

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

NANO-MANYETİK KOMPOZİT TEMELLİ
ELEKTROMANYETİK RADYASYON
SOĞURUCU MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

HÜSEYİN KAVAS

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE

2010

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

NANO-MANYETİK KOMPOZİT TEMELLİ
ELEKTROMANYETİK RADYASYON
SOĞURUCU MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

HÜSEYİN KAVAS

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN:
Prof. Dr. BEKİR AKTAŞ

GEBZE

2010



DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 25.10/20.10 tarihinde tez savunma sınavı yapılan HÜSEYİN KAVAS'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof.Dr. Bekir AKTAŞ

ÜYE

: Doç.Dr. Bulat RAMEEV

ÜYE

: Doç.Dr. Mustafa ÖZDEMİR

ÜYE

: Doç.Dr. Abdülhadî BAYKAL

ÜYE

: Yrd.Doç.Dr. Fikret Yıldız

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: NANO-MANYETİK KOMPOZİT TEMELLİ ELEKTROMANYETİK RADYASYON SOĞURUCU MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

YAZAR ADI : HÜSEYİN KAVAS

Elektromanyetik Radyasyon Soğurucu Malzeme (EMARSOM) teknolojisi son yıllarda çok araştırılan bir konu olup nano boyutlu malzemelerin bu teknolojiye katkıları yoğun olarak araştırılmaktadır. Bu Tez çalışmasında Nano boyutlu manyetik hexaferritler ile metal kaplanmış Poliakrilinitrile (PAN) bezlerin elektromanyetik dalga yansıtma ve geçirme özellikleri incelenmiştir. Manyetik hexaferrit olarak yüksek şekil anisotropisi ve kristal anisotropiye sahip $Ba^{+2}Fe^{+3}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O^{-2}_{19}$ nano çubukları ($X = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}$ and Zn^{+2}) nano çubukları üretilmiş ve Metal kaplama olarak PAN bezleri Ni-Co-Cr metallerinin ikili alaşım banyosunda kaplanmıştır. Üretilen kompozitlerin dielektrik ve manyetik özellikleri deneysel olarak bulunmuştur. Bu kompozitlerin Yansıma Kayıp (RL) eğrileri, tek ve çok katmanlı olarak modellenmiştir. Ayrıca FDTD metodu ile de ortam içerisinde elektromanyetik dalganın ilerlemesi modellenerek bütün modellemeler kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonucu olarak MEDAN adı verilen 152//122//M kompozitinin 8.2-26.6 GHz aralığında en düşük yansıma kayıp veren tasarım olduğu bulunmuştur.

SUMMARY

THESIS TITLE: DEVELOPING ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBING MATERIALS BASED ON NANO-MAGNETIC COMPOSITES

AUTHOR : HÜSEYİN KAVAS

Electromagnetic Radiation Absorbing Materials (EMRAM) technology is the widely studied topic in last decades and these studies are focused on nano-sized materials as an EMRAM. In this Theses study nano magnetic hexaferrites and metal coated Polyacrylnitrile (PAN) textiles are produced. Electromagnetic wave reflection and transmission properties of them were characterized. The $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+3}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}^{-2}_{19}$ ($\text{X} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}$ and Zn^{+2}) nano rods with high magnetocrystal anisotropy and shape anisotropy were synthesized. The PAN textiles were coated in a Ni-Co-Cr alloy deposition bath. The dielectric and magnetic properties of these composites were found experimentally. Reflection Loss (RL) of these composites were simulated theoretically as one and multi layer structure. Additionally the propagation of Electromagnetic wave in these composites was simulated by FDTD method and all simulation results were compared. As a result the composite called as a MEDAN with a structure of 152//122//M is found as an least reflective structure in frequency range of 8.2-26.6 GHz..

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Sanayi ve Ticaret Bakanlığı tarafından “Elektro Manyetik Radyasyon Soğurucu Malzeme (EMARSOM) Geliştirilmesi”(Kod:00185.STZ.2007-2) başlıklı proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca TUBİTAK BİDEB tarafından 2214-Yurt Dışı Doktora Araştırma Bursu ile araştırmalar desteklenmiştir. Her iki kurumda teşekkürler.

Tez danışmanım Prof. Dr. Bekir Aktaş’a teşvik, yardım ve tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca tez kapsamında hazırlanan numunelerin hazırlanmasında bilgi ve laboratuvar imkânlarını sınırsız kullandıran Doç. Dr. Abdülhadi Baykal ve Prof. Dr. Galen Stucky’nin şahıslarına ve çalışma ekiblerine teşekkürler ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTROMANYETİK TEORİ ve MODELLEME	8
2.1. Maxwell Denklemleri	8
2.2. Yansıma ve Geçme katsayıları	11
2.3. Nicolson-Ross-Weir (NRW) algoritması	15
2.3.1. Yansıma-Geçme ölçümleri için NRW algoritması	16
2.3.2. Sadece Yansıma ölçümleri için NRW algoritması	18
2.3.3. Yansıma Kaybı (RL) hesaplaması	19
2.4. Çok Katmanlı Yapılarda Yansımalar	21
2.5. FDTD modellemesi	24
3. EMARSOM MALZEMELERİ ve ÜRETİM TEKNİKLERİ	26
3.1. Nanomanyetik toz üretimi	26
3.1.1. Baryum Hekzaferritlerin Kristal Yapısı ve Literatürdeki yeri	26
3.1.2. Sentez metodu	30
3.1.3. Karakterizasyon metotları	31
3.2. Metal Kaplı Bezler	32
3.2.1. Literatürdeki yeri	33
3.2.2. Metal kaplama tekniği	34
3.2.3. Karakterizasyon metotları	37
4. KARAKTERİZASYON VE MİKRODALGA SOĞURMA ÖZELLİKLERİ	39
4.1. Manyetik Tozlar	39
4.1.1. XRD Analizi	39
4.1.2. FTIR Analizi	44
4.1.3. SEM Analizi	46
4.1.4. TEM analizi	49
4.1.5. SQUID Magnetometre	52
4.1.6. Mikrodalga dielektrik ve manyetik özellikleri	55
4.2. Bezler	60
4.2.1. XRD Analizi	60
4.2.2. SEM Analizi	63
4.2.3. Mikrodalga dielektrik ve manyetik özellikleri	70

5. SONUÇ ve YORUMLAR	81
5.1. Modellemeler	81
5.2. Manyetik Tozlarda Yansıma Kaybı	82
5.3. Metal Kaplı Bezlerde Yansıma Kaybı	88
5.4. Çok Katmanlı EMARSOM Modellemesi	93
5.4.1. X ve Ku band (8.2-18 GHz) için EMARSOM Modellemesi	94
5.4.2. X-Ku-K (8.2-26.5 GHz) için EMARSOM Modellemesi	97
5.5. FDTD modellemesi	101
6. TATIŞMA ve ÖNERİLER	104
7. KAYNAKÇA	105
8. EKLER	112
EK I - FDTD Teori ve Algoritması	112
EK II- FDTD MODELLEME İÇİN MATLAB PROGRAMI	118
EK III- FDTD MODELLEMELERİNE AİT FİLİMLER	122

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EMARSOM	: Elektromanyetik Radyasyon Soğurucu Malzeme
$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$	: Dielektrik sabitinin (permittivite)
$\mu = \mu' - i\mu''$	: Manyetik geçirgenlik katsayısı (permeability)
$\vec{E}$	: Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\vec{D}$	: Deplasman akısı (C/m ²)
$\vec{B}$	: Manyetik indüksiyon akısı
$\vec{H}$	: Manetik alan (T veya Wb/m ²)
ρ	: Elektrik yük yoğunluğu (C/m ³)
$\vec{J}$	: Elektrik akım yoğunluğu (A/m ²)
$\varepsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
$\mu_o = 0.4\pi \times 10^{-6}$ H/m	: Boşluğun manyetik geçirgenliğidir
σ	: Ortamın iletkenlik değeri (S/m)
$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_o$	: Boşluğa göre bağıl permittivite
$\mu_r = \mu / \mu_o$	: Boşluğa göre bağıl permabilite
$\tan \delta_e$	: Dielektrik kayıp tanjantı
λ	: Dalgaboyu
SM	: Segnetomagnetler
BST	: Baryum Stronsiyum titanat
γ	: İlerleme katsayısı
k	: Dalga sayısı
ω	: Açısal hız
Z	: Empedansdır
$\eta_o = 377$	: Boşluğun Empedans
$\bar{\eta}$	: Ortamın boşluğa göre bağıl empedansı
f	: Frekans
$c = 3 \cdot 10^8$ m / s	: Işık hızı

NRW	: Nicolson-Ross-Weir
SWR	:Durgun dalga oranı (SWR- Standing Wave Ratio)
S_{11}	: Yansımaya katsayısı
S_{11}'	:Metal önüne kaplanmış numune için yansımaya katsayısı
S_{21}	: Geçme katsayısı
Γ	: Yansımaya Katsayısı
T	: Geçme Katsayısı
RL	: Ölçülen veya hesaplanan Yansımaya kaybı
$\tilde{R}_{12}$	:1. ortam ile 2. ortam arasındaki toplam yansımaya katsayısı
R_{23}	:2. ortam ile 3. ortam arasındaki toplam yansımaya katsayısı
T_{12}	:Frensel katsayısıdır. (1. ortamdan 2. ortama geçiş katsayısı)
FDTD	:Zaman Uzayında Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain)
BaM	: Baryum M-tipi Hexaferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$)
μ_B	: Bohr Magnetron
M_s	: Doyum mıknatıslanması
H_c	: Koersif alan
M_r	: Kalıcı mıknatıslanma değeri
K	: Magnetic Anisotropoy Katsayısı
f_{FMR}	: Ferromanyetik rezonans frekansı
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işınlari Kırınım)
FTIR	: Fourier Transformed Infrared (Fourier Dönüştürülmüş Kızılötesi Spektrumu)
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscopy - SEM)
TEM	:Geçirmeli elektron mikroskopu (Transmission Electron Microscopy - TEM)
SQUID	: Superconducting Quantum Design
PAN	: Poliakrilinitrile
PPy	: Polypyrol
PANI	: Polyaniline
PMMA	: Polymetamethyleacrylate

PVP	: Poly(vinylpyrrolidone)
PVA	: Poly (vinyl alcohol-co-acetate)
a	: Latis hücre parametresi
c	: Latis hücre parametresi
V	: Latis hücre hacmi
(hkl)	: Hücre içersindeki yüzey indisi
$\text{\AA}$	: Angstrom (10^{-10} m)
f_c	: Limit Frekansı
dB	: Desibel
V_r	: Yansıyan dalga gerilim şiddeti
V_i	: Gelen dalga gerilim şiddeti
X band	: 8.2-12.4 GHz
Ku band	: 12.4-18 GHz
K band	: 18-26.5 GHz
1K	: 1 katmanlı
2K	: 2 katmanlı
3K	: 3 katmanlı
MEDAN	: Akımsız metodla metal kaplanmış Akrilonitril (Metal Eletrolessly Deposited on Acrylonitrile)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Elektromanyetik dalga spektrumu.	2
2.1. Numune içerisinde yansıyan ve geçen elektromanyetik dalgaların gösterimi	11
2.2. Üç katmanlı sistemde çoklu yansımanın optik serisi.	21
2.3.Yee algoritmasına göre 3 Boyutlu uzayda E ve H alanlarının indislenmesi	24
2.4. FDTD metod ile modellenen sistem	25
3.1. M tipi $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ kristal yapısı.	27
3.2.BaM içerisinde bulunan ve fazla miktarda Fe^{+3} iyonunu alabilen konumlar a: oktahedra, b:bipiramid içkonumları.	29
3.3. Ölçüme hazırlanmış düzgün torroid şekilli numuneler.	32
3.4.Akımsız metal kaplama banyo düzeneği ve kaplama esnasından görünüm	34
3.5. Kaplama öncesi ve sonrası PAN fiber ve iplik	35
3.6. a) S11 ölçümünün b) S11' ölçümünün örnek resimleri	38
4.1. Farklı Hekzaferritlerin MeO, BaO ve Fe_2O_3 kompozisyonuna göre ölçek gösterimi. Yuvarlak ve Kare gösterimler bu çalışmada üretilmiş sırasıyla Y+4S ve M+19S yapısı.	40
4.2. Yukarıdan aşağı sırasıyla Mn^{+2} , Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} ve Zn^{+2} iyon katkılı Baryum Hexaferrit numunelere ait XRD profilleri ve JCPDS-ICDD 74-1121 ait referans XRD profili	41
4.3. Numunelere ait “a”, “c” hücre parametreleri ve hacmin katkılılandırılan iyon yarıçapına bağlı grafiği.	43
4.4. Ba hexaferrit numunelere ait FTIR spektrumu	45
4.5. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $1\mu\text{m}$ dir	46
4.6. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $10\mu\text{m}$ dir	47
4.7. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $2\mu\text{m}$ dir	47

- 4.8. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $50\mu\text{m}$ dir 48
- 4.9. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $2\mu\text{m}$ dir 48
- 4.10. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 20 nm dir 49
- 4.11. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 20 nm dir 50
- 4.12. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 20 nm dir 50
- 4.13. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 50 nm dir 51
- 4.14. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 50 nm dir 51
- 4.15. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ Numunelerine ait magnetic histerisis eğrileri. 52
- 4.16. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ numunelerinin manyetik histerisisden elde edilen Ms, Mr ve Hc grafikleri. 53
- 4.17. M+19S ile Y+4S yapısının şematik gösterimi. 54
- 4.18. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri. 56
- 4.19. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri. 56
- 4.20. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri. 57
- 4.21. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri. 58
- 4.22. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri. 58
- 4.23. Co yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerin XRD desenleri ve karşılık gelen kristal yüzeyler. 60

4.24. Ni yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerin XRD desenleri ve gözlenebilen kristal yüzey.	61
4.25. Cr yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerin XRD desenleri ve gözlenebilen kristal yüzey.	62
4.26. 100 Kodlu(Ham) beze ait 200µm ve 10 µm ölçekli SEM resimleri	63
4.27. 111 Kodlu ($\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 2 µm ölçekli SEM resimleri	64
4.28. 115 Kodlu ($\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 10 µm ölçekli SEM resimleri	64
4.29. 131 Kodlu ($\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	65
4.30. 135 Kodlu ($\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 20 µm ölçekli SEM resimleri	65
4.31. 141 Kodlu ($\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	66
4.32. 145 Kodlu ($\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 2 µm ölçekli SEM resimleri	66
4.33. 161 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	67
4.34. 165 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 10 µm ölçekli SEM resimleri	67
4.35. 171 Kodlu ($\text{Cr}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	68
4.36. 175 Kodlu ($\text{Cr}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	68
4.37. 191 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	69
4.38. 195 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri	69
4.39. 111-115 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	70
4.40. 121-125 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	71
4.41. 131-135 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	73
4.42. 141-145 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	74

4.43. 151-151 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	74
4.44. 161-165 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	76
4.45. 171-175 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	76
4.46. 181-185 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	78
4.47. 191-195 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri	78
5.1. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$, Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} için hesaplanan Yansımaya Kaybı (RL).	82
5.2. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	85
5.3. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	86
5.4. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	86
5.5. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	87
5.6. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	87
5.7. 111-135 arası ve 100 kodlu bezlere ait yansımaya kayıp eğrileri	89
5.8. 141-165 arası ve 100 kodlu bezlere ait yansımaya kayıp eğrileri	90
5.9. 171-195 arası ve 100 kodlu bezlere ait yansımaya kayıp eğrileri	91
5.10. 153 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 2 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	92
5.11. 181 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ banyosunda 0.5 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	92
5.12. 152 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 1 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.	93
5.13. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansımaya kayıp (RL) çizgisine göre en verimli kombinasyonlara ait RL eğrileri.	95
5.14. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -20 dB referans yansımaya kayıp (RL) çizgisine göre en verimli kombinasyonlara ait RL eğrileri.	96

5.15. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kayıp (RL) çizgisine göre en verimli kombinasyonlara ait RL eğrileri.	98
5.16. 152//122//M tasarımına ait Çok katmanlı ve FDTD modellemelerinden elde edilen S11 parametresi.	101
5.17. MEDAN tasarımının FDTD ile 26 GHz de modelle(t=10)	102
5.18. MEDAN tasarımının FDTD ile 26 GHz de modellenmesi(t=60)	102
5.19. MEDAN tasarımının FDTD ile 26 GHz de modellenmesi(t=150)	103
5.20. MEDAN tasarımının FDTD ile 26 GHz de modellenmesi(t=210)	103

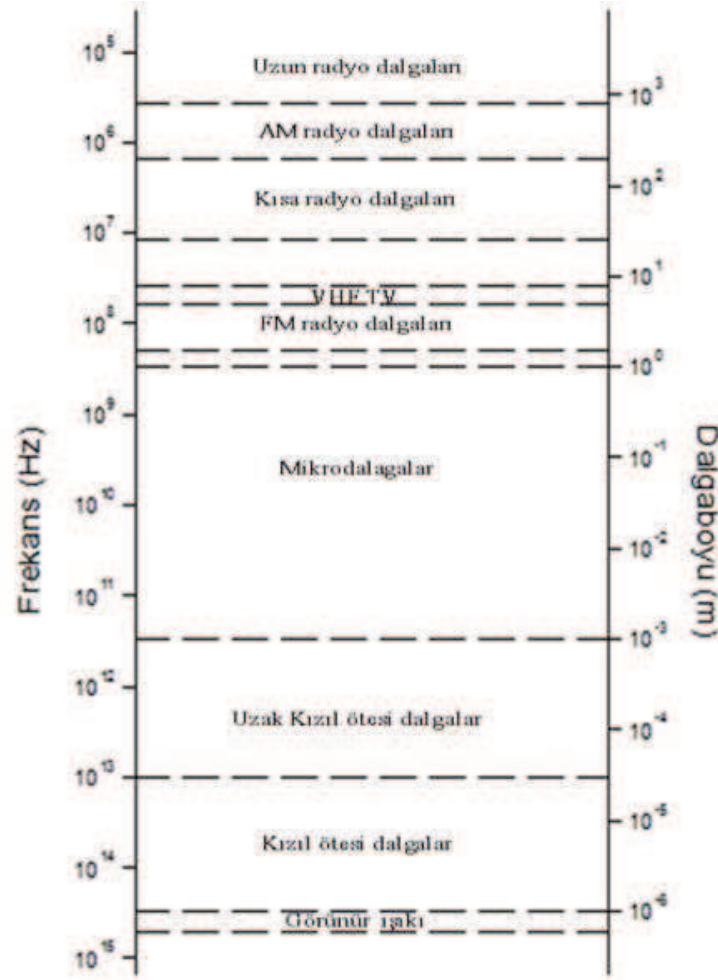
TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. M tipi hekzagonal ferrit içerisindeki Fe^{+3} iyonlarının özellikleri.	27
3.2. Kaplanan bez ve kaplama özelliklerinin kodları.	36
3.3. Kullanılan dikdörtgen kalvuzların özellikleri.	38
4.1. XRD deseninden elde edilen 2θ değerleri, (hkl) yüzeyleri arası mesafe d ve h,k,l indisleri ($\text{X}^{+2}=\text{Mn}^{+2}$ olan numuneye aittir).	42
4.2. XRD deseninden hesaplanan hücre parametreleri ve Hacim.	42
4.3 Ba hexaferritlerde gözlenen bazı Fe-O titreşimlerinin dalga sayıları.	45
5.1. Yansıma kaybı grafiklerinden elde edilen 1. ve 2. piklere ait -20 dB sınırının altında; band aralıkları, band genişlikleri, maksimum RL değerleri ve frekansları.	83
5.2. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kayıp (RL) çizgisine göre modelleme sonuçları	96
5.3. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -20 dB referans yansıma kayıp (RL) çizgisine göre modelleme sonuçları.	97
5.4. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kayıp (RL) çizgisine göre modelleme sonuçları	99
5.5. En düşük RL değerlerine -15 referans sınırının altında en geniş banda sahip 1, 2 ve 3 katmanlı tasarlanan EMARSOM lar.	100

1. GİRİŞ

Bu çalışmasının amacı, 1930'lı yıllardan günümüze kadar yaygın olarak araştırılan Elektromanyetik Radyasyon Soğurucu Malzeme (EMARSOM) teknolojisinin son on yılın en önemli araştırma konularından nano teknoloji ile geliştirilmesidir. Elektromanyetik radyasyon, boşlukta ve madde ortamında yayılabilen elektrik ve manyetik alan bileşenleri olan dalgalardır ve bu dalgaları Şekil 1'de farklı frekans ve dalga boyu aralıklarında verilmektedir. Elektromanyetik spektrumda, 0.3 GHz - 300 GHz frekans aralığı (1 m - 1 mm dalga boyuna karşılık gelen) mikrodalga bölgesi olarak adlandırılır.

EMARSOM teknolojisinin büyük ilgi görmesinin nedenleri; iyonize olmayan mikrodalga yayınının yol açtığı elektromanyetik çevre kirliliğinin hızla artması ve bu malzemelerin savunma sanayinde radar yakalanmama teknolojisinin temelini oluşturmasıdır. Bu malzemeler savunma sanayisindeki kullanım alanları dışında ticari olarak özellikle sağlık, iletişim ve güvenlik sektöründe mikrodalgalar, radarlar, kablosuz bilgi transferi (wireless), tıbbi tanı koyma ve araştırma sistemleri gibi sivil uygulamalarda da yaygınca kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalganın yayınının istenmediği ortamlara ihtiyaç duyulmasının sebebi; elektromanyetik dalgaların yaygın olarak günlük hayatta kullanımı sonucu bu dalgaların çevre ile etkileşimlerinin zararlarını azaltmak, iletişim teknolojisinde gizli bilgi ulaştırılması ve savunma sanayinde radara yakalanmama amaçlarıdır. Bu bağlamda, mikrodalga yayınınını engelleme amacına yönelik "Radar Soğurucu Malzemeler" (Stealth) ile "Elektromanyetik Parazit Kalkanları" (EMI Shielding Materials) geliştirmek için çalışmalar hızla sürmektedir. Bu açıdan, EMARSOM lerin temel görevi elektromanyetik radyasyonu belli bir alanda belli değerle sınırlamak ya da yayılmasını engellemektir.



Şekil 1.1 Elektromanyetik dalga spektrumu [1].

Bir malzemenin EMARSOM olarak kullanılabilmesi için elektromanyetik radyasyon için kayıplı ortam (lossy medium) olması gerekir. Elektromanyetik dalga için üç temel kayıp mekanizması vardır. Bunların birincisi; ortam boyunca yüklerin akışıdır (iletkenlik) ki bu sonlu ortamlar için geçerlidir. Bu tip kayıplarda ortalama kayıp güç yoğunluğu, E elektrik alanı ve σ ortamın iletkenliği ile doğru orantılıdır. İkinci kayıp mekanizması; uygulanan elektromanyetik dalganın değişken elektrik alan bileşeni ile elektrik dipollerin hareketidir. Bu kayıpta ortalama kayıp güç yoğunluğu, yine E elektrik alanı ve dielektrik sabitinin (permittivite: $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$) sanal bileşeni ile ifade edilir. Dielektrik sabiti en temel tarifi ile elektrik dipollerinin elektrik alandan ne kadar etkilendiğini yani elektriksel kutuplandığını ifade eden bir katsayıdır. Üçüncü kayıp mekanizması ise elektromanyetik dalganın değişken H manyetik alan bileşeni ile manyetik dipollerin hareketi ile oluşur. Bu kayıp da ortalama kayıp güç yoğunluğu, H manyetik alan bileşeni ve ortamın manyetik alan

ile ne kadar manyetik kutuplandığını (mıknatıslanmışlığını) belirten manyetik geçirgenlik katsayısının (permabilite: $\mu = \mu' - i\mu''$) sanal kısmı ile ifade edilir. Her üç mekanizmadaki iletkenlik (σ), dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik katsayısı (μ), frekans'a bağlı ortamın özgül değerleri olup, detayları ilerleyen bölümlerde verilecektir. Diğer bir deyişle elektromanyetik dalganın malzeme içinde yayılışı maddenin ϵ dielektrik katsayısı, μ manyetik geçirgenliği ve σ iletkenlik katsayısına bağlıdır. Bu fiziksel nicelikler genelde boşluktaki değerleri ile normalize edilirler: $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_o$ ve $\mu_r = \mu / \mu_o$. Burada ϵ_o ve μ_o boşluğun elektriksel ve manyetik geçirgenlikleridir. ϵ_r ve μ_r ise ortamın (maddenin) elektriksel ve manyetik bağıl geçirgenlikleridir ve sanal bileşenler ortamın kaybı ile ilgili niceliğidir. Ortamdaki dielektrik kayıp ϵ_r'' ortamın iletkenliğine ve μ_r'' ise mıknatıslanma şiddetine bağlıdır.

İlk radyasyon soğurucu malzeme geliştirilmesi, Siyah Karbon ve TiO_2 karışımı kullanarak Hollanda'lı Naamllooze Vennotschap Machinerreen Firması tarafından 1936' da olmuştur. Bu çalışmanın temelini oluşturacak Mikrodalga boyutunda radyasyon soğurucu malzeme olarak dielektrik, manyetik ve bunların birlikte kullanıldığı kompozitler kullanılmıştır [2] .

Dielektrik soğurucu olarak, relaksasyon dispersiyonu veya iletken katkısından dolayı yüksek ϵ'' değerine ve düşük ϵ' değerine sahip olduğu bilinen dielektrikler kullanılmıştır. Baryum titanat ve kurşun zirkonat gibi seramik ferroelektrikler yüksek elektrik geçirgenliğe ($\epsilon' = 10^3 - 10^4$) ve çok yüksek dielektrik kayıp tanjantına ($\tan \delta_e = 0.1 - 0.6$) sahiptirler [3]. Bu malzemelerden oluşan gerekli kalınlıktaki ($\sqrt{\lambda / \epsilon'}$ mertebesinde) ferroelektrik katman yeterince güçlü bir soğurucudur. Fakat yüksek ϵ' den dolayı hava soğurucu yüzeyinde yansıma katsayısı çok büyük olduğu için bu şekilde kullanılamaz. Dolayısı ile ferroelektrikler çok katmanlı sistemlere katkılandırılarak [4-6] ve kompozit kaplama ve duvar olarak [7] kullanılmalıdır. Magnetodielektrik soğurucu malzemelerde ϵ' ve μ' reel kısımlarının 1 den farklı ve büyük olması, ϵ'' ve μ'' sanal kısımlarının ise sıfırdan farklı olmasından dolayı verim yüksektir. Sonuç olarak kaplama kalınlığı dalga boyu mertebesinde

$(\lambda/\sqrt{\epsilon'\mu'})$, $\sqrt{\epsilon'\mu'}$ kez azalır, dielektrik ve manyetik kayıplar gelen dalgayı tamamen soğurmayı sağlar. Ferroelektrikler mikrodalga frekansına kadar çok yüksek dielektrik permabilitesine sahiptirler 10^3 - 10^5 . Yüksek ϵ' 'ye sahip ferroelektrik seramikten yapılmış kaplamanın rezonans kalınlığı (çeyrek dalga) çok küçüktür $(\lambda/4\sqrt{\epsilon'})$. Fakat saf ferroelektrik malzemenin uyum frekansının çok dar olması yukarıda bahsedilen özelliğin kullanılmasını engeller. Bu açıdan kompozit kaplama yapımında çok az içerikte ferroelektrik seramik kullanılmalıdır.

Suatake ve Naito [4] ferrit ve ferroelektrik içeren, ince kalınlıklı ve güçlü soğurucu özelliği olan ve iki katmanlı soğurucu malzemeyi sentezlemeyi başardılar. Benzer iki katmanlı çeyrek dalga kalınlığındaki kompozitleri Wright da [5] önermiştir. Tyulyukowski [8] plazma kireçlemesi yöntemi ile çok yüksek oranda üretilen dielektrik/ferromanyetik kaplamayı başarmıştır. Ferromanyetik ve ferroelektrik katmanlar dielektrik bağlayıcılar ile uygun tozların karışımı ile hazırlanırlar. Yapıyı dielektrik katman ile kaplamak frekans aralığını önemli ölçüde genişletip yansımayı ortadan kaldırmaktadır. Manyetik (ferrit veya karbonil demir) ve ferroelektrik (PZT gibi malzemeler) tozların polimer tutkalı içinde kullanılmış soğurucu kaplamalarda [7], uyum sorunu düşük frekanslarda kalın katman şartı ile $(\epsilon' = \mu'$ ve $\epsilon'' \approx \mu'')$, yani santimetre aralığında rezonans katman şartı ile ve milimetre aralığında ince katman şartı ile çözülmüştür [9]. Azalan ϵ' , μ' ve λ ile kaplama kalınlığı biraz değiştiğinde frekans dispersiyonu nedeniyle iç uyum durumu gerçekleşebilir. Bu ise katmanlar arası empedans uyumsuzluğundan iç yansımaları arttırmaktadır.

Belirli sıcaklık aralığında ferro-, antiferro- veya ferrielektrik özelliklerin ferro-, antiferro- veya ferrimanyetik özellikler ile birleştirilmesiyle yeni bir grup bulunmuştur ve bunlara Segnetomagnetler (SM) adı verilmiştir[10]. Bu malzemeler ile mikrodalga soğuran malzeme üretimi çok farklı ihtimalleri ortaya çıkardı ve günümüzde 80'den fazla SM bileşikleri ve bunlardan oluşmuş daha fazla sayıda katı solüsyonları bilinmektedir. SM lerin potansiyel uygulamaları Wood Austin tarafında analiz edilmiştir [11] ancak mikrodalga soğurma potansiyelleri incelenmemiştir. Bu tür malzemelerin dielektrik (ϵ') ve manyetik (μ') permabiliteleri yüksek ve şiddetçe birbirine eşit olmalıdır. İlk şart SM lerde mikrodalga'nın önemli derecede azalmasını

($\sqrt{\epsilon'\mu'}$ oranında) ve ikinci şart da SM ile boşluk arasındaki uyumu sağlar (dalga direnci $\sqrt{\mu'/\epsilon'}$ ile orantılı olduğu için) [3]. Bilinen hiç bir SM bileşiği $\epsilon' = \mu'$ şartını sağlamaz. Katı SM oluşan solüsyonlar ayrıca $\mu' \ll \epsilon'$ özelliğine sahiptir. Örneğin $Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3 - Pb(Li_{1/4}Fe_{1/4}W_{1/2})O_3$ için $\mu' = 10$ ve $\epsilon' = 930$ dır. Oda sıcaklığında güçlü mikrodalga soğurabilen sadece Ba_2FeReO_6 ferroelektrik-ferrimanyetik malzemesidir. [13]. Fakat bu malzeme çok karışık bir işleyiş ile hazırlanır ve Re gibi pahalı bir metali içerir. Bu açıdan oda sıcaklığında mikrodalga kaybı olan yeni malzemeler arayışı başka malzemeler üzerinde devam etmektedir. Ferroelektriklerin dielektrik rezanotor, mikrodalga hibrit entegre devre elemanı, planar anten gibi mikrodalga uygulamaları vardır [13–15]. Paraelektrik fazda bu malzemeler önemli ölçüde yüksek dielektrik sabite, mikrodalga aralığında düşük kayba ve uygun şekilde ayarlanabilen rezonans frekansının sıcaklık katsayısına sahiptirler. $Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$ (kısaca BST) ferroelektrik seramikler elektriksel olarak ayarlanabilir mikrodalga aletleri için çok caziptirler [13-16]. Bunun sebebi küçük boyut, hafiflik, düşük maliyet, düşük güç tüketimi ve sürekli bias elektrik alanı ile elektronik ayarlanabilen dielektrik sabitlerine sahip olmalarıdır. Bu özelliğe bağlı mümkün olan önemli uygulamalar ferroelektrik varaktor, faz değiştiriciler, ayarlanabilir filtreler gibidir.

Yeni metotlarla sentezlenmiş ferroelektrik $SrTiO_3$, $BiMnO_3$ ve $BiCrO_3$ gibi peroksit SM ler arasında oluşturulmuş katı solüsyonlardır. Ferroelektriklerden (örneğin BST) üretilmiş mikrodalga rezonatörlerindeki kompozitler, dolgu malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra alternatif mikrodalga soğurucu olarak tasarlanması beklenmektedir [17] .

Günümüzde en önemli gelişmelerden biri nanoteknolojidir. Malzemelerin nano boyutta olanları üretildikçe, bilinen özelliklerinin değiştiği fark edilmiştir. Bunun sebebi olarak parçacıklarda küçülen hacimle, yüzey alanı / hacim oranının kıyaslanabilir olması hatta birden büyük olmasıdır. Nano parçacığın hacmi içerisindeki yapı malzemenin büyük boyutlardaki (bulk) özellikleri ile aynı iken yüzeyde tamamlanmamış bağlar, bozuk kristal örgü ve gözeneklilik (porosite) gibi sebeplerden farklı özelliklere sahip olacaktır. Yüzey alanı / hacim oranının artması

ile malzemenin etkin fiziksel özellikleri, artık sadece hacimdeki yapı tarafından değil hem hacim hem de yüzey yapısı tarafında belirlenir hatta çok küçük nano yapılarda tamamen yüzey tarafından belirlenir. Bu gerçeklerin ışığında şimdiye kadar araştırılan ve kullanılan EMARSOM malzemelerin nano boyutlarında tekrar incelenmeye ve geliştirilmeye çalışılmıştır. Son yıllarda radyasyon soğurucu olarak çok araştırılan nano ferritler ve metal-polimer kompozitleri bu doktora tezinde üzerinde çalışılan temel malzemelerdir.

Geçmişte dielektrik soğurucu olarak; metaller, iletken karbon parçacıklar ve filmlerin; manyetik soğurucu olarak; ferromanyetik, ferroelektrikler ve ferritlerin radyasyon soğurucu olarak araştırıldığından kısaca bahsettik. Gerçekte ideal yansıtıcı ve soğurucu malzeme olmadığı göz önüne alınarak, bu yöntemlerle geniş bantlı ve yüksek verimli EMARSOM lar tasarlanmıştır. Farklı boy ve şekle sahip, iletken ve manyetik soğurucu malzemeler, dielektrik matrise yerleştirilerek kompozit malzemeler üretilmesi ve bunların geniş frekans aralığında yüksek verimli soğurucu olarak tasarlanması konusunda yeni yaklaşımlar bulunmaktadır. Ferrit bazlı üretimlerin temel dezavantajı sınırlı frekans aralığı ve rezonans soğurucu olmasıdır.

Son yıllarda elektromanyetik radyasyon soğurucu malzeme olarak kullanılan manyetik soğurucular, Karbonil demir ve Hekzaferritler den tasarlanmaktadır[18]. Bu malzemeler MHz ve GHz frekanslarında soğurmaya sahiptirler. Spinel ferritlere göre daha fazla manyetik anizotropiye sahip olan M-tipi Hekzaferritlerin optik özellikleri incelenmiş [19,20] olup Yansıma Kaybı (Reflection Loss) hesaplamalarına göre parçacık büyüklüğüne ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak 5-20 GHz gibi yüksek frekanslarda ayarlanabilir radyasyon soğurabildikleri tespit edilmiştir. Katkılandırılmış çeşitli Hekzaferritlerden istenilen frekanslarda kullanılmak üzere EMARSOM tasarlanması öngörülmüştür. Diğer önemli geniş bant koruyucu (shielding) malzeme araştırmalarında metal nano parçacıklar, iletken polimerler ve metal parçacıkların kaplandığı polimer kompozitler çokça yer almaktadır [18, 21-24].

Bu tez çalışması ve SANTEZ projesi kapsamında çeşitli kimyasal yöntemler ile nanoparçacık üretimi ve karakterizasyonu yapılmış olup bunlardan bazıları şöyledir; 9-20 nm boyutlarda Zn katkılı Nikel ferrit nano parçacıkları Polietilenglikol yardımcı

Hidrotermal metoduyla [25], 14-59 nm arası büyüklüğe sahip NiFe_2O_4 Mikrodalga yanma, NaOH ve NH_3 ile CTAB yardımcı hidrotermal, ve EDTA yardımcı Hidrotermal yöntemleriyle [26], Poly(1-vinyl-1,2,4-triazole) - Fe_3O_4 nano kompozitleri 12 nm olarak sonokimyasal yöntemle [27], L-Lysine polimeri kaplanmış 8 nm çaplı Demir oksit nano parçacıkları ortak çökertme metoduyla [28], 30 nm boyutlara sahip Co_3O_4 nano parçacıkları oksitleme-indirgeme yöntemiyle [29], 6-14 nm büyüklüğe sahip Mn_3O_4 Nano parçacıkları TMAOH ve NaOH ile hidrotermal metodla [30] ve Polyvinylpyrrolidone- Mn_3O_4 nanoparçacıkları 6 nm çaplı olarak polyol metodu [31] ile elde edilmişlerdir. Bu üretilen nano parçacıklar kristallografik, morfolojik, manyetik ve dielektrik özellikleri bakımından incelenmiştir. Fakat elde edilen ürün miktarının az olması nedeniyle bu üretim metotları çok miktarda soğurucu malzeme üretmek için uygun olmadığı anlaşılmıştır. Ucuz, basit, nano boyutta daha fazla ürün elde edilebilecek bir yöntem olan PMMA destekli sol-jel yanma metodu ile nano tozların elde edilmesi kararlaştırılmıştır.

Bu çalışmada yüksek manyetik anizotropiye sahip olmaları nedeniyle Hekzaferritler manyetik radyasyon soğurucu olarak düşünülmüştür. Çalışmanın diğer önemli kısmı yukarıda bahsedilen metal kaplama yöntemi ile Poliakrilinitrile (PAN) polimerlerin, Ni, Co, Cr gibi metallerin alaşımları ile kaplanarak çok geniş bant aralığında (shielding;) koruyucu özelliğe sahip EMARSOM üretim metodu ve Shielding özellikleri tartışılacaktır. Her iki malzemenin üretim şekilleri ilgili bölümlerde gerekçeleriyle detaylı anlatılacaktır. Tasarlanan malzemelerin karakterizasyonları ve 8.2 - 26.5 GHz aralığında radyasyon soğurma ve yansıtma özellikleri incelenmiş ve çok katmanlı yapı ve FDTD (Finite Difference Time Domain) Zaman Uzayında Sonlu Farklar metodu ile elektromanyetik dalgayı yansıtma özellikleri teorik olarak modellenmiştir

2. ELEKTROMANYETİK TEORİ ve MODELLEME

2.1. Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik dalgaların lineer homojen bir ortam içerisinde ilerleyişi, Maxwell denklemleri ile ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon} & \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon} \\
 \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \text{veya} & \nabla \cdot \vec{H} = 0 \\
 \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\
 \nabla \times \vec{B} &= \mu \vec{J} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

burada $\vec{E}$ elektrik alan şiddeti (V/m), $\vec{D}$ deplasman akısı (C/m²), $\vec{B}$ manyetik indüksiyon akısı $\vec{H}$ (T veya Wb/m²), ρ elektrik yük yoğunluğu (C/m³) ve $\vec{J}$ elektrik akım yoğunluğu (A/m²) dur. Deplasman akısı, manyetik indüksiyon akısı ve yük yoğunluğu daha açık ifade ile

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_o \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_r \mu_o \vec{H}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \tag{2.2}$$

şeklinde yazılır ve burada $\varepsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m, $\mu_o = 0.4 \pi \times 10^{-6}$ H/m boşluğun elektriksel geçirgenliği ve manyetik geçirgenliğidir. σ (S/m) ise ortamın iletkenlik değeridir.

Zamana bağılı durumlar için Maxwell denklemlerinin çözümü olabilecek elektrik ve manyetik alanlar zamana bağılı harmonik titreşim fonksiyonu ($e^{j\omega t}$) ve zamandan bağımsız konuma bağılı fazör terimi ($\tilde{E}(x, y, z)$ ve $\tilde{H}(x, y, z)$) ile ifade edilirler; $\vec{E} = \tilde{E}(x, y, z)e^{j\omega t}$ ve $\vec{H} = \tilde{H}(x, y, z)e^{j\omega t}$. Bu alanlar ve zamana bağılı türevleri ($\frac{d\vec{E}}{dt} = j\omega\tilde{E}e^{j\omega t} = j\omega\vec{E}$ ve $\frac{d\vec{H}}{dt} = j\omega\vec{H}$) Maxwell denklemlerinde kullanıldığında ve harmonik ifadelerden bağımsız olarak aşağıdaki gibi yazılır

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \tilde{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \nabla \cdot \tilde{H} &= 0 \\ \nabla \times \tilde{E} &= -(j\omega\mu)\tilde{H} \\ \nabla \times \tilde{H} &= \vec{J} + (j\omega\epsilon)\tilde{E}\end{aligned}\tag{2.3}$$

İletken bir ortamda $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ ifadesi son denklemin yeniden düzenlenmesinde kullandığımızda $\nabla \times \tilde{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\tilde{E}$ elde edilir. Burada $(\sigma + j\omega\epsilon)$ Maxwell denklemlerini simetrik yazmak için $j\omega(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega})$ şeklinde yazılır. Bu ifade karmaşık permitivite $\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$ olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \tilde{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \nabla \cdot \tilde{H} &= 0 \\ \nabla \times \tilde{E} &= -(j\omega\mu)\tilde{H} \\ \nabla \times \tilde{H} &= (j\omega\epsilon_c)\tilde{E}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Yüksüz bir ortamda $\rho = 0$, bu denklemlerin yeni hali

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \tilde{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \tilde{H} &= 0\end{aligned}$$

$$\nabla \times \tilde{E} = -(j\omega\mu)\tilde{H} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \tilde{H} = (j\omega\epsilon_c)\tilde{E}$$

Olarak gösterilir. Bu denklemde 3. eşitliğin rotasyonu alınır ve 4. eşitlik yerleştirildiğinde

$$\nabla \times (\nabla \times \tilde{E}) = -j\omega\mu(\nabla \times \tilde{H}) \quad (2.6)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \tilde{E}) = -j\omega\mu(j\omega\epsilon_c\tilde{E}) = \omega^2\mu\epsilon_c\tilde{E}$$

elde edilir. Genel $\nabla \times (\nabla \times \tilde{E}) = \nabla(\nabla \cdot \tilde{E}) - \nabla^2 \tilde{E}$ dönüşümü $\nabla \cdot \tilde{E} = 0$ varlığında kullanılırsa $-\nabla^2 \tilde{E} = \omega^2\mu\epsilon_c\tilde{E}$ elde edilir. Bu ifade elektrik alan için homojen dalga denklemdir.

$$\nabla^2 \tilde{E} + \omega^2\mu\epsilon_c\tilde{E} = 0 \quad (2.7)$$

ilerleme katsayısı, γ

$$\gamma^2 = -\omega^2\mu\epsilon_c \quad (2.8)$$

ile ifade edersek yukarıdaki denklem son hali aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\nabla^2 \tilde{E} - \gamma^2 \tilde{E} = 0 \quad (2.9)$$

Aynı yaklaşımla manyetik alan için homojen dalga denklemi

$$\nabla^2 \tilde{H} - \gamma^2 \tilde{H} = 0 \quad (2.10)$$

elde edilir. İlerleme katsayısı ifadesi kayıpsız ortamda

$$\gamma_0^2 = -\omega^2\mu_0\epsilon_0 \quad (2.11)$$

olarak ifade edilirken kırıcı ortamlar için ise

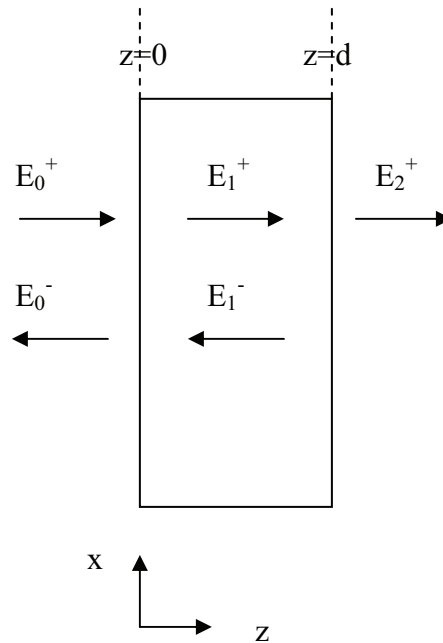
$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 = \gamma_0^2 \mu_r \epsilon_r \quad \text{veya} \quad \gamma = \gamma_0 \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \quad (2.12)$$

bulunur. İlerleme katsayısı ile dalga sayısı k arasındaki ilişki $\omega = kc_{ortam}$ kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\gamma^2 = -k^2 \quad \text{veya} \quad \gamma = jk \quad (2.13)$$

2.2. Yansıma ve Geçme katsayıları

Boşluktan bir ortam içerisine gelen dalganın geçme ve yansıma prensipleri ilk olarak Baker-Jarvis [32] tarafından 1990 de ortaya konmuştur. Bu analize göre gelen dalga, yansıyan, iç yansıyan dalgalar ve geçen dalga Şekil 2.1 de görülmektedir.



Şekil 2.1. Numune içerisinden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalgaların gösterimi

Yukarıdaki şekilde elektromanyetik dalga z yönünde ilerleyen TEM dalga olarak ele alınmıştır. Burada E_0^+ gösteriminde E elektrik alanı belirtmektedir, “+” üs işareti $+z$ yönünde yani gelen dalga yönünde, “-” üs işareti $-z$ yönünde olduğunu belirtirken, 0, 1, 2 gibi alt belirteç bulunduğu ortamı ifade etmektedir.

Elektromanyetik dalganın geldiği ortamda (0 nolu ortam: $\epsilon_0, \mu_0, \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, z \leq 0$), Elektrik alan ve Manyetik alan ($H_0 = \frac{E_0}{\eta_0}$) bileşenleri ilerleme katsayısı ifadesi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_0^+ + E_0^- = E_0^+ e^{-\gamma_0 z} + E_0^- e^{\gamma_0 z} & \hat{x} \\ H_0 &= H_0^+ + H_0^- = \frac{1}{\eta_0} (E_0^+ e^{-\gamma_0 z} - E_0^- e^{\gamma_0 z}) & \hat{y} \end{aligned} \quad (2.14)$$

İlk ortamda (1 nolu ortam: $\epsilon_1, \mu_1, \eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, 0 \leq z \leq d$), Elektrik alan ve Manyetik alan ($H_1 = \frac{E_1}{\eta_1}$) bileşenleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_1^+ + E_1^- = E_1^+ e^{-\gamma_1 z} + E_1^- e^{\gamma_1 z} & \hat{x} \\ H_1 &= H_1^+ + H_1^- = \frac{1}{\eta_1} (E_1^+ e^{-\gamma_1 z} - E_1^- e^{\gamma_1 z}) & \hat{y} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Son ortamda (2 nolu ortam: $\epsilon_0, \mu_0, \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, d \leq z$), Elektrik alan ve Manyetik alan ($H_2 = \frac{E_2}{\eta_0}$) bileşenleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned} E_2 &= E_2^+ + E_2^- = E_2^+ e^{-\gamma_0(z-d)} & \hat{x} \\ H_2 &= H_2^+ + H_2^- = \frac{1}{\eta_0} E_2^+ e^{-\gamma_0(z-d)} & \hat{y} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Elektrik alanın ve manyetik alanın 0,1 ve 2 nolu ortamlara geçişinde sürekliliğinden

$$\begin{aligned} E_0 &= E_1 \quad \text{ve} \quad H_0 = H_1 & z = 0 \\ E_1 &= E_2 \quad \text{ve} \quad H_1 = H_2 & z = d \end{aligned} \quad (2.17)$$

$z = 0$ noktasında süreklilikten

$$\begin{aligned} E_0^+ + E_0^- &= E_1^+ + E_1^- \\ E_0^+ - E_0^- &= \frac{\eta_0}{\eta_1} (E_1^+ - E_1^-) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Elde edilen bu iki eşitliğin taraf tarafa toplamından ve çıkartılmasından sırasıyla

$$E_0^+ = \left(\frac{\eta_1 + \eta_0}{2\eta_1} \right) E_1^+ + \left(\frac{\eta_1 - \eta_0}{2\eta_1} \right) E_1^- \quad (2.19)$$

$$E_0^- = \left(\frac{\eta_1 - \eta_0}{2\eta_1} \right) E_1^+ + \left(\frac{\eta_1 + \eta_0}{2\eta_1} \right) E_1^- \quad (2.20)$$

elde edilir.

$z = d$ noktasında süreklilikten

$$\begin{aligned} E_1^+ e^{-\gamma_1 d} + E_1^- e^{\gamma_1 d} &= E_2^+ \\ E_1^+ e^{-\gamma_1 d} - E_1^- e^{\gamma_1 d} &= \frac{\eta_1}{\eta_0} E_2^+ \end{aligned} \quad (2.21)$$

Bu iki eşitliğin taraf tarafa toplamından ve çıkartılmasından sırasıyla

$$E_1^+ = \left(\frac{\eta_1 + \eta_0}{2\eta_0} \right) E_2^+ e^{\gamma_1 d} \quad (2.22)$$

$$E_1^- = - \left(\frac{\eta_1 - \eta_0}{2\eta_0} \right) E_2^+ e^{-\gamma_1 d} \quad (2.23)$$

elde edilir. Denklem 2.19'a Denklem 2.22 ve 2.23 yerleştirilirse gelen dalganın geçen dalga cinsinde ifadesi elde edilir:

$$E_0^+ = E_2^+ \frac{e^{\gamma_1 d}}{4\eta_1 \eta_0} \left[(\eta_1 + \eta_0)^2 - (\eta_1 - \eta_0)^2 e^{-2\gamma_1 d} \right] \quad (2.24)$$

Toplam iletim katsayısı $T^b = \frac{E_{geçen}}{E_{gelen}} = \frac{E_2^+}{E_0^+}$

$$T^b = \frac{4\eta_1 \eta_0 e^{-\gamma_1 d}}{(\eta_1 + \eta_0)^2 - (\eta_1 - \eta_0)^2 e^{-2\gamma_1 d}} \quad (2.25)$$

Benzer işlemler Denklem 2.20'e Denklem 2.22 ve 2.23 yerleştirilirse yansıyan dalganın geçen dalga cinsinden ifadesi elde edilir:

$$E_0^- = E_2^+ \frac{e^{\gamma_1 d}}{4\eta_1 \eta_0} (\eta_1^2 - \eta_0^2) (1 - e^{-2\gamma_1 d}) \quad (2.26)$$

Toplam yansıma katsayısı $\Gamma^b = \frac{E_{yansians}}{E_{gelen}} = \frac{E_0^-}{E_0^+}$

$$\Gamma^b = \frac{(\eta_1^2 - \eta_0^2) (1 - e^{-2\gamma_1 d})}{[(\eta_1 + \eta_0)^2 - (\eta_1 - \eta_0)^2 e^{-2\gamma_1 d}]} \quad (2.27)$$

Daha kolay ifade etmek için $\Gamma = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0}$, $1 - \Gamma^2 = \frac{4\eta_1 \eta_0}{(\eta_1 + \eta_0)^2}$ ve $T = e^{-\gamma_1 d}$ ifadeleri

kullanılırsa:

$$T^b = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.28)$$

$$\Gamma^b = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.29)$$

Yansıma katsayısının malzemenin permitivite ve permabilitesine bağlı ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \eta_0, \quad \text{ise} \quad \frac{\eta_1}{\eta_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (2.30)$$

$$\Gamma = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0} = \frac{\eta_1 / \eta_0 - 1}{\eta_1 / \eta_0 + 1} \quad \text{veya} \quad \eta_1 / \eta_0 = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.31)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.32)$$

2.3. Nicolson-Ross-Weir (NRW) algoritması

Numunelerden ansıyan ve geçen elektromanyetik dalgaların Network analizör ile durgun dalga oranlarından elde edilen ve numuneye birinci ortamdan gelen ve geri yansiyarak yine birinci ortama geri gelen dalgaların gerilim şiddetlerinin oranı olan yansıma katsayısı S_{11} ve numuneden geçerek ikinci ortama geçen dalga ile numuneye birinci ortamdan gönderilen dalganın gerilim şiddetleri oranı olan geçme katsayısı S_{21} ölçümlerden elde edilir. Nicolson ve Ross [33] ve Weir [34] de bu iki katsayıyı kullanarak permitivite ve permabilitenin hesaplanacağı formülleri ortaya koydular ve elde edilen bu yöntemle Nicolson-Ross-Weir (NRW) algoritması denir. Numunenin fiziksel özelliklerinin hesaplanması için yansıma-geçme, farklı kalınlıklı aynı numunede yansıma, aynı kalınlıklı metal perdelenmiş ve perdelenmemiş aynı numunede yansıma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmadan manyetik nano toz malzemeler için yansıma-geçme algoritması ve metal kaplı bezler için ise aynı kalınlıkta metal perdelenmiş ve perdelenmemiş ölçümler için NRW algoritması kullanılmıştır.

2.3.1.Yansıma-Geçme ölçümleri için NRW algoritması

Elektromanyetik dalgaın hava ortamından örneğe gelip yine hava ortamından örnekten ayrıldığı yani hava ve örnek sınır koşullarında Durgun dalga oranı (SWR- Standing Wave Ratio) için Network analizörden elde edilecek toplam yansıma ve geçme katsayıları Denklem 2.33 ve 2.34 de belirtildiği gibi ifade edilir. [35].

$$S_{11} = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.33)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.34)$$

Bu iki eşitliğin toplam ve farkını kullanarak düzenlenecek denklemlerde aşağıdaki işlemler yapılır.

$$denk.I = S_{11} + S_{21} = \frac{T + \Gamma - \Gamma T(T + \Gamma)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.35)$$

$$denk.II = S_{21} - S_{11} = \frac{T - \Gamma + \Gamma T(T - \Gamma)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.36)$$

$$denk.I - denk.II = 2S_{11} = \frac{2(1 - T^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.37)$$

$$denk.I \times denk.II = S_{21}^2 - S_{11}^2 = \frac{T^2 - \Gamma^2}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2.38)$$

Burada yansıma katsayısı Γ , yalnız bırakmak için

$$\begin{aligned} K &= \frac{1 - (S_{21}^2 - S_{11}^2)}{2S_{11}} \\ &= \frac{1 - \Gamma^2 T^2 - T^2 + \Gamma^2}{2(1 - T^2)\Gamma} = \frac{1 + \Gamma^2}{2\Gamma} \end{aligned} \quad (2.39)$$

K değeri kabul edilir. Elde edilen ikinci dereceden $\Gamma^2 - 2K\Gamma + 1 = 0$ denkleminin çözümü;

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1}, \quad (2.40)$$

ve fiziksel olarak $\Gamma \leq 1$ şartına uygun olarak $\pm$ belirlenir. Denk I de T çekilirse;

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.41)$$

Denklem 12 ve 32 den permabilite ve permitivite yansıma katsayısı ve ilerleme katsayısı cinsinden ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\mu_r = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) \quad (2.42)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \left(\frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right) \quad (2.43)$$

Burada $\gamma_0 = i2\pi/\lambda_0$ iken malzeme içerisinde ilerleme katsayısı $T = e^{-\gamma d}$, ifadesinden çekilerek bulunur.

$$\gamma_1 = \frac{\ln(1/T)}{d} \quad (2.44)$$

Bu ifadede T birden fazla değere sahip karmaşık sayıdır, dolayısıyla γ_1 birden fazla değere sahiptir. T karmaşık uzayda kendini tekrar edecek şekilde $T = |T|e^{j\phi}$ olarak alınır

$$\gamma_1 = \frac{\ln(1/|T|)}{d} + j \left(\frac{2\pi n - \phi}{d} \right) \quad (2.45)$$

elde edilir ki burada $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. γ_1 nın gerçekte kısmı tek değere sahiptir, ama sanal kısmı birden fazla değere sahip olabilir. İlerleme katsayısının sanal kısmını faz sabiti olarak $\frac{2\pi}{\lambda_m} = \frac{2\pi n - \phi}{d}$ alınır ve buradan

$$\frac{d}{\lambda_m} = n - \frac{\phi}{2\pi} \quad (2.46)$$

Koşulu elde edilir. Numune kalınlığı dalga boyundan küçük ise ($d < \lambda_m$), $n = 0$ değeri için μ_r ve ϵ_r tek değerlere sahip olurlar [32, 36]. Numunelerin ölçüm sonrası fiziksel parametrelerin hesaplanması için NRW algoritması kullanılacaktır.

2.3.2. Sadece Yansıma ölçümleri için NRW algoritması

Aynı kalınlıklı aynı numune yansıma katsayılarını kullanarak fiziksel parametrelerin hesaplandığı bu algoritmada; önce yalnız yansıma katsayısı ölçülür (S11), daha sonra aynı numunenin arkası metal ile perdelenir ve yansıma katsayısı (S11') tekrar ölçülür. Toplam yansıma katsayısı metal perdelenmiş düzeneğe için Denklem 2.22 de aşağıdaki işlemler yapılarak elde edilir.

$$E_1^+ = \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{2\eta_2} \right) E_2^+ e^{\gamma_1 d} = \frac{\eta_1}{2\eta_2} \left(1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) E_2^+ e^{\gamma_1 d} \quad (2.47)$$

$$E_1^- = - \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{2\eta_2} \right) E_2^+ e^{-\gamma_1 d} = - \frac{\eta_1}{2\eta_2} \left(1 - \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) E_2^+ e^{-\gamma_1 d} \quad (2.48)$$

Burada ϵ_2 çok büyük değerlere sahip olduğu için $\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}$ sifıra yakın değere

sahiptir. Buradan ve yukarıdaki denklemlerde $\frac{\eta_2}{\eta_1} \ll 1$ yaklaşımı uygulanır

parantezli ifadelerde bire yakın sonuç verir. Bulunan E_1^+ ve E_1^- ifadeleri Denklem

2.19 ve 2.20 de yerine yazılırsa ve bu iki denklemin bir birine bölümünden E_0^- / E_0^+ aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{\left(\frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0} \right) e^{-2\gamma_1 d}}{1 - \left(\frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0} \right) e^{-2\gamma_1 d}} \quad (2.49)$$

Burada Γ ve T değerleri yerine yazılırsa metal perdelenmiş numune için toplam yansıma katsayısı $S_{11}' = \frac{E_0^-}{E_0^+}$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$S_{11}' = \frac{\Gamma - T^2}{1 - \Gamma T^2} \quad (2.50)$$

Denklem 2.33 deki $S_{11} = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - \Gamma T^2}$ ve Denklem 2.50 deki $S_{11}' = \frac{\Gamma - T^2}{1 - \Gamma T^2}$ ifadeleri kullanılarak basit işlemler sonucu boşluğa göre normalize edilmiş empedans $\bar{\eta}$ değeri bulunur.

$$\eta^2 = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right)^2 = \frac{(1 + S_{11})(1 + S_{11}')}{S_{11}S_{11}' + S_{11}' - 3S_{11} + 1} \quad (2.51)$$

Daha sonraki işlemler Denklem 2.42 den sonra yukarıdaki bölümdeki gibi aynen takip edilerek fiziksel parametreler elde edilir.

2.3.3. Yansıma Kaybı (RL) hesaplaması

Elektromanyetik dalgaları iyi ansızan metal düz yüzey önüne yine düz bir katman konularak ölçülen yansıma kaybı $RL = 20 \log(S_{11}')$ olarak ifade edilir [37,38]. Bir malzemenin bilinen permitivite ve permabilite katsayıları kullanılarak tek katmanlı EMARSOM ile kaplanmış bir metal yapının yansıma kaybı ise aşağıdaki gibi

bulunur. Denklem 2.49 aşağıdaki gibi düzenlenir ve son olarak sistemin empedansı elde edilir.

$$S'_{11} = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{(\eta_1 - \eta_0) - (\eta_1 + \eta_0)e^{-2\gamma_1 d}}{(\eta_1 + \eta_0) - (\eta_1 - \eta_0)e^{-2\gamma_1 d}} = \frac{\eta_1(1 - e^{-2\gamma_1 d}) - \eta_0(1 + e^{-2\gamma_1 d})}{\eta_1(1 - e^{-2\gamma_1 d}) + \eta_0(1 + e^{-2\gamma_1 d})} \quad (2.52)$$

Pay ve payda $(1 + e^{-2\gamma_1 d})$ ile bölünürse

$$S'_{11} = \frac{\eta_1 \left(\frac{1 - e^{-2\gamma_1 d}}{1 + e^{-2\gamma_1 d}} \right) - \eta_0}{\eta_1 \left(\frac{1 - e^{-2\gamma_1 d}}{1 + e^{-2\gamma_1 d}} \right) + \eta_0} \quad (2.53)$$

elde edilir burada $\tanh(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}}$ uygulanırsa;

$$S'_{11} = \frac{\eta_1 \tanh(\gamma_1 d) - \eta_0}{\eta_1 \tanh(\gamma_1 d) + \eta_0} \quad (2.54)$$

bulunur. Burada $Z_1 = \eta_1 \tanh(\gamma_1 d)$ bir katmanlı sistemin empedansıdır ve en açık yazılımı aşağıdaki gibidir;

$$Z_1 = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[\left(-j \frac{2\pi}{c} \right) f d \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right]. \quad (2.55)$$

Bu hesaplana empedans ifadesi kullanılarak teorik Yansıma Kaybı (RL) hesaplanabilir[37].

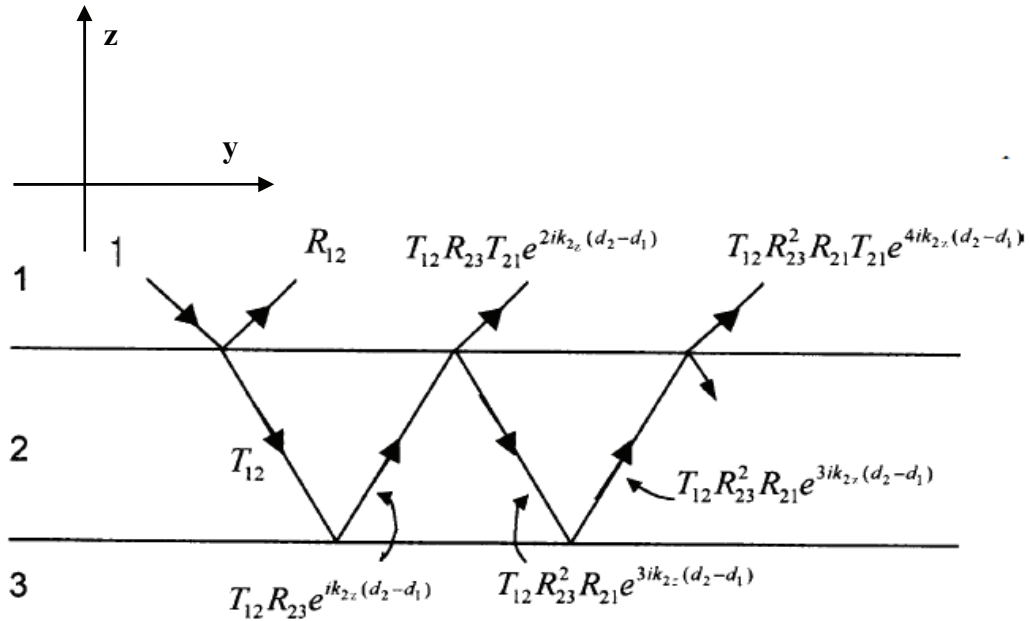
$$RL = 20 \log \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (2.56)$$

Bu formül ile permitivite ve permabilitesi bilinen malzemeler farklı kalınlıklar için modellenerek üretilmeden en verimli yapı bulunması kolaylaştırılır.

Bu çalışmada hekzaferritler için kullanılan ölçüm düzeneklerinden dolayı deneysel RL değeri edilemiyor bu hesaplamalar kullanılarak; metal yüzeyine kaplanması modellenerek farklı kalınlıklarda Yansıma Kaybı sunulacaktır. Bez numuneler için ölçülen ve hesaplanan Yansıma Kayıpları yine bu denklemler yardımı ile bulunup açıklanacaktır.

2.4. Çok Katmanlı Yapılarda Yansımalar

Birde fazla katmanlı yapılarda katmanlar arası iç yansımalar sonucu elektromanyetik dalganın geldiği yönde geri yansıyan dalga sadece ilk yüzeyden yansımayı değil bu iç yansımaları da içermektedir. Şekil 2,2’de görüldüğü normalize edilmiş bir dalganın ilk iç yansıması için, 1 ortamdan 2. ortama geçme katsayısı T_{12} olarak yazılır. Daha sonra 2. ortamda ilerleyen dalga $e^{ik_2d_2}$ katsayısı ile azalacak ve 3. ortam yüzeyinde iç yansıma R_{23} yaptıktan sonra 2. ortamda yine $e^{ik_2d_2}$ katsayısı ile şiddeti azalarak geri yönde ilerleyecek, son olarak 2. ortamdan 1. ortama geçiş yapacak T_{21} . Bütün bu katsayıların çarpımı ilk iç yansımanın (2 ile 3 nolu katmanlar arası yansıma) dalga şiddetini verir; $T_{12}R_{23}T_{21}e^{i2k_2d_2}$.



Şekil 2.2. Üç katmanlı sistemde çoklu yansımanın optik serisi [39].

Çok katmanlı sistemlerde toplam yansımayı bulmak için örnek 3 katmanlı bir sistemi inceleyelim (Şekil 2.2). Birinci ortamda bulunan bir TE dalga sırasıyla 1. 2. ve 3. ortamlarda aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$E_1 = A_1 \left[e^{-ik_1 z} + \tilde{R}_{12} e^{2ik_1 d_1 + k_1 z} \right] \quad (2.57)$$

$$E_2 = A_2 \left[e^{-ik_2 z} + R_{23} e^{2ik_2 d_2 + ik_2 z} \right] \quad (2.58)$$

$$E_3 = A_3 e^{-ik_3 z} \quad (2.59)$$

Burada $\tilde{R}_{12}$ birinci ortam ile 2. ortam arasındaki yansıma katsayısıdır ki yansıyan dalganın genliğinin gelen dalga genliğe oranına eşittir, R_{23} ise 2. ortamda aşağı doğru gelip 3. ortam yüzeyinde yansıyan dalga için Frensel katsayısıdır. Alan ifadelerindeki bilinmeyen katsayıları bulmak ve toplam $\tilde{R}_{12}$ yansıma ifadesini bulmak için $z = -d_1$ sınır koşulunda inceleyelim. Öncelikle $z = -d_1$ sınır koşulunda; 2. ortamda aşağı ilerleyen $A_2 e^{-ik_2 z}$ dalgası, 1. ortamda aşağı doğru ilerleyen $A_1 e^{-ik_1 z}$ dalgasının T_{12} (1. ortamdan 2. ortama geçiş katsayısı) kadarı ile yine 2. ortamdaki yukarı giden $A_2 R_{23} e^{2ik_2 d_2 + ik_2 z}$ dalgasının R_{21} (2. ortam ile 1. ortam arasındaki yansıma katsayısı) kadarının toplamına eşittir.

$$A_2 e^{ik_2 d_1} = T_{12} A_1 e^{ik_1 d_1} + R_{21} A_2 R_{23} e^{2ik_2 d_2 - ik_2 d_1} \quad (2.60)$$

Daha sonra $z = -d_1$ sınır koşulunda; 1. ortamda yukarı yansıyan dalga, 1. ortamda aşağı doğru ilerleyen dalganın R_{12} kadarı ile 2. ortamdan yukarı giden dalganın T_{21} kadarının toplamına eşittir.

$$A_1 \tilde{R}_{12} e^{ik_1 d_1} = R_{12} A_1 e^{ik_1 d_1} + T_{21} A_2 R_{23} e^{2ik_2 d_2 - ik_2 d_1} \quad (2.61)$$

Denklem 60 den A_2 , A_1 cinsinden

$$A_2 = \frac{T_{12} A_1 e^{i(k_1 - k_2)d_1}}{1 - R_{21} R_{23} e^{2ik_2(d_2 - d_1)}} \quad (2.62)$$

olarak bulunur ve Denklem 58 de yerine konulursa

$$\tilde{R}_{12} = R_{12} + \frac{T_{12} R_{23} T_{21} e^{2ik_2(d_2 - d_1)}}{1 - R_{21} R_{23} e^{2ik_2(d_2 - d_1)}} \quad (2.63)$$

ortam ile 2. ortam arasındaki genelleştirilmiş yansıma katsayısı elde edilmiş olur. Bu sadece ilk doğrudan yansıma ile ilk iç yansımayı içermektedir, eğer sonraki yansımaları da eklemek gerekirse Denklem 59 seri açılımından

$$\tilde{R}_{12} = R_{12} + T_{12} R_{23} T_{21} e^{2ik_2(d_2 - d_1)} + T_{12} R_{23}^2 R_{21} T_{21} e^{4ik_2(d_2 - d_1)} + \dots \quad (2.64)$$

elde edilir. N katmanlı bir yapıda Denklem 63. aşağıdaki gibi genelleştirilerek yazılırken sadece R_{23} ifadesi yerine $\tilde{R}_{i+1,i+2}$, genelleştirilmiş yansıma katsayısı alınarak bu iki katman arasındaki tüm yansıma etkisi hesaba katılmış olur;

$$\tilde{R}_{i,i+1} = R_{i,i+1} + \frac{T_{i,i+1} R_{i+1,i+2} T_{i+1,i} e^{2ik_{i+1}(d_{i+1} - d_i)}}{1 - R_{i+1,i} R_{i+1,i+2} e^{2ik_{i+1}(d_{i+1} - d_i)}} \quad (2.65)$$

şeklinde ifade edilir ve burada $T_{i,i+1} = 1 + R_{i,i+1}$ ve $R_{i+1,i} = -R_{i,i+1}$ dönüşümleri ile basitleştirilirse denklem aşağıdaki gibi elde edilir [39,40]

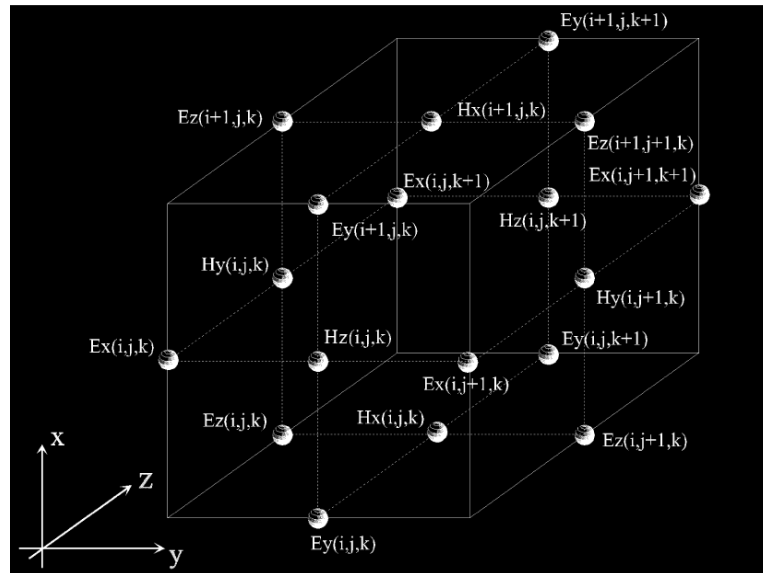
$$\tilde{R}_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2ik_{i+1}(d_{i+1} - d_i)}}{1 + R_{i,i+1} \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2ik_{i+1}(d_{i+1} - d_i)}} \quad (2.66)$$

Bu kendisini tekrar eden eşitlik N inci katmanın metal alındığı bir ortam için çözülerek ilk yüzeydeki toplam genelleştirilmiş yansıma elde edilerek farklı sayıda katmanlardan farklı kombinasyonla elde edilen sistemin Yansıma kaybı

R_L hesaplanarak bütün kombinasyonlar için minimize edilir ve en verimli sistem ortaya konulabilir.

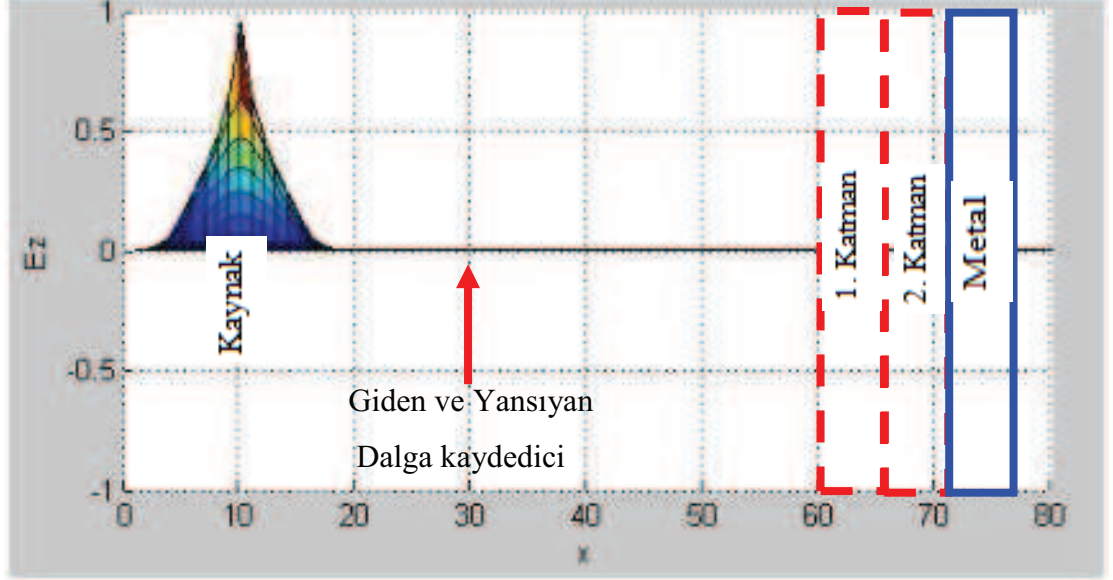
2.5. FDTD modellemesi

FDTD (Finite Difference Time Domain) - Zaman Uzayında Sonlu Farklar metodu, Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman ve konum uzaylarında sayısal hesaplama ile çözümünü veren ve elektromanyetik dalgaının ortam içerisinde ilerlemesini ve başka ortamlardan yansırken ve geçerken etkileşimini hesaplamak için yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir. İlk olarak Yee [41] tarafından 1966 da bulunmuş ve daha sonra Talove ve diğerleri tarafından [42-47] geliştirilmiştir. Teorisi detaylı olarak EK-I bölümünde verilmiş olup Şekil 2.3 de görüldüğü gibi üç boyutlu uzayda Elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri ardışık olarak indislenmiş ve bir birinin hesaplanmasında döngüsel olarak kullanılmaktadır [48]. Modellemelerde 80x80x40 birim hücre diğer bir deyişle 40x40x20 mm lik bir hacim modellenmiştir. Sonuçların güvenilirliği ve hassasiyeti için dalga boyu ile birim hücre arasında gerekli Courant şartı göz önüne alınarak algoritma yazılmıştır.



Şekil 2.3. Yee algoritmasına göre 3 Boyutlu uzayda E ve H alanlarının indislenmesi

Bir kaynaktan sinüsel titreşime sahip TM modda üretilen normalize edilmiş dalga ortamdan geçerek modellenen kaplamaya daha sonra ise iyi bir yansıtıcı olan metal bir ortama girmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. FDTD metod ile modellenen sistem

Deneysel olarak elde edilen permitivite ve permabilite katsayıları kullanılarak kaynaktan çıkan dalga'nın modellenen malzemeden yansıması ve tüm etkileşimin gözlemlenebilmesi için 320 zaman birimi hesaplama yapılmıştır. Bu süreç içerisinde kaynak ile 1. katman arasında 30. birim hücrede E alanı kaydedilmiştir. Bu kaydedilen E alanının ilk değerleri gelen dalgaya sonraki değerleri ise gelen ve yansıyan dalga'nın girişiminden oluştuğundan bu değerlerin Fourier Dönüşümü yapılarak birbirine oranlanır. Gönderilen frekansa ait Fourier şiddetlerinin oranında S11 yansıma katsayısı hesaplanır.

3. EMARSOM MALZEMELERİ ve ÜRETİM TEKNİKLERİ

3.1. Nanomanyetik toz üretimi

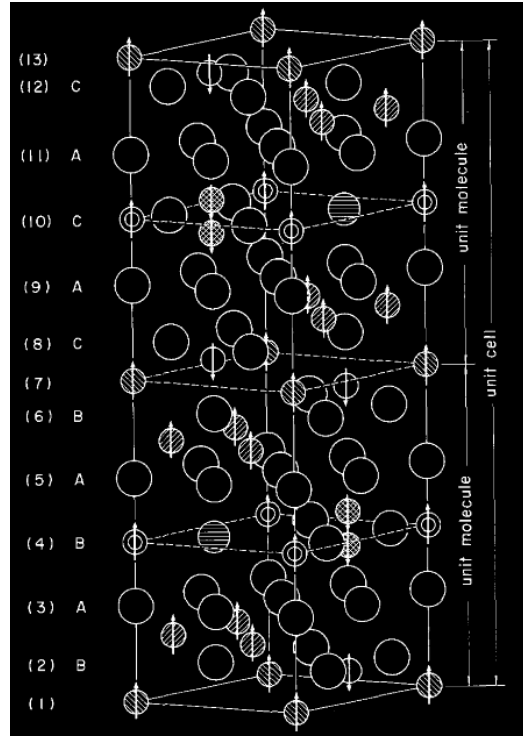
Hekzagonal ferritler elektromanyetik radyasyon soğurucu olarak oldukça araştırılan ve kullanılan malzemelerdir. Sert manyetik malzemeler olan hekzagonal ferritler yüksek, koersif alan ve permabiliteye sahip olmalarının yanı sıra yüksek magnetokristal anisotropileri nedeniyle geniş kullanım alanları vardır; kalıcı mıknatıslar, kayıt ortamı, mikrodalga cihazlar [49]. Özellikle Hekzaferritler M-tipi ve W-tipi olanları mikrodalga ve milidalgı kullanımlarında öne çıkmaktadır[50]. Bunların elektromanyetik soğurucu ve kablosuz iletişim malzemesi olarak kullanılmalarının temel sebebi bu frekans aralığında dielektrik ve manyetik kayba sahip olmalarıdır. Bu çalışmada kristal örgü yapısının daha kararlı olması nedeniyle M tipi hekzagonal ferritler seçilmiştir.

3.1.1. Baryum Hekzaferritlerin Kristal Yapısı ve Literatürdeki yeri

M-tipi hekzaferrit, $MFe_{12}O_{19}$ ($M = Ba, Sr, Pb$), sert ferrimanyetik oksitlerin önemli bir grubudur. Kristal yapıları hekzagonal, $P6_3/mmc$ uzay grubundandır ve spinel benzeri ($S = Fe_6O_8^{+2}$) ile hekzagonal ($R = MFe_6O_{11}^{-2}$) katmalarının ardışık olarak tekrarı ile oluşur. Bir birim hücresinde iki formül ünitesi bulundurulur (Şekil 3.1). Bu katmanlar kendilerini tekrar ederken c eksenine göre 180° dönmüş halde yerleşirler (RSR^*S^*). M tipi hekzaferritler c ekseninde tercih edilmiş hekzagonal magnetokristal anisotropiye sahiptirler. Demir iyonlarının manyetik spinleri c eksenine paralel yada antiparalel yönelirler. Kristallografik yapıda Fe^{+3} iyonlarının oturduğu yerler şu şekildedir: üç oktahedral ($12k, 4f_2$ ve $2a$), bir tetrahedral ($4f_1$), ve bir trigonal bipiramidal ($2b$). Tablo 3.1 de bu iyonların sahip oldukları spinlerin yönelimleri verilmektedir [51].

Tablo 3.1. M tipi hekzagonal ferrit içerisindeki Fe^{+3} iyonlarının özellikleri [51].

Koordinasyon	Fe^{+3} iyonlarının kafes(latice) hücrede yeri	yer (site) simetrisi	İyonun bulunduğu yapısal alt birim	Fe^{+3} iyon/birim kafes hücre
Oktahedral	2a	$\bar{3}m$	S	2 ↑
5-fold- bipiramidal	2b (4e)	$\bar{6}m 2(3m)$	R	2 ↑
Tetrahedral	4f ₁	3m	S	4 ↓
Oktahedral	4f ₂	3m	R	4 ↓
Oktahedral	12k	m	R-S	12 ↑

Şekil 3.1. M tipi $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ kristal yapısı: O^{2-} (○), Ba^{+2} (●) ve Fe^{+3} (diğer) [51]

BaM ferritlerin en önemli özellikleri ~ 17500 Oe kadar ya da kübik spinel ferritlerden 1000 kat fazla manyetik anisotropi alanına sahip olmalarıdır. Bu yüksek anisotropi alanı dipol-dipol etkileşimleri ve tek iyon anisotropisinden kaynaklanmaktadır [52]. Aynı yöne yönelmiş spin yapısında, Ni, Fe ve Mn spinel

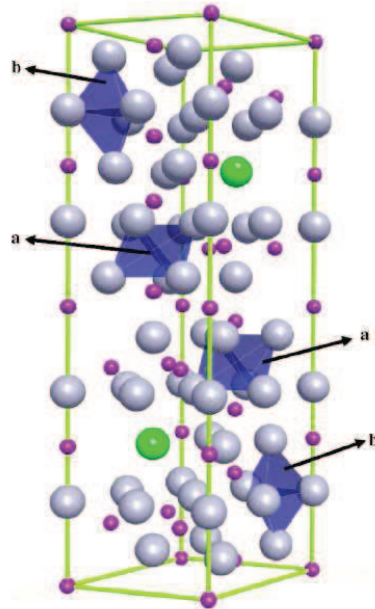
ferritleri sırasıyla 2, 4 ve 4.74 μ_B /b.f. (Bohr magneton / birim formül) sahipken, hekzaferritler 5 μ_B /b.f [51]. Tanecik büyüklüğünün manyetik özelliklere etkisinin araştırıldığı bir çalışmada [53] hekzaferritlerin 1 μm altında tek manyetik domeine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Hekzaferritlerin manyetik özellikleri temel olarak katyonlar arası değiş-tokuş etkileşmesi, parçacık büyüklüğü ve şekline dayanmaktadır. Kristal örgü içerisine farklı manyetik etkileşmeler elde etmek amacı ile çok çeşitli katyonlar katkılanmıştır. Bu katkılanmaların amacı M_s , H_c , K f_{FMR} , fiziksel özelliklerini değiştirmektir. Ba^{+2} iyonu yerine Sr^{+2} , Pb^{+2} [54-58] ve Fe iyonu yerine Co-Ti, Zn-Ti, Zn-Sn, Co-Sn, Ni-Zr ve Co-Mo [59-64] iyonlarının katkılanıldığı ilk çalışmalardır.

Son yıllarda ise Kagotani [65] Fe ve Ba iyonlarının yerine La, Zn ve Mn iyonları katkılanmak suretiyle 4 -16 GHz bant aralığında mikrodalga soğurma piklerinin yerinde kırmızıya kaymalar (yüksek dalga boyuna değişmeler) gözlemlenmiştir. Meshram [66] ise Fe iyonlarının yerine Co, Ti ve Mn iyonları katkılanarak mikro dalga soğurma spektrumunda çoklu pikler gözlemlenmiştir. Bu çoklu soğurma pikleri uzun süre incelenmiştir ve sonuç olarak sadece yüksek frekansın sebep olmadığı bununla birlikte grain boyutu, kristal yapı ve manyetik domenlerin etkili olduğu tespit edilmiştir [67]. Diğer bir çalışmada [68] Co-Mn-Ti katkılanmış Ba ferritlerin manyetik ve mikrodalga soğurma özellikleri incelenmiş olup çok pikli spektruma sahip olmasına neden olan faktörler tartışılmıştır. Mikrodalga soğurucu özellik olarak 12 GHz de en fazla 14 dB lik yansıma kaybına sahip malzemeler elde etmişlerdir. Tang ve çalışma arkadaşları [69] Ni^{+2} - Ti^{+4} katkılanmış Ba ferritlerin 10 GHz civarında en fazla 10 dB lik kayba sebep olduklarını bulmuşlardır. Bir başka çalışmada ise, Co-Mn-Ti katkılı Ba ferritlerden 12-20 GHz aralığında etkin yansıma kaybı gösteren malzemeler üretilmiş ve analizleri sunulmuştur [70,71]. Başka bir çalışmada ise çok geniş bant aralığına sahip olmasa da keskin ama yüksek soğurmalara sahip Mn-Co ve Co-Ti katkılı Sr ferritler üretilmesi ve mikrodalga özellikleri bildirilmiştir[72]. R. Sharma çalışma grubu [73], mikrodalga yardımcı sentez metodu ile elde ettikleri Ba ferrit nano çubukların Ku bantta (12.4–18.0 GHz) , -15.23 den -53.63 dB aralığında önemli ölçüde yansıma kaybına sahip olduklarını gösterdiler. Bir başka grup tarafında

mikrodalga yardımcı yöntemle sentezlenen Mn ve Ti katkılı Sr ferritlerde çok verimli olmayan ve dar bant aralığında soğurucu özellikleri bulunmuştur[74]. Mg-Ti katkılı Ba ferritlerde ise -10dBm ile -50 dB aralığında yansımaya kaybı elde edilmiştir [75]. PMMA yardımcı metodu ile sentezlenen Ba ferrit nano çubuklarında 7-10 GHz aralığında -20 dB in altında yansımaya kaybı rapor edilmiştir[76].

Yukarıda bahsedilen ve önemli ölçüde yansımaya kaybına sebep olan katkılanırılmış Ba ferritler içerisinde iyonlar arasındaki değiş-tokuş etkileşimleri farklı frekanslarda elektromanyetik dalga soğurma elde edilmesine imkan vermektedir. Yapılan bazı çalışmalarda stokiometrik oranın üzerinde iyon eklenildiğinde $Ba_{1+x}CoTiFe_{10}O_{19+x}$ ($x = 0.00; 0.05, 0.10, 0.15, 0.20$) kristal örgü içerisinde fazla atomların iç yapısal kusur olarak oturduğu ve kristal örgüyü bozmadığı gözlenmiştir[77]. Fazla miktarda Fe içeren Ba ferritler için benzer deneysel bulgularda [78-80]. M tipi hekzaferritlerde bir latice içerisinde orta Ba-O katmanının merkezine göre 180 derece simetrik iki noktada (bir bileşik formülünde 1 iyon olmak üzere) iki iyon alabilecek boşluk tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmalarda biraz fazla Fe^{+3} iyonu katkılmalarda bu iyonların 12k konumunda oktahedron yapıya, daha fazla miktarda katkılmalarda 2b konumundaki bipiramidal yapıya yerleştikleri görülmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. BaM içerisinde bulunan ve fazla miktarda Fe^{+3} iyonunu alabilen konumlar a: oktahedra, b:bipiramid içkonumları [81].

Bu bilgilerin ışığında bahsedilen boşluğa iyon katkılama amacı ile +3 değerlikli **iki** Fe iyonu yerine +2 değerlikli **üç** iyon katkılandırılması şimdiye kadar literatürde olmayan ve bu çalışmada ilk kez sentezlenmiş hekzaferritler olacaktır. Temel amaç farklı değiş-tokuş etkileşimleri meydana getirebilmektir. En yüksek net spin manyetik momente sahip Mn^{+2} ve sıfır net spin manyetik momente sahip Zn^{+2} iyonları ile farklı net spin manyetik momente sahip üçüncü bir iyon eklenmiştir. Eklenen üçüncü iyon serisi: Mn^{+2} , Co^{+2} , Ni^{+2} , Cu^{+2} ve Zn^{+2} dir ve sahip oldukları net manyetik moment sırasıyla 5,3,2,1 ve 0 Bohr magnetondur. Böylelikle farklı manyetik momente sahip iyonlar ile değiş-tokuş etkileşmesi ve manyetik momenti olmayan Zn iyonları üzerinden ise süper değiş-tokuş etkileşmelerinin oluşumu hedeflenmiştir.

Malzemenin manyetik ve elektromanyetik dalga soğurma özelliklerine doğrudan etkileyecek diğer bir konuda numune büyüklüğü ve şeklidir. Dolayısıyla nano boyutlu ve boyutları arasında 1:5 ve daha fazla oranda numune üretmek için PMMA destekli sol-jel yanma metodu ile sentez yapılmıştır. [80]. Bu çalışmada nano çubuk şekilli BaM toz numuneler elde edilmiştir. Bu yöntemin seçilmesinin kattığı avantajlar; ucuz, basit, az zaman gerektiren, nano boyutlu ürün veren bir yöntem olmasıdır. Ayrıca bu yöntemle elde edilen BaM malzemelerin literatürde iyi mikrodalga soğurucu olmaları üretim metodu olarak seçilmesinde önemli faktörlerdendir.

3.1.2. Sentez metodu

$BaFe_{10}(MnXZn)O_{19}$ nano çubukları ($X = Mn, Co, Ni, Cu$ and Zn) PMMA destekli katı-jel yanma reaksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Başlangıç çözeltisi için $Ba(II)$, $Fe(III)$, $Mn(II)$, $Co(II)$, $Ni(II)$, $Cu(II)$ ve $Zn(II)$ metal nitrat tuzları kimyasal formüle göre stokiyometrik oranda kullanılmıştır. Nitrat tuzları 0.03 M konsantrasyonda olacak şekilde damıtılmış suda çözülmüştür, daha sonra sitrik asit eklenmiştir. $Ba^{2+}:(Fe^{3+} Mn^{2+} X^{2+} Zn^{2+})$:Sitrik asit molar oranı 1:11.6:13. Çözeltinin pH değeri amonyak çözeltisi kullanılarak 7.0 sabitlenir. Elde edilen son çözelti 80 °C sıcaklığa ulaşınca ve jel kıvamı elde edinceye kadar yavaş yavaş buharlaştırılır. Daha sonra PMMA polimeri eklenir. Ultrasonik titreştirici kullanılarak 10 dakika

kariştırılan katı-jel çözeltisi 70°C sıcaklıkta akışkan jel oluncaya kadar buharlaştırılır. Kurutulan jel 110°C sıcaklıkta kurutulduktan sonra doğrudan 850°C fırında herhangi bir küçültme ve ezme olmaksızın 1 saatlik yakılmaya bırakılır ve numune hazırlanmış olur.

3.1.3. Karakterizasyon metotları

Üretilen manyetik nano tozları Hekzagonal yapıya sahip oldukları, kristal boyutları X-Işınları Kırınım (XRD) metodu ile Rigaku Smart Lab XRD Diffractometer marka cihazı kullanılarak 40 kV ve 35mA (CuKa)deney şartlarında 20-70° aralığında yapılmıştır.

Moleküldeki atomlar arası baē titreşimlerinin analiz edildiēi Fourier Dönüştürülmüş Kızılötesi Spektrumu (FTIR - Fourier Transformed Infrared) 4000 ile 400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında KBr palet referanslı olarak ölçülmüştür. Bu deneyde Perkin Elmer Spectrum BX IR modeli kullanılmıştır.

Parçacıkların sahip oldukları yüzey yapısı ve morfolojisini incelemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy - SEM) yöntemi kullanılmıştır. SEM resimleri FEI XL40 Sirion FEG Digital Scanning Microscope modeli ile alınmıştır. Bu deneyde numuneler 10mA akım ile 2 dk Altın ile kaplanarak SEM filimleri çekilmiştir.

Nano boyutlu toz parçacıkların büyüklük ve morfolojilerinin tayininde kullanılan etkili metotlardan biriside Geçirmeli elektron mikroskobu (Transmission Electron Microscopy - TEM) yönteminde elde edilen resimlerdir. FEI Tecnai G2 Sphera Microscope modelinin kullandığı bu denelerde Alkol ile seyreltilen toz numuneler TEM ızgara üzerine damlatılarak kurutulmaya bırakılır. Daha sonra numuneden nano ölçekli resimler kaydedilmiştir.

Manyetik özelliklerinin karakterizasyonu için Superconducting Quantum Design (SQUID) 6000 model magnetometre kullanılmıştır. Numunelerin yüksek

mıknatıslanması göz önüne alınarak mg mertebesinde örnekler hazırlanarak oda sıcaklığında manyetik histerezisleri -20 kOe ile 20 kOe arasında alınmıştır. Elde edilen histerilerden Doyum mıknatıslanması (M_s), Koersif alan (H_c) ve Kalıcı mıknatıslanma değeri (M_r) elde edilmiştir.

Numunelerin mikrodalga yansıtma ve geçirme özellikleri koaksiyel çubuk metodu ile ticari olarak bulunabilen 3mm iç 7mm dış çaplı SMA konektörler içerisinde alınmıştır. Numuneler ölçüm öncesi %50 oranında mum ile ısıtılarak homejen karıştırılmış ve 3 mm iç - 7 mm dış çaplı 2.7 mm kalınlıklı düzgün teker şeklinde ölçüm numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.3). HP PNA E8364B marka Network analizör yardımı ile S_{11} ve S_{21} yansıma ve iletme katsayıları kaydedilmiştir. Bütün ölçümler kullanılan SMA konektörün çalışma aralığı olan 8.2-18 GHz arasında yapılmıştır. Elde edilen katsayılardan NRW metodu ile kompleks permitivite ve permabilite değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.3. Ölçüme hazırlanmış düzgün torroid şekilli numuneler.

3.2. Metal Kaplı Bezler

Mikrodalga soğurucu malzeme olarak iletken kumaş, sentetik yün (fiber) ve polimere kaplanmış metal kompozitler kullanımı son zamanlarda artmıştır [81]. PPy (polypyrrol), PANI (polyaniline) iletken polimerlerinin polimerleşme ile kumaş üzerine kaplanmış malzemeler[82], PPy-PMMA(polymetamethyleacrylate) kompozitleri [83] ve PPy polimerinin Polisytrene [84], PVP (poly(vinylpyrrolidone)) [85] ve PVA (poly (vinyl alcohol-co-acetate) [86] ile oluşturulmuş kompozitleri

bunlardan bazılarıdır. Son yıllarda tekstil ürünlerinde kullanılan polimerlerin (sentetik fiber, iplik ve kumaş gibi) üzerinin metal kaplanması ile zayıf iletken kompozitler elde edilmiş ve mikrodalga özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada PAN polimer ham maddesinden elde edilmiş iplikten örülü bezler akımsız metal kaplama metodu ile kaplanarak mikrodalga soğuran malzeme olarak tasarlanmıştır.

3.2.1. Literatürdeki yeri

Kendiliğinden iletkenliği zayıf olan ve polimerleşme esnasında metal katkılama veya metal kaplama ile metalleştirilmiş tekstil ürünleri de yaygın olarak elektromanyetik kalkan olarak kullanımı araştırılmaktadır[87]. Bunun amaçla polimerleşme, toz metalürji teknikleri, akımlı (elektroliz) ve akımsız (electroless) kaplama metotları yaygın kullanılmaktadır. Bunlardan Akımsız kaplama metodu düşük maliyet, düşük sıcaklık işleyişinden dolayı metal içeren plastik veya tekstil kompozitlerinin hazırlanmasında daha avantajlı bir yöntemdir [88]. Akımsız kaplama metodunda metal iyonlarının indirgenerek polimer yüzeyine bağlanması ve orada çekirdeklenerek büyümesi ile kaplama sağlanmaktadır. Bu konuda yüksek hacimli PAN (poliacrylonitrile) fiberlerinin yüksek elastikiyet ve bazı mekanik özellikleri ile metal kaplı kompozitlerinin yüksek frekanslarda mikrodalga kalkanı olarak tasarlanmıştır[88,89]. Özellikle manyetik metal olan Nil ve Com kaplanmış PAN kompozitler de 20 GHz üzeri frekanslarda -20 DB den daha düşük geçirme özelliğine sahip oldukları rapor edilmiş ve bu frekanslarda çalışabilecek iyi bir mikrodalga kalkanı bulunmuştur.[87]

Bu bilgilerin ışığında PAN hammaddesi olan fiber, iplik ve bu ipliklerden örülmüş bezlerin akımsız kaplama metodu kullanarak Co, Ni, Cr gibi manyetik özellikleri de olan metalleri ile kaplanmıştır. Elde edilen kompozitlerin fiziksel özellikleri ilerleyen bölümlerde tartışılacaktır.

3.2.2. Metal kaplama tekniği

Akımsız kaplama yöntemi ile metal yapı üretimi metal iyonunun indirgenmesine dayanmaktadır. Bu indirgenme reaksiyonu sonucu üretilen elektronlar kaplanan yüzeyde çekirdeklenmiş metal iyonlarına ulaşarak burada büyümeye başlar. Oksitlenme-indirgenme reaksiyonu malzemenin katalitik yüzeyinde olur. Bu yüzey metallerin çekirdeklenme kısmını barındırır. Akımsız çözeltilerin çoğu sıvı olduğu için depozisyon sıcaklığı 100°C aşmaz. Plaka örneğın şekil ve büyüklüğünde bir sınır yoktur ve depozisyon çözülebilen metal tuzlarında gerçekleştirilir. Reaksiyon hızı banyo konsantrasyonu ile kontrol edilir, ve endüstriyel sistemde yüksek üretim hızı sağlamak için yeterince hızlıdır.

Akımsız kaplama metodu kullanılarak, Poliakrilinitril (PAN) iplik ve fiberleri Ni, Co ve Cr gibi metal alaşımlarla kaplanmıştır. Şekil 3.4 de bu kaplama tekniği için tasarlanmış banyo tertibatı görölmektedir.



Şekil 3.4. Akımsız metal kaplama banyo düzeneği ve kaplama esnasından görünüm

Banyo için öncelikle üretim esnasında oluşabilecek sanayi yağlanması (Ön temizleme-Yağ alma) ve kirleri nötr deterjan ile yıkanarak bol su ile temizlenir kurutulma aşamasından sonra iplikler kaplanmaya hazır hale gelir. Akımsız kaplama metodu temel olarak üç farklı banyodan oluşmaktadır ve birde kaplama sonrası işlemlerle birlikte 4 aşaması şu şekilde sıralanır; hassaslaştırma (Sensitization),

Aktifleştirme (Activation), Kaplama (Deposition) ve Son işlem (post treatment). Kaplamalar, banyo sıcaklıkları, pH değerleri, çözelti içerikleri ve derişimi tamamen sanayi de kullanılan plastik kaplama şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kaplama öncesi ve sonrasında PAN iplik ve fiberlerin görünümü sırasıyla Şekil 3.5 deki gibidir.



Şekil 3.5. Kaplama öncesi ve sonrası PAN fiber ve iplik

Ön temizleme aşamasında kaplanacak malzeme iyonik olmayan bir deterjanla (pH:7) yıkanır, ve sonra damıtılmış su bolca yıkanarak 40 °C de kurutulur. Hassalaştırma aşamasında SnCl_2 (Kalay klorür) ve HCl çözeltilerinden hazırlanan banyo kullanılır. Bu aşamada kaplanacak malzeme yüzeyinde kimyasal bazı bağlar koparak bağ yapmaya hazır hale getirilir. Sıradaki diğer aşama aktifleştirme aşamasıdır. Bu aşamada metal çekirdeklenmesini sağlayacak olan ve çok aktif metal olan PdCl_2 kullanılır. Bu banyonun uzun süreli kullanılması için yardımcı olarak HCl (Hidroklorik asit) ve H_3BO_3 (Borik asit) kullanılır. Kaplama aşamasında ise kaplanacak metal veya metallerin tuzları, NaOH ve bazı ticari çökmeyi engelleyen kimyasallarla hazırlanır. Bu aşamalar arasında malzeme bolca saf su ile yıkanır. Son

aşama da ise kaplanmış metallerin oksitlenmesini engellemek veya geciktirmek için moleküler ağırlığı düşük bir polimer banyosuna daldırıldıktan sonra kurutulur.

Polimer malzemeler ticari olarak faaliyet gösteren AKAL A.Ş. iplik firmasından temin edilmiştir. PAN sentetik ipliklerin metal kaplanması ve daha sonra örülerek analiz edilmesi pek tercih edilmemiştir. Bunun sebebi kaplanmış ipliklerin daha sonra makine örgüsü yapılabilmesi için büyük miktarlara ihtiyaç duyulması, ve el yordamı ile örgünün homojen ilmeklerden oluşmamasıdır. Dolayısıyla ham iplikler bez olarak sanayi şartlarında düz örgü şeklinde örüldükten sonra metal kaplanmıştır. Kaplama şartların ve kaplanan malzemeler gibi bazı parametreler değiştirilerek en iyi soğurucu kompozitin bulunması hedeflenmiştir. Farklı tasarlanmış bezler için 3 basamaklı kodlama kullanılmıştır. Yüzler basamağı bez çeşidini, onlar basamağı kaplanan metal alaşım türünü ve birler basamağı kaplama süresini göstermektedir (Tablo 3.2)

Tablo 3.2. Kaplanan bez ve kaplama özelliklerinin kodları

Kod	Kaplanan örgünün Hammaddesi	Metal banyo kompozisyonu	Banyo (kaplama) süresi
1xx	%100 Poliakrilik		
2xx	%70 Poliakrilik %30 Yün		
3xx	%50 Poliakrilik %50 Yün		
4xx	%100 Poliester		
x1x		Ni _{0.2} Co _{0.8}	
x2x		Ni _{0.5} Co _{0.5}	
x3x		Ni _{0.8} Co _{0.2}	
x4x		Cr _{0.2} Co _{0.8}	
x5x		Cr _{0.5} Co _{0.5}	
x6x		Cr _{0.8} Co _{0.2}	
x7x		Cr _{0.2} Ni _{0.8}	
x8x		Cr _{0.5} Ni _{0.5}	
x9x		Cr _{0.8} Ni _{0.2}	
	xx1		0.5 dk
	xx2		1 dk
	xx3		2 dk
	xx4		4 dk
	xx5		8 dk

i) Kaplanacak bez çeşidi: Dört farklı bez, yukarıda belirtilen firmadan alınmış; %100 Poliakrilik, %70 Poliakrilik-%30 Yün, %50 Poliakrilik-%50 Yün ve %100 Polyester ipliklerden örülmüştür. Bu bezlerden özellikle %100 poliakrilik içeren iplikden örülmüş ((1xx) kodlu) bezlerin daha iyi ve homojen olarak metal kaplandığı görsel olarak tespit edilmiştir ve kaplamalara %100 poliakrilik kumaşla devam edilmiş olup diğer bezlerdeki homojen olmayan ve kötü kaplanma sebebinin araştırılması ve uygun şartların bulunması çalışmanın dışında bırakılmıştır. Burada yün miktarı arttıkça bez sertliği azalmakta ve aynı örgü ve ilmek miktarına rağmen örgü kalınlığı azalmaktadır. Bu ürüne farklı kullanım alanları sağlamakla birlikte araştırma konumuzun doğrudan ilgilendirmemesi nedeniyle ileriki araştırmalara bırakılmıştır. Yukarıdaki bez türleri üretim esnasında olabilecek kirlerden arındırmak amacıyla deterjan ile yıkanarak kurutulur ve kaplanmaya hazır hale getirilir. Kaplamaların etkisinin görülmesi için ham kaplanmamış (100 kodlu bez- %100 poliakrilik) metal kaplanmamış bezlerle birlikte ölçüm alınacaktır.

ii) Kaplanan alaşım türü: Kaplamalar Akımsız (Electroless) metal kaplama tekniği Cr ve Pd destekli yöntemle avantajları gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde son uygulanan havuzda bulunan metal veya alaşım tuzlarını; $Ni_{0.2}Co_{0.8}$, $Ni_{0.5}Co_{0.5}$ ve $Ni_{0.8}Co_{0.2}$ alaşımları kaplama olacak şekilde ayarlanır.

iii) Kaplama süresi: Örgülerin alaşım kaplaması yapılacak banyo içerisinde bulundurulma süresini kaplama süresi olarak ifade edeceğiz. Bu süreler: 0.5 dk, 1 dk, 2 dk, 4 dk ve 8 dk olacak şekilde fiber ve ipliklerle yapılan öncü deneyler sonucu tespit edilmiş ve tatbik edilmiştir. Kaplama süresi kaplama kalınlığını ve oluşan alaşım boyutunu etkisi analiz kısmında tartışılacaktır.

3.2.3. Karakterizasyon metotları

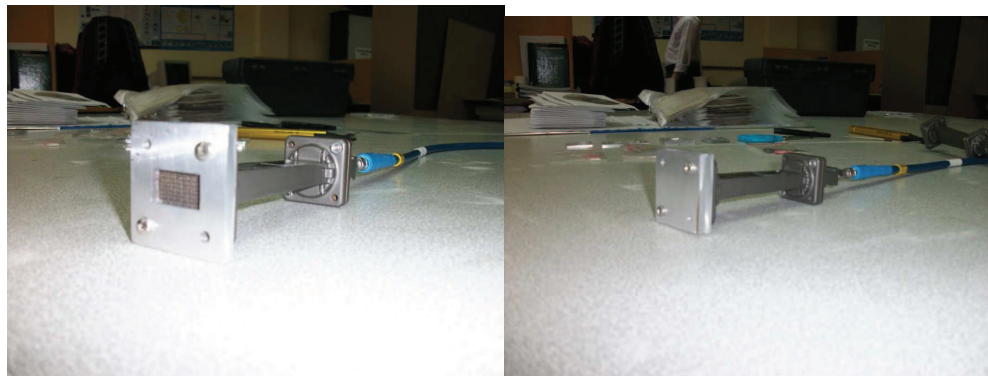
Metal kaplanmış bezler Rigaku Smart Lab XRD marka cihaz ile 40 kV ve 35mA (CuK α) deney şartlarında 20-70° aralığında XRD spektrumu alınmıştır.

Metal kaplamaların polimer kumaş üzerinde oluşturduğu yüzey yapısı ve morfolojisini incelemek için çekilen SEM resimleri FEI XL40 Sirion FEG Digital Scanning Microscope modeli ile elde edilmiştir. Kumaştan alınan bir parça fiber 10mA akım ile 2 dk Altın ile kaplandıktan sonra SEM filmleri çekilmiştir.

Metal Kaplı bezlerin sadece kendisinin ve metal perdelendikten sonra metal ile birlikte mikrodalga yansıtma özellikleri dikdörtgen kılavuzlar kullanılarak alınmıştır(Şekil 3.4.). Kullanılan kılavuzların uygulama bandı (frekans aralığı) Tablo 3.3 de özetlenmiştir. HP PNA E8364B marka Network analizör yardımı ile S11 ve S11' olarak metal perdelemesiz ve perdelemeli yansıma katsayıları kaydedilmiştir. Elde edilen katsayılardan NRW metodu ile kompleks permitivite ve permabilite değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 3.3. Kullanılan dikdörtgen kılavuzların özellikleri

Band	Kesitler (mm x mm)	Limit Frekansı f_c (GHz)	Maksimum Frekans (GHz)	Frekans aralığı (GHz)
X	22.86 x 10.16	6.557	13.114	8.20–12.4
P	15.80 x 7.90	9.487	18.974	12.4–18.0
K	10.67 x 4.32	14.048	28.096	18.0–26.5
R	7.112 x 3.556	21.082	42.164	26.5–40.0



Şekil 3.6. a) S11 ölçümünün b) S11' ölçümünün örnek resimleri

4. KARAKTERİZASYON VE MİKRODALGA SOĞURMA ÖZELLİKLERİ

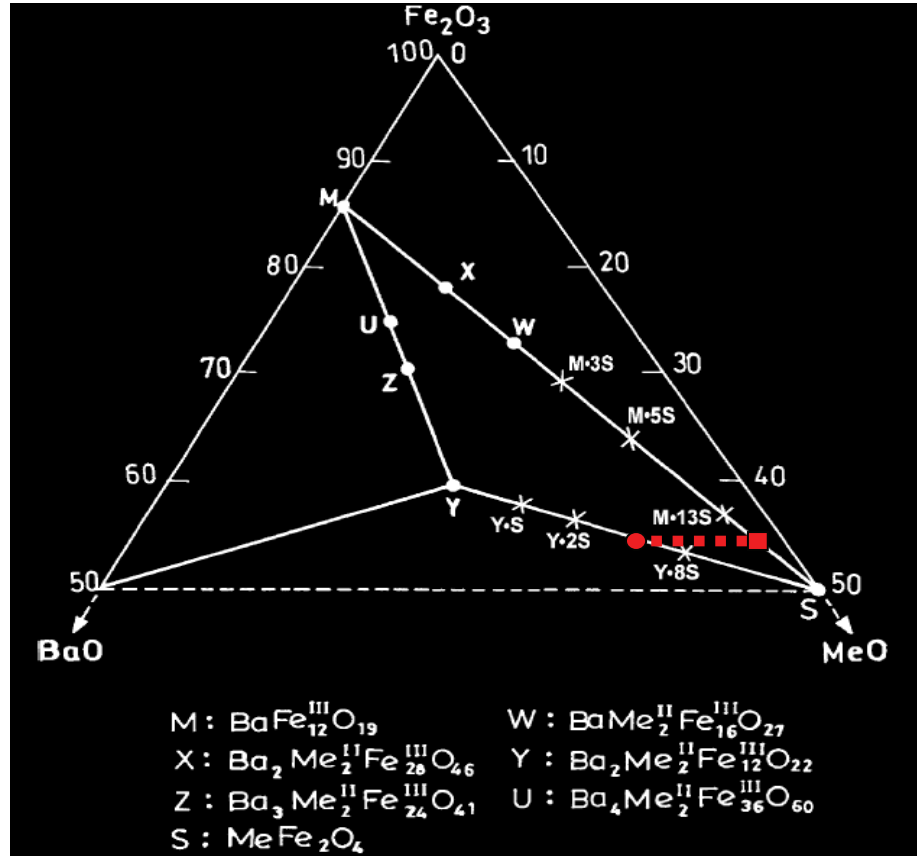
Bu bölümde üretilen Hekzaferrit nano tozlarının ve metal kaplanmış polimer bez kompozitlerin X-ışını kırınım (X-ray diffraction, XRD) metodu ile kristallografik yapıları, şekil ve yapıları ise Geçmeli elektron mikroskobu (Transmission Electron Microscopy, TEM) ve Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscopy, SEM) ile incelenecektir. Ek olarak Hekzaferritlerin oda sıcaklığındaki manyetik özellikleri SQUID Magnetometre ile ölçülmüştür. Bu çalışanın temelini oluşturan mikrodalga yansıtma geçirme ve soğurma özelliklerini de Network analizör yardımı ile ölçülmüştür.

4.1. Manyetik Tozlar

4.1.1. XRD Analizi

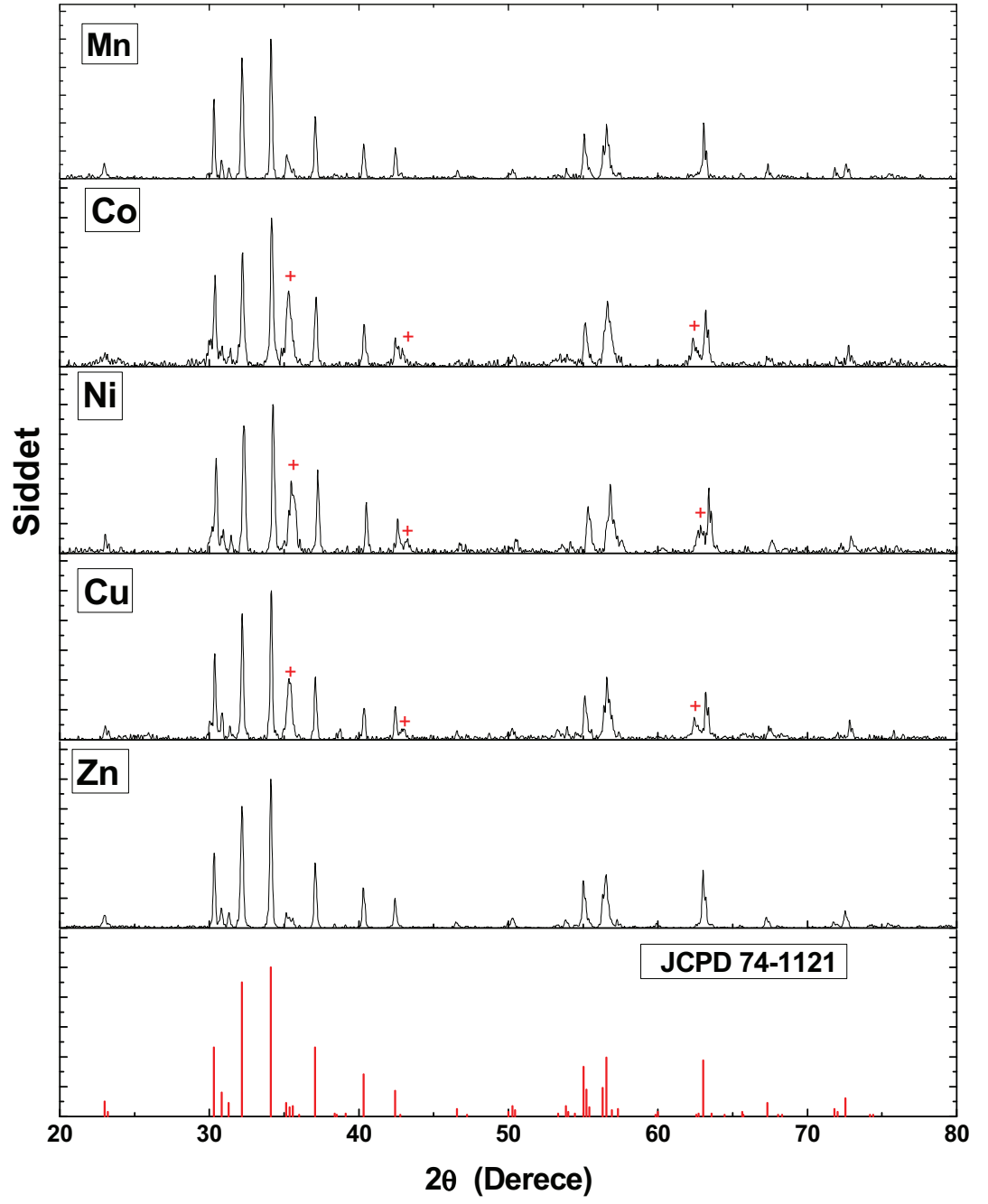
$BaFe_{12}O_{19}$ temel M-tipi Hezaferritler ve diğer X,Z,W,Y,U tipi hexaferritler aşağıdaki Şekil 4.1 de MeO (Metal-oksit) Fe_2O_3 ve BaO yüzde oranı olarak üçgen skalada gösterilmiştir [90]. Hedeflenen $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$ hexaferrit yapısı ($X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}$ ve Zn^{+2}) aşağıdaki Şekil 4.1 de daire ve kare nokta ile belirtilmiş olup sırasıyla Y+4S ve M+19S yapısındaki kompozisyonlara eşittir. Her iki yapıda daha aynı oranda MeO (%44.44) ve Fe_2O_3 (%55.56) içermektedir. Üretilen numunelere ait XRD profillerinden kristallografik yapılarının $BaFe_{12}O_{19}$ (JCPDS-ICDD 74-1121) yapısında olduğu Şekil 4.2. den anlaşılmaktadır. Burada $X^{+2} = Co^{+2}, Ni^{+2}$ ve Cu^{+2} katkılı numunelerde bazı piklerin şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Bu pikler spinel ferritlerde (örneğin Fe_3O_4) de bulunan ortak 311(100), 400(20), 440(40) yüzeylerine (şiddet) ait piklerdir ki bahsedilen şekilde + ile işaretlenmişlerdir. Buradan $X^{+2} = Co^{+2}, Ni^{+2}$ ve Cu^{+2} katkılı numunelerin kristal yapılarında daha fazla spinel yapının varlığından dolayı ve diğer iki numunede $X^{+2} = Mn^{+2}$ ve Zn^{+2} ise spinel yapı ile ortak bu piklerin şiddetlerinin azlığından dolayı yola çıkarak bunların sırasıyla M+19S yapısı ile Y+4S yapısına sahip olduklarını kabaca

söylenebilir. Spinel yapıya ait XRD piklerindeki artış ve Y+2S ve Y+8S yapılar için daha önce Sudakar ve arkadaşları [90] tarafından gözlemlenmiş ve sunulmuştur.



Şekil 4.1. Farklı Hekzaferritlerin MeO, BaO ve Fe₂O₃ kompozisyonuna göre ölçek gösterimi. Yuvarlak ve Kare gösterimler bu çalışmada üretilmiş sırasıyla Y+4S ve M+19S yapısı[90].

XRD desenlerini ve Debye Scherrer $D_{XRD} = 0.9\lambda/B\cos\theta_B$ denklemini kullanarak kristal boyutların hesaplanmış ve $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$ hexaferrit $X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}$ ve Zn^{+2} numunelerinin kristalit boyutları sırasıyla D_{XRD} : 48.3, 38.3, 46.5, 47.8, 45.2 ve 44.2 nm olarak bulunmuştur. Burada λ , X-ışını dalga boyu (1.541 Å), θ_B en şiddetli XRD pikinin bulunduğu kırınım açısının yarısı, B ise bu pikin yarı şiddetteki genişliğinin radyan değeridir. Sonraki bölümlerde boyutların TEM ve SEM resimleri ile karşılaştırmalı yorumu yapılacaktır.



Şekil 4.2. Yukarıdan aşağı sırasıyla Mn²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺ ve Zn²⁺ iyon katkılı Baryum Hexaferrit numunelere ait XRD profilleri ve JCPDS 74-1121 ait referans XRD profili

XRD piklerinin olduğu açılardan Bragg yasası kullanılarak (hkl) indisine sahip katmanlar arası mesafe d bulunmuş ve Tablo 4.1 listelenmiştir. Daha sonra hexagonal kristal yapılı birim hücreler için $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$ ifadesini kullanarak en küçük kareler yöntemi (Least Square Method) ile a ve c hücre parametreleri ve bu parametreler yardımı ile de hacim $V = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 c$ hesaplanmıştır.

Sonuçlar Tablo 4.2 de listelenmiştir.

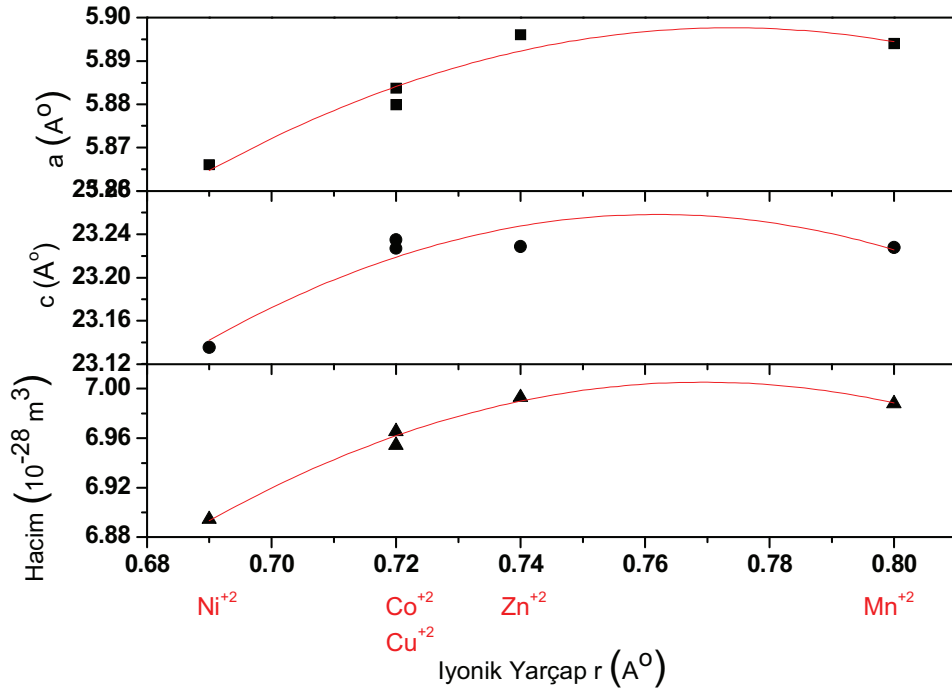
Tablo 4.1. XRD deseninden elde edilen 2θ değerleri, (hkl) yüzeyleri arası mesafe d ve h,k,l indisleri.(Tablo X⁺²=Mn⁺² olan numuneye aittir.)

h	k	l	2θ	d (Å)
0	0	6	22,97	3,87
1	1	0	30,32	2,95
0	0	8	30,82	2,90
1	1	2	31,32	2,86
1	0	7	32,17	2,78
1	1	4	34,12	2,63
2	0	0	35,18	2,55
1	0	8	35,64	2,52
2	0	3	37,09	2,42
2	0	5	40,33	2,24
2	0	6	42,44	2,13
1	1	10	42,84	2,11
2	1	7	55,07	1,67
2	0	11	56,56	1,63
2	1	10	62,23	1,49
2	2	0	63,07	1,47
2	0	14	67,37	1,39
2	2	8	71,89	1,31
3	1	7	72,60	1,30

Tablo 4.2. XRD deseninden hesaplanan hücre parametreleri ve Hacim.

İyonik Yarıçap (Å⁰)	X⁺²	a (Å)	c (Å)	V (10⁻²⁸ m³)
0.8	Mn ⁺²	5.8940	23.2277	6.9881
0.72	Co ⁺²	5.8836	23.2348	6.9656
0.69	Ni ⁺²	5.8660	23.2353	6.8944
0.72	Cu ⁺²	5.8799	23.2266	6.9543
0.74	Zn ⁺²	5.8960	23.2286	6.9931

Bu tabloda yer alan diğer bir sütunda katkılandırılan iyonların iyonik yarıçapları. Literatürde iyonlara ait yarıçapları deneysel ve hesaplamalı olarak sunulmuş çok fazla sayıda kaynak bulunmaktadır. Aynı iyon farklı kristal örgülerde farklı iyon yarıçapları bulunmaktadır. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$ numunelerinde $X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}$ ve Zn^{+2} iyonları için spinel ferritlerde genel olarak kullanılan yarıçaplar tercih edilmiştir ve bunlar sırasıyla; 0.8, 0.72, 0.69, 0.72 ve 0.74 Å [51]. Bu yarıçap değerlerinden elde edilen çarpıcı bir sonuçta yarıçapı 0.73 Å'den büyük iyon katkılama kristal fazın Y+4S yapıda ve bu değerden küçük iyonlar ise M+19S yapısını tercih etmesidir.



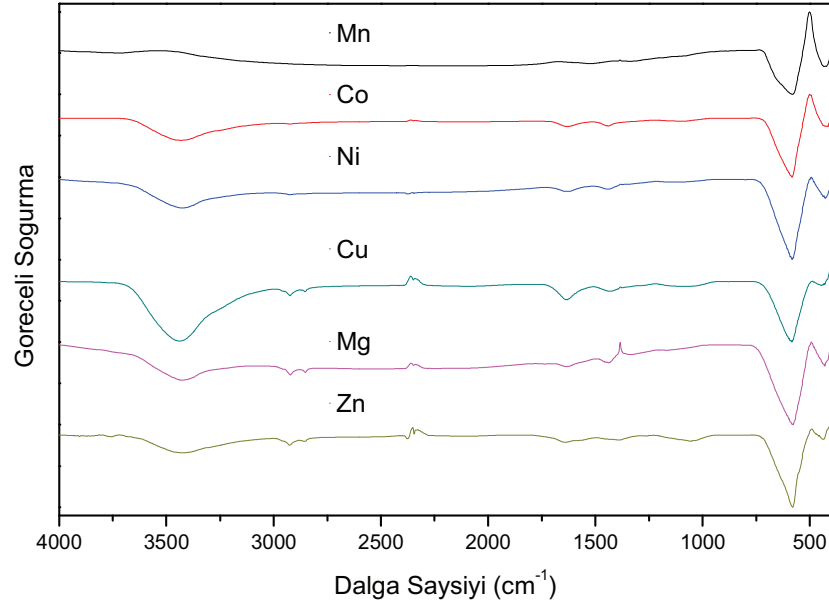
Şekil 4.3. Numunelere ait “a”, “c” hücre parametreleri ve hacmin katkılandırılan iyon yarıçapına bağlı grafiği.

Şekil 4.3 iyon yarıçapları ile “a” ve “c” hücre parametreleri ve Hacmin değişimi gösterilmektedir. Genel olarak iyon yarıçapı r arttıkça a , c ve hacim konkav bir eğri olarak artmaktadır. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$, $X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}$ ve Zn^{+2} numuneleri için “a” parametreleri sırasıyla 5.8940, 5.8836, 5.8660, 5.8799 ve 5.8960 Å, “c” parametreleri sırasıyla 23.2277, 23.2348, 23.2353, 23.2266 ve 23.2286 Å olarak hesaplanmıştır. Buradan Mn^{+2} ve Zn^{+2} katkılı iyonların “a” hücre

parametresinde beklenilenden fazla artışa sebep olmuştur. Literatürdeki “a” değerlerden 5.892, 5.89, 5.889, 5.876 Å [51] büyük olması +3 yüklü iki Fe iyonu yerine +2 yüklü üç iyonun girmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer numunelerde ise kristal yapı fazı daha çok spinel yapı içermektedir ve büyük yarıçaplı Mn ve Zn iyonları ile daha az spinel yapı olması fazla iyon katkılandırmanın etkisinin gözlemlenebilirliğini artırmaktadır. Diğer hücre parametresi “c” için 23.194, 23.20, 23.182 ve 23.17 Å değerlere sahip çalışmalar sunulmuştur [51] ve bütün numuneler için bu değerler kıyaslanabilir büyüklükte dirler ve fazla iyon katkılandırılması “c” parametresinde fark edilir bir artış sağlamamıştır bunu “c” parametresinin iyon yarıçapına oranının 30 kattan büyük olması ile izah edilebilir.

4.1.2. FTIR Analizi

Şekil 4.4 de, $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ ($\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}$ ve Zn^{+2}) numunelerine ait 400-4000 cm^{-1} aralığında FTIR spektrumu görülmektedir. Burada 2800-2900 cm^{-1} civarındaki pik üretim esnasında yardımcı olarak kullanılan PMMA polimerinden kalan organik fazdan 3500 cm^{-1} civarındaki pik ise malzeme tarafından emilen sudan (nem) kaynaklanmaktadır. Düşük dalga sayısında var olan iki pik ise Ba hekzaferritlerde bulunan metal-oksijen bağ titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu piklerin yerleri aşağıdaki Tablo 4.3 de listelenmiştir. Genel bir BaM Hekzaferritlere ait FTIR spektrumunda 103-145 cm^{-1} arasında Ba-O titreşim piki, 504 546 ve 588 cm^{-1} civarında $4f_1$ konumundaki FeO_4 tetrahedron yapıdaki Fe-O bağ titreşim piklerini, 394 ve 440 cm^{-1} civarında $4f_2$ konumundaki FeO_6 octahedron yapıdaki Fe-O bağlarına ait A_{2u} titreşim piklerine ait olduğu bilinmektedir[91-93]. Buradan 580-584 cm^{-1} aralığında olan pikler (ν_1) $4f_1$ konumundaki FeO_4 tetrahedron Fe-O bağlarına ve 430-438 cm^{-1} aralığında olan pikler (ν_2) $4f_2$ konumundaki FeO_6 oktahedron Fe-O bağlarına ait oldukları açıktır. Değişen iyon türü ile bu titreşimlerde gözle görülür bir değişiklik bulunamamıştır fakat kristal yapının Baryum hexaferritlere uygun Fe-O titreşimleri gözlenmiştir.



Şekil. 4.4. Ba hexaferrit numunelere ait FTIR spektrumu

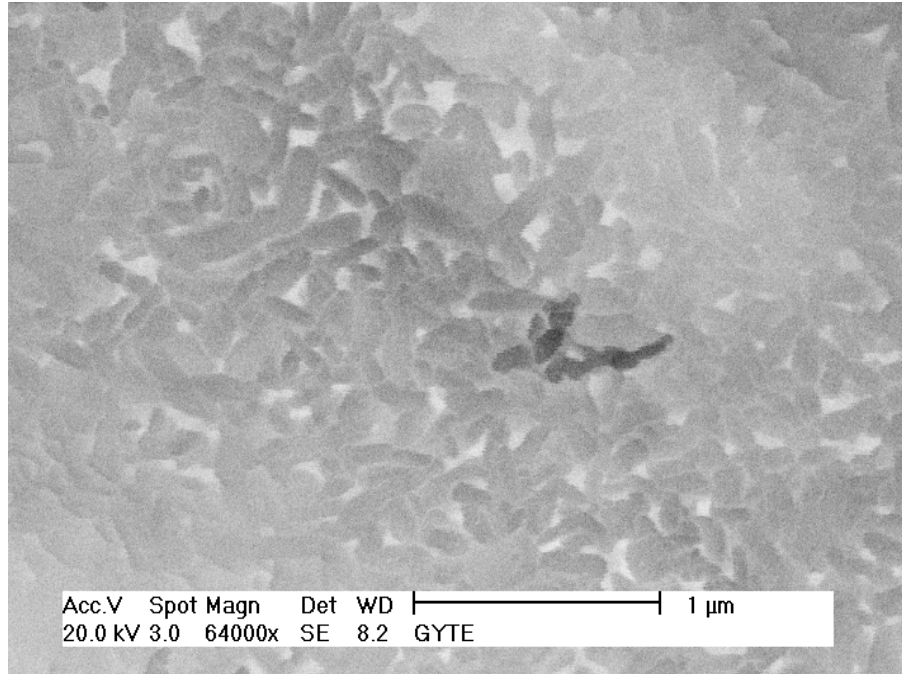
Tablo 4.3 Ba hexaferritlerde gözlenen bazı Fe-O titreşimlerinin dalga sayıları

X^{+2}	$\nu_1 \text{ cm}^{-1}$	$\nu_2 \text{ cm}^{-1}$
Mn ⁺²	582	434
Co ⁺²	584	430
Ni ⁺²	584	430
Cu ⁺²	584	438
Mg ⁺²	576	432
Zn ⁺²	580	436

Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, $\text{BaFe}_{12+x}\text{O}_{19+x}$ olarak fazla miktarda Fe^{+3} katkılandırılmış M tipi hekzaferritlerde $x=0-0.4$ arasında FTIR spektrumundan, $4f_1$ konumundaki tetrahedron ve $4f_2$ konumundaki octahedron konumlarında herhangi bir değişme gözlemlenmemiştir. $x \leq 0.3$ oranda katkılandırmanın etkisi 12k konumundaki octahedron yapıdaki Fe-O bağ titreşimlerinin şiddetinin arttığı bulunmuştur. Daha fazla oranda katkılamalar da ($x > 0.3$), 2b konumundaki FeO_5 bipiramid yapıdaki Fe-O bağ titreşimlerinde değişiklikler rapor edilmiştir. Buradan fazla miktarda katkılamalardan Fe^{+3} iyonlarının bu bipiramidal yapı içinde kristal örgüye katıldığı saptanmıştır [79].

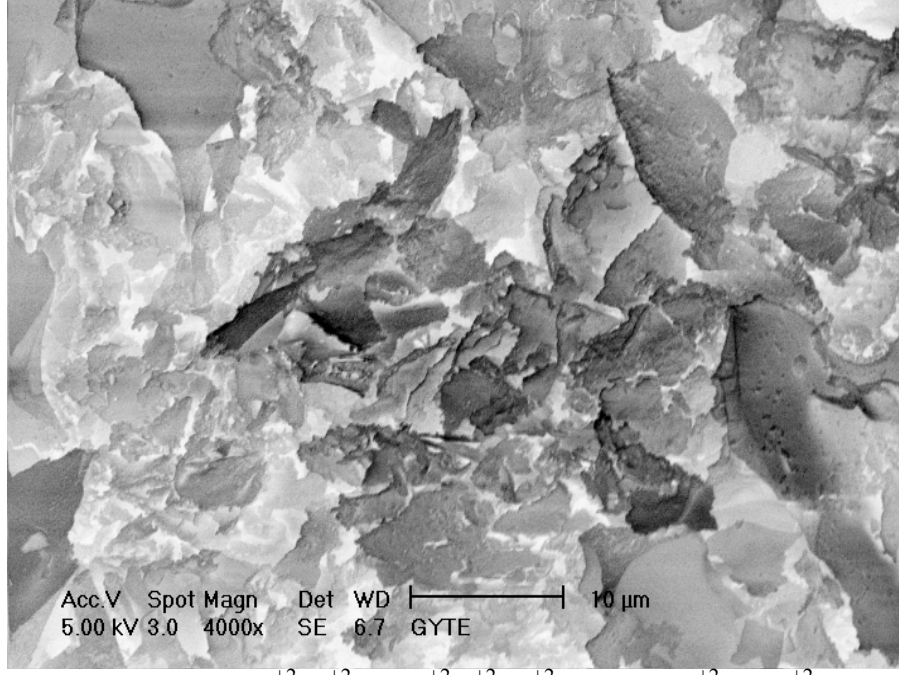
4.1.3. SEM Analizi

$\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ numunelerine ait SEM resimleri Şekil 4.5-4.9 arasında verilmiştir. SEM resimlerinden elde edilen parçacıkların morfolojik ve boyutlarının tespit edilmiştir. Numunenin hazırlanması esnasında kullanılan PMMA polimerinin çok azda olsa yanmadan kaldığı yerler gözlemlenmiştir. $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ numunesinde parçacıklar çubuk şeklinde yapıya sahip olup yaklaşık 100 nm uzunluğunda, 20-30 nm genişliğinde boyutlara sahiptir (Şekil 4.5).

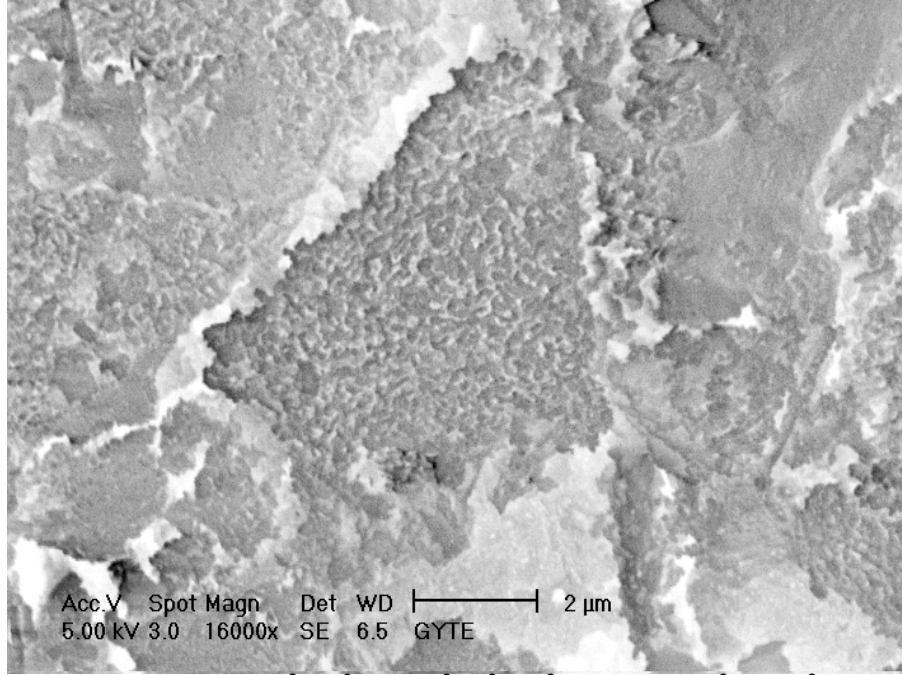


Şekil. 4.5. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk 1 μm dir

Şekil 4.6 ve 4.8 de $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ ve Cu^{+2} numunelerinin çok çeşitli morfoloji ve geniş parçacık büyüklüğünden dolayı ortalama bir büyüklük ve kesin bir morfolojiden bahsetmek zordur. PMMA polimerinin ısıtılarak patlaması ve gaz çıkış esnasında oluşan nano boyutlu tanecikler için TEM resimlerinden faydalanılacaktır. Burada $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ için toz parçalarının yaprak morfolojisine yakın olduğu $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ için keskin herhangi bir şekli olmayan ama düze yakın yüzeye sahip olması gaz çıkışı esnasında düzgün yarılmalardan kaynaklandığı söylenebilir.



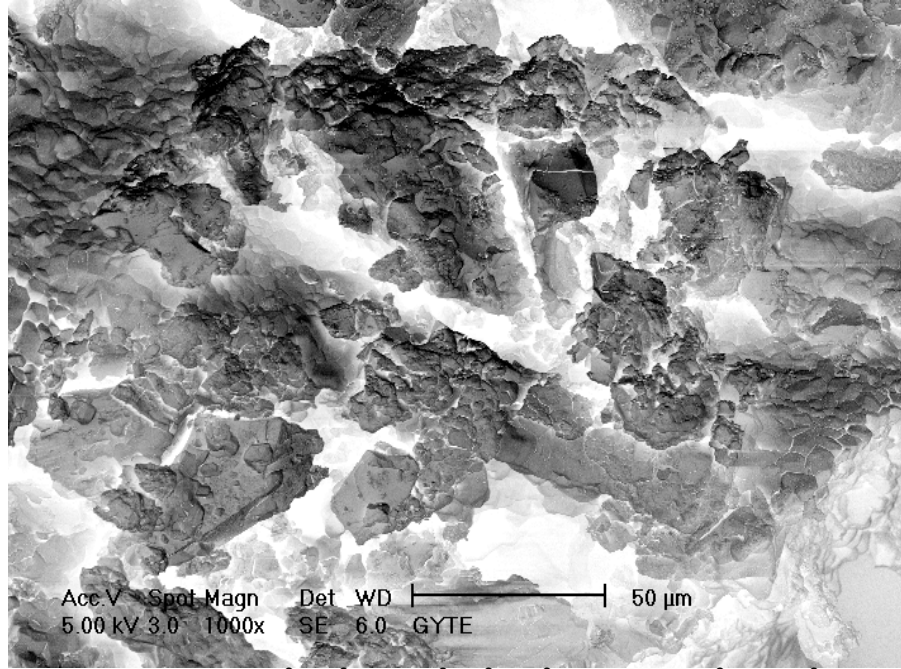
Şekil. 4.6. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $10\mu\text{m}$ dir



Şekil. 4.7. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk $2\mu\text{m}$ dir

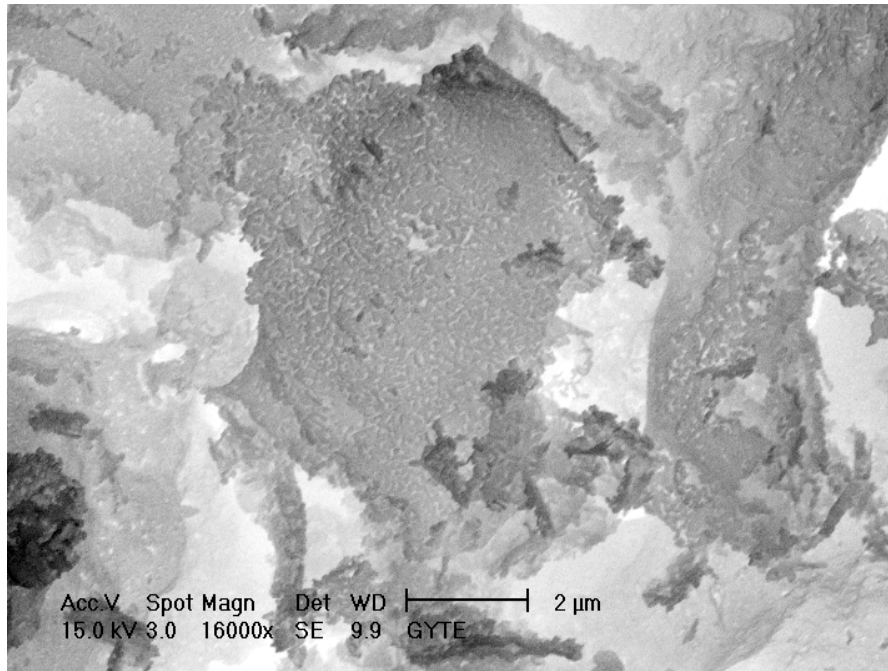
Şekil 4.7 ve 4.9 de $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ ve Zn^{+2} numunelerinin Şekil 4.5 deki gibi parçacıkların oluşumu gözlenmektedir. Parçacıkların kümeleşmesi sonucu gözenekli

ince kabuğumsu bir yapı görünmektedir. Boyutlarının 200 nm altında olduğu söylenebilen bu taneciklerin detaylı analizi için TEM resimlerinden faydalanılacaktır.



Şekil. 4.8. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$ için $X^{+2} = Cu^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk 50μm dir

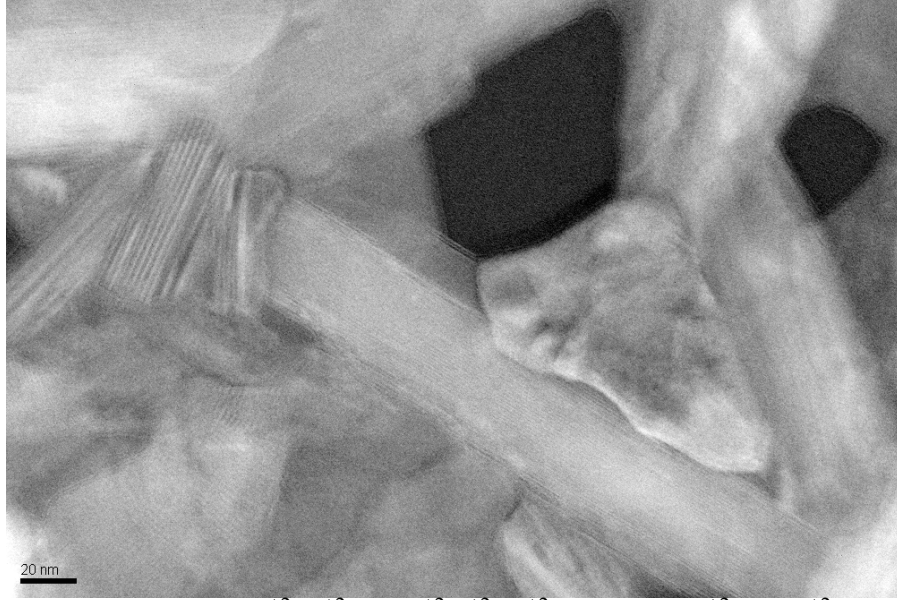
SEM resimleri Şekil 4.5-4.9 arasında verilmiştir. SEM resimlerinden elde edilen parçacıkların morfolojik ve boyutlarının tespit edilmiştir. $X^{+2} = Mn^{+2}$ numunesinde



Şekil. 4.9. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$ için $X^{+2} = Zn^{+2}$ numunesine ait SEM resmi. Referans uzunluk 2μm dir

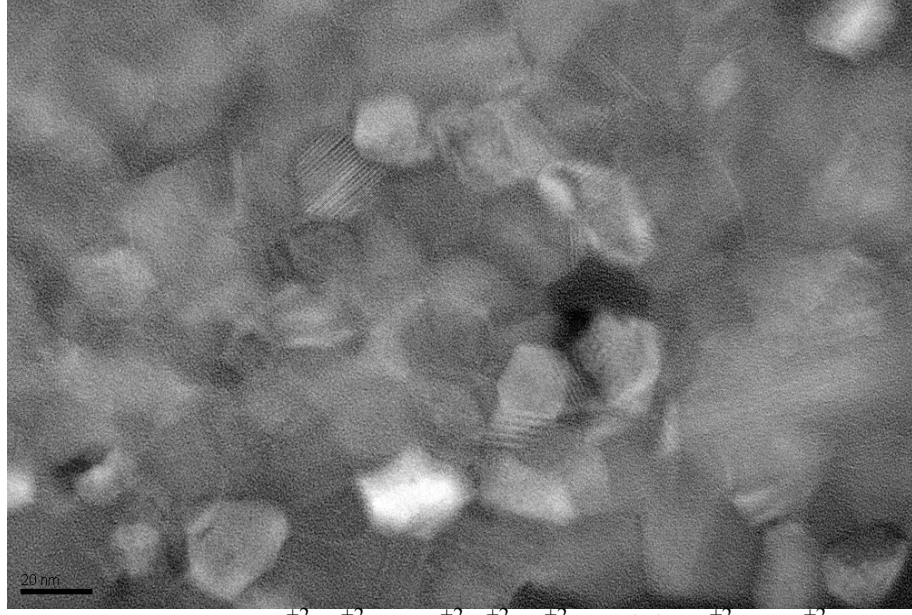
4.1.4. TEM analizi

Şekil 4.10-4.14 arasında, $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ numunelerine ait TEM resimleri görülmektedir. Sentez sıcaklığı 850°C olduğu için tanecikler bir birine yapışık elde edilmiştir. $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ katkılı Baryum hekzaferrit genel olarak nano-çubuk morfolojisine sahip olup kalınlıkları 10-40 nm arasında uzunlukları ise 50-200 nm arasında bulunmaktadır(Şekil 4.10). Bu numunede başka bir morfolojiye rastlanmamaktadır.

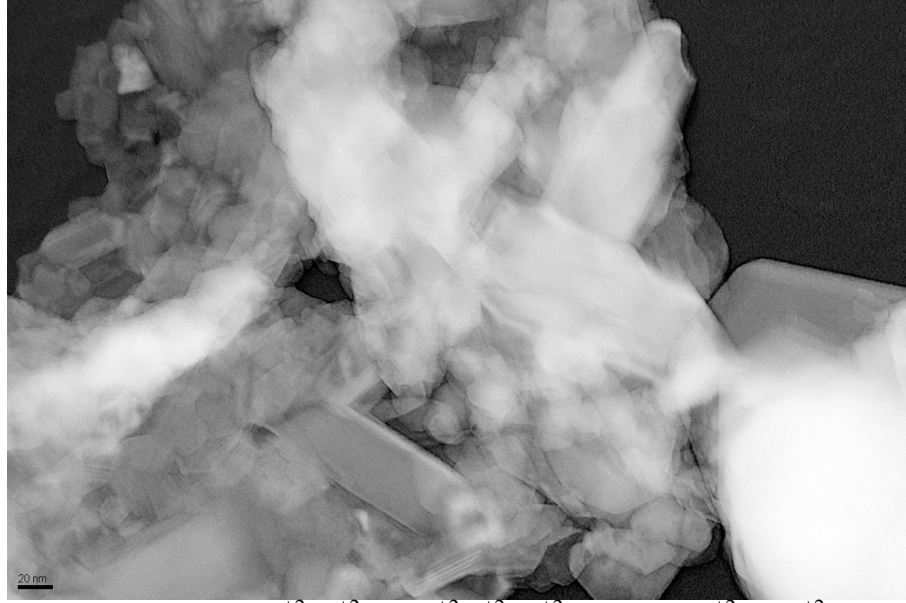


Şekil. 4.10. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 20 nm dir

Şekil 4.11 de $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ katkılı Baryum hekzaferritin daha çok altıgen yapılı ve çok az çubuk morfolojide bulunan ve boyutları 20-40 nm arasında değişen nano parçacıklar görülmektedir. PMMA polimeri ile karıştırılmış Ba hexaferrit bulk malzemesinin yüksek sıcaklıkta yakılarak PMMA'nın yanması sonucu gaz çıkışının rastgele ve kontrolsüz olması ile homojen olmayan morfolojiye sahip parçacıklar elde edilmesi açıklanabilir. $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ numunesinin ise iki farklı morfolojik fazda bulunduğu Şekil 4.12 de görülmektedir. Bu örnek resimde 20-40 nm boyutları arasındaki altıgen şekilli parçacıklar ile 20-40 nm genişliğinde 100-200 nm uzunluğunda nano çubuklar bulunmaktadır.

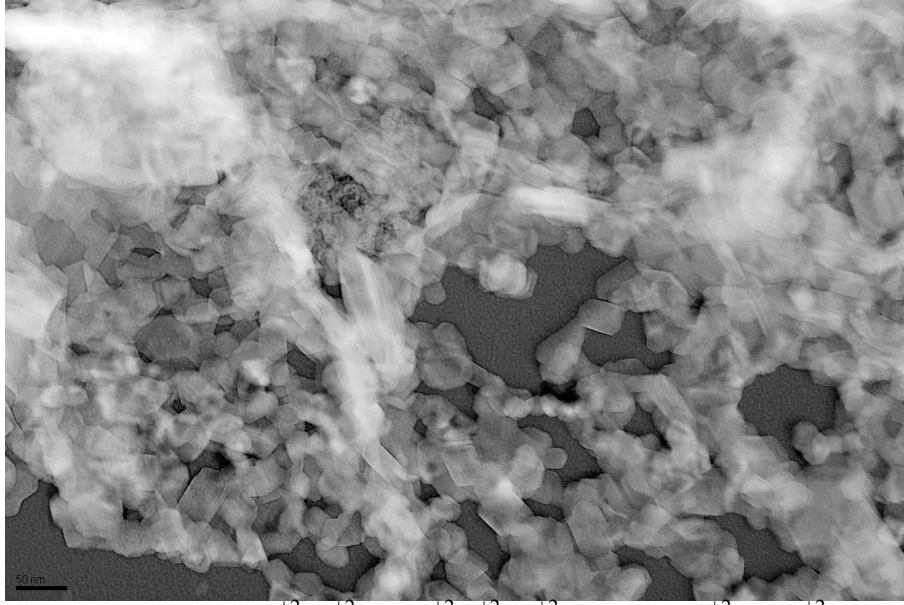


Şekil. 4.11. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 20 nm dir



Şekil. 4.12. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Ni}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 20 nm dir

Şekil 4.13 de $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ katkıli Baryum hekzaferritin daha fazla farklı morfolojide taneciklerden oluştuğu görülmektedir. Altıgen, dairesel ve kareye yapın morfolojik yapıların genel olarak boyutları bir birine eşit olup yaklaşık 20-40 nm arasındadır. TEM resminde az miktarda görünen fazda yine nano-çubuk yapısıdır ki bu çubuklar diğer baryum hekzaferrit numunelerindeki boyutlara sahiptirler.



Şekil. 4.13. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 50 nm dir

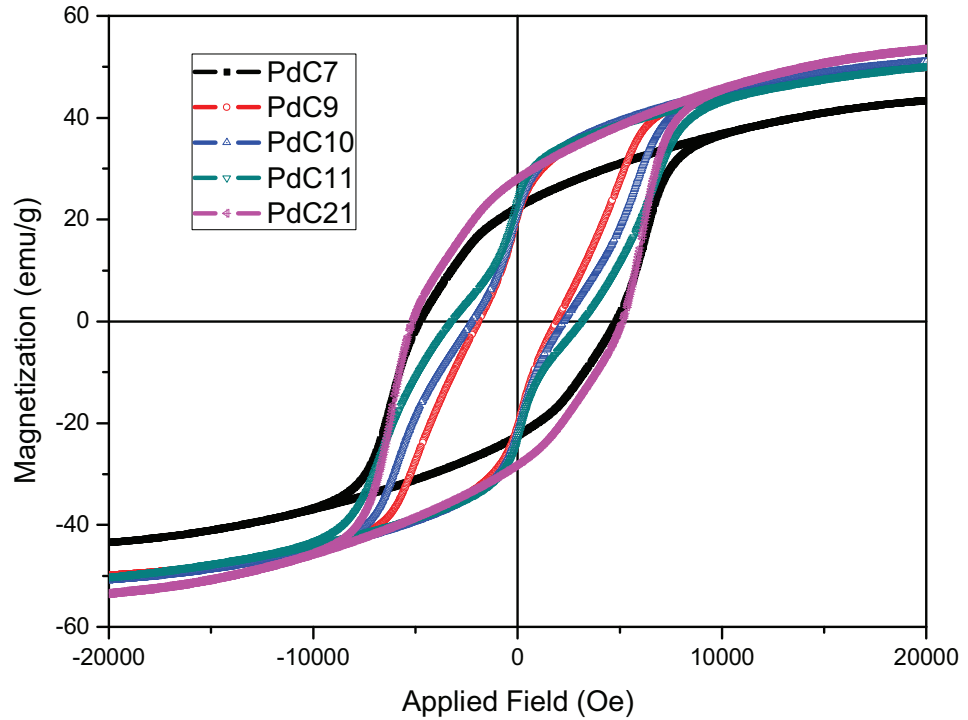


Şekil. 4.14. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ numunesine ait TEM resmi. Referans uzunluk 50 nm dir

Son numene $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ katkılı Baryum hekzaferritin çubuk morfolojisine sahip olduğu ve bu çubukların genişlikleri 20-40 nm arasında uzunlukları 100-200 nm arasında oldukları görülmektedir (Şekil 4.14). Bütün hekzaferritlerde çubuk morfolojisine sahip taneciklerde en boy oranı 1/5 yakın olarak tespit edilirken, diğer gözlemlenen altıgen, dairesel veya kare morfolojiye sahip taneciklerin genelde boyutları bir birine çok yakın olduğu bulunmuştur.

4.1.5. SQUID Magnetometre

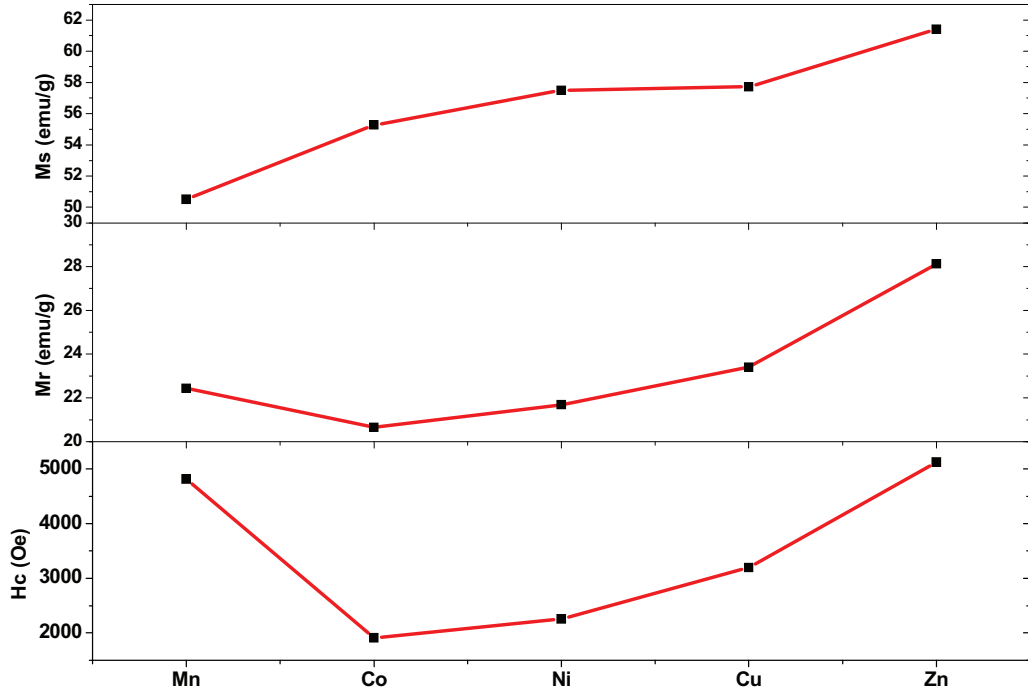
Üretilen hekzaferrit numunelerin oda sıcaklığında SQUID magnetometre ile alınmış manyetik histerisiz eğrileri Şekil. 4.15 de görülmektedir. Bütün bu eğrilerin 20 kOe gibi yüksek alana rağmen doyum mıknatıslanmasına ulaşamamışlardır ve $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ genel formülünde $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ numunelerinin $1/H$ sıfıra giderken ekstrapolasyonundan elde edilen M_s doyum mıknatıslanma değerleri sırasıyla 50.52, 55.28, 57.49, 57.72 ve 61.4 emu/g dır. BaM hekzaferritine ait teorik M_s değeri olan 72 emu/g [94] dan küçük değerler bulunmasının en önemli sebebi M_s doğrudan kompozisyona bağlı olmasıdır.



Şekil. 4.15. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ Numunelerine ait manyetik histerisiz eğrileri.

Doyum mıknatıslanmasına yüksek alan rağmen ulaşamamasının sebebi ise Çekirdek-Kabuk ikili yapısı ile izah edilebilir ki bu yapı nano boyutlarda rastlanan ve yüzeyin manyetik olmayan ve çekirdek içerisindeki toplam mıknatıslanmayı azaltıcı şekilde diamanyetik özellik gösteren kabuk ile kaplanmasıdır. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ yapısında katkılandırılan iyonun ($\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$) manyetik momenti (sırasıyla 5, 3, 2, 1 ve 0 μ_B) arttıkça M_s doyum

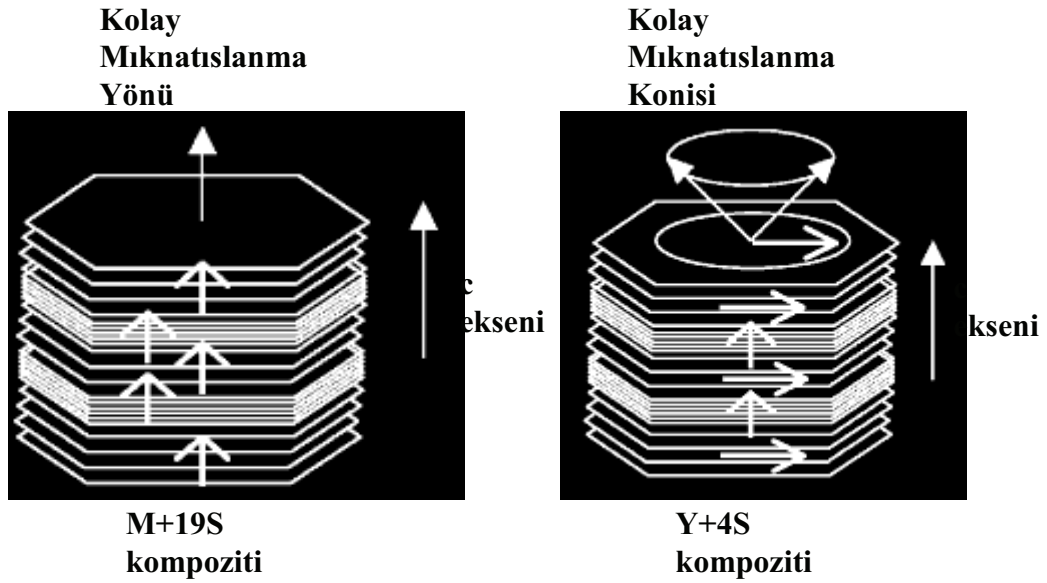
mıknatıslanmasının azaldığı gözlemlenmektedir. Buda eklenen iyonun manyetik momentini Toplam manyetik moment yönüne ters olan konumlara yerleşmesinden kaynaklanmaktadır[95]



Şekil. 4.16. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ için $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}, \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}, \text{Cu}^{+2}, \text{Zn}^{+2}$ numunelerinin manyetik histerisinden elde edilen Ms, Mr ve Hc grafikleri.

Histerisiz eğrilerinden elde edilen diğer manyetik özellikler; Mr Kalıcı mıknatıslanma değerleri 22.43, 20.65, 21.69, 23.4 ve 28.13 Oe iken, Hc Koersif alan değerleri 4.816, 1.911, 2.254, 3.194 ve 5.126 kOe bulunmuştur (Şekil 4.16). Bu eğrilerden, numuneler için iki farklı histerisinden bahsetmek mümkündür. Birincisi; $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ ve Zn^{+2} katkılı numunelerinin manyetik histerileridir ki yüksek koersif alana sahip ve manyetik olarak tek tip yapı içerdiği görülebilen eğrilerdir, ikincisi ise $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}$ ve Cu^{+2} katkılı numunelerin daha düşük koersif alanlı ve basamaklı manyetik histerilere sebep olan farklı morfolojik faz barındırdığı öngörülen numunelerdir. Yukarıda TEM resimlerinden $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ ve Zn^{+2} katkılı numunelere ait morfolojinin nanoçubuk yapılarda oldukları ve diğer numunelerden şekil olarak farklı oldukları gözlemlenmiştir. Parçacıklardaki etkin anisotropi çoğunlukla magnetokristal anisotropi ve şekil anisotropisinin kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla çubuk şekli boyutlar arası 5 yakın oranı ile etkin anisotropiyi artırmış ve yüksek Hc

ye sebep olmuştur. $X^{+2} = \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}$ ve Cu^{+2} katkılı numunelerin ise TEM analizinden kısmen nanoçubuklar ihtiva ettiği ama çoğunlukla boyutları bir birine çok yakın altıgen, daire ve köşeden morfolojide oldukları görülmektedir. Bu yüksek anisotropili çubuk ve düşük anisotropili diğer morfolojilerin birlikte manyetik olarak kıyaslanabilir etki oluşturacak oranda bulunması basamak şekli histerezislere sebep olmaktadır. Benzer sonuçlar Guohong Mu [80] tarafından çubuk şeklindeki BaM hezaferitlerin altıgen plaka şekilli BaM hezaferitlerden çok fazla H_c sahip oldukları rapor edilmiştir.



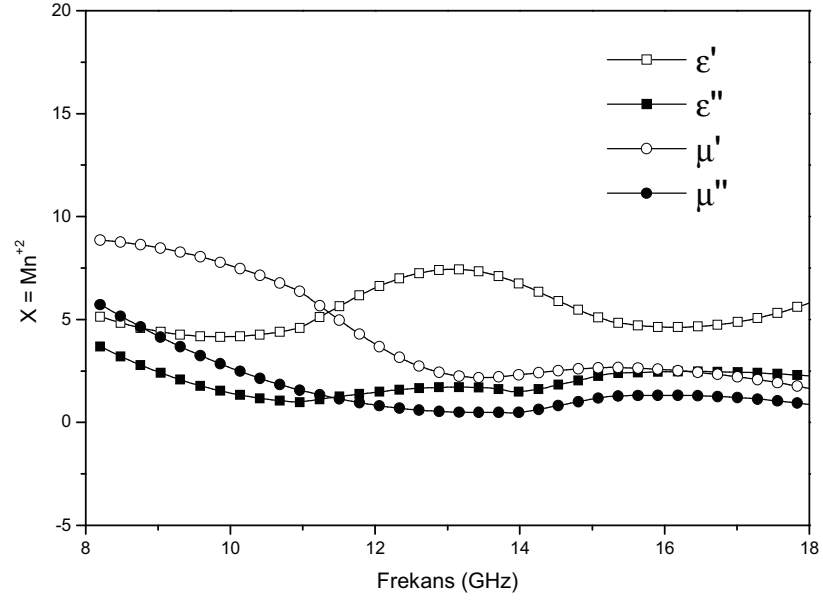
Şekil 4.17. M+19S ile Y+4S yapısının şematik gösterimi [Ref 90 den uyarlanmıştır]

Kristal yapı analizinde bahsedilen ve aynı açılarda farklı şiddetlerde kırınım desenine sahip Y+4S yapısı ($X^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ ve Zn^{+2} için) ile M+19S yapısının ($X^{+2} = \text{Co}^{+2}, \text{Ni}^{+2}$ ve Cu^{+2} için) bulunma öngörüsü ile manyetik olarak numunelerin bu yapıların etkisini barındıran özellikleri vermelidir. Hexaferite ile spinel ferrite oranı Y+4S yapısında M+19S yapısına göre daha fazladır ve bu sert manyetik malzeme olmasına (yüksek koersif alanlı) sebep olurken diğerinde ise bu oranın azlığı Spinel yapıya yakın karakterde davranmasına ve yumuşak manyetik malzeme olmasına sebep olmuştur [96]. Ayrıca M+19S yapısında manyetik olarak kıyaslanabilir özelliklerde olmasında basamak şekilli mıknatıslanma histerisi vermesine sebep olabilir. Bu yapıların kristal özellikleri Şekil 4.17 de gösterilmektedir. M+19S yapısı,

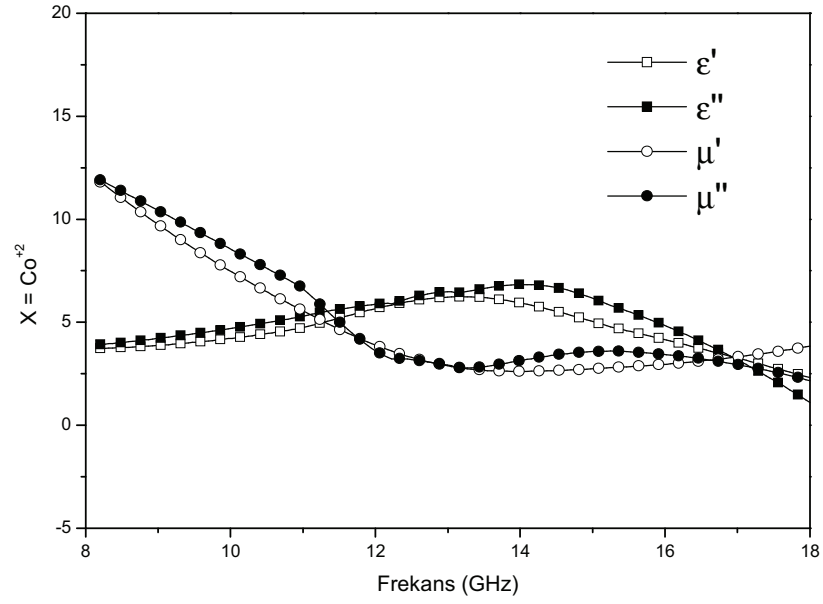
hekzagonal M ferritetin c-ekseni kolay mıknatıslanma yönüdür ve S spinel ferritin kolay mıknatıslanma yönü olan köşegen diyagonalı bu c-ekseni üzerinde olacak şekilde oluşmuştur. Diğer bir deyişle Hekzaferritteki $(001)_M$ yüzeyi spinel ferrit tabakalarındaki $(111)_S$ yüzeyi ile paraleldir. Dolayısıyla iki yapısında net manyetik momentleri Şekil 4.17 görüldüğü gibi birbirine paraleldir. Y+4S yapısında ise, hekzagonal Y ferritetin kolay mıknatıslanma yönü c-ekseni diktir ve S spinel ferritin kolay mıknatıslanma yönü olan köşegen diyagonalı c-eksenine paralel olacak şekilde bu yapıyı oluşturur. Şekil 4.17 de c-eksenine dik olan oklar Y yapısının, paralel olan oklar ise S yapısının net manyetik momentini göstermektedir. Genel mıknatıslanma yönü kristal anizotropinin etkisi ile c-ekseni görüldüğü gibi birbirine paraleldir.

4.1.6. Mikrodalga dielektrik ve manyetik özellikleri

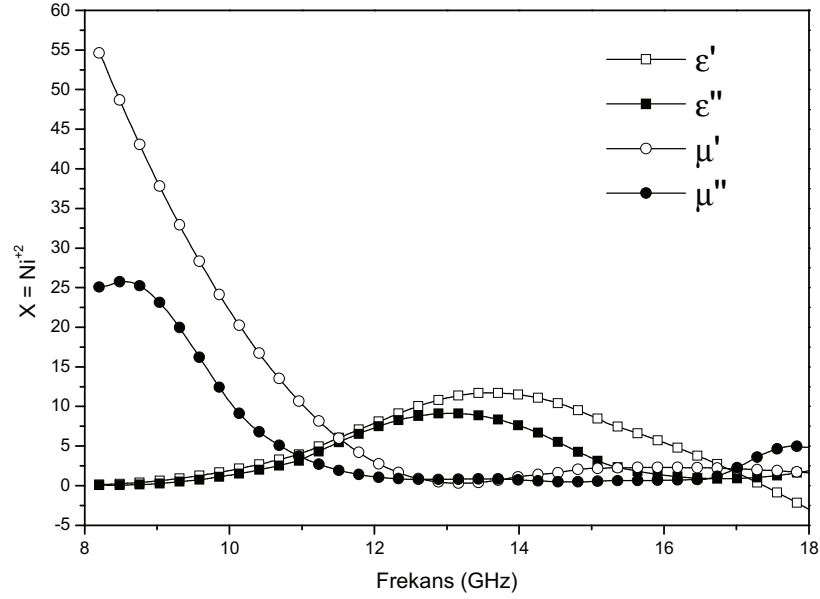
Şekil 4.18- 4.22 arasında sırasıyla $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$ için $X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}, Zn^{+2}$ katkılı numunelerine ait permitivite ve permabilite katsayılarının gerçek ve sanal bileşenleri 8.2 ile 18 GHz aralığında verilmektedir. Tüm bu grafiklerde ϵ' içi boş kare kutucukla (□), ϵ'' içi dolu kare kutucukla (■), μ' içi boş çemberle (○) ve μ'' içi dolu çemberle (●) gösterilmektedir. $X^{+2} = Mn^{+2}$ katkılı numunede ϵ' tarama frekans aralığında dalgalı değerlere sahip olurken ϵ'' frekans aralığı boyunca önce azalan daha sonra çok az değişim gösteren bir eğriye sahiptir. μ' ve μ'' farklı değerler ile 13 GHz değerine kadar azalmakta daha sonra sabitlenmektedir. 11.5 GHz de ϵ' ile μ' ve ϵ'' ile de μ'' aynı değerlere sahip olmakta böylelikle göreceli empedans bire yaklaşmakta veya diğer bir deyişle yansıma katsayısı sıfıra gitmektedir.



Şekil. 4.18. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri.



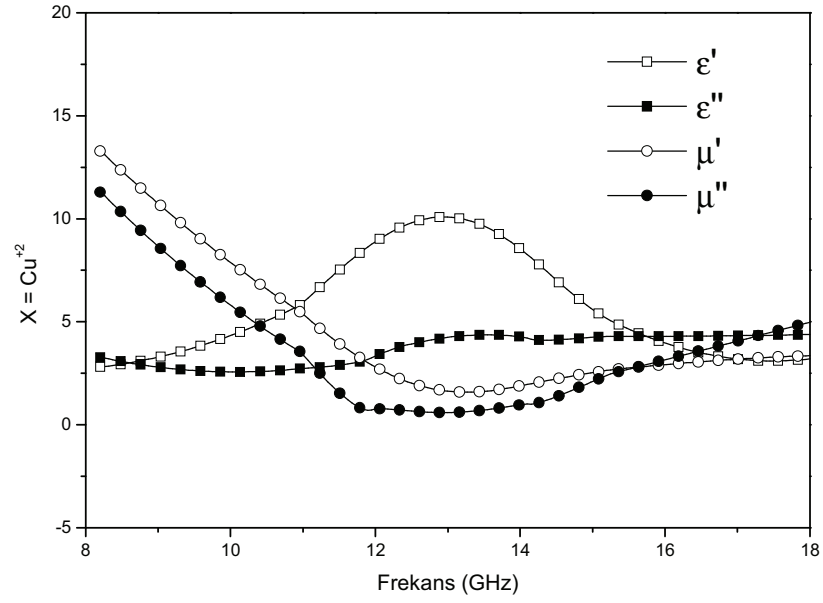
Şekil. 4.19. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ için ε' (□), ε'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri.



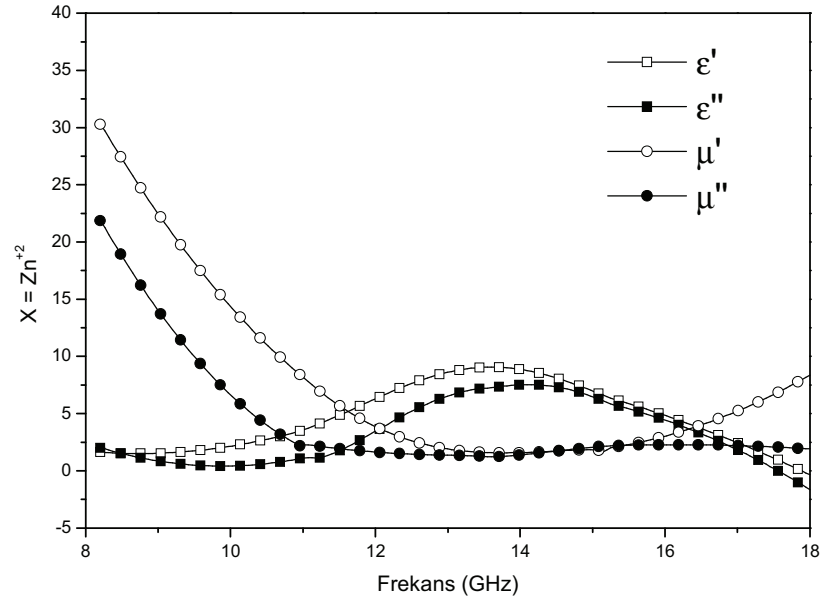
Şekil. 4.20. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$, $X^{+2} = Ni^{+2}$ için ϵ' (□), ϵ'' (■), μ' (○) ve μ'' (●) parametreleri.

$X^{+2} = Co^{+2}$ ve Ni^{+2} katkılı numunelerde ϵ' ve μ' değerleri 11-12GHz e kadar keskin bir iniş göstermekte daha sonra sabitlenmektedir Şekil 4.19 ve 4.20. ϵ'' ve μ'' ise 13-15 GHz civarında küçük bir tepe yaparak azalmaktadır. Her iki parametrelerinin de gerçek ve sanal kısımları 11-12 GHz ve 13-17 GHz arasında yaklaşık aynı değerlere ulaşarak düşük empedans değerleri vermektedir. Buralarda yansımının az olması beklenir. Dielektrik sabiti Ni^{+2} katkılı numunelerde diğer numunelere oranla daha büyük bulunmuş olup sebebi aşağıda açıklanmıştır.

Şekil 4.21 ve 4.22 de $X^{+2} = Cu^{+2}$ ve Zn^{+2} katkılı numunelerin ϵ' ve μ' değerleri 11-13 GHz e kadar keskin bir iniş göstermekte daha sonra sabitlenmektedir. ϵ'' ve μ'' ise 13-14 GHz civarında küçük bir tepe yaparak azalmaktadır. ϵ' ile μ' ve ϵ'' ile de μ'' iki farklı frekansta yaklaşık aynı değerlere ulaşarak düşük empedans değerleri vermektedir. Bu frekanslar $X^{+2} = Cu^{+2}$ için yaklaşık 11 ile 16 GHz iken $X^{+2} = Zn^{+2}$ için yaklaşık 11.5 ile 16.5 GHz dir.



Şekil. 4.21. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ için ϵ' ($\square$), ϵ'' ($\blacksquare$), μ' ($\circ$) ve μ'' ($\bullet$) parametreleri.



Şekil. 4.22. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ için ϵ' ($\square$), ϵ'' ($\blacksquare$), μ' ($\circ$) ve μ'' ($\bullet$) parametreleri.

Bu hekzaferitlerin dielektrik özellikleri, çoğunlukla ara yüzey kutuplanması (interfacial polarization) ve az oranda iyonik ve iç elektrik dipol kutuplanması

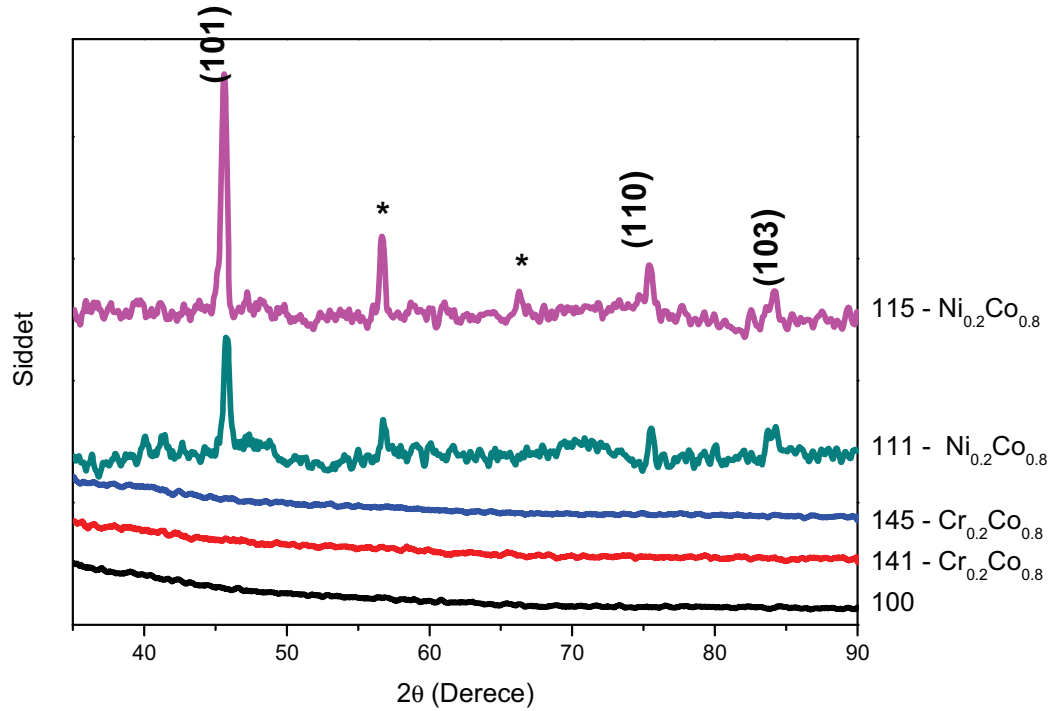
(intrinsic electric dipole polarization) katkısından kaynaklanmaktadır. Bu ara yüzey kutuplanmasının temel sebebi Feritlerin yapısındaki nispeten iyi iletken Tetrahedron ve nispeten kötü iletken olan octahedron kısımların oluşturduğu düşük iletken kısımların yüksek dirençli kısımlarla ayrılmış olmasından kaynaklandığı Koops [97] tarafından izah edilmiştir. Benzer yüksek dielektrik özelliklere sahip kendiliğinden yanma reaksiyonu ile elde edilmiş Al katkılı hexaferrit, $\text{BaFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19-x}$ ($x = 1.5 - 2.3$), numunelerde [98] ve Kontrollü sıvı kimyasal dan kristal yapıya indirgeme metodu ile elde edilen WCo_2 ve YCo_2 hekzaferritlerde 4-18 GHz aralığında ϵ' dielektrik katsayısını yaklaşık 50, ϵ'' katsayısını ise 30 bulunmuştur [99]. Mukesh ve çalışma grubu tarafından yapılan başka bir çalışmada [100] Baryum hexaferritlerde 8-12 GHz aralığında ϵ' dielektrik katsayısını 18-24 değerleri arasında bulmuştur ve bu yüksek dielektrik katsayısını +2 yüklü iyonlarının fazla olmasına ve bu iyonların daha kolay polarize olabilmesi ile açıklamıştır. Ayrıca +2 yüklü iyonların katkılandırılma sonucu daha fazla olması M^{+2} ile M^{+3} arasında sıçrama iletimi (hopping conduction) nedeniyle yüksek dielektrik kaybına sebep verdiği bu çalışmada ifade edilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen μ' ve μ'' parametreleri yaklaşık 1-12 arasında değişmektedir ve literatürde, burada bulunan değerlerden daha yüksek permabiliteye sahip hekzaferritler bildirilmiştir. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir. Y tipi hekzaferritlerde yapılan bir çalışmada[101] ise 1GHz civarında μ' ve μ'' parametrelerinin 10 ve 20 gibi yüksek değerlere çıktığı ve artan frekansla artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Sitrat öncü (precursor) kimyasal yöntemi ile hazırlanan Baryum Hekzaferritlerde 9-12 GHz aralığında elde edilen μ' ve μ'' parametreleri sırasıyla 24 ve 2.4 gibi yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. [100]. Yüksek permabilite değerlerine sahip olmasının nedeni hegzagonal yapıda birbirini takip eden R ve S yapılarında katkılanan metallerin ardışık olarak ince dilimli metal tabakalar gibi yapılar oluşturmamasından kaynaklandığı rapor edilmiştir. Yüksek permabilitiye sahip malzemelerin olumlu etkisi ise daha ince yapıları Elektromanyetik soğurucu malzeme yapılabilmesidir[99]. Ayrıca bu frekanslarda domain duvar hareketi ihmal edilebilir olduğundan (50MHz üzeri frekanslarda) yüksek permabilite nano boyutlu manyetik parçacıkların yüzeylerinde daha fazla bulunan atomlardaki spin hareketinden kaynaklanabilir [102].

4.2. Bezler

4.2.1. XRD Analizi

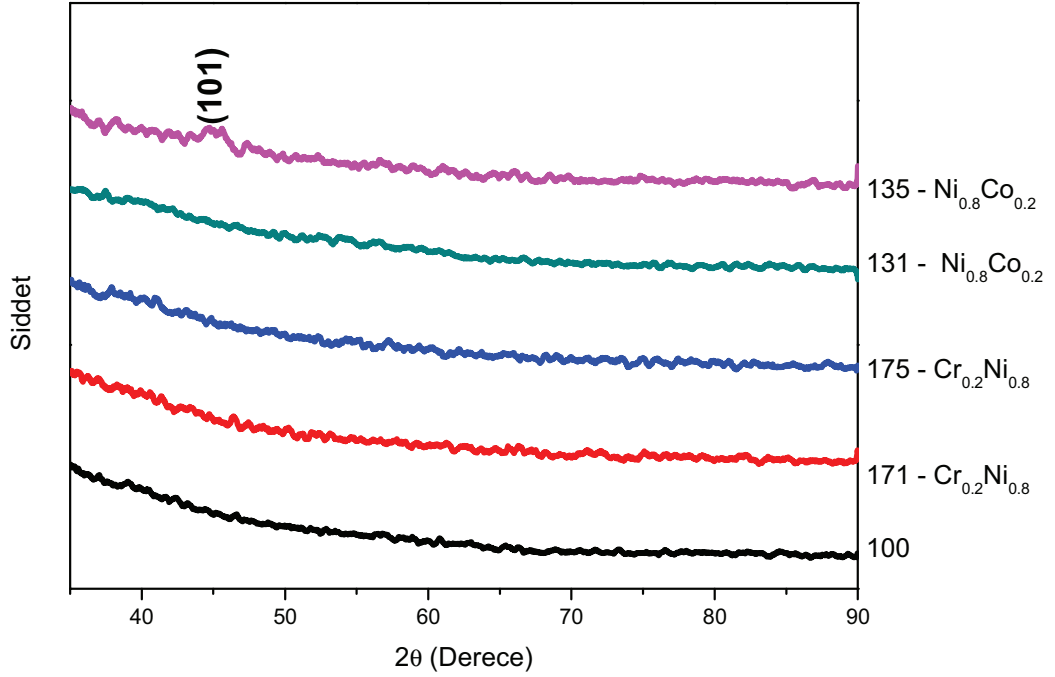
Metal kaplama kompozitlerin XRD desenleri Şekil 4.23-4.25 arasında gösterilmiştir. Metal kaplanılan ham Poliakrilinitril kumaş (100 Kodlu) XRD sinden küçük açılarda geniş bir pik sahip olup büyük açılarda ($< 35^\circ$) ise herhangi bir pike sahip olmamasında amorf yapıda olduğu teyit edilmiştir (Şekil 4.20). Kaplamaların SEM analizinde belirtildiği üzere mikro nano boyutta olması Kumaş fiberlerin ise bunun 100 mikron kalınlığında olmasından dolayı kaplama metale ait XRD piklerin tespiti zor olmaktadır. $Ni_{0.2}Co_{0.8}$ banyosunda kaplanarak elde edilen kompozit'in Co metaline ait (101),(110) ve (103) indisli kristal yüzeylerden kaynaklanan pikleri tayin edilmiştir [103,104].



Şekil 4.23. Co yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerin XRD desenleri ve karşılık gelen kristal yüzeyler. [104]

Nil-Co kaplamalarda “*” sembolü ile işaretli pikler indisleşemeyen ve akımsız kaplama yönteminin kontrolsüz, oda sıcaklığında açık atmosfer ortamda

gerçekleşmiş olması herhangi bir metal oksit veya metal hidroksit yapısından kaynaklanmış olabileceği varsayılmaktadır. RC-Co kaplamalarında ise oluşan kaplamanın kristal yapıya sahip olup olmadığı, eğer kristal yapıda ise polimerin baskın amorf yapısından dolayı gözlenemediği veya eğer kristal yapı oluşmamış ise oluşan kaplamanın amorf yapıda olabileceği öngörülmektedir.

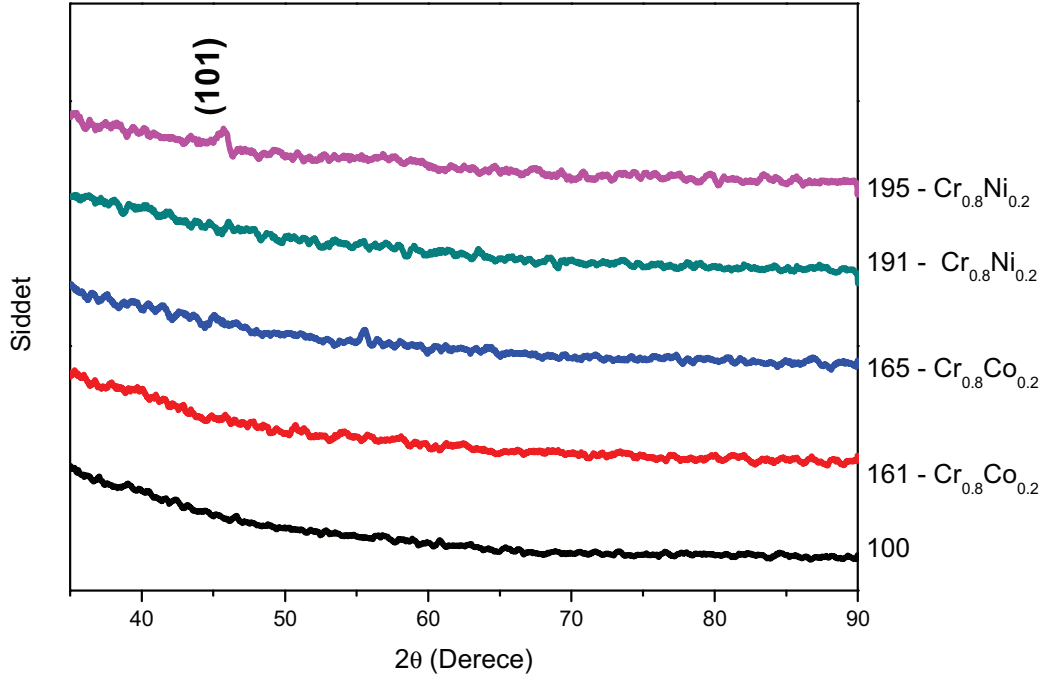


Şekil 4.24. Nil yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerin XRD desenleri ve gözlenebilen kristal yüzey. [105]

Nil yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerde elde edilen XRD desenleri Şekil 4.24 de görülmektedir. Sadece $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ banyosunda kaplanan kompozit'in Nikel metaline ait (101) en şiddetli piki görülebilmektedir [105]. Diğer kompozitlerde üstede açıklandığı gibi amorf yapıda kaplama veya amorf polimerin baskın olması nedeniyle görülememektedir.

Cr yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerde elde edilen XRD desenleri Şekil 4.25 de görülmektedir. Sadece $\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ banyosunda kaplanan kompozit'in Krom metaline ait (101) en şiddetli piki görülebilmektedir [105]. Kaplamanın amorf yapıda

gerçekleşmesi veya amorf polimerin baskın olması nedeniyle diğer kompozitlerde XRD desenleri görülememektedir.



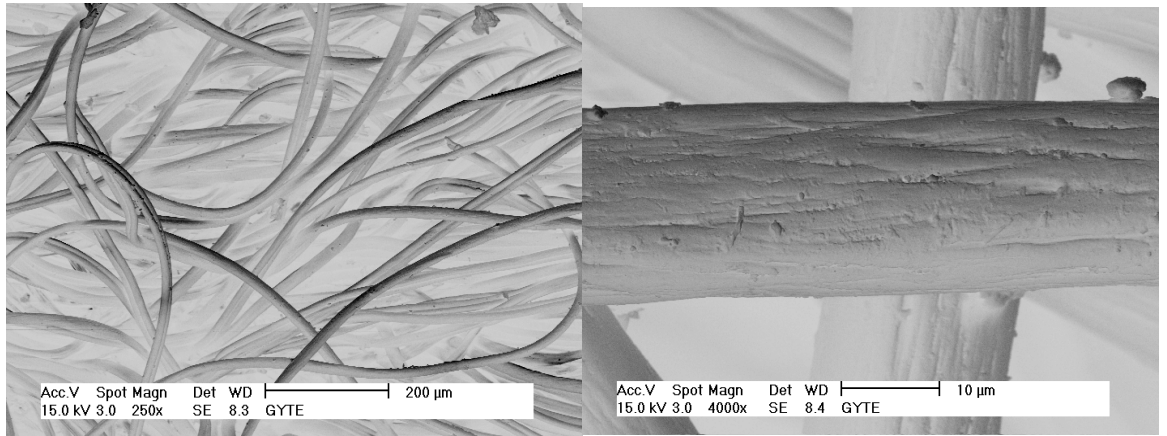
Şekil 4.25. Cr yoğunluklu banyoda kaplanan kompozitlerin XRD desenleri ve gözlenebilen kristal yüzey. [105]

Genel olarak 115, 135 ve 195 kodlu bezlerde XRD desenlerinin daha iyi görülebilmesinin nedeni kaplama süresi arttıkça daha metalik yapı elde edilmekte ve polimerin amorf yapısı ile kıyaslanabilir boyutta metal kaplama gerçekleşirse XRD pikleri daha belirgin hale gelmektedir. Fakat uzun süreli kaplamalar bu çalışmanın amacına uygun olmayan ve bulk metal oluşturmakta ve Elektromanyetik dalganın hemen hemen tamamını yansıtan kompozitlere dönüşmektedir.

Belirtilmesi gereken diğer bir unsur ise XRD desenleri açıkça görülebilen numunelerde Ni ortak noktadır. Buradan bu metal kaplama şartlarının Ni kaplamaya daha uygun olduğu ortaya çıkmaktadır.

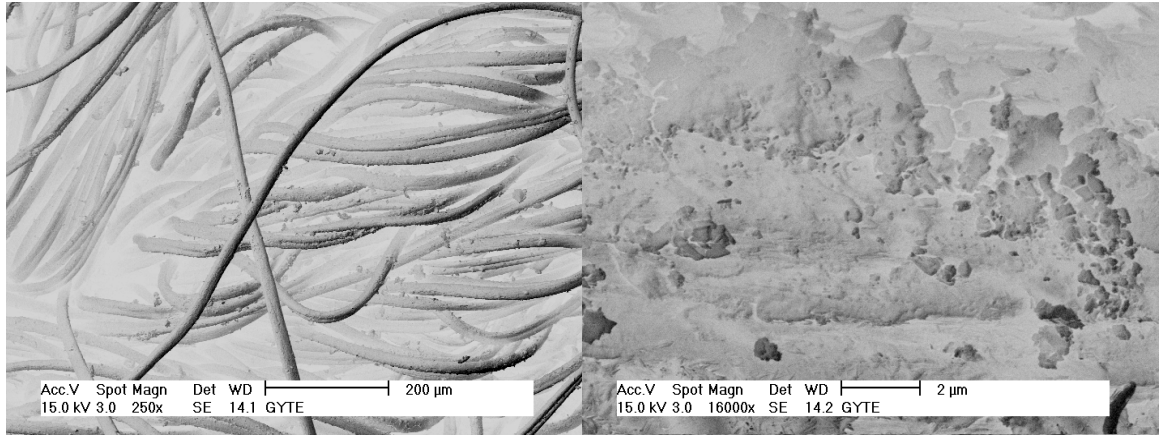
4.2.2. SEM Analizi

Akımsız kaplama tekniği kullanılarak metal kaplanan poliakrilik bezlerden kaplamaların bez yüzeyinde oluşturduğu yapı ve şekil değişiklikleri SEM resimlerinde görülmektedir (Şekil 4.26-4.38). Burada bezlerdeki kaplamaların etkisini ham bez ile karşılaştırmak için ham bez (100 kodlu numune) ve seçilen bazı kaplanmış bezler gösterilmektedir. Kaplanan bezlerden SEM analizine alınanlar kaplama banyosunun farklı kompozisyonu ve bu banyoda en az kalan ile en çok kalan türlerini içerecek şekilde seçilmiştir. Ham bezin yüzeyinde çok az miktarda mikron boyutun altında pürüzlü yapı bulunmaktadır. Bunlar bezin oluşturan polimer fiberlerin yapısında olduğu kadar üretim, örgü ve kaplama öncesi hassaslaştırma aşamalarında maruz kaldıkları mekanik kuvvet ve kimyasal malzemelerden kaynaklanmış olabilir.

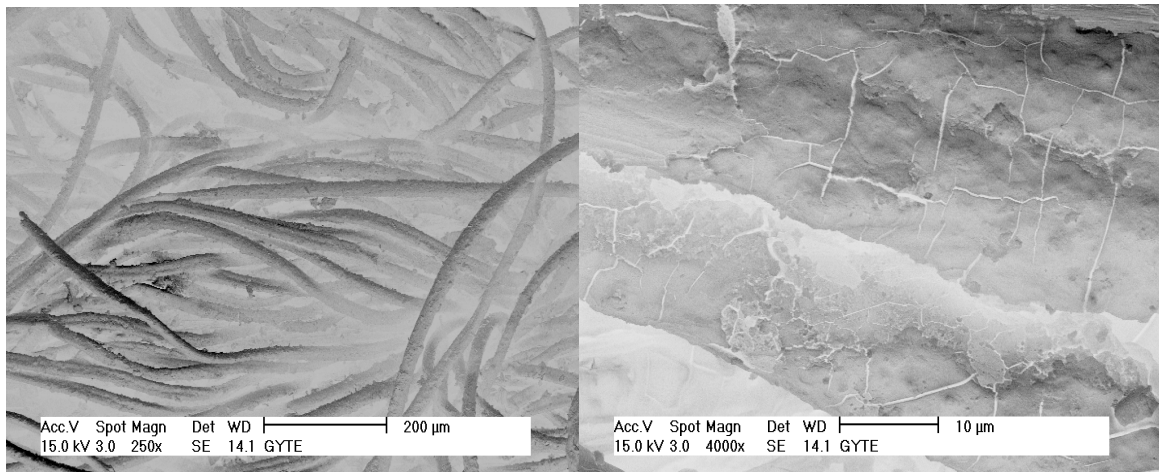


Şekil 4.26. 100 Kodlu(Ham) beze ait 200µm ve 10 µm ölçekli SEM resimleri

Şekil. 4.27 ve 4.28 de $\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ kompozisyonlu banyoda kaplanmış sırasıyla 0.5 ve 8 dk kaplanmış bezlere ait SEM resimleri görülmektedir. 111 Nolu numunede, kaplama süresinin kısalığından dolayı kaplamanın bazı bölgelerde yoğun diğer bölgelerde daha ince olarak gerçekleştiği ve nano boyut ile mikro boyut arası farklı büyüklüklerde topaklanmalar olduğu anlaşılmaktadır. 115 Nolu numunede, kaplamanın daha yoğun ve kalın olduğu, ayrıca mikron altı pürüzlü yüzeyde 8 µm aralıklı çatlamlar görülmüştür. Kaplama süresi artıka tanecikli oluşan kaplamaların birleşerek daha düzgün ve homojen katman halinde kaplama haline geldiği tespit edilmiştir.

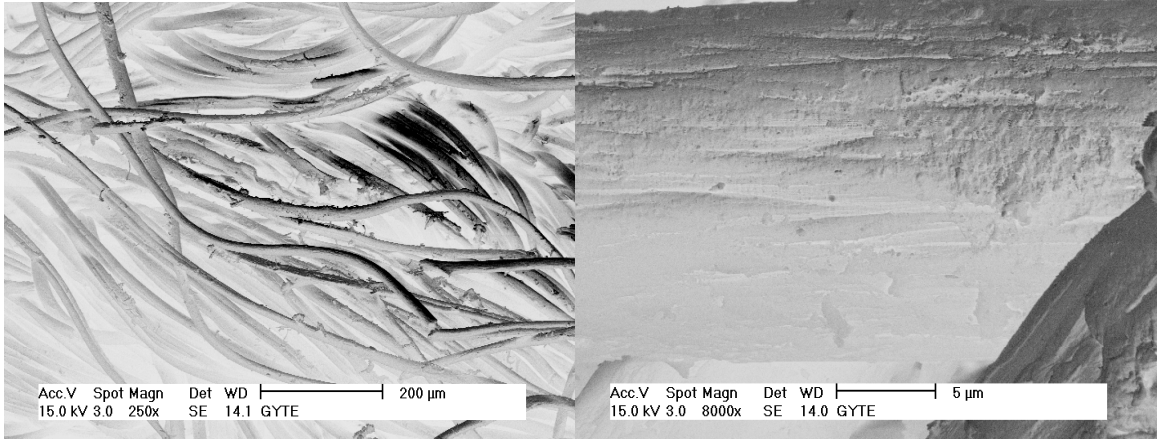


Şekil 4.27. 111 Kodlu ($\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 2 µm ölçekli SEM resimleri

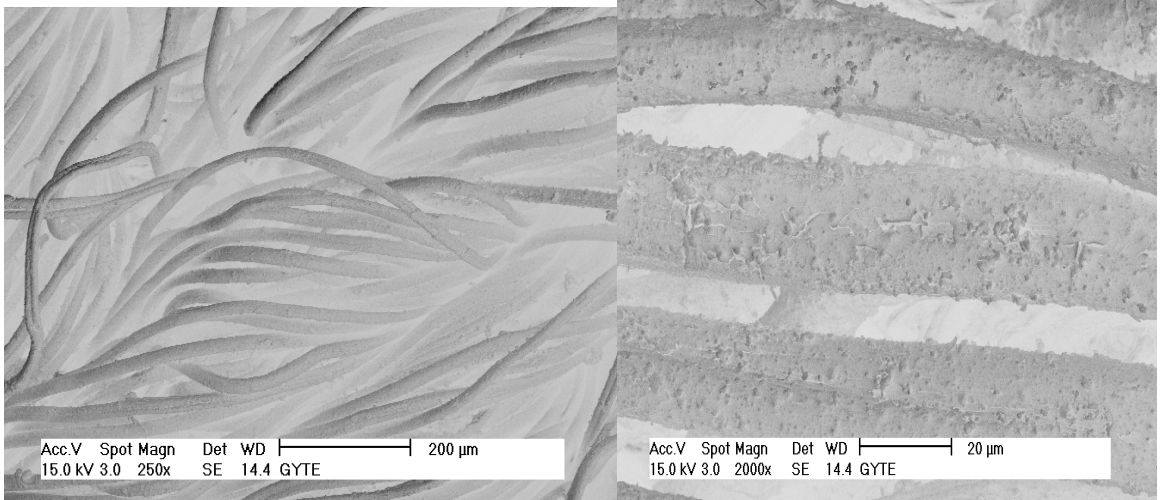


Şekil 4.28. 115 Kodlu ($\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 10 µm ölçekli SEM resimleri

$\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ kompozisyonlu banyoda kaplanmış sırasıyla 0.5 ve 8dk kaplanmış bezlere ait SEM resimleri Şekil. 4.29 ve 4.30 de görülmektedir. 131 Nolu numunede, bölgesel ve daha az pürüzlü bir kaplama elde edilirken 135 nolu numunede tüm fiberi kaplayan ve 10 mikron aralıklı çatlaklara ve mikron altı topaklanmalara sahip bir kaplama elde edilmiştir.

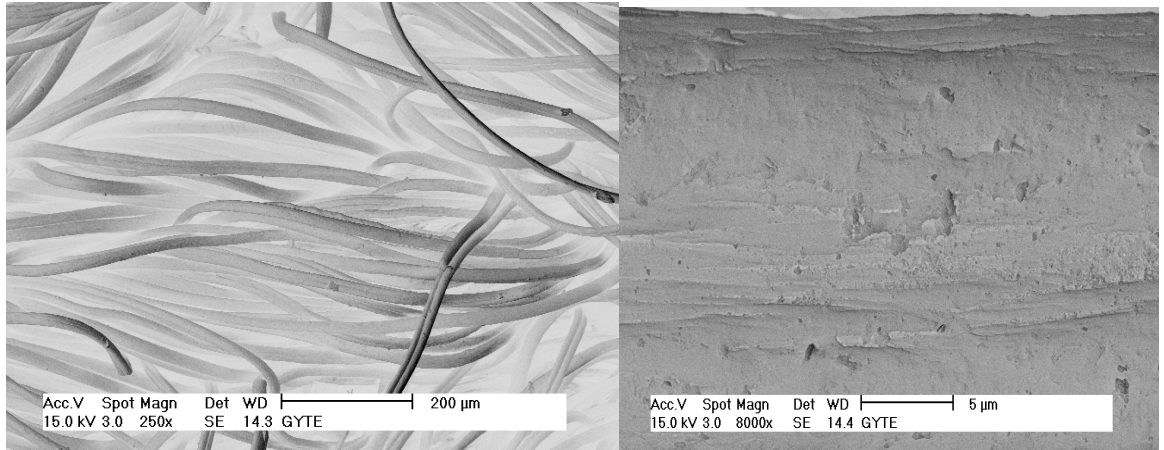


Şekil 4.29. 131 Kodlu ($\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri

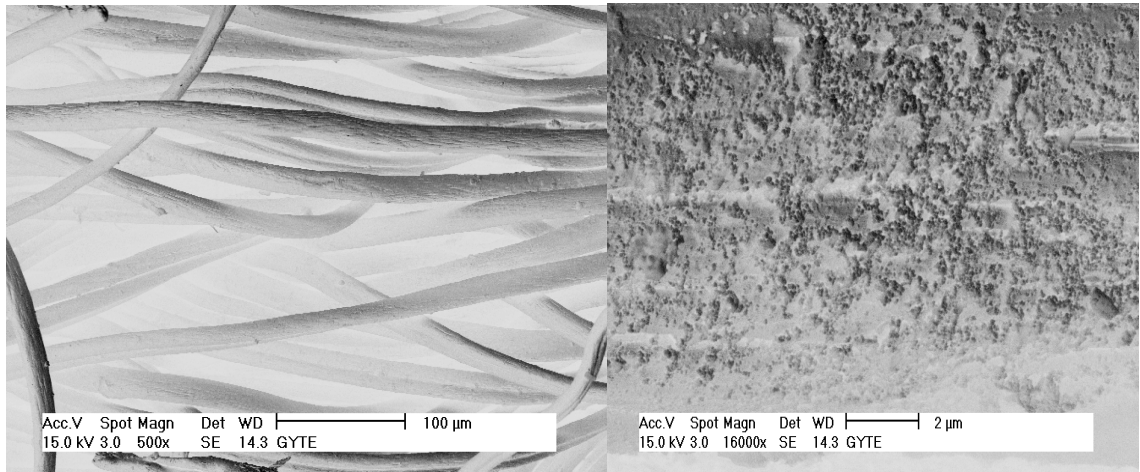


Şekil 4.30. 135 Kodlu ($\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 20 µm ölçekli SEM resimleri

Şekil. 4.31 ve 4.32’de $\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ kompozisyonlu banyoda kaplanmış sırasıyla 0.5 ve 8 dk kaplanmış bezlere ait SEM resimleri görülmektedir. 141 Nolu numunede, bölge bölge çok az yoğun kaplama gerçekleşirken 145 Nolu numunede, kaplamanın daha yoğun olduğu görülmektedir. Kaplama sonrası yüzeyde oluşan küçük parçacık boyutları 100 nm altında olduğu referans uzunluk yardımıyla anlaşılmaktadır. Kaplama süresi artıkça daha yoğun bir kaplama elde edilmektedir. Kaplama tabaka şeklinde değil de tanecikli halde olduğu dikkat çekmektedir.

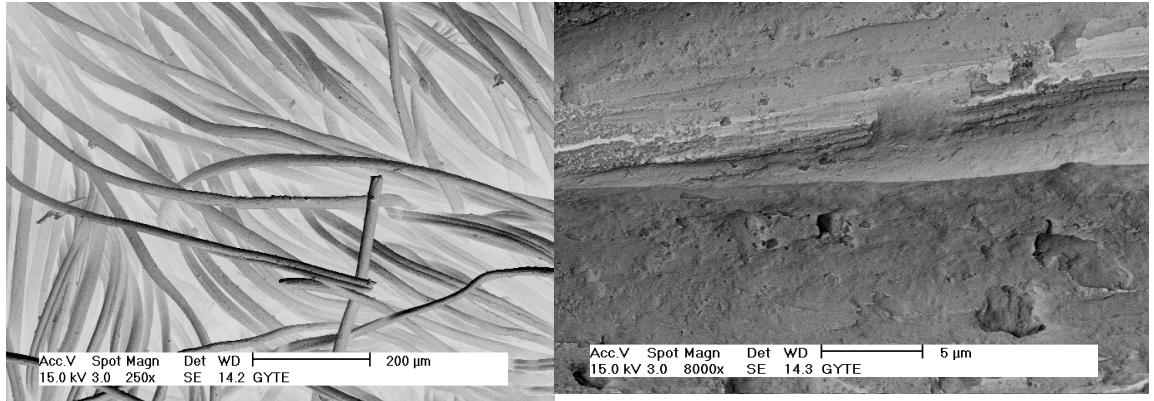


Şekil 4.31. 141 Kodlu ($\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri

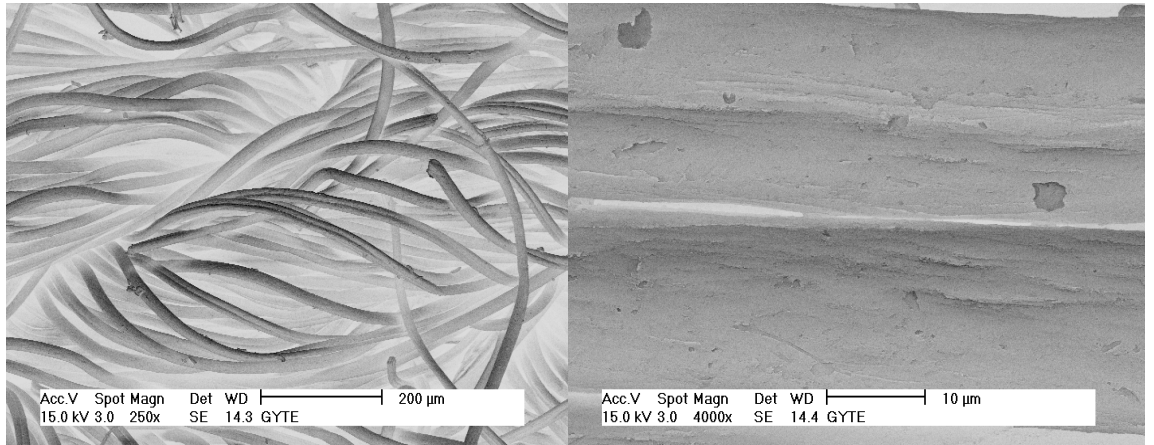


Şekil 4.32. 145 Kodlu ($\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 2 µm ölçekli SEM resimleri

$\text{Cr}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ kompozisyonlu banyoda kaplanmış sırasıyla 0.5 ve 8 dk kaplanmış bezlere ait SEM resimleri Şekil. 4.33 ve 4.34 de görülmektedir. Her iki resimde de kaplamanın nispeten daha az gerçekleştiği görülmektedir. Kaplamalar daha çok fiber üzerindeki kıvrım ve çukur bölgelerde gerçekleşmiştir.

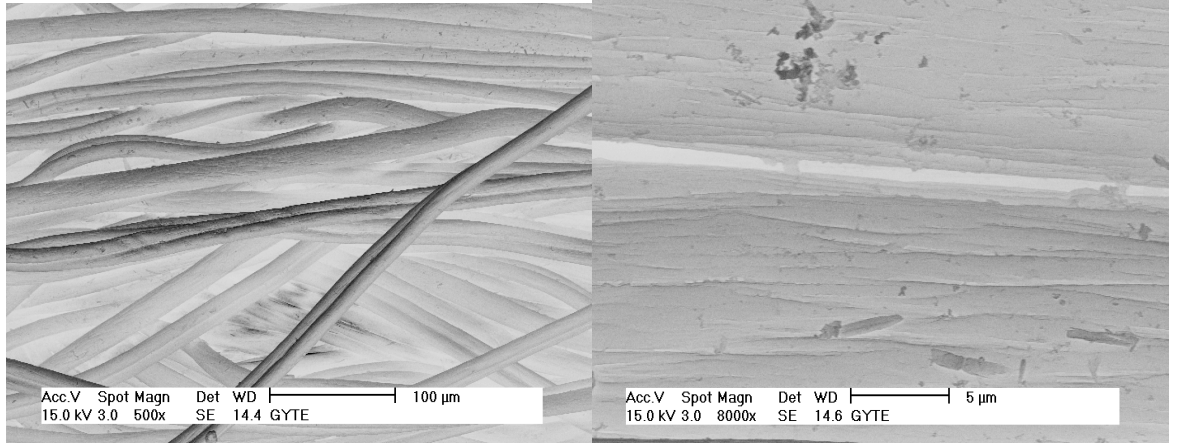


Şekil 4.33. 161 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 0.5 k) beze ait 200µm ve 5 Mµ ölçekli SEM resimleri

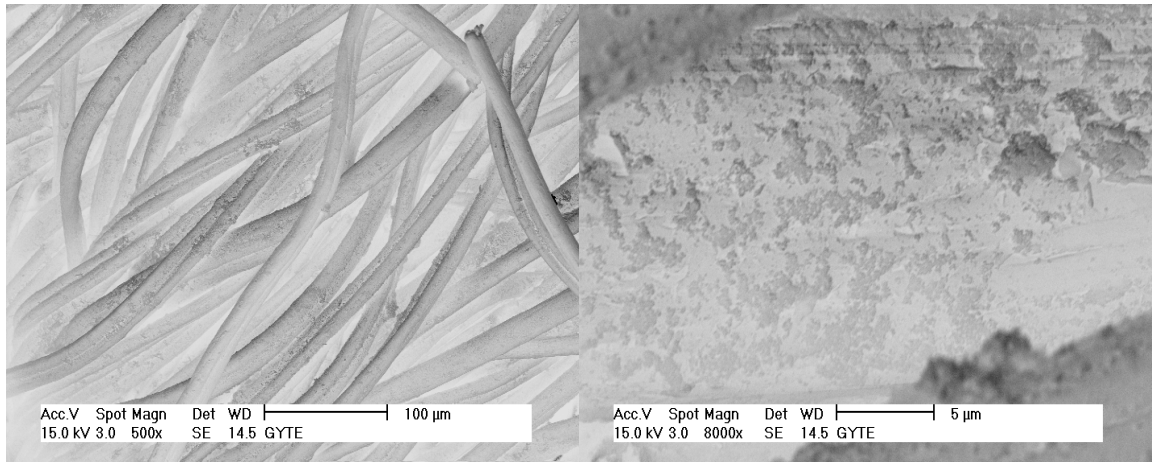


Şekil 4.34. Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ - 8 k) beze ait 200µm ve 10 Mµ ölçekli SEM resimleri

Şekil. 4.35 ve 4.36’da $\text{Cr}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ kompozisyonlu banyoda kaplanmış sırasıyla 0.5 ve 8 dk kaplanmış bezlere ait SEM resimleri görülmektedir. 171 Nolu numunede, bölgesel ve daha az yoğun kaplama gerçekleşirken 175 Nolu numunede, kaplamanın daha yoğun olduğu görülmektedir. Kaplama sonrası yüzeyde 100 nm altı büyüklükteki küçük parçacıkların kümeleştikleri ve süre artıka birleşmeye doğru gittikleri görülmektedir. Ayrıca bazı bölgelerde şerit yapıda yüzeye yapışmış yapılar olduğu dikkat çekmektedir.

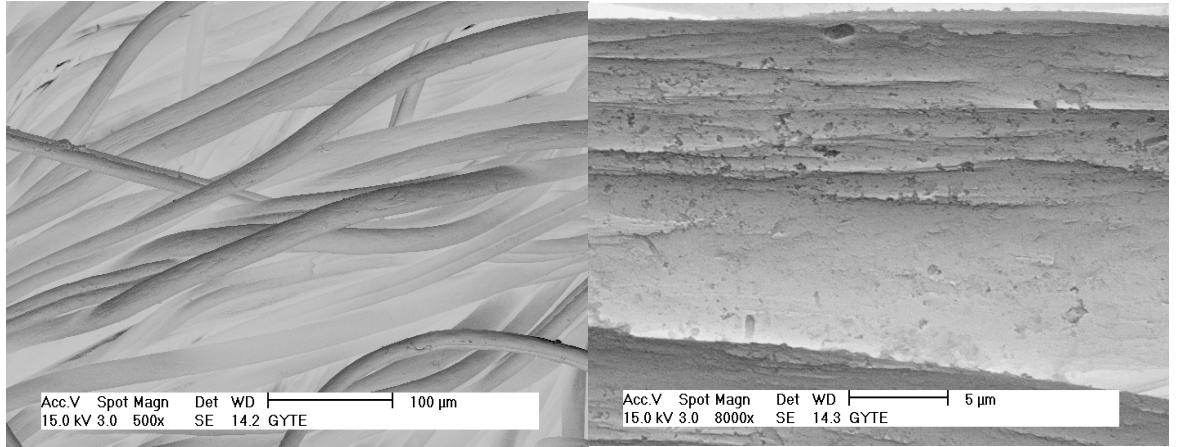


Şekil 4.35. 171 Kodlu (Cr_{0.2}Ni_{0.8} - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri

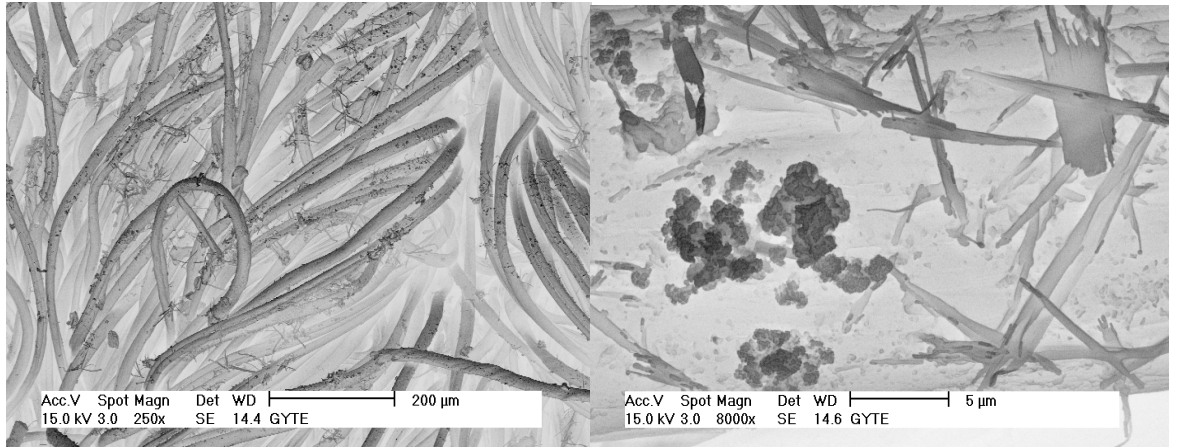


Şekil 4.36. 175 Kodlu (Cr_{0.2}Ni_{0.8} - 8 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri

Cr_{0.8}Ni_{0.2} kompozisyonlu banyoda kaplanmış sırasıyla 0.5 ve 8 dk kaplanmış bezlere ait SEM resimleri Şekil. 4.37 ve 4.38 de görülmektedir. 191 Nolu numunede, seyrek ve daha az yoğun tanecikli kaplama gerçekleşirken 195 Nolu numunede, kaplamanın daha yoğun ve farklı şekillerde tanecikler içeren kaplama gerçekleşmiştir. Kaplama süresi düşük olan numunede fiber üzerinde nano boyutlu tanecikleşmeler gözlenirken, 8dk kaplanmış numunede yüzeyde 1 mikron civarında taneciklerin kümeleştiği ve 0.5 mikron kalınlıklı 5 mikron uzunluklu şerit yapıların varlığı tespit edilmiştir. Kısmen bu şerit yapıların birleştiği görülmektedir.



Şekil 4.37. 191 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ - 0.5 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri

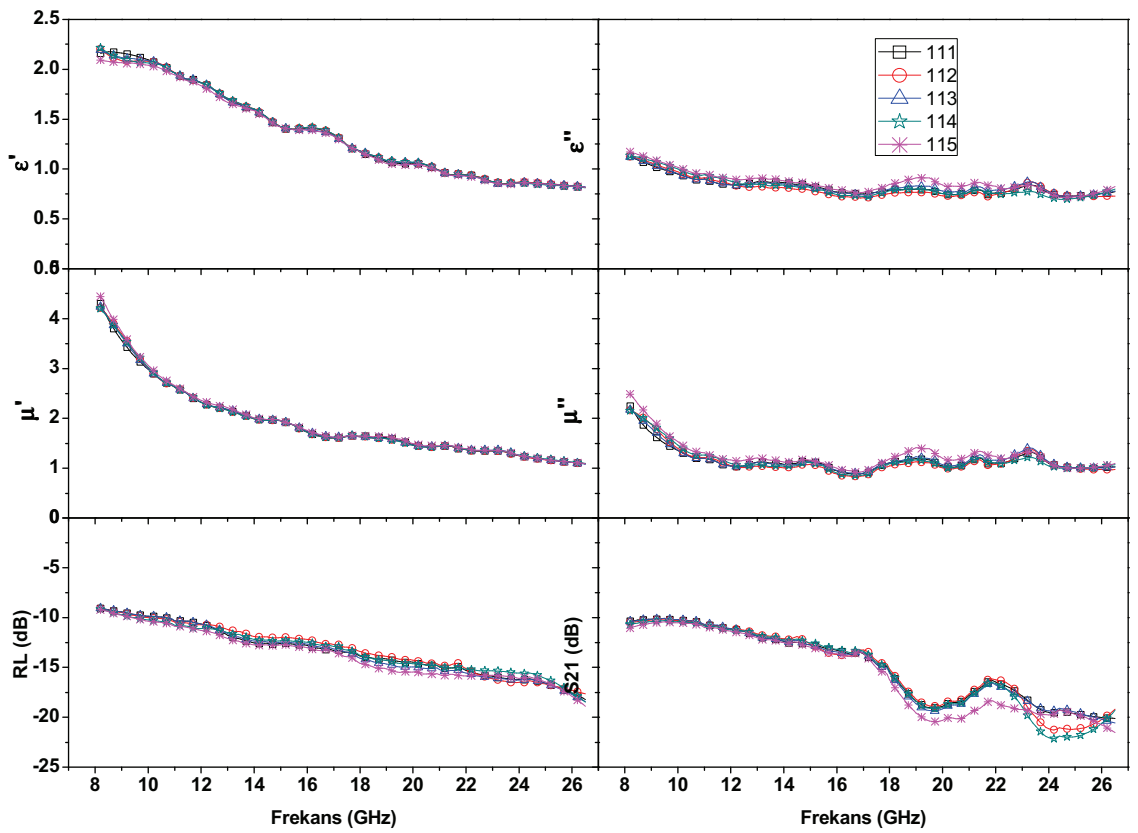


Şekil 4.38. 195 Kodlu ($\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ - 8 dk) beze ait 200µm ve 5 µm ölçekli SEM resimleri

Genel olarak Co yoğun kaplamada tabaka halinde, Ni yoğunluklu kaplamalarda nano tanecikli ve Cr yoğun kaplamalarda şerit halinde kaplamalar gözlemlenmiştir. Kaplama süresi arttıkça kaplamanın yoğunlaştığı taneciklerin birleşip tabaka yada kümeleşmiş yapılar oluşturduğu fark edilmiştir. Kaplamalarda 100 nm altı tanecikler ile mikron boyutlu şerit ve tabaka yapıların yüzeyde oluştuğu görülmektedir.

4.2.3. Mikrodalga dielektrik ve manyetik özellikleri

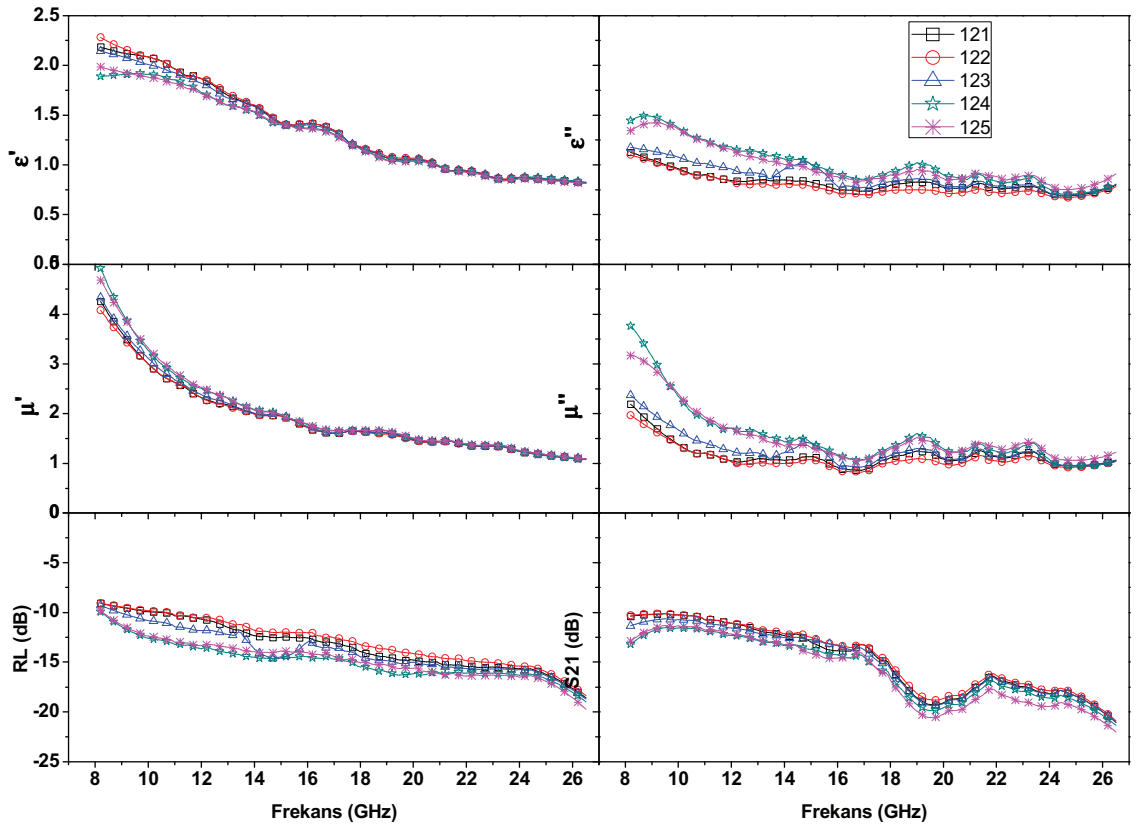
Metal kaplanmış bezlerden uygun ebatlarda kesilerek dikdörtgen Dalga kılavuzlarında sadece bez ve bezin arkası metal ile perdelenerek elde edilen ansıma katsayıları NRW algoritması kullanılarak fiziksel parametreler elde edilmiştir. Kaplı bezlere ait Yansıma katsayısı RL (deneysel S11') , geçme katsayısı S21, ϵ' , ϵ'' , μ' ve μ'' katsayıları 8.2-26 GHz aralığında Şekli 4.39-4.47 arasında verilmiştir.



Şekil 4.39. 111-115 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri

$\text{Ni}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.39 verilmiştir. Bu frekans aralığında ϵ' ve ϵ'' katsayıları frekans arttıkça küçük bir eğimle azalma görülürken, ϵ' 2 ile 1 arasında ϵ'' ise 1.5 ile 1 arasında değerlere sahiptir. μ' ın 4 ile 1 arasında μ'' ise 2 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir.

Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı μ''/μ' oranına göre daha büyük olduğundan elektromanyetik dalga soğurma mekanizmasında katkıda sonucu elde edilen metal-polimer malzemenin dielektrik özelliklerinin manyetik özelliklerine göre daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Geçme katsayısı S21 ve hesaplanan yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında elde edilmiştir. Kaplama süresinin bu banyo kompozisyonunda çok etkili olmadığı gözlenmiştir.

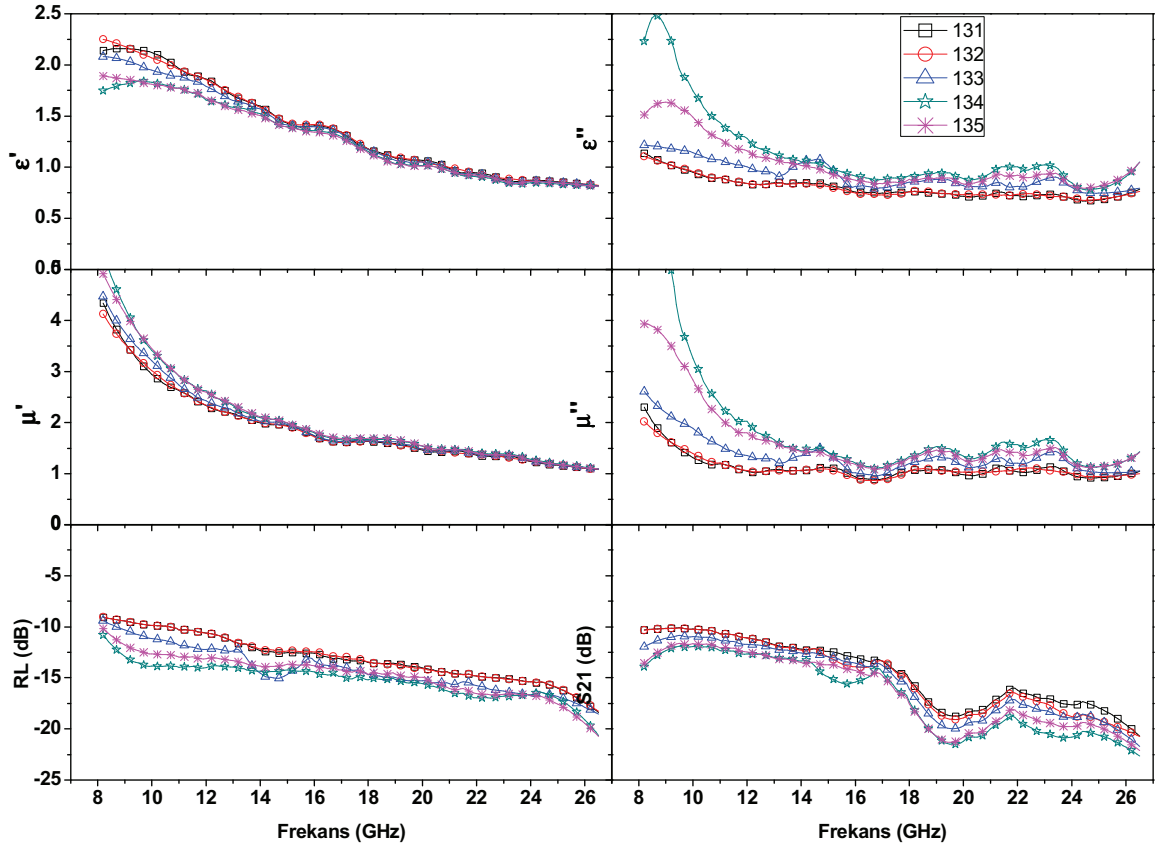


Şekil 4.40. 121-125 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri

$\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.40'de verilmiştir. Düşük frekanslarda kaplama süresine bağlı olarak farklı değerler elde edildiği ama yüksek frekanslarda benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. 8 GHz civarında kaplama süresi arttıkça ϵ' değerlerinin azaldığı ϵ'' , μ' ve μ'' değerlerinin ise arttığı gözlemlenmiştir.

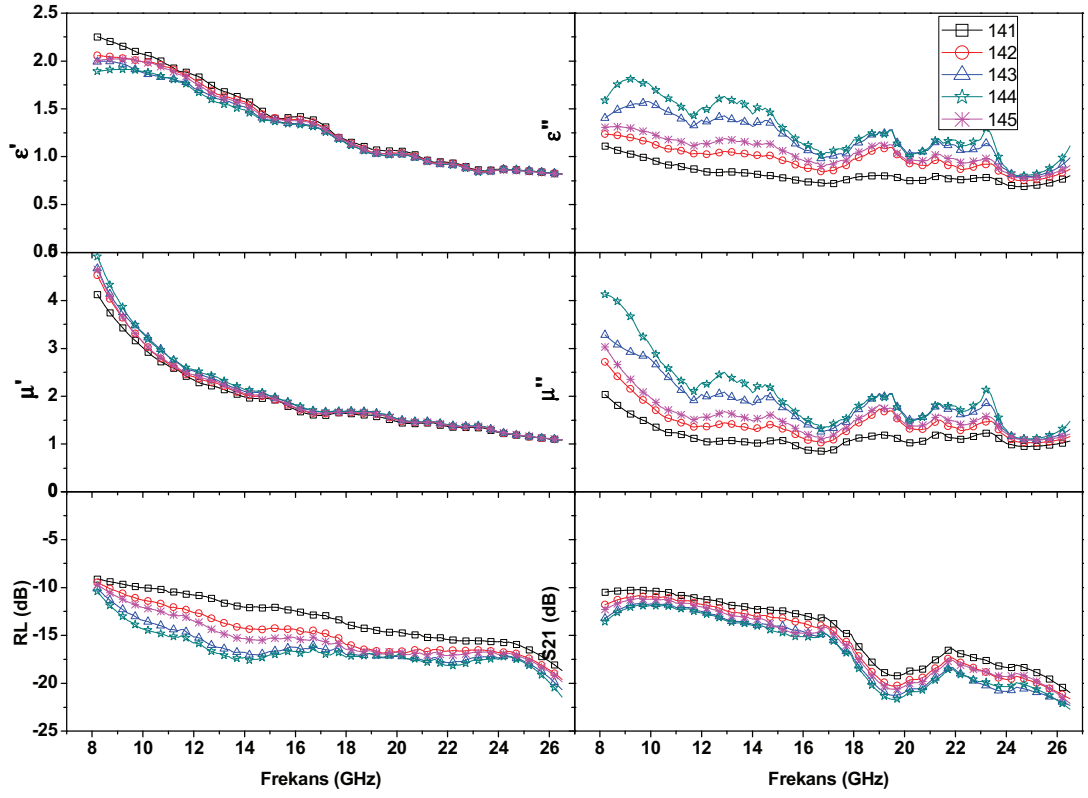
8.2 - 26 GHz aralığında ϵ' ve ϵ'' katsayıları frekans arttıkça küçük bir eğimle azalma görülürken, ϵ' 2.5 ile 1.5 arasında ϵ'' ise 1.5 ile 1 arasında değerlere sahiptir. μ' nin 5 ile 1 arasında μ'' ise 4 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir. 14-16 GHz aralığında ϵ'' ve μ'' eğrilerinde küçük bir tepe bulunmaktadır. Elde edilen parametrelerden ϵ''/ϵ' oranının μ''/μ' oranına göre daha büyük olduğu kompozit malzemenin dielektrik özelliklerinin baskın olduğu tespit edilmiştir. Geçme katsayısı S21 ve hesaplanan yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında elde edilmiştir. Kaplama süresi 4 ve 8 dk olan bezlerde yansıma kaybı ve S21 geçirme katsayısı 3-4 dB daha küçük değerler vermektedir.

Ni yoğunluğunun fazla olduğu banyo $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.41 verilmiştir. Bu frekans aralığında ϵ' küçük bir eğimle azalma gösterirken ϵ'' , μ' ve μ'' katsayıları üstel olarak azalmaktadır. ϵ' 2.5 ile 1.5 arasında ϵ'' ise 2.5 ile 1 arasında değerlere sahip iken μ' in 5 ile 1 arasında μ'' ise 6 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı μ''/μ' oranı ile kıyaslanabilir ölçüde birbirine yakın değerlere sahiptir ve elektromanyetik dalga soğurma mekanizmasında kompozit malzemenin dielektrik özellikleri kadar manyetik özellikleride etkin hale gelmektedir. Geçme katsayısı S21 ve hesaplanan yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında elde edilmiş olup kaplama süresi 4 ve 8 dk olan bezlerde yansıma kaybı ve S21 geçirme katsayısı 4-5 dB daha küçük değerler vermektedir. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısının kaplama süresi ile değişimi birlikte yorumlandığında 4dk kaplamalarda en iyi verimin elde edildiği ve kaplama süresi daha büyük olan (8 dk) bezde metalik yapıya doğru gidiş ve yansıtma özeliğinde artış gözlenmiştir. Bu sebeple uzun süreli metal kaplamalardan kaçınılmıştır.

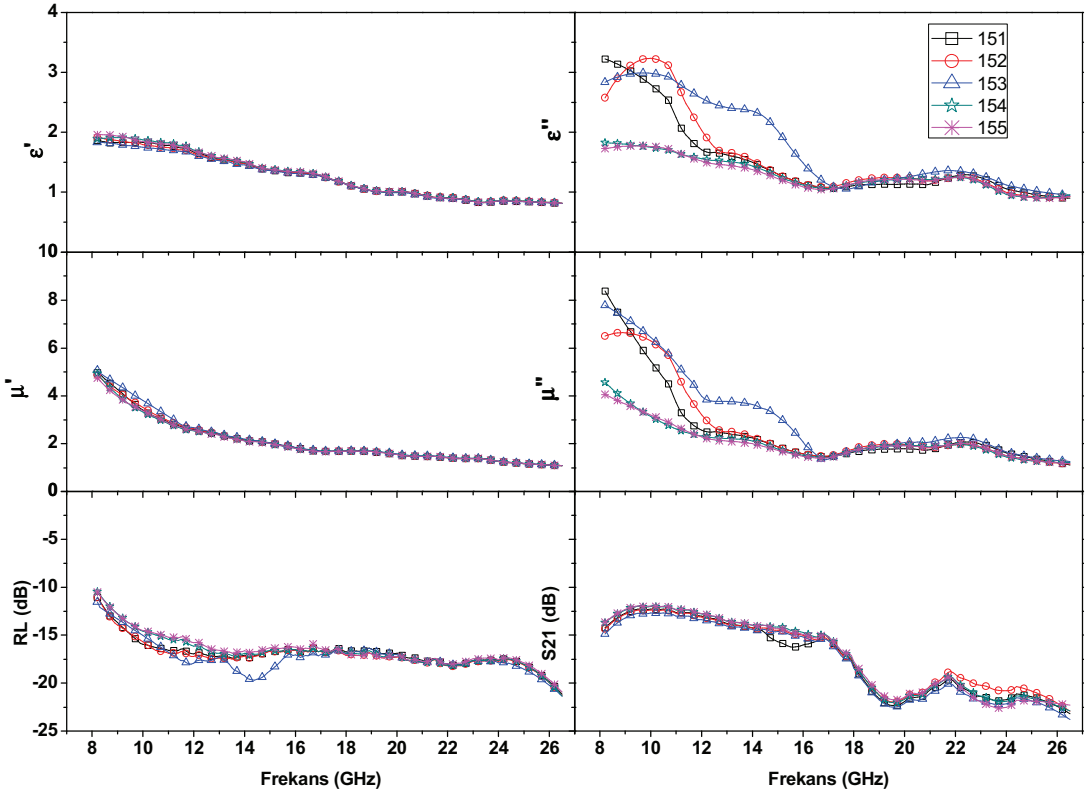


Şekil 4.41. 131-135 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri

Şekil 4.42 $\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar verilmiştir. Bu eğrilerden ϵ' ve ϵ'' küçük bir eğimle azalma gösterirken μ' ve μ'' katsayıları üstel olarak azalmaktadır. ϵ' 2 ile 1.5 arasında ϵ'' ise 2 ile 1 arasında değerlere sahip iken μ' in 5 ile 1 arasında μ'' ise 4 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı μ''/μ' oranına göre çok büyük olduğu ve elektromanyetik dalga ile etkileşiminde dielektrik kayıp mekanizmasının çok baskın olduğu anlaşılmaktadır. Geçme katsayısı S21 -10 dB ile -15 dB arasında değişirken yansıma kaybı RL -10 dB ile -22 dB arasında elde edilmiştir. Kaplama süresi 2 ve 4 dk olan bezlerde yansıma kaybı ve S21 geçirme katsayısı daha küçük değerler vermektedir. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısı kaplama süresi arttıkça daha yansıtıcı malzeme elde edilmiştir. $\text{Cr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}$ banyosunda verimli RL ve S21 değerleri için ideal kaplama süresi 2-4 dk civarındadır.



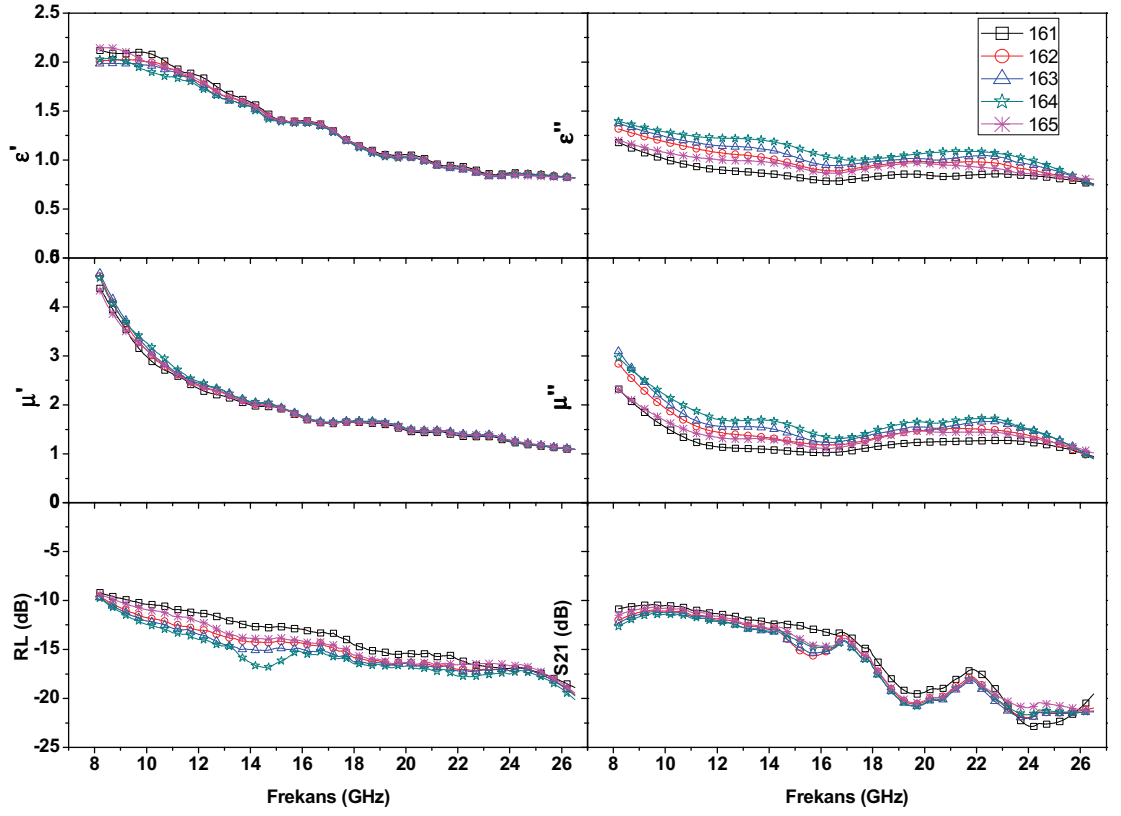
Şekil 4.42. 141-145 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri



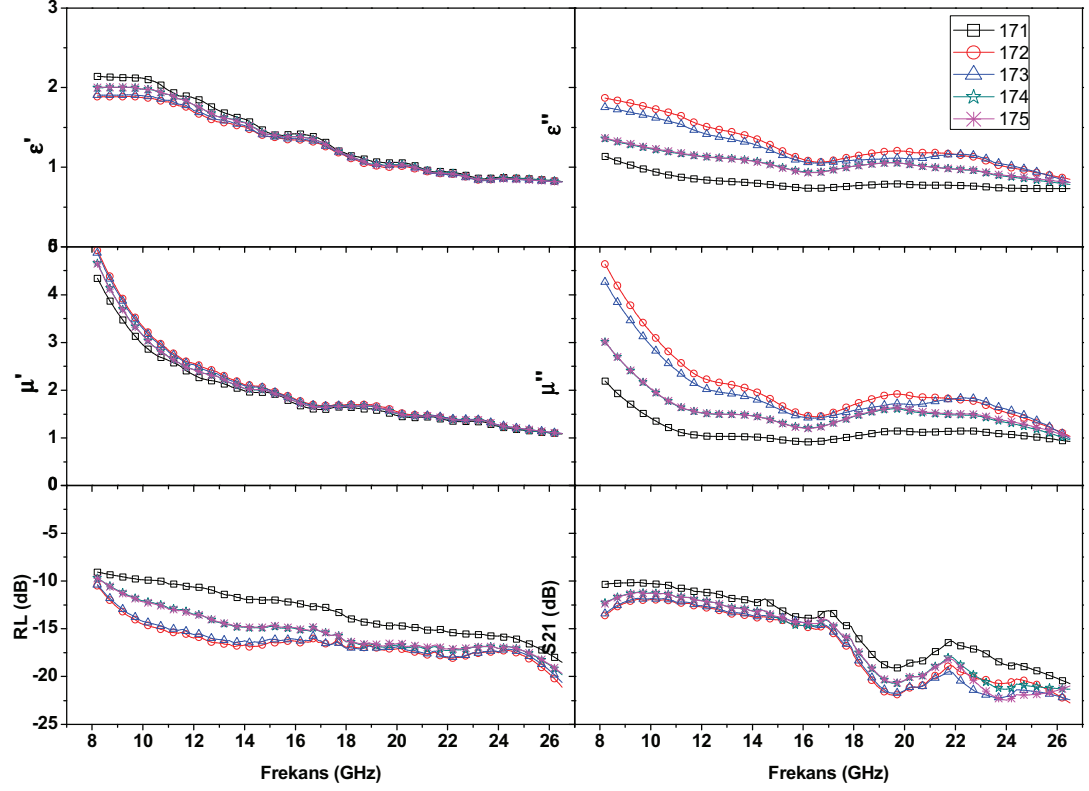
Şekil 4.43. 151-151 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri

$\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.43 görülmektedir. Bu eğrilerden ϵ' ve μ' bütün kaplam süreleri için benzer özellik gösterip küçük bir eğimle azalma gösterirken ϵ'' ve μ'' katsayıları daha karışık ve 12 GHz kadar hızlı azalma eğilimindeyken bu frekans sonrası azalma yavaşlamaktadır. ϵ' 2 ile 1.5 arasında μ' ise 5 ile 2 arasında değerlere sahip iken ϵ'' ve μ'' az süreli kaplamalarda (0.5, 1 ve 2 dk yada 151, 152 ve 153 kodlu bezlerde) sırasıyla 3-1 ve 8-1 arasında değişirken yine bu parametreler uzun süreli kaplamalarda (4 ve 8 dk yada 154 ve 155 kodlu bezlerde) daha az değişken olup sırasıyla 2-1 ve 4-1 aralığında değişmektedir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı ve μ''/μ' oranının bahsedilen düşük süreli kaplamalarda çok büyük değerlerinde ise küçük olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak Geçme katsayısı S21 ve yansıma kaybı RL, -12 dB ile -23 dB arasında değişirken 153 kodlu (2 dk kaplanmış) bezde yansıma kaybı RL -20 dB değerlere düşmektedir. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısı kaplama süresi arttıkça değişik değerler vermiş ve uzun süreli kaplamalarda daha yansıtıcı malzeme elde edilmiştir. $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda verimli RL ve S21 değerleri için ideal kaplama süresi 2 dk civarındadır.

Şekil 4.44'de Cr yoğunluğunun fazla olduğu $\text{Cr}_{0.8}\text{Co}_{0.2}$ kompozisyonunda hazırlanan banyoda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar görülmektedir. Bu eğrilerden ϵ' ve ϵ'' küçük bir eğimle azalma görülürken μ' ve μ'' katsayıları üstel olarak azalmaktadır. ϵ' 2 ile 1 arasında ϵ'' ise 1.5 ile 1 arasında değerlere sahip iken μ' ın 5 ile 1 arasında μ'' ise 3 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir. Kaplama süresi 4 dk olan bezin (164 kodlu) en düşük ϵ' değerlerine ve en yüksek ϵ'' , μ'' ve μ' değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı μ''/μ' oranına göre büyük olduğu ve elektromanyetik dalga ile etkileşiminde dielektrik kayıp mekanizmasının çok baskın olduğu anlaşılmaktadır. Geçme katsayısı S21 -10 dB ile -23 dB arasında değişirken yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında elde edilmiştir. Kaplama süresi 2 ve 4 dk olan bezlerde yansıma kaybı ve S21 geçirme katsayısı daha küçük değerler vermektedir. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısı kaplama süresi arttıkça daha yansıtıcı malzeme elde edilmiştir. Bu banyoda verimli RL ve S21 değerleri için ideal kaplama süresi 2-4 dk civarındadır.



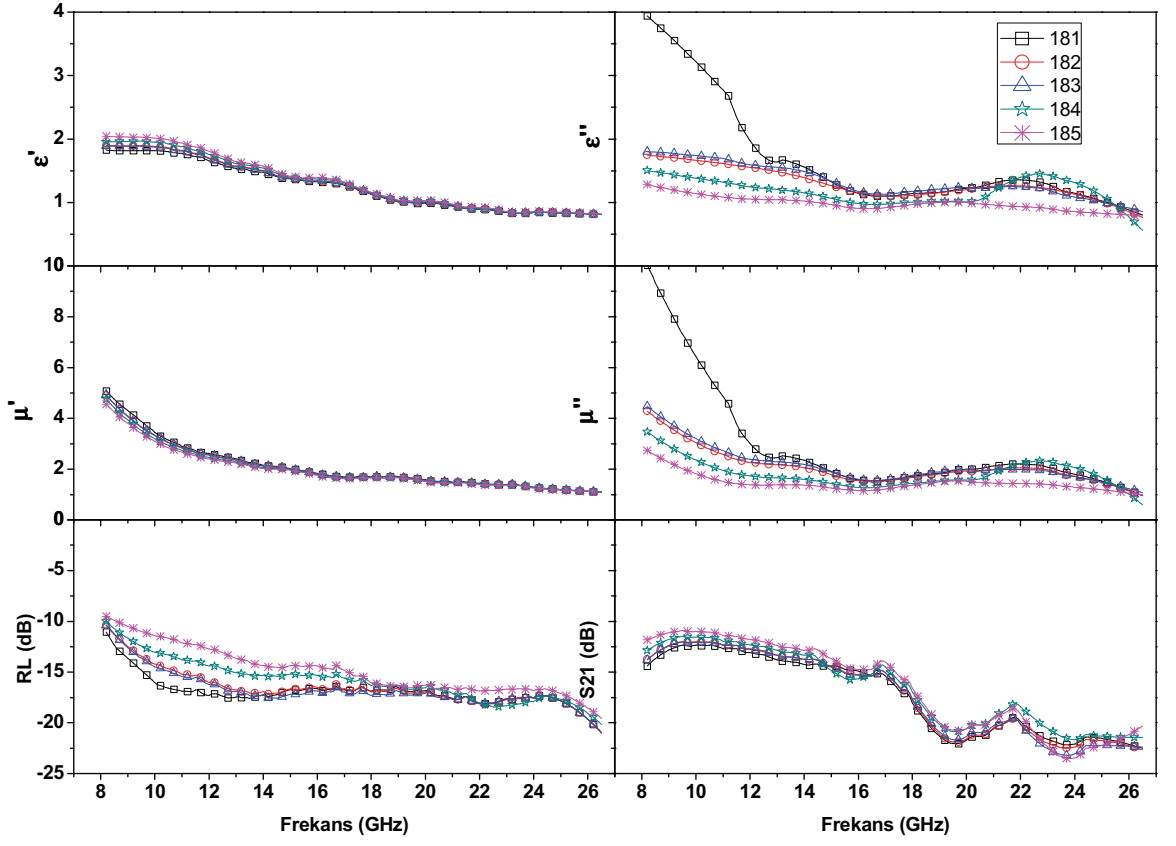
Şekil 4.44. 161-165 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri



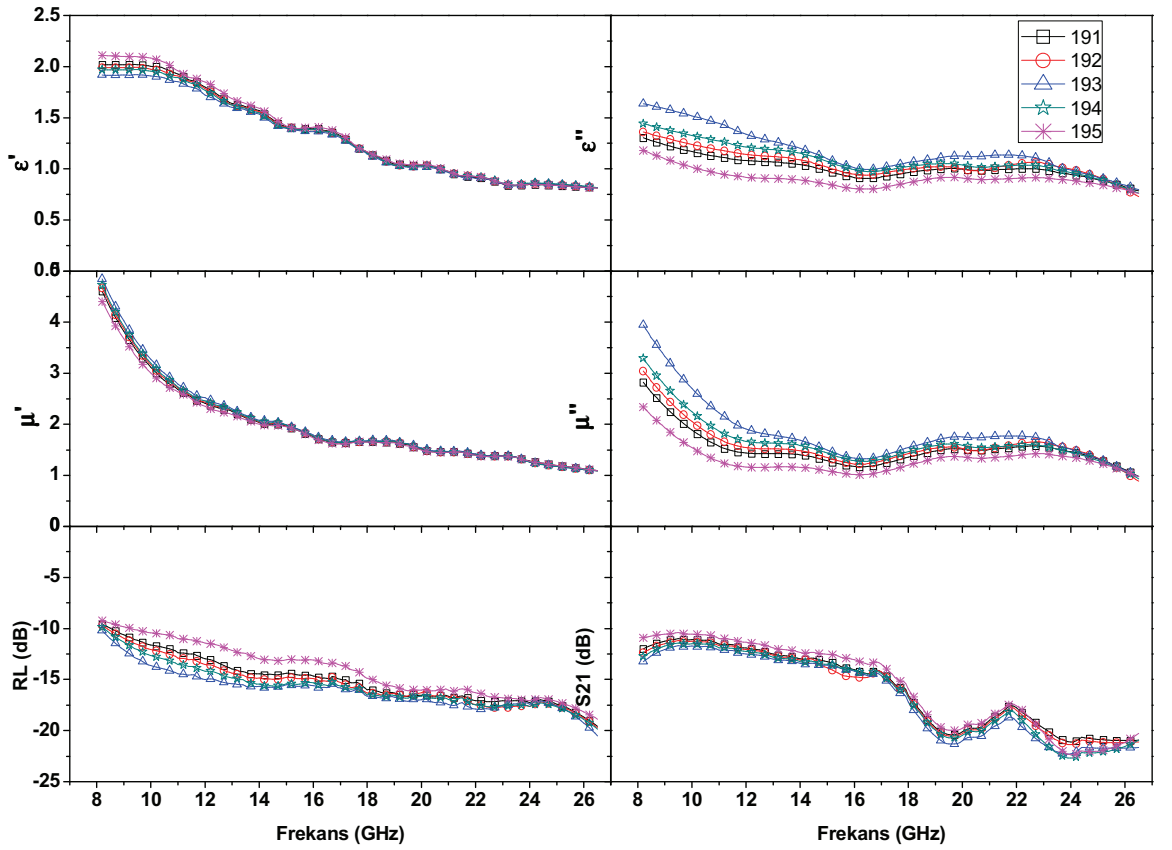
Şekil 4.45. 171-175 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri

$\text{Cr}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.45 görülmektedir. Bu bezlerde ϵ' ve ϵ'' küçük bir eğimle azalma görülürken μ' ve μ'' katsayıları üstel olarak azalmaktadır. ϵ' 2 ile 1 arasında ϵ'' ise 2 ile 1 arasında değerlere sahip iken μ' 5 ile 1 arasında μ'' ise 4 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir. Kaplama süresi 1 dk olan bezin (172 kodlu) en düşük ϵ' değerlerine ve en yüksek ϵ'' , μ'' ve μ' değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı μ''/μ' oranına göre kıyaslanabilir büyükte olduğu ve dielektrik ve manyetik kayıp mekanizmalarının birlikte olduğu anlaşılmaktadır. Geçme katsayısı S21 -10 dB ile -22 dB arasında değişirken yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında elde edilmiştir. Kaplama süresi 1 ve 2 dk olan bezlerde yansıma kaybı ve S21 geçirme katsayısı daha küçük değerler vermektedir. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısı kaplama süresi arttıkça (4 ve 8 dk kaplamalarda) daha yansıtıcı malzeme elde edilmiştir. Bu banyoda verimli RL ve S21 değerleri için ideal kaplama süresi 1 dk civarındadır.

Eşit miktarda Cr ve Ni kompozisyonuna sahip $\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.46 görülmektedir. Bu eğrilerden ϵ' ve μ' bütün kaplam süreleri için benzer özellik gösterip küçük bir eğimle azalma gösterirken, ϵ'' ve μ'' katsayıları daha karışık ve 12 GHz kadar hızlı azalma eğilimindeyken bu frekans sonrası azalma yavaşlamaktadır. ϵ' 2 ile 1.5 arasında μ' ise 5 ile 2 arasında değerlere sahip iken ϵ'' ve μ'' az süreli kaplamalarda (0.5, 1 ve 2 dk yada 181, 182 ve 183 kodlu bezlerde) sırasıyla 4-1 ve 8-1 arasında değişirken yine bu parametreler uzun süreli kaplamalarda (4 ve 8 dk yada 184 ve 185 kodlu bezlerde) daha az değişken olup sırasıyla 2-1 ve 4-1 aralığında değişmektedir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı ve μ''/μ' oranının bahsedilen düşük süreli kaplamalarda çok büyük değerlerinde ise küçük olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak Geçme katsayısı S21 -12 dB ile -24 dB arasında değişirken yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında değerler almaktadır. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısı kaplama süresi arttıkça artmaktadır ve ne kadar kısa süreli kaplama yapılırsa daha az yansıtıcı malzeme elde edilmiştir. $\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ banyosunda verimli RL ve S21 değerleri için ideal kaplama süresi minimum süre olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.46. 181-185 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri



Şekil 4.47. 191-195 kodlu bezlere ait ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' , RL ve S21 eğrileri

$\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ banyosunda farklı sürelerde kaplan bezlere ait fiziksel katsayılar Şekil 4.47. görülmektedir. Bu bezlerde ϵ' ve ϵ'' küçük bir eğimle azalma görülürken μ' ve μ'' katsayıları üstel olarak azalmaktadır. ϵ' ve ϵ'' 2 ile 1 arasında değerlere sahip iken μ' in 5 ile 2 arasında μ'' ise 4 ile 1 arasında değiştiği ve bu katsayıların frekans attıkça üstel azalan bir eğilim gösterdikleri gözlenmiştir. Kaplama süresi 2 dk olan bezin (193 kodlu) en düşük ϵ' değerlerine ve en yüksek ϵ'' , μ'' ve μ' değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu kaplama bezlerde ϵ''/ϵ' oranı μ''/μ' oranına göre daha büyüktür ve Elektromanyetik dalga sönümlemede dielektrik özellikleri daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Geçme katsayısı S21 -10 dB ile -22 dB arasında değişirken yansıma kaybı RL -10 dB ile -20 dB arasında elde edilmiştir. Kaplama süresi 2 ve 4 dk olan bezlerde yansıma kaybı ve S21 geçirme katsayısı daha küçük değerler vermektedir. Yansıma kaybı ve Geçirme katsayısı kaplama süresi arttıkça (8 dk kaplamalarda) daha yansıtıcı malzeme elde edilmiştir. Bu banyoda verimli RL ve S21 değerleri için ideal kaplama süresi 2-4 dk civarındadır

Genel olarak permitivite ve permabilitenin reel ve sanal kısımları frekans arttıkça parabolik olarak azalmakta ve 1 değerine yakınlarına gelmektedir. Düşük frekanslarda ise farklılıklar daha fazladır. Özellikle Ni yoğunluklu banyoda yapılan kaplamalarda ve Co-Cr eşit oranlı kaplamalarda permabilitenin sanal kısımlarının daha büyük değerlerde olduğu göze çarpmaktadır. Metal, alaşım ve kompozit malzemelerin 1-18 GHz arasında mikrodalga özellikleri incelenmiş ve permitivite ile permabilite değerleri hesaplanarak sunulduğu çalışmalar bulunmaktadır. X. G. Liu ve çalışma arkadaşları [106] tarafından FeNi ve FeNi/ AlO_x nano malzemelerin kompleks permitivite ve permabilite değerlerini sırasıyla 12-3 (ϵ') 0-1 (ϵ''), 1.2-0.9(μ') ve 0.15- -0.075(μ'') aralıklarında bulmuşlar. Diğer bir çalışmada ise Fe nano ve mikron altı parçacıklarının 28-12 (ϵ'), 12-2 (ϵ''), 1.4-0.5 (μ') ve 0.5 - -0.2 (μ'') aralıklarında değişen permitivite ve permabilite değerleri sunulmuştur [107]. Ni-Co-P üçlü alaşım kaplanmış SiC tozlarında yapılan çalışmada kompozitlerde ϵ' : 30-8, ϵ'' : 12-1, μ' : 1.3 - 0.9 ve μ'' : 0.3- -0.2 aralıklarında değer alan fiziksel parametrelere sahiptir [108]. 50 nm çaplı Ni nano parçacıklarda, ϵ' : 14-15, ϵ'' : 0-1.5, μ' : 1.3-0.9, μ'' : 0.3-0 aralıklarına sonuçlar elde edilmiştir [109]. 100 nm çaplı nano plaka şekline sahip FeCo parçacıklarda 20 - 16 aralığında ϵ' , 4 - 2 aralığında ϵ'' , 2.4 - 1.2 aralığında μ' ve 0.3-0.5 aralığında μ'' değerlere sahip oldukları bulunmuştur [110]. Bu tezin bulguları ile bahsedilen çalışmaların sonuçları karşılaştırıldığına

permitivite değerlerinin ve permabilitenin reel kısımlarının uyumlu olduğu görülmektedir. Nano malzemelerde yüzeyde tamamlanmamış bağa sahip atomlar veya çok sık rastlanan metal çekirdek metal-oksit kabuktan oluşan ikili yapıdan dolayı malzemenin dielektrik ve manyetik özelliklerinde değişiklikler görülmektedir. Bu değerlerdeki farklılıklar manyetik metalin bir polimer üzerine kaplandığı kompozitlerde artmaktadır. Özellikle akımsız kaplama yöntemi gibi elektroliz yöntemine göre daha kontrolsüz bir metotla elde edilen kaplama kompozitlerde tahmin edilmesi güç sonuçlar elde edilmektedir. İlerleyen bölümde bu kompozit kaplamaların tahminin yansıma kayıp özellikleri incelenecektir.

5. SONUÇ ve YORUMLAR

5.1. Modellemeler

Çalışma kapsamında üretilen EMARSOM'ların metal önüne tek katmanlı olarak kaplanması sonucu elde edilecek Yansıma kayıpları modellenmiş ve bu bölümde sonuçlar sunulacaktır. İlk olarak sadece Hekzaferrit manyetik nano tozlardan elde edilen yansıma kayıpları ve farklı kalınlıklar için frekans ve kalınlığa bağlı Yansıma kayıp bölgeleri ortaya konacaktır. Daha sonra benzer şekilde Metal kaplı bezlerin Yansıma kayıpları ve düşük yansıma kaybı veren seçilen bazı bezler için frekansa ve kalınlığa bağlı Yansıma kayıp bölgeleri sunulacaktır.

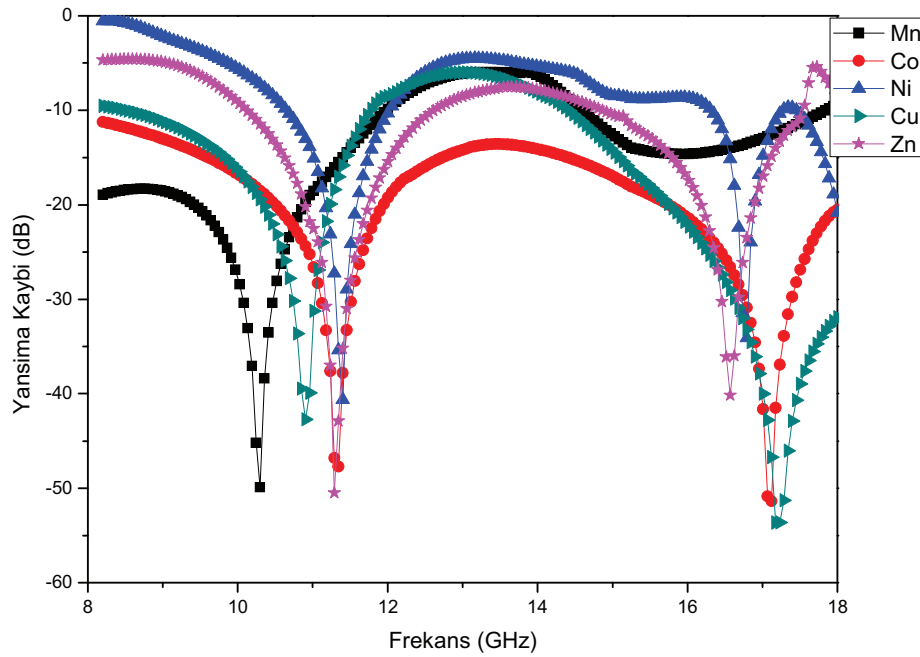
Çok katmanlı EMARSOM modellemeleri için ise önce manyetik tozların ve Metal kaplı bezlerden birlikte oluşabilecek tüm ihtimalli 2, 3 ve 4 katmanlı yapıların yansıma kayıpları 8.2-18 GHz aralığında (iki malzemenin ortak ölçüm aralığı) incelenecek. Daha sonra sadece metal kaplı bezlerden oluşan 2 ve 3 katmanlı olarak modellenen EMARSOM'ların Yansıma kayıp sonuçları 8.2-26.6 GHz arasında sunulacaktır.

FDTD metodu kullanılarak elektromanyetik dalganın en az yansıma kayıp sonucu elde edilen modelleme içerisinde ilerlemesi ve bu yüzeyden geri yansıyan dalga incelenecek. Buradan Maxwell denklemleri nümerik çözümünden ve Fourier dönüşümünden S11 parametresi elde edilerek diğer sonuçlarla kıyaslanacaktır.

Yansıma kaybı hesaplamalarında ve yorumlarında referans kabul edilen -15 dB değeri $RL = 20 \log(V_r / V_i)$ şeklinde yansıyan dalganın gelen dalgaya gerilim şiddetleri (Durgun dalga oranı) cinsinden oranı olarak ifade edilir. Burada -15 dB lik kayıp metal ile test numunesinin kaplanıldığında, gerilim şiddetleri düzeyinde gelen dalganın gerilim şiddeti % 82.2 lik kayıba uğradığı anlamına gelmektedir.

5.2. Manyetik Tozlarda Yansima Kaybı

Hekzaferrit numunelerden elde edilen yansima kaybı egrileri Şekil 5.1 de verilmiştir. Genel olarak 11 GHz ile 17 GHz civarında iki farklı frekansta yansima kayıp pikleri gözlenmiştir. Bu frekanslar katkılanan iyon ile değişmektedir. RL piklerine ait maksimum RL değeri ve frekansı , -20 dB referansa göre band aralığı ve genişlikleri Tablo 5.1 de listelenmiştir.



Şekil. 5.1. Ba⁺²Fe⁺²₁₀(Mn⁺²X⁺²Zn⁺²)O₁₉ , X⁺² = Mn⁺², Co⁺², Ni⁺², Cu⁺², Zn⁺² için hesaplanan Yansima Kaybı (RL).

Mn⁺² katkılı hekzaferritde -20 dB sınırının altında ve -50 dB değerine ulaşan 10.30 GHz de 1.54 GHz genişliğinde sadece bir pik elde edilmiştir ve bu en geniş birinci piktir. Co⁺² katkılı hekzaferritde 11.34 GHz de -47.7 dB değerine ulaşan 1.52 GHz genişliğinde birinci pik ile 17.12 GHz de -51.4 dB değerine ulaşan 2.37 GHz genişliğinde ikinci pik gözlenmiştir. Ni⁺² katkılı hekzaferritlerde ise 1.pik sağa kaymış ve 11.4 GHz de 0.45 GHz genişlikte (-40.6 DB) ikinci pik ise 16.8 GHz de 0.26 GHz genişlikte (-34.09 DB) tespit edilmiştir. Cu⁺² katkılı hekzaferritlerde 10.9 GHz de 0.93 GHz genişlikte (-42.7 DB) birinci pike ve 17.21 GHz de 2.24 GHz genişlikte (-53.77 DB) ikinci pik tespit edilmiştir. Zn⁺² katkılı hekzaferritde -20 dB

sınırının altında ve -50 dB değerine ulaşan 11.30 GHz de 0.89 GHz genişliğinde birinci pik -53.77 dB değerine ulaşan 17.21 GHz de 2.24 GHz genişliğinde ikinci pik elde edilmiştir.

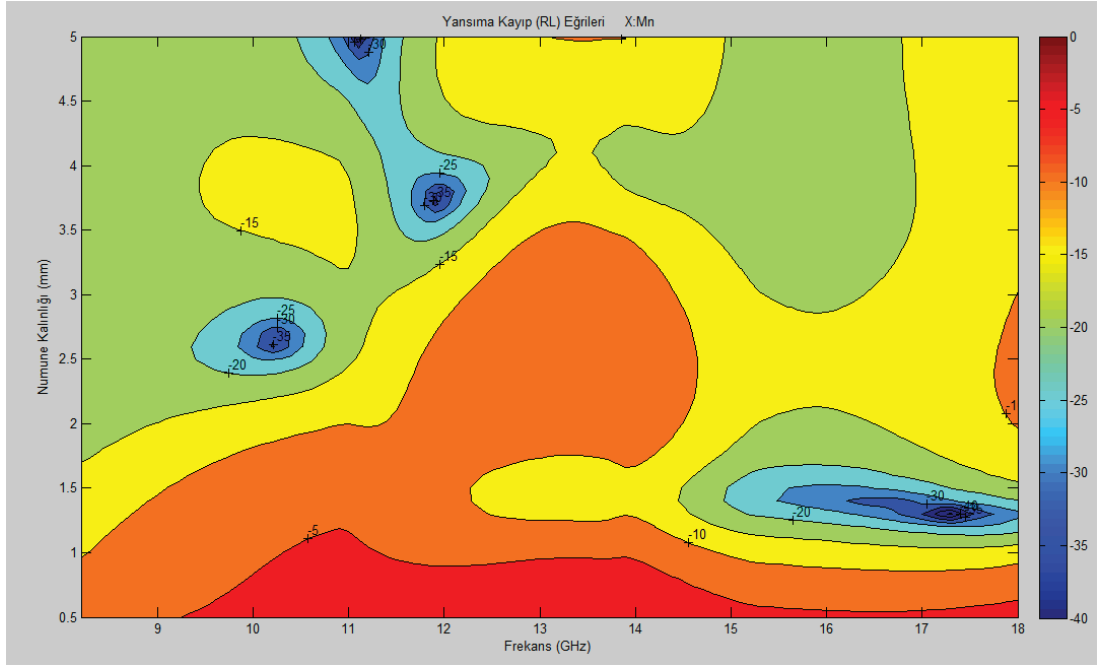
Tablo 5.1. Yansıma kaybı grafiklerinden elde edilen 1. ve 2. piklere ait -20 dB sınırının altında; bant aralıkları, bant genişlikleri, maksimum RL değerleri ve frekansları.

X	1. Yansıma kayıp piki				2. Yansıma kayıp piki			
	Bant aralığı (GHz)	Δf_1 (GHz)	$RL_{1,max}$ (dB)	$f_{1,max}$ (GHz)	Bant aralığı (GHz)	Δf_2 (GHz)	$RL_{2,max}$ (dB)	$f_{2,max}$ (GHz)
Mn ⁺²	09,37-10,91	1,54	-50,0	10,30				
Co ⁺²	10,46-11,98	1,52	-47,7	11,34	15,63-18,00	2,37	-51,40	17,12
Ni ⁺²	11,16-11,61	0,45	-40,6	11,40	16,64-16,90	0,26	-34,09	16,80
Cu ⁺²	10,32-11,25	0,93	-42,7	10,90	15,76-18,00	2,24+	-53,77	17,21
Zn ⁺²	10,88-11,77	0,89	-50,0	11,30	16,16-16,90	0,74	-40,10	16,57

Genel olarak 11 GHz ve 16 GHz civarında olmak üzere iki farklı frekans aralığında yansıma kaybı veren Hexaferritler elde edilmiştir. Bulunan bu sonuçlar literatürde var olan bazı çalışmalarla da uyumludur. Bu çalışmalardan bazıları şöyle özetlenebilir. Saeed ve grubu [70] Co, Ti ve Mn katkılı M tipi hexaferritlerde farklı kalınlıklar için 14.6 GHz (-26.5 dB) ve 18.6 GHz (-23 dB) olmak üzere iki farklı yansıma kaybı piki elde etmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise [72], Mn-Co ve Co-Ti katkılı ayrı ayrı M-tipi Sr hexaferritlerin 12-13 ve 18.6-19.6 aralıklarında yine iki farklı yansıma kayıp pikleri tespit etmişlerdir. Mikrodalga ile modifiye akı metodu ile elde edilen Ba hexaferritlerde 14.25-14.75 aralığında bir pike sahip yansıma eğrileri bulunmuştur[73]. BaFe₉Mg_{1.5}Ti_{1.5}O₁₉ Hexaferritlerde ise 14.7 GHz ve 16.44 GHz de olmak üzere -49.69 dB ve -45.65 dB değerlerinde yansıma kayıpları elde edilmiştir[75]. Al ve Cr katkılı hexaferritlerde ise 7.29, 9.70, 11.87 ve 14.27 GHz frekanslar 4 ayrı yansıma kayıp pikleri gözlemlenmiştir[111]. Üretim metodu olarak bu çalışma ile aynı olan ve 5-15 GHz arasında yapılan deneysel çalışmada, Ba hexaferrit nano çubuklarında 8-11 GHz arasında tek pikten yansıma kaybı verdikleri gözlemlenmiştir[76]. Özetle Bu çalışmada elde edilen yansıma kayıp eğrileri literatürle uyumlu yeni sonuçlar elde edilmiştir.

Hexaferritlerde yüksek magnetokristal anisotropi nedeniyle 48 GHz civarında olan doğal manyetik rezonans nano boyutlu numunelerde daha düşük frekanslarda görülebilmektedir. Yukarıdaki çalışmaların ışığında yanımsa kaybının daha az olması ve soğurma bant genişliği katkılanan iyon cinsine ve nano parçacıkların şekil ve boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. Katkılanan manyetik iyonlar ile farklı değiş tokuş etkileşimleri ve manyetik olmayan iyonlar üzerinden süper değiş tokuş etkileşimleri magnetokristal anisotropi ekseninin c ekseninden a-b yüzeyine kaymasına sebep olabilir. Buda manyetik iyon spinlerinin etkin çiftlenmesini ve iyonlara spin-yörünge çiftlenmesi ile etki eden kristal elektrik alanında değişikliğe sebep olabileceği öngörülmektedir. Bütün bu katkılarını etkisi ile rezonans frekansı düşük frekanslara kayabilmektedir[74]. Bununla birlikte parçacık ebatları arasındaki göreceli oran nano çubuk yapılarıdaki gibi çok büyük olursa parçacık üzerinde daha büyük gözenekli (pores) yapılar meydana gelir ve bu yapılar elektromanyetik dalganın daha kolay içe nüfuz etmesini sağlarken geri doğrudan yansımada azaltıcı görev yaparlar [112]. Ayrıca manyetik çubuk yapılarda etkin anizotropi termokristal anizotropi ve şekil anizotropisini içermektedir [113]. Buradan hareketle büyük şekil anizotropisine sahip parçacıklarda domen dönme hareketi daha zor olması ve artan yüzey hacim oranı ile yüzeydeki atomların sallanan bağları ile tamamlanmamış yüzey koordinasyonu iç yüzey kutuplanmalarına ve çok yüzeyli yansımalara sebep olarak daha çok mikrodalga soğurulmasına sebep olabilir. Hexaferrit nano parçacıklar için bu iki frekanslı soğurma piklerinden düşük frekansta olanı domen duvar hareketi yüksek frekansta olanı ise spin rezonansı ile izah edilmiştir[114].

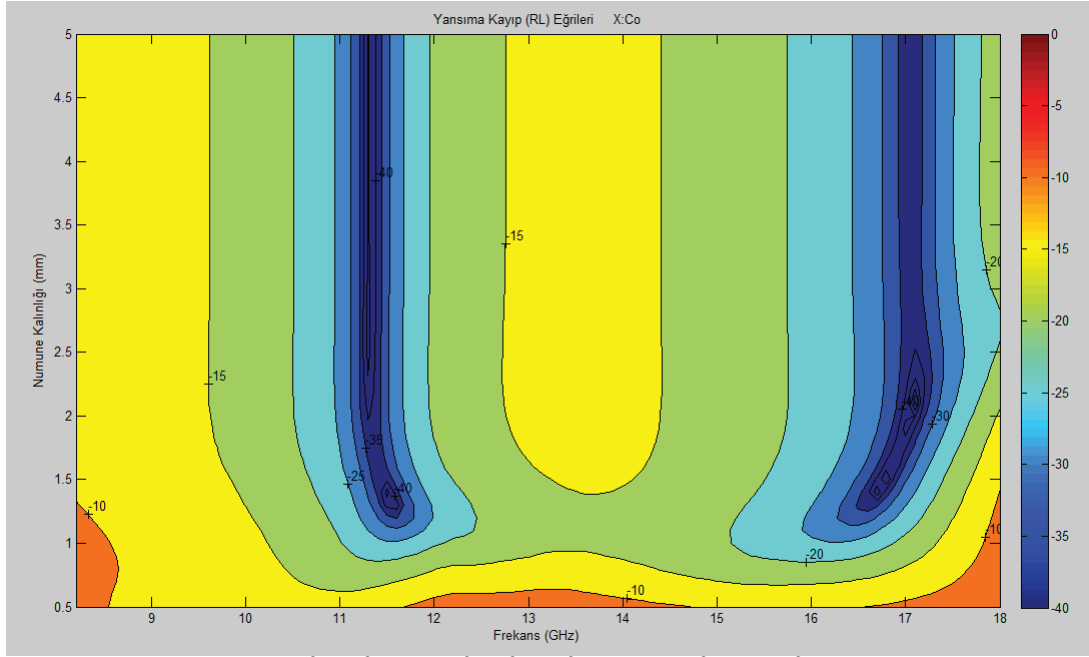
NRW algoritması sonucu elde edilen permitivite ve permabilite değerleri kullanılarak 8.2-18 GHz frekans aralığında ve 0.5 - 5 mm kalınlıkları arasında $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$, $X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}, Zn^{+2}$ numuneleri için Yansıma kayıpları hesaplanmış (Denklem 2.56) ve eğriler olarak sırasıyla Şekil 5.2 - 56 arasında sunulmuştur.



Şekil. 5.2. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansıma Kaybı çizgileri.

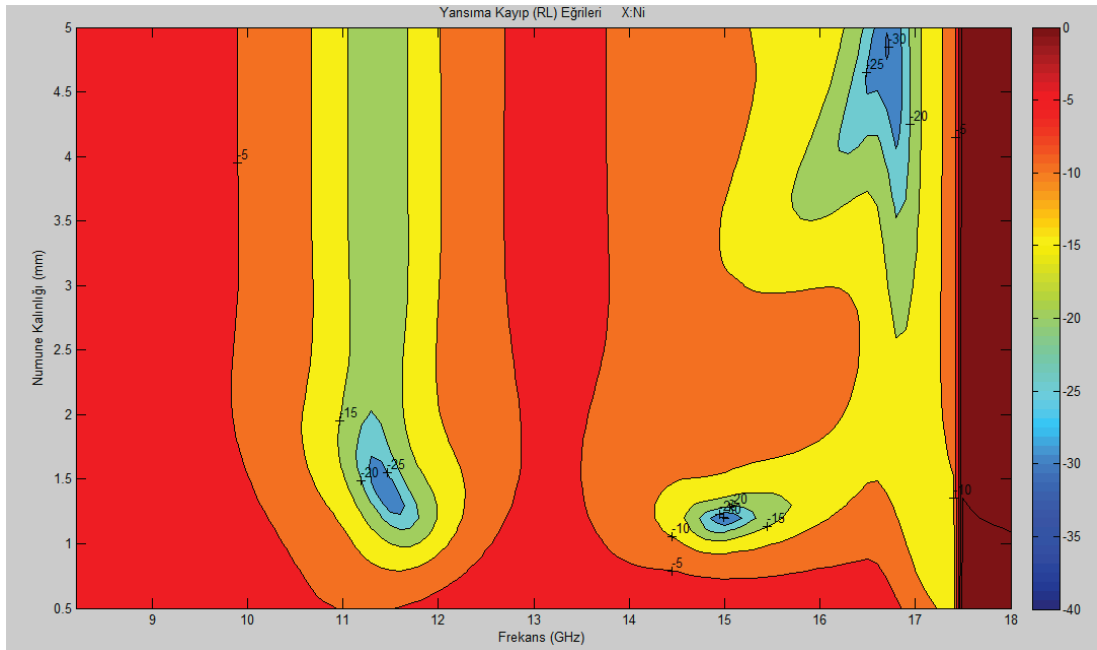
Şekil 5.2 den $\text{X}^{+2} = \text{Mn}^{+2}$ numunesinin 1-1.5 mm kalınlıkları arasında 15-18 GHz arasında -20 dB den az yansıma kaybı veren bölge saptanmıştır. Diğer bir bölge ise 2.5-3 mm kalınlık aralığında ve 9.5-11 GHz aralığında -20 dB sınırının altında yansıma kaybı gözlenmiştir ki burası deneysel olarak elde edilen permittivite ve permabilitenin bir birine yaklaştığı bölgedir. Bu malzeme kullanılarak daha kalın tasarlanabilecek bir numune 11 ve 12 GHz civarında keskin iki yansıma kayıp bölgesi daha bulunmaktadır bu bölgeler daha kalın numune tasarımı gerektirdiğinden incelenmeyecektir.

$\text{X}^{+2} = \text{Co}^{+2}$ numunesinin 0.8 mm den kalın yapıda 11-12.4 GHz bandında ve 16-17.8 GHz bandında -20 dB den az yansıma kaybı veren bölge saptanmıştır (Şekil 5.3). Kalınlığın 1.5 mm üzerinde 10.8-12 GHz ve 16-18 GHz bandında -20 dB sınırının altında yansıma kaybı gözlenmiştir. En geniş bant aralığı 2.5 mm kalınlıkta elde edilebilir.

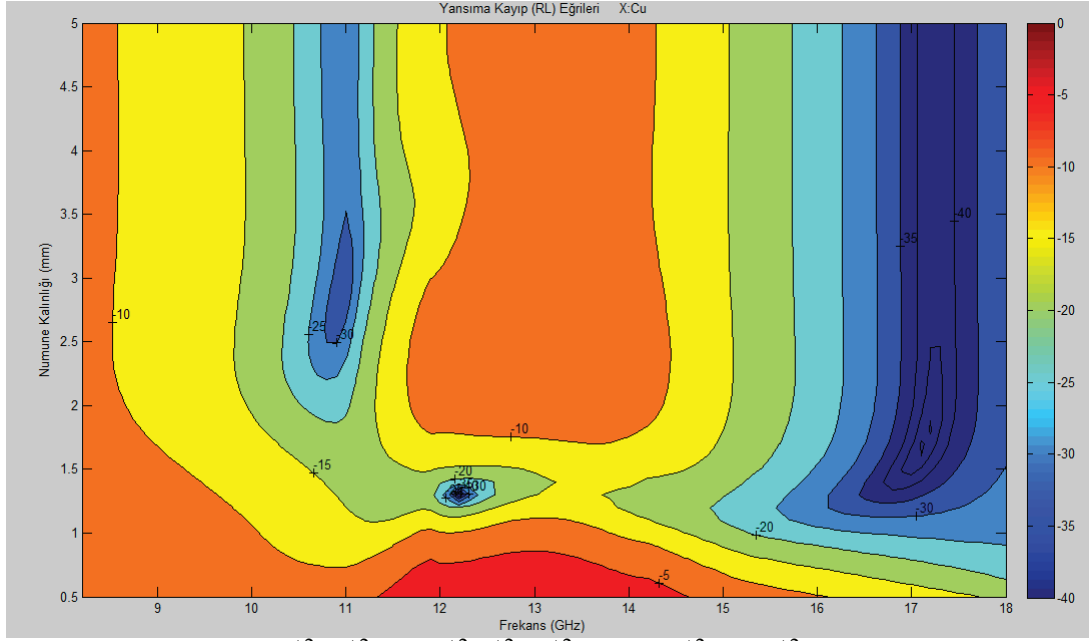


Şekil. 5.3. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$, $X^{+2} = Co^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.

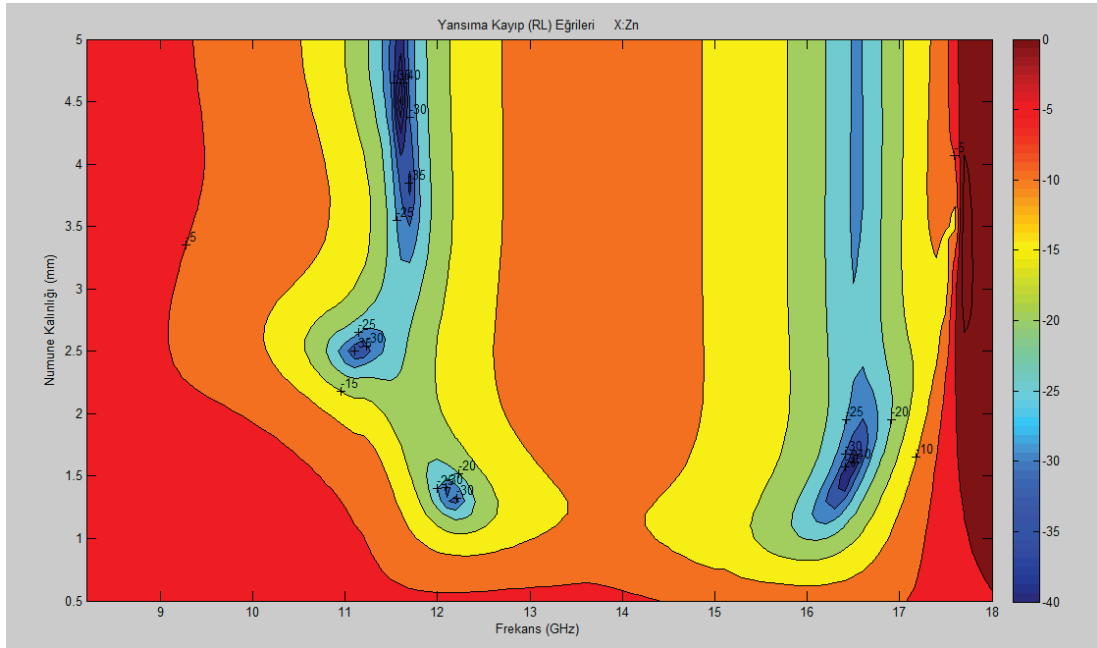
Şekil 5.4 den $X^{+2} = Ni^{+2}$ numunesinin 1.2-1.5 mm kalınlıkları arasında 11.2-11.8 GHz arasında 0.6 GHz bant genişliğinde ve 14.8-15.3 GHz arasında 0.6 GHz bant genişliğinde referans yansımaya kaybından (<-20 dB) daha az yansımaya kaybı veren iki bölge saptanmıştır. Diğer bir bölge ise 4mm kalınlığın üzerinde ve 16.5-17.2 GHz gibi yüksek frekanslarda bir bölgede az yansımaya kaybı vermektedir.



Şekil. 5.4. $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$, $X^{+2} = Ni^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.



Şekil. 5.5. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansima Kaybı çizgileri.



Şekil. 5.6. $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{X}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$, $\text{X}^{+2} = \text{Zn}^{+2}$ için frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansima Kaybı çizgileri.

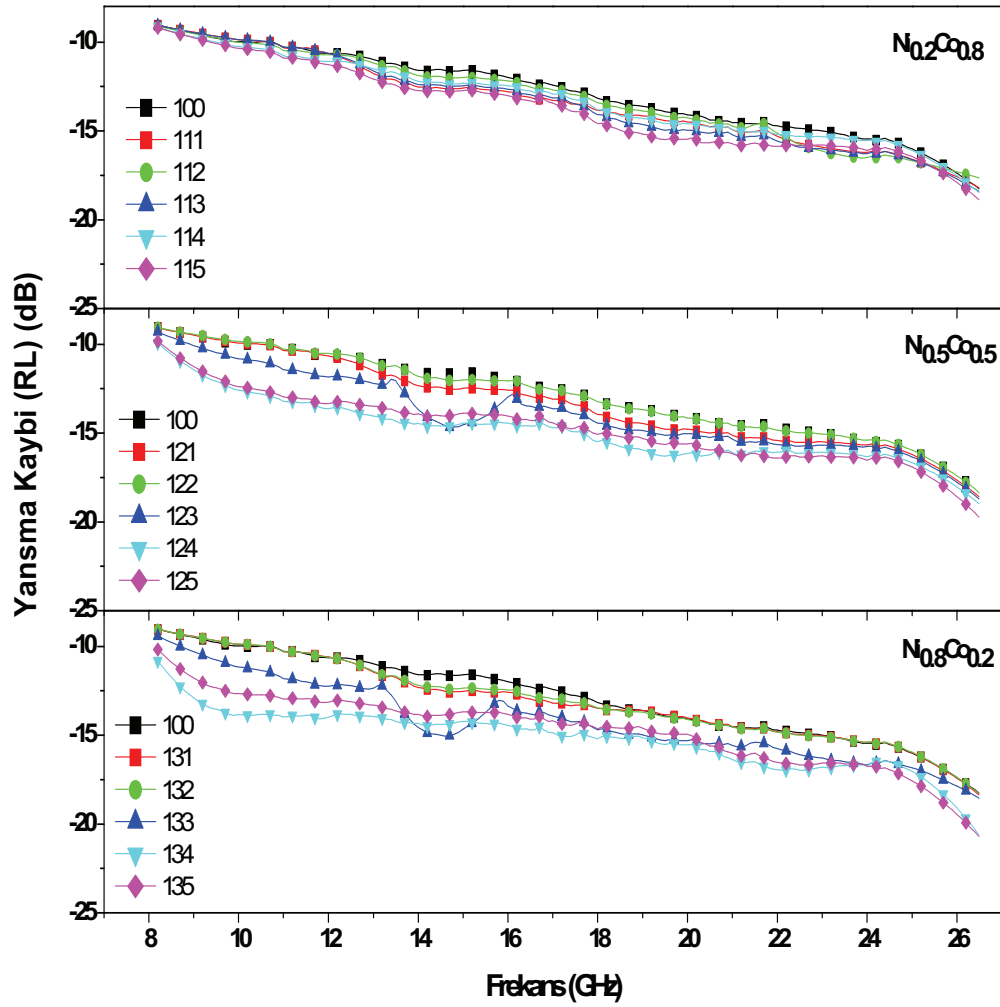
$\text{X}^{+2} = \text{Cu}^{+2}$ katkılı hekzaferrit kullanılarak 1.4 mm kalınlıkta tasarlanacak bir soğurucu malzemenin 12-12.5 GHz arasında keskin ve 15-18 arasında ise geniş bandta -20 DB altında yansima kaybına sebep olması öngörülmektedir (Şekil 5.5).

Diğer bir bölge ise 2 mm kalınlığın üzerinde 11 GHz de 1 GHz bant genişliğinde yansımaya kaybı beklenmektedir. Yüksek frekanslarda ise 2mm üzerinde kalınlıktan bağımsız ve 16 GHz-18 GHz arası tamamen -20 dBnin altında yansımaya kaybı hesaplanmıştır.

Şekil 5.6 da $X^{+2} = Zn^{+2}$ numunesinin frekans ve numune kalınlığına bağlı hesaplanan yansımaya kayıp eğrileri gösterilmektedir. Bu eğrilerden numunenin 1-1.5 mm kalınlıklarında 12-12.4 GHz arasında ve 16-16.5 GHz arasında -20dB den az yansımaya kaybı vermektedir. 16.5 GHz de 0.8 Ghz bant genişlikli yansımaya kaybı 1.5 mm üzeri kalınlıklarda bulunmuştur. 2.2 mm üzeri kalınlıklarda ise 11.8 GHz de 0.5 GHz bant genişliğinde referanstan daha az yansımaya kaybı tespit edilmiştir.

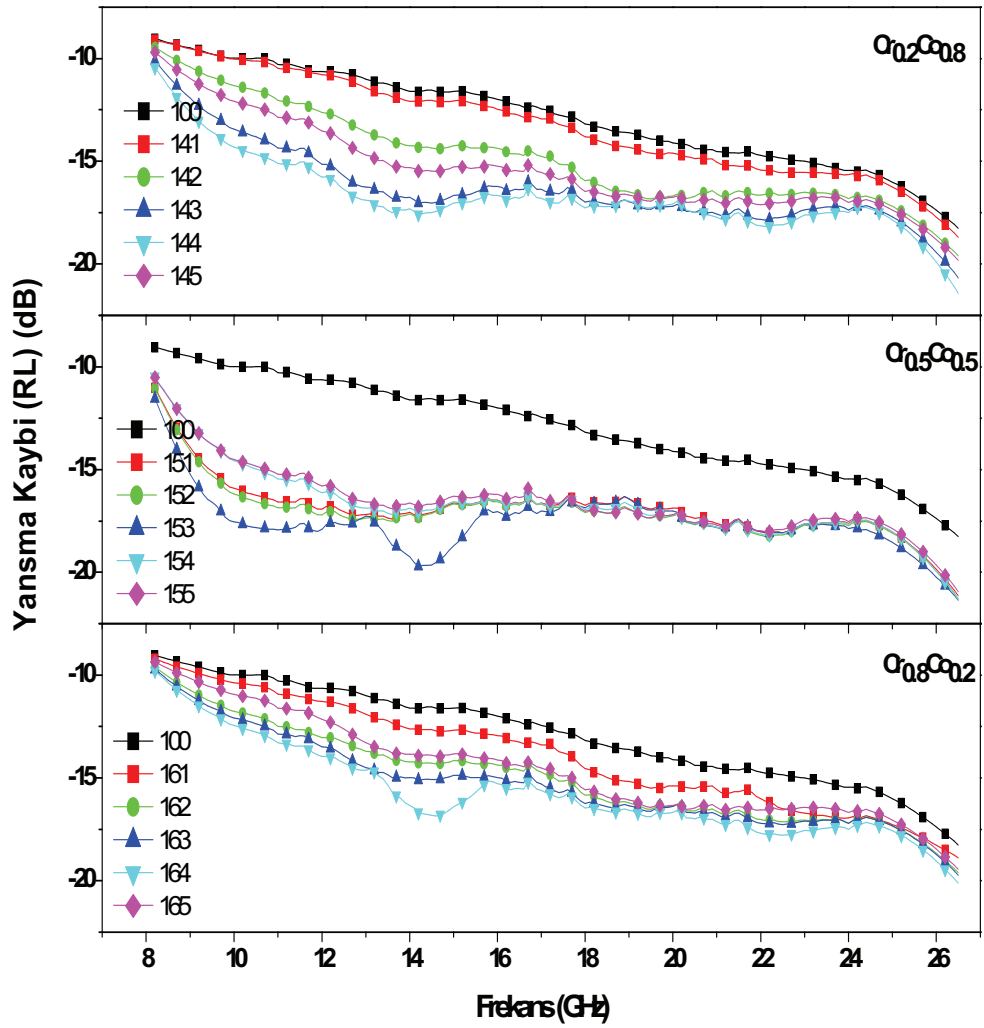
5.3. Metal Kaplı Bezlerde Yansımaya Kaybı

Metal kaplı bezlerde yansımaya kayıp eğrileri (RL) Şekil 5.7-5.9 arasında 100 kodlu kaplanmamış beze göre verilmiştir. Ni-Co banyosunda kaplanan bezlerde genel olarak frekans arttıkça yansımaya kaybının azaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte kaplama süresi arttıkça daha etkin soğurucu malzeme elde edilmektedir. $Ni_{0.2}Co_{0.8}$ banyosunda kaplanmış bezlerde kaplama süresi arttıkça RL daha düşük değerlere inmektedir. $Ni_{0.5}Co_{0.5}$ banyosundaki kaplamalarda ise en düşük RL değerini düşük frekanslarda 4 dk kaplanan (124 kodlu) numune verirken yüksek frekanslarda 8dk kaplanmış (125 kodlu) numune vermektedir. $Ni_{0.8}Co_{0.2}$ banyosunda kaplanan bezlerde de benzer sonuç elde edilmiş olup 4 dk (134 kodlu) ve 8 dk (135 kodlu) kaplanmış bezler en düşük yansımaya kayıp değerlerine sahiptirler. Bu kaplamalara ait SEM resimlerini analizinde açıklandığı üzere Co yoğun banyoda kaplananların daha çabuk tüm fiberi kaplayacak şekilde olması ve sadece mikron mertebesinde aralıklarla çatlaklar oluşması nedeniyle daha metalik özelliğe sahip kompozit elde edilmiştir. Banyodaki Co miktarı arttıkça mikron altı büyüklükte çekirdeklenme şeklinde oluşan kaplamalarda (135 kodlu numune) ise yansımaya kaybı en düşük kompozit elde edilmiştir. Bu banyolardan elde edilen kompozitlerden en düşük RL sahip olan 124,125, 134 ve 135 kodlu bezlerde kaplanmamış (100 kodlu) beze göre yansımaya kaybında 5 dB lik bir azalma gözlenmiştir.



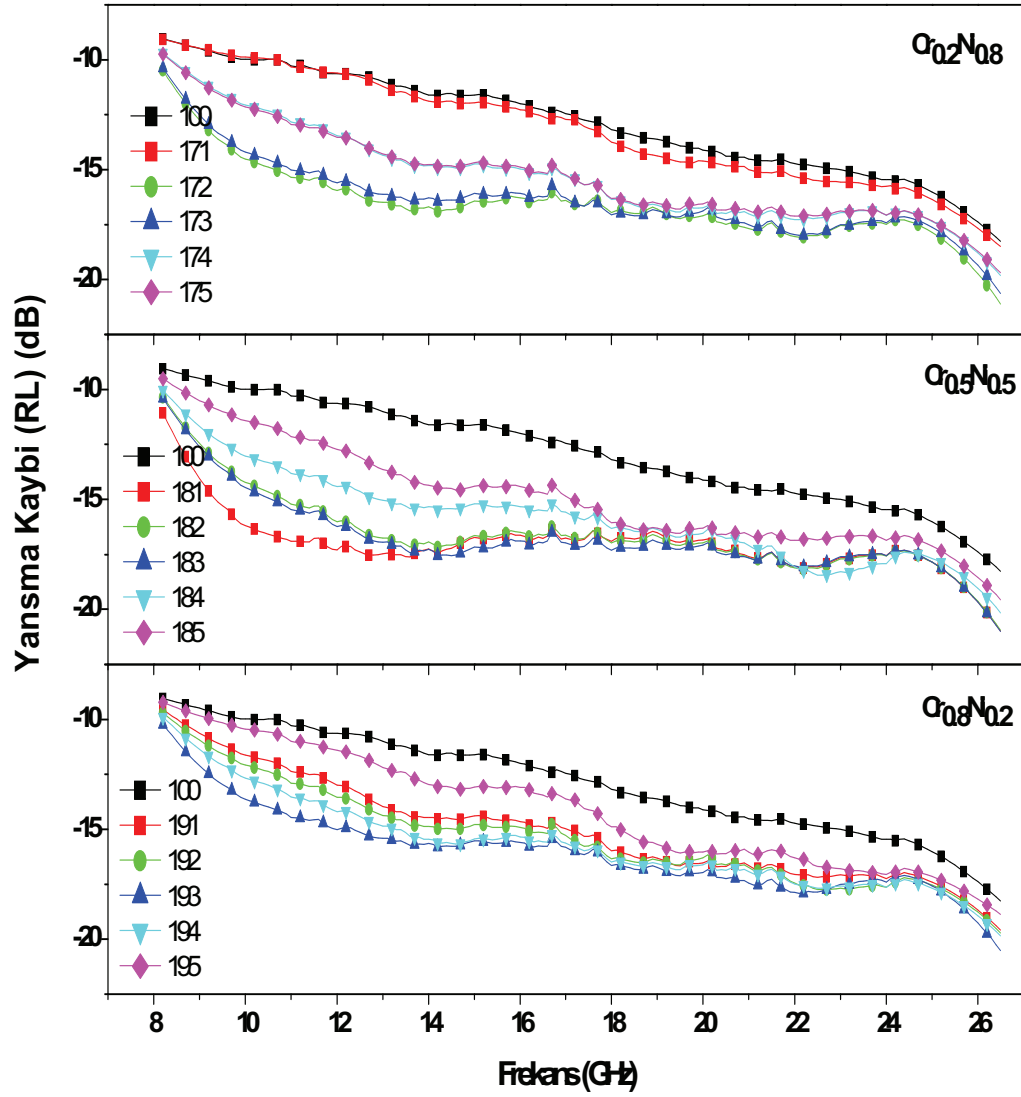
Şekil. 5.7. 111-135 arası ve 100 kodlu bezlere ait yansıma kayıp eğrileri

Şekil 5.8 de Cr-Co banyosunda kaplanmış bezlere ve kaplanmamış beze air yansıma kayıp eğrileri görülmektedir. RL eğrilerinde artan frekansla azalma eğilimi tespit edilmiştir. Bununla birlikte kaplama süresi arttıkça daha etkin soğurucu malzeme elde edilmektedir. Bu banyolarda kaplanmış bezlerde kaplama süresi arttıkça RL daha düşük değerlere inmektedir fakat daha uzun süre kaplamalarda yoğun kaplama dan dolayı yansıma kayıp değerleri büyümektedir. En düşük yansıma kaybına sahip bezler 144, 143, 153, 164 ve 163 olarak görülmektedir. En düşük RL değerleri elde etmek için $Cr_{0.2}Co_{0.8}$, $Cr_{0.5}Co_{0.5}$ ve $Cr_{0.8}Co_{0.2}$ banyolarının en iyi kaplama süresi sırasıyla 4 dk, 2 dk ve 4 dk olarak bulunmuştur. Bu en az yansıma veren kaplamaların RL değerleri kaplanmamış (100 kodlu) beze göre 5-10 dB kadar daha az olarak bulunmuştur.



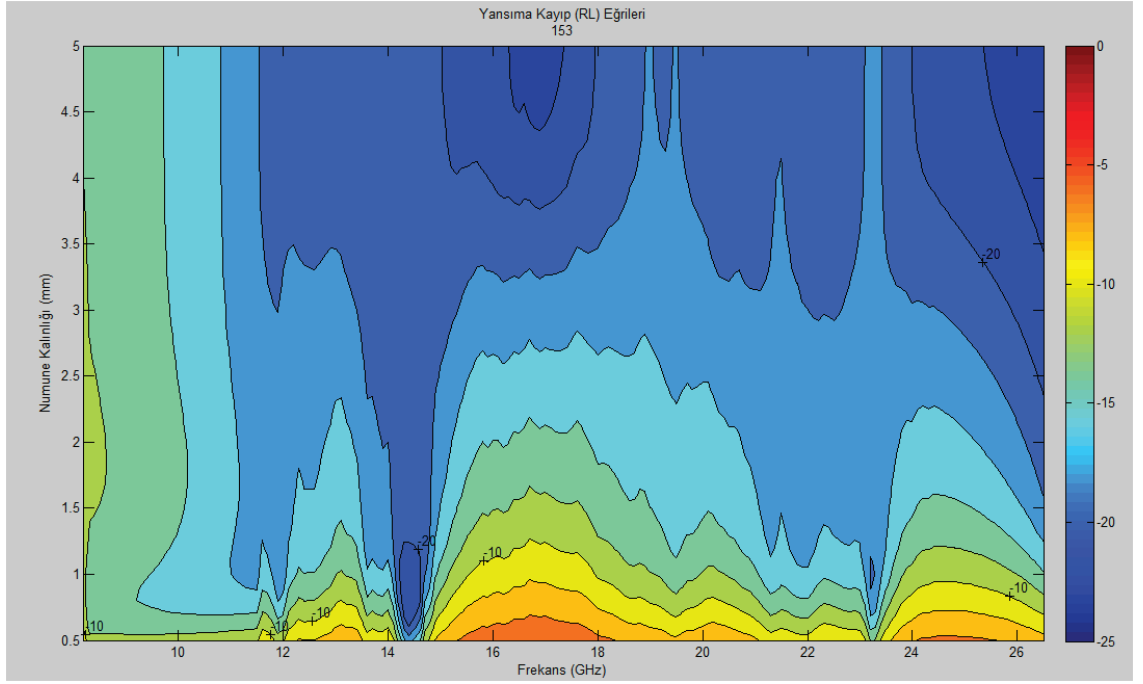
Şekil. 5.8. 141-165 arası ve 100 kodlu bezlere ait yansımaya kayıp eğrileri

Cr-Ni banyosunda kaplanmış bezlere ve kaplanmamış beze ait yansımaya kayıp eğrileri Şekil 5.9 de görülmektedir. RL eğrilerinde artan frekansla azalma eğilimi tespit edilmiştir ve kaplama süresi arttıkça daha etkin soğurucu malzeme elde edilmektedir. Bu banyolarda kaplanmış bezlerde kaplama süresi arttıkça RL daha düşük değerlere inmektedir fakat daha uzun süre kaplamalarda yoğun kaplama dan dolayı yansımaya kayıp değerleri büyümektedir. En düşük yansımaya kaybına sahip bezler 172, 173, 181-184 193 ve 194 olarak görülmektedir. En düşük RL değerleri elde etmek için $\text{Cr}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$, $\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ ve $\text{Cr}_{0.8}\text{Ni}_{0.2}$ banyolarının en iyi kaplama süresi sırasıyla 1 dk, 0.5 dk ve 2 dk olarak bulunmuştur. Bu en az yansımaya veren kaplamaların RL değerleri kaplanmamış (100 kodlu) beze göre 5-8 dB kadar daha az olarak bulunmuştur.

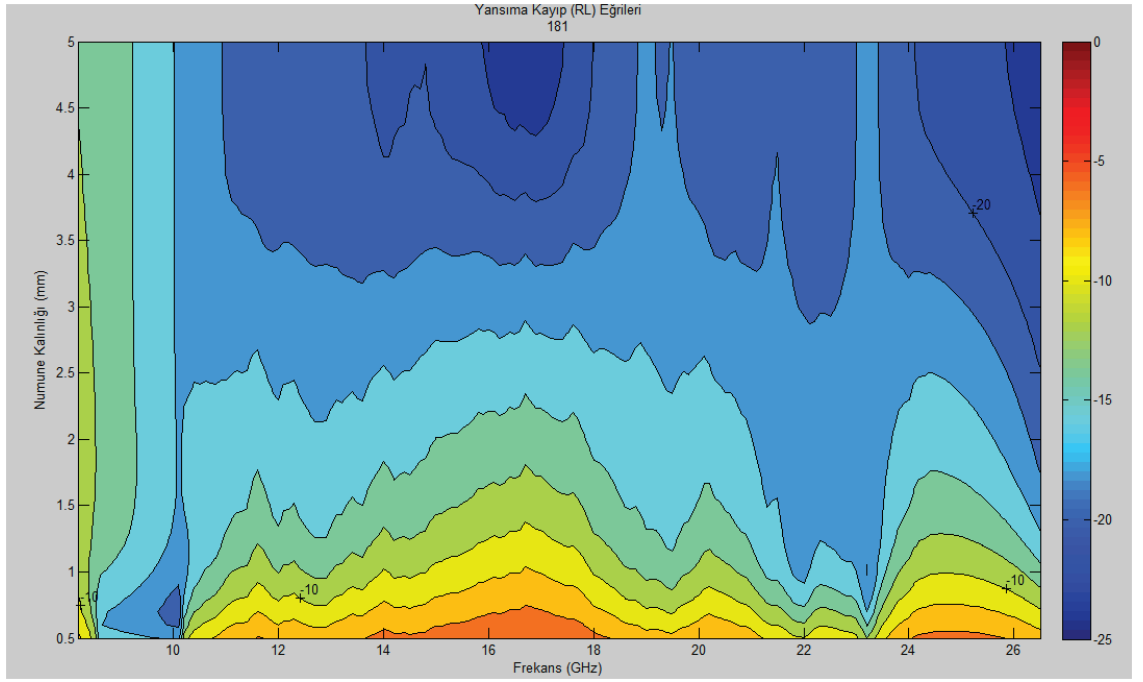


Şekil. 5.9. 171-195 arası ve 100 kodlu bezlere ait yansıma kayıp eğrileri

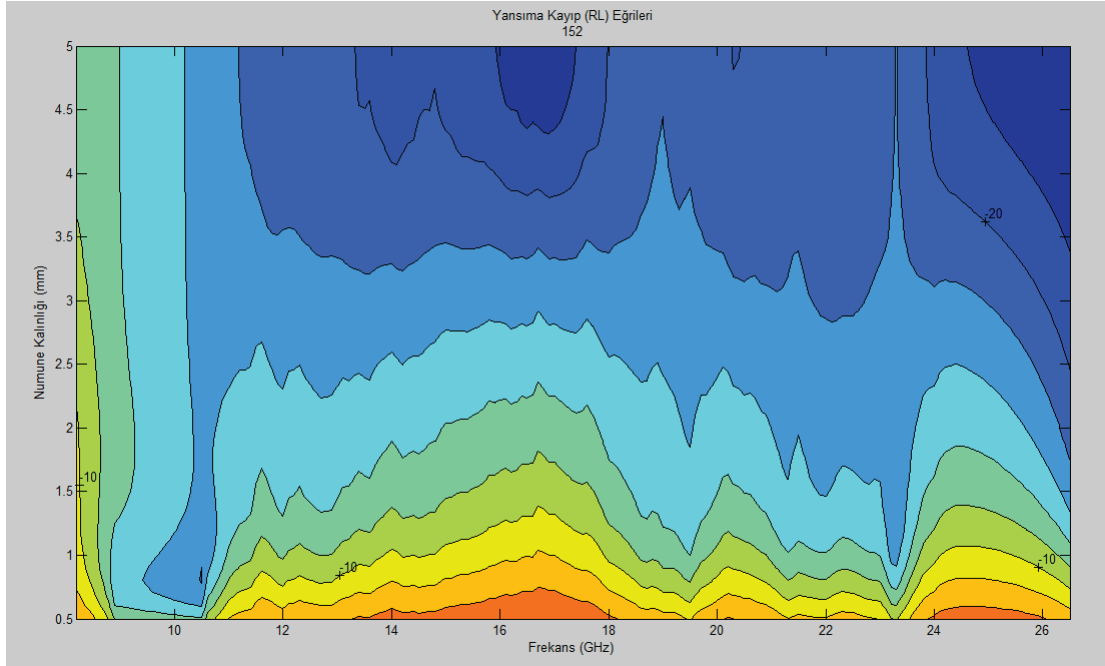
NRW algoritması sonucu elde edilen permitivite ve permeabilite değerleri kullanılarak 8.2-26 GHz frekans aralığında ve 0.5 - 5 mm kalınlıkları arasında en düşük yansıma Kaybı (RL) veren 153, 181, 152 numuneleri için Yansıma kayıpları hesaplanmış (Denklem 2.56) ve eğriler olarak sırasıyla Şekil 5.10 -5.12 arasında sunulmuştur.



Şekil. 5.10. 153 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 2 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansıma Kaybı çizgileri.



Şekil. 5.11. 181 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ banyosunda 0.5 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansıma Kaybı çizgileri.



Şekil. 5.12. 152 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 1 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan Yansımaya Kaybı çizgileri.

Şekil 5.10 da 153 kodlu ($\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 2 dk kaplanmış) bezin frekans ve kalınlığa bağlı hesaplanan yansımaya kayıp çizgileri görülmektedir. Hesaplanan değerlere göre 2.6 mm kalınlıkta ve 9 GHz üzerinde -15 dB den az yansımaya kaybı elde edilmiştir. 181 ($\text{Cr}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}$ banyosunda 0.5 dk kaplanmış) ve 152 ($\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 1 dk kaplanmış) kodlu numunelerde ise -15 dB sınır değeri 10 GHz üzerinde 3 mm de ulaşılmıştır (Şekil 5.11 ve 5.12). RL değerleri 153 kodlu bez de daha düşük değerleri daha ince tasarlanarak elde edilirken 181 ve 152 kodlu bezlerde 3 mm uygun kalınlık olduğu anlaşılmaktadır.

5.4. Çok Katmanlı EMARSOM Modellemesi

EMARSOM'ların tek başına bazı frekanslarda düşük yansımaya kaybı verirken diğer frekanslarda yansıtmaktadır. Bu sebeple iyi yansıtıcı metal yüzeyler birden fazla EMARSOM ile düz katmanlar oluşturacak şekilde kaplanarak yansımaya kayıp piklerini bant aralığını genişletmek ve değerini düşürmek mümkündür. Üretilen soğurucu malzemelerin sayısı N ve katman sayısı n ise toplam N^n adet malzeme

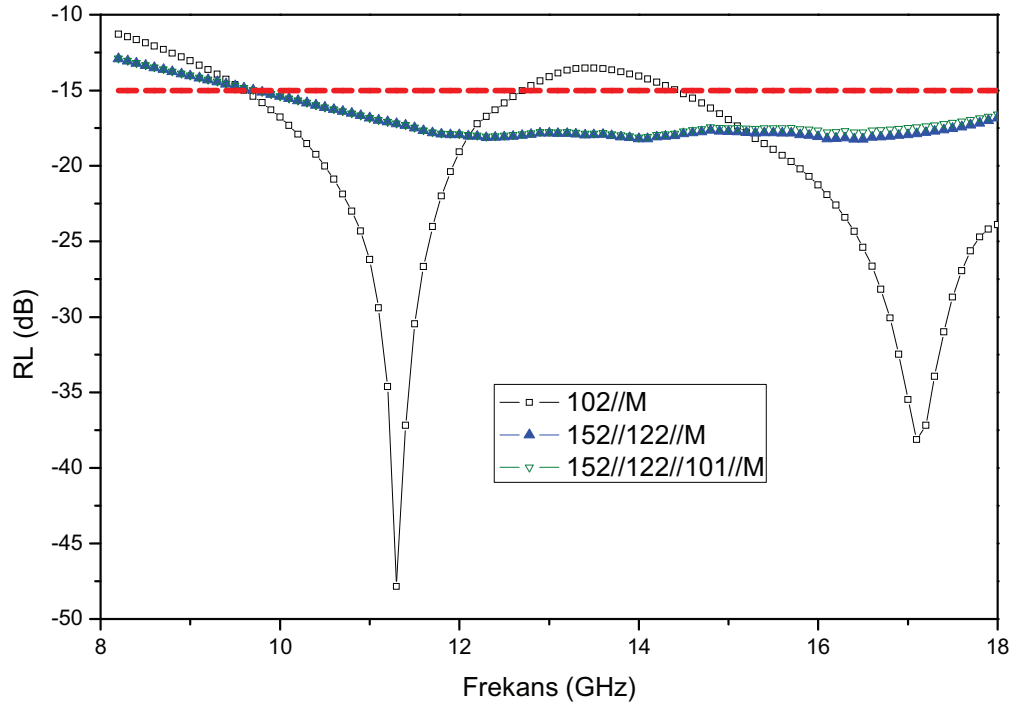
tasarlanmalıdır bu zaman kaybına ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bu sorunu aşmak için mümkün olan bütün kombinasyonlar için Denklem 2.66 da verilen çok katmanlı sistemler için türetilmiş yansıma kayıp formülü ile modelleme yapılmaktadır. Bu bölümde bahsedilen modellemeler incelenecektir. Öncelikle manyetik nano tozlar ve metal kaplı bezlerin ortak ölçüm aralığı olan 8.2-18 GHz frekans aralığında birlikte oluşturdukları çok katmanlı sistemler modellenmiştir. Daha sonra metal kaplı bezler yalnız başına ölçüm alınan tüm frekans aralığında hesaplanmıştır. Manyetik toz numuneleri daha kolay ifade etmek amacıyla $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}X^{+2}Zn^{+2})O_{19}$, $X^{+2} = Mn^{+2}, Co^{+2}, Ni^{+2}, Cu^{+2}, Zn^{+2}$ için sırasıyla 101, 102, 103, 104 ve 105 kodları kullanılmıştır.

5.4.1. X ve Ku band (8.2-18 GHz) için EMARSOM Modellemesi

Manyetik tozların ve metal kaplı bezlerin X (8.2-12 GHz) ve Ku (12-18 GHz) bantlarında alınan ölçümleri sonucu elde edilen kompleks permitivite ve permeabilite katsayıları kullanılarak birden fazla katmanlı EMARSOM modellemesi yapılmıştır. Bu modellemede hem manyetik nano tozlardan oluşan 2.7 mm katman ve/veya 3 mm kalınlıklı metal nano kaplı bez yüzeyler arklı kombinasyonlar için Denklem 2.66 ya göre Yansıma kayıpları (RL) hesaplanmıştır. Üretilen 5 farklı manyetik nano toz ile 45 farklı metal kaplanmış bezden oluşan 50 adet kaplama malzemesi 2 katmanlı modellendiğinde 2500, 3 katmanlı modellendiğinde 125000 farklı kombinasyon oluşmaktadır. Modellenen bütün kombinasyonların sonuç yansıma kayıp eğrileri iki şarta göre sıralandı; -15 dB yansıma kayıp sınırının altında kalan frekans band genişliği ve -15 dB yansıma kayıp sınırının altındaki alan. Çok katmanlı modellenen kombinasyonlar bu iki kriterin çarpımına göre sıralanmış ve en verimli sonuç verene göre listelenmiştir. Burada yansıma kayıp sınırının -15 dB alınmasının sebebi, düşük frekanslarda yansıma kayıp pikine sahip olan hekzaferitlerin baskın olması metal kaplı bezlerin etkisinin görülmesini engellemektedir.

Yansıma kayıp referansı -15 dB (yansıyan dalga ile gelen dalga arasındaki durgun dalga gerilim şiddet oranı 0.178 iken) bütün numunelerden 1 katmanlı (1K), 2 katmanlı (K) ve 3 katmanlı (3K) olabilecek tüm kombinasyonların her katman sayısı için en iyi sonuç verenlerine ait RL eğrileri Şekil 5.13 de verilmiştir. Ayrıca ilk

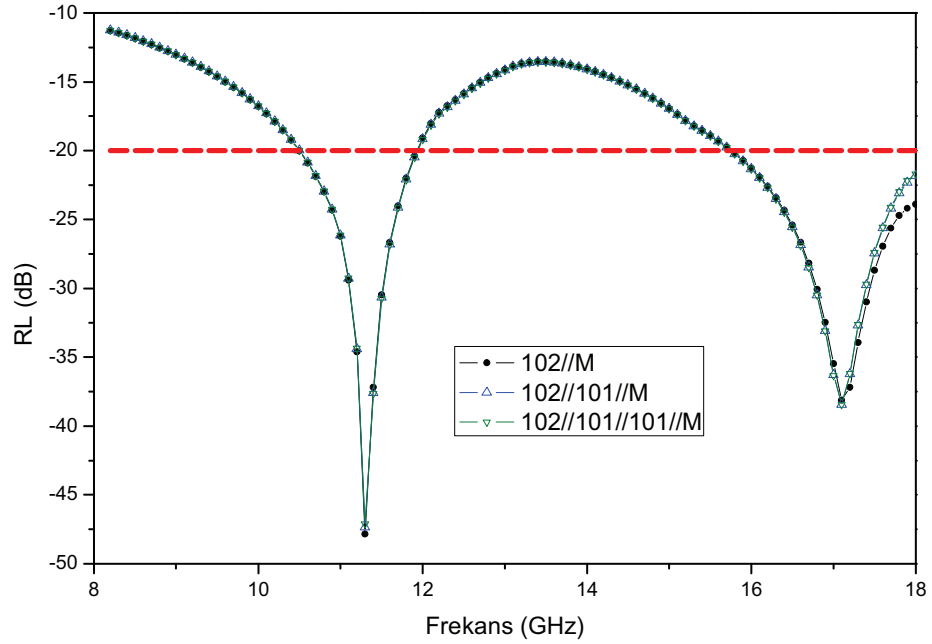
20 kombinasyonda Tablo 5.2 de listelenmiştir. Bu sonuçlara göre bir katmanlı kaplamalarda en az RL değerleri veren 102//M, iki katmanlı kaplamalarda 152//122//M ve üç katmanlı kaplamalarda ise 152//122//101//M olarak bulunmuştur. Bu üçüne ait -15 dB çizgisi ile RL çizgileri arasında kalan alan ve bant genişliği dikkate alınır ise iki katmanlı 152//122//M en iyi sonucu verdiği gözlemlenmektedir. Bu kombinasyon 9.7-18 GHz arasında -15 dB altında 8.3 GHz lik yansıma kaybına sebep olmakta iken 102//M tek katmanlı sistemi ise iki farklı bölgede toplam 6.8 GHz frekans aralığında daha düşük yansıma kaybı vermektedir. Diğer önemli bir bulgu ise 3 katmanlı yapılarda, 152 ve 122 kodlu metal kaplı bezlerin empedans ayarlayan katman gibi davrandığı 101 kodlu hekzaferitin ise soğurucu katman olarak görev yapmasıdır.



Şekil 5.13. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kaybı (RL) çizgisine göre en verimli kombinasyonlara ait RL eğrileri.

Tablo 5.2. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kaybı (RL) çizgisine göre modelleme sonuçları

1 Katmanlı			2 Katmanlı			3 Katmanlı		
Komb 1K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)	Komb 1K//2K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)	Komb 1K//2K//3K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)
102	6.80	1.5580	152 122	8.30	1.4566	152 122 101	8.30	1.4396
153	6.20	1.0900	152 171	8.30	1.4551	152 112 101	8.30	1.4383
104	4.50	1.2128	152 112	8.30	1.4551	152 171 101	8.30	1.4383
181	4.00	0.6340	152 141	8.30	1.4528	152 141 101	8.30	1.4364
152	3.60	0.5736	152 132	8.30	1.4522	152 132 101	8.30	1.4359
105	3.10	0.5645	152 114	8.30	1.4518	152 114 101	8.30	1.4355
101	2.20	0.5272	152 121	8.30	1.4506	152 122 103	8.30	1.4355
151	1.90	0.2976	152 131	8.30	1.4503	152 121 101	8.30	1.4346
144	1.20	0.1836	152 113	8.30	1.4497	152 131 101	8.30	1.4345
183	0.80	0.1226	152 111	8.30	1.4486	152 112 103	8.30	1.4343
103	0.60	0.1010	152 161	8.30	1.4465	152 171 103	8.30	1.4342
			152 115	8.30	1.4452	152 113 101	8.30	1.4340
			154 122	8.30	1.4450	152 122 104	8.30	1.4336
			152 195	8.30	1.4438	152 111 101	8.30	1.4330
			154 171	8.30	1.4432	152 141 103	8.30	1.4324
			152 123	8.30	1.4398	152 112 104	8.30	1.4324
			154 132	8.30	1.4398	152 171 104	8.30	1.4324
			154 131	8.30	1.4379	152 132 103	8.30	1.4320
			154 121	8.30	1.4378	152 114 103	8.30	1.4316
			154 113	8.30	1.4370	152 161 101	8.30	1.4313



Şekil 5.14. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -20 dB referans yansıma kaybı (RL) çizgisine göre en verimli kombinasyonlara ait RL eğrileri.

Tablo 5.3. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -20 dB referans yansıma kaybı (RL) çizgisine göre modelleme sonuçları

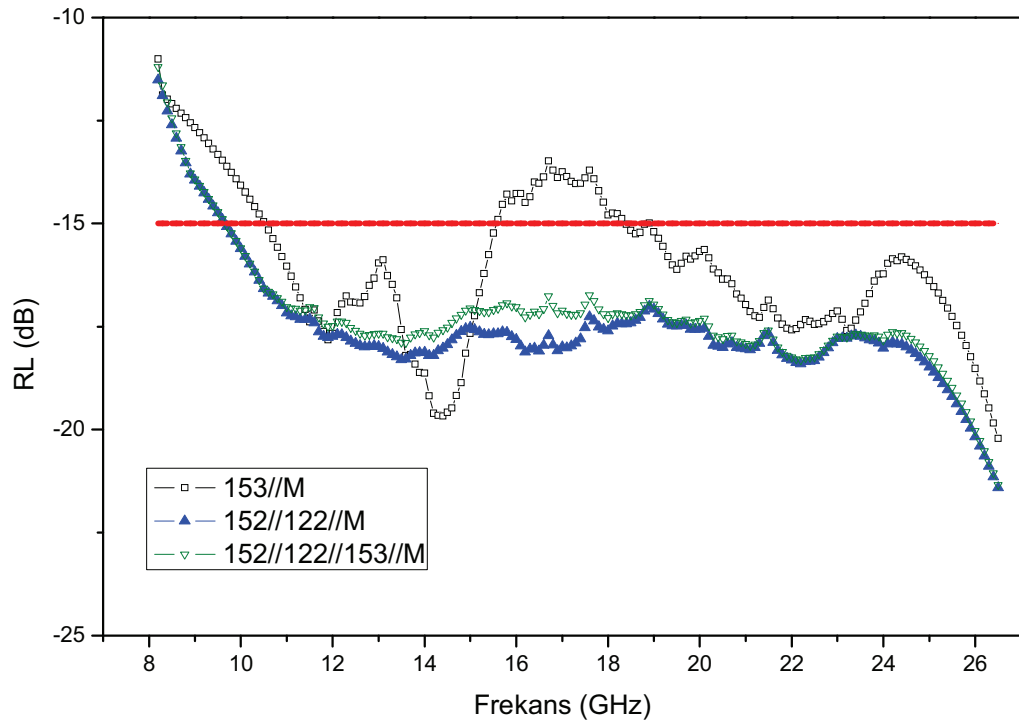
Komb 1K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)	Komb 1K//2K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)	Komb 1K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)
102	3.80	1.0359	102 101	3.70	1.0061	102 101 101	3.70	1.0053
104	3.20	0.9874	102 104	3.70	0.9997	102 101 104	3.70	1.0050
101	1.70	0.4327	102 102	3.70	0.9992	102 101 102	3.70	1.0049
105	0.80	0.1758	102 103	3.70	0.9971	102 101 152	3.70	1.0048
			102 183	3.60	0.9772	102 101 103	3.70	1.0048
			102 144	3.60	0.9772	102 101 181	3.70	1.0048
			102 154	3.60	0.9772	102 101 183	3.70	1.0048
			102 182	3.60	0.9771	102 101 151	3.70	1.0048
			102 152	3.60	0.9771	102 101 154	3.70	1.0048
			102 155	3.60	0.9771	102 101 144	3.70	1.0048
			102 172	3.60	0.9771	102 101 182	3.70	1.0048
			102 181	3.60	0.9770	102 101 155	3.70	1.0048
			102 143	3.60	0.9770	102 101 172	3.70	1.0048
			102 173	3.60	0.9770	102 101 173	3.70	1.0048
			102 151	3.60	0.9770	102 101 143	3.70	1.0048
			102 193	3.60	0.9768	102 101 193	3.70	1.0048
			102 164	3.60	0.9767	102 101 134	3.70	1.0048
			102 194	3.60	0.9767	102 101 184	3.70	1.0048
			102 184	3.60	0.9766	102 101 164	3.70	1.0048
			102 145	3.60	0.9766	102 101 194	3.70	1.0048

Yansıma kaybı referansı -20 dB olarak tekrar incelendiğinde Şekil 5.14 ve Tablo 5.3 elde edilmektedir. Bu sonuçlara göre ise tek katmanlı 102 kodlu numune en verimli yansıma kaybına sebep olmaktadır. 2 katmanlı sistemlerde 102//101//M ve 3 katmanlı 102//101//101//M yapıları çok yakın sonuçlar vermiştir. Burada metal kaplı bezlerin etkisi ancak iki katmanlı sistemlerde 102//182, 102//152, 102//155, 102//172, 102//181, 102//143, 102//173 ve 102//151 gibi kaplamalarda göreceli olarak iyi sonuçlar elde edilmiştir. Burada elektromanyetik dalga önce manyetik nano toz içeren katmanda soğrulduktan sonra arada metal kaplı bez ortamdan geçerek esas metal yüzeye ulaşmaktadır. Soğurma ise daha çok iç yansılardan sonra elde edildiği söylenebilir.

5.4.2.X-Ku-K (8.2-26.5 GHz) için EMARSOM Modellemesi

Metal kaplı bezlerin X (8.2-12 GHz), Ku (12-18 GHz) ve K (18-26.5 GHz) bantlarında alınan ölçümler sonucu elde edilen kompleks permitivite ve permeabilite katsayıları kullanılarak birden fazla katmanlı EMARSOM modellemesi yapılmıştır.

Bu modellemede 3 mm kalınlıklı katmanlardan oluşan metal kaplı bezlerden oluşan farklı kombinasyonlar için Denklem 2.66 ya göre Yansıma kayıpları (RL) hesaplanmıştır. Üretilen 45 farklı kaplanmış bezden 2 katmanlı modellendiğinde 2025, 3 katmanlı modellendiğinde 91125 farklı kombinasyon oluşmaktadır. Modellenen bütün kombinasyonların toplam yansıma kayıp eğrileri -15 dB yansıma kayıp sınırının altında olan RL frekans band genişliği ve -15 dB yansıma kayıp sınırının altındaki alan dikkate alınarak sıralandırılmıştır. Çok katmanlı modellenen kombinasyonlar bu iki kriterin çarpımına göre sıralanmış ve en az yansıma kaybını en geniş frekans aralığında sahip olarak listelenmiştir.



Şekil 5.15. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kayıp (RL) çizgisine göre en verimli kombinasyonlara ait RL eğrileri.

Yansıma kayıp referans üst sınırı -15 dB alınarak bütün kaplama bezlerden 1 katmanlı (1K), 2 katmanlı (2K) ve 3 katmanlı (3K) olabilecek tüm kombinasyonların her katman sayısı için en iyi sonuç verenlerine ait RL eğrileri Şekil 5.15 de verilmiştir. Ayrıca en düşük RL ile en geniş frekansa sahip ilk 10 kombinasyonda Tablo 5.4 de listelenmiştir. Bu sonuçlara göre bir katmanlı kaplamalarda en az RL değerleri veren 153//M, iki katmanlı kaplamalarda 152//122//M ve üç katmanlı

kaplamalarda ise 152//122//153//M olarak bulunmuştur. Bu üçüne ait -15 dB çizgisi ile RL çizgileri arasında kalan alan ve bant genişliği dikkate alınırsa iki katmanlı 152//122//M tasarım en iyi (en düşük RL ve en geniş band aralığı) sonucu verdiği gözlemlenmektedir. Bu kombinasyon 9.6-26.5 GHz arasında -15 dB altında 16.9 Ghz band aralığında yansıma kaybına sebep olmakta iken 153//M tek katmanlı sistemi ise iki farklı bölgede toplam 13.1 GHz frekans aralığında daha düşük yansıma kaybı vermektedir. 3 katmanlı yapı (152//122//153//M) 2 katmanlı yapıya (152//122//M) göre daha çok yansıtıcı olup yine aynı frekans aralığında -15 dB sınırının altında RL değeri vermektedir.

Tablo 5.4. Çok katmanlı ve tek katmanlı sistemler için -15 dB referans yansıma kaybı (RL) çizgisine göre modelleme sonuçları

Komb 1K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)	Komb 1K//2K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)	Komb 1K//M	Δf (GHz)	Alan (10^3 a.u)
153	13.10	2.2241	152 122	16.90	3.0200	152 122 153	16.90	2.9715
181	13.00	2.1060	152 112	16.90	3.0158	152 122 181	16.90	2.9704
152	12.50	2.0306	152 171	16.90	3.0157	152 122 152	16.90	2.9703
151	10.70	1.7196	152 132	16.90	3.0157	152 122 183	16.90	2.9701
183	9.40	1.5381	152 131	16.90	3.0142	152 122 151	16.90	2.9701
144	8.60	1.3913	152 141	16.90	3.0136	152 122 144	16.90	2.9698
182	8.00	1.3134	152 114	16.90	3.0126	152 122 154	16.90	2.9696
155	8.00	1.3094	152 121	16.90	3.0112	152 122 182	16.90	2.9696
154	7.70	1.2698	152 111	16.90	3.0090	152 122 172	16.90	2.9693
172	7.40	1.2101	152 113	16.90	3.0087	152 122 155	16.90	2.9693

Üretilen kompozitlerin mikrodalga özelliklerine göre en düşük yansıma kaybı değerlerine -15 referans üst sınırının altında en geniş frekans aralığında sahip olan tek katmanlı ve çok katmanlı yapı tasarımlarını iki farklı frekans aralığında olacak şekilde özetleyelim. X-Ku bantta (8.2-18 GHz) 102//M ($Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}Co^{+2}Zn^{+2})O_{19}$) en az yansıtıcı tek katmanlı, 152//122//M (1 dk $Cr_{0.5}Co_{0.5}$ kaplama // 1 dk $Ni_{0.5}Co_{0.5}$ kaplama) en az yansıtıcı iki katmanlı ve 152//122//101//M (1 dk $Cr_{0.5}Co_{0.5}$ kaplama // 1 dk $Ni_{0.5}Co_{0.5}$ // $Ba^{+2}Fe^{+2}_{10}(Mn^{+2}Mn^{+2}Zn^{+2})O_{19}$) en az yansıtıcı üç katmanlı olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.5. En düşük RL değerlerine -15 referans sınırının altında en geniş banda sahip 1, 2 ve 3 katmanlı tasarlanan EMARSOM lar

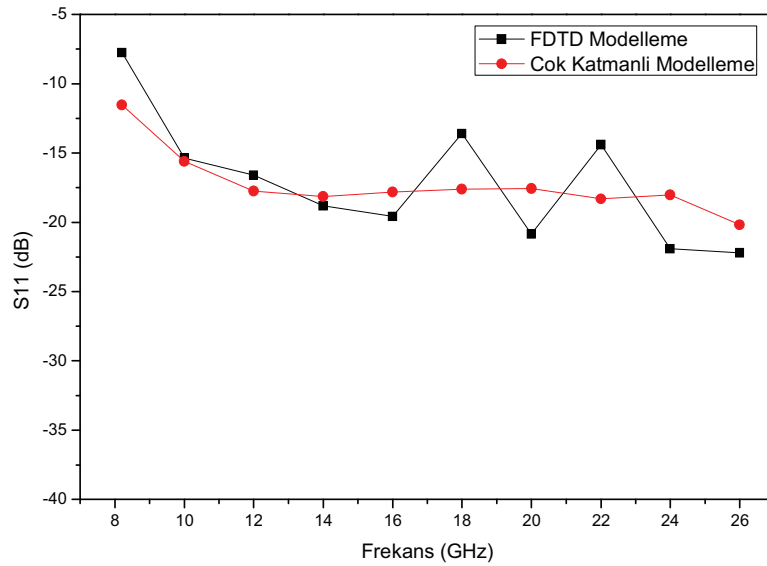
	X-Ku bant (8.2-18 GHz)	X-Ku-K bant (8.2-26.5 GHz)
1 Katmanlı		
2 Katmanlı MEDAN		
3 Katmanlı		
101: $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{Mn}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ 102: $\text{Ba}^{+2}\text{Fe}^{+2}_{10}(\text{Mn}^{+2}\text{Co}^{+2}\text{Zn}^{+2})\text{O}_{19}$ 122: $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 1 dk kaplananmış PAN 152: $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 1 dk kaplananmış PAN 153: $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ banyosunda 2 dk kaplananmış PAN		

X-Ku-K bantta (8.2-26.5 GHz) 153//M (2 dk $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ kaplama) en az yansıtıcı tek katmanlı, 152//122//M (1 dk $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ kaplama // 1 dk $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ kaplama) en az yansıtıcı iki katmanlı ve 152//122//153//M (1 dk $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ kaplama // 1 dk $\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ // 2 dk $\text{Cr}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ kaplama) en az yansıtıcı üç katmanlı olarak hesaplanmıştır.

En az kalınlıkda yada katman sayısı ile en geniş frekans aralığında en düşük RL değerlerine sahip modelleme olan 152//122 kaplaması en verimli EMARSOM yapı olarak bulunmuştur. Bu iki katmanlı kaplama yapısı Akımsız metotla metal kaplanmış Akrilonitril ifadesinin İngilizce kısaltılması olan MEDAN (Metal Elektrolessly Deposited on Acrylonitrile) ile tanımlanarak ilerleyen bölümde FDTD metodu ile elektromanyetik dalganın bu malzeme ile etkileşimi modellenenecektir.

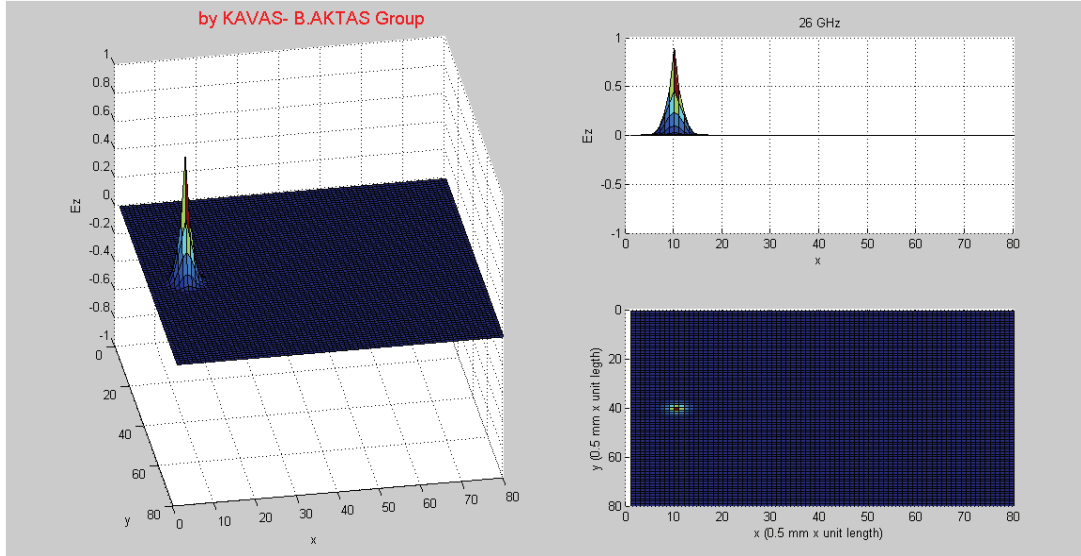
5.5. FDTD modellemesi

En az yansıtıcı olan 152//122//M yapısı için FDTD metodu ile çeşitli frekanslarda sinüsel dalga gönderilerek geri yansıyan dalga ve gönderilen dalganın Fourier analizi yapılmıştır. Bu dalgaların şiddetlerinin oranı kullanılarak elde edilen S11 yansıma kaybı Çok katmanlı modellemedeki S11 (Şekil 5.15 deki 152//122//M ait eğri) değerleri ile birlikte Şekil 5.16 gösterilmektedir.

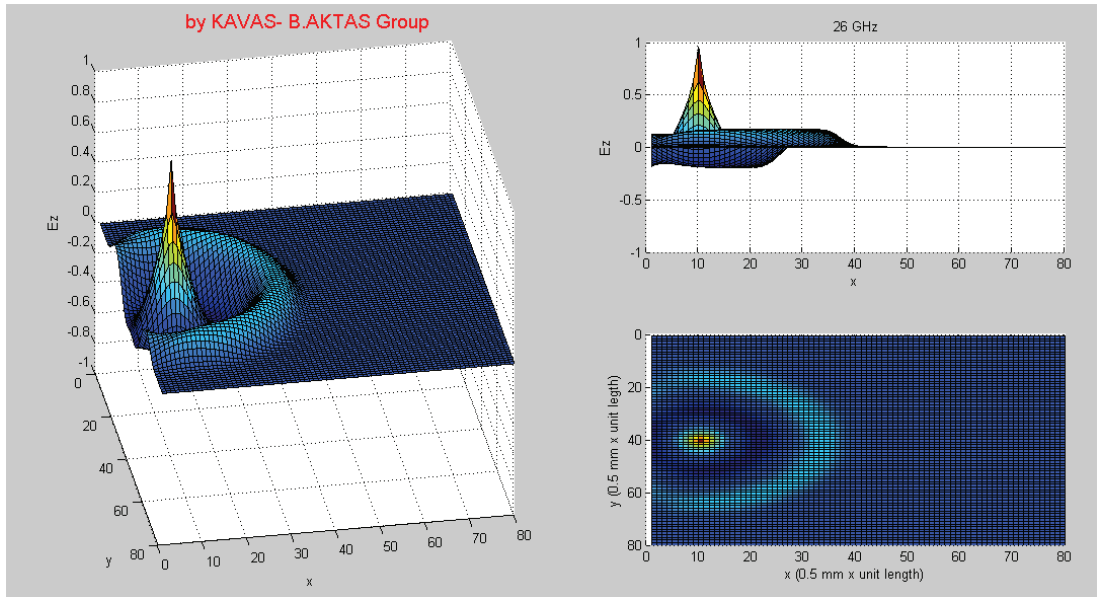


Şekil 5.16. 152//122//M tasarımına ait Çok katmanlı ve FDTD modellemelerinden elde edilen S11 parametresi.

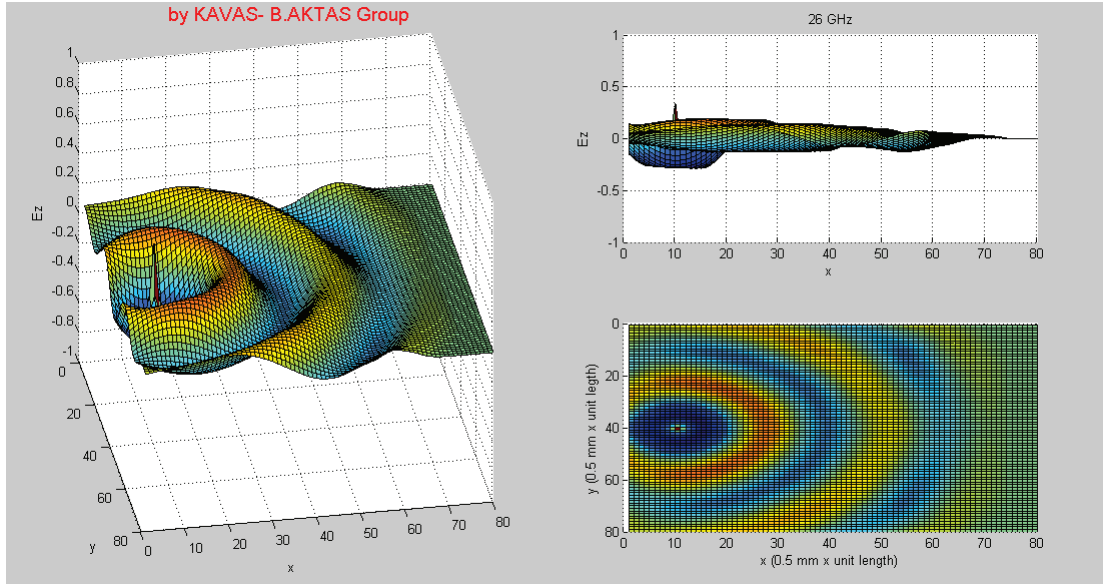
Bu iki modellemenin düşük frekanslarda uyumlu sonuç verirken yüksek frekanslarda FDTD metot sonuçlarının daha dalgalı olduğu görülmektedir. FDTD modellemeye ait 26 GHz frekansta bir dalğanın modellenen sistem içerisinde farklı zamanlarda ilerlemesi Şekil 5.17 ile 5.20 arasında verilmektedir. FDTD modellemelerine ait sonuç filmleri EK 3. de avi formatında CD de verilmededir.



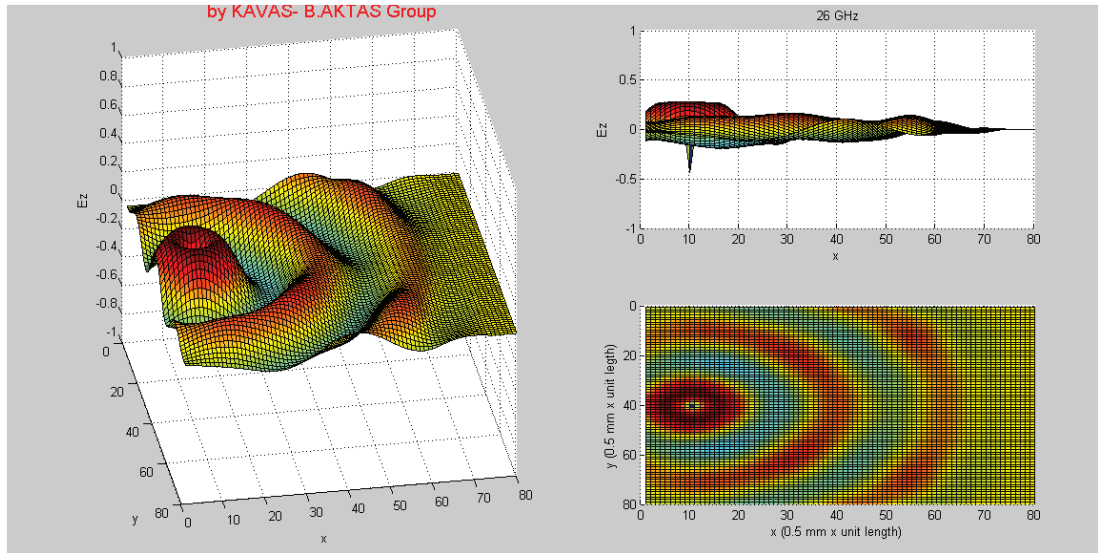
Şekil 5.17. MEDAN tasarımının FDTD metodu ile 26 GHz de modellenmesi($t=10$)



Şekil 5.18. MEDAN tasarımının FDTD metodu ile 26 GHz de modellenmesi($t=60$)



Şekil 5.19. MEDAN tasarımının FDTD metodu ile 26 GHz de modellenmesi(t=150)



Şekil 5.20. MEDAN tasarımının FDTD metodu ile 26 GHz de modellenmesi(t=210)

Sonuç olarak Metal bir yüzeye gönderilen elektromanyetik dalgaların geri yansımalarını 10-26.5 GHz aralığında %82 oranında (-15 dB) azaltacak MEDAN olarak isimlendirilen kaplama bulunmuş ve iki farklı yöntemle modellenerek sonuçların uyumluluğu doğrulanmıştır.

6. TATIŞMA ve ÖNERİLER

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

Yapılan bu çalışmalar kullanılan maddenin dielektrik ve manyetik özellikleri farklı atom katkılanması ve metal kaplamalarda değişik banyolarda farklı süreler uygulanarak sadece kimyasal içerik değiştirilerek en az yansıtıcı kompozit bulunmuştur. Gelecekte bu kompozitlerden piramidal şekilli farklı yüzeylere sahip yapılar elde edilerek yansıtma özelliğinin daha da düşürülebileceği öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR DIZINI

- [1] David M. Pozar, Microwave Engineering, 3rd Edition John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [2] V. M. Petrov and V. V. Gagulin, Inorganic Materials, Vol. 37, No. 2, 93, 2001
- [3] Petrov, V.M., Microwave Dielectric Properties of Ferroelectrics, in *Segnetomagnitnye veshchestva* (Magnetoelectric Materials), Moscow: Nauka, 1990, pp. 152–164.
- [4] Suetake, K. and Naito, Yo, USA Patent 3737903, 1973.
- [5] Wright, R.W., USA Patent 4012738, 1977.
- [6] Tino, M. and Hasegawa, T., Microwave-Absorbing Coatings: 2. Prototype Design of Thin-Film Broadband 3-cm Absorber, *Boei Daigakko Rikogaku Kenku Hokoku*, vol. 14, no. 1/2, pp. 21–34, 1976.
- [7] Petrov, V.M., Mirovitskii, D.I., and Dobrovenskii, V.V., USSR Inventor's Certificate no. 1447179, 1986.
- [8] Tyulyukovskii, E.V., Technology of Electromagnetic-Shielding Composites for Passive Electromagnetic Protection Systems, *Vopr. Materialoved.*, no. 1 (14), pp. 45–52, 1998.
- [9] Mirovitskii, D.I. and Petrov, V.M., Self-matched Absorption of Electromagnetic Waves by a Seignettomagnetodielectric Layer, *Radiotekhnika*, no. 3, pp. 60–62, 1989.
- [10] Venevtsev, Yu.N., Gagulin, V.V., and Lyubimov, V.N., *Segnetomagnetiki* (Seignettomagnets), Moscow: Nauka, 1982.
- [11] Wood, V.E. and Austin, A.E., Possible Applications for Magnetoelectric Materials, *Magnetoelectric Interaction Phenomena in Crystals*, Freeman, A.J. and Schmid, H., Eds., London: Gordon and Breach, pp. 181–193, 1975.
- [12] Gagulin, V.V., Fadeeva, N.V., Belous, A.G., *et al.*, New Rhenium Containing Seignettomagnets and Ferroelectrics, *Phys. Status Solidi A*, vol. 44, no. 1, pp. 247–257, 1978.
- [13] Y.U. Liu, A.S. Nagra, E.G. Erker, P. Periaswami, T.R. Taylor, J. Speck, R.A. York, IEEE Microwave Guided Wave Lett. 10 (11), 448–450, 2000.

- [14] V.K. Varadan, D.K. Ghordgaonkar, V.V. Vardan, J.F. Kelly, P. Glikerdas, *Microwave J.* 1, 116–127, 1992.
- [15] F. De Flaviis, N.G. Alexopoulos, O.M. Stafsudd, *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* MTT 45 (6), 963–969, 1997.
- [16] D. Roy, S.D. Krupandih, *Appl. Phys. Lett.* 62 (10), 1056–1058, 1993.
- [17] Semenenko, V.N., Chistyayev, V.A., and Ryabov, D.E., *Electrical Properties of Composites Containing Microwave Dielectric Resonator Inclusions*, Preprint of Join. Inst. of High Temperatures, Russ. Acad. Sci., Moscow, no. 4-430, 1999.
- [18] Paul Saville *Review of Radar Absorbing Materials*, DRDC Atlantic TM 2005-003 Defence R&D Canada – Atlantic, 2005.
- [19] Sugimoto, S., Kondo, S., Okayama, K., Nakamura, H., Book, D., Kagotani, T., Homma, M., Ota, H., Kimura, M., Sato, R. *IEEE Transactions on Magnetism*, 35, 3154, 1999.
- [20] Cho, H.-S.; Kim, S.-S. *IEEE Transactions on Magnetism*, 35, 3131, 1999.
- [21] Pratt, B. C., US Patent 2992425, 1961.
- [22] Stubbs, H. V. G., Wickenden, B.V.A., Howell, W.G., Perry, E.D., UK Patent GB 2058469A, 1981.
- [23] Gregory, R. V.; Kimbrell, W. C.; Kuhn, H. H. *Synth. Met*, 28, C823, 1989.
- [24] Janos, W. A., US Patent 5298903, 1994.
- [25] H. Kavas, A. Baykal, M.S. Toprak, Y.Koseoglu, M. Sertkol, B. Aktas, *Journal of Alloys and Compounds* 479, 49–55, 2009.
- [26] H. Kavas, N. Kasapoglu, A. Baykal, Y. Koseoglu, *Chemical Papers* 63 (4) 450–455, 2009.
- [27] H. Kavas, Z. Durmus A. Baykal, A. Aslan, A. Bozkurt, M.S. Toprak, *Journal of Non-Crystalline Solids* 356, 484–489, 2010.
- [28] Z. Durmus, H. Kavas, M.S. Toprak, A. Baykal, T. Gürkaynak Altınçekic, A. Aslan, A. Bozkurt, S. Cosgun, *Journal of Alloys and Compounds* 484, 371–376, 2009.
- [29] T.Ozkaya, A.Baykal Y.Koseoğlu, H.Kavas, *Cent. Eur. J. Chem.* 7(3), 410-414, 2009.
- [30] Z. Durmus, M. Tomas, A. Baykal, H. Kavas, T. Gürkaynak Altınçekic, M. S. Toprak, *Journal of Inorganic Chemistry*, Vol 55, № 12, pp. 1-6, 2010.

- [31] A.Baykal, N. Bitrak, B. Unal, H. Kavas, Z. Durmus, S. Ozden, M.S. Toprak
Journal of Alloys and Compounds 502, 199–205, 2010.
- [32] Baker-Jarvis, J. NIST Technical Note, National Institute of Standards and
Technology, Boulder, CO, USA, 1990.
- [33] Nicolson, A. M. and Ross, G. F., *IEEE Transactions on Instrumentation and
Measurement*, 19 (4), 377–382, 1970.
- [34] Weir, W. B., *Proceedings of the IEEE*, 62 (1), 33–36, 1974.
- [35] Ghodgaonkar, D.K., Varadan, V.V., Varadan V. V., *IEEE Transactions on
Instrumentation and Measurement*, 39, 387–394.
- [36] Baker-Jarvis J., Janezic, M.D., Grosvenor, J.H. Jr, Geyer, R.G. NIST Technical
Note National Institute of Standards and Technology, Boulder CO 1993.
- [37] Yoshiyuki Naito, Kunihiro Suetake. Application of Ferrite to Electromagnetic
Wave Absorber and Its Characteristics. *IEEE trans. microwave Eng. Theory
Techn.*, 65, 19, 1971.
- [38] Hewlett-Packard. Product Note, 8510, 3, 1987.
- [39] Weng Cho Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, IEEE Press, New
York, 1995.
- [40] Vinoy KJ, Jha RM. *Radar absorbing materials from theory to design and
characterization*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [41] K.S. Yee, *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol. AP-14, pp. 302–307, vMay 1966.
- [42] A. Taflovit and K.R. Umashankar, A.J. Kalinowski, *Computational Methods for
Infinite Domain Media-structure Interaction*. Washington, DC: ASME, vol. 46,
pp. 83–113, 1981.
- [43] A. Taflovit, *IEEE Trans. EM Comp.*, vol. EMC-22, no. 3, pp. 191–202, Aug.
1980.
- [44] K. Umashankar and A. Taflovit, *IEEE Trans. EM Comp.*, vol. EMC-24, no. 4,
pp. 397–405, Nov. 1982.
- [45] A. Taflovit and M.E. Brodwin, *IEEE Micro. Theo. Tech.*, vol. MTT-23, no. 8,
pp. 623–630, Aug. 1975.
- [46] M. Okoniewski, *IEEE Micro. Guided Wave Lett.*, vol. 3, no. 9, pp. 307–309,
Sept. 1993.
- [47] A. Taflovit and K.R. Umashankar, *Electromagnetics*, vol. 10, pp. 105–126,
1990.

- [48] Dennis M. Sullivan, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method, Wiley-IEEE Press; 1st edition
- [49] C. Siirig, K.A. Hempel, R. Miiller and P. Görnert, *J. Magn. Magn. Mater.* 150, p. 270, 1995.
- [50] A.J.Baden Fuller, Ferrites at microwave frequency, Peter Peregrinus Ltd. 1987
- [51] E.P Wohlfarth, Handbook of Magnetic Materials, Volume 3, North-Holland Publishing Company, 1982.
- [52] J. Smit, H.P.J. Wijn, Ferrites, Wiley, New York, pp. 191–211, 1959.
- [53] K. Haneda, C. Miyakawa and H. Kojima, Journal of the American Ceramic Society 57(8), 354-357, 1974
- [54] Borovik, E.S. and N.G. Yakovleva, Fiz. Metal. Metalloved. 13, 470, 1962.
- [55] Borovik, E.S. and N.G. Yakovleva, Fiz.Metal. Metalloved. 14, 927, 1962.
- [56] Borovik, E.S. and N.G. Yakovleva, Fiz.Metal. Metalloved. 15, 511, 1963.
- [57] Hunty, P., Fiz. Metal. Metalloved. 16, 132, 1963
- [58] Kojima, H. and K. Got, J. Appl. Phys. 36, 538, 1965.
- [59] O. Kubo, E. Ogawa, J. Magn. Magn. Mater. 134, 376, 1994.
- [60] D.G. Agresti, T.D. Shelfer, Y.K. Hong, IEEE Trans. Magn. 25, 4069, 1989.
- [61] X.Z. Zhou, A.M. Morrish, Z. Yang, J. Appl. Phys. 75, 5556, 1994.
- [62] C.S. Wang, F.L. Wei, M. Lu, J. Magn. Magn. Mater. 183, 241, 1998.
- [63] Y.K. Hong, H.S. Jung, J. Appl. Phys. 85, 5549, 1999.
- [64] M.V. Rane, D. Bahadur, S.D. Kulkarni, J. Magn. Magn. Mater. 195, 256, 1999.
- [65] T. Kagotani, D. Fujiwara, S. Sugimoto, J. Magn. Magn. Mater. 272-276, E1813, 2004.
- [66] M.R. Meshram, N.K. Agrawal, B. Sinha, J. Magn. Magn. Mater. 271, 207, 2004.
- [67] Y.Y. Li, G.D. Li, Ferrite Physics, Science Press, Beijing, 1978.
- [68] S.P. Gairola, Vivek Verma, A. Singh, L.P. Purohit, R.K. Kotnala, Solid State Communications 150, 147-151, 2010.
- [69] Xin Tang, Yuanguang Yang, Keao Hu, Journal of Alloys and Compounds 477, 488–492, 2009.
- [70] Saeed Choopani, Neda Keyhan, Ali Ghasemi, Ali Sharbathi, Iman Maghsoudi, Mohammad Eghbali, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321, 1996–2000, 2009.

- [71] Saeed Choopani, Neda Keyhan, Ali Ghasemi, Ali Sharbati, Reza Shams Alam Materials Chemistry and Physics 113, 717–720, 2009.
- [72] F. Tabatabaie, M.H. Fathi, A. Saatchi, A. Ghasemi, Journal of Alloys and Compounds 474, 206–209, 2009.
- [73] Rahul Sharma, R.C. Agarwala, Vijaya Agarwala, Materials Letters 62, 2233–2236, 2008..
- [74] F. Tabatabaie, M.H. Fathi, A. Saatchi, A. Ghasemi, Journal of Alloys and Compounds, 470, 1-2, 332-335, 2009.
- [75] Mohammad Hossein Shams, Seyed Mohammad Ali Salehi, Ali Ghasemi, Materials Letters 62, 1731–1733, 2008.
- [76] Guohong Mu, Na Chen, Xifeng Pan, Haigen Shen, Mingyuan Gu, Materials Letters 62, 840–842, 2008.
- [77] Wen-Yu Zhao, Qing-Jie Zhang, Li-Chun Li, Jian-Guo Guan, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 295, 21–27, 2005.
- [78] W.Y. Zhao, P. Wei, X.Y. Wu, W. Wang and Q.J. Zhang, Scripta Materialia 59, 282–285, 2008.
- [79] W. Y. Zhao, P. Wei, X. Y. Wu, W. Wang, and Q. J. Zhang, Journal of Applied Physics 103, 063902, 2008.
- [80] Guohong Mu, Xifeng Pan, Na Chen, Keke Gan, Mingyuan Gu, Materials Research Bulletin 43, 1369–1375, 2008.
- [81] V. M. Petrov and V. V. Gagulin, Inorganic Materials, Vol. 37, No. 2, pp. 93–98, 2001.
- [82] Gregory, R. V. Kimbrell, W. C. Kuhn, H. H. Synth. Met., 28, C823, 1989.
- [83] Mohamed, A. B. H.; Miane, J. L.; Zangar, H. Polymer International, 50, 773, 2001.
- [84] Qi, Z., Pickup, P.G. Chem. Mater., 9, 2934, 1997.
- [85] Armes, S. P., Vincent, B. J. Chem. Soc., Chem. Comm., 288, 1987.
- [86] Armes, S. P.; Miller, J. F.; Vincent, B. J. Colloid Interface Sci., 118, 410, 1987.
- [87] V. Bugush, Jour. Opto elect. And Adv.Mat., Vol.7, No.3. 1635, June 2005.
- [88] L. M. Lynkov, Flexible electromagnetic shields, Minsk, BSUIR, 2000.
- [89] V. Glybin, L. Lynkov, V. Bogush, Physics Chemistry and Application of Nanostructure Reviews and Short Notes to Nanomeeting 99, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, C251, 1999.

- [90] C. Sudakar, G.N. Subbanna, T.R.N. Kutty, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 268, 75–88, 2004.
- [91] M. Bellotto, G. Busca, C. Cristiani, and G. Groppi, *J. Solid State Chem.* 117, 8 1995.
- [92] M. V. Rane, D. Bahadur, and C. M. Srivastava, *J. Phys. D* 32, 2001, 1999.
- [93] W. Y. Zhao, P. Wei, H. B. Cheng, X. F. Tang, and Q. J. Zhang, *J. Am. Ceram. Soc.* 90, 2095, 2007.
- [94] B.T. Shirk, W.R. Buessem, *J. Appl. Phys.* 40, 1294–1296, 1969.
- [95] Albanese, G, M.Carbusisshio,.A Deriu, *Appl. Phys.* 7, 227, 1975b
- [96] C. Sudakar, G.N. Subbanna, T.R.N. Kutty, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 263, 253–268, 2003.
- [97] C.G. Koops, *Phys. Rev.* 83, 121, 1951.
- [98] Jianxun Qiu, Qiguo Zhang, Mingyuan Gu, Haigen Shen, *Journal of Applied Physics* 98, 103905, 2005.
- [99] C. Sudakar, G. N. Subbanna, T. R. N. Kutty, *J. Appl. Phys.*, Vol. 94, No. 9, 1 November 2003.
- [100] Mukesh C. Dimri, Subhash C. Kashyap, D.C. Dube, *Ceramics International* 30 1623–1626, 2004.
- [101] Yang Bai, Ji Zhou, Zhilun Gui, Longtu Li, *Materials Science and Engineering*, B103, 115/117, 2003.
- [102] J.P. Bouchaud, P.G. Zerah, *J. Appl. Phys.* 67, 5512, 1990.
- [103] <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/amcsd.php>
- [104] Taylor A, Floyd R W, *Acta Crystallographica*, 3, 285-289,1950.
- [105] Wyckoff R W G, *Cystal Structures* 1, 7-83, Second edition. Interscience Publishers, New York, New York, 1963.
- [106] X. G. Liu, D. Y. Geng, C. J. Choi, J. C. Kim, Z. D. Zhang, *J Nanopart Res.*, 11, 2097–2104, 2009.
- [107] Xi'an Fan, Jianguo Guan, Wei Wang and Guoxiu Tong, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 075006, 2009.
- [108] Yongjie Li, Rui Wang, Fengming Qi, Chunming Wang, *Applied Surface Science* 254, 4708–4715, 2008.
- [109] B. Lu, X.L. Dong, H. Huang, X.F. Zhang, X.G. Zhu, J.P. Lei, J.P. Sun, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 1106–1111, 2008.

- [110] Yong Yang, Cailing Xu, Yongxin Xia, Tao Wang, Fashen Li, doi:10.1016/j.jallcom.2009.12.153.
- [111] Jianxun Qiu, Mingyuan Gao, Haigen Shen, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 295, 263–268, 2005.
- [112] Z. Zhou, L. Chu, S. Hu, Mater. Sci. Eng. B 126, 93, 2006.
- [113] N. Cordente, M. Respaud, F. Senocq, M.J. Casanove, C. Amiens, B. Chaudret, Nano Lett., 1, 565, 2001.
- [114] B. Lax, K.J. Button, Microwave Ferrites and Ferrimagnetics, McGraw-Hill, 1962.

ÖZGEÇMİŞ

20 Temmuz 1980 tarihinde Konya da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Konya ilinin Çumra ilçesine bağlı Alibeyhüyüğü Kasabasında, lise öğrenimini 1998 yılında Meram Konya Lisesinde tamamlamıştır. Aynı yıl Lisans eğitimine ODTÜ Fizik bölümünde başlamış ve 2003 yılında bu programdan mezun olmuştur. 2003-2006 yılları arasında Selçuk Üniversitesi Fizik Bölümü ve Fatih Üniversitesi Fizik Bölümünde Yüksek lisans derecesine sahip olmuştur. 2003 yılında Lisans öğreniminde Katıhal araştırma Laboratuvarında başladığı bilimsel araştırmalarından bu güne kadar çok sayıda konferans katılmış, projelerde çalışmış ve indekse giren 25 makaleye sahiptir. Doktora öğrenimi süresince DAAD bursu ile Hamburg Üniversitesinde tam burslu olarak yaz okuluna katıldıktan sonra TÜBİTAK 2214 yurt dışı doktora araştırma bursu ile Kalifornia Üniversitesi (Santa Barbara) doktora tez çalışmalarını tamamlamıştır. 2005 yılından bugüne Fatih Üniversitesi Fizik Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evlidir ve iyi seviyede İngilizce ve başlangıç seviyesinde İspanyolca bilmektedir.

8. EKLER

EK I - FDTD Teori ve Algoritması

Denklem 2.1 de iii ve iv denklemleri simetrik olması için manyetik yükün sebep olduğu akım $\vec{J} = \vec{\sigma} \vec{H}$ ekleyerek yazılır. Böyle bir yük yoğunluğu ve akımı henüz kanıtlanmamıştır sadece maxwell denklemlerinin simetrik olması ve çözümün kolaylaşması için kullanılır.

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{J} & \text{veya} & & \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \vec{\sigma} \vec{H} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \vec{J} & & & \nabla \times \vec{H} &= \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{\sigma} \vec{E} \end{aligned}$$

Buradan elektrik ve manyetik alanın zamana bağlı değişimini çekersek;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} - \frac{1}{\mu} \vec{\sigma} \vec{H} \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{\varepsilon} \vec{\sigma} \vec{E} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Üç boyutlu sistemler için aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) - \frac{1}{\varepsilon} \sigma E_x & \frac{\partial H_x}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) - \frac{1}{\mu} \sigma^* H_x \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) - \frac{1}{\varepsilon} \sigma E_y & \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) - \frac{1}{\mu} \sigma^* H_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) - \frac{1}{\varepsilon} \sigma E_z & \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - \frac{1}{\mu} \sigma^* H_z \end{aligned}$$

Zaman bağılı türev ve konuma bağılı türevler, merkezi fark yaklaşımı ile ifade edilirler.

$$\frac{\partial u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)}{\partial x} = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - u_{i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x} + O[(\Delta x)^2]$$

$$\frac{\partial u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)}{\partial y} = \frac{u_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - u_{i,j-\frac{1}{2},k}^n}{\Delta y} + O[(\Delta y)^2]$$

$$\frac{\partial u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)}{\partial z} = \frac{u_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n - u_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n}{\Delta z} + O[(\Delta z)^2]$$

$$\frac{\partial u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)}{\partial t} = \frac{u_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2]$$

Şekil 2. XX e göre bu yaklaşım uygulanırsa

$$\frac{E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \left(\begin{aligned} & \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ & - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \\ & - \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+\frac{1}{2}} \end{aligned} \right)$$

olur, sağ taraftaki en son terimde sol tarafa benzetilmek için yine merkezi farkla ifade edilir

$$\frac{E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ \\ - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \\ \\ - \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{2} \end{array} \right)$$

$$E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n = \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ \\ - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \end{array} \right) - \left(\frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1}}{2 \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right) - \left(\frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{2 \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right)$$

$$E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + \left(\frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1}}{2 \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right) = \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ \\ - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \end{array} \right) + E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - \left(\frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k} E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n}{2 \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right)$$

$$E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \left(1 + \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2 \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right) = \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \left(\begin{array}{c} \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ \\ - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \end{array} \right) + E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left(1 - \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2 \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \right)$$

$$E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \\ \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{1 + \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}} \end{pmatrix} E_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \begin{pmatrix} \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \\ \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{1 + \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \\ - \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} \end{pmatrix}$$

Hesaplamalarda kolaylık açısından $\tilde{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E$ kullanılırsa $\tilde{E}$ ve H aynı boyutta olur. Ayrıca $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta s$ alınırsa.

$$\tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \\ \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{1 + \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}} \end{pmatrix} \tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \begin{pmatrix} \frac{\Delta t}{\Delta s \varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \\ \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{1 + \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} \\ - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{2c_0} = \frac{\Delta s \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}{2} \text{ kullanılırsa (Courant şartı sağlanmış olur)[41]}$$

$$\tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}} \\ \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{1 + \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}} \end{pmatrix} \tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \varepsilon_r \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} \left(\frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{1 + \frac{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} \\ - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \end{pmatrix}$$

$$C_1 \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}\right)} \quad C_2 \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{\frac{1}{2}}{\varepsilon_r \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} \left(1 + \frac{\Delta t \sigma_{i+\frac{1}{2},j,k}}{2\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k}}\right)}$$

kısaltması ile

$$\tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = C_1 \tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n + C_2 \left(H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

$$\tilde{E}_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} = C_1 \tilde{E}_y \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n + C_2 \left(H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} + H_z \Big|_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

$$\tilde{E}_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} = C_1 \tilde{E}_z \Big|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n + C_2 \left(H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i-\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + H_x \Big|_{i,j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right)$$

Benzer işlemler H_x, H_y ve H_z için yapıldığında

$$D_1 \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^*}{2\mu_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}\right)}{\left(1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^*}{2\mu_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}\right)} \quad D_2 \Big|_{i+\frac{1}{2},j,k} = \frac{\frac{1}{2}}{\mu_r \Big|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{\Delta t \sigma_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^*}{2\mu_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}}\right)}$$

kısaltmaları ile

$$\begin{aligned}
H_x \Big|_{i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= D_1 H_x \Big|_{i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + D_2 \left(\tilde{E}_y \Big|_{i, j+\frac{1}{2}, k+1}^n - \tilde{E}_y \Big|_{i, j+\frac{1}{2}, k}^n - \tilde{E}_z \Big|_{i, j+1, k+\frac{1}{2}}^n + \tilde{E}_z \Big|_{i, j, k+\frac{1}{2}}^n \right) \\
H_y \Big|_{i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} &= D_1 H_y \Big|_{i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + D_2 \left(\tilde{E}_z \Big|_{i+1, j, k+\frac{1}{2}}^n - \tilde{E}_z \Big|_{i, j, k+\frac{1}{2}}^n - \tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2}, j, k+1}^n + \tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2}, j, k}^n \right) \\
H_z \Big|_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k}^{n+\frac{1}{2}} &= D_1 H_z \Big|_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k}^{n-\frac{1}{2}} + D_2 \left(\tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2}, j+1, k}^n - \tilde{E}_x \Big|_{i+\frac{1}{2}, j, k}^n - \tilde{E}_y \Big|_{i+1, j+\frac{1}{2}, k}^n + \tilde{E}_y \Big|_{i, j+\frac{1}{2}, k}^n \right)
\end{aligned}$$

Bu alan formüllerinin programlamada döngüsel hesaplanması için ($\tilde{E}$ artık E olarak kullanılacaktır.) aşağıdaki basitleştirme kullanılır.

$$\begin{aligned}
E_x(i, j, k, n) &= C_1 E_x(i, j, k, n) + C_2 (H_z(i, j, k, n) - H_z(i, j-1, k, n) - H_y(i, j, k, n) + H_y(i, j, k-1, n)) \\
E_y(i, j, k, n) &= C_1 E_y(i, j, k, n) + C_2 (H_x(i, j, k, n) - H_x(i, j, k-1, n) - H_z(i, j, k, n) + H_z(i-1, j, k, n)) \\
E_z(i, j, k, n) &= C_1 E_z(i, j, k, n) + C_2 (H_y(i, j, k, n) - H_y(i-1, j, k, n) - H_x(i, j, k, n) + H_x(i, j-1, k, n)) \\
H_x(i, j, k, n) &= D_1 H_x(i, j, k, n) + D_2 (E_y(i, j, k+1, n) - E_y(i, j, k, n) - E_z(i, j+1, k, n) + E_z(i, j, k, n)) \\
H_y(i, j, k, n) &= D_1 H_y(i, j, k, n) + D_2 (E_z(i+1, j, k, n) - E_z(i, j, k, n) - E_x(i, j, k+1, n) + E_x(i, j, k, n)) \\
H_z(i, j, k, n) &= D_1 H_z(i, j, k, n) + D_2 (E_x(i, j+1, k, n) - E_x(i, j, k, n) - E_y(i+1, j, k, n) + E_y(i, j, k, n))
\end{aligned}$$

EK II- FDTD MODELLEME İÇİN MATLAB PROGRAMI

```

%3D with ABC epsR mu sigma
%FLUX DENSITY D -> E -> H
%pause(13);
clear all;clc;tic;%%%%
MaxTime=320;;%0;
%%%%%%%%55
Max_i_Space=80; % Number of cells along each axis
Max_j_Space=80;
Max_k_Space=40;
%%%%%%%%%%%%%D E H
%dx=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);Dx=[];
%dy=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);Dy=[];
%dz=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);Dz=[];
ex=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);%Ex=[];
ey=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);%Ey=[];
ez=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);%Ez=[];
hx=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);%Hx=[];
hy=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);%Hy=[];
hz=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);%Hz=[];
gax=ones(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);
gay=ones(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);
gaz=ones(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);
%%%%%%%%%%%%%
PPi=10;%PP : Place of Pulse
PPj=Max_j_Space/2;
PPk=Max_k_Space/2;
%%%%%%%%%%%%%Dipole patch antenna
%gax(PPi-9:PPi+9,PPj,PPk)=0;
%gax(PPi,PPj,PPk)=1;
%gay(PPi,PPj-9:PPj+9,PPk)=0;
%gay(PPi,PPj,PPk)=1;
%gaz(PPi,PPj,PPk-9:PPk+9)=0;
%gaz(PPi,PPj,PPk)=1;
%%%%%%%%%%%%%
del_x=0.0005;%0.5 mm yani 3mm sample 6 birimile temsil ediliyor
del_t=del_x/(2*3e8);
freq1=26e9;
qd=10;
%%%
QD=load('DATAS.txt');
%%%%%%%%%%%%%lossy medium
thick=3e-3;
SUTs=60;
SUTf=SUTs+thick/del_x;
SUTs2=SUTf+1;
SUTf2=SUTs2+thick/del_x;
SUTs3=SUTf2+1;
SUTf3=SUTs3+thick/del_x;
%%%%%%%%
epsRp=QD(qd,1);epsRpp=QD(qd,2); epsRp2=QD(qd,5);epsRpp2=QD(qd,6);
epsRp3=1E5;epsRpp3=1;
muRp=QD(qd,3);muRpp=QD(qd,4); muRp2=QD(qd,7);muRpp2=QD(qd,8);
muRp3=1E5;muRpp3=1;
epsR1=ones(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);
epsR2=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);
muR1=ones(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);
muR2=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,Max_k_Space);

```

```

epsR1 (SUTs:SUTf, :, :) = epsRp;      epsR1 (SUTs2:SUTf2, :, :) = epsRp2;
epsR1 (SUTs3:SUTf3, :, :) = epsRp3;
epsR2 (SUTs:SUTf, :, :) = epsRpp;      epsR2 (SUTs2:SUTf2, :, :) = epsRpp2;
epsR2 (SUTs3:SUTf3, :, :) = epsRpp3;
muR1 (SUTs:SUTf, :, :) = muRp;          muR1 (SUTs2:SUTf2, :, :) = muRp2;
muR1 (SUTs3:SUTf3, :, :) = muRp3;
muR2 (SUTs:SUTf, :, :) = muRpp;          muR2 (SUTs2:SUTf2, :, :) = muRpp2;
muR2 (SUTs3:SUTf3, :, :) = muRpp3;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Sig(Max_i_Space-10:Max_i_Space,Max_j_Space-
10:Max_j_Space,:)=1e5;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%_____sanal_____
SigM=0*2*pi*freq1*muZ*muR2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Frequency dependent medium
qx1=(Sig*del_t)/(2*eps1);qx2=(SigM*del_t)/(2*mu1);
C1=(1-qx1)/(1+qx1);
C2=1/2*(1/(epsR1.*(1+qx1)));
D1=(1-qx2)/(1+qx2);
D2=1/2*(1/(muR1.*(1+qx2)));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
exb11=zeros(1,Max_j_Space,Max_k_Space);exb21=zeros(1,Max_j_Space,Max
_k_Space);exs11=zeros(1,Max_j_Space,Max_k_Space);exs21=zeros(1,Max_j
_Space,Max_k_Space);
exb12=zeros(Max_i_Space,1,Max_k_Space);exb22=zeros(Max_i_Space,1,Max
_k_Space);exs12=zeros(Max_i_Space,1,Max_k_Space);exs22=zeros(Max_i_S
pace,1,Max_k_Space);
exb13=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,1);exb23=zeros(Max_i_Space,Max_j
_Space,1);exs13=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,1);exs23=zeros(Max_i_S
pace,Max_j_Space,1);
%
eyb11=zeros(1,Max_j_Space,Max_k_Space);eyb21=zeros(1,Max_j_Space,Max
_k_Space);eys11=zeros(1,Max_j_Space,Max_k_Space);eys21=zeros(1,Max_j
_Space,Max_k_Space);
eyb12=zeros(Max_i_Space,1,Max_k_Space);eyb22=zeros(Max_i_Space,1,Max
_k_Space);eys12=zeros(Max_i_Space,1,Max_k_Space);eys22=zeros(Max_i_S
pace,1,Max_k_Space);
eyb13=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,1);eyb23=zeros(Max_i_Space,Max_j
_Space,1);eys13=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,1);eys23=zeros(Max_i_S
pace,Max_j_Space,1);
%
ezb11=zeros(1,Max_j_Space,Max_k_Space);ezb21=zeros(1,Max_j_Space,Max
_k_Space);ezs11=zeros(1,Max_j_Space,Max_k_Space);ezs21=zeros(1,Max_j
_Space,Max_k_Space);
ezb12=zeros(Max_i_Space,1,Max_k_Space);ezb22=zeros(Max_i_Space,1,Max
_k_Space);ezs12=zeros(Max_i_Space,1,Max_k_Space);ezs22=zeros(Max_i_S
pace,1,Max_k_Space);
ezb13=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,1);ezb23=zeros(Max_i_Space,Max_j
_Space,1);ezs13=zeros(Max_i_Space,Max_j_Space,1);ezs23=zeros(Max_i_S
pace,Max_j_Space,1);
%%%
nN=[ones(1,MaxTime/2) ones(1,MaxTime/2)];
for n=1:MaxTime
    disp(int2str(n))
    %
    ex=C1.*ex+C2.*(hz-B2(hz)-hy+B3(hy));
    ey=C1.*ey+C2.*(hx-B3(hx)-hz+B1(hz));
    ez=C1.*ez+C2.*(hy-B1(hy)-hx+B2(hx));
    %%%
ex(1, :, :) = exb21; exb21 = exb11; exb11 = ex(2, :, :); ex(Max_i_Space, :, :) = exs2
1; exs21 = exs11; exs11 = ex(Max_i_Space-1, :, :);

```

```

ex(:,1,:)=exb22;exb22=exb12;exb12=ex(:,2,:);ex(:,Max_j_Space,:)=exs2
2;exs22=exs12;exs12=ex(:,Max_j_Space-1,:);

ex(:, :, 1)=exb23;exb23=exb13;exb13=ex(:, :, 2);ex(:, :, Max_k_Space)=exs2
3;exs23=exs13;exs13=ex(:, :, Max_k_Space-1);
%

ey(1, :, :)=eyb21;eyb21=eyb11;eyb11=ey(2, :, :);ey(Max_i_Space, :, :)=eys2
1;eys21=eys11;eys11=ey(Max_i_Space-1, :, :);

ey(:, 1, :)=eyb22;eyb22=eyb12;eyb12=ey(:, 2, :);ey(:, Max_j_Space, :)=eys2
2;eys22=eys12;eys12=ey(:, Max_j_Space-1, :);

ey(:, :, 1)=eyb23;eyb23=eyb13;eyb13=ey(:, :, 2);ey(:, :, Max_k_Space)=eys2
3;eys23=eys13;eys13=ey(:, :, Max_k_Space-1);
%

ez(1, :, :)=ezb21;ezb21=ezb11;ezb11=ez(2, :, :);ez(Max_i_Space, :, :)=ezs2
1;ezs21=ezs11;ezs11=ez(Max_i_Space-1, :, :);

ez(:, 1, :)=ezb22;ezb22=ezb12;ezb12=ez(:, 2, :);ez(:, Max_j_Space, :)=ezs2
2;ezs22=ezs12;ezs12=ez(:, Max_j_Space-1, :);

ez(:, :, 1)=ezb23;ezb23=ezb13;ezb13=ez(:, :, 2);ez(:, :, Max_k_Space)=ezs2
3;ezs23=ezs13;ezs13=ez(:, :, Max_k_Space-1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ex=0*gax;%gax.*ex;%
ey=0*ey;%gay.*ey;%
ez=gaz.*ez;%0*ez;%
%
hx=D1.*hx+D2.*(S3(ey)-ey-S2(ez)+ez);
hy=D1.*hy+D2.*(S1(ez)-ez-S3(ex)+ex);
hz=D1.*hz+D2.*(S2(ex)-ex-S1(ey)+ey);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
hx=gax.*hx;%0*hx;%      ?
hy=gay.*hy;%0*hy;%      ?
hz=0*hz;%hz=gaz.*hz;          ?

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ez1(n)=ez(SUTs-30,Max_j_Space/2,Max_k_Space/2);
Ez2(n)=ez(SUTf+10,Max_j_Space/2,Max_k_Space/2);
%plot(ez(:,Max_j_Space/2,Max_k_Space/2));
subplot(2,2,2);surf(ez(:, :, Max_k_Space/2)); axis([0 Max_i_Space
0 Max_j_Space -1 1]);
view([90,0]); zlabel('Ez');ylabel('x');title(['26 GHz']);
subplot(2,2,4);surf(ez(:, :, Max_k_Space/2)); axis([0 Max_i_Space
0 Max_j_Space -1 1]);
view([90,90]);xlabel('y (0.5 mm x unit legth)'),ylabel('x (0.5
mm x unit length)')
subplot(1,2,1);surf(ez(:, :, Max_k_Space/2)); axis([0 Max_i_Space
0 Max_j_Space -1 1]);
view([80,30]);zlabel('Ez');xlabel('y');ylabel('x')
title(['\fontsize{14} {\color{red}by KAVAS- B.AKTAS Group}']);
%subplot(3,1,2);plot(Ez1);
%subplot(3,1,3);plot(Ez2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%SAVE FIELD
%Ex=[Ex ex];
%Hy=[Hy hy];
pause(1000);
end

```

```

toc;
%%%%
EZ1=Ez1(41:100);%60 data
EZ11=Ez1(161:220);
EZ21=Ez2(201:260);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%BACK=load('bSamp1.txt');
%back=BACK';
%FF0=back(1,:);AMP0=back(2,:);
%FF01=back(3,:);AMP01=back(4,:);
%FF02=back(5,:);AMP02=back(6,:);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[FF,Amplitude]=FFT_1(EZ1,del_t);
[FF1,Amplitude1]=FFT_1(EZ11,del_t);
[FF2,Amplitude2]=FFT_1(EZ21,del_t);
%
[ff1,S11]=S11_(FF,Amplitude,FF1,Amplitude1-Amplitude);
[ff2,S21]=S11_(FF,Amplitude,FF2,Amplitude2);
%
subplot(5,1,1);plot(FF/1e9,Amplitude);ylabel('Einc');
subplot(5,1,2);plot(FF1/1e9,Amplitude1-Amplitude);ylabel('Eref')
subplot(5,1,3);plot(FF2/1e9,Amplitude2);ylabel('Etra')
subplot(5,1,4);plot(ff1/1e9,S11);ylabel('S11')
subplot(5,1,5);plot(ff2/1e9,S21);ylabel('S21'),xlabel('Frequency
(GHz)')
%data=[FF' Amplitude' FF1' Amplitude1' FF2' Amplitude2'];
%save bSamp1.txt data -ascii

```

EK III- FDTD MODELLEMELERINE AİT FİLİMLER

Dosya Adı	özellikleri
f08_1.avi	8.2 GHz
f10_1.avi	10 GHz
f12_1.avi	12 GHz
f14_1.avi	14 GHz
f16_1.avi	16 GHz
f18_1.avi	18 GHz
f20_1.avi	20 GHz
f22_1.avi	22 GHz
f24_1.avi	24 GHz
f26_1.avi	26 GHz