



**MANYETİK NANOPARTİKÜL/KARBON NANOTÜP
KOMPOZİT NANOPARTİKÜLLERİ İLE DEKORE
EDİLMİŞ KENEVİR KUMAŞLARIN
ELEKTROMANYETİK SOĞURMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Pembe TEBER

Yüksek Lisans Tezi

Kimya

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANA BİLİM DALI
KİMYA TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

MANYETİK NANOPARTİKÜL/KARBON NANOTÜP KOMPOZİT
NANOPARTİKÜLLERİ İLE DEKORE EDİLMİŞ KENEVİR KUMAŞLARIN
ELEKTROMANYETİK SOĞURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Pembe TEBER

Danışman: Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ danışmanlığında, Pembe TEBER tarafından hazırlanan “Manyetik Nanopartikül/Karbon Nanotüp Kompozit Nanopartikülleri ile Dekore Edilmiş Kenevir Kumaşların Elektromanyetik Soğurma Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 23.01.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği / çokluğu ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Serkan BAYAR

Üye : Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Manyetik Nanopartikül/Karbon Nanotüp Kompozit Nanopartikülleri ile Dekore Edilmiş Kenevir Kumaşların Elektromanyetik Soğurma Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

19.01.2025

Pembe TEBER



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında herhangi bir şekilde katkı sunan herkese içtenlikle teşekkür ediyorum. Öncelikle, bu sürecin her aşamasında sağladığı değerli katkılar, rehberlik ve mentorluk için danışman hocam Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ'a şükranlarımı iletmek isterim.

Ayrıca, tez çalışmam sırasında tezin planlanmasında değerli önerileriyle bana önemli geri bildirimler sunan, sonuçların yorumlanmasında ve elektromanyetik soğurma analiz süreçlerine önemli katkı sağlayan kıymetli eşim ve Bayburt Üniversitesi Elektrik ve Enerji Bölümü öğretim üyelerinden Doç. Dr. Ahmet TEBER'e en derin teşekkürlerimi sunarım. Küçük oğlumuz Hasancan'a ise sevgi dolu varlığı ve gülümsemesiyle bu süreci daha anlamlı kıldığı için teşekkür ediyorum.

Malzeme sentezi, analizleri ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmaları yürüttüğümüz Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BUMER) yönetici ve yetkililerine de ayrıca teşekkürü borç biliyorum. Bu kapsamda, Bayburt T3 Vakfı il sorumlusu Emrah BAYRAMOĞLU'na mikrodalga yakma tekniği ile nanomalzeme sentezlenmesinde yardımları için teşekkür ediyorum.

Elektromanyetik soğurma ölçümlerini gerçekleştirdiğimiz Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden Prof. Dr. Bulat RAMEEV ve mikrodalga laboratuvarı asistanlarından Elif AVİNCA'ya yardımlarından ötürü içtenlikle teşekkürlerimi sunuyorum.

Savunma sınavımda bulunan değerli başkan Doç. Dr. Serkan BAYAR'a ve jüri üyelerine, Dr. Öğr. Üyesi Cihan PALOLUOĞLU'na tez çalışmam ve akademik çalışmalarım için verdikleri önemli katkılar için teşekkür ediyorum.

Son olarak, bu tezimi destek ve sevgileri ile her daim yanımda hissettiğim aileme; eğitim sevdalıları olan rahmetli babam Sait KUL'a ve rahmetli kayınpederim SAİM TEBER'e ithaf ediyorum. Onların anıları ve hayatıma kattıkları değer, bu çalışmayı gerçekleştirmemde ilham kaynağı olmuştur.

Pembe TEBER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MANYETİK NANOPARTİKÜL/KARBON NANOTÜP KOMPOZİT NANOPARTİKÜLLERİ İLE DEKORE EDİLMİŞ KENEVİR KUMAŞLARIN ELEKTROMANYETİK SOĞURMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Pembe TEBER

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

Bayburt-2025, Sayfa: 56

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, manyetik $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartikül ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kompozit nanopartikülleri kullanılarak kenevir kumaşların elektromanyetik (EM) soğurma özellikleri incelenmiştir. Mikrodalga destekli yakma yöntemiyle sentezlenen nanopartiküller, satın alınan MWCNT nanopartikülleri ve kenevir kumaş ile birleştirilerek katmanlı bir yapı oluşturulmuştur. Bu yapının X-bandı frekans aralığında (8.2-12.4 GHz) EM dalgaları soğurma performansı, saçılma parametreleri (S_{11} ve S_{21}) ve kompleks dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayıları kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar hem dielektrik hem de manyetik malzemelerin karışımıyla elde edilen kompozit yapıların EM dalga soğurma kapasitesini artırdığını göstermiştir. Kenevir kumaşın doğal emme kapasitesi ve MWCNT'nin yüksek iletkenlik özellikleri, nanopartiküllerin manyetik özellikleriyle birleştirilerek EM soğurma etkinliği optimize edilmiştir. Bu tez, savunma sanayi ve radar görünmezlik teknolojilerinde kullanılmaya uygun, sürdürülebilir ve yüksek performanslı EM soğurucu malzemelerin geliştirilmesine aday bir çalışma önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Manyetik Nanopartikül, Karbon Nanotüp, Kenevir Kumaş, Elektromanyetik Soğurma, Mikrodalga, X-Bant.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC ABSORPTION PROPERTIES OF HEMP FABRICS DECORATED WITH MAGNETIC NANOPARTICLE/CARBON NANOTUBE COMPOZITE NANOPARTICLES

Pembe TEBER

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Chemistry

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. İbrahim Hakkı KARAKAŞ

Bayburt-2025, Pages: 56

In this master's thesis study, the electromagnetic (EM) absorption properties of hemp fabrics were investigated using magnetic $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles and multi-walled carbon nanotube (MWCNT) composite nanoparticles. The nanoparticles synthesized via the microwave-assisted combustion method were combined with purchased MWCNT nanoparticles and hemp fabric to form a layered structure. The EM wave absorption performance of this structure in the X-band frequency range (8.2–12.4 GHz) was evaluated using scattering parameters (S_{11} and S_{21}) and complex dielectric and magnetic permeability coefficients. The results demonstrated that the composite structures obtained by combining both dielectric and magnetic materials enhanced EM wave absorption capacity. By integrating the natural absorption capacity of hemp fabric, the high conductivity properties of MWCNT, and the magnetic properties of nanoparticles, the EM absorption efficiency was optimized. This thesis proposes a sustainable and high-performance EM absorbing material suitable for use in defense industry and radar stealth technologies.

Keywords: Magnetic Nanoparticle, Carbon Nanotube, Hemp Fabric, Electromagnetic Absorption, Microwave, X-Band.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME	III
ÖN SÖZ	IV
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XII
SİMGELER.....	XII
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	2
Araştırmanın Amacı	3
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	4
Araştırmanın Sınırlılıkları	4
Terim ve Tanımları.....	5
BİRİNCİ BÖLÜM.....	7
1. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	7
1.1. SPİNEL FERRİTLER.....	7
1.1.1. Nikel-Çinko Ferritler, Türevleri ve Uygulamaları.....	8
1.2. ÇOK-DUVARLI KARBON NANOTÜPLER	9
1.3. KENEVİR TEKSTİLLER VE ÖZELLİKLERİ	10
1.4. DİELEKTRİK VE MANYETİK MALZEMELERİN HARMANLANMASI İLE ELDE EDİLEN KOMPOZİT YAPILAR VE EM SOĞURMA ÖZELLİKLERİ.....	11
1.5. MİKRODALGA DESTEKLİ KİMYASAL SENTEZ YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	12
1.5.1. Mikrodalga Destekli Yakma Yöntemi ve Üstünlükleri	13
İKİNCİ BÖLÜM	15
2. YÖNTEM	15
2.1. MANYETİK $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ NANOPARTİKÜLLERİN SENTEZİ	15
2.2. ÇOK-DUVARLI KARBON NANOTÜP VE DİELEKTRİK MALZEMELERİN (KENEVİR TEKSTİL VE PARAFİN) TEMİNİ	16
2.3. ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA ÖLÇÜMLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMİ.....	17
2.4. ELEKTROMANYETİK (EM) KURUCU PARAMETRELERİN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	21
2.4.1. İletim Hattı (Dalga Kılavuzu) Yöntemi	23
2.4.2. Nicholson-Ross-Weir Tekniği	24
2.5. ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA TEORİSİ.....	25
2.5.1. Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri)	25
2.5.2. Saçılma Parametrelerinden Elektromanyetik Kurucu Parametreleri ve Dağılma Faktörlerinin Hesaplanması.....	26
2.5.3. Yansıma Kayıplarının (Return Loss, RL) Hesaplanması	28
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	29
3. BULGULAR.....	29

3.1. MANYETİK NANOPARTİKÜL KARAKTERİZASYON BULGULARI	29
3.2. ELEKTROMANYETİK SOĞURUCU YAPININ KURUCU PARAMETRELERİ	37
3.2.1. Kompleks Dielektrik Geçirgenlik Katsayısı Analizi Bulguları	37
3.2.2. Kompleks Manyetik Geçirgenlik Katsayısı Analizi Bulguları	39
3.2.3. Dağılıma Faktörü (Tanjant Kayıpları) Analiz Bulguları.....	41
3.2.4. Yansıma Kaybı (Reflection Loss, RL) Analiz Bulguları.....	43
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	47
Sonuç	47
Tartışma	48
Öneriler	48
KAYNAKÇA.....	49
EKLER	55
Ek 1: Numune Tutucu Yapısı ve Görseli	55
ÖZ GEÇMİŞ	56



TABLÖLAR

Tablo 1: Çok-Duvarlı Karbon Nanotüplerin (MWCNT) Temel Özellikleri	16
Tablo 2: Numune Hazırlamada Kullanılan Ağırlık Miktarları, Oranları ve Numune Kodları	18
Tablo 3: Elektromanyetik Kurucu Parametrelerin Ölçüm Yöntemleri	22
Tablo 4: Isıl İşlem Sıcaklıklarına Göre Hazırlanan Numunelere ait XRD Verileri	30
Tablo 5: Isıl İşlem Sıcaklıklarına Göre Hazırlanan Numunelere ait Manyetik Özellikleri.....	37
Tablo 6: Referans -10dB Seviyesine Göre X-Bandı EM Soğurma Analiz Sonuçları	45
Tablo 7: Referans -20dB Seviyesine Göre X-Bandı EM Soğurma Analiz Sonuçları	45
Tablo 8: X-Bandı EM Soğurma Analiz Sonuçlarının Literatürde Benzer Çalışmalar ile Karşılaştırılması (Referans -10dB Seviyesine Göre).....	46
Tablo 9: Numune Tutucu Yapısal Parametreleri	55

ŞEKİLLER

Şekil 1: EM Spektrum ve Dalga Boyu Şematik Gösterimi.....	13
Şekil 2: Manyetik Nanopartiküllerin Sentezlenme Sürecinin Şematik Gösterimi.....	16
Şekil 3: EM Soğurma Ölçümleri için Çok Katmanlı Soğurucu Yapı Tasarımı ve Ölçüm Düzenneği.....	17
Şekil 4: EM Soğurma Ölçüm Düzenneği Görselleri.....	19
Şekil 5: EM Soğurma Ölçümler için wt% Ağırlık Tartım Görselleri	20
Şekil 6: EM Soğurma Ölçümler için Parafin ve Numune Tutucu Kalibrasyon Görselleri	20
Şekil 7: EM Soğurma Ölçümler için Dalga Kılavuzu ile Entegre Hazırlanmış Katmanlı Yapı Görselleri	21
Şekil 8: EM Soğurma Ölçümleri Sonunda Dalga Kılavuzundan Çıkartılmış Numune Görselleri	21
Şekil 9: İletim Hattı (Dalga Kılavuzu Modeli) Ölçüm Sistemi	23
Şekil 10: EM Dalga Soğurma Ölçümü için Akış Şeması	24
Şekil 11: S-Parametrelerinin Tanımlanma Şematığı	25
Şekil 12: Dalga Kılavuzu İletim Hattı Modeli	26
Şekil 13: Mikrodalga Destekli Yakma Tekniği ile Üretilen ve Çeşitli Sıcaklıklarda Isıl İşlem Görmüş $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ Nanopartiküllerin X-ışını Kırınım Desenleri	29
Şekil 14: Farklı Sıcaklıklarda Isıl İşlem Uygulanarak Üretilen $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ NP'lerin FT-IR Spektrumları	31
Şekil 15: 800 ⁰ C'de Isıl İşlem Uygulanarak Sentezlenen $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ Nanopartiküllerin TEM Görüntüleri	33
Şekil 16: $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ Nanopartiküllerin Oda Sıcaklığında Ölçülen VSM Verilerinden Elde Edilen Manyetik Histerezis Eğrileri	34
Şekil 17: Isıl İşlem Sıcaklığına Göre $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ Nanopartiküllerin VSM Analizinden Kalıntı Manyetizasyonu ve Koersivite Yakın Görünümleri	36
Şekil 18: $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Dielektrik Geçirgenlik Katsayılarının Gerçek (ϵ') Kısımları	38
Şekil 19: $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Dielektrik Geçirgenlik Katsayılarının Sanal (ϵ'') Kısımları	39
Şekil 20: $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Manyetik Geçirgenlik Katsayılarının Gerçek (μ') Kısımları	40
Şekil 21: $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Manyetik Geçirgenlik Katsayılarının Sanal (μ'') Kısımları	41

Şekil 22: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Dielektrik Dağılma Faktörleri (Dielektrik Tanjant Kayıpları).....	42
Şekil 23: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Manyetik Dağılma Faktörleri (Manyetik Tanjant Kayıpları).....	43
Şekil 24: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Yansıma Kayıpları (Reflection Loss, RL).....	44
Şekil 25: (a) Numune Tutucu Boyut Parametreleri ve (b) Numune Tutucu Perspektif Görünüm Şematiği.....	55



KISALTMALAR

EM	: Elektromanyetik
CNT	: Karbon Nanotüp
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GHz	: Gigahertz
Hz	: Hertz
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
MUT	: Test Altındaki Numune
NA	: Network Analizör
NP	: Nanopartikül
NRW	: Nicholson-Ross-Weir
RF	: Radyo Frekansı
S-Parametresi	: Saçılma Parametresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
THz	: Terahertz
VSM	: Titreşimli Numune Manyetometresi
X-Band	: 8.2-12.4 GHz frekans bandı
XRD	: X-Işını Difraktometresi

SİMGELER

c	: Işık Hızı
d	: kalınlık
ϵ_0	: Serbest Uzay Dielektrik Sabiti
ϵ_r	: Dielektrik Geçirgenlik Katsayısı
f	: Frekans
k	: Dalga Sayısı
K	: Kelvin
λ	: Dalga Boyu
μ_0	: Serbest Uzay Manyetik Geçirgenlik Sabiti
μ_r	: Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
Ni	: Nikel
Ni-Zn	: Nikel-Çinko
S₁₁	: Yansıma Katsayısı
S₂₁	: Geçirme Katsayısı
$\tan(\delta_\epsilon)$	: Dielektrik Kayıp (Dağılma Faktörü) Parametresi
$\tan(\delta_\mu)$	: Manyetik Kayıp (Dağılma Faktörü) Parametresi
wt%	: Ağırlık Yüzdesi

GİRİŞ

Günümüz teknolojilerinde telekomünikasyon, endüstri, savunma, güvenlik ve askeri sistemlerdeki gelişmeler nedeniyle radar soğurma ve kalkanlama teknolojisi hakkında artan büyük bir ilgi mevcuttur. Tüm bu gelişmeler, araştırmaları uygun kalınlık, maliyet, verimlilik, ağırlık, sertlik/esneklik, sürdürülebilirlik, elektromanyetik ve fiziksel uyumluluğa sahip mikrodalga soğurucu malzemelere yönlendirmektedir (Giuseppe vd., 2022). Elektromanyetik (EM) soğurucular, radar sistemlerinde "görünmez" uçak tasarımı, yer tabanlı askeri donanımları (teçhizat ve iletişim sistemleri vb.) hava tabanlı radar gözetimine karşı gizlemede ve araştırma laboratuvarlarında uçakların veya diğer hedeflerin izlerinin simüle edildiği yansız odaların inşa edilmesi gibi çeşitli savunma/havacılık uygulamalarına sahiptir. Radar sistemlerinde görünmezlik ve kamuflaj (gizleme) tasarımlarının amacı, potansiyel hedeflerin radar kesitini alanlarını azaltmak, yani uçakları, araçları veya donanım sistemlerini düşman radar gözlem sistemleri tarafından daha az tespit edilebilir hale getirmektir (Teber vd., 2016).

Savunma sanayi teknolojilerindeki gelişmeler gerek uçakların radar sistemlerinde görünmezliği gerekse havada uçuş gerçekleştiren uçaklar, dronlar vb. havadan radar sistemlerine sahip sistemler tarafından yerüstü sistemlerin (askeri mühimmat ve/veya teçhizatların) görünmezliği konusunda radar soğurucu malzeme teknolojisine duyulan/artan talep doğrultusunda tekstil tabanlı nanopartiküller ile kaplanmış kompozit yapıların geliştirilmesi bir gerekliliktir. Literatürdeki çalışmalarda tekstil malzemeler alttaş malzeme formunda kullanılmakla beraber sentezlenen nanopartiküllerin tekstil ürünleri üzerinde konumlandırılması ya da tekstil ürünleri içine emdirilmesi gibi uygulamalar sayesinde kullanımları da mevcuttur. Tekstiller, önemli endüstri sektörlerinden biri olmasından dolayı giyim, haneler, medikal ve laboratuvar malzemeleri gibi teknik birçok sektörle ilişkili olarak üretimleri mevcuttur (Wilson, 2021). Geleneksel tekstil ürünlerinin aksine bu sektörler içerisinde 1990'lı yıllarda öne çıkan akıllı tekstil malzemeler son yıllarda ilgi odağı olmuştur (Akman vd., 2013; Cherenack & Pieterston, 2012; Stoppa & Chiolerio, 2014). Akıllı tekstil malzemeler, tekstil ürünlerine özel özellikler kazandırarak geleneksel tekstil anlayışının aksine yeni özelliklerde kullanım alanlarına göre yenilikçi yaklaşımlar sunmaktadırlar. Bu yaklaşımlar içerisinde yukarıda bahsedilen savunma, güvenlik ve askeri sistemler için nano-malzeme ya da kompozit malzeme kaplamalı tekstil ürünleri araştırmacıları bu alanlarda çalışmaya yönlendirmektedir. Keçeler, iplikler, dokuma ya da dokunmamış kumaşlar gibi çok sayıda tekstil malzemesi hâlihazırda araştırılmakta ve ticari tekstilleri elektromanyetik radar sinyallerinin emilimini uygun hale getirmek için yeni yaklaşımlar geliştirilmektedir (Maity & Chatterjee, 2018). Bu anlamda, kenevir bitkisinin ya da kenevirden üretilen tekstillerin

özelliklerine bakmak fayda sağlayacaktır. Şöyle ki, kenevir bitkisi ya da liflerinin en önemli özelliklerinden biri topraktaki ağır metalleri emme konusundaki doğal yeteneğidir (LaJeunesse, 2021). Bu özellik dikkate alınırsa endüstriyel kenevirden elde edilen iplik veya dokunma kumaşların Co, Fe, Mn, Ni ve Zn gibi geçiş metalleri ile sentezlenen nano yapıları kompozit malzemeleri emme kabiliyetinin yüksek olacağı açıktır. Literatürdeki kenevir lifler ya da dokumalar üzerinde olgunlaşmamış bu çok özel çalışma alanı ve kenevir tabanlı tekstil malzemelerin metalleri doğal emme kabiliyeti baz alınarak alttaş malzemesi olarak kenevir kullanımı bu tez çalışmasının odağındadır. Bu sayede literatürdeki kenevir malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen mikrodalga soğurucu malzeme boşluğu doldurularak orijinal bir çalışma olacaktır.

Radar soğurucu malzeme geliştirme çalışmalarında tekstil ürünleri gibi alttaş malzemesinin yanı sıra sentezlenen nanopartiküller öne çıkan etkenlerdendir. Radar soğurucu malzemeler iki gruba ayrılarak kategorize edilebilir: (i) dielektrik ve (ii) manyetik soğurucular. Bu soğurucular nano-yapılı malzemenin elektromanyetik dalgalar ile etkileşimlerinden ötürü soğurma sırasıyla malzemenin dielektrik ve manyetik özelliklerinden kaynaklandığını gösterir. Karbon nanotüpler (CNT) ya da çok-duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) tarafından soğurma, elektrik ve iyonik polarizasyon gibi dielektrik mekanizmalara bağlı olan dielektrik özellikleri (complex permittivity) ile ilgilidir. Öte yandan Demir (Fe), Nikel (Ni), Kobalt (Co), Manganez (Mn) ve Çinko (Zn) gibi geçiş metalleri, elektromanyetik dalgaları, özellikle mikrodalgaları, zayıflatmak için manyetik özelliklerine (complex permeability) dayanan manyetik malzemelerdir. Bununla birlikte hem dielektrik hem de manyetik malzemeler, kendi başlarına kullanıldıklarında nispeten düşük soğurma özelliğine sahiptir. Dielektrik malzemeler (CNT ve MWCNT'ler), mikrodalga absorpsiyon özellikleriyle bilinen geçiş metalleri veya bunların ferritleri gibi manyetik nanomateriyallerle kaplandığında veya harmanlandığında soğurma özelliklerini geliştirmek mümkündür (Teber vd., 2017). Bu perspektiften, hem nano-yapılı dielektrik malzeme (MWCNT) hem de yukarıda bahsedilen nano-yapılı manyetik geçiş metalleri sentezlenerek belirli ağırlık yüzdelerinde (%wt) farklı kombinasyonları ile harmanlanarak tekstil ürünlerine ek bir tabaka oluşturan çok katmanlı bir yapı gerçekleştirilerek mikrodalga frekanslarında (özellikle IEEE'nin kabul ettiği radar frekans bantlarında X-Bandı) yüksek soğurma kabiliyetine sahip radar soğurucu malzemeler geliştirilebilir.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Bu tez çalışmasında araştırma konusu, özellikle yer üstü askeri teçhizat ve mühimmatların havadan radar görüntüleme sistemlerine sahip havada uçuş özelliği olan uçak, dronların sistemlerinde görünmez kılabilmek için kenevir kumaş malzemeler üzerine ve/veya

içine sentezlenen nanopartik  leri farklı ağırlık konfigürasyonlarında harmanlayarak radar soğurucu malzeme geliştirilmesidir. Geliştirilen kenevir kumaş tabanlı radar soğurucu malzemeler sayesinde yer üstü sistemlerin uak radarlarında görüntülenebilme probleminin önüne geçilmesinin sağlanmasıdır.

Araştırmanın Amacı

Bu tez kapsamında amaç, kenevir kumaş tabanlı tekstil kumaşları bir katman olacak şekilde ve mikrodalga destekli yakma yöntemi kullanılarak sentezlenecek olan Nikel ve Zinc nanopartiküller ile belirli yüzde ağırlıklarda oluşturulan plaka yapı diğer bir katman olarak hazırlanarak mikrodalga frekanslarından X-Bandında mikrodalgaların soğurulmasının sağlanmasıdır. Bu doğrultuda yukarda bahsedilen radar bant frekans aralığını vermek faydalı olacaktır: X-Bandı frekans aralığı 8.2-12.4GHz. Araştırma metrikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Manyetik nanopartiküller (Nikel ve Zinc ferritler) mikrodalga yakma tekniği ile sentezlenir ve sentezlenen nanopartiküllerin karakterizasyonu aşağıdaki tekniklerle gerçekleştirilir.
- X-ışını kırınımı (XRD) ile malzemenin kristal yapısı/faz sağlığı doğrulanır.
- Geçiş Elektron Mikroskobu (TEM) ile nanopartiküllerin morfolojisi incelenir.
- Fourier-Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR).
- VSM Analizi.
- Ticari olarak satın alınan MWCNT'ler ile manyetik nanopartiküller belirli yüzde ağırlıklar ile harmanlanır.
- Manyetik nanopartiküller ve dielektrik malzeme olan nano-yapılı MWCNT'ler 50   C'de eritilen parafin içinde manyetik karıştırıcı yardımıyla homojenize bir solüsyon hazırlanarak numune tutucular içine yerleştirilen kenevir kumaş üzerinde yeni bir tabaka olarak hazırlanır.
- Numune tutucular network analizör cihazına entegre edilen uygun radar frekans aralıklarına göre boyutlandırılan dalga kılavuzları arasına montajı sağlanır.
- Network analizör cihazından alınan saçılma parametreleri (S-parametreleri: S_{11} ve S_{21}) ve dielektrik ve manyetik geçirgenlik verileri kompleks formda deneysel olarak elde edilir.

- Nicholson-Ross-Weir metodu kullanılarak üretilen radar soğurucu malzemelerin kompleks dielektrik geçirgenlik, kompleks manyetik geçirgenlik katsayıları ve geri dönüş kayıpları (soğurma) türetilir.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Günümüz teknolojisinde radar soğurma ve kalkanlama teknolojileri, özellikle savunma sanayi, güvenlik ve askeri sistemler açısından büyük bir öneme sahiptir. Radar soğurucu malzemeler, uçaklar, dronlar ve askeri teçhizatların düşman radar sistemleri tarafından tespit edilmesini zorlaştırarak stratejik avantaj sağlar. Bu bağlamda, araştırma, elektromanyetik dalgaları etkin bir şekilde soğurabilen ve düşük maliyetli, hafif, çevre dostu alternatifler sunan yeni malzemelerin geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel kenevir bazlı tekstil malzemeleri, manyetik ve dielektrik özelliklere sahip nano yapıları malzemelerle birleştirilerek radar soğurucu kompozitler elde edilmektedir. Kenevirin ağır metalleri doğal olarak emme yeteneği sayesinde, demir, nikel, çinko gibi geçiş metalleriyle sentezlenen nano yapıları bileşiklerin tekstil yüzeyine entegre edilmesiyle etkin bir radar soğurucu yapı oluşturulması hedeflenmektedir. Böylece hem sürdürülebilir hem de yüksek performanslı bir radar soğurucu malzeme geliştirilerek literatürdeki boşluk doldurulacak ve savunma sanayi için yenilikçi bir çözüm sunulacaktır. Bu araştırma, özellikle askeri teçhizat ve mühimmatın havadan görüntülenmesini önleyerek güvenlik seviyesini artırmak, radar sistemlerine karşı görünmezlik sağlamak ve elektromanyetik dalga soğurma performansını iyileştirmek amacıyla büyük bir öneme sahiptir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Araştırmanın sınırlılıkları malzeme seçimi ve uygulama alanı, deneysel koşullar ve test süreci, uygulama koşulları ve ölçeklenebilirlik ve ticari uygulanabilirliklik şekilde özetlenebilir ve aşağıda bu başlıklara göre sırasıyla detaylı bilgiler sunulmuştur.

Çalışma sadece kenevir bazlı tekstil malzemeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı tekstil türleri veya sentetik bazlı malzemeler üzerine uygulanabilirliği araştırılmamıştır. Ayrıca kullanılan nanopartiküller (Nikel ve Çinko) belirli kombinasyonlarla test edilmiştir; diğer manyetik ve dielektrik malzemelerle kıyaslanmamıştır.

Mikrodalga frekans aralığı olarak yalnızca X-Bandı (8.2-12.4 GHz) ele alınmıştır. Daha geniş frekans aralıklarında malzemenin performansı test edilememiştir. Ek olarak, kullanılan karakterizasyon yöntemleri (XRD, TEM, FT-IR, VSM) belirli analizleri sağlamaktadır; farklı analiz yöntemleriyle ek yapısal ve elektromanyetik incelemeler yapılamamıştır.

Araştırma laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir; gerçek hava koşulları, nem, sıcaklık değişimleri veya mekanik dayanıklılık gibi faktörlerin etkisi değerlendirilmemiştir. Üretilen malzemenin uzun vadeli dayanıklılığı, çevresel faktörlere karşı direnç gibi hususlar kapsam dışında kalmıştır.

Malzeme üretim süreci laboratuvar ölçeğinde yapılmış olup, endüstriyel üretime geçişte karşılaşılabilecek teknik ve ekonomik engeller değerlendirilmemiştir. Üretim maliyetleri ve geniş çaplı üretim süreçleri açısından uygulanabilirliği analiz edilmemiştir.

Bu sınırlılıklar, araştırmanın belirli bir odak alanında özgün ve yenilikçi katkılar sunduğunu, ancak gelecekte daha geniş çaplı çalışmalara ihtiyaç duyulabileceğini göstermektedir.

Terim ve Tanımları

Araştırmada sıkça kullanılan malzeme ve yöntemleri anlamak açısından önemli olan terimler ve tanımlar şu şekilde verilebilir: (i) Radar Soğurucu Malzemeler (RSM), (ii) Elektromanyetik Soğurucular (EMS), (iii) X-Bandı, (iv) Dielektrik Malzemeler, (v) Manyetik Malzemeler, (vi) Karbon Nanotüpler (CNT&MWCNT), (vii) Mikrodalga Destekli Yakma Yöntemi (MDYY), (viii) Kenevir Tabanlı Tekstiller, (ix) X-Işını Kırınımı(XRD), (x) Geçiş Elektron Mikroskobu (TEM), (xi) Fourier-Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), (xii) VSM Analizi (Titreşim Numune Manyetometresi) ve (xiii) Nicholson-Ross-Weir (NRW) Metodu'dur.

RSM; radar dalgalarını emerek veya saçılmasını sağlayarak radar sistemlerinde görünmezlik veya düşük radar izi oluşturan malzemelerdir. Savunma ve güvenlik alanlarında kullanılır.

EMS; elektromanyetik dalgaların yansımaları azaltan veya tamamen absorbe eden malzemelerdir. Savunma sanayi, tıbbi cihazlar ve elektronik sistemlerde kullanılır.

X-Bandı; IEEE tarafından belirlenen radar frekans aralıklarından biridir ve 8.2-12.4 GHz arasında yer alır. Hava ve deniz radar sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.

Dielektrik Malzemeler; elektrik yüklerini depolayabilen ancak elektrik akımını iletmeyen malzemelerdir. Radar soğurucu malzemelerde dielektrik özellikler, dalga soğurma kapasitesini artırmada önemli rol oynar.

Manyetik Malzemeler; Manyetik alanlarla etkileşime giren ve elektromanyetik dalgaları soğurma kapasitesi olan malzemelerdir. Geçiş metalleri (Fe, Ni, Co, Mn, Zn) manyetik özellikleri nedeniyle radar emilimi için kullanılır.

Karbon Nanot   ler; CNT, Karbon atomlarının silindirik yapıda tek katmanlı olarak düzenlendiğı nanomalzemeler iken MWCNT, Birden fazla karbon nanotüp katmanından oluŐ an t   ler olup, dielektrik özellikleri sayesinde radar dalgalarını soğ urmada kullanılır.

Kenevir Tabanlı Tekstiller; kenevir bitkisinden elde edilen doğ al liflerden üretilen tekstil malzemeleridir. Doğ al ağ ır metal emme   zelliğ i nedeniyle nano malzemelerle kaplanarak radar soğ urucu malzeme olarak kullanılabilir.

MDYY; Nanopartiküllerin sentezi için mikrodalga enerjisi kullanılan bir yöntemdir. Kontrollü ve hızlı bir sentez süreci sağ lar.

NRW Metodu; Radar soğ urucu malzemelerin dielektrik geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve soğ urma özelliklerini hesaplamak için kullanılan bir matematiksel yöntemdir.

XRD; malzemelerin kristal yapılarını ve faz saflıklarını belirlemek için kullanılan bir karakterizasyon yöntemidir.

TEM; nanopartiküllerin morfolojisini ve boyutlarını incelemek için kullanılan yüksek çözünürlüklü bir mikroskoptur.

FT-IR; malzemelerin kimyasal bileŐ imini ve fonksiyonel gruplarını analiz eden bir yöntemdir.

VSM Analizi; manyetik malzemelerin manyetik özelliklerini belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

Elektromanyetik dalga emen nano yapıları malzemeler, ince, hafif ve esnek radar emicilerin üretimi sayesinde özellikle askeri uygulamalarda önem kazanmıştır. Mikrodalga emilim, malzemenin karmaşık dielektrik ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır ve maksimum verimlilik için optimize edilmelidir. Kompozit mikrodalga emiciler, tipik olarak dielektrik bir matris içinde iletken veya manyetik dolgu parçacıklarını barındırarak farklı şekil ve boyutlarda tek veya çok katmanlı olarak üretilebilir (Donald & Mardiguian, 1988). Bu çalışmanın konusu olan kenevir tekstil kumaşlar ile çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve sentezlenen Nikel-Çinko (Ni-Zn) ferrit manyetik malzemelerin farklı ağırlık konsantrasyonlarında harmanlanması sonucu iki katmanlı bir yapı oluşturularak elde edilen numunelerin elektromanyetik (EM) dalga soğurma özelliklerini amaçlamaktadır. Bu perspektiften, öncelikli olarak bu bölümde spinel ferritler ve bu ferrit sınıfı altında yer alan Ni-Zn ferritler, bu ferritlerin türevleri ve uygulamaları hakkında literatüre atıf yapılarak kuramsal bir çerçeve sunmayı amaçlar. Ni-Zn ferritlerin geleneksel yöntemlerin aksine mikrodalga destekli yakma tekniği kullanılmıştır ve bu tekniğin üstünlükleri sunulmuştur. Ayrıca iki katmanlı yapının oluşturulmasında kullanılan MWCNT'lerin yapısal ve elektriksel özellikleri verilmiştir. Bu tez çalışmasında dielektrik malzeme olarak kullanılan ve literatürde EM soğurucu olarak kullanıma ender rastlanan diğer bir eleman olan kenevir kumaşların yapısal, termal, dielektrik ve elektriksel iletkenlikleri hakkında detaylı bilgi sunulmuş ve neden bu tez çalışmasında tercih edildiğine dikkat çekilmiştir.

Bu tez çalışmasında temel olarak ele alınan prensip olan EM dalgaların emiliminin dielektrik ve manyetik malzemelerin karışımları ile gerekli üretim optimizasyonları gerçekleştirilerek EM dalga emiliminin artırılmasıdır. Bu açıdan dielektrik ve manyetik malzemelerin karışımları ile elde edilen kompozit yapıların EM dalga soğurma özelliklerinin artırılacağına ilişkin literatür verilmiştir.

1.1. SPİNEL FERRİTLER

Spinel ferritler, genel formülü AB_2O_4 olan ve özgül yüzey alanı ve kimyasal kararlılıkları yüksek, ayarlanabilir şekil ve boyut ya da esnek olarak yeni fonksiyonlar kazandırılabilenlerindeki kolaylık ve manyetik özellikleriyle öne çıkan seramik malzemelerdir. Bu yapı(lar)da A genellikle Nikel (Ni^{2+}), Çinko (Zn^{2+}) gibi divalent (iki değerlikli) katyonları temsil ederken B ise Demir (Fe^{3+}) iyonlarını temsil eder. Spinel yapısı, kristal kafesindeki tetrahedral ve oktahedral boşlukların belirli bir süzenle doldurulmasıyla oluşur ve bu yapı(lar),

malzemenin manyetik ve elektriksel özelliklerini belirler. Spinel ferritler nanopartiküller yarı iletken davranışları ve ferromanyetik özellikleri nedeniyle birçok uygulamada kullanımları yer bulmaktadırlar. Manyetik malzeme, elektromanyetik sistem, telekomünikasyon gibi uygulamaları öne çıkan başlıklardandır.

Spinel ferritler, manyetik zorlanma seviyelerine göre yumuşak, yarı-sert ya da sert malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Yumuşak ferritler, düşük zorlayıcı kuvvetleri nedeniyle EM uygulamalarda yaygın olarak tercih edilirlerken bu sınıfta yer alan ferritler, manyetizasyon yönünü minimum enerji harcayarak tersine çevirebilme özelliği taşımaktadır ve histerezis kayıpları da oldukça düşüktür. Genellikle çinko ($ZnFe_2O_4$), nikel ($NiFe_2O_4$) ve mangan ($MnFe_2O_4$) ferrit gibi metal ferritleri yumuşak manyetik özellikler sergiler. Düşük zorlayıcılıkları sayesinde, bu malzemeler yüksek frekanslarda bile düşük enerji kayıpları sunar. Bu özellikleriyle yumuşak ferritler, özellikle radyo frekans (RF) uygulamalarında ve enerji verimliliği gerektiren elektronik aygıtlarda önemli bir anahtardır. Yumuşak ferritlerin başlıca uygulama alanları arasında EM dalga soğurucuları (Barbarino vd., 2011; Costa vd., 2009), AM radyo alıcıları, anahtarlamalı mod güç kaynakları, antenler, RF transformatörleri ve indüktör çekirdekleri yer alır. Bu uygulamalarda, ferritlerin düşük kayıp ve yüksek performans özellikleri, cihazların etkinliğini artırarak enerji tasarrufu sağlar. Özetle, spinel ferritlerin yumuşak manyetik özellikleri, düşük histerezis kayıpları ve yüksek frekans uygulamalarına uygunlukları sayesinde elektronik-iletişim teknolojilerinde kritik bir malzeme grubu olarak dikkat çekicidir. Bu durum endüstriyel nano-malzemelerin kullanılabilir olmaları açısından bu tür nano-partiküllerin sentezlenmesi için hızlı, çevreci, mümkün olduğunca basit işletim süreci olan ve etkili metotlar araştırma/geliştirme alanlarının gelişmesine olanak tanımıştır (Karakaş, 2022).

1.1.1. Nikel-Çinko Ferritler, Türevleri ve Uygulamaları

Nikel Ferritler ($NiFe_2O_4$) manyetik kayıt cihazları, mikrodalga cihazları ve manyetik hedef taşıyıcıları gibi uygulamalarda kullanılan önemli bir Spinel ferrit türüdür. Hidrotermal sentez yöntemiyle üretilen nikel ferrit nano parçacıkları, yaklaşık 25-70 nm boyutlarında olup, süperparamanyetik özellikler sergiler. Bu özellik, manyetik alan kaldırıldığında manyetizasyon kalıntısı olmaması anlamına gelir, bu da biyomedikal uygulamalar için avantajlıdır (Vural vd., 2016).

Çinko ferritler ($ZnFe_2O_4$), zayıf manyetik özelliklere sahip olup, katalizör, gaz sensörleri ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi alanlarda kullanılır. Hidrotermal sentezle elde edilen çinko ferrit nano parçacıkları, küresel morfolojiye sahip olup, homojen element dağılımı gösterir. Manyetik özellikleri, nikel ve kobalt ferritlere göre daha zayıftır, bu

da belirli uygulamalar için uygun hale getirir.

Nikel ve çinko ferritlerin farklı katyonlarla (örneğin, kobalt, manganez) yer değiştirilmesiyle türevleri oluşturulabilir. Bu türevler, manyetik ve elektriksel özelliklerin ayarlanmasında kullanılır avantajlıdır (Sousa vd., 2002). Örneğin, kobalt ferrit (CoFe_2O_4), yüksek manyetik anizotropisi nedeniyle manyetik kayıt ortamlarında tercih edilir (Sugimoto, 1999; Bhat P.B. & Bhat B.R., 2016). Ayrıca, nikel-çinko ferritler ($\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$), elektromanyetik enerji soğurucularında ve radar soğurucu malzemelerde kullanılır (Lima vd., 2008; Sugimoto, 1999).

Spinel ferritler, özellikle nikel ve çinko ferritler, manyetik özellikleri ve geniş uygulama alanlarıyla dikkat çekmektedir. Sentez yöntemleri ve bileşimlerindeki değişiklikler, bu malzemelerin özelliklerini büyük ölçüde etkileyerek, onları farklı teknolojik uygulamalar için ideal hale getirmektedir.

1.2. ÇOK-DUVARLI KARBON NANOTÜPLER

Çok-duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler), birden çok konsantrik silindirik grafen yapılar oluşturacak şekilde birbirine sarılmasıyla meydana gelen nanomalzemelerdir. Bu yapılar, benzersiz mekanik, elektriksel ve termal özellikleri sayesinde nanoteknoloji, elektronik, malzeme bilimi ve biyomedikal mühendislik gibi çeşitli alanlarda geniş bir uygulama ağına sahiptir. MWCNT'lerin elektronik spektrumu ve tünelleme özellikleri, katman sayısı ve çap gibi yapısal parametrelere bağlıdır. Abrikosov vd. (2005), MWCNT'lerin elektronik spektrumunu ve tünelleme özelliklerini inceleyerek, bu yapıların metalik veya yarı iletken davranış sergileyebileceğini göstermişlerdir. MWCNT tabanlı elektromanyetik soğurucular, özellikle elektronik cihazlarda EMI koruması, radar sistemlerinde görünmezlik teknolojileri ve telekomünikasyon ekipmanlarında parazit önleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek soğurma kapasitesi ve geniş frekans bantlarında etkinlikleri nedeniyle tercih edilmektedir.

Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler), elektromanyetik dalga soğurucu olarak dikkat çeken nano-malzemelerdir. Yüksek elektrik iletkenlikleri, geniş yüzey alanları ve ayarlanabilir manyetik özellikleri sayesinde, MWCNT'ler elektromanyetik girişim (EMI) koruması ve radar soğurucu malzemeler gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

MWCNT'lerin elektromanyetik dalgaları soğurma yeteneği, dielektrik kayıplar ve manyetik kayıplar gibi mekanizmalara dayanır. Yüksek iletkenlikleri, elektromanyetik dalgaların malzeme içinde indüklediği akımların oluşturduğu ısı kayıplara yol açar. Ayrıca, MWCNT'lerin yüzeyleri, elektromanyetik dalgaların yansımalarını azaltarak soğurma etkinliğini artırır. MWCNT'ler, polimer matrislerle veya manyetik malzemeler ile birleştirilerek kompozit

malzemeler oluşturulur. Bu kompozitler, hafiflik ve esneklik gibi avantajlar sunarken, elektromanyetik soğurma performansını da artırır. Özellikle, MWCNT içeren kompozitlerin elektromanyetik dalgaların soğurulması ve geri yansımaları üzerindeki etkileri incelenmiştir (Kaşgöz, 2017).

MWCNT'lerin yapısal özellikleri hakkında şunlar söylenebilir:

MWCNT'ler, grafen tabakalarının silindirik yapılar oluşturacak şekilde birbirine konsantrik olarak sarılmasıyla meydana gelir. Bu yapı, MWCNT'lerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini belirleyen temel bir unsurdur. MWCNT'ler, iç içe geçmiş birden fazla grafen tabakasından oluşur. Tabakalar arasında Van der Waals kuvvetleri etkili olup, yapının mekanik kararlılığını artırır (Tschumper, 2009). Katmanlar arası kuvvetler, nanotüplerin birbirine yapışma eğilimini artırır ve topaklanmaya neden olabilir. Dispersiyon teknikleri, bu etkiyi azaltmak için kullanılır. Katman sayısı genellikle 2 ile 50 arasında değişebilir. Dış çapları genellikle 10 ile 50 nm arasında değişebilirken iç çapları 2 ile 20 nm arasında olabilir. Uzunluk olarak ise mikrometre ile santimetre arası ölçeklerde değişebilir. Grafen tabakaları, heksagonal bir düzende düzenlenmiştir. Bu düzen, MWCNT'lere yüksek kristallik ve düşük kusur yoğunluğu sağlar. Tabakalar arasındaki mesafe yaklaşık 0.34 nm'dir. Elektriksel özellikler açısından MWCNT'ler, grafen tabakalarının elektronik yapılarına bağlı olarak metalik veya yarı iletken özellikler gösterebilir. Çoklu katmanlı yapı, elektriksel iletkenliği artırabilir. Termal özellikleri ise yüksek termal iletkenlik ($>3000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) sunmakla birlikte termal dayanıklılıkları, özellikle kompozit malzemelerde etkin soğutucu olarak kullanılmalarını sağlar (Miranda vd., 2019). Son olarak yüzey özellikleri bakımından MWCNT'lerin yüzeyleri fonksiyonelleştirme için uygundur; kimyasal gruplarla modifiye edilebilir. Bu modifikasyonlar, malzemenin su sevme veya sevmezlik gibi özelliklerini değiştirir ve uygulama alanlarını genişletir.

1.3. KENEVİR TEKSTİLLER VE ÖZELLİKLERİ

Kenevir kumaşları, kenevir bitkisinin liflerinden üretilen doğal bir tekstil malzemesidir. Liflerin yapısal özellikleri, termal dayanımı ve dielektrik davranışları, malzemenin geniş uygulama alanı mevcuttur. Kenevir kumaşlar, doğal ve sürdürülebilir malzemeler olarak yapısal dayanıklılık, termal kararlılık ve iyi dielektrik özellikler sunar. Bu özellikler, onları tekstil, yalıtım, kompozit malzeme güçlendirme ve elektromanyetik koruma gibi alanlarda ideal bir seçenek haline getirir. Kenevir kumaşların çevresel avantajları da (biyobozunur ve düşük karbon ayak izi) bu malzemeye olan ilgiyi artırmaktadır.

Kenevir tekstillerin yapısal özellikleri şu şekilde verilebilir:

Lif yapısı: Kenevir lifleri, selüloz (%60-70), hemiselüloz (%15-25) ve lignin (%3-10)

içerir. Selüloz içeriği, malzemeye yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlar. Yoğunluk: Kenevir liflerinin yoğunluğu yaklaşık 1,4-1,5 g/cm³'tür. Bu, kumaşın hafif ve dayanıklı olmasına katkıda bulunur. Mekanik özellikleri: Yüksek çekme mukavemeti (550-900 MPa), kenevir kumaşlarını sağlam ve esnek kılar. Elastik modülü yaklaşık 30-60 GPa'dır, bu da malzemenin deformasyonlara karşı dayanıklı olduğunu gösterir. Yüzey özellikleri: Kenevir kumaşları, pürüzlü ve mikro gözenekli bir yüzeye sahiptir. Bu özellik, boyama ve kaplama işlemleri için avantaj sağlar.

Kenevir tekstillerin termal özellikleri şu şekilde verilebilir:

Isıl Dayanım bakımından, kenevir lifleri, yüksek selüloz içeriği nedeniyle 150-200 °C'ye kadar termal kararlılığa sahiptir. Isı İletkenliği açısından kenevir kumaşları düşük ısı iletkenliğine sahiptir (~0,04-0,06 W/mK). Bu, onları termal yalıtım malzemesi olarak uygun hale getirir. Isı Toleransı için Lifler, 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bozulmaya başlar. Bu sıcaklık aralığı, kenevir kumaşlarını düşük ila orta sıcaklık uygulamaları için ideal yapar. Ayrıca, termal genleşme özellikleri açısından kenevir lifleri, düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Bu özellik, malzemenin boyutsal stabilitesini artırır.

Kenevir tekstillerin dielektrik özellikleri şu şekilde verilebilir:

Elektriksel İletkenlik: Kenevir lifleri doğal olarak yalıtkandır ve düşük elektriksel iletkenlik sergiler. Dielektrik Sabiti için kenevir kumaşları düşük dielektrik sabiti (yaklaşık 1-3,0) gösterir. Bu özellik, kumaşı elektromanyetik dalgalara karşı etkili bir yalıtım malzemesi yapar. Bu açıdan dielektrik kayıplara bakmak faydalı olacaktır: düşük dielektrik kayıpları, kenevir kumaşlarının elektronik uygulamalarda kullanımına olanak tanır. Dielektrik kayıpların yüksek frekanslar açısından ilişkisi dikkate alındığında kenevir liflerinin dielektrik özellikleri, uygulanan frekansa bağlı olarak değişebilir. Yüksek frekanslarda performansı stabilize kalır (Dahal vd., 2022; Krishnasamy vd., 2024).

1.4. DİELEKTRİK VE MANYETİK MALZEMELERİN HARMANLANMASI İLE ELDE EDİLEN KOMPOZİT YAPILAR VE EM SOĞURMA ÖZELLİKLERİ

EM dalga soğurucu malzemeler, soğurma mekanizmalarına göre dielektrik ve manyetik soğurucular olmak üzere iki tipe ayrılabilir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT'ler) mikrodalga soğurması, elektronik ve iyon polarizasyonu gibi dielektrik mekanizmalara dayanan karmaşık geçirgenlik özelliklerinden kaynaklanır. Buna karşılık, Fe, Ni, Co, Mn ve Zn gibi geçiş metalleri manyetik özelliklerine (karmaşık manyetik geçirgenlik) bağlı olarak mikrodalgaları zayıflatır. Manyetik dolgu malzemeleri (Fe, Ni, Co ve ZnO gibi), karbon nanotüpler (CNT) ve ZnO ile birleştirilerek çeşitli hibrit kompozitler geliştirilmiştir. Bu malzemeler, mikrodalga soğurucu özelliklerin artırılması için kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda, demir (Fe) (Lin vd., 2007), nikel (Ni) nanotel (Zou vd., 2010), manyetit

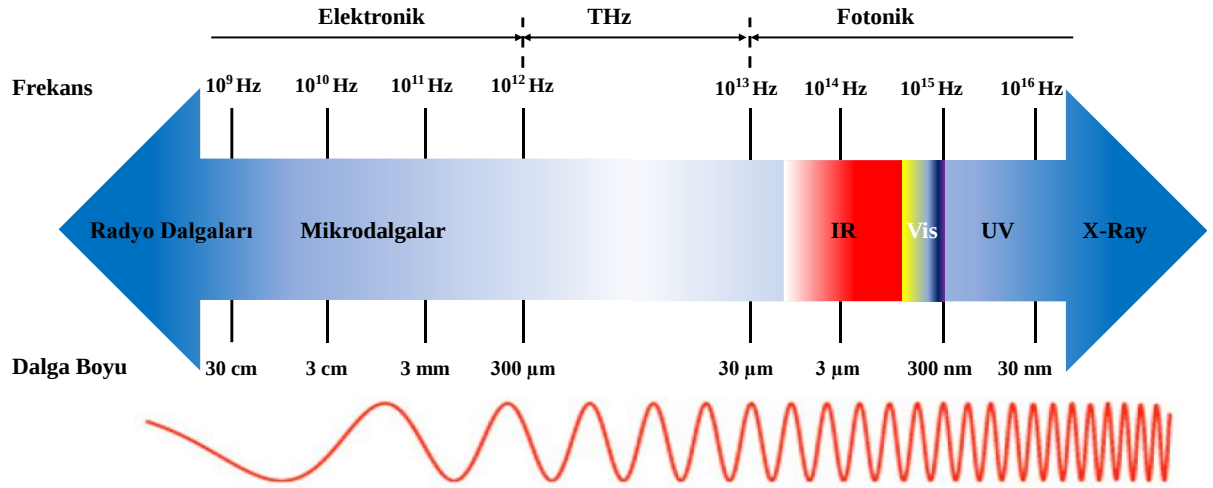
nanokristaller içeren hibrit malzemeler (Wang vd., 2013), karbonil demir parçacıkları (Qing vd., 2010), manyetit nanoparçacık ve içi boş karbon fiber kompozitler (Qiu J. & Qiu T., 2015), karbon kaplı kobalt (Co) nanoparçacıklar (Zhang vd., 2014), kobalt (Co) (Lin vd., 2008), nikel (Ni) ve kobalt (Co) kombinasyonları (Shi vd., 2011), çinko oksit (ZnO) kristalleri gibi manyetik dolgu malzemeleri (Liu vd., 2012), CNT'ler, karbon nanotüpler, (Paton & Windle, 2008) ve ZnO (Lu vd., 2014) ile birlikte kullanılmıştır.

Sonuç olarak, manyetik ve dielektrik malzemeler, malzemeler kendi başlarına nispeten zayıf zayıflama kabiliyetlerine sahip olsalar da mikrodalga frekanslarında emilim özelliklerini artırmak için harmanlanabilirler. Hem dielektrik hem de manyetik malzemeler tek başlarına kullanıldıklarında nispeten düşük soğurmaya sahiptirler. Dielektrik malzemeler (MWCNT'ler), mikrodalga soğuruculuk özellikleriyle bilinen geçiş metalleri veya ferritleri gibi manyetik nanomalzemelerle kaplandığında veya harmanlandığında soğuruculuk özelliklerini artırmak mümkündür (Wang vd., 2013; Giannakopoulou vd., 2002).

Bu tezde burada bahsedilen bilgi doğrultusunda bu bilginin de doğruluğunu kanıtlayan bir çalışma olarak gerçekleştirilmiştir. Kenevir kumaşlar ve MWCNT ve manyetik Nanopartiküllerin harmanlanmasıyla elde edilen sonuçlar dielektrik ve manyetik malzemelerin bağlayıcı malzeme ile harmanlanmasıyla EM soğurma özelliklerinin iyileştirilebildiğini göstermektedir.

1.5. MİKRODALGA DESTEKLİ KİMYASAL SENTEZ YÖNTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Mikrodalga ısıtma, 1986'de Gedye ve Giguere ve Majetich gruplarının makalelerinden sonra geniş kabul görmeye başladı, ancak kimyasal modifikasyonda mikrodalga ısıtmanın kullanımı 1950'lere kadar uzanmaktadır (Gaba & Dhingra, 2011). Mikrodalga ışıması, moleküllerle doğrudan etkileşime girerek sıcaklıkta hızlı bir artış sağlar ve reaksiyonların etkinliğini önemli ölçüde artırır. Geleneksel ısıtma yöntemlerinin aksine, bu yöntemle reaksiyonlar dakikalar içinde gerçekleşebilir, böylece araştırmacılara daha fazla zaman kazandırır. Mikrodalga destekli sentez, çözücü kullanmadan, atık bertarafı sorununu ortadan kaldırarak çevre dostu süreçler sunar. Bu yöntem, özellikle organik sentezde, mineral destekli katalizörlerle daha yüksek hız, verim ve seçicilik sağlar. Ayrıca solvent içermeyen, temiz kimyasal işlemler için yeşil kimyada önemli bir araçtır (Grewal vd., 2013; Krstenansky & Cotterill, 2000; Ravichandran & Karthikeyan, 2011). Mikrodalgalar, EM spektrumun kızılötesi ve RF dalgaları arasında tanımlanır ve 0,3-300 GHz arası frekanslarda çalışır (Şekil 1). Bu teknoloji, geleneksel yöntemlerle gerçekleştirilemeyen reaksiyonları mümkün kılarak kimya alanında yenilikler sunmaktadır.



Şekil 1: EM Spektrum ve Dalga Boyu Şematik Gösterimi

1.5.1. Mikrodalga Destekli Yakma Yöntemi ve Üstünlükleri

Mikrodalga yakma tekniği, geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla nanopartikül üretiminde önemli avantajlar sunar. Mikrodalga ışımlarının doğrudan moleküllerle etkileşime girmesi, enerjinin hızlı ve eşit bir şekilde aktarılmasını sağlar. Bu özellik, nanopartiküllerin kontrol edilebilir boyut ve morfoloji ile daha homojen bir şekilde sentezlenmesine olanak tanır (Kappe, 2004; Pein vd., 2011). Mikrodalga yakma tekniği, hız, enerji tasarrufu ve çevresel faydalar gibi birçok üstünlüğü sayesinde nanopartikül üretiminde geleneksel yöntemlerin önüne geçmiştir. Bu yöntem, nanoteknoloji, malzeme bilimi gibi alanlarda yenilikçi bir araç olarak değerlendirilmektedir. Bu tekniğin üstünlükleri (i) hızlı reaksiyon süresi, (ii) yüksek verim ve saflık, (iii) enerji verimliliği, (iv) çözücü ve yeşil kimya uygulamaları ve (v) daha fazla kontrol ve tekrar edilebilirlik şeklinde verilebilir. Bu başlıklar daha da genişletilmek istenirse;

- Mikrodalga ışımları, reaksiyon süresini geleneksel yöntemlere göre önemli ölçüde kısaltır. Örneğin, saatler veya günler sürebilecek bir sentez işlemi mikrodalga yardımıyla dakikalar içinde tamamlanabilir (Karakaş, 2021).
- Mikrodalga ısıtma, reaksiyon kinetiğini hızlandırarak daha yüksek ürün verimi ve saflığı sağlar. Elde edilen nanopartiküller genellikle daha kısa bir boyut dağılımına sahiptir, bu da malzeme özelliklerini optimize eder (Ravichandran & Karthikeyan, 2011).
- Geleneksel yöntemlerin aksine mikrodalgalarda, yalnızca reaksiyona giren maddeleri ısıtarak enerji kaybı en aza indirilir ve daha çevre dostu bir işlem sağlanır (Grewal vd., 2013).

- Mikrodalga destekli nanopartikül sentezleri, çözücü kullanmadan veya minimum çözücü ile yapılabilir. Bu durum, atık bertarafı gereksinimlerini azaltarak çevreye duyarlı bir yaklaşım sunar (Kaur vd., 2019).
- Mikrodalga ile yapılan ısıtma, sıcaklık ve basınç üzerinde hassas bir kontrol imkânı tanır. Bu özellik, reaksiyonun tekrar edilebilirliğini ve ölçeklenebilirliğini artırır (Ganguly vd., 2019).

Sonuç olarak, Mikrodalga destekli yakma/sentez metodu, yeşil kimya prensipleriyle uyumlu, çevre dostu bir süreç sunar. Mikrodalga ışımaları, reaksiyon sürelerini kısaltıp verimi artıran etkili bir ısıtma kaynağıdır. Daha güvenli ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için, ev tipi mikrodalga fırınlar yerine özel tasarlanmış ekipmanların kullanılması önerilmektedir. Bu yöntem, malzemelerin hızlı, yüksek verimli ve yinelenebilir şekilde işlenmesini sağlar. Nano ve mikro boyutlarda partikül üretimi ile çözünürlüğün artırılmasında ekonomik bir araçtır. Mikrodalgaların moleküllerle doğrudan etkileşime girme yeteneği sadece organik maddelerin sentezinde değil aynı zamanda inorganik maddelerin sentezinde önemli avantajlar sunmaktadır.

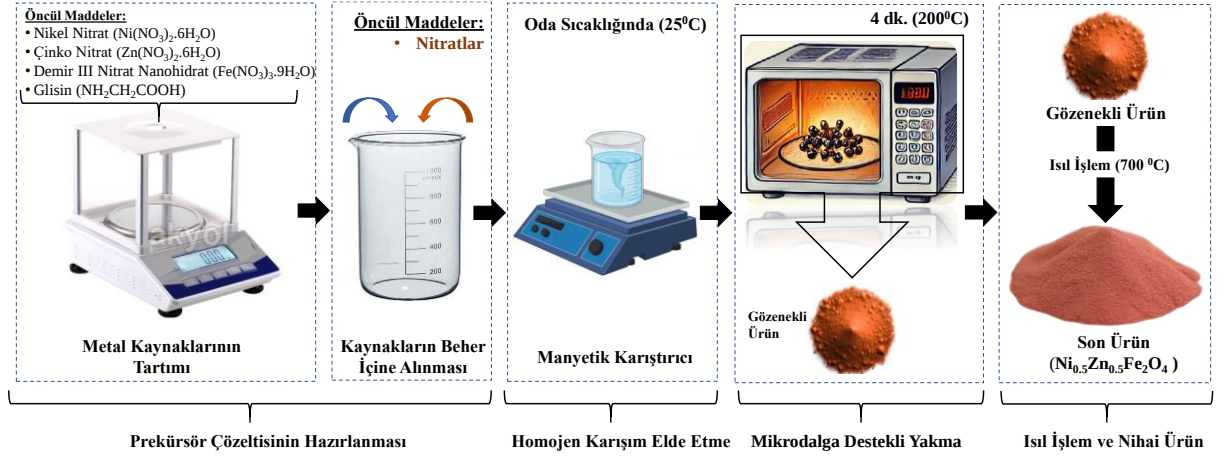
İKİNCİ BÖLÜM

2. YÖNTEM

Bu bölümde, mikrodalga destekli yakma metodu kullanılarak $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ manyetik nanopartiküllerin sentez yöntemi ve karakterizasyonu anlatılmıştır. Ayrıca dielektrik malzeme (dolgu malzemesi) olan, bu çalışmada kullanılacak olan, ticari ürün olarak satın alınan MWCNT'ler ve yine ticari ürün olarak satın alınan saf kenevir kumaşların toplam kalınlıkları 3mm olacak şekilde parafin bağlayıcı matrisi ile bağlanarak oluşturulan çok katmanlı bir yapının mikrodalga frekanslarından X-Bandında (8,2-12,4GHz) elektromanyetik dalgaları soğurma özelliklerinin incelenmesinde kullanılan hesaplama yöntemi anlatılmıştır. Bu yöntem deneysel veriler ile elde edilen çok katmanlı yapının saçılma parametreleri (S-parametreleri, S_{11} ve S_{21}) ve bu yapının dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayıları yardımıyla Nicholson-Ross-Weir algoritması yardımıyla bu yapıya ait tanjant kayıpları ve yansıma kayıpları türetilmesine olanak tanımıştır.

2.1. MANYETİK $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ NANOPARTİKÜLLERİN SENTEZİ

Manyetik $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ NP'ler mikrodalga destekli yakma metoduyla sentezlenmiştir. Mikrodalga destekli yakma metoduyla yapılan sentez çalışmalarında sistemde su veya herhangi bir sıvı kimyasal madde kullanılmasına gerek yoktur. Sisteme reaktifler dışında sadece toz halde glisin, alanine, üre gibi oksidant madde eklenmektedir. Reaksiyon sonunda ise ürün nanopartiküller dışında başka herhangi bir katı ya da sıvı atık oluşumu yoktur. Bu doğrultuda, bu sentez yönteminin yeşil bir sentez yöntemi olduğu ifade edilebilir. Fakat sentez sürecinin sonrasında oluşan ürünlerin yapısında bir miktar safsızlık ya da yanma kalıntıları kalabilmektedir. Bu safsızlıkların uzaklaştırılması için yıkama yapılması gerekse de bu işlemin sonucunda sıvı atık oluşumu söz konusu olacaktır. Yıkama işlemine alternatif olarak mikrodalga sürecinin sonrasında ısıtma işlemi uygulandığında bu safsızlıkların uzaklaştırılabildiği rapor edilmektedir. Buna göre, mikrodalga tekniği ile sentezlenen örnekler 400 ile 1000°C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanmıştır. Manyetik NP'lerin sentezlenme süreci Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Manyetik Nanopartiküllerin Sentezlenme Sürecinin Şematik Gösterimi

2.2. ÇOK-DUVARLI KARBON NANOTÜP VE DİELEKTRİK MALZEMELERİN (KENEVİR TEKSTİL VE PARAFİN) TEMİNİ

Dielektrik malzeme (dolgu malzemesi) olarak bu çalışmada kullanılacak olan ve U.S. Research Nanomaterials, Inc., TX, ABD firmasından ticari ürün olarak satın alınan Çok-Duvarlı Karbon Nanotüpler kullanılmıştır. MWCNT'lerin temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir (US Research nanomaterials, 2024).

Tablo 1: Çok-Duvarlı Karbon Nanotüplerin (MWCNT) Temel Özellikleri

Üretim Yöntemi	MWCNT Boyutları	Yığın Yoğunluğu	Özgül Yüzey Alanı	Saf Ağırlık	En-Boy Oranı
Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	İç Çap: 5-10 (nm)	0,28 g/cm ³	>110 m ² /g (BET'den)	>95%	10 ³
	Dış Çap: 5-10 (nm)			(TGA ve TEM'den)	
	Uzunluk: 10-30 (µm)			>97% (Karbon içeriği)	

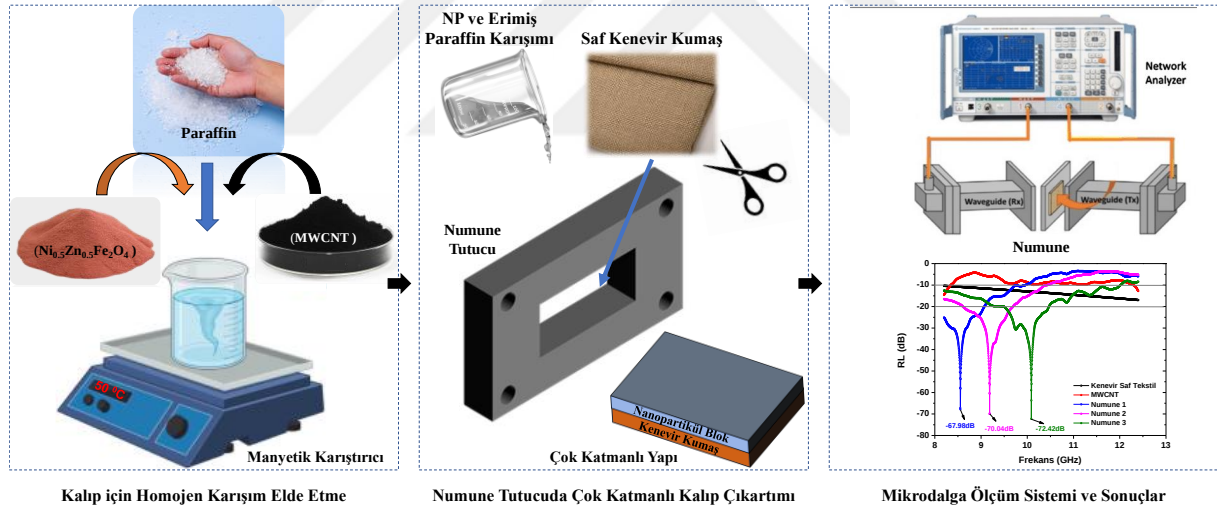
Dielektrik (kenevir kumaş ve MWCNT'ler) ve manyetik malzemeleri (Ni-Zn ferritler) kalıp olarak çıkartabilmede kullanmak için bağlayıcı madde olarak Riedel-de Haën firmasından 18635 kod numaralı Merck 1.11609.2500-Histosec pastil boncuk formda, beyaz renkli ve donma aralığı 50-60°C olan parafin kullanılmıştır. Bu parafin malzemesi elektromanyetik dalgalara karşı transparant bir özelliğe sahip olmasından ötürü ayrıca tercih sebebi olmuştur.

Ham Keten Kumaş dielektrik malzeme olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Herhangi bir ön işleme (boyama, kaplama vb.) tabi tutulmadan ticari firmadan satın alındığı gibi numune tutucu boyutlarında hassas bir kesim yapılarak çok katmanlı yapının ilk katmanı olarak kullanılmıştır.

Manyetik olmayan alüminyum malzemeden yapılmış numune tutucu(lar) kalıp çıkarmada ve dalga kılavuzu ölçümlerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. EK-1’de numune yapı boyutları ve görseli yer almaktadır.

2.3. ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA ÖLÇÜMLERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMİ

Bu tez çalışmasında sentezlenen manyetik nanopartiküller, kenevir kumaş ve dielektrik malzeme olan MWCNT’ler yine dielektrik bir malzeme olan ve EM dalgalara maruz kaldığında transparan özellik gösteren bağlayıcı madde olarak parafin kullanılmıştır. Bu çalışmada iki katmanlı bir yapı (birisi kenevir kumaş diğeri ise manyetik Ni-Zn ferrit manyetik nanopartiküller ve MWCNT’lerin karışımından oluşan bir yapı) parafin bağlayıcı maddesi yardımıyla oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3: EM Soğurma Ölçümleri için Çok Katmanlı Soğurucu Yapı Tasarımı ve Ölçüm Düzenneği

Öncelikle numune tutucu boyutlarında (22,86x10,16mm) kenevir kumaş hassas bir şekilde giyotin kesilmiş ve düz bir zemin üzerinde numune tutucunun içine yerleştirilmiştir. Daha sonra, bir beher içine alınan parafin 50°C sıcaklıkta ısıtıcıli manyetik karıştırıcı yardımıyla eriyik hale getirilmiştir. Eriyik parafin içine manyetik NP’ler ve MWCNT’ler Tablo 2’de verilen oranlarda eklenerek manyetik karıştırıcıda homojen dağılımı sağlanmış ve numune tutucu içindeki kenevir kumaş üzerine dökerek/emdirilerek ikinci bir tabaka oluşturulmuştur. İki katmanlı yapının toplam kalınlığı 3mm olarak ayarlanmıştır. Bu sayede dalga kılavuzu

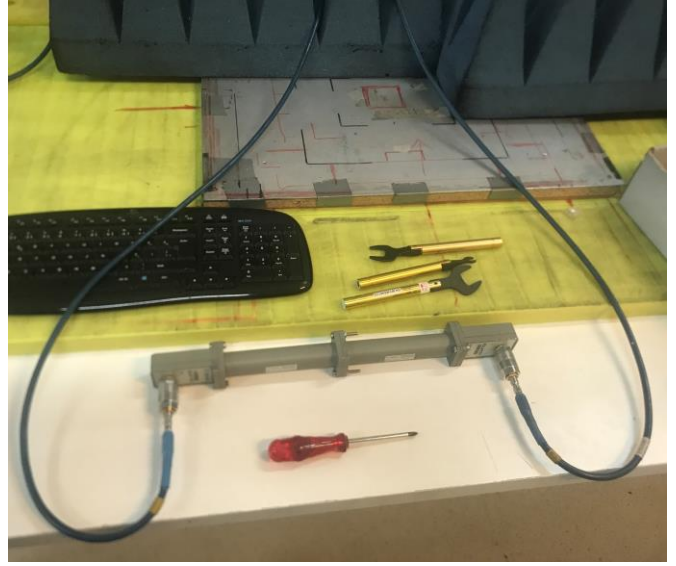
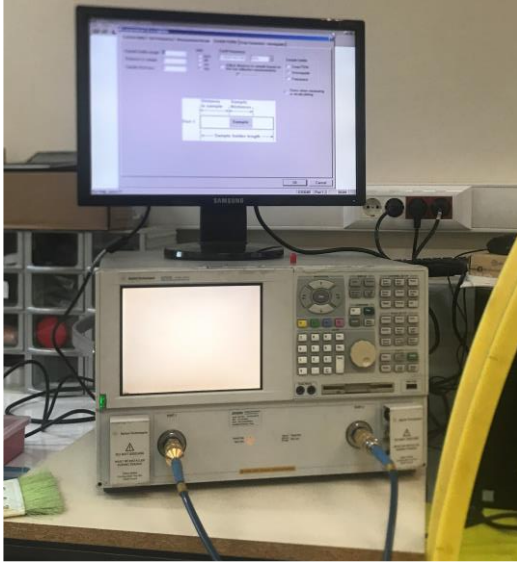
ölçümleri için numune hazır hale getirilmiştir. Bu process farklı konsantrasyonlar için yenilenerek EM soğurma ölçümleri için bütün numuneler hazır hale getirilmiştir.

Tablo 2: Numune Hazırlamada Kullanılan Ağırlık Miktarları, Oranları ve Numune Kodları

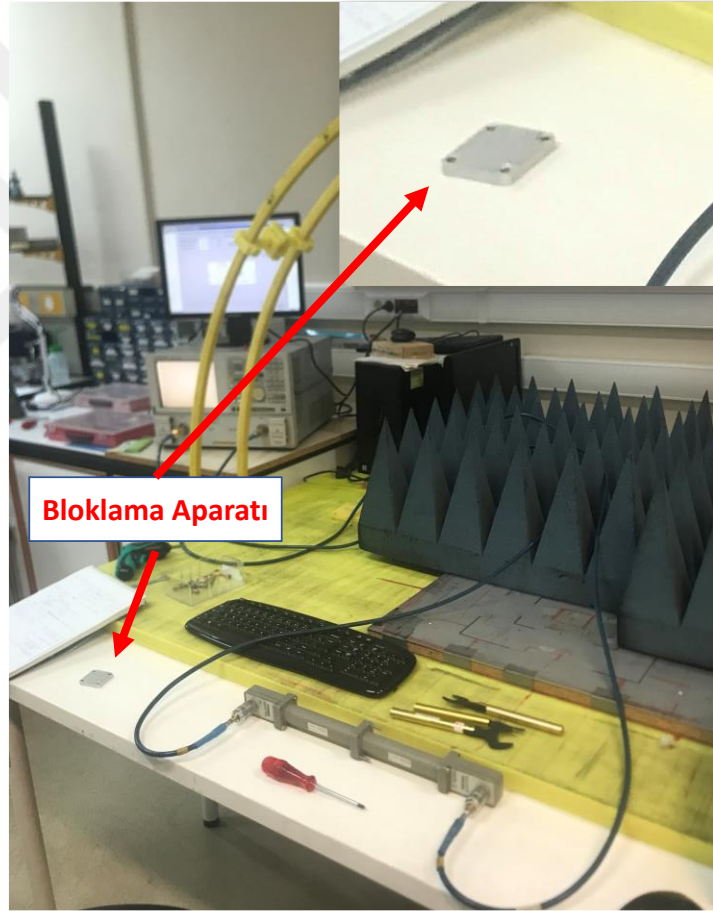
Numune Kodu	Bileşenler	MWCNT (wt%)	Ni-Zn Ferrit (wt%)	Bileşen Oranları
Numune 1	%75 MWCNT- %25 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,0697g	0,0225g	~3,097
Numune 2	%50 MWCNT- %50 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,0467g	0,0466g	~1,002
Numune 3	%25 MWCNT- %75 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	0,0229g	0,0699g	~3,052

Şekil 3'te bahsedilen numune hazırlama süreçleri sonunda elde edilen numunelerin ölçüm düzeneği görselleri, hazırlanma sürecine ait görseller ve numunelerin gerçek görselleri Şekil 4-8'te yer almaktadır.

Şekil 4'de iletim hattı modellerinden dalga kılavuzu tekniğine ait deneysel setup yer almaktadır. Ölçümlerde Port 2 bloklama aparatı kullanıldığı için kullanılmamıştır.



(a)



(b)

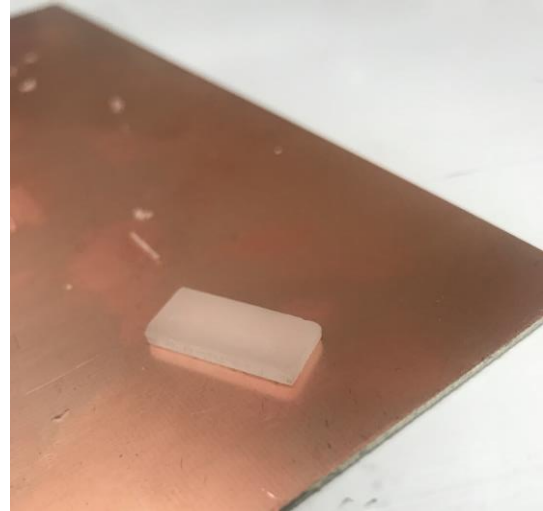
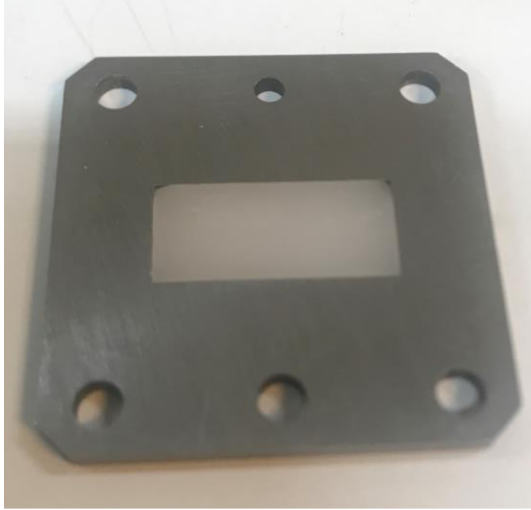
Şekil 4: EM Soğurma Ölçüm Düzenağı Görşelleri

Tablo 2’de verilen numunelerde kullanılan nanopartiküllerin wt% ağırlık yüzdelerine göre tartımlarını gösteren laboratuvar görşelleri yer almaktadır (Şekil 5).



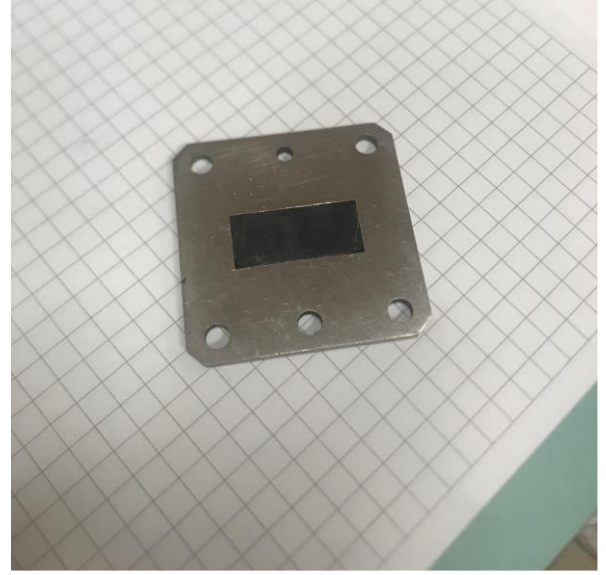
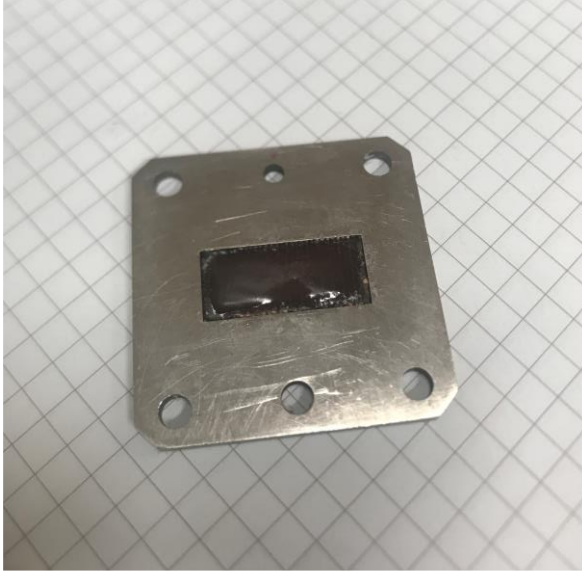
Şekil 5: EM Soğurma Ölçümler için wt% Ağırlık Tartım Görselleri

Nanopartiküllerin bağlayıcı maddesi olarak kullanılan parafin her ne kadar EM dalgalarına karşı transparan olma özelliği olsa da EM ölçümler öncesinde numune tutucuyla beraber kalibrasyon numunesi hazırlanmıştır. İlgili görseller Şekil 6’da verilmiştir.



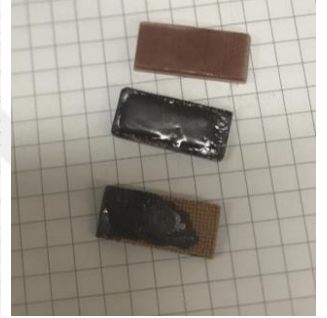
Şekil 6: EM Soğurma Ölçümler için Parafin ve Numune Tutucu Kalibrasyon Görselleri

Şekil 7’de ise iki katmanlı (kenevir kumaş+MWCNT ve Ni-Zn ferrit NP’lerinden oluşan) yapının dalga kılavuzlarında dökümlenmiş görselleri yer almaktadır.



Şekil 7: EM Soğurma Ölçümler için Dalga Kılavuzu ile Entegre Hazırlanmış Katmanlı Yapı Görselleri

Son olarak Şekil 8’de ölçümler tamamlandıktan sonra numune tutuculardan çıkartılmış numunelerin görselleri yer almaktadır.



Şekil 8: EM Soğurma Ölçümleri Sonunda Dalga Kılavuzundan Çıkartılmış Numune Görselleri

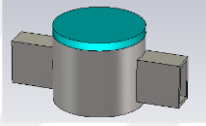
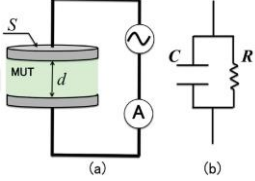
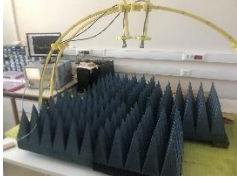
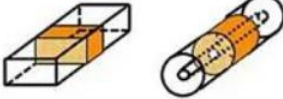
2.4. ELEKTROMANYETİK (EM) KURUCU PARAMETRELERİN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Malzemelerde enerji soğurulması, malzemelerin dielektrik ve manyetik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu parametreler kompleks formda parametrelerdir ve dielektrik ve manyetik geçirgenlik sırasıyla $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$ ve $\mu_r = \mu' - j\mu''$ şeklinde tanımlanır. Dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarının gerçek kısımları (ϵ' ve μ'), elektrik ve manyetik enerjilerin depolanma kapasitesini belirtirken; sanal kısımları (ϵ'' ve μ'') ise bu enerjilerin kaybını ifade etmektedir. Malzemelerin dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayıları çeşitli yöntemler kullanılarak hesaplanabilir ve şu şekildedir (Tablo 3):

- Koaksiyel Prop
- Rezonant Kavite

- Paralel Plaka
- İndüktans Ölçümü
- İletim Hattı
- Serbest-uzay.

Tablo 3: Elektromanyetik Kurucu Parametrelerin Ölçüm Yöntemleri

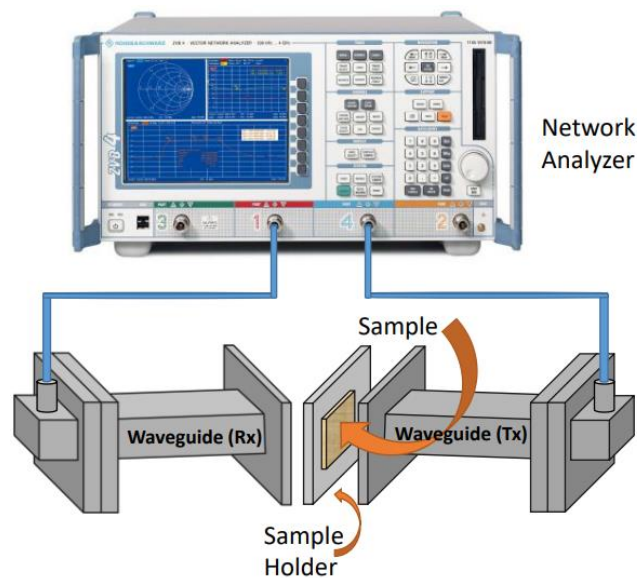
Yöntem	Yaklaşık Görüntüsü	Özellikleri
Koaksiyel Prop Tekniği (ϵ_r)		Geniş bant için uygun, kullanışlı ve tahribatsızdır.
Rezonant Kavite (ϵ_r)		Tek frekansta cevap verir ve kesin sonuçludur, küçük numuneler için ve düşük kayıplı numuneler için en iyisidir.
Paralel Plaka (ϵ_r)		Kesin sonuçludur, düşük frekanslarda en etkili tekniktir: ince ve düz plaka numuneler için idealdir.
İndüktans Ölçümü (ϵ_r)		Doğru ve basit ölçüme sahiptir. Bir toroidal çekirdek gereklidir.
Serbest-uzay (ϵ_r ve μ_r)		Geniş bant için uygun, temassız. Yassı levhalar, toz numuneler ve yüksek sıcaklıklar için uygundur.
İletim Hattı (Dalga Kılavuzu ve Koaksiyel) (ϵ_r ve μ_r)		Geniş bant için uygun ve işlenebilir katılar için uygundur.

Koaksiyel prop, Rezonant kavite ve paralel plaka teknikleri ile sadece malzemenin dielektrik geçirgenlik katsayıları hesaplanabilirken indüktans ölçüm yöntemi ile sadece malzemelerin manyetik geçirgenlik katsayıları hesaplanabilir. Mikrodalga frekanslarında gelen

EM dalgaların emilimi/soğrulması için sadece dielektrik geçirgenlik katsayısı değil aynı zamanda manyetik geçirgenlik katsayılarının da hesaplanmasını zorunluluktur. Bu açıdan ilk dört yöntem bu çalışmanın amacına yönelik değildir. İletim hattı ve serbest-uzay yöntemleri hem dielektrik hem de manyetik geçirgenlik katsayıları hesaplanmasına izin verir. Bu iki yöntem geniş bant ölçümlere izin verir. Sadece serbest-uzay tekniğinin avantajları olmasına rağmen bu teknikte EM dalganın dalga boyuna göre ya da mikrodalga frekans bandına göre büyük boyutlarda numune hazırlanması gibi bir dezavantajı vardır. Bu nedenle bu çalışmada numune boyutuyla orantılı olarak büyük miktarlarda NP sentezlenmesi gerekliliği dikkate alındığında iletim hattı tekniğinin (dalga kılavuzu yöntemi) bu avantajından dolayı tercih edilmiştir. Genel olarak bahsedilen yöntemler, yaklaşık görüntüleri ve özellikleri aşağıdaki Tablo 3’de verilmiştir. Ayrıca, Koaksiyel prop, serbest-uzay ve diğer tekniklerin detaylı incelemesi için literatürde yer almaktadır (Arslan-Madak, 2024).

2.4.1. İletim Hattı (Dalga Kılavuzu) Yöntemi

Mikrodalga soğurma özelliklerinin belirlenmesinde dalga kılavuzu yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, malzemelerin elektromanyetik dalgalarla etkileşimlerini analiz ederek, soğurma kapasitesi ve yansıma özellikleri gibi kritik parametreleri ölçmeye olanak tanır. Dalga kılavuzu yönteminde, malzeme belirli bir frekans aralığında mikrodalga dalgalarına maruz bırakılır ve iletim ile yansıma katsayıları ölçülür. Bu ölçümler, malzemenin dielektrik ve manyetik özelliklerinin yanı sıra soğurma yeteneği hakkında bilgi sağlar. Özellikle, dalga kılavuzu içinde malzemenin yerleştirildiği konum ve dalga kılavuzunun boyutları, ölçümlerin hassasiyetini etkileyen önemli faktörlerdir.



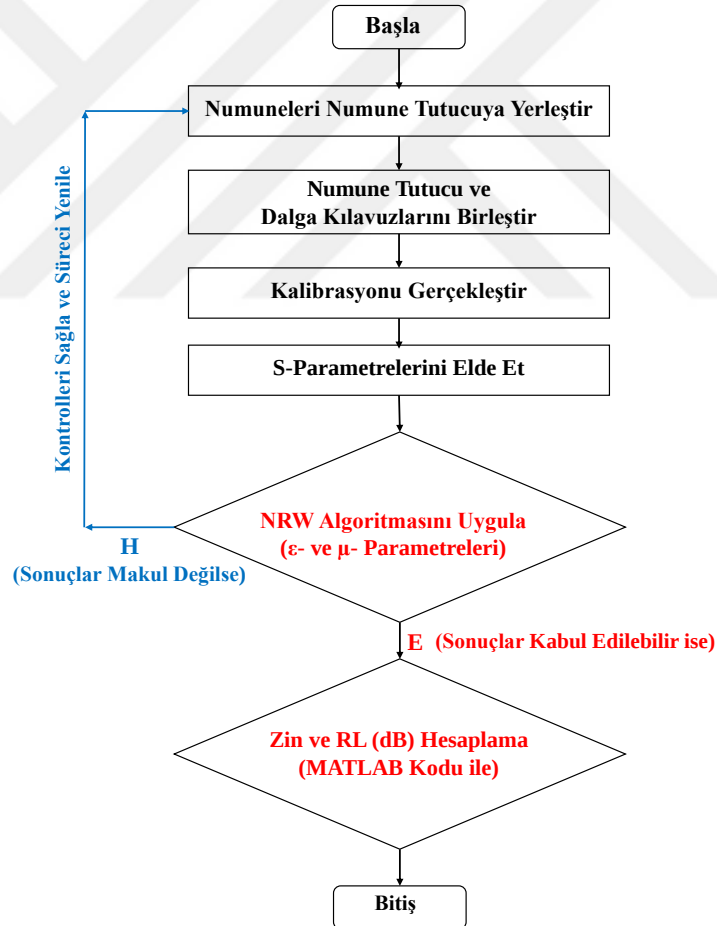
Şekil 9: İletim Hattı (Dalga Kılavuzu Modeli) Ölçüm Sistemi

Bu teknik, ölçülecek malzemelerin bir dalga kılavuzu bölümüne (numune tutucu)

yerleştirilmesini ve network analizörü (NA) kullanılarak iki portlu kompleks saçılma parametrelerinin (S_{11} , S_{21} , S_{21} ve S_{12}) ölçülmesini içerir. Bazı tip network analizörlerde kendilerine has yazılımları sayesinde malzemenin dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayıları hesaplanabilir. Sadece S-parametrelerini veren skalar network analizörlerde malzemenin EM kurucu parametrelerinin hesaplanması için Nicholson-Ross-Weir Algoritması kullanılır. Şekil 9'da iletim hattı (dalga kılavuzu) modeli resmedilmiştir (Teber vd., 2016).

2.4.2. Nicholson-Ross-Weir Tekniği

Nicholson-Ross-Weir (NRW) tekniği, saçılma parametrelerinden hem karmaşık bağlı geçirgenliğin hem de geçirgenliğin doğrudan hesaplanmasını sağlar. Bu teknik, dalga kılavuzu ve koaksiyel hat yöntemleri için de geçerlidir. Yansıma ve iletim katsayısının ölçümü, ölçülecek test altındaki malzemenin (MUT) S_{11} , S_{21} , S_{22} ve S_{12} 'nin dört parametresinin tamamını veya bir çift S_{11} , S_{21} 'i gerektirir.



Şekil 10: EM Dalga Soğurma Ölçümü için Akış Şeması

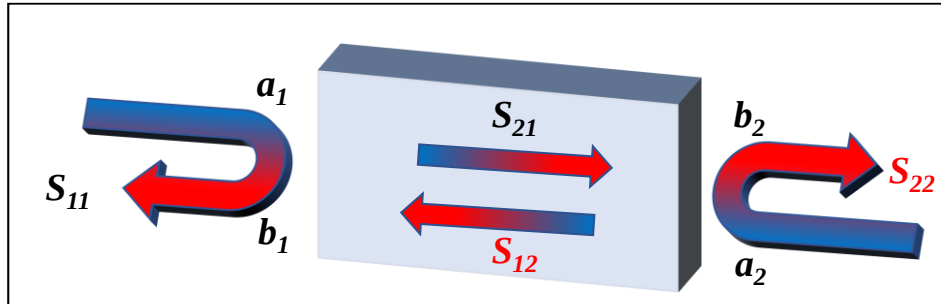
NRW dönüşüm süreci için prosedürü formülasyonu için “Development of radar absorbing materials (RAMs) based on nano-structured magnetic materials and applications” isimli doktora tezine (bkz. Sayfa 91) bakılabilir (Teber vd., 2017; Rothwell vd., 2016). Burada

sadece kompleks dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarının hesaplanması ve soğurmanın hesaplanması için bir algoritma sunulmaktadır (Şekil 10).

2.5. ELEKTROMANYETİK DALGA SOĞURMA TEORİSİ

2.5.1. Saçılma Parametreleri (S-Parametreleri)

Radyo frekans dünyasında network bir veya çok porta sahip aygıt olarak tanımlanır. Bu portlar radyo frekans (RF) enerjisini geçirme, soğurma veya yansıtma kabiliyetine sahiptir. Networkler belirli bir porta enjekte edilen RF sinyallerini, RF enerjinin seviyesini aynı port üzerinden (yansıyan güç ölçümü) ya da diğer port(lar) üzerinden ölçerek analiz edilebilir. Bu analizi gerçekleştiren ağıta ise network analizör (NA) denir. Bu nicelikleri temsil etmenin en yaygın yolu S-parametreleri adı verilen bir hesaplamadır. S-parametreleri, çeşitli portlardan ne kadar RF enerjinin geri ve/veya dışarı dağıldığını ölçtüğümüz için saçılmayı temsil eder. S_{xy} şeklinde tanımlanır, burada x , enerjinin ortaya çıktığı port (çıkış portu) olarak tanımlanırken y ise enerjinin giriş yaptığı port (giriş portu) anlamına gelir. Örneğin bir portlu bir networkte sadece iki adet S-parametresi tanımlanır: S_{11} and S_{21} . Eğer network 2 portlu ise S-parametreleri S_{11} , S_{21} , S_{22} ve S_{12} olarak tanımlanır ve NA tarafından ölçülür (Şekil 11). S_{11} , giriş veya ilerletilen porttan yansıyan güç miktarı olarak tanımlanırken S_{21} giriş portundan ileri porta geçen yük miktarını temsil eder. Benzer şekilde S_{12} ters yönde geçen güç miktarı iken S_{22} ise ileri porttan yansıyan güç miktarını gösterir. Bu değerler her bir portta görülen gücün (Şekil 11’te gösterildiği gibi) oranları olarak tanımlanır.



Yansıma Parametreleri

$$S_{11} = b_1 / a_1, \quad S_{22} = b_2 / a_2$$

Geçirme Parametreleri

$$S_{21} = b_2 / a_1, \quad S_{12} = b_1 / a_2$$

Şekil 11: S-Parametrelerinin Tanımlanma Şematiği

S-parametreleri NxN matris formunda da aşağıda verildiği şekliyle tanımlanabilir, N burada port sayısını göstermektedir. S-parametreleri gerçek ve sanal kısımlara sahip olan kompleks sayılardır, buradan hareketle S-parametreleri bir genlik ve bir fazdan oluşacak şekilde de tanımlanır. S-parametreleri S_{11} ve S_{22} genel olarak RF mühendisleri tarafından yansıma katsayıları olarak tanımlanır ve giriş ve çıkış arasındaki empedans eşleşmesini ve yansıma kaybını (Return Loss, RL) verir. Diğer parametreler olan S_{21} geçirme katsayısı olarak tanımlanır

ve giriş ve çıkış portları arasında kazanç veya kaybın miktarını gösterir. Yine S_{12} geçirme katsayısı ters izolasyon ölçüsü olarak tanımlanır veya bir aygıttan ne kadar gücün yanlış yönde aktığını gösterir. Unutulmamalıdır ki S-parametreleri network analizör tarafından deneysel olarak elde edilen verilerdir. S-parametreleri bağıntıları ve matris formunda sembolize edilen formu sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır (Faircloth vd., 2006):

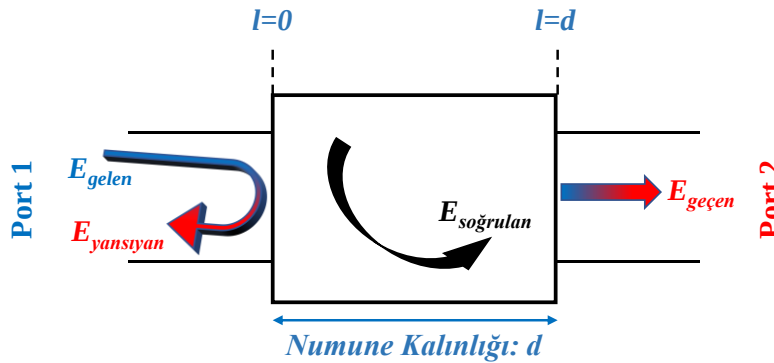
$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.5.2. Saçılma Parametrelerinden Elektromanyetik Kurucu Parametreleri ve Dağılıma Faktörlerinin Hesaplanması

Malzemeleri EM kurucu parametreler açısından sınıflandırıldığında doğada bulunan malzemelerin dielektrik (permittivity) ve manyetik geçirgenlik (permeability) katsayıları genel olarak pozitif değerlidir. EM kurucu parametreleri kompleks sayılardır. Bu parametreler Nicholson-Ross-Weir tekniği kullanılarak hesaplanabilir. Bir dalga kılavuzu iletim hattında d-kalınlığında bir numuneden geçen, yansıyan ve soğurulan EM dalgaların şematik gösterimi Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12: Dalga Kılavuzu İletim Hattı Modeli

Bu teknik deneysel olarak elde edilen saçılma parametrelerini kullanarak yansıma ve geçirme katsayılarını hesaplar ve bu hesaplamalar neticesinde test edilen malzemelerin permittivity ve permeability değerlerini türetebilir. Bu çalışmada bu NRW algoritması yardımıyla iki katmanlı olarak yapılan numunelerin dielektrik, manyetik geçirgenlik katsayıları ve bu katsayılar yardımıyla dielektrik ve manyetik tanjant kayıpları hesaplanmıştır. NRW

algoritması yardımıyla yansıma katsayısı (Γ) şu şekilde hesaplanabilir (Fang vd., 2021):

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (4)$$

burada saçılma parametrelerinden türetilen $K = [(S_{11}^2 - S_{21}^2) + 1]/2S_{11}$.

Geçirme katsayısı (T) ise şu şekilde hesaplanır:

$$T = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (5)$$

Yansıma ve geçirme katsayıları yardımıyla test altındaki numunenin dielektrik (ϵ_r) ve manyetik geçirgenlik (μ_r) katsayıları aşağıda verildiği şekliyle türetilir:

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[\left(\frac{1}{\lambda_c^2} \right) - \left(\frac{1}{\Lambda^2} \right) \right]} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (7)$$

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0^2} \right) - \left(\frac{1}{\lambda_c^2} \right)}} \quad (8)$$

burada, λ_0 serbest uzay dalga boyunu, λ_c iletim hattının kesim dalga boyunu göstermektedir.

Karmaşık EM kurucu parametreler (dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik), test edilen numunelerin dielektrik ve manyetik özelliklerini belirtir. EM kurucu parametrelerin gerçekte bileşenleri (ϵ_r' ve μ_r'), elektrik ve manyetik enerjinin depolama kapasitesini temsil ederken test edilen numunelerdeki enerji kaybı, karmaşık dielektrik ve manyetik geçirgenliklerin sanal kısmından kaynaklanır (ϵ_r'' ve μ_r''). Manyetik kayıplar, mikrodalga emilimi için dielektrik kayıplardan daha etkili ve hassastır. Geçirgenlikteki küçük farklılıklar, malzemelerin mikrodalga emilim özelliklerini bile etkileyebilir (Wang vd., 2013). Bu perspektiften literatürde tanjant dielektrik ve manyetik kayıpları ya da dağılma faktörleri tanımlanmıştır ve şu şekilde ifade edilir:

$$\tan(\delta_\epsilon) = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (9)$$

$$\tan(\delta_\mu) = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (10)$$

Bu faktörler birbirleri ile karşılaştırıldığında eğer dielektrik dağılma faktörü manyetik dağılma faktöründen büyük ise numune içindeki dielektrik malzemeden kaynaklı soğurmanın manyetik malzemeden kaynaklı soğurmaya göre üstün olduğu anlamına gelir. Bu tanımın tersi de mümkündür.

2.5.3. Yansıma Kayıplarının (Return Loss, RL) Hesaplanması

Yansıma kaybı hesaplamalarında dalga kılavuzu iletim tekniğinde EM dalganın çıkış portu altın, bakır, alüminyum vb. iyi bir iletken ile kaplandığında ya da bloke edildiğinde EM dalgalar karşı tarafa (Port 2'ye) geçemeyeceklerdir. Bu durumda hesaplamalarda S_{21} parametresi sıfır değerini alacaktır ve bu durumda hesaplamaları daha kolay hale getirecektir. İletim hattı teorisi empedans uyumu tekniğine dayanır bu teknikte gelen EM dalga ortamının empedansı numune yüzeyinde oluşan empedansa eşit olması durumunda maksimum soğurulma olduğunu ifade eder. Bu durumda gelen EM dalganın yansıma oranı ne kadar az olursa soğurma o derecede maksimuma ulaşacaktır. Numune yüzeyinde normalize edilmiş giriş empedansı (Z_{in}), (f EM dalganın frekansını, d numune kalınlığını, c vakum ortamında EM dalganın hızını gösterirken) şu şekilde tanımlanır (Wang vd., 2013; Fang vd., 2021; Teber vd. 2017):

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(-j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right) \quad (11)$$

İletken destekli numuneler için yansıma kaybı (Return Loss, RL) giriş empedansına bağlı olarak aşağıda verildiği şekliyle hesaplanır.

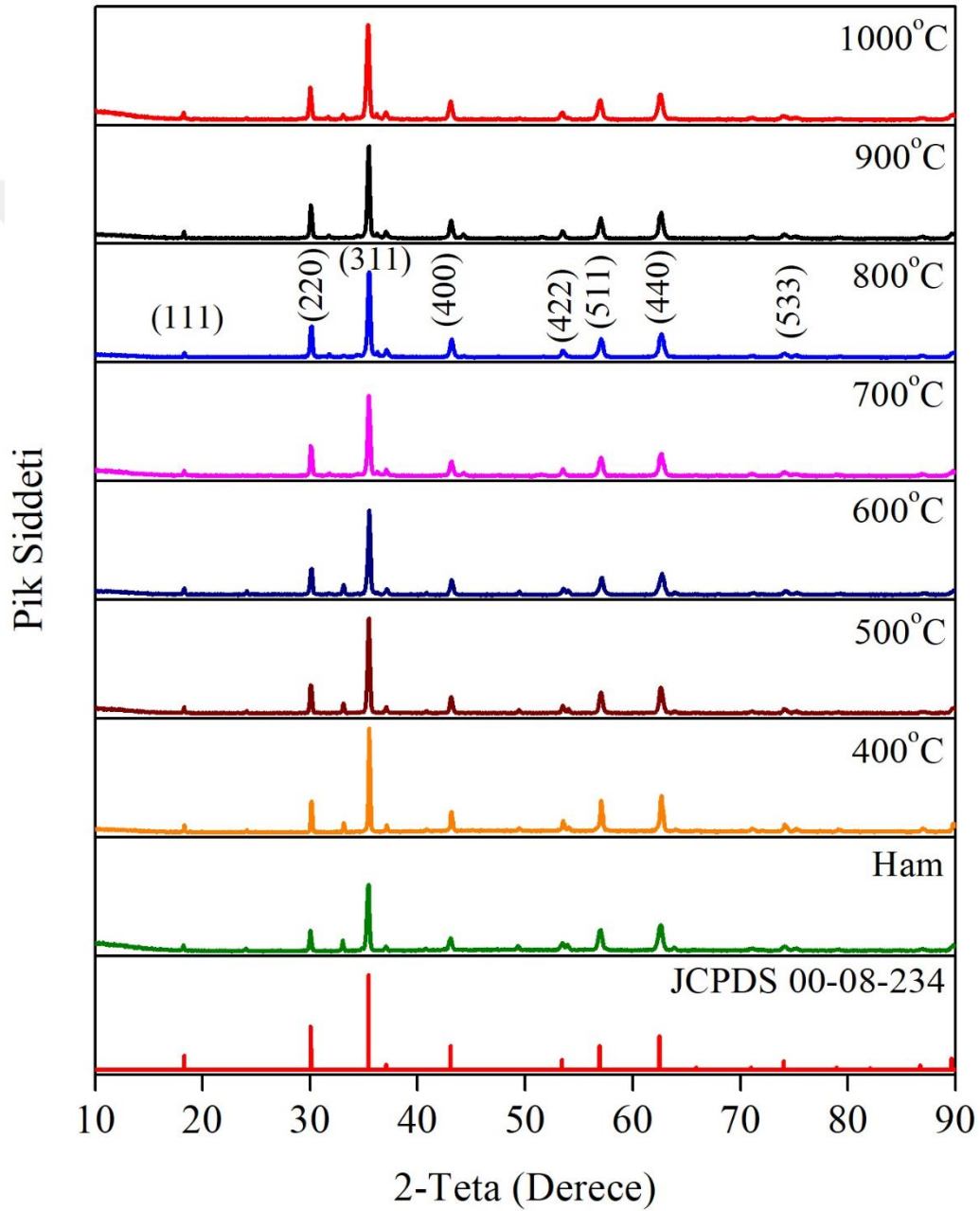
$$RL(dB) = -20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad (12)$$

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

3.1. MANYETİK NANOPARTİKÜL KARAKTERİZASYON BULGULARI

Mikrodalga destekli yakma tekniği ile sentezlenen örnekler 400-1000°C arasında değişen sıcaklıklarda ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Bütün örnekler için XRD analizi yapılmış ve uygulanan ısıtılma işlemli malzemenin yapısal özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Tüm numunelere ait X- ışını kırınım desenleri Şekil 13’de verilmiştir.



Şekil 13: Mikrodalga Destekli Yakma Tekniği ile Üretilen ve Çeşitli Sıcaklıklarda Isıl İşlem Görmüş Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ Nanopartiküllerin X-ışını Kırınım Desenleri

Örneklerin X-ışını kırınım desenleri incelendiğinde sentezlenen tüm örneklerin hemen

hemen aynı yapıya sahip oldukları görülmektedir. Elde edilen difraksiyon paternlerinin $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ nanopartiküller için tanımlanan standart difraksiyon kartıyla (JCPDS kartları) tam uyumlu oldukları ve bu malzeme için tanımlanan tüm yansıma piklerinin doğru açılal pozisyonlarında bulundukları gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler benzer içerikli çalışmalarda sunulan verilerle de uyumludur (Gavrilova vd., 2023; Wahab vd., 2016; Widakdo vd., 2018; Wu vd., 2011).

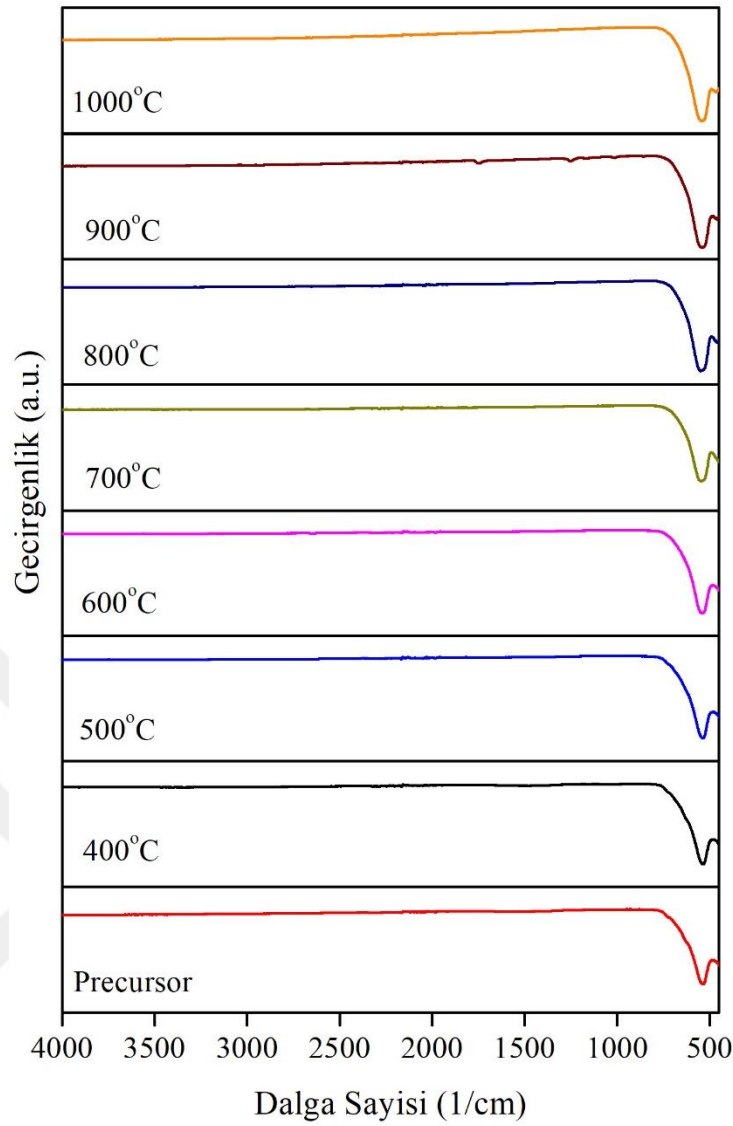
Isıl işlem sıcaklıklarına göre hazırlanan numunelerin en büyük şiddete sahip pik için (311) düzleminde yoğunluğun yarı maksimumdaki tam genişlik kullanılarak Sherrer formülü ile parçacık boyutları hesaplandı. Ayrıca, Bragg denklemine dayalı düzlemler arası mesafeler ($d(\text{\AA})$), ortalama kristallite boyutları (L) ve kristal büyüklükleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4: Isıl İşlem Sıcaklıklarına Göre Hazırlanan Numunelere ait XRD Verileri

Numune	Isıl İşlem Sıcaklığı	D ($\text{\AA}$)	Lattice Parametreleri	Kristallite Büyüklüğü (nm)
Ham	-	2,533	8,403	29,32
NiZn-1	400 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	29,36
NiZn-2	500 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	30,84
NiZn-3	600 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	31,09
NiZn-4	600 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	31,34
NiZn-5	800 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	31,55
NiZn-6	900 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	33,19
NiZn-7	1000 $^{\circ}\text{C}$	2,533	8,403	45,65

FT-IR Analizi (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi), malzemelerin kimyasal bileşimlerini ve fonksiyonel gruplarını belirlemek için kullanılan bir güçlü bir analiz analitik yöntemidir. Yöntemin temeli, bir malzeme tarafından emilen veya iletilen kızılötesi (IR) ışınının dalga boyuna bağlı olarak nasıl değiştiğinin ölçülmesine dayanmaktadır.

FT-IR yöntemi malzemelerin moleküler yapıları hakkında önemli bilgiler sunabilmektedir. Bu çalışmada üretilen örneklerin tümünde FT-IR analizi gerçekleştirilmiş ve FT-IR spektrumları Şekil 14’de verilmiştir.



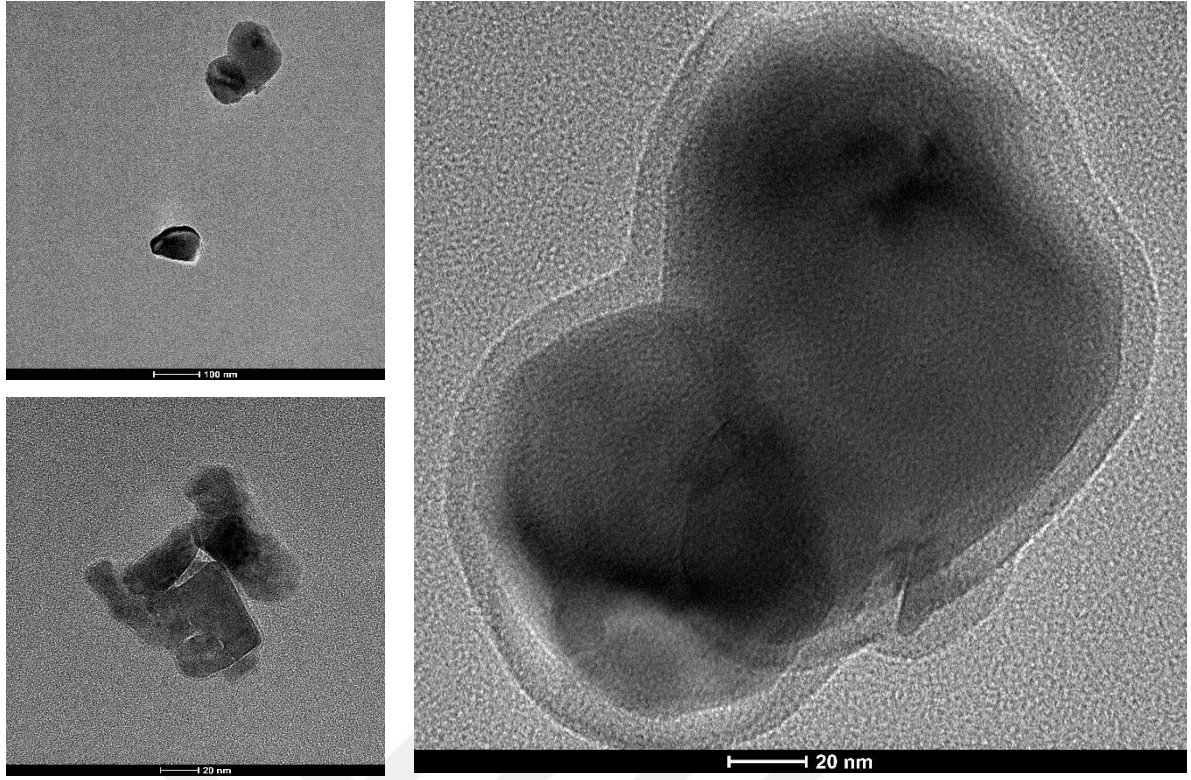
Şekil 14: Farklı Sıcaklılarda Isıl İşlem Uygulanarak Üretilen $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ NP'lerin FT-IR Spektrumları

Precursor (öncül işlem/ham) spektrumu genellikle örneğin ısıl işlem öncesindeki durumunu temsil eder. Precursor spektrumunda belirgin fonksiyonel gruplar ve moleküler bağlar FT-IR sinyalleri olarak görülür. 400°C-1000°C arasındaki ısıl işlem sıcaklıkları ile üretilen örneklerin FT-IR spektrumlarında sıcaklık arttıkça spektrumda belirli piklerin kaybolduğu veya azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, örneğin kimyasal yapısında bir bozulmaya, bağların kopmasına veya dönüşümüne işaret etmektedir. Örneğin, 700°C'den sonra hidroksil (-OH) grubu veya organik bileşiklere ait karakteristik piklerin (örneğin 3000–3500 cm^{-1} aralığındaki geniş bant) kaybolması, karbonizasyon veya termal ayrışmaya işaret edebilmektedir. Ayrıca, 900°C ve 1000°C'de spektrumun oldukça sadeleştiği, sadece inorganik kalıntılara ait (örneğin, metal oksit bağlarına karşılık gelen) sinyallerin kaldığı görülüyor. Diğer taraftan, düşük dalga sayılarında (örn. 500–1000 cm^{-1}) metal-oksijen bağlarıyla ilişkili sinyallerle karşılaşılabilir. Bu sinyaller, ısıl işlem sonucu ortaya çıkan inorganik

fazlardan kaynaklanabilmektedir. Başlangıç örneğinin (Precursor) spektrumunda yüksek dalga sayılarında ($3000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$) geniş bir bant ve keskin pikler görülmektedir, bu durum organik bağların varlığını doğrulamaktadır. Fakat, 700°C ve daha yüksek sıcaklıklarda bu organik bağların büyük ölçüde azaldığı, yapının inorganik hale dönüştüğü açıkça gözlemlenmektedir.

Uygulanan ısıtma işlemin sonucu olarak malzemenin yapısındaki kimyasal ve yapısal değişikliklerin belirlenmesi için, yapılan Fourier dönüşümü kızılötesi (FT-IR) analizi daha ayrıntılı olarak ele alındığında ise, spektrumun $3600\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ aralığında bölgesinde birçok küçük tepe görülebilir. Dahası, 1090 cm^{-1} 'de görülen zayıf titreşimler C-H etkileşimlerine işaret etmektedir (Ing Hua & Sundari, 2014). 1636 cm^{-1} 'deki O-C-O'nun asimetrik gerilme titreşiminden kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Shanmugavel vd., 2014). Ayrıca, 471 cm^{-1} 'deki pik, oktahedral bölgelerdeki içsel metallerin oksijenle etkileşimi sonucu ortaya çıkan gerilme titreşimlerini göstermektedir. Dahası, 550 cm^{-1} 'deki pik, tetrahedral ve oktahedral pozisyonlardaki metal oksitlerin gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Islam vd., 2020). Benzer eğilimler daha önceki çalışmalarda farklı araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir (Zipare vd., 2015). Dolayısıyla sonuç daha önce bildirilen deneysel sonuçlarla tutarlıdır. Ayrıca 1000 cm^{-1} 'in altında, özellikle 786 , 552 ve 471 cm^{-1} 'de gözlemlenen pikler spinel ferritler için karakteristik bir ortak özellik olarak değerlendirilmektedir (Zipare vd., 2015). Dolayısıyla FTIR analizi sentezi hedeflenen $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerinin başarılı bir şekilde sentezlendiğinin doğrulamaktadır.

$\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerin morfolojik özelliklerinin tespit edilebilmesi için 800°C de ısıtma işlemi ile üretilen örnekte TEM analizi yapılmıştır. Elde edilen TEM görüntüleri Şekil 15'de verilmiştir. TEM görüntüleri incelendiğinde, üretilen nanopartiküllerin $40\text{--}60\text{ nm}$ aralığında bir partikül boyut dağılımına sahip oldukları buna karşın şekil ve boyut açısından bir homojenliğin olmadığı görülmektedir.



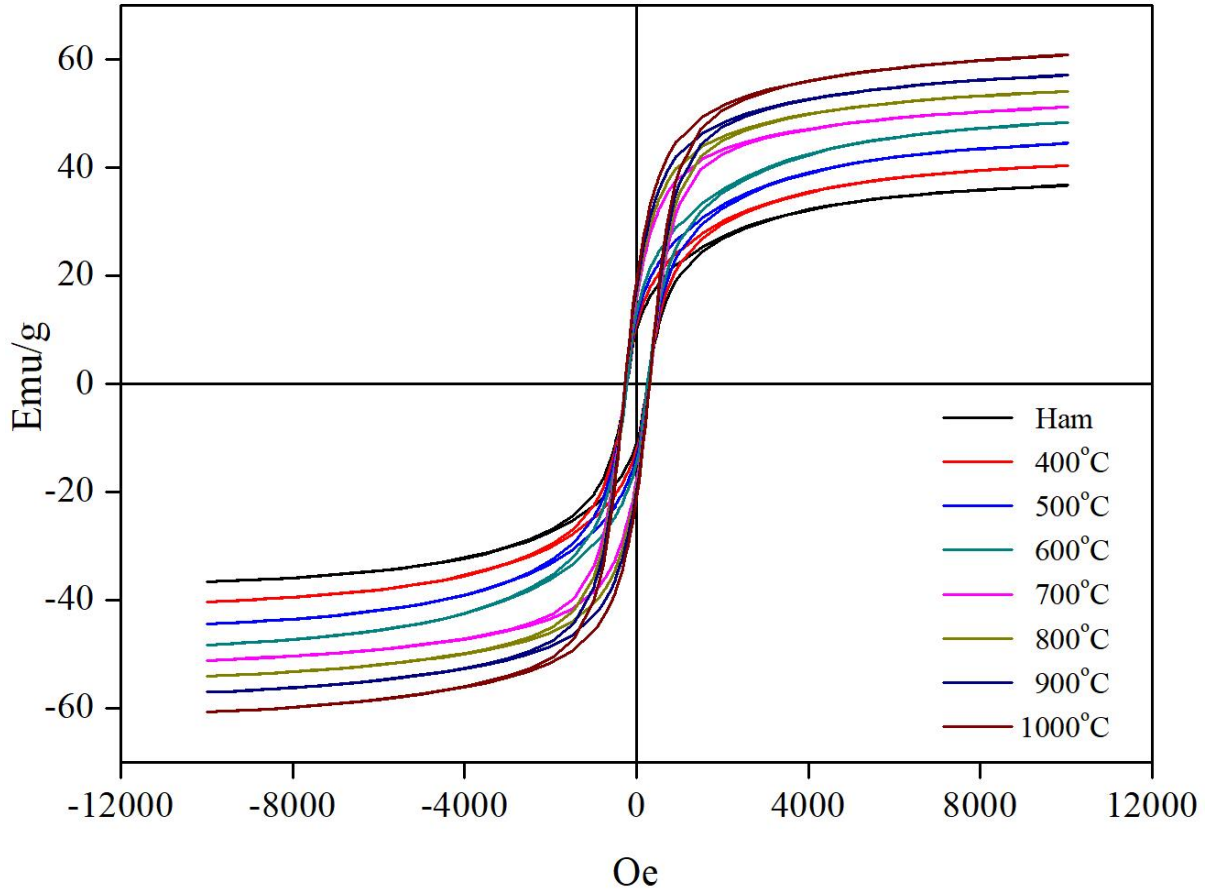
Şekil 15: 800⁰C’de Isıl İşlem Uygulanarak Sentezlenen Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ Nanopartiküllerin TEM Görüntüleri

Ferritlerin diğer malzemelere göre en önemli üstünlükleri manyetik özelliklere sahip olmalarıdır. Bu çalışmada örneklerin manyetik özelliklerinin incelenmesi amacıyla sentezlenen tüm örnekler oda sıcaklığında VSM analizi yapılmıştır.

Örneklerin VSM (Vibrating Sample Magnetometer- Titreşimli Numune Manyetometresi), bir malzemenin manyetik özelliklerini ölçmek için kullanılan bir sistemdir. VSM cihazı, bir manyetik alan altında titreştirilen bir numunenin manyetik momentini (mıknatıslanmasını) ölçmektedir. Ölçüm, manyetik malzemenin farklı özelliklerini ve davranışlarını anlamamıza olanak tanımaktadır. VSM analizi sırasında, manyetik alan uygulanarak malzemenin tepkisi incelenir ve manyetik moment (emu/g) ile uygulanan manyetik alan (Oe ya da Tesla) arasındaki ilişki grafiği (histerezis eğrisi) elde edilir. VSM analizi, malzemenin manyetik özelliklerini ve davranışlarını belirlemek için yapılır. Bu analiz, farklı uygulamalar için malzemenin uygunluğunu değerlendirmeye ve manyetik yapısındaki değişimleri anlamamızı mümkün hale getirmektedir.

Şekil 16’da sunulan grafik, Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ kimyasal formülüne sahip olan karma spinel ferrit türü bir nanomalzemenin oda sıcaklığında ölçülen VSM (Titreşimli Numune Manyetometresi) verilerinden üretilen manyetik histerezis eğrilerini göstermektedir. Ferritler manyetik malzemeler olup, manyetik özellikleri mikro yapısal ve kimyasal değişikliklere oldukça duyarlıdır. Manyetik histerezis eğrileri, sıcaklıkla birlikte bu malzemenin manyetik özelliklerindeki değişimi analiz etmek önemli veriler sunmaktadır. Histeresiz eğrisinden bir

malzemenin (doymum manyetizasyonu, artık manyetizasyon ve koersivite) gibi önemli manyetik özelliklerini belirlemek mümkündür.



Şekil 16: $Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ Nanopartiküllerin Oda Sıcaklığında Ölçülen VSM Verilerinden Elde Edilen Manyetik Histerezis Eğrileri

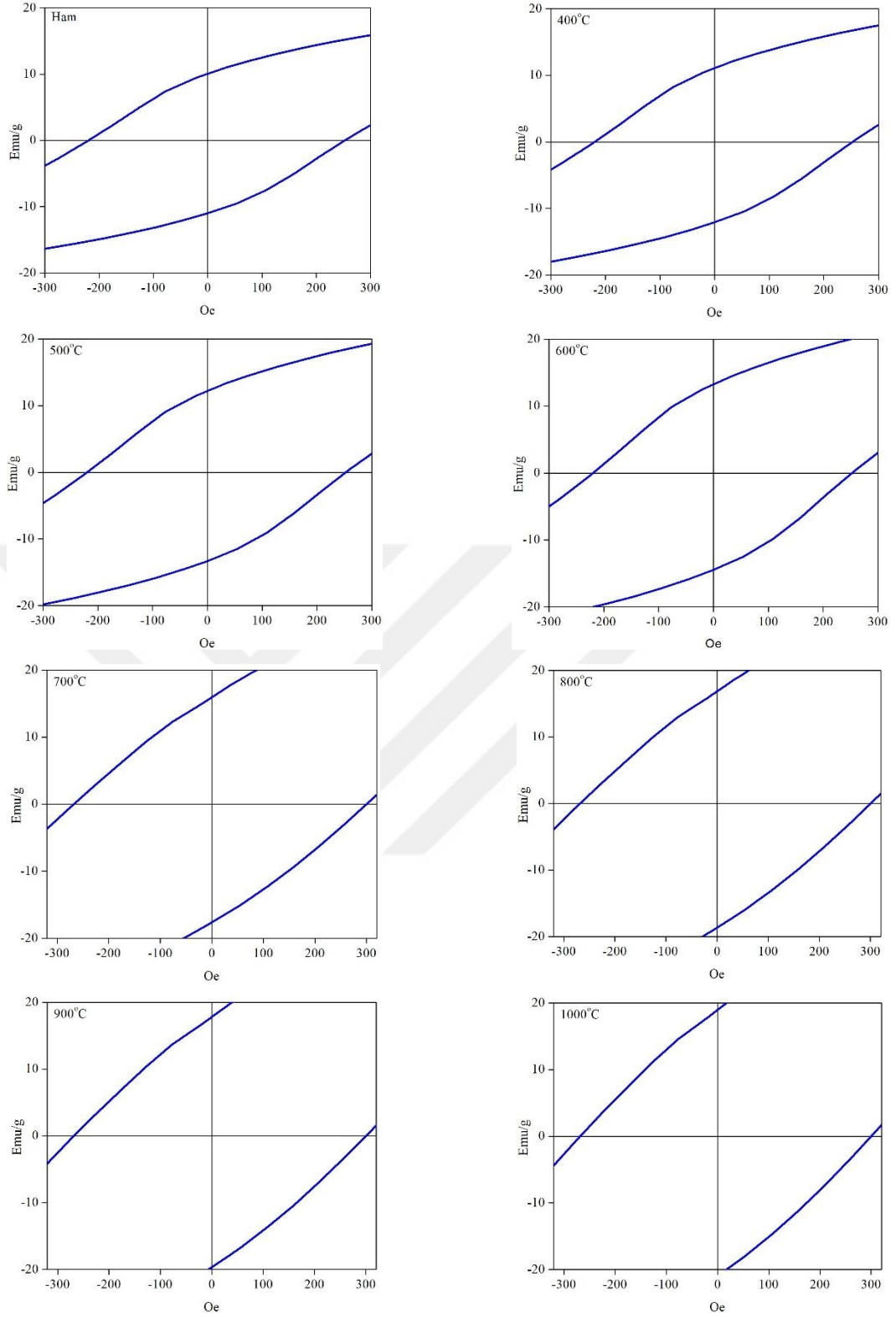
Doygunluk (saturasyon) manyetizasyon değeri (M_s) bir malzemenin manyetik özelliklerini değerlendirirken referans alınan en önemli manyetik özellik olup malzemenin maksimum manyetik momentini temsil etmektedir. Sıcaklık arttıkça doymum manyetizasyonun da belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Eğriler, pozitif veya negatif manyetik alanın yüksek değerlerine ulaştığında yatay hale geliyor, bu da malzemenin manyetizasyonunun doymumla ulaştığını (M_s) göstermektedir. Isıl işlem sıcaklığı yükseldikçe doymum manyetizasyon değeri genellikle artış göstermektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda manyetik fazların kristalleşme derecesinin artmasına ve malzemenin manyetik özelliklerinin iyileşmesinden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir.

Dolayısıyla saturasyon manyetizasyonundaki bu iyileşme, yüksek sıcaklıklarda ferritlerin daha saf bir manyetik faza dönüşmesi ve kristalleşme derecesinin artmasıyla açıklanabilir. Dahası, 400°C ve 500°C'de M_s değeri nispeten düşük olup bu durum örneğin tam olarak manyetik fazlara dönüşmediğini göstermektedir. Bununla birlikte, 800°C ve üzeri sıcaklıklarda M_s 'nin stabilize olduğu görülmektedir. Bu durum, malzemenin kristal yapısının dengeye ulaştığına ve manyetik özelliklerin maksimum seviyeye ulaştığına işaret etmektedir.

Bir diğerk önemli manyetik özellik ise kalıntı manyetizasyon (M_r) değeridir. Kalıntı manyetizasyon (M_r) manyetik alan sıfıra döndüğünde malzemenin sahip olduğu kalıcı manyetik momenttir. Düşük sıcaklıklarda (örn. 400°C, 500°C), M_r değerleri nispeten düşük değerlerdedir. Fakat, 700°C ve daha yüksek sıcaklıklarda M_r değerinin arttığı ve stabil hale geldiği görülmektedir. Bu durum, malzemenin manyetik düzeninin daha belirgin hale geldiği ve manyetik anizotropinin arttığını göstermektedir.

Koersivite (H_c), histerezis eğrisinin sıfır manyetizasyona ulaştığı noktadaki manyetik alanın büyüklüğüdür. Sıcaklık arttıkça koersivitede değişiklikler görülüyor olabilir. Genellikle yüksek sıcaklıklarda faz safiyeti ve tane boyutu artar, bu da koersiviteyi etkileyebilir. Koersivitenin azalması, daha yumuşak manyetik özellikler anlamına gelir. Ayrıca, 400°C ve 500°C gibi düşük sıcaklıklarda ürün nanopartiküllerin mikro yapısı henüz tam olarak oturmamış olduğu için H_c değeri daha düşük olabilmektedir. 700°C'den sonra koersivite değerinin nispeten arttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuç, ürün nanopartiküllerin tane boyutunun büyümesi ve manyetik anizotropinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. 800°C'den sonra manyetik özelliklerdeki artış, manyetik fazların daha iyi kristalleşmesi ve manyetik momentlerin daha düzenli bir hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. 1000°C'de manyetik özelliklerde daha stabilize bir durum görülmektedir.

Koersivite değerinin düşük olduğu eğriler, manyetik olarak "yumuşak" bir malzemeyi; yüksek olduğu eğriler ise "sert" bir malzemeyi temsil etmektedir. Bu tür malzemelerin histeresiz döngüleri genellikle dar histerezis döngüleri şeklindedir. Grafikteki histeresiz döngüleri de genelde dar bir histerezis döngüsü göstermektedir, bu da sentezlenen nano malzemelerin "yumuşak manyetik malzeme" özelliğine sahip olabileceğini düşündürmektedir. Genel olarak ferrit türü nano malzemeler genellikle yumuşak manyetik özelliklere sahiptir. Grafik, ferritin düşük koersiviteye sahip olduğunu, yani enerji kaybının düşük olduğunu ve yumuşak manyetik bir malzeme olarak davranabileceğini göstermektedir. Bu tür özelliklere sahip olan manyetik malzemeler, manyetik çekirdekler, sensörler ve manyetik depolama cihazlarında kullanılabilmek potansiyeline sahiptirler.



Şekil 17: Isıl İşlem Sıcaklığına Göre $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanopartiküllerin VSM Analizinden Kalıntı Manyetizasyonu ve Koersivite Yakın Görünümleri

Özetle, 400°C ve 500°C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda ferrit tam olarak kristalleşmemiş olması ve dolayısıyla da manyetik özelliklerin zayıf olması olasıdır. Buna karşın, 800°C ve üzerindeki sıcaklıklarda kristal yapının daha stabilize olduğu ve dolayısıyla da manyetik fazların (Ni, Zn ve Fe bazlı spinel yapıların) optimize olduğu anlaşılmaktadır. Son olarak ısıt

işlem sıcaklıklarına göre kalıntı manyetizasyonu ve koersivite değerlerinin daha net anlaşılabilmesi için yakın görünüm Şekil 17’de verilmiştir. Buna bağlı olarak her bir ısıtma işlem sıcaklığına göre atanan numunelere ait doygunluk manyetizasyonu (M_s), kalıntı manyetizasyonu (M_r), M_s/M_r oranları ve koersivite (H_c) değerleri Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Isıl İşlem Sıcaklıklarına Göre Hazırlanan Numunelere ait Manyetik Özellikleri

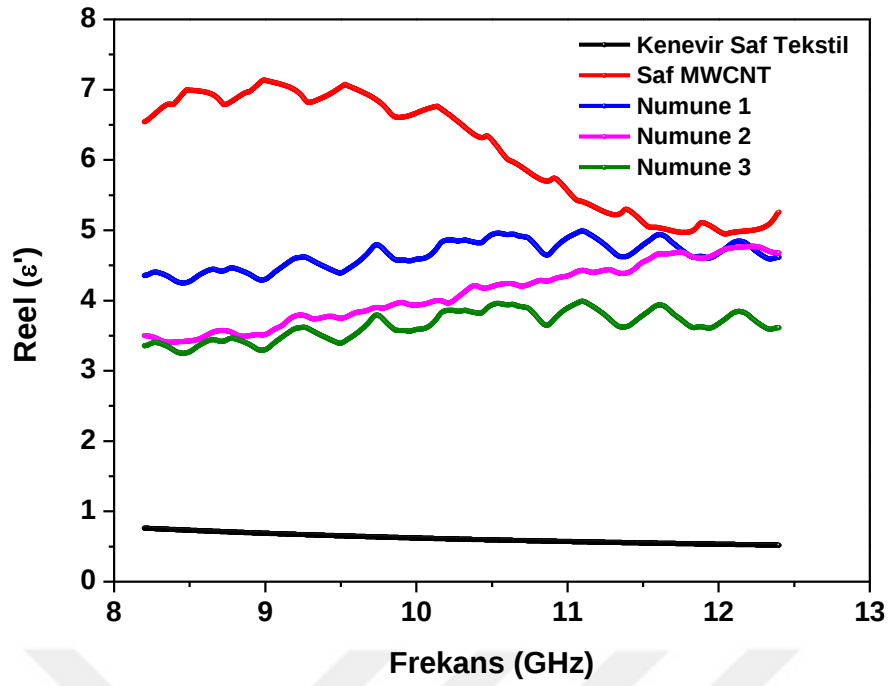
Numune	Isıl İşlem Sıcaklığı	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	M_r / M_s	H_c (Oe)
Ham	-	36,7477	10,03	0,272	251
NiZn-1	400 °C	40,4465	12,60	0,311	256
NiZn-2	500 °C	44,5475	14,80	0,332	260
NiZn-3	600 °C	48,4212	15,50	0,320	268
NiZn-4	600 °C	51,1988	16,85	0,329	295
NiZn-5	800 °C	54,1668	17,11	0,315	298
NiZn-6	900 °C	57,1349	17,71	0,309	301
NiZn-7	1000 °C	60,8449	18,30	0,300	306

3.2. ELEKTROMANYETİK SOĞURUCU YAPININ KURUCU PARAMETRELERİ

Bu bölümde Ni-Zn ferrit manyetik nanopartikülleri ile çok-duvarlı karbon nano tüplerinin plaka bir düzlem olarak kenevir kumaşları üzerine dalga kılavuzu numune tutucu boyutlarında (22,86x10,16mm ve 3mm kalınlık) hazırlanmış tek parça Tablo 2’de verilen farklı konsantrasyonlarda numunelerin ham kenevir kumaş, ve sadece MWCNT’lerden oluşan yapılara ait saçılma (S-parametreleri) parametrelerinden türetilen frekans bağımlı kompleks dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayıları bulguları ve EM dalga soğurma mekanizması hakkında bir tartışma, dağılma faktörleri ile EM dalga soğurmanın dielektrik mi yoksa manyetik malzemelerden kaynaklı olduğu ya da her ikisinden mi kaynaklı olduğu araştırılmış ve sonuçları tartışılmıştır. Son olarak hazırlanan numunelerin EM dalga soğurma özellikleri sonuçlar verilerek tartışılmıştır ve literatürde benzer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

3.2.1. Kompleks Dielektrik Geçirgenlik Katsayısı Analizi Bulguları

Şekil 18 ve Şekil 19 Ham/Saf kenevir kumaş, MWCNT ve ağırlıkça Ni-Zn ferrit oranı %25 artırılırken MWCNT oranı %25 azaltılarak elde edilen numunelere ait dielektrik geçirgenlik katsayısının gerçek ve sanal kısımlarını sırasıyla göstermektedir.

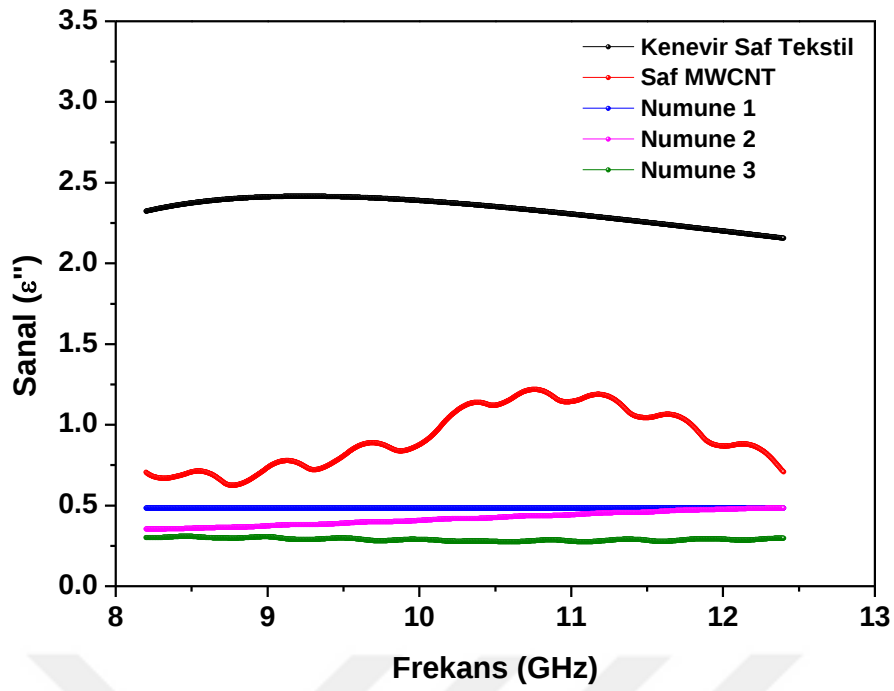


Şekil 18: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Dielektrik Geçirgenlik Katsayılarının Gerçek (ϵ') Kısımları

Şekil 18’de gösterildiği gibi numunelerin permittivity değerlerinin gerçek kısımları frekans bölgesinde nispeten ufak bir artış sergilemişlerdir. Bu durum elektrik dipol momentlerinin salınımının mikrodalga frekanslarıyla biraz faz dışı olduğu baskın bir polarizasyon olduğu anlamına gelir (Ahmad vd., 2010). İlâveten, atomik ve elektronik polarizasyonlar bir mikrodalga sinyalinin periyodundan daha kısa bir periyotta gerçekleşir. Hem doğru akım hem de alternatif akım iletkenliği malzemelerin dielektrik kaybına neden olabilir. Bu durum aşağıda verilen denklemle de kolaylıkla anlaşılabilir (Ahmad vd., 2010):

$$\epsilon'' = \frac{\sigma_{DC}}{\omega\epsilon_0 + \epsilon_{AC}} \quad (13)$$

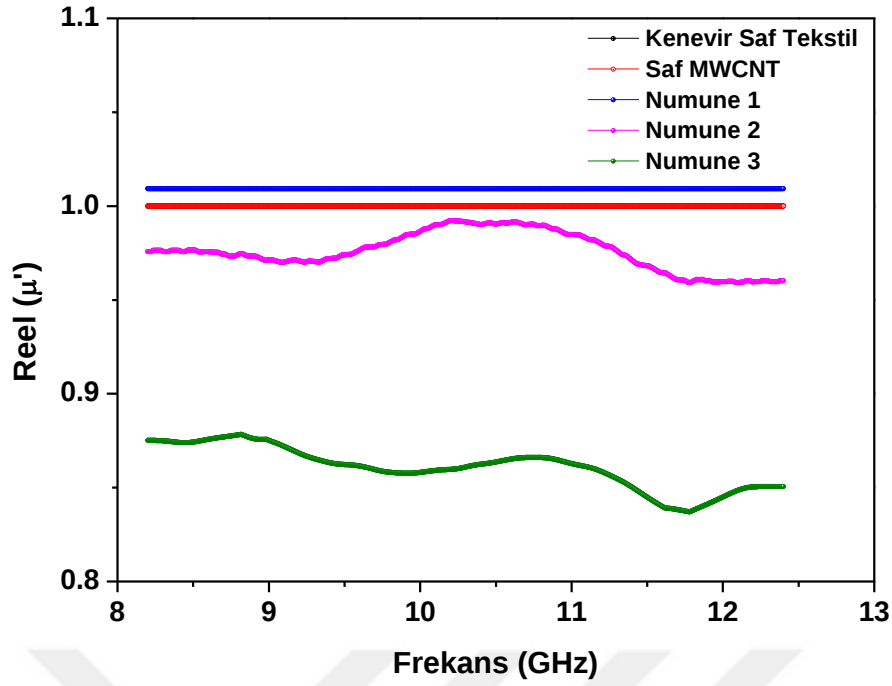
Bu formülden de anlaşıldığı üzere doğru akım iletim kaybının frekansla ters orantılı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla saf MWCNT’den oluşan numune için daha düşük frekanslarda dielektrik geçirgenlik katsayısının sanal kısmının daha yüksek seviyede seyretmesini açıklamaktadır. Ayrıca, kompozitlerde MWCNT’nin azalan yüklenme miktarının etkisi gerçek ve sanal kısımların azalmasını da açıklamaktadır.



Şekil 19: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Dielektrik Geçirgenlik Katsayılarının Sanal (ϵ'') Kısımları

3.2.2. Kompleks Manyetik Geçirgenlik Katsayısı Analizi Bulguları

Şekil 20 ve Şekil 21, Ham/Saf kenevir kumaş, MWCNT ve ağırlıkça Ni-Zn ferrit oranı %25 artırılırken MWCNT oranı %25 azaltılarak elde edilen numunelere ait manyetik geçirgenlik katsayısının gerçek ve sanal kısımlarını sırasıyla göstermektedir. Gerçek kısım 0,83 ile 1,02 arasında frekansa bağlı olarak değişirken sanal kısım 0-0,033 arasında yine frekansa bağlı olarak değişim göstermektedir. Sanal kısmın gerçek kısma göre nispeten çok küçük olması bu parametreden ötürü manyetik kaybın EM dalga zayıflamasına düşük bir katkı sağladığı anlamına gelir.

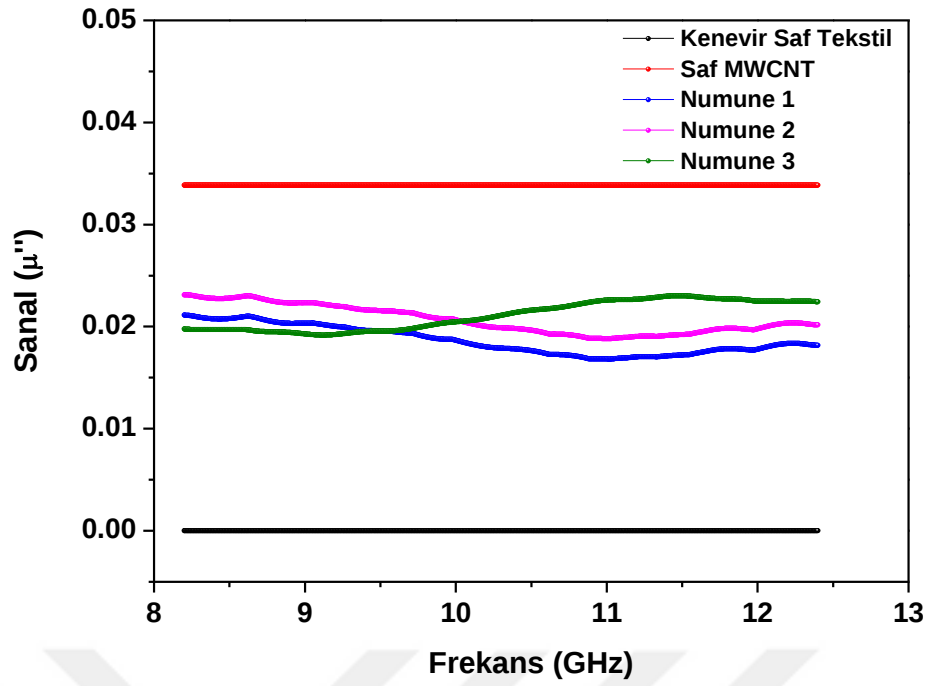


Şekil 20: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Manyetik Geçirgenlik Katsayılarının Gerçek (μ') Kısımları

Genel olarak, manyetik malzemelerin manyetik kaybı, manyetik histerezis, eddy akımı kaybı, domen duvarı rezonansı, nötr rezonans ve değişim rezonansı gibi faktörlerden tahmin edilebilir. Eddy akımı kaybı, elektriksel iletkenlik ve örneklerin kalınlığı ile ilişkilidir. Bu, χ_{eddy} ile ifade edilebilir (Yin vd., 2016).

$$\chi_{\text{eddy}} = \frac{\mu''}{f(\mu')^2} = 2\pi\mu_0\sigma d^2 \quad (14)$$

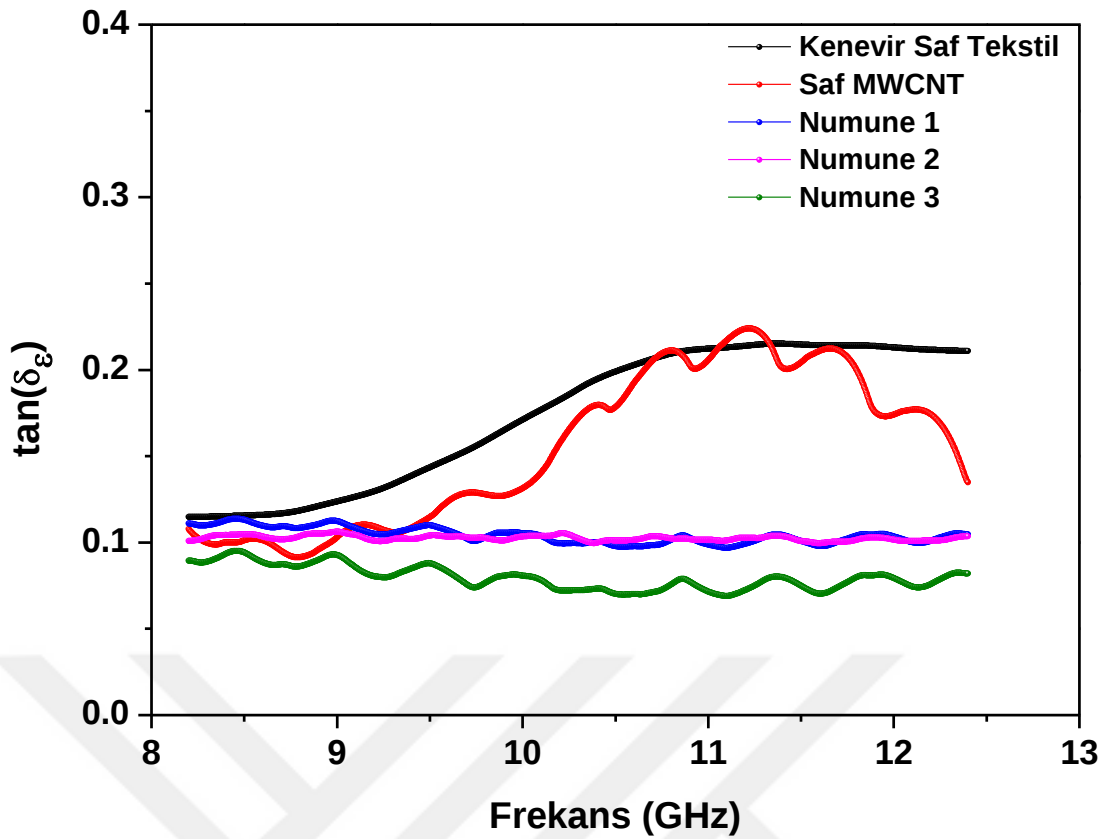
burada μ_0 bir vakumun geçirgenlik değeri ve σ malzemenin elektriksel iletkenliğidir. Buradaki örnekler için, girdap akımı kaybı etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu, girdap akımı kaybının mikrodalga emilim özellikleri açısından önemli bir etkisinin olmadığı anlamına gelir. Unutulmamalıdır ki , manyetik geçirgenlikteki küçük farklılıklar, malzemelerin mikrodalga emilim özelliklerini bile etkileyebilir (Zhao vd., 2016). Daha sonra manyetik özelliklerin Şekil 24'deki RL değerlerine iyi katkıda bulunduğu görülecektir.



Şekil 21: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Manyetik Geçirgenlik Katsayılarının Sanal (μ'') Kısımları

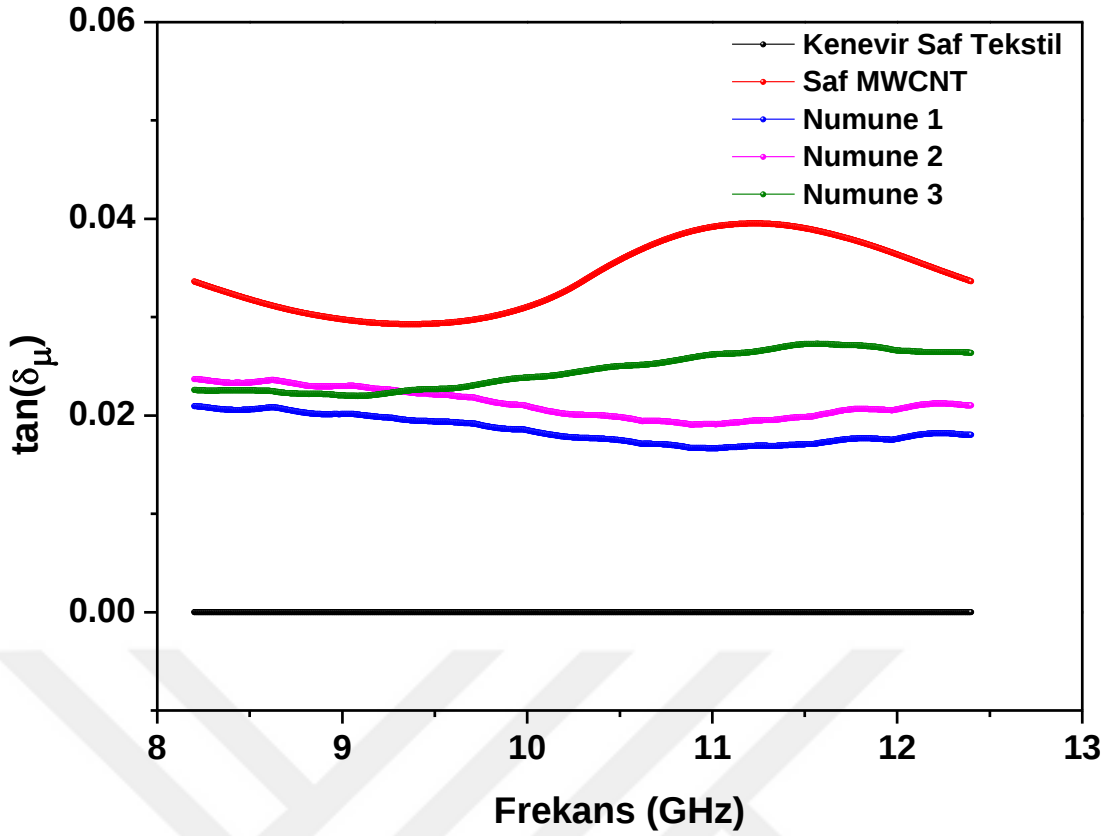
3.2.3. Dağılma Faktörü (Tanjant Kayıpları) Analiz Bulguları

Hesaplamalar sonucu elde edilen dielektrik ve manyetik dağılma faktörleri (tanjant kayıpları) Şekil 22 ve Şekil 23’de sırasıyla verilmiştir. Ni-Zn ferrit katkılı numuneler için dielektrik kayıpların manyetik kayıplara oranla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum soğurmanın esas olarak katmanlı yapıda yapının dielektrik karakteristiklerinden kaynaklandığı ve manyetik karakteristiklerden ötürü soğurmanın etkisinin çok az olduğunu göstermektedir.



Şekil 22: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Dielektrik Dağılma Faktörleri (Dielektrik Tanjant Kayıpları)

Bu durumda, genel kompleks dielektrik geçirgenlik katsayısının katkı sağlayan dielektrik mekanizmalar veya polarizasyon etkileri, dielektrik kayıp faktörlerinin manyetik kayıp faktörlerinden daha belirgin olduğu sonucuna ulaşılabilir. Bir elektrik alan uygulandığında pozitif ve/veya negatif yükler zıt yönlerde hareket eder, bu da baskın dipol polarizasyonuna katkıda bulunulduğunu gösterir. Nikel (Ni), Çinko (Zn) ve Demir (Fe)'in boyutlarının nano ölçekli olduğu dikkate alındığında yüzey atomlarının doymamış bağlarla sayısını artıracak ve bu da dipol polarizasyonunun artması ile sonuçlanacaktır. Artan dipol polarizasyonu, dielektrik kayıp faktörlerine veya dielektrik kayıplarına katkıda bulunabildiğini gösterir. Dielektrik kayıplara olası başka bir katkı da Ni-Zn ferrit NP'lerinin MWCNT'lerdeki uygun dağılımıdır. Bu durum ek yüzeyler oluşturarak ara yüzeysel polarizasyona neden olabilir. Ayrıca Ni-Zn ferrit NP'leri-MWCNT'ler ara yüzeylerinde gevşeme meydana gelebilir, bu durumda dielektrik kayıplara katkıda bulunabilir (Xiang vd., 2014). Alan yükü (space-charge) polarizasyonu, ilave bir gevşemeye katkıda bulunarak dielektrik kaybın bir ölçüde artmasına yol açabilir (Liu vd., 2010). Son olarak Şekil 18 ve Şekil 20'de verilen dielektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarının reel/gerçek kısımları birbiri ile karşılaştırıldığında dielektrik geçirgenlik katsayısının gerçek kısmının nispeten daha büyük olduğu görülür. Bu durum direkt tanjant kayıpları ile ilişkili olduğunu da göstermektedir.



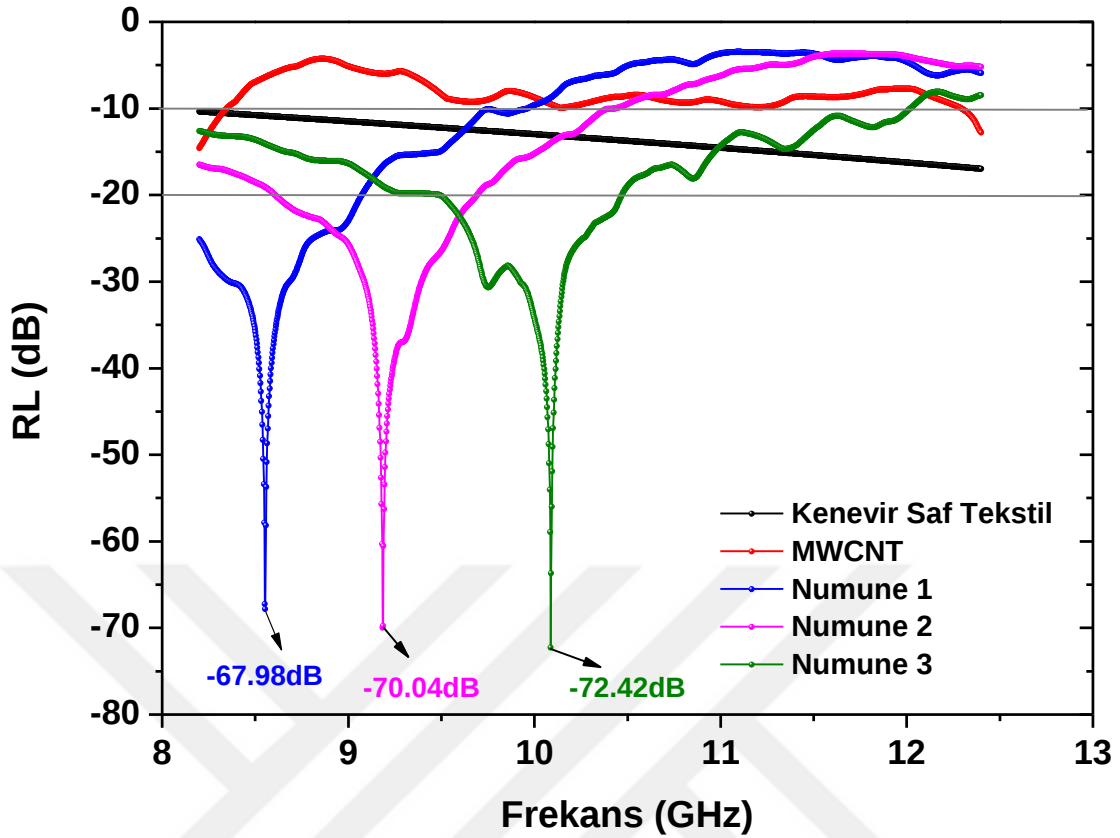
Şekil 23: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Manyetik Dağılıma Faktörleri (Manyetik Tanjant Kayıpları)

3.2.4. Yansıma Kaybı (Reflection Loss, RL) Analiz Bulguları

Yaklaşık olarak aynı kalınlıkta (3 mm) hazırlanmış Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT numuneleri, $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ manyetik nanopartikülleri ile MWCNT ve kenevir kumaşlardan elde edilen farklı konsantrasyonlardaki yapılar için deneysel olarak elde edilen S-parametreleri ile empedans uyum teorisine göre hesaplanan frekans bağımlı yansıma kaybı (Reflection Loss, RL) X-bandı için Şekil 24'de gösterilmiştir. Ham (saf, herhangi bir işleme tabi tutulmamış) kenevir kumaş ve saf MWCNT'lerden oluşan numunelere nazaran $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ manyetik NP'leri ile MWCNT harmanlanmasından elde edilen ve ham kenevir kumaşla iki katmanlı farklı konsantrasyonlarda yapıların yansıma kayıplarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürde dielektrik ve manyetik malzemelerin harmanlanması ile elde edilen EM soğurucuların performansının artırılacağı bilgisini de doğrulamaktadır.

En düşük RL değeri Numune 3'te yani ağırlık olarak yaklaşık %25 MWCNT - %75 $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ numunede tespit edilmiştir. Numune içinde ağırlık olarak artan $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ manyetik malzeme miktarı gerek -10dB seviyesi gerekse -20dB seviyeleri referans seviyelerinde sadece EM soğurmayı değil aynı zamanda bant genişliğini de artırmıştır. Her ne kadar EM soğurulmanın kaynağı manyetik kayıplara göre dielektrik kayıplardan olsa da manyetik kayıplardan EM dalga (veya mikrodalga) Emilimi/soğurulması için dielektrik

kayıplardan daha etkin ve hassas olduğu gerçeğini de doğrulamıştır (Zhao vd., 2016).



Şekil 24: $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Manyetik Nanopartikülleri ile MWCNT ve Kenevir Kumaşlardan Elde Edilen Farklı Konsantrasyonlardaki Yapılar, Ham Kenevir Kumaş ve Saf MWCNT Numunelerine Ait Yansıma Kayıpları (Reflection Loss, RL)

Beş (5) farklı numunenin dalga kılavuzu iletim hattı tekniğine göre ölçülmüş S-parametreleri yardımıyla empedans uyumu yaklaşımı ile türetilen yansıma kayıpları (RL) ve bu yansıma kayıpları sonuçlarına dayanarak kabul edilebilen soğurmanın en düşük ve en yüksek frekans noktaları, her bir numune için bant genişlikleri Tablo 6’de -10dB referans seviyesine göre (%90’nın üzerinde bir soğurma seviyesi) verilmiştir. Ni-Zn ferrit miktarının ağırlıkça artması ile rezonans frekansı yüksek frekanslara doğru kaymaktadır ve bant genişliği 1,54GHz’den 3,81GHz’e kadar çıkmaktadır. X-bandı frekans bölgesi (8,2-12,4 GHz, 4,2GHz’lik bir bant genişliği) için bandın tamamının yaklaşık %90,71’ini kapsayan bir EM soğurma (RL < -10 dB) elde edilmiştir. Ayrıca yansıma kaybı ise -67,98 dB’den -72,42dB seviyesine gerileyerek daha fazla yansıma kaybı olduğu ve dolayısıyla soğurmanın maksimum seviyeye çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca 1- ve 2- No’lu numunelerin soğurmalarının -10dB’nin altında mikrodalga frekanslarından C- (4-8GHz) bandına doğru kayma eğilimlerinin olduğu da tespit edilmiştir.

Tablo 6: Referans -10dB Seviyesine Göre X-Bandı EM Soğurma Analiz Sonuçları

Numune	Rezonans Frekansı (f_r)	-10dB En Yüksek ve En Düşük Frekans Noktaları (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Yansıma Kaybı (dB)
Kenevir Kumaş	-	8,20-12,40	4,20	-16,96
MWCNT	-	8,20-8,34 12,30-12,40	0,14 0,10	-15,12 -13,03
Numune 1	8,55	8,20-9,74	1,54	-67,98
Numune 2	9,17	8,20-10,38	2,18	-70,04
Numune 3	10,08	8,20-12,01	3,81	-72,42

Tablo 7’de ise -20dB’seviyesine göre (%99,99’luk bir soğurma seviyesi) EM soğurma verileri listelenmiştir. Bu referans seviyesine göre bant genişliği 0,86 GHz’den 1.21 GHz’e kadar artırılmış olduğu gözlemlenmektedir. Yansıma kaybı, $RL < -10$ dB referans seviyesi dikkate alındığında bu çalışmada sunulan numuneler %90,71’in üzerinde bir soğurma ederek kabul edilebilir yüksek bir bant genişliği performansı sergilemiştir.

Tablo 7: Referans -20dB Seviyesine Göre X-Bandı EM Soğurma Analiz Sonuçları

Numune	Rezonans Frekansı (f_r)	-20dB En Yüksek ve En Düşük Frekans Noktaları (GHz)	Bant Genişliği (GHz)	Yansıma Kaybı (dB)
Kenevir Kumaş	-	-	-	-
MWCNT	-	-	-	-
Numune 1	8,55	8,20-9,06	0,86	-67,98
Numune 2	9,17	8,61-9,68	1,07	-70,04
Numune 3	10,08	9,25-10,46	1,21	-72,42

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgular ile literatürde benzer Ni-Zn ferrit tabanlı yayınlanmış çalışmalarla karşılaştırmalar numune içeriği, en başarılı numune, bant genişliği (GHz) ve Yansıma kaybı, RL, (dB) açısından Tablo 8’de verilerek performans durumu da incelenmiştir. Verilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere X-bandı için elde edilen soğurucu yüksek performansa sahiptir.

Tablo 8: X-Bandı EM Soğurma Analiz Sonuçlarının Literatürde Benzer Çalışmalar ile Karşılaştırılması (Referans -10dB Seviyesine Göre)

Referans	Numune İçeriği	Numune	Bant Genişliği (GHz)	Yansıma Kaybı (dB)
(Chahar vd., 2022)	MWCNT+Ni-Zn Ferrit	MWCNT+Ni-Zn Ferrit	0,45	-51,20
(Liu vd., 2012)	CNT+ZnOw Komposit	CNT+ZnOw Komposit	1,90	-37,03
(Tong vd., 2014)	MWCNT+Ni	MWCNT+Ni	2,00	-37,9
(Wen vd., 2011)	MWCNT+Co	MWCNT+Co	1,16	-37,00
(Xiang vd., 2014)	Karbon Nanofiber (Fe/Co/Ni)	Karbon Nanofiber, Fe	3,40	-67,50
(Teber vd., 2017)	MWCNT+ZnFe ₂ O ₄ ve MnFe ₂ O ₄ NPs	MWCNT+ ZnFe ₂ O ₄	4,20	-42,06
Bu Tez Çalışması	MWCNT+Kenevir	Numune 1	1,54	-67,98
	Kumaş+Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄	Numune 2	2,18	-70,04
	NPs	Numune 3	3,81	-72,42

SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sonuç

Bu çalışmada, $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerinin manyetik ve dielektrik özelliklerinin yanı sıra, bu malzemelerin yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalarla etkileşimi üzerine yapılan analizler detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Yapılan X-ışını kırınım (XRD) analizi, sentezlenen $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerinin standart JCPDS kartlarıyla uyumlu yapılar sergilediğini ve örneklerin düzgün kristal yapılar oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, difraksiyon paternlerinin, $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerinin doğru açisal pozisyonlarda bulunan yansıma pikselleri ile örtüştüğü belirlenmiştir. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarda elde edilen sonuçlarla da tutarlıdır.

FT-IR analizi, malzemenin kimyasal yapısını doğrulamış ve hedeflenen $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanopartiküllerinin başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermiştir. Temel kimyasal grupların varlığı, sentez aşamasındaki reaksiyonların doğru bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Mikro yapısal inceleme için uygulanan TEM analizi, nanopartiküllerin homojen olmayan bir yapıda dağıldığını, 40-60 nm arasında boyutlar sergilediğini ve şekil açısından heterojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, 800°C'de yapılan ısıtıl işlem ile kristal yapı stabil hale gelmiş ve manyetik fazlar optimize olmuştur. Düşük sıcaklıklarda ise, ferritin tam olarak kristalleşmemesi nedeniyle manyetik özelliklerin zayıf olduğu gözlemlenmiştir.

Dielektrik ve manyetik nanopartiküllerin, MWCNT'ler ile harmanlanarak oluşturulan iki katmanlı yapı, yüksek oranda elektromanyetik dalga soğurma özelliği göstermiştir. Yapı, dalga kılavuzu iletim hattı ölçüm tekniğiyle test edilmiştir ve elde edilen yansıma kaybı, saf kenevir kumaş ve saf MWCNT'ye kıyasla belirgin şekilde artmıştır. Bu artış, %90'ın üzerinde bir soğurma sağlandığını göstermektedir. Manyetik malzeme miktarındaki artışın, soğurma bant genişliğini de önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir.

Soğurma mekanizması incelendiğinde, soğurmanın büyük oranda dielektrik kayıplardan kaynaklandığı, ancak manyetik Ni-Zn ferrit nanopartiküllerinin eklenmesinin, manyetik kayıplarda sınırlı bir artışa yol açarak toplam soğurma/yansıma kaybının ve bant genişliğinin ciddi şekilde arttığını göstermektedir. NRW tekniği ile yapılan hesaplamalarda -72,42 dB'lik bir soğurma/yansıma kaybı başarıyla elde edilmiştir. X-bandı (8,2-12,4 GHz) için ölçülen soğurma bant genişliği, 3,81 GHz olarak belirlenmiş ve bu bandın %90,71'lik kısmında yüksek verimli bir soğurucu malzeme elde edilmiştir. Ayrıca, Ni-Zn ferrit miktarındaki artışın rezonans frekansını yüksek frekanslara kaydırması tespit edilmiştir.

Tartışma

Literatürdeki benzer Ni-Zn ferrit tabanlı çalışmalarla karşılaştırmalar, numune içeriği, en başarılı numune, bant genişliği (GHz) ve yansıma kaybı (RL, dB) açısından Tablo 8'de sunulmuş ve performans durumu değerlendirilmiştir. Verilen sonuçlardan, X-bandı için elde edilen soğurucunun yüksek performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Öneriler

$Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe_2O_4$ nanopartikülleri mikrodalga destekli yakma tekniği ile sentezlenmiş ve bu NP'lerin dielektrik ve manyetik özellikleri ile elektromanyetik dalgaların soğurulmasındaki etkinliği başarılı bir şekilde incelenmiş ve elde edilen bulgular, yüksek performanslı soğurucu malzemelerin geliştirilmesi için önemli bir katkı sağlamaktadır. Gelecekte, bu malzemelerin potansiyel uygulamaları, elektromanyetik alanın etkilerini azaltma ve özellikle iletişim sistemlerinde sinyal bozulmalarını engelleme gibi alanlarda daha da genişleyebilir. Bu açıdan, kenevir kumaşların değişik teknik ve yöntemlerle nanometre boyutunda kaplamalarının yapılarak yeni soğurucu tasarımları içinde avantajlı bir malzeme olduğunu ve yeni soğurucu çalışmalarda kullanımı önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abrikosov Jr, A.A., Livanov, D.V., & Varlamov, A.A., (2005). Electronic spectrum and tunneling properties of multiwall carbon nanotubes. *Physical Review B-Condensed Matter and Materials Physics*, 71(16), 165423.
- Ahmad, S. H., Abdullah, M. H., Hui, D. Yusoff, A. N., & Puryanti, D. (2010). Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite–thermoplastic natural rubber nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322(21), 3401-3409.
- Akman, O., Kavas, H., Baykal, A., Toprak, M. S., Çoruh, A., & Aktaş, B. (2013). Magnetic metal nanoparticles coated polyacrylonitrile textiles as microwave absorber. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 327, 151–158. doi:10.1016/J.JMMM.2012.09.032
- Arslan Madak, S. Ş. (2024). *Yüksek frekans 5G bantlarında çalışan metamalzeme soğurucu ve X-, Ku-, K-bantlarında çalışan polarizasyon dönüştürücü tasarımlarının gerçekleştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 832166)
- Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R. M., Friswell, M. I., & Inman, D. J. (2011). A review of morphing aircraft. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(9), 823-877.
- Bhat, P. B., & Bhat, B. R. (2016). Magnetically retrievable nickel hydroxide functionalised AFe_2O_4 (A=Mn, Ni) spinel nanocatalyst for alcohol oxidation. *Applied Nanoscience*, 6, 425–435.
- Chahar, M., Dabas, S., & Thakur, O. P. (2022). Enhanced electromagnetic shielding effectiveness of MWCNT/zinc-doped nickel ferrite nanocomposites. *Ceramics International*, 48(4), 5352-5360.
- Cherenack, K., & Pieterse, L. V. (2012). Smart textiles: Challenges and opportunities. *Journal of Applied Physics*, 112(9). doi:10.1063/1.4742728.
- Costa, A. C. F. M., Diniz, A. P., Silva, V. J., Kiminami, R. H. G. A., Cornejo, D. R., Gama, A. M., Rezende, M. C., & Gama, L. (2009). Influence of calcination temperature on the morphology and magnetic properties of Ni–Zn ferrite applied as an electromagnetic energy absorber. *Journal of Alloys and Compounds*, 483, 563-565.
- Dahal, R. K., Acharya, B., & Dutta, A. (2022). Mechanical, thermal, and acoustic properties of hemp and biocomposite materials: a review. *Journal of Composites Science*, 6(12), 373.
- Donald, R.J.W. & Mardiguian M. (1988). *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility: Electromagnetic Shielding*. Gainesville, VA, USA: Interference Control Technologies. (Volume 3).
- Fang, Y., Li, H., Akhtar, M. N., & Shi, L. (2021). High-efficiency microwave absorber based on carbon Fiber@ $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}@ \text{NiO}$ composite for X-band applications. *Ceramics International*, 47(14), 20438-20446.
- Faircloth, D. L., Baginski, M. E., & Wentworth, S. M. (2006). Complex permittivity and permeability extraction for multilayered samples using S-parameter waveguide

- measurements. *IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques*, 54(3), 1201-1209.
- Gaba, M., & Dhingra, N. (2011). Microwave chemistry: General features and applications. *Ind J Pharm Edu Res*, 45(2), 175-183.
- Ganguly, S., Das, P., Das, S., Ghorai, U., Bose, M., Ghosh, S., ... & Das, N. C. (2019). Microwave assisted green synthesis of Zwitterionic photoluminescent N-doped carbon dots: An efficient 'on-off' chemosensor for tracer Cr (+6) considering the inner filter effect and nano drug-delivery vector. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 579, 123604.
- Gavrilova, M., Gavrilova, D., Kondrashkova, I., & Evstropiev, S. (2023). Structural engineering of nanocrystalline Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ synthesized by auto combustion method through the use of different organic reducing compounds and its effect on magnetic and photocatalytic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(22), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-11063-9>.
- Giannakopoulou, T., Kompotiatis, L., Kontogeorgakos, A., & Kordas, G. (2002). Microwave behavior of ferrites prepared via sol–gel method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 246(3), 360-365.
- Giuseppe Daalioia, A., Bidsorkhi, H. C., De Bellis, G., & Sarto, M. S. (2022). Graphene Based Wideband Electromagnetic Absorbing Textiles at Microwave Bands. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(3), 710–719. doi:10.1109/TEMPC.2021.3133665.
- Grewal, A. S., Kumar, K., Redhu, S., & Bhardwaj, S. (2013). Microwave assisted synthesis: A green chemistry approach. *International Research Journal of Pharmaceutical and Applied Sciences*, 3(5), 278-285.
- Ing Hua, T., & Sundari, R. (2014). Fabrication and characterization of ferrites (Mg and Mn) based on FTIR, XRD, SEM and TEM. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8(3), 153–158. <https://doi.org/10.11113/mjfas.v8n3.140>.
- Islam, K., Haque, M., Kumar, A., Hoq, A., Hyder, F., & Hoque, S. M. (2020). Manganese Ferrite Nanoparticles (MnFe₂O₄): Size Dependence for Hyperthermia and Negative/Positive Contrast Enhancement in MRI. *Nanomaterials*, 10(11), 2297. <https://doi.org/10.3390/NANO10112297>.
- Kappe, C. O. (2004). Controlled microwave heating in modern organic synthesis. *Angewandte Chemie International Edition*, 43(46), 6250-6284.
- Karakaş, İ. H. (2022). *Mikrodalga destekli yakma yöntemiyle sentezlenen çeşitli metal aluminat nanopartiküllerin fotokatalitik aktivitelerinin incelenmesi* (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No.761708)
- Karakaş, Z. K. (2021). Investigation of the usability of zinc ferrite nanoparticles synthesized by microwave assisted combustion method as photocatalyst for removal of organic dyes from wastewaters. *Environmental Research and Technology*, 4(1), 42-52.
- Kaşgöz, A. (2017). *Elektromanyetik dalga kalkanlama özelliğine sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi ve yapı-performans ilişkilerinin incelenmesi*, (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 478309)

- Kaur, N., Grewal, P., Bhardwaj, P., Devi, M., & Verma, Y. (2019). Nickel-catalyzed synthesis of five-membered heterocycles. *Synthetic Communications*, 49(12), 1543-1577.
- Krishnasamy, P., Mysamy, G., Arulvel, S., Rajamurugan, G., & Gadekar, A. (2024). Characterization of electrical conductivity and dielectric properties of electroless NiP/rGO composite coated hemp fiber with various weight% of rGO and coating duration. *Results in Physics*, 60, 107694.
- Krstenansky, J. L., & Cotterill, I. (2000). Recent advances in microwave-assisted organic syntheses. *Current Opinion in Drug Discovery & Development*, 3(4), 454-461.
- LaJeunesse, S. (2021). Cannabis may contain heavy metals and affect consumer health, study finds. Retrieved from <https://www.psu.edu/news/research/story/cannabis-may-contain-heavy-metals-and-affect-consumer-health-study-finds/>
- Lima, U. R., Nasar, M. C., Nasar, R. S., Rezende, M. C., & Araújo, J. H. (2008). Ni-Zn nanoferrite for radar-absorbing material. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 1666-1670.
- Lin, H., Zhu, H., Guo, H., & Yu, L. (2007). Investigation of the microwave-absorbing properties of Fe-filled carbon nanotubes. *Materials Letters*, 61(16), 3547-3550.
- Lin, H., Zhu, H., Guo, H., & Yu, L. (2008). Microwave-absorbing properties of Co-filled carbon nanotubes. *Materials Research Bulletin*, 43(10), 2697-2702.
- Liu, G., Wang, L., Chen, G., Hua, S., Ge, C., Zhang, H., & Wu, R. (2012). Enhanced electromagnetic absorption properties of carbon nanotubes and zinc oxide whisker microwave absorber. *Journal of Alloys and Compounds*, 514, 183-188.
- Liu, X. G., Ou, Z. Q., Geng, D. Y., Han, Z., Jiang, J. J., Liu, W., & Zhang, Z. D. (2010). Influence of a graphite shell on the thermal and electromagnetic characteristics of FeNi nanoparticles. *Carbon*, 48(3), 891-897.
- Lu, M. M., Cao, W. Q., Shi, H. L., Fang, X. Y., Yang, J., Hou, Z. L., ... & Cao, M. S. (2014). Multi-wall carbon nanotubes decorated with ZnO nanocrystals: mild solution-process synthesis and highly efficient microwave absorption properties at elevated temperature. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(27), 10540-10547.
- Maity, S., & Chatterjee, A. (2018). Conductive polymer-based electro-conductive textile composites for electromagnetic interference shielding: A review. *Journal of Industrial Textiles*, 47(8), 2228-2252. doi:10.1177/1528083716670310.
- Miranda, A., Barekar, N., & McKay, B. J. (2019). MWCNTs and their use in Al-MMCs for ultra-high thermal conductivity applications: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 774, 820-840.
- Qing, Y., Zhou, W., Luo, F., & Zhu, D. (2010). Epoxy-silicone filled with multi-walled carbon nanotubes and carbonyl iron particles as a microwave absorber. *Carbon*, 48(14), 4074-4080.
- Qiu, J., & Qiu, T. (2015). Fabrication and microwave absorption properties of magnetite nanoparticle-carbon nanotube-hollow carbon fiber composites. *Carbon*, 81, 20-28.

- Paton, K. R., & Windle, A. H. (2008). Efficient microwave energy absorption by carbon nanotubes. *Carbon*, 46(14), 1935-1941.
- Pein, A., Baghbanzadeh, M., Rath, T., Haas, W., Maier, E., Amenitsch, H., ... & Trimmel, G. (2011). Investigation of the formation of CuInS₂ nanoparticles by the oleylamine route: comparison of microwave-assisted and conventional syntheses. *Inorganic Chemistry*, 50(1), 193-200.
- Ravichandran, S., & Karthikeyan, E. (2011). Microwave synthesis-a potential tool for green chemistry. *International Journal of ChemTech Research*, 3(1), 466-470.
- Rothwell, E. J., Frasc, J. L., Ellison, S. M., Chahal, P., & Ouedraogo, R. O. (2016). Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials. *Progress In Electromagnetics Research*, 157, 31-47.
- Shanmugavel, T., Raj, S. G., Kumar, G. R., & Rajarajan, G. (2014). Synthesis and Structural Analysis of Nanocrystalline MnFe₂O₄. *Physics Procedia*, 54(C), 159–163. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2014.10.053>.
- Shi, D., He, P., Zhao, P., Guo, F. F., Wang, F., Huth, C., ... & Lian, J. (2011). Magnetic alignment of Ni/Co-coated carbon nanotubes in polystyrene composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1532-1538.
- Sousa, M. H., Hasmonay, E., Depeyrot, J., Tourinho, F. A., Bacri, J. C., Dubois, E., Perzynski, R., & Raikher, Y. L. (2002). NiFe₂O₄ nanoparticles in ferrofluids: evidence of spin disorder in the surface layer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 572, 242-245.
- Stoppa, M., & Chiolerio, A. (2014). Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. *Sensors*, 14(7), 11957–11992. doi:10.3390/S140711957.
- Sugimoto, M. (1999). The past, present, and future of ferrites. *Journal of the American Ceramic Society*, 82, 269-280.
- Teber, A., Unver, I., Kavas, H., Aktas, B., & Bansal, R. (2016). Knitted radar absorbing materials (RAM) based on nickel–cobalt magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 406, 228–232. doi:10.1016/J.JMMM.2015.12.056.
- Teber, A., Cil, K., Yilmaz, T., Eraslan, B., Uysal, D., Surucu, G., ... & Bansal, R. (2017). Manganese and zinc spinel ferrites blended with multi-walled carbon nanotubes as microwave absorbing materials. *Aerospace*, 4(1), 2.
- Tong, G., Liu, F., Wu, W., Du, F., & Guan, J. (2014). Rambutan-like Ni/MWCNT heterostructures: easy synthesis, formation mechanism, and controlled static magnetic and microwave electromagnetic characteristics. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(20), 7373-7382.
- Tschumper, G. S. (2009). 2 Reliable Electronic Structure Computations for Weak Noncovalent Interactions in Clusters. *Reviews in Computational Chemistry*, 26, 39.
- US Research Nanomaterials, (2024, 28 November). MWCNTs (>95%, OD: 10-20 nm) [Powder Form]. Retrieved from <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/224>

- Vural, S., Bayrak Alphan, A., Köytepe, S., Seçkin, T. (2016). Spinel Ferrit Nano-Parçacıklarının Hidrotermal Sentez Tekniği Kullanılarak Hazırlanması Ve Manyetik Özelliklerinin Araştırılması. *Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, 17(1), 111-120. <https://doi.org/10.18038/btda.19450>.
- Wahab, R., Kaushik, N., Khan, F., Kaushik, N. K., Choi, E. H., Musarrat, J., & Al-Khedhairi, A. A. (2016). Self-Styled ZnO Nanostructures Promotes the Cancer Cell Damage and Supresses the Epithelial Phenotype of Glioblastoma. *Scientific Reports*, 6(1), 19950. <https://doi.org/10.1038/srep19950>.
- Wang, Z., Wu, L., Zhou, J., Cai, W., Shen, B., & Jiang, Z. (2013). Magnetite nanocrystals on multiwalled carbon nanotubes as a synergistic microwave absorber. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(10), 5446-5452.
- Wen, F., Zhang, F., & Liu, Z. (2011). Investigation on microwave absorption properties for multiwalled carbon nanotubes/Fe/Co/Ni nanopowders as lightweight absorbers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 115(29), 14025-14030.
- Widakdo, J., Istikhomah, N., Rifianto, A., Suharyadi, E., Kato, T., & Iwata, S. (2018). Crystal Structures and Magnetic Properties of Polyethylene Glycol (PEG-4000) Encapsulated $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Magnetic Nanoparticles. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012068>.
- Wilson, K. (2021). *A history of textiles*. New York: Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780429049101/history-textiles-kax-wilson>
- Wu, W., Cai, J., Wu, X., Li, Y., & Liao, S. (2011). Magnetic properties and crystallization kinetics of $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$. *Rare Metals*, 30(6), 621–626. <https://doi.org/10.1007/S12598-011-0439-6/METRICS>.
- Xiang, J., Li, J., Zhang, X., Ye, Q., Xu, J., & Shen, X. (2014). Magnetic carbon nanofibers containing uniformly dispersed Fe/Co/Ni nanoparticles as stable and high-performance electromagnetic wave absorbers. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(40), 16905-16914.
- Yin, Y., Zeng, M., Liu, J., Tang, W., Dong, H., Xia, R., & Yu, R. (2016). Enhanced high-frequency absorption of anisotropic Fe_3O_4 /graphene nanocomposites. *Scientific Reports*, 6(1), 25075.
- Zhang, D., Xu, F., Lin, J., Yang, Z., & Zhang, M. (2014). Electromagnetic characteristics and microwave absorption properties of carbon-encapsulated cobalt nanoparticles in 2–18GHz frequency range. *Carbon*, 80, 103-111.
- Zhao, H. B., Fu, Z. B., Chen, H. B., Zhong, M. L., & Wang, C. Y. (2016). Excellent electromagnetic absorption capability of Ni/carbon based conductive and magnetic foams synthesized via a green one pot route. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(2), 1468-1477.
- Zipare, K., Dhumal, J., Bandgar, S., Mathe, V., & Shahane, G. (2015). Superparamagnetic Manganese Ferrite Nanoparticles: Synthesis and Magnetic Properties. *Journal of Nanoscience and Nanoengineering*, 1(3), 178–182. <https://www.academia.edu/download/79267536/70270032.pdf>.

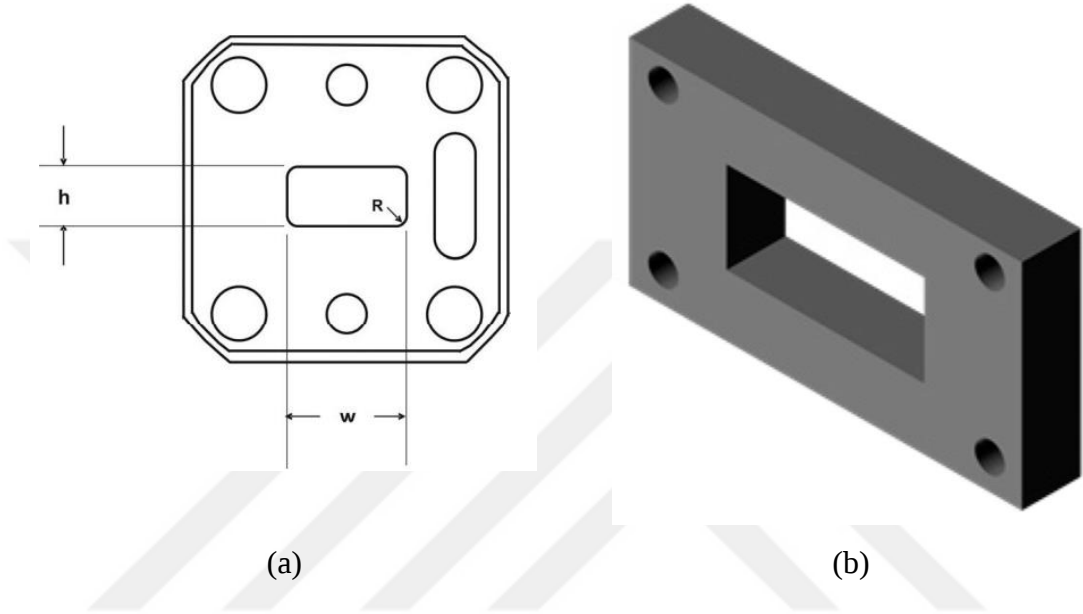
Zou, T., Li, H., Zhao, N., & Shi, C. (2010). Electromagnetic and microwave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes filled with Ni nanowire. *Journal of Alloys and Compounds*, 496(1-2), L22-L24.



EKLER

Ek 1: Numune Tutucu Yapısı ve Görseli

Mikrodalga frekanslarından X-bandı yansıma, geçirme ve soğurma ölçümlerinde kullanılan $\frac{1}{4}$ dalga boyu ara parçası (takoz) yapısı hem kalibrasyon hem de kalp çıkartımında numune tutucu olarak kullanılmıştır. Numune tutucunun yapısal boyutları aşağıda Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 25: (a) Numune Tutucu Boyut Parametreleri ve (b) Numune Tutucu Perspektif Görünüm Şematığı

X-Bandı için kullanılan WR90 dalga kılavuzunda kullanılan numune tutucuya ait yapısal parametreler Tablo 9’da verilmiştir. Tüm dalga kılavuzu şortları 0,008 mm içerisinde düzdür.

Tablo 9: Numune Tutucu Yapısal Parametreleri

Dalga Kılavuzu Modeli	Frekans Aralığı (GHz)	En (W)	Yükseklik (H)	Kesim Kenar Uzunluğu (R)	Kalınlık
WR90	8,2-12,4	22,86±0,01	10,16±0.01	0,13 mm max.	3 mm

ÖZ GEÇMİŞ

Pembe TEBER, ilk, orta ve lise öğrenimini Fatsa, Ordu’da tamamladıktan sonra 2005 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Tekstil Mühendisliğini kazandı. 2009 yılında Lisans derecesini aldı. Mezuniyet sonrasında özel sektörde Tekstil Mühendisi olarak görev yaptı. Eğitim hayatından kopmamak için Eğitim ve Yaşam Koçluğu sertifikalarına sahip oldu bu alanda çalışarak 10 yıllık tecrübeye kavuştu. 2021 yılında Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı’nda Yüksek lisans eğitimine başladı.

