absorbans, grafen katkısı nedeniyle antikorozyonluk, şekil bellekli FeNiCo tozu nedeni ile kendi-kendini onarma (dönüşüm toklaşması) göstermiştir.

(12) Teorik ve deneysel elastisite modülleri arasında % 40-70 arasında değişen farklar oluşmuştur. Mevcut bilgisayar kapasitesinden dolayı belirli boyutta yapı üretilebilmesi ve hesaplamaların orta hassasiyet modunda gerçekleştirilmesi sonucu teorik ve deneysel veriler arasında fark oluşmuştur. Ayrıca deneysel malzemelerde mikroyapıda tamamen homojen yapı olmaması ve hataların bulunmasının sonuçları etkilediği söylenebilir.



Aşağıdaki şekilde epoksi matrise yapılan çeşitli katkı maddelerinin etkilerinin karşılaştırılması görülmektedir.

- hBN sadece korozyon dayanımını arttırmaktadır.
- Grafen korozyon dayanımı ve mekanik özellikler geliştirmekte, aynı zamanda radar absorblama özelliklerini arttırmaktadır. Dezavantajı maliyetinin yüksek olmasıdır.
- Şekil bellekli FeMnSi/FeNiCo tozları tokluk değerini ve diğer mekanik özellikleri geliştirmekte, aynı zamanda radar absorblama özelliklerini arttırmaktadır.

Tablo 6.1. Katkı maddelerinin etkilerinin karşılaştırılması

	Kendi-Kendini Onarma Hızı	Kendi-Kendini Onarma Miktarı	Radar Absorbsiyon	Korozyon Direnci	Mekanik Özellikler	Doğal Polimer	Fiyat
h-BN				++++	++	--	+
Grafen			++++	++++	++++	--	--
CNT			++++	+	++++	--	--
Fe-Mn-Si	+++	--	++++	-	++	-	++++
Fe-Ni-Co	+++	--	++++	-	+++	-	++++
Fe			+++	-	++	-	++++
BPO/MMA	----	++		---	----	----	+++
Cam Fiber					++++	--	++++
Karbon Fiber					++++	--	+++
Kenevir					+++	++++	++++

Gelecek Çalışmalara Öneriler:

- (1) Daha geniş aralıkta h-BN tozu katkılı antikorozyon özellikte polimer matrisli kompozit malzeme üretilmelidir.
- (2) Daha geniş aralıkta karbon nanotüp (CNT) katkılı polimer matrisli kompozit malzeme üretilmelidir.
- (3) Daha geniş aralıkta karbon nanotüp (CNT) ve FeMnSi katkılı radar absorban polimer matrisli kompozit malzeme üretilmelidir.
- (4) Daha geniş aralıkta MMA/BPO katkılı kendi kendini onaran polimer matrisli kompozit malzeme üretilmelidir.
- (5) Matris olarak termoplastik esaslı polilaktik asit (PLA), poliüretan (PU), ve termoset esaslı bismaleidimid (BMI) kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Jha A.R.. 2011, *Wind Turbine Technology*, Taylor-Francis Group, CRC Press
- [2] Aymerich F, 2012, Department of Mechanical, Chemical and Materials Engineering, SYSWIND Summer School University of Cagliari, Italy
- [3] Mishnaevsky J.L., Branner K, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, Malcolm McGugan and Bent F. Sørensen Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials* 2017, 10, 1285
- [4] Kaboglu C, 2017, *Composite Materials for Wind Energy Applications*, Degree of Doctor of Philosophy (PhD) of Imperial College London, Mechanical Engineering
- [5] Keleş D., 2012, *Bir rüzgar türbini tasarımı ve geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Makine Eğitimi, Sakarya Üniversitesi
- [6] Tuna D., 2009, *Rüzgar türbini kanadı tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi
- [7] Strong A.B., 2008, *Fundamentals of composites manufacturing, materials, methods and applications*, Society of Manufacturing Engineers, USA
- [8] F.C. Campbell, 2010, *Structural composite materials*, ASM International
- [9] ASTM Handbook, 2001, Composites, Volume 21, ASM International
- [10] Guerra V, Wan C, McNally T, Thermal conductivity of 2D nano-structured boron nitride (BN) and its composites. *Progress in Materials Science* 100 (2019) 170–186
- [11] Karadağ M, 2022, *Effect of Hexagonal Boron Nitride on Organic/Inorganic Hybrid Polymer Coatings for Aluminium*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- [12] Fadhel T. Alabdullah, C. Ali, Mishra B, Evaluation of Corrosion Resistance Properties of Hexagonal Boron Nitride Based Polymer Composite Coatings for Carbon Steel in a Saline Environment. *Corrosion Science and Tech*, 21, No.1 (2022), 41~52
- [13] Tsai P.Y., Chen T., Lee Y.L., Development and Characterization of Anticorrosion and Antifriction Properties for High Performance Polyurethane/Graphene Composite Coatings, *Coatings* 2018, 8, 250;
- [14] Kumar S. *Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications*. 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [15] <https://analyzing-testing.netzsch.com/tr/hizmetler/sozlesme-test> [ziyeret 01.02.2025]
- [16] Kevin P. Menard. *Dynamic mechanical analysis*. 1999, CRC Press. USA

- [17] Sperling L.H.. *Introduction to physical polymer science*. Fourth edition. 2006. Wiley.
- [18] Erel G., 2019, *Polilaktik asit (PLA) Matrisli Nano Takviyeli Biyouyumlu Kompozit Malzeme Üretimi*, Yüksek Lisans, Karabük Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği.
- [19] Yalman Ü, 2023, *Kenevir Dolgulu Polipropilen Kompozitlerin Hazırlanması ve Reolojik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Kimya Mühendisliği
- [20]. Erbayrak, E., 2018, *Termoplastik Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıların Doktora, Kendi-Kendini Onarma Davranışının Nümerik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [21]. Berkem, A.S., 2019, *Kendi Kendini Onaran Vanadyum Pentoksit ve Grafen Oksit Katkılı Polimer Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu*. Doktora, Gebze Teknik Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [22]. Görür, M.C., 2022, *3B Baskılı Hekzagonal Bor Nitrürü Nanolevhaları/Polilaktik Asit Nanokompozitleri*. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı,.
- [23]. Mudu, M., 2022, *Bor Nitrür Esaslı Polipropilen Nanokompozit Filmlerin Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Yalova Üniversitesi, Polimer Mühendisliği, Doktora Tezi.
- [24]. Öztürkmen, M.B., 2022, *Grafen ve Bor Nitrür Takviyeli Epoksi Reçine ile Hibrit Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [25]. Seydioğlu, R., 2018, *Biyonanokompozitlerin Bariyer ve Termal Özelliklerine Bor Nitrürün Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği,
- [26]. Ertuş, E.B., 2014, *Radar Absorblayan Malzemelerin Üretilmesi, Karakterizasyonu ve Endüstriyel Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı,
- [27]. Kaşgöz, A., 2017, *Elektromanyetik Dalga Kalkanlama Özelliğine Sahip Polimer Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Yapı-Performans Özelliklerinin Geliştirilmesi*. İstanbul Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- [28]. Gökçe, S., 2017, *Manyeto-Polimerik Mikrodalga Kompozitler ve Yankısız Oda Kaplamalar*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı,.
- [29]. Kavas, H., 2010, *Nano Manyetik Kompozit Temelli Elektromanyetik Radyasyon Soğurucu Malzeme Geliştirilmesi*. , Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fizik.

- [30]. Gözde Toraman, 2018, Karbon Nanotüplerin Polietereterketon ve Arayüzlerinin Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi ve Moleküler Dinamik Simulasyonları, ODTÜ, Fizik
- [31]. Adem Duran, 2016, Bazı Monomer ve Polimerlerin Yoğunluk Fonksiyonel teorisi ile Kuantum Kimyasal Hesaplamaları, Bitlis Eren Üniversitesi, Kimya Bölümü
- [32]. Kalaycı A. 2021, Havacılık Uygulamaları İçin Bor Katkılı Termoset Kompozit malzemelerin Birleştirme Yöntemleri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- [32]. Kemaloğlu Ş. 2009, Termal Arayüzey Malzemesi Olarak Kullanılabilecek Polimer/Bor Nitrür Mikro ve Nano Kompozitlerin Üretimi, Kocaeli Üniversitesi, Kimya Mühendisliği
- [33]. Ahangari M.G., Fereidoon A. Ganji M.D. Density functional study of epoxy polymer chains absorbing onto single-walled carbon nanotubes, *J. Mol Model* 2013, 19, 3127;

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Furkan YENİLMEZ Doktora Tezi			
ORJİNALLIK RAPORU			
%6	%3	%4	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ
BİRİNCİL KAYNAKLAR			
1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2	
2	Yingang Gui, Tao Li, Xin He, Zhuyu Ding, Pingan Yang. "Pt Cluster Modified h-BN for Gas Sensing and Adsorption of Dissolved Gases in Transformer Oil: A Density Functional Theory Study", Nanomaterials, 2019 Yayın	%1	
3	Submitted to Eskisehir Osmangazi University Öğrenci Ödevi	%1	
4	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1	
5	Gök, Zeliha. "Prepreg Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Cevabına Karbon Nanotüp Takviyesinin Etkisinin İncelenmesi", Necmettin Erbakan University (Turkey), 2024 Yayın	<%1	
6	toad.halileksi.net İnternet Kaynağı	<%1	

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Furkan YENİLMEZ
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

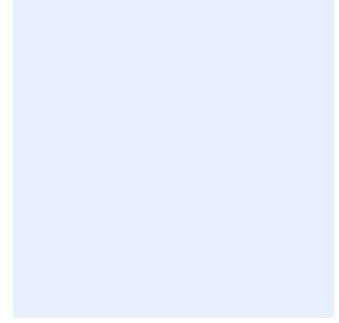
- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Furkan YENİLMEZ
(İmza)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Yüksek Lisans	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	

Makale ve Bildiriler