

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANS

MANYETİK DUYGUNLUK VE SOĞURMA

ÖZELLİKLERİNİN

ARAŞTIRILMASI

MİKAİL DİREKÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GYTE FİZİK BÖLÜMÜ

GEBZE

OCAK-2009

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

NANO MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANS

**MANYETİK DUYGUNLUK VE SOĞURMA
ÖZELLİKLERİNİN**

ARAŞTIRILMASI

MİKAİL DİREKÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GYTE FİZİK BÖLÜMÜ

DANIŞMAN

PROF. DR. BEKİR AKTAŞ

GEBZE

OCAK-2009



GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JÜRİ ONAY FORMU

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Prof. Dr. Bekir AKTAŞ

ÜYE : Doç. Dr. Bulat RAMAEV

ÜYE : Doç. Dr. Faruk YILMAZ

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **06 / 03 / 2009** tarih ve **2009 / 07** sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 10 / 04 / 2009 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi **Mikail DİREKÇİ**' nin çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/...../..... sayılı kararıyla **Fizik** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: NANO MALZEMELERİN YÜKSEK FREKANS

MANYETİK DUYGUNLUK VE SOĞURMA ÖZELLİKLERİNİN

ARAŞTIRILMASI

YAZAR ADI: MİKAİL DİREKÇİ

Radar soğurucu malzemeler (RSM), sahip oldukları potansiyel uygulama alanlarından dolayı büyük ilgi görmektedirler. Elektromanyetik dalgayı ısıya çevirebilme özelliğine sahip olan ve radar soğurucu manyetik malzeme olarak iyi bilinen ferritler çok geniş alanlarda kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada PMMA, grafit ve Pluronic F87 karışımı içerisinde farklı oranlarda karıştırılan Kobalt Ferrit (CoFe_2O_4) ve Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) karışımından oluşan kompozit malzemelerin manyetik geçirgenlik ve radar soğurma özellikleri 26,4- 34,0 GHz frekans bandı (R bant) aralığında incelenmiştir. Bu ferrit-polimer yapıları ortak çökertme yöntemi ile PMMA içerisinde homojen olarak karıştırılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu numuneler X-Ray Kırınım(XRD) ve Geçişli Elektron Mikroskobu (TEM) ile karakterize edilmiştir. Yapısal ve morfolojik analizden sonra örneklerin manyetik özellikleri Ferromanyetik Rezonans(FMR) yöntemi ile analiz edilmiştir. Numuneler literatürdeki bilinen değerlerine yakın rezonans alanına sahipken, çizgi genişliklerinin çok geniş olduğu görülmüştür. Bunun sebebi yapı içerisinde bulunan moleküllerdeki katyonlar arasındaki çok çeşitli etkileşmeler ve fiziksel olarak karışmış farklı ferrit parçacıklar arası etkileşmelerdir. Bu etkileşmelerin birlikte etkisi ile geniş FMR pikler elde edilmiştir. Çizgi genişliklerinin ve rezonans alanlarının önemli ölçüde sıcaklığa bağlı olduğu bulunmuştur. Sıcaklık azalırken çizgi genişlikleri artarken, rezonans alanları artmaktadır. Ayrıca karışımda Kobalt ferrit miktarı arttıkça yine çizgi genişliğinin arttığı bulunmuştur. Bu çizgi genişliğinin artmasına Kobalt ferrit içerisindeki güçlü antiferromanyetik etkileşmeler yol açmıştır.

Anahtar Kelimeler: RSM, Ferritler, Mikrodalga, Radar, FMR.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: INVESTIGATION OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND ABSORBING PROPERTIES OF NANO MATERIALS AT HIGH FREQUENCY

AUTHOR: MİKAİL DİREKÇİ

Radar absorbing materials (RAM) have attracted great interest due to their potential for applications. The widely used and the well known radar absorbing magnetic particles is the ferrites with property to change electromagnetic radiation energy by thermal energy. In this study, the mixture of Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) and Complex Ferrite ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) with various ratios in PMMA, Graphite and Pluronic F87 are studied by their relative magnetic permeabilities and radar absorbing characteristics between 26.4 and 34.0 GHz frequency band (R-Band). These ferrites obtained by coprecipitation method and dispersed in PMMA homogeneously. These particles characterizations are done by using X-ray Diffraction (XRD) method and Transmission Electron Microscopy (TEM). After structural and morphological analysis, magnetic properties of these ferrites will be analyzed by Ferromagnetic Resonance (FMR) spectroscopy technique. Samples have resonance field values approximately same order with the reported values in the literature; however linewidths of FMR signals have very wide. It is caused by the different magnetic interactions between the cations in the molecular structure and interparticle interactions of different ferrites mixed physically. The combined effect of these interactions may cause FMR spectra with broader linewidths. The peak to peak linewidths and resonance fields found linearly temperature dependent. While the linewidths increasing, resonance fields decrease by decreasing temperature. Also the antiferromagnetic interactions in cobalt ferrite cause the increase in linewidth also by increasing cobalt ferrite amount.

Keywords: RAM, Ferrites, Microwave, Radar, FMR.

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerekleşmesinde araştırma ve laboratuvar alışmalarında ok büyük yardım ve desteğini gördüğüm Fizik Bölüm Başkanı ve Danışmanım **Prof. Dr. Bekir AKTAŞ**' a ve yüksek lisans programım süresince bana verdikleri eğitim ve göstermiş oldukları ilgileri nedeniyle G.Y.T.E Fizik Bölümün' de görevli olan tüm öğretim üyeleri ve asistanlarına teşekkür ederim.

Bu tez alışması **00185.STZ.2007/2 SAN-TEZ** projesi desteğinde gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca tezde kullanılan numunelerin temininde yardımlarını esirgemeyen Dr. **D. Kyung Kim** ve Doç Dr. **Yüksel Köseoęlu**' na teşekkür ederim.

Eęitimim süresince bana hep destek olan ve sabır gösteren aileme sonsuz şükran ve minnettarlığımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. RADAR SOĞURUCU MALZEMELERİN TARİHÇESİ	1
2. TEORİ	4
2.1. SPEKTROSKOPİ NEDİR?	4
2.2. MANYETİK REZONANS	5
2.2.1. Manyetik Rezonans Kavramı	5
2.3. MANYETİK MOMENT	7
2.4. MANYETİK MALZEMELER	8
2.5.1. Diyamanyetizma	9
2.5.2. Paramanyetizma	9
2.5.3. Ferrimanyetizma	10
2.5.4. Antiferromanyetizma	10
2.5.5. Ferromanyetizma	11
2.5. FERROMANYETİK REZONANS	12

2.6. GEÇİŞ HATTI TEORİSİ	16
2.6.1. Geçirgen Yapıların Genel Özellikleri	17
2.6.1.1. TE Dalga Modu	19
2.6.1.2. TM Dalga Modu	21
2.6.1.3. TEM Dalga Modu	22
2.6.2. Serbest Ortam Yansıma Metodu	24
2.6.2.1. Uzak-alan Gereksinimi	24
2.6.2.2. Numune Boyutu	25
2.7. KAYIP MEKANİZMASI	25
2.7.1. Soğurulma Kalınlığı	29
2.8. SAÇILMA PARAMETRESİ	30
2.9. NICOLSON-ROSS-WEIR (NRW) ALGORİTMASI	32
3. DENEYSEL TEKNİK	34
3.1. ELEKTRON SPİN REZONANS	34
3.1.1. Manyetik Alan Kaynağı	35
3.1.2. Mikrodalga Alan Kaynağı	35
3.1.3. ESR Kavitesi	36
3.1.4. Dalga Kılavuzu	37
3.1.5. Modülasyon ve Dedeksiyon Sistemi	37
3.1.6. ESR Spektroskopisindeki Bilgisayar Elemanı	38
3.2. MW SOĞURULMA ÖLÇÜMLERİ	39
3.2.1. Geçiş Hattı Metodu	39
3.2.2. Serbest-Ortam Metodu	39
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR	40
4.1. NUMUNE HAZIRLANIŞI	40
4.1.1. Ortak Çökertme Metodu	40
4.2. XRD ve TEM Analizi	42
4.3. ESR Ölçümleri	43
4.3.1. Oda Sıcaklığındaki	43
4.3.2. Düşük sıcaklık EPR Ölçümleri	45
4.3.2.1. A Numunesi	45
4.3.2.2. B Numunesi	46
4.3.2.3. C Numunesi	47

4.3.2.4. D Numunesi	48
4.3.2.5. E Numunesi	49
4.3.3. Çizgi Genişliği ve Rezonans Alanı	50
4.4. NETWORK ANALİZÖR SOĞURULMA ÖLÇÜMLERİ	53
4.4.1. A Numunesi	54
4.4.2. B Numunesi	55
4.4.3. C Numunesi	56
4.4.4. D Numunesi	57
4.4.5. E Numunesi	58
4.4.6. Tüm Numunelerin Yansıma Kaybı Değerlerinin Kıyaslanması	59
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	62
KAYNAKLAR DİZİNİ	64
ÖZGEÇMİŞ	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ESR	Elektron Spin Rezonans
FMR	Ferromanyetik Rezonans
RF	Radyo Frekans
MD	Mikro Dalga
M	Mıknatıslanma
M_0	Doyum Mıknatıslanması
M_d	Demanyetizasyon Mıknatıslanması
μ	Manyetik Moment
i	Akım
q	Birim Yük
v	Hız
A	Birim Alan
Co	Kobalt
Fe	Demir
j	Açısal Momentum
H_d	Demanyetizasyon Alan
M_d	Demanyetizasyon Mıknatıslanması
ω	Açısal Frekans
γ	Frekans
H_{eff}	Etkin Manyetik Alan
m	Birim Kütle
r	Dönme Eksenine Uzaklık

G	Gauss
kG	Kilo Gauss
Hz	Hertz
GHz	Giga Hertz
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
h	Planck Sabiti
dB	desibel
Ni	Nikel
Cu	Bakır
Zn	Çinko
MHz	Megahertz
Mn	Mangan
H	Manyetik alan
ν	Frekans
B	Manyetik alan
χ	Duygunluk
Fe	Demir
Gd	Gadolinyum
Dy	Dysprosium
Cr	Krom
O	Oksijen
λ	Landau-Lifshitz sönüm sabiti
T_1	Spin-örgü durulma zamanı
T_2	Spin-spin etkileşme sabiti

D	Anten/dalga kılavuzu köşegen uzunluğu
ϵ	Elektrik geçirgenlik
σ	İletkenlik
E	Elektrik alan
Φ	Skalar Potansiyel
H_T	Manyetik Alanın Transverse bileşeni
E_T	Elektrik Alanın Transverse bileşeni
η	Empedans
Z_0	Serbest ortam empedansı
mW	Miliwatt
XRD	X-ray Diffraction
TEM	Tranmission Elektron Microscopy.
PMMA	Poli Metil Metakrilat Polimeri
a.u.	Atomik kütle birimi
O_e	Orsted
RSM	Radar Soğurucu Malzeme
RL	Reflection Loss
EM	Elektromanyetik

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1. Bir nikel kristalinde ferromanyetik domainler.	14
2. Domeinler arasındaki Bloch duvarının yapısı.	15
3. Bir ferromanyetik malzemenin mıknatıslanması: (a) mıknatıslanmamış hal, (b) domain duvar hareketi ile mıknatıslanma, (c) domain dönmesi ile mıknatıslanma.	15
4. Dalga Kılavuzu içindeki EM dalganın Elektrik ve Manyetik alan çizgilerinin gösterilişi.	17
5. TE Modu Dalganın dalga kılavuzu içerisindeki ilerlemesi.	20
6. TM Modu Dalganın dalga kılavuzu içerisindeki ilerlemesi.	21
7. TEM Modu Dalganın Manyetik alan ve Elektrik Alan çizgilerinin birbirine dik (Transverse) olduğunun gösterilişi.	23
8. S-parametreleri katsayıları tanımı.	30
9. ESR Spektrometresinin blok diyagramı.	34
10. TE ₁₀₂ modunda çalışan dikdörtgen kavite.	36
11. Hazırlanan Ni _{0.5} Zn _{0.4} Cu _{0.1} Fe ₂ O Ferritlerin XRD analiz grafiği.	42
12. Hazırlanan Ni _{0.5} Zn _{0.4} Cu _{0.1} Fe ₂ O Ferrit yapısının (a) hazırlanış ve (b) ısıtılma sonrası TEM görüntüsü.	42
13. Oda sıcaklığındaki FMR çizgileri ve Landau-Lifschitz teorisi ile yapılan fitler.	43
14. A-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.	46

15. B-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.	47
16. C-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.	48
17. D-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.	49
18. E-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.	50
19. Sıcaklık- Çizgi genişliği grafiği.	51
20. a) Sıcaklık-Rezonans Alanı grafiği.	
b) Yüksek ve düşük sıcaklıktaki g-değerleri.	52
21.- A-Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için	
(a)- Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.	54
22- B-Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için	
(a)- Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.	55
23- C-Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için	
(a)- Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.	56
24- D Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için	
(a)- Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.	57
25- E Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için	
(a)- Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.	58
26- A,B,C,D,E numunelerinin 26.40-29.25 GHz frekans aralığı için	
ortak Yansıma Kaybı grafiği.	59
27- A,B,C,D,E numunelerinin 29.25-29.75 GHz frekans aralığı için	
ortak Yansıma Kaybı grafiği.	60
28- A,B,C,D,E numunelerinin 29.75-32.00 GHz frekans aralığı için	
ortak Yansıma Kaybı grafiği.	61

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Kompleks Ferrite ve Kobalt Ferrit karışım oranları.	41
4.2. Kompleks Ferrit, Kobalt Ferrit, Pluronic 87 ve Grafit karışım miktarları (gr).	41
4.3. Oda sıcaklığında alınan FMR ölçümlerine ait Teorik fit parametreleri.	45

1.GİRİŞ

1.1.RADAR SOĞURUCU MALZEMELERİN TARİHÇESİ

Radar (Elektromanyetik dalga) soğurucu malzemelerin ticari olarak kullanımı 1950' li yılların başlarında başlamıştır. Aslında bu malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesine ilk olarak 1930' lu yıllarda başlanmış olup ilk Elektromanyetik Dalga Soğurucu malzemenin, Hollanda' lı Naamlooze Vennotschap Machinerreen Firması tarafından 1936' da patenti alınmıştır. Bu soğurucu malzeme çalışma frekansı olarak 2 GHz frekans bandında soğurulma sağlamaktadır. Üretilen bu malzemede enerji soğurucu (güç kaybını sağlayıcı) olarak Siyah Karbon (Black Carbon) ve yüksek dielektrik sabite sahip olan TiO kullanılmıştır.

Sonraki yıllarda Radar soğurucu malzemelerin yaygın olarak kullanılmaya başlaması 2. Dünya savaşı ile birlikte başlamıştır. Almanya ve A.B.D bu malzemeleri geliştirmek amacı ile farklı projeler geliştirmeye başlamışlar. Bu ülkelerde yapılan araştırmalarda tamamen birbirine zıt konular üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Almanya; öncelikli olarak radar kamufleji için uygulanabilir soğurucu malzeme Ar-Ge çalışmalarına, A.B.D ise; Radar performansını artırıcı malzemelerin (EMARSOM 1973) Ar-Ge projelerine hız vermiştir.

Almanya' da üretilen 2 farklı malzeme (MacFarlane 1945; Schade 1945) sualtında algılanabilmeyi ortadan kaldırmak için denizaltı araçlarında kullanılmak amacı ile geliştirilmiştir. İlk malzeme; Wesch malzeme olarak adlandırılmış olup yapı olarak yarı bükülebilir kauçuk içerisine Demir Karbonil (Iron Carbonyl) parçacıkları eklenerek 3 GHz' lik frekans bandında rezonans(soğurulma) tespit edilmiştir (gözlenmiştir). İkinci malzeme; Jaumann soğurucusu olarak çoklu katman yapı şeklinde geliştirilmiştir. Bu tip soğurucu yapılar -20 dB'den daha düşük yansıma katsayı değerlerini geniş bant (2-15 GHz) aralığında normale yakın açılarda göstermektedir. Almanya' da ki tüm bu çalışmalara karşın A.B.D'de; HARP (Halpern- Anti- Radar- Paint) olarak adlandırılan 15- 20 dB seviyesinde yansıma kaybı sağlayan iki çeşit soğurucu malzeme geliştirilmiştir. Bunlardan hava araçları için üretilen versiyonu, MX-410, yüksek etkinlikte dielektrik sabite sahip yapay boya yapısındaki malzemedir. Diğer malzeme ise; gemiler için geliştirilen dayanıklı

kauçuk tutkal yapısına eklenmiş yüksek konsantrasyonda demir parçacıklarının olduğu versiyondur. Bu iki malzemede bant olarak X-Bandı (9.84 GHz) ve 0.07 inch' lik uygulama kalınlığında verimli bir şekilde uygulanmaktadırlar [1].

Zaman içerisinde Radar Soğurucu Malzemeler (RSM) farklı alanlarda kullanılmak üzere farklı kompozit yapıda üretilmiş ve geliştirilmiştir. Bu kullanım alanlarına örnek verilecek olursak; yüksek frekans (GHz) band aralığında mikrodalga radyasyonuna sahip sistemler, iletişim teknolojisinde ve veri işleme amaçlı olarak yaygın olarak kullanılan kablosuz iletişim sistemleri (WLAN: Wireless Local Area Networks, GPS: Global Positioning System, Radar ve mobil telefonlar v.s...) gibi yüksek frekanslı devre cihazlarının yol açtığı elektronik kirliliği azaltma amaçlı uygulamalarda, Elektro manyetik (EM) dalga girişimlerinin yol açtığı bozulmaları önlemek ve EM dalganın enerjisini soğurmasından (ısıya dönüştürmesinden) dolayı askeri amaçlı kullanılan hava araçlarının radar kesit alanlarının azaltılması ve böylece yer savunma radarları tarafından algılanılmasını engellemek amaçlı olarak da çok farklı alanlarda kullanılmaktadır.

Geçmişten günümüze kadar farklı yapıda RSM malzeme üretilmiştir. Bunlar arasında boya içerisine katılan metal tozlar, polimer yada kauçuk yapı içerisine katılan grafit-metal toz kompozitlerinden oluşan sistemler, manyetik metal katkıli spinel ferritler (Ni, Co, Mn) soğurucu malzeme olarak kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmaların ağırlık olarak Spinel Ferritlerden, NiCuZn/ Co ferritlerle ilgili olduğu görülmektedir [2,4]. Spinel ferrit kullanımının amacı yüksek frekanslarda (>10 MHz) manyetik katkı olarak Ni, Co, Mn metallerin geniş bantta elektromanyetik dalga soğurucu özelliğini arttırmalarından dolayıdır. Metal katkılar NiZn ferrit yapıların elektriksel direncini ve manyetik uygunluğunu artırarak elektromanyetik özelliklerini düzenlemek için kullanılırlar. Ayrıca Ferrit-Polimer kompozit yapılar; ağırlık olarak hafif, düşük maliyetli ve uygulanabilirliklerinin kolay olmasından dolayı soğurucu malzeme olarak kullanılmaktadır [3].

Radar soğurucu malzemeler için karakteristik temel uygulanabilirlik gereksinimleri öncelikli olarak; uygulanan frekans aralığı ve aç değelerinde gelen dalgayı mümkün olabildiğince düşük oranda yansıtmalı yani yüksek soğurma özelliği göstermeli, kirlilik ve nem bulundurmamalı, hafif olmalı, hedeflenen frekansta ve uygun kalınlık değelerinde yüksek manyetik uygunluğa ve yüksek elektriksel

dirence sahip ve izin verilen kalınlık değeriinde maksimum güç kaybını sağlamalı, ışıktan zarar görmeyecek dirençli bir yapıya sahip olmalıdır. Ayrıca bir diğeri gereksinim ise son yıllarda yapılan çalışmalarda uzay araçlarında kullanılan RSM'lerin vakum ortamda uygulanabilirlik yönüdür. RSM, yansıtıcı ya da yansıtıcı olmayan yönler içerisinde yansımayı azaltmak için tasarlanırlar. Bu nedenle soğurucu yüzeylerin yapı olarak genellikle dielektrik ve manyetik malzemeler içerirler. Literatürde yapılan çalışmalara baktığımız zaman manyetik malzeme katkılı Feritler (Ni/Co-Zn-Cu) soğurucu malzeme olarak yapılan araştırmalar çokça yer almaktadır [4].

Bilinen manyetik malzemelerin mikrodalga geçirgenlikleri birkaç GHz frekansın üzerine çıkmamaktadır, bu nedenle bu RSM'lerin uygulanabilir frekans band aralığını artırmak için farklı yaklaşımlar yapılmaktadır. Bunlar arasında manyetik malzeme katkılı ferrit yapılar, polimer içerisine katılanmış ferrimanyetler, çoklu katman yapılar v.s...[5] yaklaşımları örnek verebiliriz. İnce filmler bulk (katı) yapılara göre daha yüksek manyetik uygunluğsa sahiptirler. Bu nedenle manyetik uygunluğun sanal kısmının yüksek olması RSM'ler için uygulanabilirlik açısından daha uygundur.

Bu tez çalışmasında ortak çökeltme (coprecipitation) yöntemi ile elde edilmiş olan NiZnCuFeO/CoFeO spinel ferritlerin XRD spektroskopisi ile kristal yapısı, yüzey analizi için TEM (Geçişli Elektron Mikroskobu) kullanıldı. FMR sistemi ile Manyetik Rezonans ölçümü ve 3mm kalınlığında dikdörtgensel yapıdaki ferrite-polimer kompozitinden oluşan planar yapıların Agilent 8364B PNA serisi Vektörel Network Analizörle Yüksek Frekans (26.4-34.0 GHz) bant aralığında Elektromanyetik soğurulma (güç kaybı) ölçümleri yapıldı. Ferrit yapıların yüksek frekans bant aralığında Elektromanyetik dalga ile etkileşmeleri sonucunda Manyetik geçirgenlikleri (μ) nasıl değıştiğı hakkında çıkarımlarda bulunuldu.

2.TEORİ

2.1. SPEKTROSKOPİSİ NEDİR?

Maddenin yapısını (moleküler etkileşim, iyonların ve çekirdeklerin sahip olduğu kuantumlanmış enerji düzeylerini) inceleyen bir yöntem olarak Spektroskopi, farklı iki enerji seviyesi arasındaki geçişe karşı gelen soğurulma enerjisini bir spektral çizgi ya da spektrum olarak tanımlar. Spektroskopide geçiş frekanslarına karşılık gelen spektrumlar gözlemlenir ve her bir spektrumun yeri frekans olarak belirlenir.

Net bir spine sahip olan yüklü parçacıklar bir H manyetik alanın etkisinde kalınca, manyetik moment ile alanın etkileşmesi sonucu uyarılan enerji düzeyi Zeeman etkileşmesi ile ikili durumlara yarılır. Bu durumlar arasındaki geçişlerde $h\nu$ enerjisine sahip yüksek frekanslı bir fotonun enerjisi yüklü parçacık tarafından soğrularak alt enerji durumundan üst enerji durumuna ya da tersinir durumda foton yayarak üst enerji durumundan alt enerji durumuna geçer ve bu olay Manyetik Rezonans olarak adlandırılır [6].

Manyetik Rezonans tekniği, malzemelerin (bulk yapı, toz, kompozit, ince film..vs.) manyetik özelliklerinin araştırılmasında önemli bir yere sahiptir. Bu teknikle manyetik anizotropi, değiş-tokuş parametreleri, mıknatıslanma, yüzey ve hacim anizotropileri hesaplanarak malzemenin yapısı ve karakteristiği hakkında bilgi sahibi oluruz. Manyetik Rezonansta; manyetik alanla etkileşen parçacık atom ise Nükleer Manyetik Rezonans, şayet manyetik alanla etkileşme elektronlarla oluyorsa Elektron Spin Rezonans (ESR) olarak adlandırılır.

Manyetik Rezonansın temelleri ilk olarak Zavoisky tarafından 1945 yılında katı malzemeler üzerinde yaptığı araştırmalarla gerçekleştirildi. Bir sonraki yıl farklı haldeki (katı ve sıvı) maddelerin çekirdeklerindeki Spin Rezonans araştırmaları 1946 yılında Purcell, Torrey ve Pound ve yine Bloch, Hansen ve Packard tarafından gerçekleştirildi.

İlk olarak bir rezonans çizgisinin dinamiğiyle başlayan Deneysel Ferromanyetizma çalışmaları ise daha sonraları 1948 yılında Kittel tarafından ortaya atılan “Birçok rezonans çizgisinden oluşan Ferromanyetik rezonans spektrumunun gözlenebileceği” çalışmaları ile devam etti [7]. 1954 yılında Rado Kittel’in açıkladığı bu spektrumu “Spin Dalga Rezonans” olarak adlandırıldı. Kittel, SDR çalışmalarında yapı olarak ince filmlerin diğer yapılara oranla durağan spin dalgalar için uygun bir ortam olacağını gösterdi.

2.2.MANYETİK REZONANS

2.2.1. Manyetik Rezonans Kavramı

Manyetik Rezonans; manyetik momente ve açısal momentuma sahip manyetik sistemlerde gözlemlenen olaydır. Rezonans; dış bir etkenin, manyetik sistemin doğal frekansı ile uyum içinde olmasını açıklar ve bu frekans durgun dış manyetik alanda manyetik momentin jirokobik presesyonuna karşılık gelir. Atomik spektrumun belirgin frekansları arasındaki benzerliği ve manyetik rezonans frekanslarının tipik olarak radyo frekans bölgesine (çekirdek spinleri için) yahut mikrodalga frekansı bölgesine (elektron spinleri için) düşmesi nedeniyle pek çok defa radyo frekans (RF) spektroskopisi veya mikrodalga (MD) spektroskopisi olarak adlandırılmıştır [8]. Rezonans yönteminin üstünlüğü, incelenen örnekte tümü ile karşılaştırıldığında çok zayıf olabilen bir katkıyı seçip ayırmayı mümkün kılmasıdır. En dikkat çekici örnek ise temel elektronik Ferromanyetizmasına karşın demirin, zayıf para-manyetizma özelliği göstermesidir. Kısacası rezonans; kesin, oldukça ayrıntılı ve başka yollarla elde edilemeyen tipte manyetik bilgi toplanmasını mümkün kılar. Manyetik rezonansın fizik ile bütünleşmesinin en büyük sebebi atomik ölçekteki süreçler hakkında bilgi vermesidir [9]. Burada, açısal momentumu olan manyetik sistemler söz konusudur. Elektron ve çekirdek manyetik rezonansları arasındaki en temel fark, çekirdeksel spin, manyetik moment ve dört kutuplu (quadropol) moment gibi özelliklerinin büyük bir olasılıkla çevreden etkilenmemeleri, buna karşın çok daha büyük fiziksel hacimde olan uyarılmış durumlarını çok daha küçük enerji istemeleri yüzünden çevreye kuvvetle bağlı

olmalarıdır. Bir kristale konulan atom serbest haldeki atomdan tamamen farklı açısal momentum, manyetik moment ve dört kutuplu momente sahip olabilir. Bir atomun katı veya sıvıda fazda olduğu zamanki durumunun, serbest (durağan) olduğu zamankinden çok farklıdır. Bu yüzden bir katı veya sıvı içindeki atomun manyetik rezonans çalışmasında atoma ait özellikleri hakkında yorum yapmak zorlaşabilir. Demir grubu veya nadir toprak elementleri grubu gibi bazı atomlar tamamlanmamış iç tabakalara sahiptir. Hatta iyonlaştırıldıkları zaman bile yine net bir momente sahiptirler. Spin çiftlenişleri yüzünden yalıtkanlar rezonans göstermez. Özel durumlarda genel durumların geçersiz kalmasına rağmen manyetik rezonansın inceleme konusuna giren madde sınıflarını ve koşullarını şöyle sıralayabiliriz:

- a. Demir grubu ve nadir toprak elementleri gibi doldurulmamış iç tabakaları olan geçiş elementlerinin bulunduğu maddeler.
- b. Metallerdeki iletkenlik elektronları.
- c. Ferro ve ferrimanyetler.
- d. Yalıtkanlarda elektron veya boşluklar yakalayabilen bozukluklar. Bir alkali halojenden çıkarılan halojenin yerinde yakalanan bir elektron (F merkezi) veya yarı iletkenlerde donör ve kabul edici bölgeler[8].

Kuantum mekaniğinde rezonans olayını daha kolay açıklayabilmek için örnek olarak, ışık ile maddenin etkileşmesi verilebilir. Bu durumda atom ile elektromanyetik alan birbiri ile kenetlenen iki periyodik sistem olarak düşünülür. Atomların doğal frekansları geçiş frekansları olarak bilinir ve gelen ışığın frekansı da bu frekanslara göre ayarlanabilir. O halde elektromanyetik alanın frekansı, atomun doğal frekansına ayarlandığı zaman, bu kuantum mekaniksel sistem klasik mekanikteki sarkaç sistemi gibi davranır. Yani, ya elektromanyetik alandan atoma enerji aktarılır ya da başlangıçta uyarılmış durumda olan atomdan elektromanyetik alana enerji aktarılır. Bu olaylardan ilkinde enerji soğurulması ve ikincisine de enerji salınması denir. RSM malzemelerde bu iki olay birlikte incelenerek, malzemenin Elektromanyetik (EM) dalga ile etkileşmesi sonucu Yansıma Kaybı (Reflection Loss, RL) hesaplanabilmektedir.

Çekirdek spinlerinin uygulanan manyetik alanla etkileşmelerine benzer

şekilde, elektronların spinlerinin de manyetik alanla etkileşme içinde oldukları bilinmektedir. Ancak bu etkileşmeler enerji bakımından çekirdeklere ait etkileşmelerden yaklaşık 10^3 kez daha büyüktür ve elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesine düşmektedir.

2.3. MANYETİK MOMENT

Kesit alanı A olan bir dairesel sarımdan geçen i akımı, sarım düzlemine dik doğrultuda ve akım şiddeti(i) ile alanın büyüklüğüne bağlı bir manyetik moment oluşturur. Bu manyetik moment;

$$\vec{\mu} = iA\vec{n} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Burada $\vec{n}$ sarım düzlemine dik birim vektörü, $\vec{\mu}$ de manyetik momentini temsil etmektedir. Sabit bir eksen etrafında dönen her yüklü parçacık, bu hareketinden ötürü bir manyetik momente sahip olur. Bu parçacığın yükü q , kütlesi m , dönme eksenine uzaklığı r ve çizgisel hızı v ise;

$$i = \frac{qv}{2\pi r} \text{ ve } A = \pi r^2 \text{ dir.} \quad (2.2)$$

Bu değerler Denklem (2.1) bağıntısında kullanılırsa,

$$\vec{\mu} = \frac{1}{2} qvr\vec{n} \quad (2.3)$$

elde edilir. Dönme eksenine göre açısal momentum

$$\vec{j} = mvr\vec{n} \text{ dir} \quad (2.4)$$

Denklem (2.3) ve (2.4) bağıntıları kullanılarak;

$$\vec{\mu} = \frac{q}{2mj} \text{ (emb)} \quad (2.5)$$

biçiminde yazılabilir. Yani sabit bir eksen etrafında dönen her yüklü parçacığın açısal momentumuna bir manyetik moment karşı gelir. Yüklü bir parçacığın açısal momentumu onun manyetik momenti ile orantılıdır. Bu orantı katsayısına jiromanyetik oran denir ve

$$\gamma = \frac{q}{2mc} \quad (\text{emb}) \quad (2.6)$$

ile gösterilir. Böylece eşitlik (2.4) ,

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

2.4. MANYETİK MALZEMELER

Manyetik alan içersine konulduğu zaman manyetize olan malzemeler manyetik malzeme olarak tanımlanır. Bu mıknatıslanma malzemedan malzemeye farklılık arz etmekle birlikte az ya da çok olabilir. Malzemenin birim hacmindeki toplam manyetik momenti, manyetik moment yoğunluğu olarak adlandırılır. Manyetik moment yoğunluğu $\vec{M}$ ile gösterilir. Manyetik alan büyüklüğünü gösteren bir diğer büyüklük $\vec{B}$ ile gösterilen manyetik indüksiyondur. $\vec{B}$ ile $\vec{M}$ arasında;

$$\vec{B} = \vec{M} + \mu_0 \vec{H} \quad (2.8)$$

ile gösterilir. Manyetik moment M ile manyetik alan H arasındaki bağıntı ise;

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2.9)$$

ifadesi ile verilir. Burada χ manyetik duygunluk (alınanlık) olarak adlandırılır. Alınanlığı μ_0 cinsinden ifade edebiliriz. Bu büyüklüğe ‘Relative (görelî)

alınanlık' denir ve manyetik alınganlığın, boşluğun manyetik geçirgenliğine oranı olarak tanımlanır. Göreli alınganlık aynı zamanda manyetik alanın bir fonksiyonudur. Malzemelerin manyetik özelliklerinin gerçek kaynağını, elektronların spin ve orbital hareketleri oluşturur. Bu hareketler sonucunda manyetik momente sahip atomlara manyetik atomlar denir. Beş temel yapıda manyetik davranışlar gözlenmiştir. Bunlar sırasıyla; Diyamanyetizma, Paramanyetizma, Ferrimanyetizma, Antiferromanyetizma, Ferromanyetizma'dır [11].

2.4.1. Diyamanyetizma

Zayıf bir manyetizma çeşididir. Her ne kadar böyle manyetiklerde, bir dış alan yokluğunda orbit ve spin manyetik momentleri birbirini sıfırlasa da uygulanan bir dış alan spin momentlerinin hafifçe orbital momentlerini geçmesini sağlayacak ve uygulanan B manyetik alana karşı koyacak küçük net bir manyetik momente sebep olacaktır. Böylece diyamanyetik bir örnek çok kuvvetli bir çubuk mıknatısın herhangi bir ucu yakınına konulacak olursa itilecektir. Bu etki 1846 yılında Michael Faraday tarafından bulunmuştur. Faraday çalışma yaptığı örneklerinde güçlü bir diyamanyetizma olan Bizmut'u kullanmıştı [12]. Diyamanyetizma, elektronların orbital hareketlerinden oluşur. Manyetizasyon yönü uygulanan manyetik alana ters yöndedir. Yani alınganlık negatiftir ve göreli (relative) alınganlık 10^{-5} civarındadır. Diyamanyetik maddeler bir mıknatısa yaklaştırılınca mıknatıs tarafından itilir, bir diğer ifade ile manyetik alanları zayıflatırlar. Bakır (Cu), Kurşun (Pb), Bizmut (Bi), Karbon (C), Gümüş (Ag), Cıva (Hg) ... Diyamanyetiklere örnek verilebilir.

2.4.2. Paramanyetizma

Manyetizasyon, M, manyetik alan ile orantılıdır. Paramanyetik maddeler mıknatısa yaklaştırıldığında ondan çok az etkilenir, yani içine konduğu manyetik alanı biraz sıkılaştırmış olur. Platin (Pt), Uranyum (U), Manganez (Mn), Alüminyum (Al), Sodyum (Na) ve Oksijen (O) paramanyetik maddelere örnektir. 1895 yılında Pierre Curie Paramanyetizma'nın özelliklerini keşfetti. Paramanyetik maddenin

manyetizasyonu uygulanan manyetik alanla doğru, sıcaklıkla ters orantılıdır. Bu malzemelerde orbit ve spin manyetik momentleri birbirine eşit olmadığından ötürü, herhangi bir alan olmasa da atomun net bir manyetik momenti olmaktadır. Paramanyetik malzemelerin çoğu manyetik atomlar veya manyetik iyonlar içerir ve bu atomların spinleri, ortamdaki manyetik alandan bağımsızdırlar. Alınganlık pozitifdir ve 10^{-3} ve 10^{-5} arasında değerler alır ve ayrıca alınganlık sıcaklıktan bağımsızdır.

2.4.3. Ferrimanyetizma

Neel tarafından, Feritlerin manyetizasyonunu anlatmak üzere ortaya atılmış bir kavramdır. Bu malzemelerde manyetik iyonlar A ve B olmak üzere iki örgü noktasında konuşlanırlar. A örgü noktasındaki manyetik iyon yukarı spin yönelimine, B örgü noktasındaki manyetik iyon aşağı spin yönelimine sahiptir. A ve B noktalarında konuşlanan manyetik iyonların sayıları ve manyetik momentleri farklı olduğundan net bir manyetizasyon oluşur.

2.4.4. Antiferromanyetizma

Paramanyetizma'da olduğu gibi pozitif alınganlığı çok zayıf bir manyetizma türüdür. Antiferromanyetizma'da alınganlık sıcaklık eğrisinde Neel sıcaklığı olarak adlandırılan bir faz(durum) büküm noktası bulunmaktadır. Sıcaklık azaldıkça alınganlık ta azalır. Neel sıcaklığının üzerinde ise sıcaklık arttıkça spinler daha düzenli olmaya başlar ve bu defa da kritik sıcaklık değerinden sonra sıcaklık arttıkça tersinir durumda alınganlık azalır [13]. Bir antiferromanyetikte Neel sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda spinler sıfır net manyetik moment ile anti paralel düzenlenime sahiptirler. Antiferromanyet, ferrimanyetin özel bir halidir [14].

2.4.5. Ferromanyetizma

Ferromanyetik malzemeler, bir dış manyetik alanın bulunmaması halinde bile var olan, yani kendiliğinden oluşmuş net bir manyetik momente sahip olan malzemelerdir [15]. Bu manyetik momentin oluşumu, elektron spinlerinin düzenli yönelimine bağlı olarak manyetik momentlerin uyumlu bir şekilde yerleşmiş olduklarını gösterir. Spinler birbirleri ile güçlü iç etkileşmeleri nedeniyle paralel durumdadırlar. Sıcaklık arttıkça gelişi güzel hale gelmeye başlar ve Curie sıcaklık noktası(malzemedeki malzemeye değişiklik gösterir) üzerinde malzeme Paramanyetik bir malzeme gibi davranmaya başlar. Manyetizasyon eğrisi ve sabit bir manyetizasyon miktarı, ferromanyetik ve ferrimanyetik malzemelerin önemli özellikleridir [13]. Ferromanyetik davranış gösteren malzemeler Demir (Fe), Kobalt (Co), Nikel (Ni) gibi geçiş metalleri ve geçiş ya da nadir toprak elementleri içeren alaşımlardır. Uygun şartlar sağlandığında Gd ve Dy gibi nadir toprak elementleri ve yalıtkan geçiş metal oksit olan CrO_2 ferromanyetik özellik göstermektedir.

Ferromanyetizma da her birinin büyüklüğü μ olan kalıcı atomik dipollerin bir düzen içine girmesi, çiftlenmemiş elektronlara sahip olan atomlardan kaynaklanır. Klasik bir yaklaşımla, spinleri aynı yönde yönlendirmek için çok düşük sıcaklıklarda bile yüksek manyetik alanlara ihtiyaç vardır. Yani spinler arası etkileşme manyetik olmaktan çok elektrostatik temele dayanmaktadır. İşte bu etkileşmeye değiş-tokuş (exchange) etkileşmesi denir. Ferromanyetizmanın karakteristik özelliği manyetik alana konulan bu tür maddelerin akım yönündeki net mıknatıslanmanın belli bir manyetik alan değerinden sonra sabit olmasıdır. Bu değere doyum mıknatıslanması denir. Bu değer tüm spinlerin paralel durumundaki mıknatıslanmasına karşılık gelir ve her madde için belirleyici bir özellik gösterir.

Ferromanyetizmanın iki ayrı özelliği vardır; yüksek mıknatıslanma ve dış alan değişirken lineerlik olmaması ve histerisin olmasıdır [16].

Ferromanyetik özellik gösteren malzemeler Nikel (Ni), Kobalt (Co), Demir (Fe) ve bunların çeşitli oksitlerinden oluşan malzemelerdir. Ferromanyetik malzemeler güçlü manyetik etkiler gösterirler ve en önemli manyetik malzemelerdir. Bu malzemelerin manyetik geçirgenlikleri sabit değildir ama hem uygulanan alanın

hem de örneğin önceki manyetik geçmişinin bir fonksiyonudur [12].

2.5. FERROMANYETİK REZONANS

Ferromanyetik Rezonans, manyetik malzemelerin manyetik özellikleri hakkında çok önemli bilgiler elde edildiği rezonans çeşididir. Ferromanyetik bir örnek statik bir H dış manyetik alanı içine yerleştirildiği zaman manyetik momentler denge konumları etrafında malzemeye özgü ω_0 iç frekansı ile dönüş hareketi yaparak denge durumuna geçerler. İç dönme frekansı ω_0 yalnız iç manyetik enerjilere değil aynı zamanda dış manyetik alan H 'nin de büyüklüğüne bağlıdır. ω_0 ile H arasındaki ilişkiden faydalanılarak malzeme içersindeki manyetik enerjiler hakkında bilgi sahibi olunabilir [17]. Aynı zamanda dispersiyon bağıntısı olarak adlandırılan ω_0 ile H arasındaki ilişkinin sonucu olarak manyetik enerjileri belirlemek mümkündür.

Ferromanyetizmaya katkıda bulunan çiftlenmemiş elektron spinleri arasındaki değiş-tokuş etkileşme enerjisi, çizgi genişliğine neden olan ve ferromanyetik elektronlarda oldukça kuvvetli olması beklenen di-polar genişlemenin etkisini büyük oranda yok edecek şekilde çizgi daralmasına neden olur. Bu nedenle ferromanyetik rezonans çizgileri beklenenden çok daha keskin bir şekilde ortaya çıkar. H alan doğrultusu etrafında $\omega = 2\pi\nu$ açısal frekansı ile presesyon yapan ferromanyetik örneğin toplam manyetik momenti H_0 'a bağlıdır. Bir H alanı etkisindeki $\vec{\mu}$ manyetik momenti üzerine etki eden dönme momenti (Tork);

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{H} \quad (2.10)$$

şeklinde verilir. Denklem (2.7) ifadesi hatırlanırsa ve bu örnek üzerindeki mıknatıslanmanın homojen olduğu kabul edilirse, Denklem (2.10) bağıntısı kullanılarak makroskopik mıknatıslanma ($\vec{M}$) için hareket denklemi;

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{H}_{et} \quad (2.11)$$

olarak yazılır [18]. Burada H_{et} sadece dışarıdan uygulanan olmayıp, örnek üzerine etkiyen toplam (etkin) alanı göstermektedir.

Yani etkin alan;

$$H_{et} = H_d + H_0 \quad (2.12)$$

Burada H_d , mıknatıslanmayı giderici (demanyetizasyon) alan, H_0 ise dışarıdan uygulanan alanı temsil etmektedir. Denklem (2.11)' e

$$\frac{\lambda}{M_0^2} M \times (M \times H) \quad (2.13)$$

Landau-Lifschitz tipi sönümü gösteren ifade eklenerek sönüm etkisi işin içine sokulabilir. Dolayısıyla hareket denklemini

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dM}{dt} = M \times H_{et} - \frac{M_{x,y}}{T_2} - \frac{M_z - M_0}{T_1} \quad (2.14)$$

şeklinde yazabiliriz.

Burada; λ Landau-Lifschitz sönüm sabiti, T_1 spin-örgü durulma zamanı, T_2 spin-spin etkileşmesi olarak bilinir. Denklem (2.14) ferromanyetik bir maddenin H alanı içindeki mıknatıslanmanın genel dinamik davranışını ifade eder.

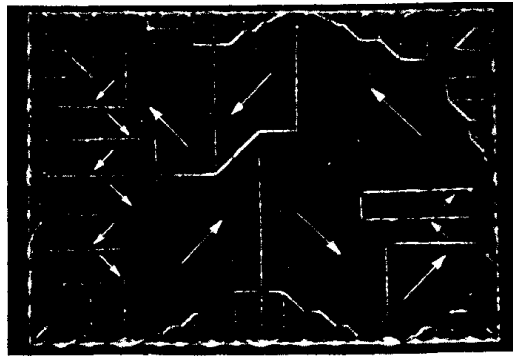
Şimdiye kadar ki tüm bu tanımlamalar domain (atom bölgesi) yapı olmama durumunda ve yeterli kuvvette manyetik alan mevcut iken yapıldı. Şimdi de domain yapılardan ve katkıdan bahsedelim:

Bir ferromanyetik malzeme örneği Curie kritik sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda doyum değerine çok yakın bir değerde mıknatıslandırılabilir. Örneğin, bir demir parçası mıknatıslanmış veya mıknatıslanmamış halde bulunabilir. Bu paradoksa cevap şöyle olacaktır: Bir ferromanyetik malzeme domainlerden oluşur [19] ve her bir domain tamamen mıknatıslanmıştır ama çeşitli domainler rastgele

yönelmiştir ve dolayısıyla makroskopik bir bakış açısıyla bakılırsa mıknatıslanmamış bir görünüm sunulur.

Domainlerin varlığının çıkarımı ilk olarak Weiss tarafından 1907'de sunulmuştur [20], Ferromanyetik malzemelerde atomik dipoller, bölgeler veya domainler içinde kendilerini aynı yöne yönlendirme eğilimindedirler [12]. Ferromanyetik malzemeler atomik seviyede bir uzun-menzil-düzen yapısı sergilerler. Bu yapı domain içindeki elektronların birbiriyle paralel olmasına sebep olur [21]. Bir domainin büyüklüğü değişir ama genellikle milyarlarca atom içerir. Ferromanyetik malzemelerin spin karakterlerinin mikroskobik düzeni, domain olarak adlandırılan manyetik yönelim bölgelerinin oluşumuna sebep olur.

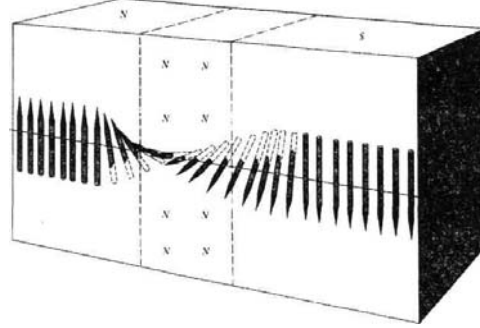
Domainlerin temel uzantısı ferromanyetik malzemelerdeki bireysel domainlerin içinde zaten yüksek derecede bir mıknatıslanmanın bulunmasıdır, ama manyetik alanın kaldırılması durumunda domainler rastgele yöneleceklerdir. Domainlerin bu gösterimleri sadece kavramsaldir ve hassas bir büyüklük ölçüsü veya domainlerin şekillerini veriyor anlamına gelmez. Mıknatıslanma hakkındaki mikroskobik kanıt şunu gösterir; dış manyetik alana tepki gösteren ferromanyetik malzemelerin net mıknatıslanması aslında uygulanan manyetik alana paralel domainlerin büyümesi ile fazlaca oluşabilir [19]. (Şekil 2.)



Şekil-1. Bir nikel kristalinde ferromanyetik domainler [9].

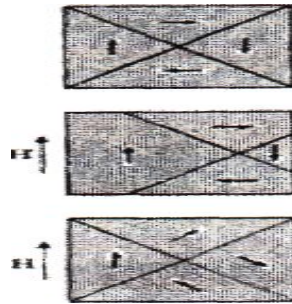
Domainler, domain sınırları boyunca yoğunlaşmış manyetik koloidal asımlarının kullanımı ile görünebilir hale gelebilir. Domain sınırları kutuplanmış ışık ve ayrıca elektron kırınımının kullanımı ile görüntülenebilir. Uygulanan

manyetik alanların etkisi altındaki domain sınır hareketinin gözlenmesi teorik çalışmaların gelişmesi ile bulunmuştur. Domainlerin oluşumu, manyetik katkının serbest enerjiyi azaltıcı katkı yaptığı gösterilmiştir [21].



Şekil 2. Domainler arasındaki Bloch duvarının yapısı. Demirde geçiş bölgesi kalınlığı örgü sabitinin 300 katı kadardır [15].

Bir domainden köşedeki bir taneye geçişte, atomik moment vektörü orijinal halinden yeni yönüne yaklaşık 100 atomun gidişatında kademeli olarak döner. İki domain arasındaki bu bölge domain duvarı olarak adlandırılır. (Şekil-2) Duvar bölgesindeki atomik spin momentleri domain içindeki atomik spin momentine göre hafifçe daha düşük olabilir [20].



Şekil-3. Ferromanyetik malzemenin mıknatıslanması: (a) mıknatıslanmamış hal, (b) domain duvar hareketi ile mıknatıslanma, (c) domain dönmesi ile mıknatıslanma [15].

Ferromanyetik malzemelerdeki mıknatıslanmanın makroskopik özelliği domain yapıların dizilişlerindeki değişmelerle ilgilidir. Uygulanan bir manyetik alanın etkisinden kaynaklanan mıknatıslanmadaki artış bağımsız iki süreç vasıtası ile oluşur:

1-Domainlerin hacmindeki artışla

2-Alan yönüne doğru domain mıknatıslanmasının dönmesi ile.

Bu iki süreç şematik olarak Şekil-3. de gösterilmiştir [20].

Bu olayı daha açık olarak şöyle açıklayabiliriz: Doğal(kendiliğinden) mıknatıslanma kendisini geniş bir ölçekte etkin olarak göstermez. Eğer alan uygulanırsa ve bu alan değişirse o zaman histeris gösterir. Bu durum malzemenin küçük domainlerinin varlığından kaynaklanmaktadır. Her bir küçük domain kesin bir kristal yönünde doyuma, sahip oldukları doğal mıknatıslanmalarıyla katkıda bulunur. Köşedeki domainler farklı yönlere sahiptirler. Domainler bir tek kristalde bile birinci yerde oluşurlar. Çünkü enerji düşmüştür. Fakat her ne kadar küçük domainler daha az enerji ifade etseler de duvar alanı artar ve enerjideki azalmadan dolayı süreç durur.

Artan bir manyetik alan uygulaması şunlara sebep olur;

(a) ters duvar hareketlerine,

(b) orta alanlar için, aynı alanların terslenemez duvar hareketlerine, mıknatıslanmanın kolay yönlerden alan yönüne doğru dönmesine, (buradaki olaylar Barkhausen etkisi adı verilen bir metotla taranabilir).

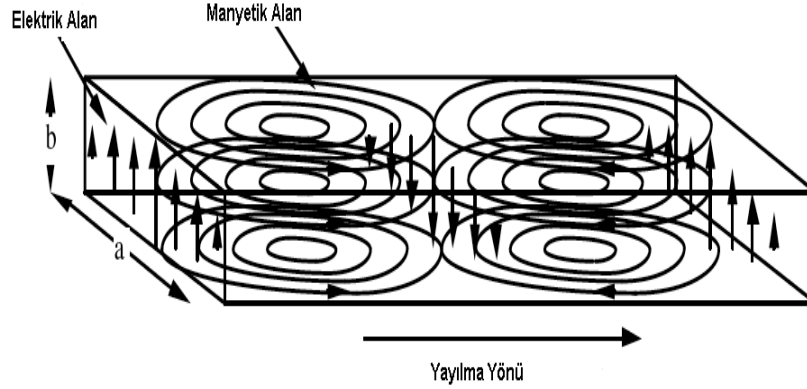
Malzemelerin yüzeylerindeki domain yapıları küçük ferromanyetik tozlar vasıtası ile bir mikroskop altında görünür hale getirilebilir [16].

Isı ve mekanik etki kristalin orijinal mıknatıslanmamış haline geri dönebilmesine yardımcı olacaktır. Sıcaklık yeterince artırılırsa, domainler demanyetize olacaklardır. Bu durumda değiş-tokuş çiftlenim etkileşimi kaybolacaktır ve böylece malzeme ferromanyetik durumdan Paramanyetik durum yapısına geçecektir. Demir için bu geçiş sıcaklığı veya Curie noktası T_c 770 °C dir [12].

2.6. GEÇİŞ HATTI TEORİSİ

RSM' lerin geçirgenlik (soğurulma) özellikleri farklı metotlarla ölçülmektedir. Bu metotlardan biride Geçiş (ilerleme) hattı (Transmission Line) teori yaklaşımıdır. Dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen Elektromanyetik Dalga (EM)' nin Elektrik Alan ve Manyetik Alan bileşenleri Şekil 4.' te gösterildiği gibidir. Dalga

kılavuzu içerisinde ilerleyen EM dalga farklı modlarda ilerler. Bunlar TE Mod, TM Mod ve TEM mod olarak adlandırılır. İlerleyen sayfalarda bu EM dalga modları hakkında daha detaylı olarak değinilecektir.



Şekil 4. Dalga Kılavuzu içerisindeki EM dalganın Elektrik ve Manyetik alan çizgilerinin gösterilişi.

Bu teoride ortamın geçirgenlik yapısını ifade etmek için eşdeğer devreler ve bu devrelere ait ortamda ilerleyen Elektromanyetik (EM) dalganın aynı ortamda sahip olduğu eşdeğer voltaj ve akım değerleri yardımı ile yapıların geçirgenlikleri hakkında fikir sahibi olabiliriz.

2.6.1. Geçirgen Yapıların Genel Özellikleri

Elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu olarak genellikle silindirik yapılar tercih edilir. Bunun nedeni, geçirgen malzeme yapıların kesit alanlarının z-ekseni doğrultusunda değişmeyecek olmasıdır. Geçirgen yapılarda, elektromanyetik dalganın yayılımını (ilerlemesini) Maxwell Denklemleri ile analiz edebiliriz.

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.16)$$

$$\nabla \times H = \frac{\delta D}{\delta t} + J \quad (2.17)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\delta B}{\delta t} \quad (2.18)$$

$$D = \varepsilon E = (\varepsilon^2 - j\varepsilon^{22})E \quad (2.19)$$

$$B = \mu H = (\mu^2 - j\mu^{22})H \quad (2.20)$$

$$J = \sigma E \quad (2.21)$$

Maxwell denklemleri yardımı ile elektrik alan ve manyetik alan dalga denklemlerini

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (2.23)$$

Geçirgen yapılı malzemelerde, elektromanyetik dalga “Transverse” bileşenlerine (E_t ve H_t) ve eksen bileşenlerine (E_z ve H_z) ayrılır.

$$E = E_t + E_z \quad (2.24)$$

$$H = H_t + H_z \quad (2.25)$$

Ayrıca ∇ operatörünü de “ Transverse” ve Eksen bileşenlerine uygulayabiliriz. Bu durumda;

$$\nabla = \nabla_t + \nabla_z \quad (2.26)$$

$$\nabla_z = \hat{z} \frac{\delta}{\delta z} \quad (2.27)$$

$$\nabla_T = \hat{z} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} \quad \text{Dikdörtgensel koordinatlar} \quad (2.28)$$

$$\nabla_T = \hat{r} \frac{\partial}{\partial r} + \phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \quad \text{Silindirik koordinatlar} \quad (2.29)$$

Burada z, x, y, r ve Q bağlı bulundukları eksenlere ait birim vektörleri.

Denklemler (2.22) ve (2.29) yardımı ile metalik dalga kılavuzları için Elektromanyetik dalganın yayılma (ilerleme) denklemlerini yazacak olursak

$$(k^2 - k_z^2)H_T = -j\omega\epsilon\hat{z}X\nabla_T E_z - jk_z\nabla_T E_z \quad (2.30)$$

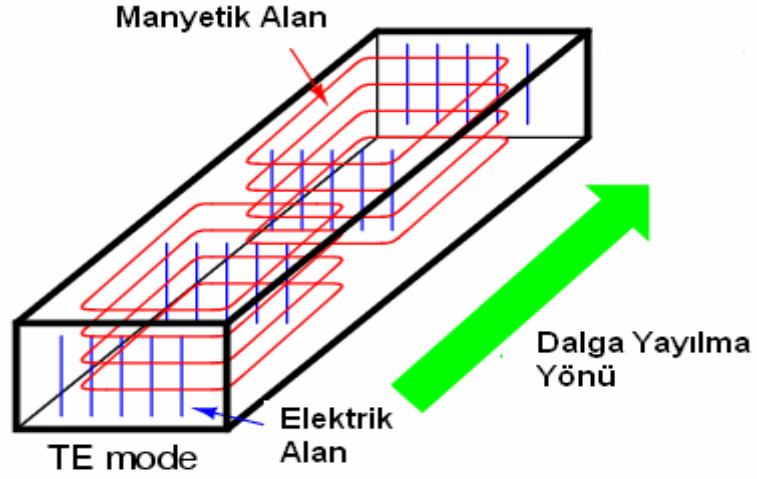
$$(k^2 - k_z^2)E_T = -j\omega\mu\hat{z}X\nabla_T H_z - jk_z\nabla_T E_z \quad (2.31)$$

Burada k_z : Z- doğrultusundaki dalga sayısı

Denklem (2.30) ve (2.31) , “Transverse” ve eksen alan bileşenleri arasındaki ilişkiyi gösterir. Şayet E_z ve H_z bilinirse, Elektromanyetik dalganın diğer bileşenleri hesaplanabilir. E_z ve H_z ’ nin özel değerlerine bağlı olarak, 3 çeşit Elektromanyetik dalga bulunmaktadır.

2.6.1.1. TE Dalga Modu

Şayet $E_z=0$, bu durumda Elektromanyetik dalga “ Transverse Elektrik (TE) Dalga ya da H dalga olarak adlandırılır. Aşağıdaki Şekil 5.’ te TE Modu dalganın, dalga kılavuzu içerisinde ilerlerken sahip olduğu Elektrik Alan ve Manyetik Alan bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 5. TE Modu Dalganın dalga kılavuzu içerisindeki ilerlemesi.

TE modu dalga ($E_z=0$) için denklem (2.30) ve (2.31)' yi tekrar düzenleyecek olursak

$$H_T = -\frac{jk_z}{k^2 - k_z^2} \nabla_T H_z \quad (2.32)$$

$$E_T = \frac{jw\mu}{k^2 - k_z^2} \hat{z} \nabla_T H_z = -\frac{w\mu}{k_z} \hat{z} \nabla_T H_T \quad (2.33)$$

biçiminde ifade edilir. Denklem (2.33) bize E_t , H_t ve Z' nin birbirlerine dik olduğunu gösterir. Şayet TE Modu dalganın empedansını

$$\eta_{TE} = \frac{w\mu}{k_z} \quad (2.34)$$

olarak tanımlanır. Denklem (2.33)'ü tekrardan düzenlediğimizde

$$E_T = -\eta_{TE} \hat{z} \nabla_T H_T \quad (2.35)$$

elde ederiz.

TE modu dalga için Dalga Empedansını;

$$\eta_{TE} = \frac{w\sqrt{\varepsilon\mu}}{k_z} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{k}{k_z} \eta \quad (2.36)$$

Burada n, düzlemsel dalganın dalga empedansı ;

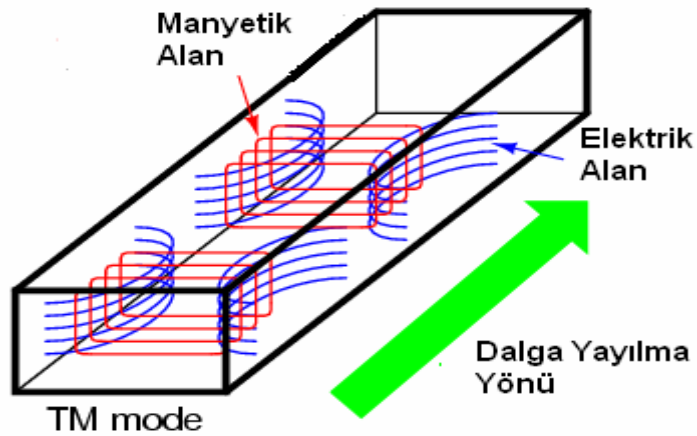
$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (2.37)$$

Dalga sayısı, k ;

$$k = w\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (2.38)$$

2.6.1.2. TM Dalga Modu

Şayet $H_z=0$ olursa, Elektromanyetik dalga “Transverse” manyetik (TM) dalga ya da E dalga olarak adlandırılır. Aşağıda Şekil 6.’ da TM modu dalganın dalga kılavuzu içerisinde ilerlerken sahip olduğu Elektrik alan ve Manyetik alan çizgileri gösterilmektedir.



Şekil 6. TM Modu Dalganın dalga kılavuzu içerisindeki ilerlemesi.

TM Dalga Modu ($H_z=0$) için, Denklem (2.30) ve (2.31)' i tekrardan düzenleyecek olursak

$$E_T = \frac{jk_z}{k^2 - k_z^2} \nabla_T E_z \quad (2.39)$$

$$H_T = -\frac{jw\mu}{k^2 - k_z^2} \hat{z} \times \nabla_T E_z = \frac{w\epsilon}{k_z} \hat{z} \times E_T \quad (2.40)$$

Denklem (2.40)' ı incelediğimizde E_t , H_t ve Z' nin birbirine dik olduğunu görürüz. Ayrıca, TM Dalga Modu' nun dalga empedansı;

$$\eta_{TM} = \frac{k_z}{w\epsilon} \quad (2.41)$$

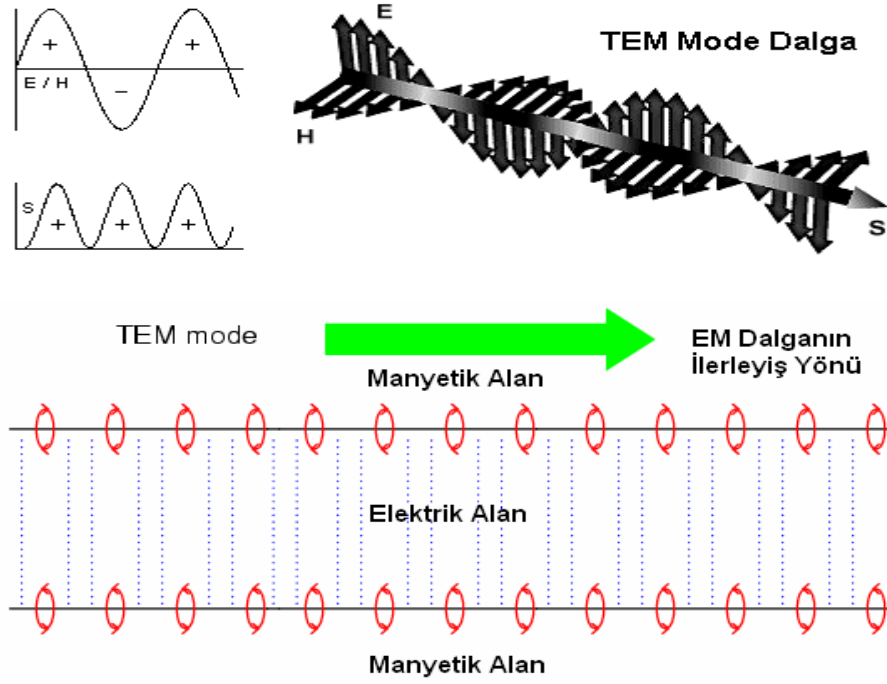
Benzer şekilde, TM modu dalganın, dalga empedansı;

$$\eta_{TM} = \frac{k_z}{k} \eta \quad (2.42)$$

olarak tanımlayabiliriz.

2.6.1.3. TEM Dalga Modu

Şayet $E_z = 0$ ve $H_z = 0$, bu durumda Elektromanyetik dalga “Transverse” Elektromanyetik (TEM) dalga olarak adlandırılır. TEM Modu dalganın Transverse Manyetik alan ve Elektrik alan çizgileri Şekil 7.' de gösterilmiştir.



Şekil 7. TEM Modu Dalganın Manyetik alan ve Elektrik Alan çizgilerinin birbirine dik (Transverse) olduğunun gösterilişi.

TEM Modu Dalga ($E_z = H_z = 0$) için Denklem (2.30) ve (2.31)' i tekrardan düzenleyecek olursak

$$\begin{aligned}
 (k^2 - k_z^2)H_T &= 0 \\
 (k^2 - k_z^2)E_T &= 0 \\
 H_T &\neq 0 \\
 E_T &\neq 0
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

elde ederiz. Burada H_t ve E_t sıfırdan farklı olmak üzere

$$\begin{aligned}
 (k^2 - k_z^2) &= 0 \\
 k &= k_z
 \end{aligned}
 \tag{2.44}$$

Denklem (2.44), Z eksenı doğrultusunda ilerleyen TEM Modu Dalga' nın dalga sayısının, düzlem dalganın dalga sayısına eşit olduğunu göstermektedir. Ayrıca TEM Modu Dalga' nın dalga empedansının, düzlemsel dalganın dalga empedansına eşit olduğu görülür.

$$\eta_{TEM} = \eta \quad (2.45)$$

Ayrıca denklem (2.43)' te E_t , H_t ve Z nin birbirlerine dik olduğunu gösterir.

Sonuç olarak; TEM Modu Dalganın E_t bileşeninin, geçirgen yapıya sahip malzemelerin ara kesitindeki değerinin skalar potansiyel ile

$$E_T = -\nabla_T \Phi \quad (2.46)$$

tanımlanır [22].

2.7. SERBEST ORTAM YANSIMA METODU

Radar Soğurucu Malzemelerin (RSM) karakterizasyonlarında kullanılan metotlardan birisi SERBEST-ORTAM METODU' dur. Elektrik ve manyetik geçirgenliğine sahip malzemelerde ölçüm yapılacak bant aralığında, mikrodalga sinyalinin dalga boyu ile ölçüm yapılacak olan malzemenin boyutları arasındaki ilişki büyük önem arz etmektedir. Düzgün ve hatasız bir ölçüm, deney düzeneklerinin ve ölçüm parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile olur. Serbest ortam metodu ölçümlerinde, ölçüm sonuçlarına etki eden parametreleri; Uzak-Alan Gereksinimi, numune büyüklüğü ve ölçüm sistemi olarak tanımlanabilir.

2.7.1. Uzak-Alan Gereksinimi

Serbest-Ortam ölçümünde, anten ya da dalga kılavuzundan yayılan düzlemsel dalga ile karakterize edilecek olan örneğin etkileşimi (girişim, kırınım, yansıma...vs.) büyük önem taşır. Antenle numune arasındaki uzaklığın (d) bağlı koşulu;

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.47)$$

olmalıdır.

Burada λ ; EM dalganın dalga boyu,

D; Anten aralığının en büyük değeridir.

Şayet antenimiz dairesel bir yapıya sahipse; burada “D” antenimizin dış yüzeydeki en büyük çapı, Dikdörtgensel yapıya sahip antenlerde köşegen uzunluğu olarak tanımlanır. Denklem (2.47) deki bağıl koşul sağlandığı zaman, serbest-ortam dalga için düzgün geçiş hattı olarak katkı sağlar. Çoğu ölçüm düzeneklerinde yukarıdaki bağıl koşul ile ortak-eksen (Co-axial) yansıma ölçümleri de Serbest-Ortamda elde edilebilir.

2.7.2. Numune Boyutu

Serbest-Ortam (Free-Space) metodu kullanılarak düzgün yüzeye sahip numuneler için yapılacak olan Elektromanyetik dalga soğurulma ölçümlerinde, numune boyutu kullanılan EM dalganın dalga boyundan çok küçük ise numunenin EM dalgaya vereceği yanıt dalga-parçacık etkileşmesine benzer. Bu nedenle etkin, anlamlı bir ölçüm sonucu almak için numune boyutu kullanılan EM dalga boyundan çok büyük olması gereklidir. Hatta EM dalganın numuneden saçılma etkisini azaltmak için numune boyutu dalga boyundan 2 kat daha büyük olmalıdır.

2.8. KAYIP MEKANİZMASI

Radar Soğurucu Malzemeler kendi içerisinden geçen ya da etkileşmede bulunan elektromanyetik dalganın gücünü zayıflatırlar. Bu zayıflatma özelliğini belirleyen parametreler kırılma indisi (η), etkin elektrik geçirgenlik (ϵ_r) ya da etkin manyetik geçirgenlik (μ_r)' dir. Bu parametreler karmaşık sayılardır. Etkin elektrik geçirgenliğin ve etkin manyetik geçirgenliğin reel kısmı, malzeme içerisinde ilerleyen dalganın sahip olduğu enerjiyi, sanal kısmı ise malzeme içerisinde

soğurulma kaybını ifade eder. Fiziksel olarak, açıklayacak olursak, soğurulma mekanizmasında malzeme içerisindeki bu güç kaybı ısıya dönüşür.

Dielektrik ya da ferroelektrik malzemeler manyetik alana maruz bırakıldıklarında, elektromanyetik dalganın gücünde azalma olur. Mühendislik uygulamalarında sadece toplam soğurulma kaybına bakılır, bu nedenle temelde farklı kayıp mekanizmaları, normalize edilmiş olan karmaşık elektrik geçirgenlik (ϵ_r) ve manyetik geçirgenlik değerleri (μ_r) ile ifade edilir.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r'' \quad (2.48)$$

$$\mu_r = \mu_r' + j \mu_r'' \quad (2.49)$$

Bu iki eşitlikte de, reel kısımlar mekanizmadaki depolanan enerjiyi, kompleks kısımlar ise malzeme içerisinde kaybolan enerji olarak tanımlanır. Literatürde tanımlanan bir diğer terim ise Kayıp Tanjantı (Loss Tangent)' dır. Malzemenin elektrik ve manyetik kayıp tanjantı sırasıyla;

$$\tan \delta_\epsilon = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2.50)$$

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (2.51)$$

olarak ifade edilir.

Denklem (2.48) ve (2.49)' i polar formda ifade edecek olursak

$$\epsilon_r = |\epsilon_r| e^{j\delta_\epsilon} \quad (2.52)$$

$$\mu_r = |\mu_r| e^{j\delta_\mu} \quad (2.53)$$

Serbest ortam kayıp RSM malzeme arasındaki kırılma indisi (η) ;

$$\eta = \frac{k}{k_0} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.54)$$

Burada k ve $k_0 = 2\pi f \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ifadeleri sırasıyla RSM yapısının ve serbest ortamın dalga sayısıdır.

Serbest ortam empedansın (Z_0) $Z_0 = 120\pi$ olması durumunda, RSM malzemenin kendine özgü empedansı, Z ,

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (\epsilon_r \neq 1 \text{ ve/veya } \mu_r \neq 1) \quad (2.55)$$

Normal kırınım yani RSM üzerine 90° ' lik açı ile gönderilen elektromanyetik dalganın malzeme yüzeyindeki Yansıma katsayısı, R ;

$$|R| = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\frac{Z}{Z_0} - 1}{\frac{Z}{Z_0} + 1} \quad (2.56)$$

Birçok uygulamada metal üzerine “ d ” kalınlığında sürülmüş/kaplanmış dielektrik soğurucu malzemenin normalize edilmiş giriş empedansı (normal açıdaki kırılma için)

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh (-jk_0 d \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) \quad (2.57)$$

Yalnız çoğu durumda RSM karakterizasyonunda yansıma katsayısının decibel (dB) türünden şiddetine bakılır[10]. Bu nedenle yansıma katsayısı şiddeti

$$|R| \text{ (dB)} = 20 \log |R| \quad (2.58)$$

Ayrıca malzemelerin yansıma katsayısının faz açısı bazı düşük band ölçümlerinde önemlidir. RSM' lerin üretiminde ve tasarımında ön-yüz yansıma katsayısı ve birim kalınlığa bağlı güç kaybı ortak rol oynar. Şayet düşük yansıma oranı isteniyorsa, malzeme kalınlığı (d), $d \geq \frac{\lambda}{4}$ koşulunu sağlamalıdır. Genellikle

hedeflenen güç kaybı ve düşük yansıma değerleri için çok katmanlı yapılar (multi-layers) kullanılır. Bu çok katmanlı yapılar geniş-bantta daha verimli çalışması için farklı empedans değerlerine ya da frekans dağılımına sahip elektriksel (ϵ) ve / veya manyetik geçirgenlik (μ) parametrelerine sahip katmanlar kullanılır.

Farklı karakteristik empedansa sahip iki katmanlı RSM' ler için yansıma katsayısı şiddeti

$$R = 20 \cdot \log \left[\frac{(Z_{in} - Z_0)}{(Z_{in} + Z_0)} \right] \quad (2.59)$$

$$Z_{in} = [Z_1 \tanh(\gamma_1 d_1) + Z_2 \tanh(\gamma_2 d_2)] / [1 + \frac{Z_1}{Z_2} \tanh(\gamma_1 d_1) \tanh(\gamma_2 d_2)] \quad (2.60)$$

Burada Z_{in} = Soğurucu yüzeyin giriş Empedansı

Z_0 = Serbest ortam Karakteristik Empedansı

Z_1 = 1. Katmanın Karakteristik Empedansı

Z_2 = 2. Katmanın Karakteristik Empedansı

γ_1 = 1. Katmanın Yayılma Sabiti

γ_2 = 2. Katmanın Yayılma sabiti

d_1 = 1. Katmanın Kalınlığı

d_2 = 2. Katmanın Kalınlığı

Yüksek frekanslarda metalik manyetik malzemeler yüksek doyum mıknatıslanmasına ve Snoek Limitine sahiptir. Sonuç olarak karmaşık manyetik duygunluk (μ_r) değerleri bu yüksek frekans aralıklarında yüksektir. Bu yüzden metalik manyetik malzemelerle katkılanmış ince kalınlıkta EM dalga soğurucu malzeme yapmak daha uygun ve mümkündür. Ayrıca E.M dalganın indüklediği

Eddy akımı sayesinde soğurucu malzemelerin mıknatıslanması azalır. En genel manada RSM malzemelerdeki Yansıma Kaybı (Reflection Loss), RL,

$$RL = 20 \log \left[\frac{(Z_{in} - Z_0)}{(Z_{in} + Z_0)} \right] \quad (2.61)$$

Malzemenin karakteristik Empedansı (Z_{in})

$$Z_{in} = Z_0 (\mu_r / \epsilon_r)^{1/2} \tanh \left[j(2\pi f d / C) (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \right] \quad (2.62)$$

Burada μ_r : Etkin manyetik duygunluk

ϵ_r : Etkin dielektrik geçirgenlik

f: Serbest-ortamda ilerleyen E:M dalganın frekansı

d: Malzeme kalınlığı

C: Işık hızı (3×10^8 m/s)

Z_0 : Havanın empedansı

d: Soğurucu malzemenin kalınlığı

şeklinde tanımlanır.

2.8.1. Soğurulma Kalınlığı

Manyetik malzeme katkılı mikrodalga soğurucularda soğurma kalınlığı ile manyetik kayıp (μ'') arasındaki bağıntı;

$$D_m = C / (2\pi f_m \mu_r'') \quad (2.63)$$

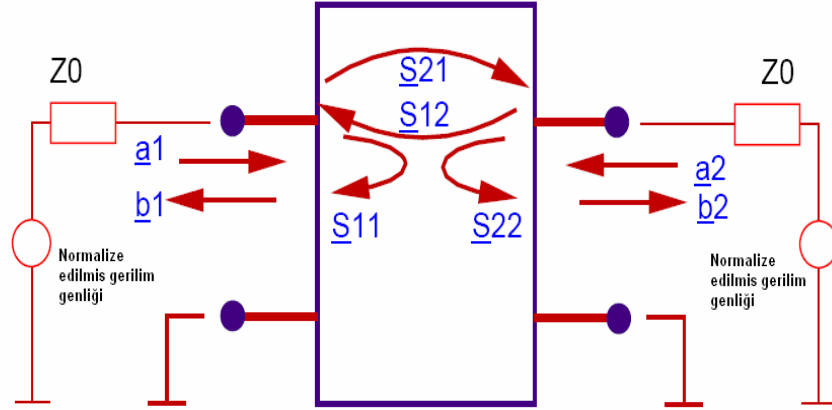
Burada C: Işık Hızı

f_m : Serbest ortamda ilerleme frekansı

μ_r'' : Etkin manyetik duygunluk sanal kısmıdır

2.9. SAÇILMA PARAMETRESİ (S-PARAMETER)

Network analizörü, analog devreleri analiz etmek için kullanılan en önemli araçlardan biridir. Mikrodalga mühendisliğinde network analizörler malzeme karakterizasyonu, devre/devre elemanları ve sistem analizlerinde sıkça kullanılmaktadır. Analog devreyi analiz etmek için, devreye gönderilen sinyallerin genliğini, geçiş ve yansıma katsayılarının faz değişimleri yardımı sayesinde devrenin tüm karakteristiğini gösterir. Network analizörlerde tüm bu karakteristikleri elde etmemizi sağlayan parametreler S-parametresi (Scattering Parameter)'dir.



Şekil 8. S-parametreleri katsayıları tanımı.

Şekil 8.' de görüldüğü gibi, kurulu olan bir devreye bir ağın verdiği cevaplar, giriş ve çıkış sinyalleri ile tanımlanır. Port 1 ve Port 2' de ki giriş sinyalleri sırasıyla a_1 ve a_2 parametresi ile aynı Port' lardaki çıkış sinyalleri ise b_1 ve b_2 parametreleri ile tanımlanır. Bu parametreler aynı zamanda voltaj ya da akım cinsinden de tanımlanabilir.

Giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki bağıntı “ Saçılma Parametresi [S] ” olarak tanımlanır. Bir ağ üzerindeki çıkış sinyali parametresini, Saçılma [S] parametresi ve giriş sinyali parametresi türünden yazacak olursak;

$$[b] = [S][a] \quad (2.64)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada $[a] = [a_1, a_2]^T$, $[b] = [b_1, b_2]^T$ ve

Saçılma matriksi $[S]$;

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

şeklinde tanımlanır. Saçılma parametresinin açılımını yazacak olursak,

$$S_{ij}, \text{ Şayet } a_i = 0 \text{ (} i \neq j \text{)},$$

Denklem (2.64)' ü kullanarak,

$$S_{jj} = \frac{b_j}{a_j} \quad j = (1, 2) \quad (2.66)$$

$$S_{ij} = \frac{b_i}{a_j} \quad (i \neq j); (i = 1, 2; j = 1, 2) \quad (2.67)$$

Denklem (2.66) ve (2.67)' de ifade edildiği üzere Saçılma parametresi matriksi elemanlarının “ i ve j ” değişkenleri kaynaktan çıkan sinyali ve test edilecek yapıya ait Port bağlantılarını ifade etmektedir. En genel manada Yansıma (Γ) ve Geçiş (T) katsayısının Saçılma parametresi türünden ifade edecek olursak;

Yansıma Katsayısı (Γ)

$$\Gamma_i = S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} \quad (2.68)$$

Ya da

$$\Gamma_j = S_{jj} = \frac{b_j}{a_j} \quad (2.69)$$

Geçiş Katsayısı (T) ;

$$T_{j \rightarrow i} = S_{ij} = \frac{a_i}{a_j} \quad (2.70)$$

biçiminde yazılır.

2.10. NICOLSON-ROSS-WEIR (NRW) ALGORİTMASI

RSM karakterizasyonlarında S-parametreleri yardımı ile etkin elektrik geçirgenlik ve etkin manyetik geçirgenlik sabitlerini hesaplamak için farklı algoritmalar kullanılır. Bunlardan en tanınmış olanı NRW algoritmasıdır. Nicolson ve Ross (1970) ve Weir (1974) S_{11} ve S_{21} parametrelerini kullanarak, dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik hesaplamaları için yeni denklemler elde ettiler. Bu algoritmalar Nicolson-Ross-Weir (NRW) algoritması olarak literatüre girdi. NRW algoritmasında, yansıma ve geçiş denklemleri S_{11} ve S_{21} parametreleri ile yeniden düzenlenmiş ve böylelikle Yansıma Katsayısı, R,

$$R = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2.71)$$

$$K = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2) + 1}{2S_{11}} \quad (2.72)$$

Denklem (2.71)' de (+) ya da (-) işaretin belirlenmesi $|R| \leq 1$ koşulu ile belirlenir.

Geçiş katsayısı, T,

$$T = \frac{(S_{11} - S_{21}) - R}{1 - (S_{11} - S_{21})R} \quad (2.73)$$

Böylelikle dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik yeniden tanımlanacak olursa;

$$\mu_r = \frac{1 + R}{(1 - R) \sqrt{(1/\epsilon_r^2) - (1/\epsilon_0^2)}} \quad (2.74)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu r [(1/\lambda_c^2) - (1/\lambda^2)]} \quad (2.75)$$

$$\frac{1}{\lambda^2} = -\left[\frac{1}{2\pi D} \ln(1/T)\right]^2 \quad (2.76)$$

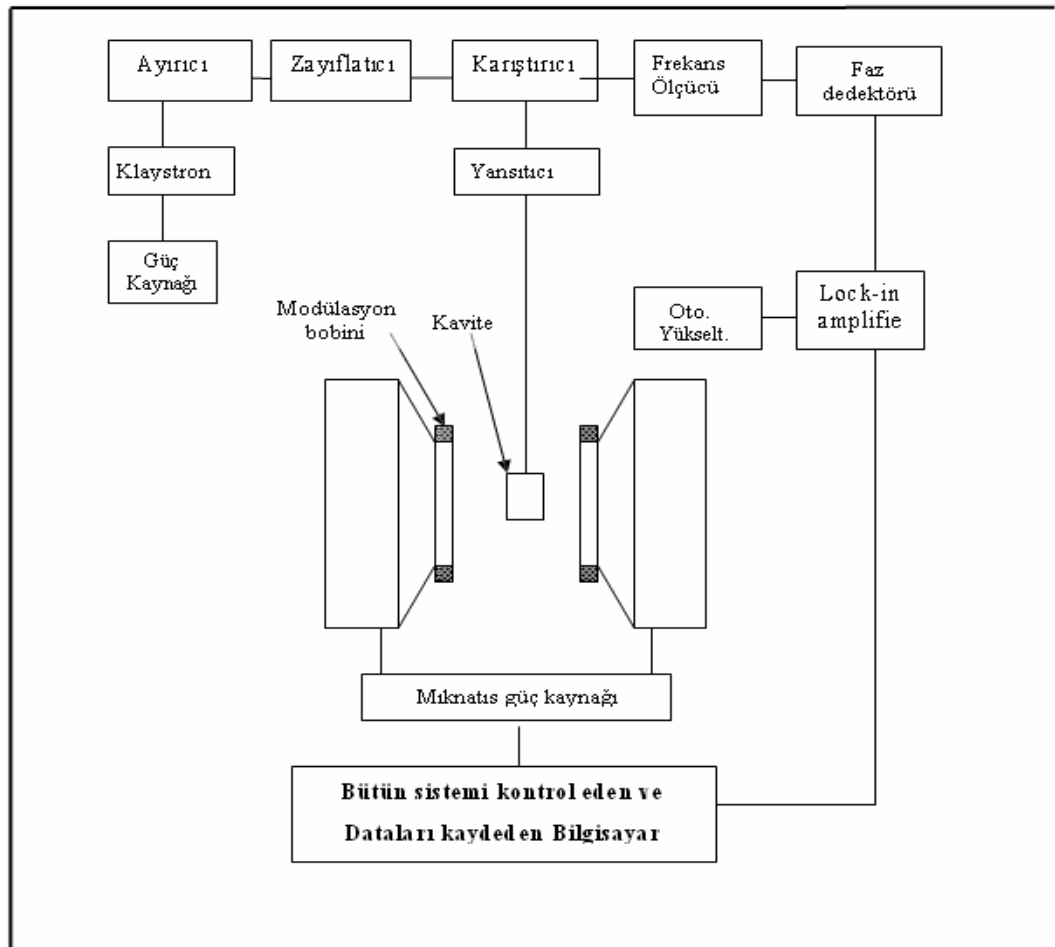
Burada λ_0 : Kullanılan frekansın serbest ortamdaki dalga boyu

λ_c : Geçiş hattındaki frekansın eşik dalga boyu (Ko-aksiyel hat için ∞ olarak alınır)

3. DENEYSEL TEKNİK

3.1- ELEKTRON SPİN REZONANS

Elektron Spin Rezonans (ESR) spektroskopisi; manyetik momente sahip atom, iyon, molekül veya molekül parçalarının manyetik alan içerisine konularak, malzemede meydana gelen enerji seviyelerinde oluşan yarılmaların elektromanyetik dalga vasıtasıyla gözlenmesi temeline dayanır. Malzemenin uygulanan mikrodalga enerjisini soğurarak yapısındaki manyetik birimler hakkında bilgi edinilmesini sağlayan araştırma ve uygulama alanıdır. Elektron spin rezonans (ESR) deney tekniği sisteminin yapısı aşağıdaki Şekil 9.' da şematize edildiği gibidir.



Şekil 9. ESR Spektrometresinin blok diyagramı.

Genel olarak kullanılan ESR spektrometreleri başlıca dört ana kısımdan oluşur; uygun güç ve frekansta (genelde 1- 100 GHz arası kullanılır) mikrodalga üreten “kaynak sistemi”, üretilen mikrodalgayı incelenen örnek üzerine ve örnekten yansıyan dalgayı da kristal dedektöre taşımayı sağlayan dalga klavuzu ve örneğin içinde bulunduğu kaviteden oluşan “kavite-klavuz” sistemi, kutupları arasında homojen ve değeri doğrusal olarak değişebilen durgun manyetik alan oluşturan “mıknatıs sistemi” ve rezonans sinyalini algılayan “dedektör ve modülasyon sistemi” dir.

3.1.1. Manyetik Alan Kaynağı

Rezonans olayı için gerekli olan manyetik alan genellikle demir çekirdekli ve su soğutmalı elektromıknatıslardan oluşur. Son zamanlarda, sürekli olarak sıvı helyuma gereksinim duymasına karşın, süper iletken mıknatıslarda kullanılmaktadır. Bu sistemin temel elemanları bir çift elektromıknatıs ve bunları besleyen güç kaynağıdır. Bizim ESR spektrometremiz, su soğutmalı olup 16 kG’a kadar alan uygulayabilen ve kutup başlıklarıyla 23 kG’a ulaşılabilen elektromanyetler kullanılmaktadır.

3.1.2. Mikrodalga Kaynağı

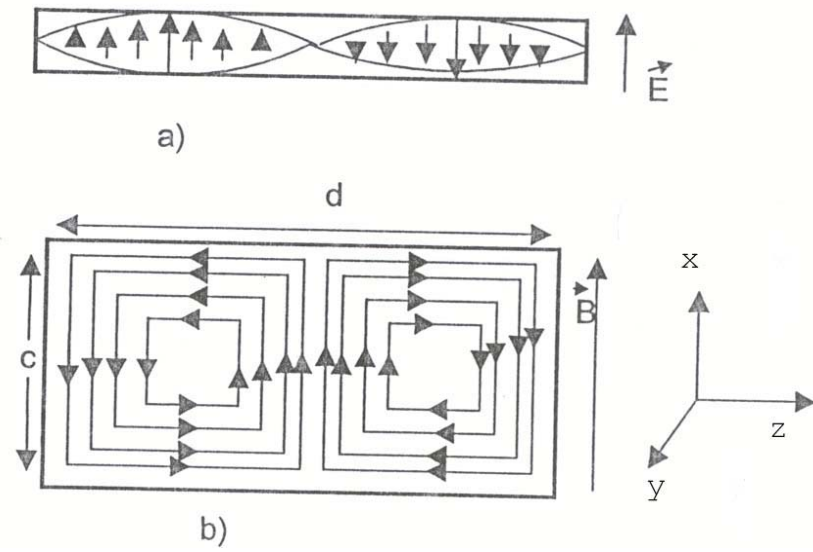
Mikrodalga, katı hal diyotu veya klistron tarafından üretilir. Çalışma frekans aralığı laboratuvarımızdaki X-Band Bruker EMX spektrometresi için 9–10 GHz dir. Ayrıca Bruker’in elektronik cihazlarına ve bilgisayar yazılımına uyumlu çalışabilecek 19–26 GHz K-Band ve 30–36 GHz Q-Band modüllerini de sisteme adapte edile bilmektedir.

Mikrodalga kaynağına geri yansıyabilecek sinyallerden sistemi korumak için ayırıcı kullanılır. Deney sistemindeki mikrodalga kaynağı çalışırken oluşan ısınmayı önlemek için de su ile soğutma yapılır. Zayıflatıcı ise kaviteye giden mikrodalga

gücünün ayarlanmasını sağlar ve mikrodalga gücü 0- 200 mW arasında değiştirilebilmektedir.

3.1.3. ESR Kavitesi

Bu kısımda mikrodalga (FMR) kavitelerinin özelliklerini ve bu özelliklerin soğurulma sonucu oluşan FMR sinyalini nasıl değiştirdiğini tartışalım. Bir mikrodalga kavitesi dikdörtgen veya silindirik yapıda bir metal kutudur. Kavitede mikrodalga enerjisi depolanır. Elektrodinamik rezonans durumunda, mikrodalga geriye yansımaz ve kavitenin içinde yarım dalga boyunun tam katları olacak şekilde modlar oluşur. Şekil 10' da TE₁₀₂ modunda bir ESR kavitesi gösterilmiştir.



Şekil10. TE₁₀₂ modunda çalışan dikdörtgen kavite [23].

a) Elektrik alan bileşeni y eksenine paraleldir ve Z doğrultusunda yaklaşık bir dalga sığmaktadır.

b) Manyetik alan bileşeni x eksenine paraleldir. Kavitenin boyutları söz konusu mod için şöyledir: c kenarı yarım dalga boyu, d kenarı yaklaşık dalga boyu ve üçüncü kenar da yarım dalga uzunluğundan daha kısadır. O nedenle dalganın şiddeti üçüncü doğrultuda değişmez.

3.1.4. Dalga Kılavuzu

Genelde dikdörtgen biçiminde bakır ya da pirinç borulardan oluşmaktadır. Yüksek derecede iletkenlik sağlamak için içyapısı altın ya da gümüş ile kaplanır. X-Band Spektrometresinde kullanılan dalga kılavuzlarının iç boyutları 1.27 cm X 2.54 cm' dir. Elektrik alan bileşeni daima dalga kavuzunun geniş yüzeyine diktir ve dalga kavuzu boyunca her yarı dalga boyunda en büyük ve en küçük değerini alır. Buna karşın manyetik alan bileşeni geniş yüzeye paraleldir ve elektrik alan bileşeninin minimum olduğu yerde maksimumdur.

3.1.5. Modülasyon ve Dedeksiyon Sistemi

Kaviteye gönderilen mikrodalga alanının bir kısmı örnek tarafından soğurulur. Kaviteden yansıyan dalga sirkülatör vasıtasıyla dedektöre gönderilir; dedektörde köprü vasıtasıyla kaviteden gelen bu dalga ile orantılı elektrik akımı oluşur. Dolayısıyla yansıyan mikrodalga şiddeti rezonans durumunda azalacağından dedektör akımında değişme gözlenir. Böylece rezonans olayı kaydedilir. Bu sinyal de sinyal yükseltici tarafından yükseltilir ve sinyalin manyetik alana karşı değişimi kaydedilir.

Statik manyetik alan ve mikrodalga frekans değerleri rezonans bölgesinin dışındayken, mikrodalga enerjisi kaviteden yansıyarak kristal dedektöre gider. Bu dedektör, üzerine düşen mikrodalga gücünün kareköküyle orantılı olarak çıkış akımı verir. Rezonans durumunda yansıyarak dedektöre gelen güç azaldığında çıkış akımı değişir ve bu değişimden yararlanarak rezonans olayı gözlenir. Mikrodalga frekansını taramak, statik manyetik alanı taramaya göre daha zor olduğundan pratikte genellikle statik manyetik alan taranarak rezonansa gözlenir. Kristal dedektörün gürültüsü, üzerine düşen soğurma sinyalinin frekansı ile ters orantılıdır. Bu yüzden rezonans sinyali modüle edilerek bu gürültü azaltılmaya çalışılır. Bunu da lineer olarak taranan statik manyetik alan üzerine, genliği, örneğin rezonans yarı eğri genişliğine göre oldukça küçük olan, sinüsoidal bir modülasyon alanı bindirilerek sağlanır. Bu alan örneğin içinde bulunduğu kavitenin genellikle iç yüzeylerine,

düzlemleri elektromıknatısın kutuplarına paralel olacak biçimde yerleştirilmiş iki küçük bobin tarafından oluşturulur.

Kaynak tarafından üretilen mikrodalganın tek frekansta olmaması, incelenen sistemin enerjisindeki belirsizlik, uygulanan statik alanın tam olarak homojen olmaması vb. faktörler yüzünden, rezonans geçişi yalnızca tek bir H manyetik alan değerinde değil de H' nin etrafında ΔH karakteristik genişliğinde bir bölgede olur. O halde statik manyetik alana, genliği rezonans eğri genişliği yanında küçük olan bir sinüzoidal alan bindirilirse, kristal dedektörün çıkışı modülasyon alanı ile aynı frekanslı ve genliği rezonans eğrisinin bulunan noktasındaki eğimi ile orantılı sinüzoidal bir sinyal oluşturur. Kristal dedektörün bu sinyali dar bantlı bir yükselteçten geçirildikten sonra, faz duyarlı bir dedektörde modülasyon sinyali ile karşılaştırılır. Faz duyarlı dedektörün çıkışı, şiddeti rezonans eğrisinin bulunan noktasındaki eğimi ile orantılı bir doğru gerilimdir. Bir filtreden geçirildikten sonra, bu doğru gerilim bir kaydetme sistemine gönderilir. Eskiden iki eksenli kaydedicinin düşey eksenine uygulanırdı. Kaydedicinin yatay eksenine statik manyetik alanın lineer değişimini sağlayan sistem mekanik olarak bağlanmıştır. Bu şekilde, kaydedicinin çizdiği eğri soğurma eğrisinin birinci türevidir. Bugünkü spektrometrelerde kaydedici yerine bilgisayar programı kullanılır.

3.1.6. ESR Spektrometresi Bilgisayar Elemanı

Modern bir spektrometre de bilgisayar teknolojisi kullanır. İlk bilgisayarlar sadece spektrometrenin dedektöründen gelen ESR sinyallerini kaydetmek ve analiz etmek için kullanılırdı. Günümüzde ise bilgisayar, manyetik alan, modülasyon genliği, mikrodalga gücü gibi spektrometre parametrelerinin hemen hemen hepsini kontrol etmek ve ayarlanmak için kullanılan spektrometrenin merkezi durumundaki bir elemanıdır.

3.2. MW SOĞURULMA ÖLÇÜMLERİ

Ferrit kompozitlerin MW (Mikrodalga) soğurulma ölçümleri Agilent 8364B PNA serisi Vektörel Network Analizör kullanılarak Geçiş hattı (Transmission Line) metodu ile yapıldı. Network analizörle yapılan malzeme karakterizasyonlarında genellikle iki method kullanılır. Bunlar; 1- Geçiş Hattı Metodu (Transmission Line Method) 2- Serbest-Ortam Metodu (Free-Space Method)' dur.

3.2.1. Geçiş Hattı Metodu

Bu metod' da alınan ölçümlerde planar yapıya sahip numuneler dalga kılavuzları arasına konularak, S_{11} , S_{21} parametreleri yardımı ile malzemenin dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri hesaplanır. Bu metotla yapılan ölçümlerde malzeme yüzeyinin alanı dalga kılavuzunun ara kesit alanına eşit olması ya da büyük olması gerekir.

3.2.2. Serbest-Ortam Metodu

Serbest-Ortam (Free-Space) metodu ile yapılan ölçümlerde mikrodalga antenleri ya da dalga kılavuzları kullanılarak malzemenin soğurulma karakterizasyonu hesaplanır. Yine S parametreleri yardımı ile malzemenin her bir frekansta karşı göstermiş olduğu etkin dielektrik geçirgenlik ve etkin manyetik geçirgenlik gibi değerleri hesaplanabilir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR

4.1. NUMUNE HAZIRLANIŞI

4.1.1. Ortak Çökertme Metodu

Ortak çökertme metodu literatürde küçük nano boyutlu parçaçık dağılımına sahip seramik toz sentezlenmesinde yaygın olarak kullanılan sıvı-kimyasal yöntemdir. Bu yöntemde sentezlenmesi istenilen ferrit numunenin suda çözünebilen metal inorganik tuzları kullanılmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajları diğer tekniklere göre kısa sürede ürün vermesi ve ucuz maliyetli olmasıdır [30].

Numune Hazırlanışı: 200 mL MMA(Metil metakrilat) ve 0.1 gr AIBN (Azobisisobutyronitrile) karıştırıldı. Ve bu karışım 60°C de 10 dk süre ile bekletildi. Viskozite durumu kontrol edildikten sonra ortam sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Tablo 2. de kütlece verilen ferrite, grafit ve Pluronic F 87 değerleri tartılarak farklı boş kaplara konuldu. Sonrasında 10 gr MMA oligomeri eklendi. Karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra ultrasonik ortamda bekletildi. Daha sonra, 60°C sıcaklıktaki yağ banyosu içerisinde bir gece reaksiyona bırakıldı.

* Pluronic F87, PPO-PEO-PPO karışımından oluşan 3 bloklu ko-polimer yapısındadır.

PEO : (polietilen oksit)

PPO : (polipropilen oksit)

Kompleks ferrit: $Ni_{0.5}Zn_{0.4}Cu_{0.1}Fe_2O_4$ ferrite

Kobalt ferrit: $CoFe_2O_4$

*Ortak çökeltme (coprecipitation) metodu ile sentezlenen ferrit-polimer kompozit yapılar bazik ortamda (pH 7-14) sentezlenmiştir.

Yüksek dielektrik sabite sahip grafit kompozit numunelerin dielektrik geçirgenliklerini artırmak için eklendi. Genellikle, GHz frekans bölgesinde spin

rotasyonel rezonans ve domain duvarı rezonansları birlikte görülür. Bununla birlikte, tek bir domain karakteristiği göstermesi için yeterince küçük ferrit parçacıkları eklendiği zaman spin rotasyonel rezonans, domain duvar rezonansa göre daha baskındır. Ferrit rezonansa başlayınca μ' azalırken, μ'' belirli frekans değerinde maksimum tepe değerini gösterir.

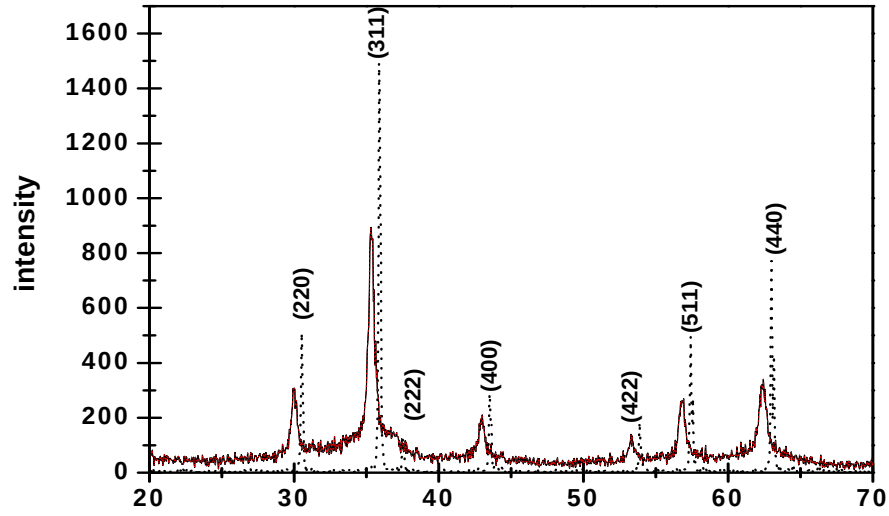
Tablo 4.1. Kompleks Ferrite ve Kobalt Ferrit karışım oranları

Numune	Ferrite/PMMA Oranı	Kompleks Ferrite/Cobalt Ferrite Oranı	
		Kompleks Ferrite	Cobalt Ferrite
A	10	0	100
B	10	25	75
C	10	50	50
D	10	75	25
E	10	100	0

Tablo 4.2. Kompleks Ferrit, Kobalt Ferrit ve Pluronic 87 ve Grafit karışım miktarları

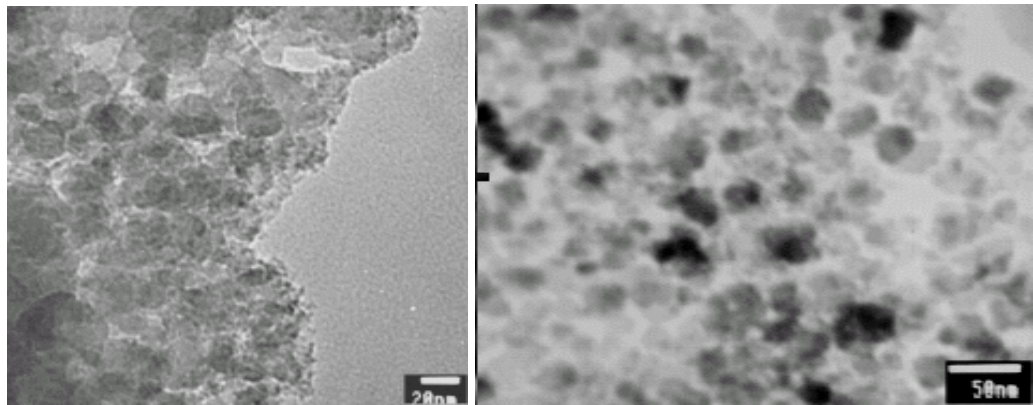
Numune	Kompleks Ferrite (gr)	Kobalt Ferrite (gr)	Pluronic 87 (gr)	Grafit (gr)
A	0	1,5	0,15	0,75
B	0,375	1,125	0,15	0,75
C	0,75	0,75	0,15	0,75
D	1,125	0,375	0,15	0,75
E	1,5	0	0,15	0,75

4.2. XRD VE TEM ANALİZİ



Şekil 11. Hazırlanan $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferritlerin XRD analiz grafiği.

Şekil 11.' de XRD analiz tekniği sonuç grafiğinde gösterildiği üzere referans tepe (peak) noktalarında gözlemlenen tepe (peak)'ler, üretilen $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ literatürdeki XRD 2θ değerleri ile karşılaştırıldığında ferritlerin Spinel Ferrit olarak üretildiğini göstermektedir.



(a)

(b)

Şekil 12. Hazırlanan $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Ferrit yapısının (a) hazırlanış ve (b) ısıtım sonrası TEM görüntüsü.

Şekil 12. (a)' da ısıtıl işlem öncesi $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$ Ferrit yapısının düzensiz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$ ferrit' teki bu düzensizliği ortadan kaldırmak için $450\text{ }^\circ\text{C}$ de 2 saat süre beklemeye bırakıldı. Şekil 12. (b)' de görülen koyu bölgelerdeki küresel yapılar 2 saat bekletilmesi ile çekilen TEM görüntüsüdür. Ferritin sıcaklıkla kristalleştirme işlemi ile tek fazlı spinel ferrit olarak sentezlendiğini göstermektedir.

4.3.ESR ÖLÇÜMLERİ

ESR ölçümlerinde farklı karışım oranlarında(0-1.5 gr aralığında) Kompleks ferritler ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ve Kobalt ferritler (CoFe_2O_4) 10 gr PMMA içerisindeki Pluronic 87 (0.15 gr) ve Grafit(0.75) ile karıştırılarak hazırlanmıştır [23]. Ferrit yapısında (Ni ve Fe) güçlü manyetik katyonlar ve manyetik olmayan katyonlar olduğundan, manyetik olmayan katyonların manyetik katyonları çevrelemesinden dolayı manyetik moleküler anizotropi (dipolar etkileşmesi) görülmektedir. Bu nedenle ESR sisteminde elde ettiğimiz spektrumlar geniş FMR çizgileri görmemizi sağlar. Literatürde Kobalt ferritin oda sıcaklığında geniş FMR çizgileri verdiği çalışmalar yer almaktadır [24]. Fiziksel olarak, manyetik ve manyetik olmayan tozların yine manyetik olmayan PMMA polimer ortamında karıştırılması ile dipolar etkileşme olayları amaçlanmaktadır. 10-300 K sıcaklık aralığında BRUKER EMX Mode ESR Spektroskopisi ile X-bantta (9.8 GHz) numunelerin FMR ölçümleri yapılmıştır.

4.3.1. Oda Sıcaklığında FMR Ölçümleri

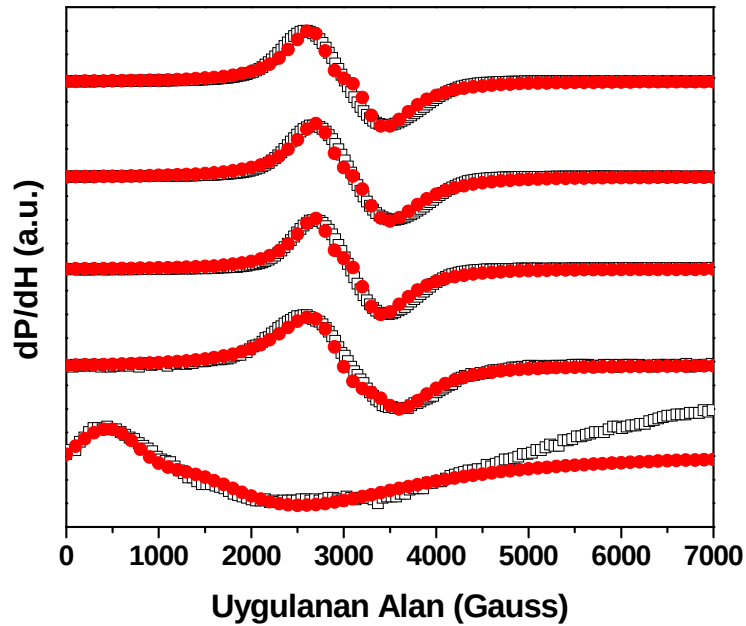
Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde örneklerin geniş FMR spektrumlarına sahip olduğu, alınan ölçüm parametreleri ile yapılan fitlerin uyumlu olduğu Şekil 13.' de görülmektedir. Kobalt ferrit karışım oranının artması ile FMR sinyali oda sıcaklığında genişlemekte ve asimetric davranış göstermektedir. Deneysel FMR

sinyal verilerini fit ederken 2 Landau-Lifschitz eşitlik kullanıldı, çünkü tek bir eşitlikle iki farklı fiziksel relaksasyon yapan ferritlerin verdiği deneysel verileri fit etmek mümkün değildir. Lorentzian ve Gaussian fitler fiziksel olarak kabul edilir sonuç parametre veremediler. Bu nedenle diyamanyetik ortamda homojen bir şekilde dağılıma ve yönelime sahip manyetik parçacıkların FMR sinyallerini fit etmek için Landau-Lifschitz eşitliği uygun olduğu için kullanıldı [25,26]. Literatürde sıklıkla kullanılan Landau-Lifschitz eşitliği aşağıda verildiği üzere;

$$\frac{d\vec{M}}{dT} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} + \frac{\lambda}{|\vec{M}|^2} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{B}) \quad (4.1)$$

$$\chi = \chi_1 + i\chi_2 \quad (4.2)$$

olarak ifade edilen manyetik duygunluk için χ_1 ve χ_2 duygunluğun reel ve sanal kısımlarıdır. Mikrodalga soğurma gücünün Manyetik duygunluğun sanal kısmı ile orantılı olduğu bilinmektedir $\frac{dP}{dB} = \frac{d\chi_2}{dB}$. Buradan aşağıdaki tekli FMR çizgi denklemini elde edilir.



Şekil 13. Oda sıcaklığındaki FMR çizgileri ve Landau-Lifschitz teorisi ile yapılan

fitler.

$$\chi_2 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{B_o^2 \Delta_B [(B_o^2 + \Delta_B^2) B^2 + B_o^4]}{[(B_o^2 (B - B_o)^2 + \Delta_B^2 B^2) [(B_o^2 (B + B_o)^2 + \Delta_B^2 B^2)]} \quad (4.3)$$

Burada $B_o = -\omega / \gamma$, rezonans manyetik alanı ve $\Delta_B = \lambda B_o / |\gamma| |B_o|$ ise çizgi genişliğidir. İki Landau-Lifschitz denklemli teorik modellemekten elde edilen parametreler aşağıdaki Tablo 3 de gösterilmektedir.

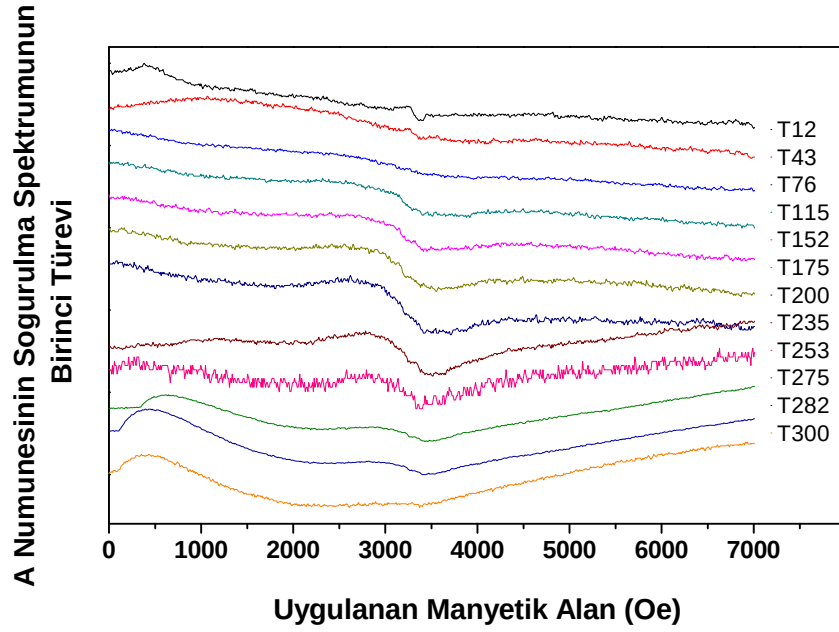
Tablo 4.3. Oda sıcaklığında alınan FMR ölçümlerine ait Teorik fit parametreleri

Numuneler	1.LL FMR Çizgi Parametreleri			2.LL FMR Çizgi Parametreleri		
	C1	Db1	Bo1	C2	Db2	Bo2
1A	280e4	1350	1400	3.5e7	4190	3700
1B	1.4e6	585	3040	3.8e5	450	3500
1C	0.25e6	305	2850	7.5e5	440	3250
1D	0.31e6	335	2885	9.5e5	510	3310
1E	0.42e6	360	2850	7.2e5	450	3285

4.3.2. Düşük Sıcaklık FMR Ölçümleri

4.3.2.1. A Numunesi

Bu bölümde CoFe₂O₄-PMMA kompozit ferritin sıcaklığın fonksiyonu olarak FMR spektrumları kaydedildi. Örnek tarafından soğurulan mikrodalga gücünün statik manyetik alan değişimine bağlı (dP/dH) grafiği statik manyetik alanın fonksiyonu olarak çizilen bazı sıcaklık değerleri aşağıdaki Şekil 14.' de gösterildiği gibidir.

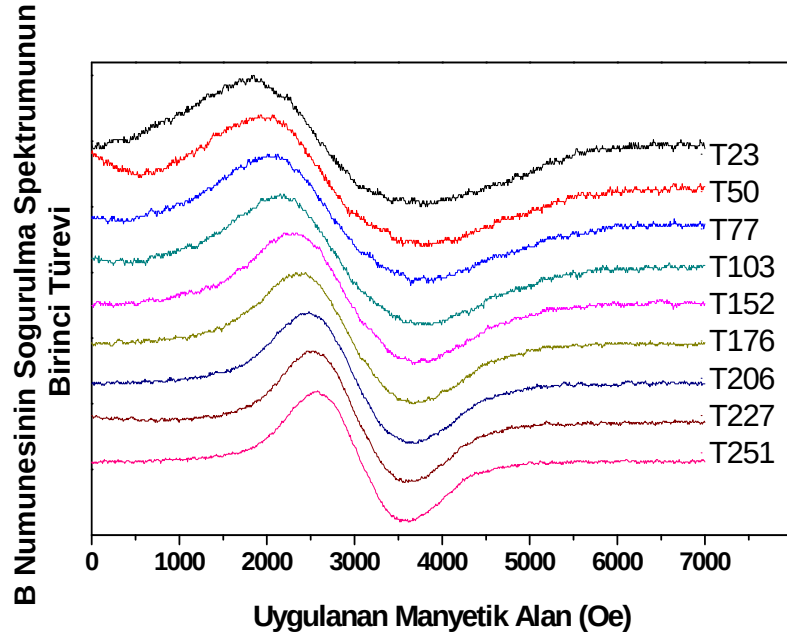


Şekil 14. A-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.

Genel olarak geniş ve net olmayan FMR spektrumlarına sahip numunemiz, yüksek sıcaklıklarda net ve analize uygun FMR spektrumları elde edilmiştir. Bu sebeple düşük sıcaklıklarda analizi yapılamamaktadır.

4.3.2.2. B Numunesi

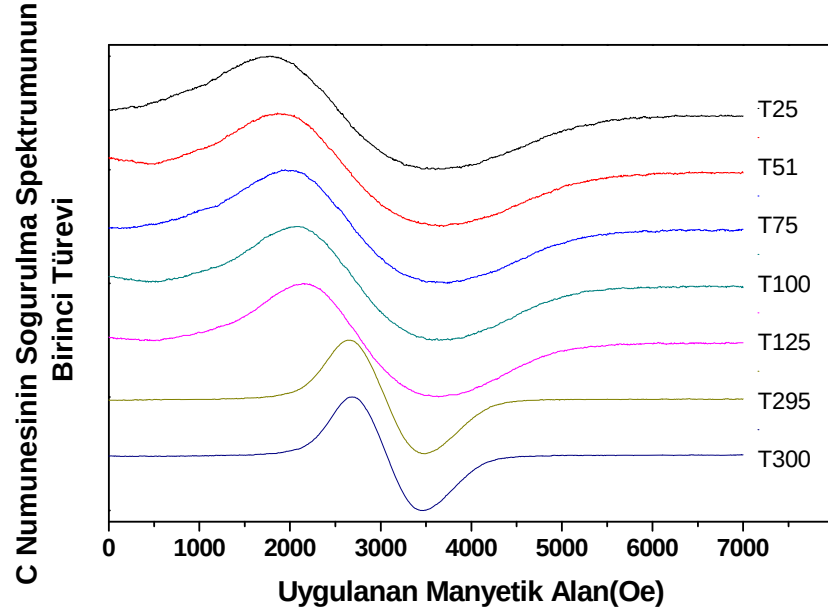
Şekil 15.' de, 0.375 g Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ve 1.125 g Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) içeren B numunesinin FMR spektrumunu göstermektedir. FMR spektrumları sıcaklığa oldukça bağlıdır. Tüm soğurma spektrumlarının 1. Türevleri geniş çizgi genliğine sahiptir. Düşük sıcaklıklarda, 152 K nin altında FMR çizgileri anti-simetrik şekle sahiptir fakat yüksek sıcaklıklarda neredeyse simetrik sinyaller elde edilmiştir. FMR sinyallerinin çizgi genişlikleri için 23 K-251 K sıcaklık aralığında 937 Gauss' tan 1922 Gauss' a erişmektedir. Rezonans alanı ise sıcaklık artıktıkça artış göstermektedir.



Şekil 15. B-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.

4.3.2.3. C Numunesi

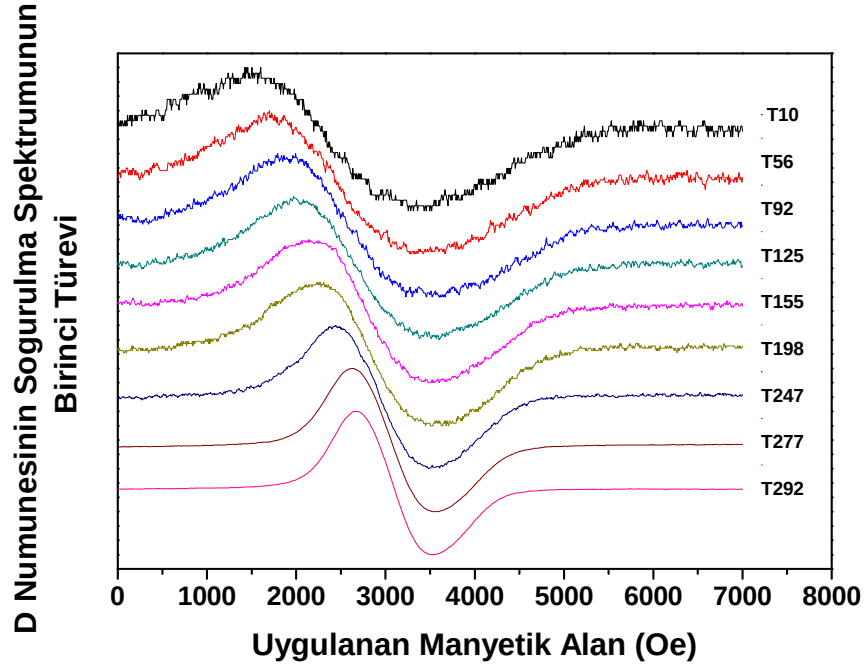
Bu bölümde eşit ağırlıkta Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$) ve Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) içeren C-numunesinin mikrodalga soğurma spektrumunun statik manyetik alana bağlı değişimi incelenmiştir. FMR çizgileri bir önceki numunede olduğu gibi 125 K' nin altında aynı asimetrik çizgi karakteristiği göstermektedir ve yüksek sıcaklıklarda daha simetrik sinyaller elde edilmiştir. Şekil 16.' da görüldüğü gibi FMR sinyallerinin sıcaklığa bağlı olduğu gözlenmiştir. Rezonans alan değerlerinin sıcaklık azaldıkça azaldığı, çizgi genişliklerinin ise arttığı görülmüştür. 300 K ile 25 K sıcaklıklarındaki çizgi geniş değerleri sırasıyla 750 Gauss ve 1861 Gauss olarak bulunmuştur. Çizgi genişlikleri ve rezonans alanının sıcaklığa bağlı değişimi ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 16. C-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.

4.3.2.4. D Numunesi

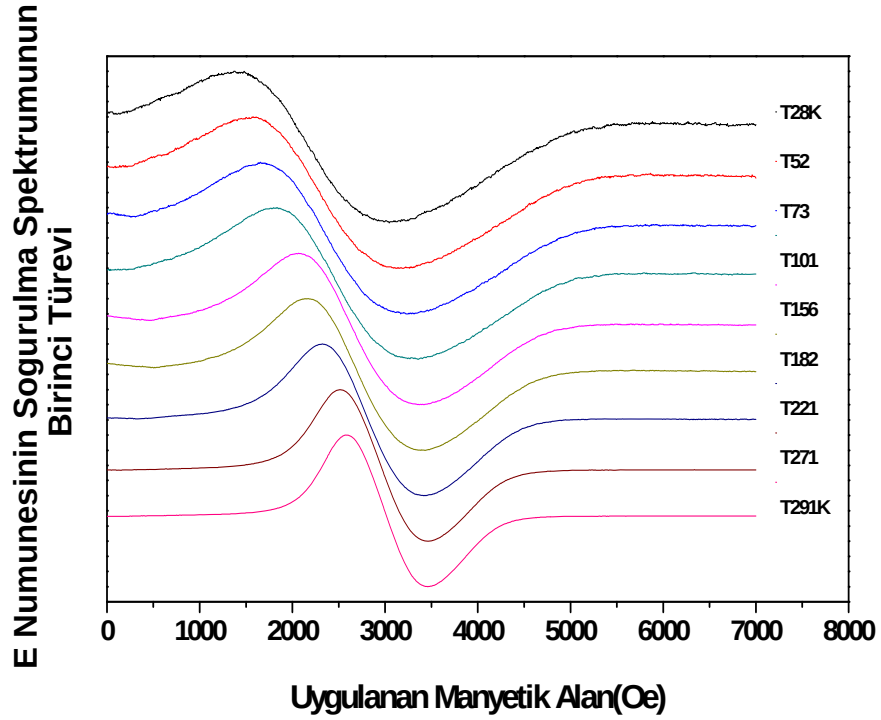
Şekil 17.' de Kobalt ferrit' ten ağırlıkça daha fazla Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$) içeren D Numunesine ait FMR spektrumunu göstermektedir. Bu numunenin FMR sinyalinin de sıcaklığa bağlı olduğu gözlenmiştir. Artan sıcaklıkla beraber numune yüksek alanlarda rezonansa, azalan çizgi genişlikleri ile gelmektedir. Ölçüm yapılan en düşük sıcaklık olan 10 K ile en yüksek sıcaklık olan 292 K sıcaklıklarında sırasıyla rezonans alan değerleri sırasıyla 2319 Gauss ve 3099 Gauss olarak çizgi genişlik değerleri ise 1833 Gauss ve 844 Gauss olarak bulunmuştur.



Şekil 17. D-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.

4.3.2.5. E Numunesi

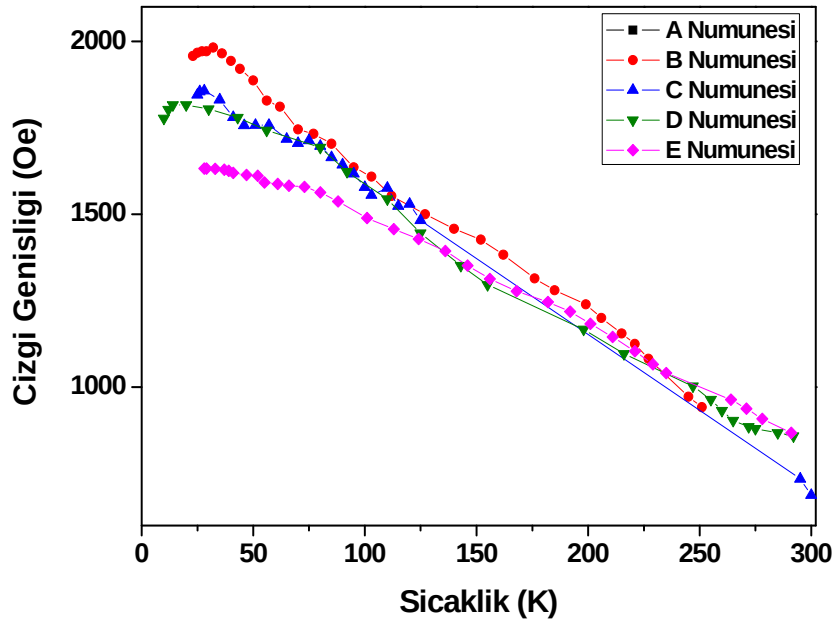
Yapısında sadece Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$) içeren E Numunesinin FMR çizgileri Şekil 18.' de gösterildiği gibidir. 156 K sıcaklığının altında FMR çizgileri asimetric çizgi şekline sahip olup, yüksek sıcaklıklarda daha simetrik hale gelmektedir. FMR sinyallerinin sıcaklığa bağımlı olduğu açıkça görülmektedir. Azalan sıcaklıkla rezonans alan değerlerinin düştüğü, çizgi genişlik değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir. 291 K ile 28 K sıcaklık değerlerinde çizgi genişlik değerleri sırasıyla 882 Gauss ve 1677 Gauss dur. Rezonans alan değerleri aynı sıcaklık değerleri için sırasıyla 2134 Gauss ve 3017 Gauss dur. Çizgi genişlikleri ve rezonans alanının sıcaklığa bağlı değişimi ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 18. E-Numunesi için farklı sıcaklıklardaki FMR çizgileri.

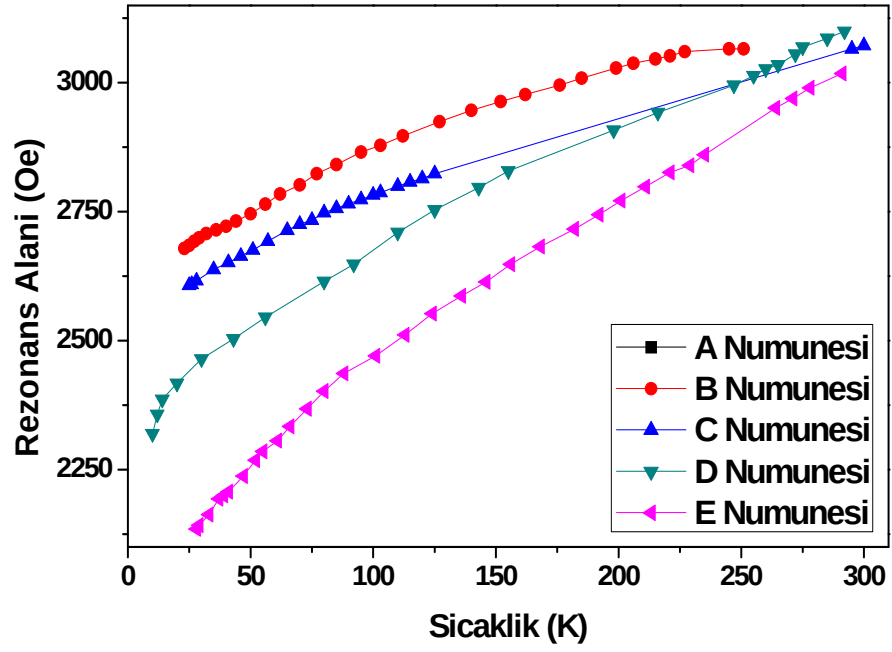
4.3.3. Çizgi Genişliği ve Rezonans Alanı

Şekil 19. ve Şekil 20.' de gösterildiği gibi, farklı karışım oranlarında ferritlerle hazırlanan numunelerin, çizgi genişliği ve rezonans alanı sıcaklıkla değişmektedir. A-Numunesinin çizgi genişliği ve rezonans alanı analiz edilemedi. Numunelerdeki kompleks ferrit oranı arttıkça FMR çizgileri daha belirginleşti. Parametre analizinde, bir rezonans alanına karşılık gelen geniş FMR sinyalini ve tepe-tepe çizgi genişliğini aldık. Daha önce belirttiğimiz üzere, teorik fit analizinde tek bir Landau-Lifschitz eşitliği ile analiz etmek mümkün değildi. Bu nedenle deneysel parametreleri hesaplarken tüm örneklerin bir geniş sinyale sahip olduğunu varsayımında bulunduk.

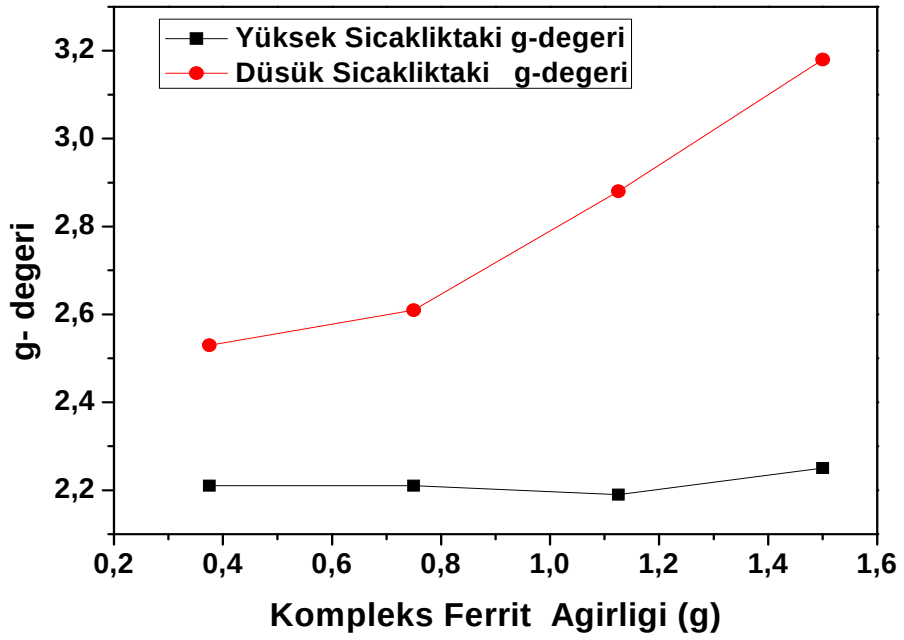


Şekil.19. Sıcaklık- Çizgi genişliği grafiği.

Sıcaklığa bağlı çizgi genişliklerinin, sıcaklık azaldıkça lineer olarak arttığı gözlemlendi. Tüm numunelerin yüksek sıcaklıklarda yaklaşık olarak aynı çizgi genişliğine sahip olduğu, bununla birlikte 125 K sıcaklıktan düşük sıcaklıklarda, Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) oranı yüksek numunelerin kompleks ferritlere oranla daha geniş çizgi genişliğine sahip oldukları saptandı. Çizgi genişliklerinin Kobalt (Co) oranı ile artması beklenen sonuçtur. Aslında, Byun ve çalışma arkadaşlarının yapmış olduğu $(\text{Ni}_{0.2}\text{Cu}_{0.2}\text{Zn}_{0.6})_{1.022-x}\text{Co}_x\text{Fe}_{1.98}\text{O}_4$ çalışmasında Kobalt (Co) oranının artması ile çizgi genişliğinin genişlediği gözlemlenmiş olup 125 K sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda karışımdaki kobalt arttıkça çizgi genişliğinin genişlediği bilgisinin kayda değer olduğu bildirilmiştir [27]. Düşük sıcaklıkta gerçekleşen bu çizgi genişlemesi ferrite yapısındaki Kobalt (Co^{+2}) iyonları ile açıklanabilir, çünkü bu Kobalt iyonlarının manyeto kristal anizotropisinin şiddetli derecede sıcaklığa bağlı olması ve düşük sıcaklıkta baskın olmasından kaynaklanmaktadır [28].



(a)



(b)

Şekil 20. a) Sıcaklık-Rezonans Alanı Grafiği, b) Yüksek ve düşük sıcaklıktaki g-değerleri.

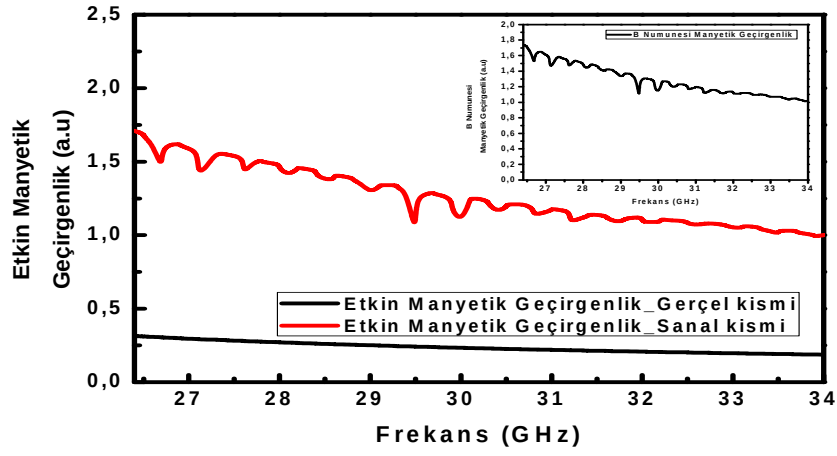
Sıcaklık arttıkça rezonans alanı artmakta ve yüksek sıcaklıklarda 3100 Gauss a kadar ulaşmaktadır. Yapısında daha fazla Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) içeren örnekler düşük sıcaklıklarda rezonansa gelmesi için daha yüksek alana ihtiyaç duyarlar. Şekil 20. (b)' de, yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklıktaki g- değerleri, numuneler içerisindeki ağırlıkça Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) içeriğine bağlı olarak çizilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda g değeri 2.2 civarında olup numune içerisindeki Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) oranı g değerini çok az etkilemektedir. Bu sonuç Byun ve arkadaşları [29] tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile uyumludur. Bununla birlikte düşük sıcaklıklarda Kobalt ferrit eklenmesi, manyeto kristal anizotropi etkisinin düşük sıcaklarda baskın hale gelmesinden dolayı, g değeri 3.2 değerine çıkmaktadır. Bu anizotropi etkisi düşük sıcaklıklarda görülen çizgi genişliklerinde de gözlenmiş ve izah edilmiştir.

4.4. NETWORK ANALİZÖR SOĞURULMA

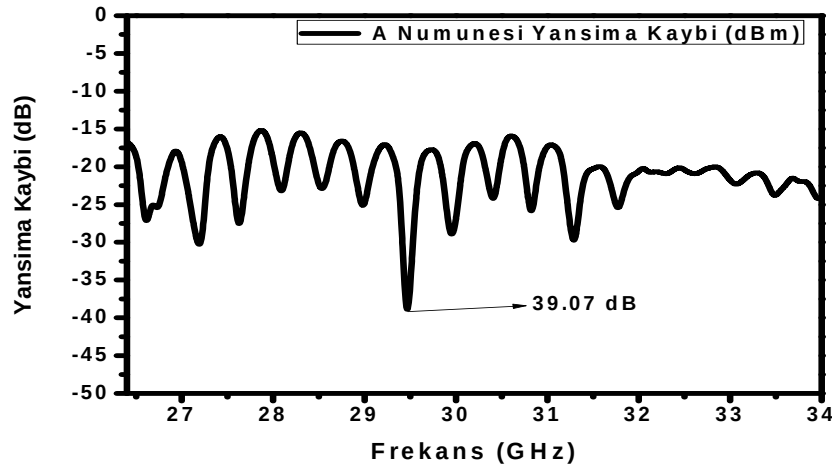
ÖLÇÜMLERİ

PMMA içerisinde ağırlıkça farklı oranlarda karıştırılan ferritlerin Agilent 8364B PNA serisi Network analizör ile 24.6-34.0 GHz (R bant) frekans aralığında Yansıma Kaybı (Reflection Loss, RL) ölçümü yapıldı. 24.6-34.0 GHz frekans aralığında ölçüm alınmasının nedenleri arasında; hazırlanan örnek boyutlarının küçük olması ve bu nedenle açık alan ölçümü yerine, açık uçlu dalga kılavuzları arasında, geçiş/yansıma metodu ile tüm numunelerin aynı kalınlık (3 mm) değerinde EM dalga soğurulma ölçümleri alındı. Kritik katkı oranlarında farklı frekans bölgelerinde Yansıma kaybı değerinin değiştiği gözlemlendi. Bu değişimin farklı olması nedenleri arasında; PMMA içerisindeki Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$) ve Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) yapıların birbirinden bağımsız olarak soğurma karakteristiği göstermesi, ferrit yapılarındaki atom ve molekül boyutunun tam olarak bilinmemesi, ferrit-polimer kompozit' inde ferritlerin homojen bir dağılım göstermemesi gibi etkilerin katkısı olduğu varsayılmaktadır. Her bir Ferrit-PMMA polimer kompozit'in etkin manyetik geçirgenliği ve 26.4-34.0 GHz frekans aralığında Yansıma Kaybı grafikleri aşağıda yer almaktadır.

4.4.1. A Numunesi



(a)

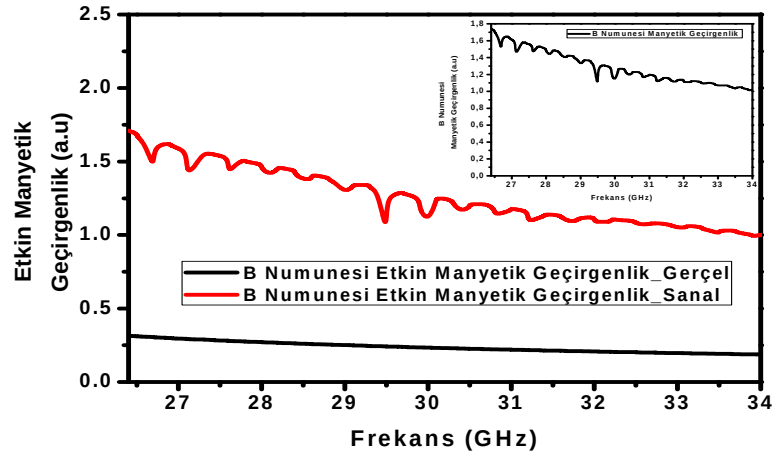


(b)

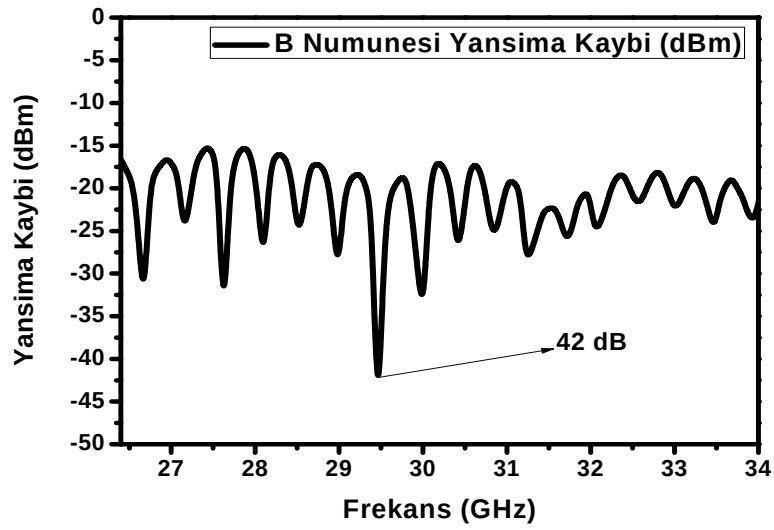
Şekil 21. A-Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için (a)- Etki manyetik geçirgenlik (b)- Yansima Kaybı (RL) grafiği.

Şekil 21.' de sadece Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) karışımından oluşan kompozit yapının 29.45 GHz frekans bandında -39.07 dB Yansima kaybı değerine sahip olduğu, diğer frekans değerlerinde yansima kaybı değerinin çoğunlukla -20 ile -35 dB aralığında değişmekte olduğu görülmektedir.

4.4.2. B Numunesi



(a)



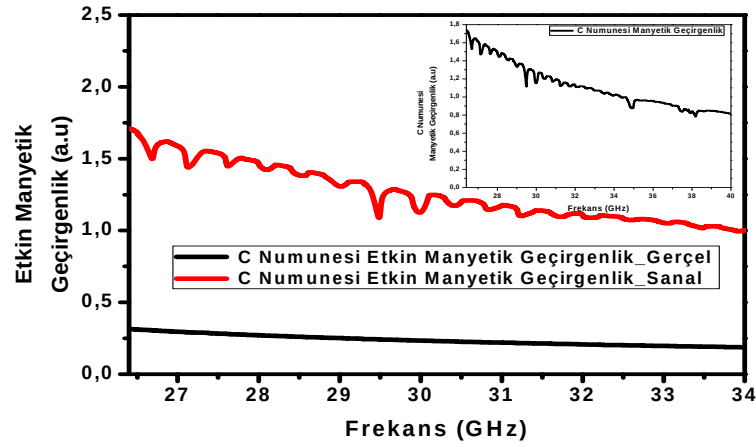
(b)

Şekil 22- B-Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için (a)- Etkin Manyetik geçirgenlik (b)- Yansima Kaybı grafiği.

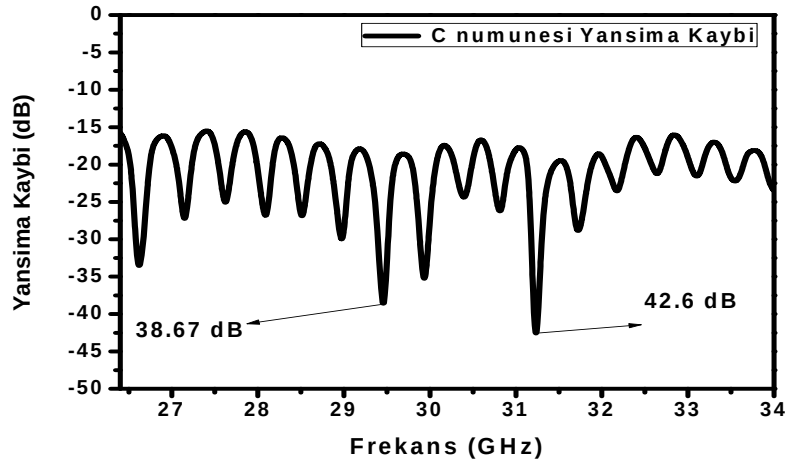
Şekil 22' de B Numunesinin ağırlıkça 1:3 oranında Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$) ve Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) katkılanmasıyla 29.45 GHz frekans bölgesinde -42 dB yansima kaybı değerine sahip olduğu ölçülmüştür. Polimer içerisine (ağırlıkça 1:3 oranında) katkılanan Kompleks ferritin ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}$) yapının soğurma özelliğini 29.45 GHz frekans noktasında yaklaşık olarak 3 dB kadar

artırdığı görülmektedir. A numunesi gibi B numunesi de incelenen frekans bölgelerinde -20 ile -35 dB arasında değişen yansıma kaybı değerleri vermektedir.

4.4.3. C Numunesi



(a)



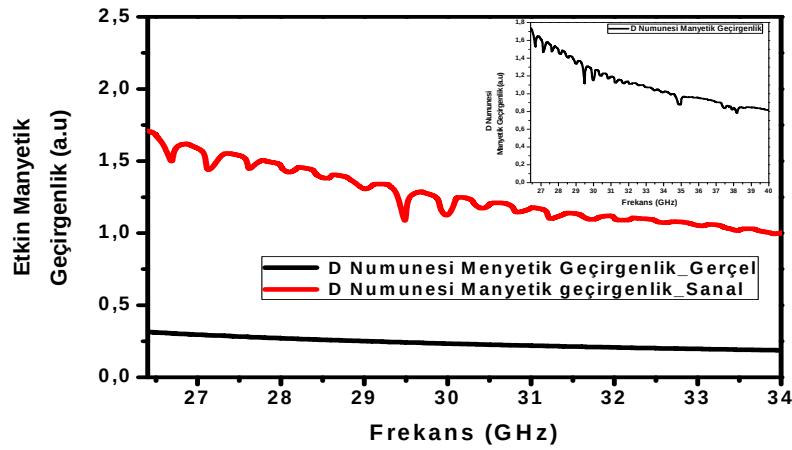
(b)

Şekil 23- C Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için (a)- Etkin Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.

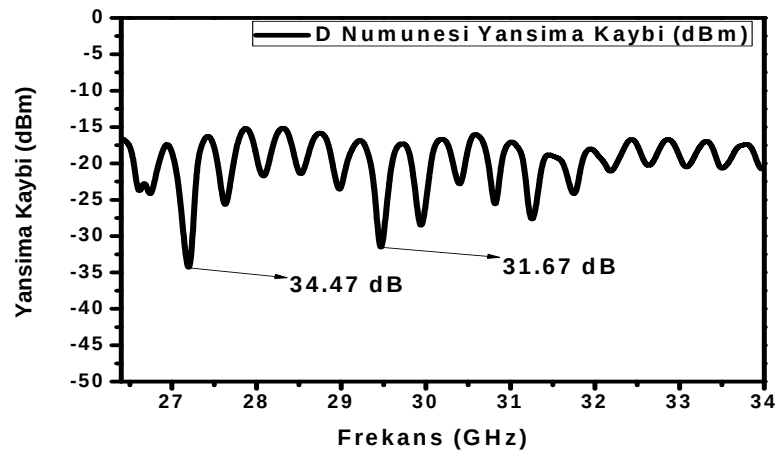
Şekil 23' de PPMA içerisinde ağırlıkça 1:1 oranında karıştırılan Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ve Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) içeren C numunesinin 29.45

GHz frekans noktasında -38.67 dB yansıma kaybı değerine sahip olduğu ölçülmüştür. Aynı frekanstaki A numunesinin yansıma kaybı değeri ile yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir. PMMA polimer içerisine eşit miktarda eklenen ferritler yapının yansıma kaybı özelliğini artırmıştır. C numunesinin sahip olduğu en yüksek yansıma kaybı değeri 31.23 GHz frekansında -42.6 dB olarak kaydedilmiştir.

4.4.4. D Numunesi



(a)

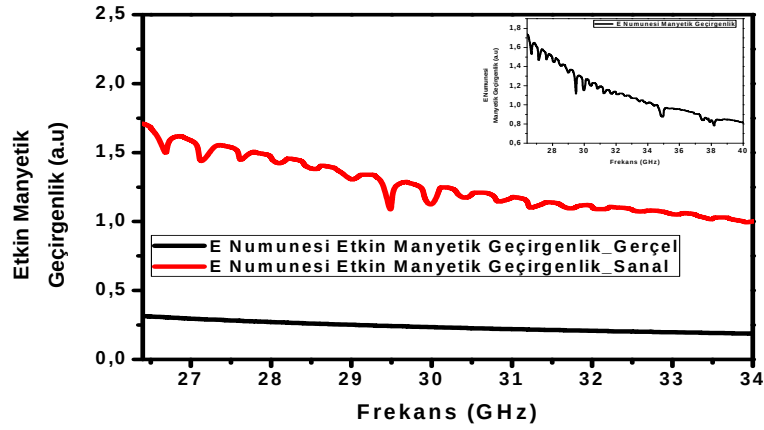


(b)

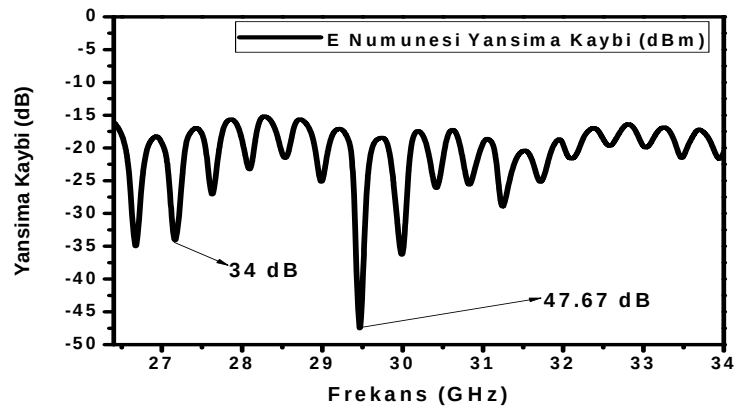
Şekil 24- D Numunesinin 26,4-34,0 GHz frekans aralığı için (a)- Etkin Manyetik geçirgenlik (b)-Yansıma Kaybı grafiği.

Şekil 24' de, D numunesinin incelenen frekans bant aralığında, 29.45 GHz frekans bandında -31.6 dB yansıma kaybı değerine sahip olduğu ölçülmüştür. D numunesinin en yüksek yansıma kaybı değeri 27.19 GHz frekansında -34.47 dB olarak kaydedilmiştir. A,B,C numunelerine kıyasla, yapı içerisindeki Kompleks ferrit oranı arttıkça soğurulma artışı incelenen frekans aralığının düşük frekans noktalarında artmaktadır.

4.4.5. E Numunesi



(a)

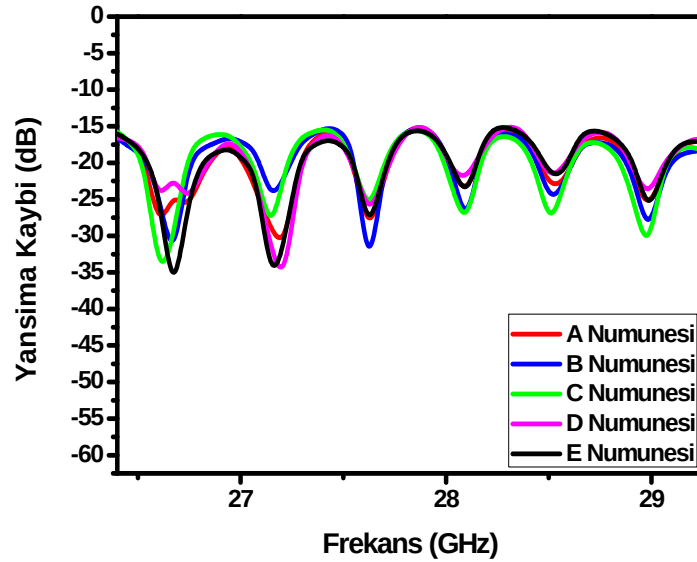


(b)

Şekil 25- E Numunesinin 26.4-34.0 GHz frekans aralığı için (a)- Etkin Manyetik geçirgenlik (b)- Yansıma Kaybı grafiği.

Şekil 25' te, E numunesinin 29.45 GHz frekans noktasında 47.67 dB RL değerine sahip olduğu ölçüldü. D numunesinin yapısında daha öncede belirttiğimiz üzere sadece kompleks ferrit olup, Kobalt ferrit bulunmamaktadır. 29.45 GHz frekansındaki en yüksek yansıma kaybı değerine yapı içerisindeki kompleks ferritin katkıda bulunduğu açıkça görülmektedir.

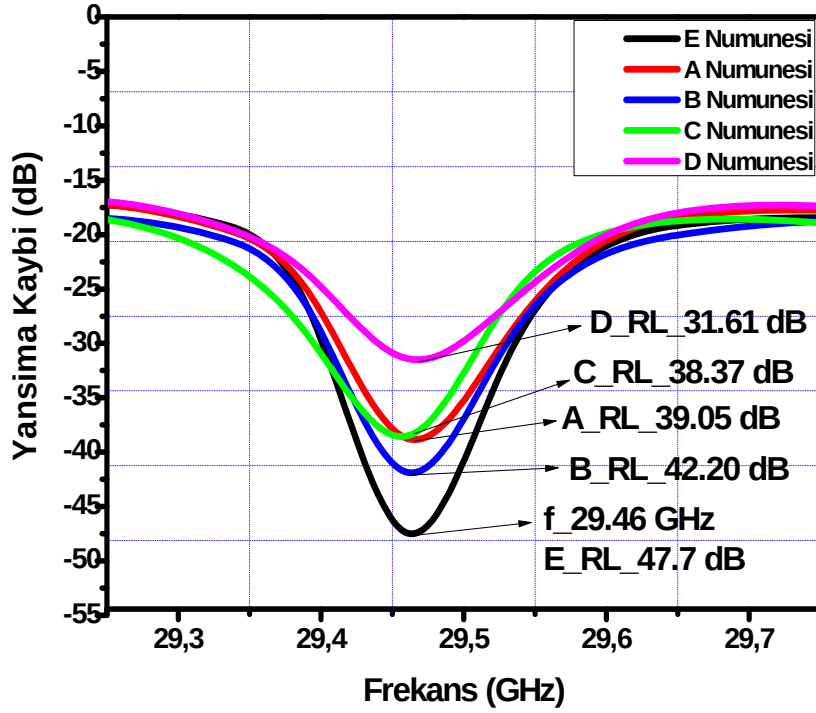
4.4.6. Tüm Numunelerin Yansıma Kaybı Değerlerinin Kıyaslanması



Şekil 26- A,B,C,D,E numunelerinin 26.40-29.25 GHz frekans aralığı için ortak Yansıma Kaybı grafiği.

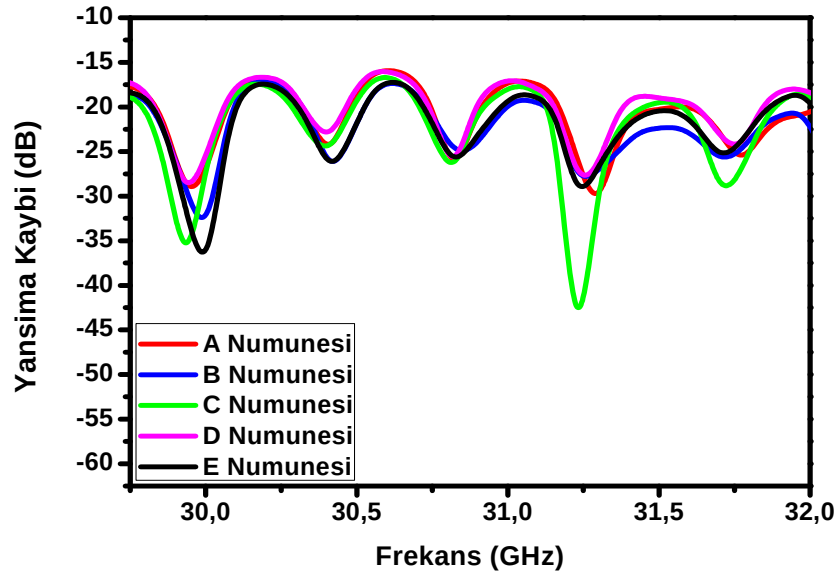
Tüm numunelerin Şekil 26.' da gösterildiği gibi belirli frekans aralığında her bir frekans değerine karşılık gelen numunelerin soğurulma değerleri farklılık göstermektedir. Buna neden olarak numune yapılarındaki ferrit karışım oranlarının farklılık göstermesi ve böylece EM dalga ile etkileşimde bulunan numunelerin içerisindeki katyonların etkileşimlerinin buna yol açtığını söyleyebiliriz. Örneğin; 26.6 GHz frekansında en fazla soğurulmayı - 35.0 dB değeri ile E numunesi, sonrasında -33.3 dB ile C numunesi, -30.9 dB ile B numunesi, -27.3 dB ile A

numunesi ve -23.4 dB ile D numunesi sağlamaktadır. Yine 27.16 GHz frekansında sırasıyla E (-34.1 dB), D (-34.3 dB), A (-30.3 dB), C (-27.2 dB) ve B (-23.89 dB) numunelerinin soğurma gösterdiği kaydedilmiştir. Aynı şekilde 27.61 GHz' lik frekansta sırasıyla B (-30.0 dB), A (-27.4 dB), E (-27.42 dB), D (-25.7 dB) ve C (-24.3 dB) numuneleri göstermektedir.



Şekil 27- A,B,C,D,E numunelerinin 29.25-29.75 GHz frekans aralığı için ortak Yansıma Kaybı grafiği.

Şekil 27.' de, aynı frekans (29.46 GHz) değerine karşılık gelen Yansıma Kaybı değerleri yer almaktadır. Ölçüm değerleri kaydedilen A,B,C,D ve E numunelerinden bu frekansta en yüksek soğurulma değerini -47,7 dB değeri ile E numunesinin yapısında daha öncede Tablo 4.1 ve 4.2' de belirtildiği gibi ferrit olarak sadece Kompleks ferrit bulunmaktadır. 2. En yüksek soğurulma değeri B numunesinde -42.20 dB olarak kaydedilmiştir.



Şekil 28- A,B,C,D,E numunelerinin 29.75-32.00 GHz frekans aralığı için ortak Yansima Kaybı grafiği.

Şekil 28.' de, görüldüğü üzere incelenen frekans band aralığında en fazla soğurulma 31.25 GHz frekansında -42.57 dB ile eşit karışım oranda Kompleks ferrit ve Kobalt ferrit içeren C numunesinde görülmektedir. İkinci en fazla soğurulma ise 29.98 GHz frekansında -36.51 dB ile yapısında sadece Kompleks ferrit bulunan E numunesinde görülmektedir. Diğer numuneleri aynı frekans değerlerinde yaklaşık olarak birbirine yakın dB seviyelerinde soğurulma göstermektedirler

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Literatürde spinel ferrit olarak bilinen Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ve Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) farklı karıştırma oranlarında PMMA polimeri içerisinde karıştırılarak elde edilen 5 farklı Polimer-Ferrit yapı EM dalga soğurma özellikleri araştırılmak üzere radar soğurucu malzeme olarak tasarlanmıştır. Radar soğurucu manyetik malzeme olarak hazırlanan Kobalt ferrit ve Bakır-Çinko katkılı Nikel ferrit malzemeler ortak çökertme metodu ile elde edilmiştir. Malzemelerin başarı ile sentezlendiği TEM görüntülerinden elde edilen morfolojik bilgi ve XRD çalışmasından elde edilen kristal yapı analizinden ortaya konmuştur.

Ferrit malzemelerin manyetik olmayan PMMA ortamında seyreltilmesi sonucu oluşan soğurucu malzemelerin manyetik özellikleri FMR ile analiz edilmiştir. Genel olarak ferritlerden beklenen rezonans alanlarına sahip olduğu ama çizgi genişliklerinin çok geniş ve FMR sinyallerinin farklı olduğu belirtilmiştir. Bu manyetik özelliklerdeki farklılığın sebebi temel olarak farklı metal katyonlarından elde edilmiş ferritlerin molekül içi farklı etkileşimleri ve bu ferritlerin polimer içerisinde fiziksel olarak karıştırılmaları ile parçacıklar arası farklı etkileşimlerin farklı alanlarda soğurucu özellik göstermesi olarak açıklanabilir. Çünkü bu farklı alan soğurmalarının birleşik etkisi çok geniş tepe tepe genlik sinyaller vermektedir. FMR deneylerinden çizgi genişliği ve rezonans alan değerlerinin sıcaklığa önemli ölçüde bağlı olduğu tespit edilmiştir. Çizgi genişliklerinin sıcaklık azaldıkça lineer olarak arttığı rezonans alanı değerlerinin lineer olarak azaldığı gözlenmiştir. Karışık ferrit yapıda Kobalt Ferrit oranı arttıkça çizgi genliği artmakta olup bu olay kobalt ferrit içerisindeki antiferromanyetik etkileşimlerden kaynaklanmakta olduğu ifade edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda Kobalt iyonlarının manyeto kristal anizotropisinin baskın hale gelmesi geniş FMR spektrumlarına sebep olmuştur. Bu etki deneysel g parametresinin de düşük sıcaklıklarda, 2 düzeyindeki değerinden 3,2 değerlerine yükselmesine sebep olduğu tespit edilmiştir.

Bu spinel ferrit yapıların farklı karışım oranlarında sergilemiş oldukları EM dalga soğurma değeri olan yansıma kaybı 24.6-34 GHz frekans band (R band) aralığında -20 dB den daha düşük olduğu kaydedilmiştir. Kritik karışım oranları arasında en yüksek soğurulmayı yapısında ferrit olarak sadece kompleks ferrit

bulunan E numunesi 29.45 GHz frekansında -47.02 dBm yansıma kaybı değeri ile göstermiştir.

Sonuç olarak, Kompleks ferrit ($\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$) ve Kobalt ferrit (CoFe_2O_4) karışımından oluşan Polimer-ferrit kompozit yapıları 26.4- 34.0 GHz frekans bandından yüksek soğurulma değerlerine sahip olduklarından Radar Soğurucu Malzeme (RSM) malzeme olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

1. Trends in Radar Absorbing Materials Technology, K.J. VINOY and R. M. JHA, Sadhana, Vol. 20, Part 5, October 1995, pp. 815-850
2. Magnetic properties and microwave characteristics of Ni–Zn–Cu ferrite film fabricated by aerosol deposition method, T. Kagotania, R. Kobayashia, S. Sugimotoa, K. Inomataa, K. Okayamab, J. Akedoc, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 290–291 (2005) 1442–1445
3. Microwave-absorbing characteristics for the composites of thermal-plastic polyurethane (TPU)-bonded NiZn-ferrites prepared by combustion synthesis method, Cheng-Hsiung Peng, Chyi-Ching Hwang, Jun Wan, Jih- Sheng Tsai, San-Yuan Chen, Materials Science and Engineering B 117 (2005) 27–36
4. Magnetic Properties and Microwave Characteristics of Ni-Zn-Cu Ferrite Film Fabricated by Aerosol Deposition Method, T.Kagotani, R. Kobayashi, S. Sugimoto, K. Inomata, K. Okayama, J. Akedo, Journal of Magnetic And Magnetic Materials 290-291 (2005) 1442-1445
5. Advantages of Ferromagnetic Nanoparticle Composites in Microwave Absorbers, Vladimir B. Breger, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 40, No. 3, May 2004
6. Apaydın F., Manyetik Rezonans, (1991)
7. C. Kittel, A. H. Mitchell. (1948)
8. C. P. Slichter, Principles of Magnetic Resonance, Harper & Row. (1963)
9. Soohoo R. F., Magnetic Thin Films, Harper & Row Publishers Inc. (1965)
10. Studies on Specular and Non-specular Reflectivities of Radar Absorbing Materials (RAM) at Submillimetre Wavelengths, Jussi Säily, Antti V. Räisänen Report S 258 February 2003
11. Hurd C.M., Contemp., Phys. 23, 469 (1982)

12. Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics Extended, Canada (1997)
13. Chikazumi S., Physics of Magnetism, Robert E. Krieger Publishing, (1978)
14. Kittel C., Introduction to Solid State Physics 7th Edit, New York (1996)
15. Kittel, Solid State Physics, (1986)
16. Kraus, Fleisch, Electromagnetics with Applications, (1999)
17. Morrish A. H., The Physical Principles of Magnetism, John Wiley & Sons Inc. (1965)
18. Rado G. T. and Weertman J. R., J. Chem. Solids., 11,315–333 (1959)
19. Griffiths, Elektromanyetik Teori, 204–205 (1996)
20. Duffin W. J., Electricity and Magnetism, London, (1990)
21. Marshall S. V., DuBroff R.E., Skitek G. G., Electromagnetic Concepts and Applications, (1996)
22. Microwave electronics : measurement and materials characterisation / L. F. Chen
23. J.A. Weil, J.R. Bolton, J.E. Wertz, A. Willey-Interscience Publication, 479, (1994)
24. C. M. Sorensen, in Nanoscale Materials in Chemistry (Ed.: K. J. Klabunde), John Wiley and Sons, Inc., New York , 2001, pp. 169
25. ,R.Ber ger, J.C.Bisse y, and J.Klia va, J. Phys.: Condens. Matter 12,9347 (2000)
26. Yüksel Köseoglu, Hüseyin Kavas, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.8, 584–590, 2008
27. T. Y. Byun, S. C. Byeon, K. S. Hong, and C. K. Kim, IEEE Trans. Magn. 35, 3445, 1999

28. Tae Young Byun, Soon Cheon Byeon, Kug Sun Hong, and Chang Kyung Kim, Journal of Applied Physics V87, No.9, 2000
29. Byunn-2000
30. V. SAmuel, A.B. Gaikwad and V. Ravi, Bull. Mater. Sci., 29 (2), 2006, 123-125.]

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk, Orta, Lise ve Üniversite öğrenimini Gaziantep’te tamamladı. 2005 yılında arasında Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimini bitirdi. 2006 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü’nde Yüksek Lisansa kayıt yaptırdı. 2009 yılında Yüksek Lisansını tamamladı. 2009 yılında Bozok Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nde Arş. Gör. olarak göreve başlamıştır.