

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ FERRİT NANOPARÇACIKLARIN
ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU, DİELEKTRİK
VE İLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tuğba ŞAŞMAZ KURU

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ali ÇORUH

Şubat 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**$Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ FERRİT NANOPARÇACIKLARIN
ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU, DİELEKTRİK
VE İLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Tuğba ŞAŞMAZ KURU

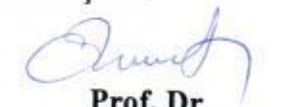
Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 15/02/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Ali ÇORUH
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Cuma BİNDAL
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Nagihan DELİBAŞ
Üye


Prof. Dr.
Cabir TERZİOĞLU
Üye


Prof. Dr.
Ahmet VARILCI
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Tuğba ŞAŞMAZ KURU

05.01.2017

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım sayın Doç. Dr. Ali ÇORUH'a teşekkür ederim.

Numunelerin hazırlanması için Çankırı Karatekin Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuvarını kullanmamıza izin verdiği için sayın Doç. Dr. Volkan EYÜPOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte bana sürekli destek olan Okan Üniversitesi SHMYO Müdürüm sayın Yrd. Doç. Dr. Onur YARAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Sakarya'ya her gidişimde kahrımı çeken sevgili arkadaşlarım Selda ESER ve Gülay GÜNDAY KONAN'a, desteklerini ve sevgilerini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Derya AVAN ÇINAR, Müge SÖYLEYİCİ ÇERGEL ve Şükran CENİKLİ BAŞEREN'e çok teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca ellerinden geleni yaparak, benden desteklerini esirgemeyen canım annem ve canım babama, beni büyütüp bugünlere gelmemde büyük emeği olan canım teyzelerime çok teşekkür ederim. Yüksek lisans ve doktora eğitimimde çok kahrımı çeken canım ablama teşekkürü bir borç bilirim. Ve tabi ki Alimefe'ye.

En büyük teşekkür diğer yarıma, kocama. O olmasaydı bu tez bitmezdi. Beni sürekli teşvik ederek geldiğim bu noktadaki en büyük emeğe sahip sevgili eşim Mehmet KURU, iyi ki varsın. Kalbimin içinden teşekkürler.

Bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2013-02-02-010.) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Ferritler	3
2.1.1. Ferrit Çeşitleri	4
2.1.1.1. Spinel ferritler	4
2.1.1.2. Hegzagonal ferritler	8
2.1.1.3. Garnetler	8
2.1.2. Sertliklerine göre ferrit çeşitleri	9
2.1.2.1. Yumuşak ferritler	9
2.1.2.2. Sert ferritler	9
2.1.3. Ferritlerin diğer manyetik malzemeler üzerindeki avantajları	10
2.1.4. Ferritlerin uygulama alanları	11
2.1.5. Cd Ferrit için literatür taraması	12
2.2. Ferritlerin Üretim Yöntemleri	24

2.3. Karakterizasyon Yöntemleri	26
2.3.1. X-Işını Kristalografisi	26
2.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	27
2.3.3. FT-IR (Fourier Transform Infrared Spektroskopisi)	28
2.3.4. UV-Vis Spektroskopisi	29
2.3.5. Titreşen Örnek Magnetometresi (VSM)	29
2.4. Dielektrik Malzemeler	30
2.4.1. Dielektrik davranış	31
2.4.2. Alan vektörleri ve polarizasyon	33
2.4.2.1. Polarizasyon türleri	35
2.4.3. Dielektrik sabitinin frekansla değişimi	36
2.4.4. Dielektrik sonuçlarının analizi için önerilen modeller ve mekanizmalar	39
2.4.4.1. Debye modeli	40
2.4.4.2. Cole Cole modeli	43
2.4.4.3. Cole Davidson modeli	45
2.5. Elektriksel İletkenlik	48
2.5.1. İletkenlik mekanizmaları	50
2.5.2. Dc iletkenlik	50
2.5.2.1. Arrhenius modeli	51
2.5.2.2. Dc iletkenlik analizi için ikinci model	52
2.5.2.3. Değişken Mesafeli Hoplama Modeli (VRH)	52
2.5.3. Ac iletkenlik	53
2.5.3.1. Kuantum Mekaniksel Tünelleme (QMT)	53
2.5.3.2. Enerji Bariyeri İle İlişkilendirilmiş Hoplama (CBH) ...	54
2.5.3.3. Küçük Polaron Tünellemesi (SP)	55
2.5.3.4. Üst Üste Örtüşen Büyük Polaron Tünellemesi (OLPT).	55
2.6. Nem	56

BÖLÜM 3.

NUMUNELERİN SENTEZİ VE KULLANILAN KARAKTERİZASYON

YÖNTEMLERİ	58
------------------	----

3.1. Al-Cd Nanoparçacıkların Sentezi	58
3.2. XRD Analizleri	61
3.3. SEM Analizleri.....	62
3.4. FT-IR Analizleri	63
3.5. UV Analizleri	64
3.6. VSM Analizleri	65
3.7. Dielektrik ve İletkenlik Analizleri	66
3.8. Nem Analizleri	67
 BÖLÜM 4.	
BULGULAR	69
4.1. XRD Sonuçları	69
4.2. SEM Sonuçları	72
4.3. FT-IR Sonuçları	76
4.4. Optik Sonuçlar	77
4.5. Manyetik Ölçümlerin Sonuçları	81
4.6. Dielektrik Ölçüm Sonuçları	83
4.6.1. Frekans bağımlılığı	83
4.6.2. Sıcaklık bağımlılığı	105
4.7. İletkenlik Sonuçları	117
4.7.1. Dc İletkenlik sonuçları	117
4.7.2. Ac İletkenlik sonuçları	120
4.8. Nem Sonuçları	128
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE TARTIŞMA	137
KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ	153

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	: Dielektrik dağılım parametresi
β	: Dielektrik eğrilik parametresi
γ	: Faz geçişinin yaygınlık derecesi
δ	: Faz farkı
$\text{\AA}$	: Angstrom
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ϵ_r	: Bağlı geçirgenlik
P	: Polarizasyon
P_e	: Elektronik polarizasyon
P_i	: İyonik polarizasyon
P_o	: Yönsel polarizasyon
ϵ'	: Dielektrik sabitinin gerçek kısmı
ϵ''	: Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ϵ^*	: Kompleks dielektrik sabiti
ω	: Açısal frekans
$\tan\delta$	: Dielektrik kayıp faktörü
τ	: Durulma zamanı
ϵ_∞	: Yüksek frekanslardaki dielektrik sabiti
ϵ_0	: Düşük frekanslardaki dielektrik sabiti
σ_{dc}	: DC iletkenlik
σ_{ac}	: AC iletkenlik
λ	: Gelen ışığın dalga boyu
θ	: Işının gelme açısı
ρ	: Yoğunluk
A	: Numune alanı

A	: Absorbans
C	: Kapasitans
C_g	: Tanelerin sığası
C_{gb}	: Tane sınırlarının sığası
CBH	: Enerji bariyeri ile ilişkilendirilmiş hoplama modeli
d	: Numune kalınlığı
D	: Yer değiştirme vektörü
E	: Elektrik alan
E_a	: Aktivasyon enerjisi
E_g	: Bant aralığı enerjisi
F	: Farad
F(R)	: Kubelka-Munk fonksiyonu
FCC	: Yüzey merkezli kübik yapı
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
G	: Konduktans
H	: Madde içindeki manyetik alan
Hz	: Hertz
h	: Plank Sabiti
hkl	: Miller indisleri
K	: Kelvin
k_B	: Boltzman sabiti
kHz	: Kilohertz
M	: Manyetizasyon
MHz	: Megahertz
mT	: Militesla
$N(E_F(T))$	: Fermi enerji seviyesi civarında durumlar yoğunluğu
nm	: Nanometre
OLPT	: Üstüste binen büyük polaron tünellemesi
P(t)	: Polarizasyon
pH	: Hidrojenin gücü (power of hydrogen)
Q	: Yük
QMT	: Kuantum mekaniksel tünelleme

R	: Reflektans
R_g	: Tanelerin direnci
R_{gb}	: Tane sınırlarının direnci
R_w	: Tünelleme mesafesi
RH	: Bağlı nem
s	: İletkenlik kuvvet parametresi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SP	: Küçük polaron tünellemesi
t	: Tünelleme bariyeri kalınlığı
T	: Transmittans
UV	: Ultraviyole (mor ötesi)
V	: Potansiyel
VSM	: Titreşimli örnek magnetometresi
W	: Potansiyel bariyeri yüksekliği
XRD	: X-ışınları kırınımı
Z'	: Empedansın gerçek kısmı
Z''	: Empedansın sanal kısmı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Tetrahedral bölgelerin kristaldeki görünümü.....	5
Şekil 2.2.	Oktahedral bölgelerin kristaldeki görünümü.....	6
Şekil 2.3.	Normal spinel ferritler.....	7
Şekil 2.4.	Ters spinel ferritler.....	7
Şekil 2.5.	Orta spinel ferritler.....	8
Şekil 2.6.	Yumuşak ve sert ferritlerin histerizis döngüleri.....	10
Şekil 2.7.	Nanoparçacık üretim yöntemlerinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.8.	Bragg Kırınımı.....	27
Şekil 2.9.	Paralel levhalı bir kapasitör, levhalar arasında (a) vakumun bulunması (b) dielektrik malzemenin bulunması durumu.....	32
Şekil 2.10.	Aralarında d mesafesi bulunan iki elektrik yük (q büyüklüğünde) tarafından üretilen bir elektrik dipolün şematik gösterimi.....	33
Şekil 2.11.	(a) Elektrik alan tarafından bir dipole etkiyen kuvvetler (dolayısıyla moment oluşumu) (b) Uygulanan alan sonucu oluşan nihai dipol düzeni.....	34
Şekil 2.12.	(a) Elektrik alan etkisindeki bir atomda, elektron bulutunun çarpılmasıyla meydana gelen elektronik polarizasyon. (b) Elektrik alan etkisinde iyonların bağlı olarak ötelenmesiyle meydana gelen polarizasyon, (c) Uygulanan etkisinde, iyonların etkisinde kalıcı dipollerin yönü (oklar) ve yönsel polarizasyon oluşumu.....	36
Şekil 2.13.	Bir p-n doğrultma birleşimine ait voltaj-zaman ilişkisi.....	38
Şekil 2.14.	Dipol yönlenmeleri (a) alternatif elektrik alanının oluşturduğu polarizasyon (b) ters polarizasyon.....	38

Şekil 2.15.	Bir alternatif elektrik alanının etkisinde, dielektrik sabitinin frekansla değişimi. Dielektrik sabitine elektronik, iyonik ve yönsel polarizasyonun katkısı.....	39
Şekil 2.16.	Dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısmının Debye modeline göre frekansla değişimi.....	41
Şekil 2.17.	Debye Modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma bağlılığı.....	43
Şekil 2.18.	Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin reel kısmının frekansla değişimi.....	44
Şekil 2.19.	Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi.....	44
Şekil 2.20.	Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma bağlılığı.....	45
Şekil 2.21.	Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin reel kısmının frekansla değişimi.....	46
Şekil 2.22.	Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi.....	47
Şekil 2.23.	Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma bağlılığı.....	47
Şekil 2.24.	Elektriksel öz direnci ölçmede kullanılan bir düzeneğin şematik gösterimi.....	49
Şekil 2.25.	Arrhenius tipi dc iletkenlik örneği.....	51
Şekil 3.1.	Al-Cd ferrit üretiminde takip edilen basamaklar.....	60
Şekil 3.2.	Al-Cd ferrit üretiminin şematik gösterimi.....	61
Şekil 3.3.	XRD cihazı.....	62
Şekil 3.4.	SEM cihazı.....	63
Şekil 3.5.	FT-IR cihazı.....	63
Şekil 3.6.	UV-Vis cihazı.....	64
Şekil 3.7.	VSM cihazı.....	65
Şekil 3.8.	Pelet haline getirilmiş toz numuneler.....	67
Şekil 3.9.	Dielektrik ve iletkenlik ölçümleri için kullanılan LCR-metre.....	67
Şekil 3.10.	Nem ölçümleri için kullanılan CEM dt-615 hygrometre cihazı.....	68

Şekil 4.1.	Al-Cd nanoparçacıklarının XRD pikleri.....	69
Şekil 4.2.	(311) pikine ait XRD analiz grafiği.....	70
Şekil 4.3.	Al katkısının, kristal boyutuna olan etkisi.....	71
Şekil 4.4.	Tüm numunelerin x30000 büyütmedeki Sem görüntüleri. a) x=0 b) x=0,1 c) x=0,2 d) x=0,3 e) x=0,4 f) x=0,5.....	72
Şekil 4.5.	x=0 için x10000 büyütmedeki tane boyutları.....	73
Şekil 4.6.	x=0,1 için x10000 büyütmedeki tane boyutları.....	74
Şekil 4.7.	x=0,2 için x10000 büyütmedeki tane boyutları.....	74
Şekil 4.8.	x=0,3 için x10000 büyütmedeki tane boyutları.....	75
Şekil 4.9.	x=0,4 için x10000 büyütmedeki tane boyutları.....	75
Şekil 4.10.	x=0,5 için x10000 büyütmedeki tane boyutları.....	76
Şekil 4.11.	Tüm numunelerin FT-IR pikleri.....	77
Şekil 4.12.	$Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ nanoparçacık serisine ait UV-Vis spektrumu.....	78
Şekil 4.13.	x=0 için Tauc grafiği.....	78
Şekil 4.14.	x=0,1 için Tauc grafiği.....	79
Şekil 4.15.	x=0,2 için Tauc grafiği.....	79
Şekil 4.16.	x=0,3 için Tauc grafiği.....	80
Şekil 4.17.	x=0,4 için Tauc grafiği.....	80
Şekil 4.18.	x=0,5 için Tauc grafiği.....	81
Şekil 4.19.	Oda sıcaklığındaki $Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ ferrit sisteminin M-H histerezis çevrimleri.....	82
Şekil 4.20.	x=0 için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	84
Şekil 4.21.	x=0,1 için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	84
Şekil 4.22.	x=0,2 için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	85
Şekil 4.23.	x=0,3 için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	85
Şekil 4.24.	x=0,4 için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	86
Şekil 4.25.	x=0,5 için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	86

Şekil 4.26.	$x=0$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.....	88
Şekil 4.27.	$x=0,1$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği...	88
Şekil 4.28.	$x=0,2$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği...	89
Şekil 4.29.	$x=0,3$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği...	89
Şekil 4.30.	$x=0,4$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği...	90
Şekil 4.31.	$x=0,5$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği...	90
Şekil 4.32.	$x= 0,2$ numunesine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına karşı çizilmiş grafiği.....	91
Şekil 4.33.	$x=0$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	93
Şekil 4.34.	$x=0,1$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	93
Şekil 4.35.	$x=0,2$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	94
Şekil 4.36.	$x=0,3$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	94
Şekil 4.37.	$x=0,4$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	95
Şekil 4.38.	$x=0,5$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	95
Şekil 4.39.	$x=0$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	96
Şekil 4.40.	$x=0,1$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	96
Şekil 4.41.	$x=0,2$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	97
Şekil 4.42.	$x=0,3$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	97
Şekil 4.43.	$x=0,4$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	98
Şekil 4.44.	$x=0,5$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.....	98
Şekil 4.45.	$x=0$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği...	99
Şekil 4.46.	$x=0,1$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.....	99
Şekil 4.47.	$x=0,2$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.....	100
Şekil 4.48.	$x=0,3$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.....	100
Şekil 4.49.	$x=0,4$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.....	100
Şekil 4.50.	$x=0,5$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.....	100
Şekil 4.51.	Eşdeğer devre gösterimi.....	101

Şekil 4.52.	$x=0$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.....	102
Şekil 4.53.	$x=0,1$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.....	102
Şekil 4.54.	$x=0,2$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.....	103
Şekil 4.55.	$x=0,3$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.....	103
Şekil 4.56.	$x=0,4$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.....	104
Şekil 4.57.	$x=0,5$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.....	104
Şekil 4.58.	$x=0$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.....	106
Şekil 4.59.	$x=0,1$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.....	107
Şekil 4.60.	$x=0,2$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.....	107
Şekil 4.61.	$x=0,3$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.....	108
Şekil 4.62.	$x=0,4$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.....	108
Şekil 4.63.	$x=0,5$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.....	109
Şekil 4.64.	$x=0$ için $\ln(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ grafiği.....	110
Şekil 4.65.	$x=0,1$ için $\ln(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ grafiği.....	110
Şekil 4.66.	$x=0,2$ için $\ln(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ grafiği.....	111
Şekil 4.67.	$x=0,3$ için $\ln(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ grafiği.....	111
Şekil 4.68.	$x=0,4$ için $\ln(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ grafiği.....	112
Şekil 4.69.	$x=0,5$ için $\ln(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ grafiği.....	112
Şekil 4.70.	$x=0$ için farklı frekanslarda $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.....	114
Şekil 4.71.	$x=0,1$ için farklı frekanslarda $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.....	114
Şekil 4.72.	$x=0,2$ için farklı frekanslarda $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.....	115
Şekil 4.73.	$x=0,3$ için farklı frekanslarda $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.....	115

Şekil 4.74.	$x=0,4$ için farklı frekanslarda $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.....	116
Şekil 4.75.	$x=0,5$ için farklı frkanslarda $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.....	116
Şekil 4.76.	$x=0$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	117
Şekil 4.77.	$x=0,1$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	118
Şekil 4.78.	$x=0,2$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	118
Şekil 4.79.	$x=0,3$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	119
Şekil 4.80.	$x=0,4$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	119
Şekil 4.81.	$x=0,5$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.....	120
Şekil 4.82.	$x=0$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi.....	121
Şekil 4.83.	$x=0,1$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi...	122
Şekil 4.84.	$x=0,2$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi...	122
Şekil 4.85.	$x=0,3$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi...	123
Şekil 4.86.	$x=0,4$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi...	123
Şekil 4.87.	$x=0,5$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi...	124
Şekil 4.88.	$x=0$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	125
Şekil 4.89.	$x=0,1$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	125
Şekil 4.90.	$x=0,2$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	126
Şekil 4.91.	$x=0,3$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	126
Şekil 4.92.	$x=0,4$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	127
Şekil 4.93.	$x=0,5$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.....	127
Şekil 4.94.	İmpedansın nem ve frekansla değişimi.....	129
Şekil 4.95.	İmpedansın bağıl nemine göre değişimi.....	131
Şekil 4.96.	Tepki ve kurtarma zamanları.....	132
Şekil 4.97.	Histerezis eğrileri.....	133
Şekil 4.98.	Uzun zaman kararlılığı.....	134
Şekil 4.99.	a. %15 ve %35 nem değerleri için Cole- Cole eğrileri b. %60 ve %90 nem değerleri için Cole- Cole eğrileri.....	135

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Farklı seramik ve polimer malzemelerin, 60 Hz ve 100 MHz'deki dielektrik sabiti değerleri	31
Tablo 2.2.	Çeşitli Elektrik Parametreleri ve Alan Vektörleri İçin Ana ve Türetilmiş Birimler	35
Tablo 3.1.	Al-Cd nanoparçacık üretmek için gerekli olan tuz miktarları.....	59
Tablo 4.1.	XRD sonuçlarında elde edilen verilerle hesaplanan kristal boyutları, örgü sabitleri ve yoğunluklar.....	71
Tablo 4.2.	$Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ nanoparçacık serisine ait bant enerjileri	81
Tablo 4.3.	Manyetik ölçüm sonuçlarından elde edilen manyetizasyon ve koersitive değerleri	83
Tablo 4.4.	Tüm numuneler için durulma zamanına karşılık gelen 1. ve 2. aktivasyon enerjileri.....	105
Tablo 4.5.	x-konsantrasyonuna karşılık gelen γ değerleri	113

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Ferritler, çökelme metodu, dielektrik spektroskopisi, iletkenlik, XRD, SEM, FT-IR, UV-Vis, manyetik ölçümler

Bu çalışmada, çökelme metodu ile $x=0$ ve $0,5$ değerleri arasında $0,1$ aralıklarla üretilen $Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ ferrit serisinin yapısal, manyetik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Numunelerin üretim aşamaları en ince ayrıntısına kadar belirtilmiş ve her aşama tüm numuneler için tekrar edilmiştir.

Tüm numuneler için fazların tespiti X-ışınları difraksiyon (XRD) cihazı ile, tane boyutunun belirlenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, infrared bölgedeki soğurulma olayları Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ile, optik özellikleri Ultraviyole ve görünür ışık (UV-Vis) cihazı ile, manyetik karakterizasyonu Titreşimli Örnek Magnetometresi (VSM) ile yapılmıştır.

Dielektrik ölçümler ve iletkenlik ölçümleri için Lcr metre kullanılmıştır. Her numune için tarama frekans aralığı $20\text{ Hz}-10\text{ MHz}$ 'dir. Sıcaklık ölçümleri için yüksek sıcaklık numune fırını kullanılmıştır. Tüm ölçümler $293-613\text{ K}$ aralığında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda üretilen numunelerin nano boyutta ve spinel formda ferrit malzemeler olduğu anlaşılmıştır. Numunelerin dielektrik davranışının Cole-Cole modele uyduğu gözlemlenmiştir. İletkenlik sonuçlarının açıklanabilmesi açısından dc iletkenlik için, teorik modellemelerden Arrhenius modeli, ac iletkenlik için ise OLPT modeli kullanılmıştır.

INVESTIGATION OF FABRICATION, CHARACTERIZATION, DIELECTRIC AND CONDUCTIVITY PROPERTIES OF $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ FERRITE NANOPARTICLES

SUMMARY

Keywords: Ferrites, Co-precipitation method, dielectric spectroscopy, conductivity, XRD, SEM, FT-IR, UV-Vis, magnetic measurements

In this study, the structural, magnetic and electrical properties of the $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite series that were prepared by co-precipitation method at intervals of 0.1 between $x = 0$ and 0.5, were investigated. The production stages of the samples were specified to the finest detail and each stage was repeated for all samples.

Determination of the phases by X-ray diffraction (XRD), particle size determination by scanning electron microscopy (SEM), the absorption characteristics of the infrared region by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), the optical properties by the ultraviolet and visible light (UV-Vis) device and magnetic characterization by Vibrating Sample Magnetometer (VSM) were performed.

Lcr meter is used for dielectric measurements and conductivity measurements. The scan frequency range for each sample was 20 Hz to 10 MHz. A high temperature sample oven was used for temperature measurements. All measurements were performed between 293-613K.

As a result of the investigations, it is understood that the produced samples are ferrite materials in nano size and spinel form. It has been observed that the dielectric behavior of the samples fit Cole-Cole model. In terms of explaining the results of conductivity, Arrhenius model for dc conductivity and OLPT model for ac conductivity were used to characterized.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Nano boyuttaki malzemeler üzerindeki çalışmalar, son yıllarda önem kazanmıştır. Bu malzemeler gelecek araştırmalar için önemli bir alan olacağı yönünde muazzam gelişmeler göstermektedir. Nano boyutta üretilen örneklerin, yeni imkân ve özellikleri fark edilip, nanobilimin gelişimi nedeniyle, nanoteknolojiyle üretilen yeni cihazların teknolojik imkânları gittikçe daha fazla dikkat uyandırmaktadır (Widanarto ve ark., 2013; Anil ve ark., 2015)

Malzemelerin kristal boyutları küçüldükçe, çok farklı mekanik, optik, elektriksel ve manyetik özellikler gösterirler. Teknolojik ve bilimsel çalışmalar sayesinde, günümüzde malzemeler, istenilen şekil ve boyutlarda üretilmektedirler. İstenilen özelliklerin sağlanabilmesi için de farklı üretim yöntem ve teknikleri kullanılmaktadır. Bütün bu durumlarla birlikte nano boyuttaki malzemeler manyetizmaya da yeni bir bakış açısı getirmiştir.

Yalıtkanlık özellikleri açısından ferritler, manyetik malzemeler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Nano boyutlu ferrit malzemeler, geniş teknolojik uygulamaları ve eşsiz elektriksel özellikleri sebebiyle, son yıllarda büyük ilgi odağı haline gelmişlerdir (Widanarto ve ark., 2013; Hankare ve ark., 2012). Benzer diğer malzemelerin içerisinde ferritler, ucuz ve kararlı olmaları sebebiyle yeri doldurulamaz malzemelerdir (Ali ve ark., 2014). Alışılmadık fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ferritler benzerlerinden ayrılmaktadırlar (Anil ve ark., 2015). Ferritler, mikrodalgalardan radyo dalgalarına kadar geniş bir frekans aralığında yüksek öz dirençleri ile teknolojik uygulamalarda tercih edilirler. Bu uygulamalar arasında, yüksek frekans magnetleri, manyetik rezonans görüntüleme, sensörler, veri depolama cihazları, ilaç taşınımı vb sayılabilir (Singhal ve ark., 2012; Ajroudi ve ark., 2014; Bhukal ve ark., 2012). Spinel ferritler mükemmel elektriksel ve manyetik özellikleri

sayesinde bilim adamları ve teknolojik çalışanlar tarafından yaygın olarak çalışılmaktadırlar.

Ferrit malzemeler pek çok değişik yöntemle üretilebilir. Bunlardan bazıları, çökelme metodu (Widanarto ve ark. 2013; Nongjai ve ark. 2012), sitrat jel metodu (Thakur ve ark. 2015), sol-jel metodu (Kumar ve ark. 2016), glikotermal reaksiyon (Shrivastava, 2016), olarak sayılabilir. Ancak bu metotların arasında karmaşık donanım gerekliliği, uzun basamaklardan oluşması, yüksek sıcaklık gerekliliği gibi dezavantajlara sahip olanlar da vardır. Çökelme metodu, diğer metotlara nazaran daha basit, az basamaklı ve uygulanabilirlik açısından fazla malzemeye gereksinim duymadığından daha tercih edilebilir bir metottur.

Ferrit parçacıkların boyutu ve özellikleri hazırlama koşullarına göre değişebilir. Bu koşullar arasında, pH değeri, sentez için kullanılan sıvı, karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi, karıştırma hızı, kullanılan metal nitrat oranı gibi durumlar sayılabilir (Anil ve ark., 2015).

Ferritlerin arzulanan elektrik ve dielektrik özelliklerini arttırabilmek için yıllardır süregelen çalışmalar vardır. Bu çalışmada biz daha önce denenmemiş Al-Cd katkılı ferrit sentezleyerek elektriksel ve dielektrik özelliklerini inceledik. $Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ ferrit nanoparçacıkları çökelme metodu kullanılarak üretilmiştir. Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip alüminyum metalini kadmiyuma katkılایarak literatüre yeni bir ferrit kazandırmak ve özelliklerini diğer ferritlerle kıyaslayarak kullanılabilirliğini, uygulanabilirliğini ve farklı çalışma alanları için faydalarını araştırmak bu çalışmanın temel amacıdır.

BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Ferritler

Ferritler elektriksel olarak iletken olmayan, seramik bileşimi ferromanyetik malzemelerdir. Bu malzemeler, Hematit (Fe_2O_3), Magnetit (Fe_3O_4) ve NiO, CuO, ZnO, MnO CoO gibi bazı metal oksitlerin çeşitli şekillerde karışımlarından oluşmaktadır. Ferritlerin en önemli özelliği, manyetize olmuş durumda, bütün spin manyetik momentlerinin aynı doğrultuya yönelmemesidir. Bazıları karşıt doğrultuda yönelir. Ancak spin manyetik momentler farklı değerlerde iki farklı tip olduğunda, net manyetik moment ölçülebilir bir değere sahip olur (Vijaya ve Rangarajan, 1999-2000).

Ferritlerin moleküler formülü $\text{M}^{2+}\text{O}.\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3$ şeklindedir. Burada M, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Mg, Zn ya da Cd gibi iki değerlikli metallerin yerine kullanılmaktadır. Spinel yapının her birim hücresinde 8 molekül vardır. Her birim hücrede 32 Oksijen (O^{2-}) iyonu, 16 Demir (Fe^{3+}) iyonu ve 8 M^{2+} iyonu vardır. Bununla birlikte 8 Fe^{3+} iyonu ve 8 M^{2+} iyonu oktahedral bölgeleri meydana getirmektedir. Her bir iyon da 6 adet oksijen iyonu ile çevrilidir. Tüm bu iyonların spini birbirine paraleldir. Geri kalan 8 Fe^{3+} tetrahedral bölgeleri meydana getirmektedir ve her biri 4 oksijen iyonu ile çevrelenmiştir. Tetrahedral bölgelerdeki bu 8 iyonun spini, oktahedral bölgelerdeki dönüşe anti paralel olarak yönelmiştir. Böylece Fe^{3+} iyonlarının net spin manyetik momenti, tetrahedral sitelerde 8 spini, oktahedral sitelerdeki diğer 8 anti paralel spin ile yok etmesi neticesinde 0 olur. 8 M^{2+} iyonunun spin manyetik momenti ferritlerin manyetizasyonuna katkı sağlar (Vijaya ve Rangarajan, 1999-2000).

Ferritler 1936 yılından beri incelenmektedir. Manyetik malzemelerin uygulamalarının üzerinde olağanüstü etkileri vardır. Ferritlerin oda sıcaklığındaki dirençleri $10^{-2} \Omega\text{-cm}$ ile $10^{11} \Omega\text{-cm}$ arasında değişmektedir (Reitz ve ark. 1959). Düşük indüksiyon akımı

kaybı ve yüksek elektriksel özdirenç özellikleri dolayısı ile ferritlerin, diğer manyetik malzemelerden daha üstün olduğu düşünülmektedir (Gupta ve ark. 2016).

Ferritler dielektrik özellikler sergiler. Dielektrik özellikler sergilemek, ferritlerin içinden elektromanyetik dalgalar geçip gitse bile, kolayca elektriği iletemediği anlamına gelmektedir. Ayrıca dielektrik özellikler ferritlerin demir, nikel ve diğer iletken metallere göre daha avantajlı olmasını sağlar. Çünkü bu metaller elektriği ilettikleri için pek çok uygulamada manyetik özelliklere sahiptirler. Diğer bir önemli faktör ise ferritlerde oldukça önemli ve metallere göre kesinlikle önemsiz olan gözenekliliktir. Demir ve demir esaslı bileşiklerin doğada bol miktarda bulunması, çeşitli malzemelerle katkılanarak ferrit tabanlı malzemelerin kolay yollarla üretilmesi, maliyetlerinin ucuz olması ve farklı teknolojik özelliklere sahip olması nedeniyle ferritler yıllardır kullanılmaktadır. Ferrit teknolojisinin daha da gelişerek kullanım alanlarının artacağı düşünülmektedir.

2.1.1. Ferrit çeşitleri

Ferritler üç değişik türde sınıflandırılabilirler (Standley, 1972):

1. Spinel (kübik) ferritler
2. Hezagonal ferritler
3. Garnetler

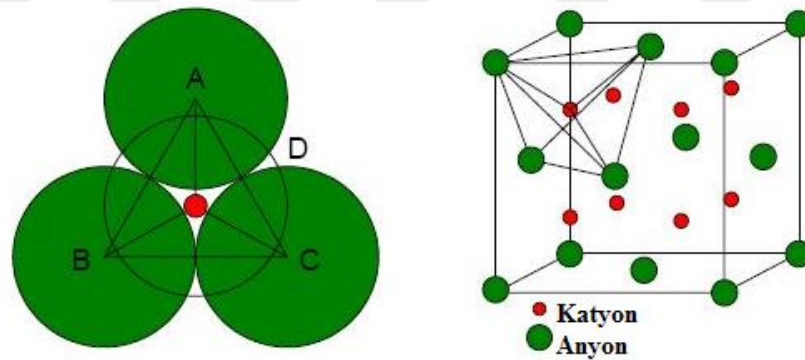
2.1.1.1. Spinel ferritler

Spinel ferritler aynı zamanda kübik ferrit olarak da anılır (Standley, 1972). Spinel ferritler, ferrit ailesinin en yaygın olarak kullanılanıdır. Yüksek elektriksel özdirenç ve düşük girdap akım kayıpları bunları mikrodalga frekanslarda kullanmak için ideal hale getirmiştir. Ferritlerin spinel yapıları ilk olarak 1915'te Bragg ve Nishikawa tarafından $MgAl_2O_4$ şeklinde elde edilmiştir (Standley, 1972). Spinel ferritlerin kimyasal kompozisyonu genel olarak şu şekilde gösterilir; MFe_2O_4 . Burada M, Co^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} veya Cr^{2+} gibi çift değerlikli metal iyonları ya da bu iyonların $Ni_{0,5}^{2+}Zn_{0,5}^{2+}$, $Cu_{0,5}^{2+}Zn_{0,5}^{2+}$ gibi kompozisyonlarını ifade etmektedir.

Spinel ferritlerin birim hücresi yüzey merkezli kübik (FCC) yapıdadır. Her birim hücrenin sekiz birim formülü vardır. Bu formül $M_8Fe_{16}O_{32}$ şeklinde yazılabilir. Anyonlar en büyük bileşen olup FCC örgüsünü oluştururlar. Birim hücrede 96 adet arayer bölgesi bulunur. Bunların 64 ü tetrahedral (a) ve 32 si oktahedral (b) bölgedir.

Tetrahedral bölgeler

Tetrahedral bölgelerde (A), arayer, dört örgü atomu tarafından oluşturulan tetrahedronun merkezidir. Birbiriyle temasta olan üç anyon düzlemindedir, dördüncü anyon diğer üç anyonun merkezinin üstünde simetrik olarak yerleşmiştir. Katyon ise bu dört anyon tarafından oluşturulmuş boşluğun merkezindedir. Tetrahedral yapıda dört anyon küpün dört köşesini işgal eder ve katyon küpün hacim merkezini işgal etmektedir. Burada anyonlar düzlemde A, B ve C dedir. Ve D anyonu, üç anyon tarafından oluşturulan üçgenin merkezinin üstünde yer alır. Katyon ise küpün merkezinde oluşan boşluğu işgal etmektedir (Standley, 1972).

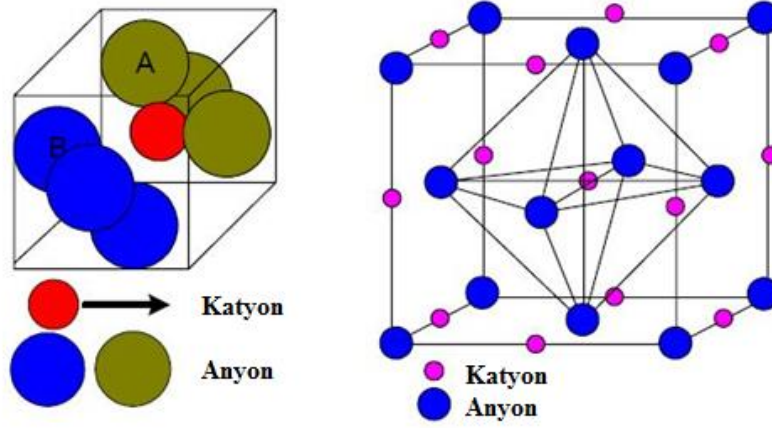


Şekil 2.1. Tetrahedral bölgelerin kristaldeki görünümü (Standley, 1972).

Oktahedral bölgeler

Oktahedral bölgelerde, arayer, altı örgü anyonu tarafından oluşturulan oktahedronun merkezindedir. Düzlemde birbirine temas eden dört anyon, diğer iki anyon bölgesi, dört anyon tarafından oluşturulan düzlemin merkezinin alt ve üstünde simetrik olarak yerleşmiştir. Katyon altı anyon tarafından oluşturulan boşluğu işgal ederek oktahedral yapıyı oluşturur. Yapı şunu gösterir; altı anyon küp yüzey merkezini işgal eder ve

kasyon küpün merkezini işgal eder. FCC de her birim hücrede dört oktahedral bölge bulunmaktadır (Standley, 1972).



Şekil 2.2. Oktahedral bölgelerin kristaldeki görünümü (Standley, 1972).

Spinel ferrit çeşitleri:

Spinel ferritler kasyonların tetrahedral (A) ve oktahedral (B) bölgelerdeki dağılımlarına göre üç ayrı kategoriye göre sınıflandırılmaktadırlar.

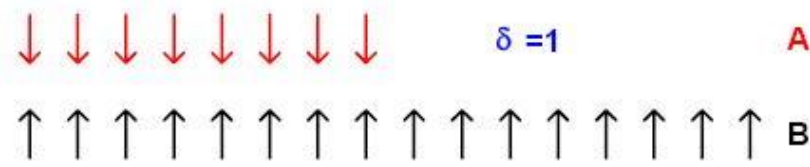
1. Normal spinel ferritler
2. Ters spinel ferritler
3. Orta spinel ferritler

Normal spinel ferritler

Eğer oktahedral (B) bölgelerde sadece bir çeşit kasyon varsa, spinel ferrit, normaldir. Bu ferritlerde çift değerlikli kasyonlar tetrahedral (A) bölgeleri işgal ederken, üç değerlikli kasyonlar oktahedral (B) bölgelerdedir. Normal spinel şu şekilde temsil edilir (kare parantez oktahedral (B) bölgelerdeki iyonik dağılımı belirtmek için kullanılır):



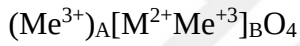
M iki değerlikli, Me ise üç değerlikli iyonları temsil eder. Normal spinel ferritlere tipik bir örnek olarak katı ZnFe_2O_4 verilebilir (Valenzuela, 1994).



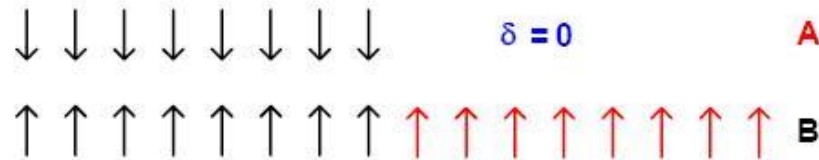
Şekil 2.3. Normal spinel ferritler.

Ters spinel ferritler

Bu yapıda, üç değerlikli iyonların yarısı tetrahedral (A) bölgelerini ve diğer yarısı da oktahedral (B) bölgeleri işgal eder. Kalan katyonlar oktahedral bölgede rastlantısal olarak dağılmıştır. Bu ferritler aşağıdaki şekilde temsil edilmektedir:



Ters spinel ferritlere tipik bir örnek olarak Fe_3O_4 verilebilir. Burada iki değerlikli Fe oktahedral (B) bölgeleri doldurmaktadır (Valenzuela, 1994).

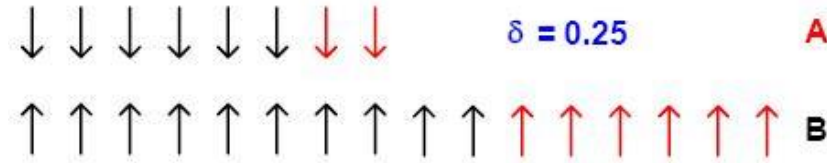


Şekil 2.4. Ters spinel ferritler.

Orta spinel ferritler

Normal ve ters spinel ferritlerin arasında kalan ve iyonik dağılmış olan ferritler karma ferritler olarak bilinir. $(\text{M}_{\delta}^{2+} \text{Me}_{1-\delta}^{3+})_A[\text{M}_{1-\delta}^{2+} \text{Me}_{1+\delta}^{3+}]_B\text{O}_4$ burada δ ters çevirme, döndürme parametresidir. δ miktarı, niceliği hazırlanma metoduna ve ferrit bileşenlerinin doğasına bağlıdır. Ferriti normal spinel ferrite tamamlamak için $\delta=1$, ters spinel ferrite tamamlamak için $\delta=0$ olmakta, karma spinel ferrit için δ bu iki uç

değer arasında değişmektedir. Tamamen karma ferritlerde $\delta=1/3$ tür. Oktahedral bölgelerde, katyonlarda eşitsizlik varsa (birbirine eşit olmayan sayıda katyon varsa) spinel karma olarak adlandırılır. Karma spinel ferritlere tipik örnek olarak $MgFe_2O_4$ ve $MnFe_2O_4$ verilebilir (Chinnasamy ve ark., 2001).



Şekil 2.5. Orta spinel ferritler.

2.1.1.2. Hegzagonal ferritler

Bu tür ferritler ilk kez Went, Rathenau, Gorter&Van Oostershout (1952) ve Jonker, Wijn&Braun (1956) tarafından belirlenmiştir. Hegza ferritler, $MFe_{12}O_{19}$ formülü ile hegzaonal ya da rombohedral ferromanyetik oksitlerdir. Burada M Baryum, Kurşun ya da Stronsiyum gibi elementlerdir. Bu ferritlerde oksijen iyonları sıkı paket hegzaonal yapıdadır. Bunlar geniş olarak kalıcı magnet olarak kullanılırlar ve yüksek koersiviteye sahiptirler. Bu ferritler oldukça yüksek frekanslarda kullanılırlar. Onların hegzaonal ferrit örgüleri, sıkı paket oksijen iyonları ile spinel yapıya benzerdir, ancak aynı katmanlarda, oksijen iyonlarıyla aynı katmanlarda metal iyonları da mevcuttur. Hegzaonal ferritler garnet ferritlerden daha büyük iyonlara sahiptirler ve oksijen iyonlarının yer değiştirmesi ile oluşurlar.

2.1.1.3. Garnetler

Yoder ve Keith 1951'de Fe iyonlarının yerine gelen farklı iyonlar ile ideal bir mineral garnet rapor etmişlerdir ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$) (Standley, 1972). Bu araştırmacılar, ilk silikonsuz garneti $Mn^{II}+Si^{IV}$ yerine $Y^{III}+Al^{III}$ koyarak $Y_3Al_5O_{12}$ şeklinde üretmişlerdir. Bertaut ve Forret 1956'da $Y_3Fe_5O_{12}$ ferriti hazırlayarak manyetik özelliklerini ölçmüştür. 1957'de Geller ve Gilleo, aynı zamanda ferromanyetik içeriğe sahip $Gd_3Al_5O_{12}$ yi hazırlayıp ölçmüştür. Saf demir garnetin birim hücresi için genel formül $M_3Fe_5O_{12}$ dir. Burada M üç değerlikli ağır toprak iyonlarıdır. (Y, Gd, Dy). Bunların

hücre şekilleri kübik olup köşe uzunluğu yaklaşık 12,5 Å dır. Bu yapı karmaşık kristal yapıdadır. Hafıza yapılarındaki uygulamaları açısından önemlidirler.

2.1.2. Sertliklerine göre ferrit çeşitleri

Manyetizasyonun varlığına göre ferritler sert ve yumuşak olmak üzere iki çeşittir. Bu sınıflandırma ferritlerin manyetize olmasına ya da olmamasına dayanır. Yumuşak ferritler kolayca manyetize ya da demanyetize olurlarken sert ferritler manyetize ve demanyetize olmakta zorlanırlar (Cullity, 1972).

2.1.2.1. Yumuşak ferritler

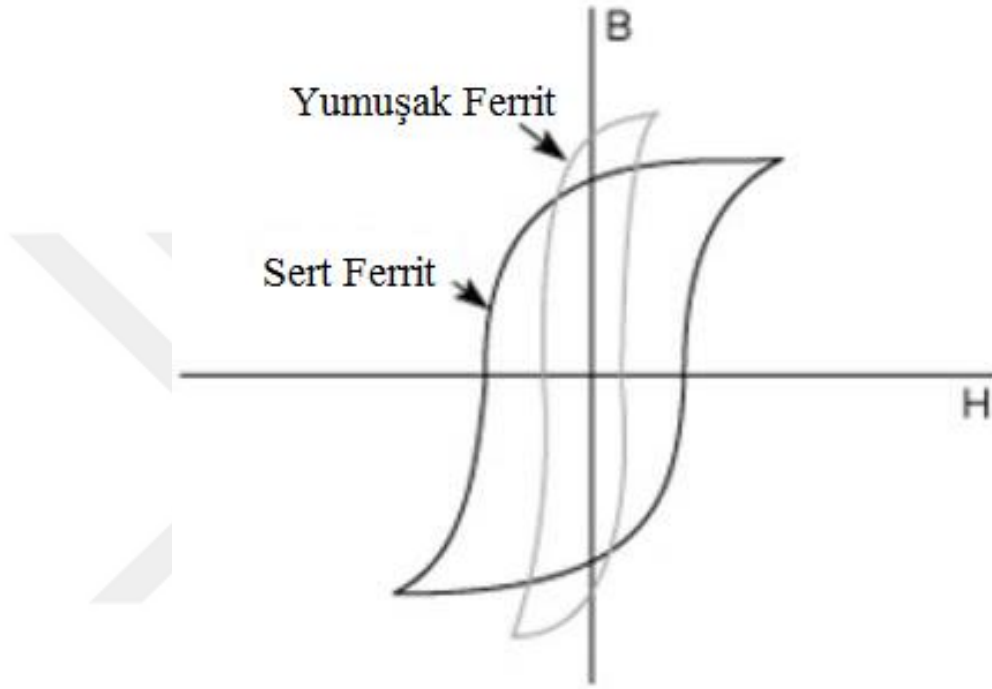
Yumuşak ferritler kolayca manyetize ya da demanyetize olabilirler. Bu durum bize, yumuşak ferritlerin, pek çok uygulama için gerekli olan düşük zorlayıcı alan ve yüksek manyetizasyona sahip olduğunu gösterir. Yumuşak ferritler için histerizis döngüleri ince ve uzun olmalıdır, bu sebeple de enerji kaybı yumuşak ferritlerde çok azdır. Bunlara örnek olarak Ni, Fe Co ve Mn verilebilir. Bu ferritler, transformatör çekirdeklerinde, indüktörlerde, kayıt cihazlarında ve mikrodalga cihazlarda kullanılmaktadır (Vijaya, 1999).

Yumuşak ferritlerin diğer elektromanyetik malzemelere kıyasla, geniş bir frekans aralığını kapsayan yüksek öz direnç ve düşük girdap akımı kaybı gibi özellikleri de içeren, net üstünlükleri vardır. Bunlar yüksek geçirgenlik ve yüksek sıcaklıklarda bile sabit olabilme özelliklerine sahiptir. Bu özellikler yumuşak ferritleri diğer tüm manyetik malzemeler içerisinde üstün kılmaktadır.

2.1.2.2. Sert ferritler

Sert ferritlerin manyetize ya da demanyetize olması zordur. Bunlar kalıcı magnet olarak kullanılırlar. Sert manyetik malzemeler, büyük zorlayıcı alana ve geniş (yaygın) histerizis döngülerine sahiptir. Bunlara örnek olarak alnico (Al-Ni-Co) ve nadir toprak metal alaşımları verilebilir (Vijaya, 1999).

Kalıcı magnetlerin gelişimi 1950’lerde sert ferritlerin tanıtılması ile başlamıştır. Bu malzemeler ferrimanyetik olup çok düşük artık mıknatıslanmaya sahiptirler ($\sim 400\text{mT}$). Maksimum enerji üretimi yalnızca $\sim 40\text{kJm}^{-3}$ ’tür. Magnetler ayrıca demanyetize alanları yumuşatır, böylece kalıcı magnet motorları gibi uygulamalar için kullanılabilirler (Vijaya, 1999).



Şekil 2.6. Yumuşak ve sert ferritlerin histerezis döngüleri.

2.1.3. Ferritlerin diğer manyetik malzemelere kıyasla avantajları

Demir ve metalik alaşımlar gibi pek çok manyetik malzeme, düşük elektriksel öz dirence sahiptir. Malzeme enerji israf ettiğinde verimsiz hale gelir. Enerji israfı yüksek frekanslarda artar. Bununla birlikte ferritler elektriksel öz dirençleri sayesinde yüksek frekanslarda çok daha iyi performans sergilerler. Ferritlerin, yüksek frekans ve geniş bant transformatörlerinde, kalite filtre devrelerinde, ayarlanabilir indüktörlerde, gecikme hatlarında ve diğer yüksek frekans elektronik devrelerde kullanılmasını arttıran diğer bir önemli özelliği de yüksek sıcaklık sabitliğidir. Yüksek frekanslarda, ferritler diğer devre elemanlarından daha iyi performans sergilerler (Nikolov ve Valchev, 2009). Ferritlerdeki önemli bir başka özellik de diğer manyetik metal ve alaşımlardan çok daha ucuz olmalarıdır (Şaşmaz Kuru ve ark. 2017). Ferritler 10

kHz'ten birkaç MHz'e kadar olan frekanslarda çekirdek için seçilebilecek en iyi malzemedir. Bunun açıklamasını şu şekilde yapabiliriz. Düşük maliyet, yüksek kalite, yüksek kararlılık ve düşük hacim kombinasyonu ferritleri çekici kılar. Sonuç olarak, hiçbir diğer manyetik malzeme manyetik ve mekanik parametreleri açısından ferritler kadar uygun değildir.

2.1.4. Ferritlerin uygulama alanları

Ferritler yüksek elektriksel öz dirençlerinden dolayı önemli manyetik malzemelerdir. Bunların teknolojik olarak özellikle yüksek frekanslarda, oldukça yaygın uygulamaları vardır. Ferritler yaygın olarak aşağıdaki özelliklerine göre kullanılırlar (Sun ve ark. 2011; Su ve ark. 2009).

1. Ferritler kuvvet kanununun ve televizyonlar için kullanılan akım değiştiricilerinin bir parçasıdır.
2. Yumuşak ferritler, telefon sistemlerinde kapasitör devreleri ile indüktör çekirdeklerinin kombinasyonunun üretilmesi için kullanılırlar, ancak son zamanlarda katı hal cihazlar bunların yerini almıştır. Yumuşak Ni-Zn ve Mn-Zn ferritleri çekirdek üretimi için kullanılırlar.
3. Küçük antenler ferrit çubuğun üstüne sarılmış bobin ile yapılır ve transistör radyo vericileri için kullanılır.
4. Bilgisayarda, kalıcı hafızalar ferrit malzemelerden yapılır. Bunlar güç sağlayıcı kapansa bile bilgileri depolar. Kalıcı hafızalar, şiddetli şok ve titreşimlere karşı oldukça dayanıklı ferrit malzemelerinden yapılırlar.
5. Ferritler sirkülatör ve izolatör gibi mikrodalga cihazlarda kullanılırlar.
6. Ferritler yüksek frekans transformatör çekirdeklerinde ve bilgisayar hard disk, flopi disk, kredi kartları, oto kasetleri ve kayıt cihazları gibi bilgisayar hafızalarında kullanılırlar.
7. Ferritler düşük mıknatısal büzülme ile frekans ultrasonik dalgalar üretmek için kullanılırlar.
8. Demir silikon alaşımlar elektriksel cihazlarda ve transformatörlerin manyetik çekirdeklerinde kullanılmaktadır.

9. Düşük dielektrik değerlerinde elektromanyetik dalga emici olarak da kullanılırlar.
10. Likit formları hoparlörlerde soğutucu malzeme olarak kullanılır. Bobinleri titreşimle soğuturlar.

2.1.5. Cd Ferrit için literatür taraması

Kadmiyum ferritler günümüze kadar çok çeşitli metallerle katkılanarak, bu katkıların ferritte meydana getirdiği değişiklikler incelenmiştir. Bu bölümde kadmiyum ferritlerle ilgili literatür taranarak, yıllar içinde gösterilen gelişim incelenmiştir.

Li-Cd ferritlerin elektriksel iletkenlik ve termoelektrik kuvvet özellikleri D. Ravinder ve T. Seshagiri Rao (1990) tarafından incelenmiştir.

$\text{Co}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit sisteminin ^{57}Fe Mössbauer ve infrared çalışmaları M. A. Amer ve O. M. Hemeda (1994) tarafından yapılmıştır.

Ni-Cd ferritler J.M. Grenéche ve arkadaşları (1995) tarafından Mössbauer Spektroskopisi ile incelenmiştir.

Bakır-kadmiyum ferritlerin dielektrik özelliklerine Gd^{+3} katkısının incelenmesi C. B. Kolekar ve arkadaşları (1995) tarafından yapılmıştır. Seramik teknikle üretilen ferritlerin genel formülü $\text{Cd}_x\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}\text{Gd}_y\text{O}_4$ 'dür.

Cd-Cu ferritler J.J. Bara ve arkadaşları (1996) tarafından Mössbauer ve NMR Spektroskopileri ile incelenmiştir. $\text{Cd}_x\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 0,5$) ferritler standart sinterleme yöntemi ile üretilmiştir.

Mg-Cd ferritlerin X-ray, SEM ve manyetik özellikleri B. R. Karche ve arkadaşları (1997) tarafından incelenmiştir. $\text{Cd}_x\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülü ve $x=0,0$ ile $1,0$ arasında $0,2$ artış miktarına sahip ferritler standart seramik teknik ile üretilmiştir.

Karma Li-Cd ferritlerin mikro yapı bağımlı manyetik özellik çalışmaları S. S. Bellad ve B.K. Chougule (1997) tarafından yapılmıştır. $\text{Li}_{0,5-x/2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2,5-x/2}\text{O}_4$ formülü ile 0'dan 0,7'ye 0,1 artışla standart çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

Katkısız ve Cr^{3+} katkılı Cd-Co ferritlerin katyon dağılımı ve duyarlılık çalışmaları P. N. Vasambekar ve arkadaşları (1998) tarafından yapılmıştır. $\text{Cd}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}\text{Cr}_y\text{O}_4$ ($x=0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,0$; $y=0, 0,15, 0,30$) genel formülü ile standart seramik metodu ile üretilmiştir.

M. Yokoyama ve arkadaşları (1998) tarafından kadmiyum ferritlerin manyetik özellikleri incelenmiştir. Ferritler çökelme metodu ile üretilmiştir.

Li-Cd karma ferritlerin yapısal ve manyetik özellikleri S. S. Bellad ve arkadaşları tarafından (1998) incelenmiştir. Standart seramik metodu ile üretilen ferritlerin genel formülleri $\text{Li}_{0,5-x/2}\text{Cd}_x\text{Al}_t\text{Fe}_{2,5-x/2}\text{O}_4$ şeklindedir.

S. A. Patil ve arkadaşları (1998) Ti/Si katkılı Cd ferritlerin yapısal ve manyetik özelliklerini incelemişlerdir. Seramik metotla üretilen ferritlere 0,05 Ti/Si katkısı eklenmiş ve genel formülü $\text{Co}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ olup artış miktarı 0,2 ile, $0 \leq x \leq 1,0$ aralığında değişmiştir.

$\text{Cd}_x\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit sisteminde katyon dağılımının X-ışını kırınım incelemesi B. P. Ladgaonkar ve A.S. Vaingankar tarafından (1998) yapılmıştır. Artış miktarı 0,2 olup, $0 \leq x \leq 1,0$ aralığında değerler alan ferritler standart seramik metodu ile üretilmiştir.

Krom katkılı kadmiyum ferritlerin manyetik davranışları P. N. Vasambekar ve arkadaşları (1999) tarafından yapılmıştır. Standart seramik yöntemi ile üretilen ve genel formülü $\text{Cd}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}\text{Cr}_y\text{O}_4$ olan ferritlerin katsayıları $x=0, 0,25, 0,50, 0,75$ ve $1,00$; $y=0, 0,15$ ve $0,30$ şeklindedir.

Li katkılı Cd ferritlerin farklı sinterleme sıcaklıklarının elektriksel özelliklerine etkisi D. Ravinder ve T. Alivelu Manga (1999) tarafından incelenmiştir. Genel formülü

$\text{Li}_{0.5-x/2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x/2}\text{O}_4$ ($x=0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ ve $1,0$) olan ferritler çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiş olup, her birine 1200, 1250 ve 1300°C de ısıtım işlem uygulanmıştır. Bu ferritler iki probe (uç) metodu ile oda sıcaklığından Curie sıcaklığına kadar ölçülmüştür.

Ni-Cd ferritlerin elastik özellikleri T. Alivelu Manga (1999) tarafından araştırılmıştır. Bu incelemeler için ultrasonik atım geçirgenliği tekniği kullanılmıştır. Ni-Cd ferrit çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir. Üretilen ferritlere 1200 derecede ısıtım işlem uygulanmıştır.

Cd katkılı magnetit, B. Gillot ve arkadaşları (1999) tarafından incelenmiştir. $\text{Cd}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$, 0,25 artış miktarı ile) genel formüllü magnetit standart seramik route metodu ile üretilmiştir.

Karma Li-Cd ferritlerin mikroyapı ve geçirgenlik çalışmaları S. S. Bellad ve arkadaşları (1999) tarafından yapılmıştır. Numuneler $\text{Li}_{0.5-x/2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x/2}\text{O}_4$ formülü ile 0'dan 0,7'ye 0,1 artışla standart çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

Zhang Tianshu ve arkadaşları (1999) kimyasal çökelme metodu ile ürettikleri kadmiyum ferritlerin etanol hassasiyet özelliklerini incelemişlerdir.

S. S. Suryawanshi ve arkadaşları (1999) Alüminyum katkılı Cu-Cd ferritlerin XRD analizleri ve manyetik özelliklerini incelemiştir. Standart seramik metotla genel formülü $\text{Cu}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Al}_t\text{Fe}_{2-t}\text{O}_4$ olarak üretilmiştir.

Cr^{3+} katkılı Cd-Co ferritlerin kristalografik ve dc elektriksel direnç çalışmaları P. N. Vasambekar ve arkadaşları (1999) tarafından yapılmıştır. $\text{Cd}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}\text{Cr}_y\text{O}_4$ ($x=0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,0$; $y=0, 0,15, 0,30$) genel formülü ile standart seramik metodu ile üretilmiştir.

Mn katkılı Cd ferritin termoelektrik ve elektriksel iletkenlik özellikleri, bileşenlerin ve sıcaklığın fonksiyonu olarak D. Ravinder (2000a) tarafından incelenmiştir.

Genel formülü $Mn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ($x=0,2, 0,4, 0,6$ ve $0,8$) olan ferrit çift sinterleme seramik tekniği ile üretilmiştir.

Cu katkılı Cd ferritin elektriksel iletim özellikleri D Ravinder (2000b) tarafından araştırılmıştır. Genel formülü $Cu_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ($x=0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ ve $1,0$) olan ferritler oda sıcaklığından Curie sıcaklığına kadar ölçülmüştür.

Cu katkılı Cd ferritlerin elastik özellikleri D. Ravinder ve T. Alivelu Manga (2000) tarafından incelenmiştir. Ferritler geleneksel çift sinterleme metodu ile üretilmiştir.

Li-Ni-Cd karma ferritlerin manyetik özelliklerinin incelenmesi R. G. Kharabe ve arkadaşları tarafından (2000) yapılmıştır. $Li_{0.5}Ni_{0.75-x/2}Cd_{x/2}Fe_2O_4$ genel formülü ve $x=0, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ ve $0,9$ değerlerine sahip ferritler standart sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

Atlama elektronlarının atlama oranı ve sıçrama yüksekliğinin Co-Cd ferritlerin iletkenlik ve dielektrik özellikleri üzerindeki etkisi O. M. Hemeda ve M. M. Barakat (2001) tarafından incelenmiştir. Ferritler çifte sinterleme metodu ile üretilmiştir.

Mn katkılı Cd ferritin oda sıcaklığındaki elastik davranışı D. Ravinder ve T. Alivelumanga tarafından (2001) incelenmiştir. Bu incelemeler için ultrasonik atım geçirgenliği tekniği kullanılmıştır. Mn-Cd ferrit çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

Bakır ferritin manyetizasyon özelliklerine Gd^{+3} ve Cd^{+2} katkılarının etkisi C. B. Kolekar ve arkadaşları (2001) tarafından incelenmiştir. Ferritler standart seramik metodu ile üretilmiştir. $Cd_xCu_{1-x}Fe_{2-y}Gd_yO_4$ genel formülüne sahip ferritlerin x değerleri $0,0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0$; y değerleri ise $0,0, 0,1$ ve $0,3$ 'dir.

Kadmiyum tabanlı Co katkılı ferritlerin yapısal, elektrik ve yük taşıma olaylarının incelenmesi A. M. Abdeen ve arkadaşları (2002) tarafından yapılmıştır.

$\text{Co}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülü ile ferritler $x=0, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ ve $0,9$ değerlerinde ayrı ayrı seramik teknik ile üretilmişlerdir.

Ni katkılı Cd ferritlerin oda sıcaklığındaki elektriksel özellikleri D. Ravinder ve arkadaşları (2003) tarafından incelenmiştir. Genel formülü $\text{Ni}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0,2, 0,4, 0,6$ ve $0,8$) olan ferrit sistemi çift sinterleme metodu ile üretilmiştir.

A.A. Sattar (2003) nadir toprak elementi katkılı Cu-Cd ferritlerin sıcaklık bağımlılığının elektriksel dirence ve termoelektrik kuvvete etkisini araştırmıştır.

Manyetik rezonans kullanarak kadmiyum ferrit tabanlı iyonik manyetik akışkanların anizotropilerin araştırılması çalışması O. Silva ve P. C. Morais (2005) tarafından yapılmıştır.

Mikrodalga yanma metodu ile üretilen kadmiyum katkılı lityum ferritlerin hazırlanması ve manyetik özellikleri S. C. Watawe ve arkadaşları (2006) tarafından incelenmiştir. $\text{Li}_{0.5-x/2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x/2}\text{O}_4$ genel formülü ile ve $x = 0,45, 0,5, 0,55, 0,6, 0,65, 0,7$ değerlerini alan ferritlerin yapısal özellikleri de incelenmiştir.

Nano- SiO_2 'in Li katkılı Cd ferritin manyetik ve dielektrik özelliklerine etkisi R.K. Kotnala ve arkadaşları (2007) tarafından araştırılmıştır. $\text{Li}_{0.35}\text{Cd}_{0.3}\text{Fe}_{2.35}\text{O}_4$ ferrit sol-gel metoduyla üretilmiştir.

Kadmiyum katkılı lityum ferritlerin hazırlama aşamaları ve dielektrik özellikleri S. C. Watawe ve arkadaşları (2007) tarafından incelenmiştir. Mikrodalga yanma metodu ile üretilen ferritler $\text{Li}_{0.5-x/2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x/2}\text{O}_4$ genel formülüne sahiptir.

$\text{Co}_{0.5}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$ ferritin yapısal ve elektriksel özellikleri A. M. M. Farea ve arkadaşları (2008) tarafından incelenmiştir. $0.0 \leq x \leq 0.5$ aralığında ve $0,1$ artış miktarına sahip ferritler sol-jel metodu ile üretilmiştir.

Cd katkılı Li-Ni ferritlerin yapısal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi R. G. Kharabe ve arkadaşları (2008) tarafından yapılmıştır. $\text{Li}_{0.5}\text{Ni}_{0.75-x/2}\text{Cd}_{x/2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülü ve $x=0, 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$ ve $0,9$ değerlerine sahip ferritler standart sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

$\text{Co}_{0.5}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$ poli-kristal ferritlerin elektriksel özelliklerine frekans, sıcaklık ve kompozisyonun etkisi A. M. M. Farea ve arkadaşları (2008) tarafından araştırılmıştır. Ferritler sol-jel metodu ile üretilmiştir ve $0,1$ artışla $0.0 \leq x \leq 0.5$ aralığında değerler almıştır.

Y^{+3} katkılı Mg-Cd ferritlerin yapısal özellikleri A. B. Gadkari ve arkadaşları (2008) tarafından yapılmıştır. Ferritler oksalat çökelme metodu ile üretilmiş olup $\text{Cd}_x\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülüne sahiptir ve x $0,2$ artış miktarı ile $0-1,0$ aralığında değerler almıştır.

Ni-Cd nano-kristal ferritlerin elektriksel özelliklerine sonlu tane etkisi ve sıcaklık etkilerinin incelemesi Khalid Mujasam Batoo ve arkadaşları (2009) tarafından yapılmıştır. Ferritler $\text{Ni}_{0.2}\text{Cd}_{0.3}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Al}_x\text{O}_4$ genel formülüyle ve sol-jel metoduyla üretilmiştir.

Sm^{3+} katkılı Mg-Cd ferritlerin yapısal analizi A.B. Gadkari (2009) tarafından yapılmıştır. Ferritler oksalat çökelme metodu ile üretilmiştir.

Mn ve Cd tabanlı Li ferritlerin manyetik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Vivek Verma ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan bu çalışma standart seramik tekniği ile üretilmiş olup genel formülü $\text{Li}_{0.35}\text{Cd}_{0.3}\text{Mn}_x\text{Fe}_{2.35-x}\text{O}_4 + 0,10 \text{ \% Bi}_2\text{O}_3$ şeklindedir. x ise sırasıyla $0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8$ ve $1,0$ değerlerini almaktadır.

Ni-Cd ferritlerin yapısal ve elektriksel özellikleri M. B. Shelar ve arkadaşları (2009) tarafından incelenmiştir. Oto yanma metodu ile üretilen numuneler $\text{Ni}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülüne sahiptir ve $x=0,2, 0,4$ ve $0,6$ değerlerini almıştır.

Saf ve katkılanmış nano-kristal Cd ferritlerin yapısal ve manyetik özellikleri N. M. Deraz ve arkadaşları (2009) tarafından araştırılmıştır.

Nikel-Kadmiyum ferritlerin kimyasal sentezi, yapısal ve manyetik özelliklerinin çalışmaları M. B. Shelar ve arkadaşları (2010) tarafından yapılmıştır. Oto yanma metodu ile üretilen numuneler $Ni_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ genel formülüne sahiptir ve $x=0,2, 0,4$ ve $0,6$ değerlerini almıştır.

Ashok B. Gadkari ve arkadaşları (2010) nadir toprak iyonu Sm^{3+} ilavesi ile nanokristal Mg-Cd ferritleri oksalat çökelme metodu ile üretmişleridir. $Mg_{1-x}Cd_xFe_2O_4 + 5\% Sm^{3+}$ ferritlerin yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir.

Vivek Verma ve arkadaşlarının (2010) yaptığı çalışmada modifiye edilmiş sitrat başlatıcılı metot ile üretilen nano-kristal $Li_{0,35}Cd_{0,3}Fe_{2,35}O_4$ ferritin manyetik özellikleri incelenmiştir.

Kadmiyum katkılı lityum ferritlerin manyetik özellikleri S. Akhter ve M. A. Hakim (2009) tarafından incelenmiştir. $Li_{0,5-x/2}Cd_xBi_{0,02}Fe_{2,48-x/2}O_4$ genel formülüne sahip ferritler $x=0 - 0,7$ aralığında değerler almıştır. Ferritler geleneksel çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

Cu katkılı Cd ferritlerin yapısal ve ferromanyetik özellikleri Radheshyam Rai ve arkadaşları (2011) tarafından incelenmiştir. $Cu_{1-x}Cd_xFe_2O_4$, $x=0,3, 0,4, 0,5, 0,6$ ve $0,7$ sitrat başlatıcılı (precursor) metod ile üretilmiştir.

Ni-Zn ferrit sistemine Cd katkısıyla elde edilen numunelerin manyetik özelliklerinin ve Dc elektriksel direnç çalışmalarının incelenmesi M. Siva Ram Prasad ve arkadaşları (2010) tarafından yapılmıştır. $Ni_{0,65-x}Cd_xZn_{0,35}Fe_2O_4$ genel formülü, $0,04$ artış miktarı ile $0,0$ ve $0,2$ arasında değerler alan x değişkeni ile ferritler geleneksel seramik yöntem ile üretilmiştir.

Nano yapılı Mn-Zn ferritlerin yapısal, manyetik ve elektriksel özelliklerine kadmiyumun etkisi C. Venkataraju ve arkadaşları (2010) tarafından yapılmıştır. $Mn_{0.5}Zn_{0.5-x}Cd_xFe_2O_4$ genel formüllü ve 0,0, 0,1, 0,2 ve 0,3 değerlerinin alan x değişkeni ile kimyasal çökelme metodu yardımıyla üretilmiştir.

Cd katkılı bakır ferritlerin yapısal ve manyetik özellikleri Radheshyam Rai ve arkadaşları (2011) tarafından incelenmiştir. $Cu_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ genel formülüne sahip ferritlerde x değeri, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7 şeklindedir ve sitrat başlatıcılı metot ile üretilmişlerdir.

La^{3+} katkılı Mg-Cd ferritlerin sentezi, karakterizasyon ve manyetik özellikleri A. B. Gadkari ve arkadaşları (2011) tarafından araştırılmıştır. Ferritler çökelme metodu ile üretilmiş olup La^{3+} %5 katkılanarak değişen özellikler gözlenmiştir.

Nano-kristal Cd-Zn ferritlerin oda sıcaklığının üstündeki dielektrik gevşeme ve manyetik alana bağlı alternatif akım iletkenliği S. Ghatak ve arkadaşları (2011) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada numuneler ball-milling metodu ile üretilmiştir ve araştırmanın yapıldığı sıcaklık aralığı $77 \leq T \leq 300$ K arasında değişmektedir. Üretilen numunelerin yapısal ve elektriksel özellikleri de incelenmiştir.

Ni-Al katkılı Cd ferritlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi Safia Anjum ve arkadaşları (2011) tarafından yapılmıştır. Ferritler standart sinterleme reaksiyon metodu ile üretilmiştir ve $Ni_{1-x}Cd_xAl_{0.6}Fe_{1.4}O_4$ genel formülüne sahiptir. 0,25 artışla $0 \leq x \leq 0.75$ aralığında değerler alır.

Ni-Cd ferritlerde manyetik düzenleşim çalışması Suman Kumar Nath ve arkadaşları (2012) tarafından yapılmıştır. Ferritler geleneksel çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir ve $Ni_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ($0,0 \leq x \leq 0,8$, 0,1 artışla) genel formülüne sahiptir.

Kadmiyum katkılı Ni-Cu ferritlerin yapısal, elektriksel ve manyetik özellikleri P. B. Belavi ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir. $Ni_{0.95-x}Cd_xCu_{0.05}Fe_2O_4$

genel formülü ve $x = 0,1, 0,2$ ve $0,3$ değerlerine sahip ferritler standart çift sinterleme seramik metodu ile üretilmiştir.

Gd^{3+} katkısının nano-kristal Ni-Cd ferritlerin yapısal ve manyetik özellikleri üzerine etkisi Binu P. Jacob ve arkadaşları (2011) tarafından incelenmiştir. Sol-jel metoduyla üretilen ferritlerin genel formülü $Ni_{x0.9}Cd_{0.1}Gd_xFe_{2-x}O_4$ 'dür ve x 0,1 artış miktarı ile 0-0,3 aralığında değerler almıştır.

Cd katkılı Li ferritlerin termal, elektriksel ve manyetik özellikleri Tsering Namgyal ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir. $LiCd_xFe_{5-x}O_8$ ($0,0 \leq x \leq 1,0$) tozları sol-gel metodu kullanılarak hazırlanmıştır.

Mn katkılı CoCd ferritler $CoCd_{0.4}Mn_xFe_{1.6-x}O_4$ ($0,1 < x < 0,6$) formülü ile Sonal Singhal ve arkadaşları (2013) tarafından sol-jel oto yanma metodu ile üretilmiştir. Üretilen ferritlerin katyon dağılımı, yapısal, manyetik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Co katkılı Cd ferritlerin manyetik davranışları Sarout Noor ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir. $Co_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ($x=0,0-1,0$, 0,1 değer aralıklarıyla) ferritler geleneksel çifte sinterleme seramik tekniği kullanılarak üretilmiştir.

Spinel tip Ni-Cd ferritlerin katyon dağılımları ve elektromanyetik özellikleri M. A. Hakim ve arkadaşları (2013) tarafından incelenmiştir. $Ni_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ($x=0,0-0,8$, 0,1 değer aralıklarıyla) geleneksel çifte sinterleme seramik tekniği kullanılarak üretilmiştir.

Sol-jel metodu ile üretilen Cd katkılı bakır ferritlerin yapısal, elektriksel ve manyetik özellikleri P. P. Hankare ve arkadaşları (2012) tarafından incelenmiştir.

Nasser Y. Mostafa ve arkadaşları (2013) tarafından hidrotermal metotla üretilen Mn katkılı Cd ferritlerin yapısal ve manyetik özellikleri araştırılmıştır. $Mn_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ formülünde x 0,1, 0,2 ve 0,3 değerlerini almıştır.

Nikel-kadmiyum ferritlerin yapısal, Mössbauer ve elektriksel özellikleri M. M. Karanjkar ve arkadaşları (2012) tarafından araştırılmıştır. $Cd_xNi_{1-x}Fe_2O_4$ genel formülü ile ferritler seramik metotla üretilmişlerdir ve 0'dan 1'e kadar 0,2 artış sergilemişlerdir.

Kadmiyum katkılı magnezyum ferrit nano parçacıkların karşılaştırmalı analizi Manpreet Kaur ve arkadaşları (2012) tarafından yapılmıştır. $Mg_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ($x= 0,0, 0,2, 0,4$ ve $0,6$) genel formülüne sahip ferritler metal nitrat yanma metodu ile üretilmiştir.

Ashok B. Gadkari ve arkadaşları (2013) nadir toprak iyonu Y^{3+} ilavesi ile nanokristal Mg-Cd ferritleri oksalat çökelme metodu ile üretmişlerdir. $Mg_{1-x}Cd_xFe_2O_4 + 5\% Sm^{3+}$ ferritlerin manyetik ve dc elektriksel özellikleri incelenmiştir.

K. N. Harish ve arkadaşları (2012) güneş ışığı altında, Cd-Zn ferritlerin sentezi ile optik ve fotokatalitik çalışmalarını gerçekleştirmiştir. $Cd_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ ($x = 0,0, 0,3, 0,7, 1,0$) genel formülü ile yumuşak kimyasal sentez metodu ile üretilmiştir.

Cu-Cd ferrit nanoparçacıkların yapısal, dielektrik ve manyetik özelliklerine Ni^{2+} katkısının etkisi Mohd. Hashim ve arkadaşları (2013) tarafından araştırılmıştır. Bahsi geçen ferritler, sitrat- nitrat sol-jel oto yanma metodu ile üretilmiştir.

M. El-Hagary ve arkadaşları (2013) Cd katkısının bakır ferrit ince filmlerin mikroyapı ve optik özellikleri üzerine etkilerini araştırmıştır. $Cu_{1-x}Cd_xFe_2O_4$ ferrit ince filmler elektron ışını buharlaştırma tekniği ile ve $x= 0, 0,2, 0,3, 0,5, 0,7, 0,8, 0,9, 1$ değerleri verilerek üretilmiştir.

$Co_{0,6}Zn_{0,4}Cu_{0,2}Cd_xFe_{1,8-x}O_4$ ($0,2 \leq x \leq 0,8$) ferritler Santosh Bhukal ve arkadaşları (2014) tarafından sol jel oto yanma metodu ile üretilmiştir. Elde edilen nano boyutlu parçacıkların sentezi karakterizasyonu ve metil turuncu bozunumunun foto katalitik etkisi araştırılmıştır.

Co-Zn ferritlere katkılanan Cd^{2+} iyonlarının yapısal, elektriksel, optik ve manyetik özelliklerine etkisi Santosh Bhukal ve arkadaşları (2014) tarafından incelenmiştir. Numuneler sol jel oto yanma metodu ile üretilmiştir.

Sprey kaplamalı Cd-ZnO ince filmlerin gaz sensörü olarak performansı N. L. Tarwal ve arkadaşları (2014) tarafından incelenmiştir. Üretilen filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri incelenmiştir.

M-tipi baryum hegzaferritlerin yapısal, elektriksel ve manyetik özelliklerine Cd katkısının incelenmesi Muhammad F. Din ve arkadaşları (2014) tarafından incelenmiştir. İncelenen nano-malzemeler çökelme metodu ile üretilmiştir.

Çeşitli organik sıvılarla indüklenmiş ve farklı çözelti yanma tekniği ile üretilmiş, süpermanyetizma eşliğindeki kadmiyum ferritin özellikleri Harpreet Kaur ve arkadaşları (2014) tarafından incelenmiştir.

Co^{3+} katkılı $\text{Cd}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferritin karakterizasyon ve spektral özellikleri M. A. Amer ve arkadaşları (2014) tarafından araştırılmıştır. Ferrit yüksek sıcaklık katı hal reaksiyon metodu ile üretilmiştir.

Sol—jel oto yanma metodu ile üretilen cd ferritlerin fiziko kimyasal özelliklerine Mg katkısının etkileri Munish Gupta ve arkadaşları (2015) tarafından incelenmiştir. $\text{CdMg}_{1.5-x}\text{Fe}_{2,x}\text{O}_4$ formülüne sahip olan ferritler ile ilgili çalışma yapılmıştır.

Cd-Co ferritlerin yapısal, termal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi Ch. Venkata Reddy ve arkadaşları (2015) tarafından yapılmıştır. $\text{Cd}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ formüllü nanoparçacık kimyasal çökelme metodu ile üretilmiştir.

$\text{Cd}_{0.3}\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit nanoparçacıklara kalsinasyon sıcaklığının etkisi, yapısal termal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi Ch. Venkata Reddy ve arkadaşları tarafından (2015) yapılmıştır. Ferritler 300 ve 600 C’lerde ayrı ayrı kimyasal metodla üretilmiştir.

$\text{Cd}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferritlerin yapısal, morfolojik ve manyetik özelliklerine sıcaklığın etkisi S. V. Prabhakar Vattikuti ve arkadaşları (2015) tarafından yapılmıştır. 300 ve 600 derecelerde kalsinasyona uğrayan ferritler kimyasal sentez metoduyla üretilmiştir.

Tek fazlı Cd ferritin optik ve manyetik özelliklerinin incelenmesi Mahmoud Naseri (2015) tarafından yapılmıştır. Cd ferrit basit sıcaklık uygulaması ile üretilmiştir.

İki ve üç değerlikli iyon katkılarının Cd ferritin yapısal ve manyetik özelliklerine etkisi Ghulam Mustafa ve arkadaşları (2015) tarafından incelenmiştir. $\text{Mg}_{0.5-x}\text{Cd}_x\text{Co}_{0.5}\text{Cr}_{0.04}\text{Tb}_y\text{Fe}_{1.96-y}\text{O}_4$ genel formüllü ferrit sol-jel metodu ile üretilmiştir ve x 0,1 artış miktarı ile 0 ve 0,5 arasında değerler alırken, y, 0 ile 0,1 arasında 0,02 artış miktarına sahiptir.

Mn-Zn-Cd nano ferritlerin, yapısal, elektriksel ve manyetik özelliklerinin geliştirilmesi üzerine Shyam Singh Thakur ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışma yayımlanmıştır. $\text{Mn}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ genel formülü ve çökelme metodu ile üretilmiştir.

M. Saravanan ve T. C. Sabari Girisun (2015) kadmiyum ferritlerin nonliner optik absorpsiyon ve optik limit özelliklerini incelemişleridir. Yanma metodu ile üretilmişlerdir.

Munish Gupta ve arkadaşları (2015) Pechini sol-jel metodu ile ürettikleri Zn katkılı Cd ferritlerin fiziko-kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülüne sahip seri 0,1 aralıklarla 0'dan 0,6'ya kadar değerler almaktadır.

Mg katkılı Cd ferrit R. Zahir ve arkadaşları (2016) tarafından çifte sinterleme tekniği ile üretilmiştir. Bu çalışmada $\text{Mg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0,1 \leq x \leq 0,6$) ferritin yapısal manyetik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Cd ferritelerin sol-jel metodu ile üretilip fiziko-kimyasal özelliklerinin incelenmesi Munish Gupta ve arkadaşları (2016) tarafından yapılmıştır.

+3 değerlikli Co katkılı Cd-Mn ferritlerin manyetik ve yapısal özellikleri M. A. Amer ve arkadaşları (2016) tarafından yapılmıştır. $Cd_{0,4}Mn_{0,6}Co_xFe_{2-x}O_4$ genel formülü ile ferritler, $0 \leq x \leq 1$ aralığında, katı hal reaksiyon metodu ile üretilmiştir.

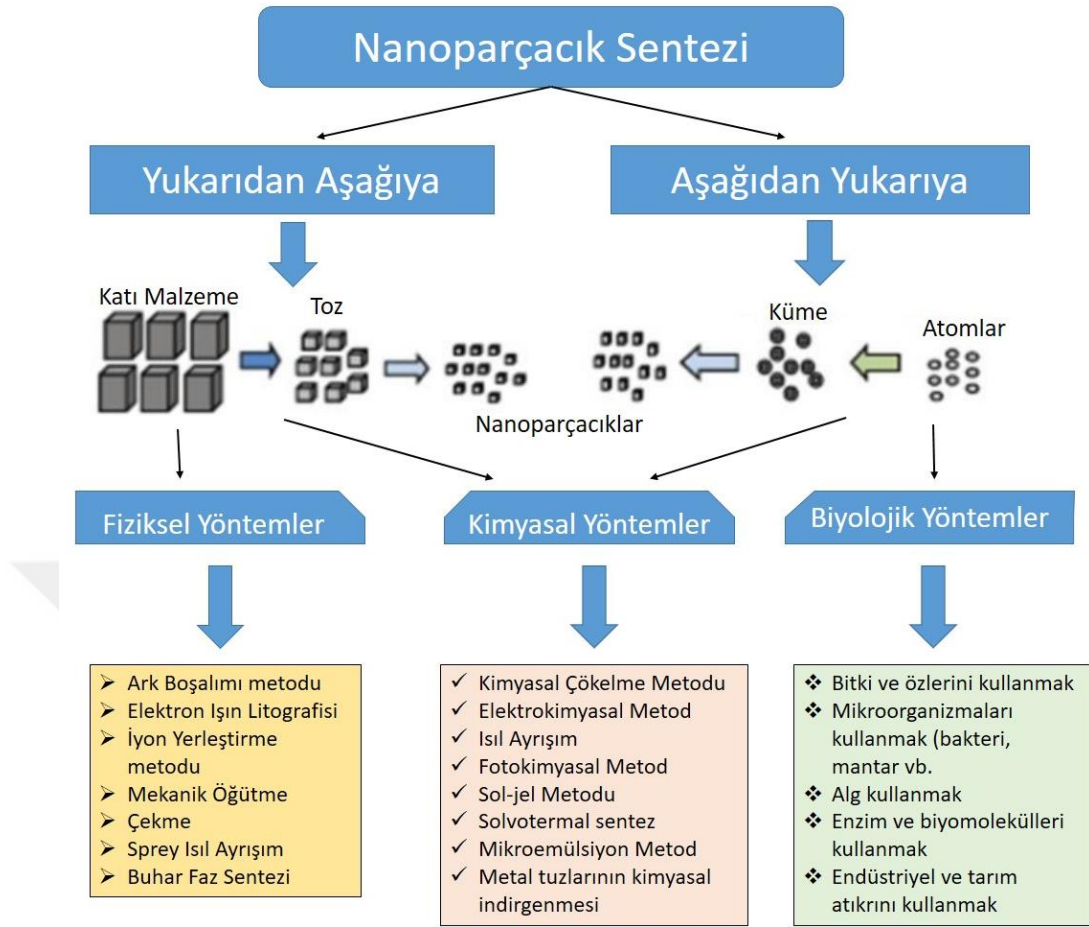
Rabia Ahmad ve arkadaşları (2016) Co katkılı Cd ferritlerin mikrodalga uygulamalar için elektriksel özelliklerini artırma çalışması yapmışlardır. Islak kimyasal çökeltme metodu ile ve $Cd_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ genel formülü ile ($x= 0, 0,2, 0,35, 0,5$) üretilen ferritlerin yapısal, morfolojik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

Kobalt katkılı Stronsiyum-kadmiyum W tipi hegzaferrit parçacıkları A. K. Nikumbh tarafından sentezlenmiş ve özellikleri incelenmiştir. Tartaret öncü metodu ile üretilmiş ferritlerin yapısal, elektriksel ve manyetik özellikleri incelenmiştir.

Krom katkısının Co-Cd ferritlerin yapısal, manyetik ve elektriksel özelliklerine etkisi Sheenu Jauhar ve arkadaşları (2013) tarafından incelenmiştir. $CoCd_{0,4}Cr_xFe_{1,6-x}O_4$ formülü ile ferritler sol-jel oto yanma metodu ile üretilmiştir.

2.2. Ferritlerin Üretim Yöntemleri

Nanoboyuttaki yapıların üretimi için “Yukarıdan aşağıya” ve “aşağıdan yukarıya” olarak adlandırılan iki farklı yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar ilk kez Foresight Enstitüsü tarafından 1989 yılında nanoteknoloji alanında kullanılmaya başlanmıştır. Yukarıdan aşağıya yaklaşımda malzemenin bir dış etki (kimyasal ve/veya mekanik) ile küçük parçalara ayrılması sağlanır. Bu yaklaşımın uygulandığı yöntemler; kesme, öğütme, fotolitografi olarak sıralanabilir. Aşağıdan yukarıya yaklaşımında ise atomik ya da moleküler boyutlardaki yapılar bir araya getirilerek nanoboyutlu yapı oluşur. Sol-jel, kimyasal buhar biriktirme, gaz fazdan yoğunlaştırma gibi yöntemler bu tip yaklaşıma örnek olarak verilebilir (Demirci, 2012; Cebeci, 2016). Bu iki yaklaşımın şematik gösterimi şekildeki gibidir:



Şekil 2.7. Nanoparçacık üretim yöntemlerinin şematik gösterimi.

Ferrit tabanlı malzemeler günümüzde pek çok teknolojide kullanılmaktadır bu nedenle de bu malzemelerin hazırlanabilmesi amacıyla pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında; çökelme metodu, sol-jel metodu, oto yanma tekniği, hidrotermal metod, standart seramik teknik sayılabilir (Dahage ve ark. 2003). Sol-jel metodu, oto yanma tekniği, hidrotermal metod, standart seramik teknik zaman alıcı, stabil olmayan alkoksitlerin ilavesine ihtiyaç duyulan ve reaksiyon koşullarının sağlanmasında zorlanılan yöntemler olduğu için tercih edilebilirlikte daha sonraki sıralarda gelirler (Dahage ve ark. 2003).

Geleneksel katı hal ya da seramik metodun, pahalı olması, yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyması, büyük grain formlarında parçacıklar ortaya çıkması gibi pek çok dezavantajı sayılabilir. Bu yüzden çeşitli kimyasal metotlar geliştirilmiştir.

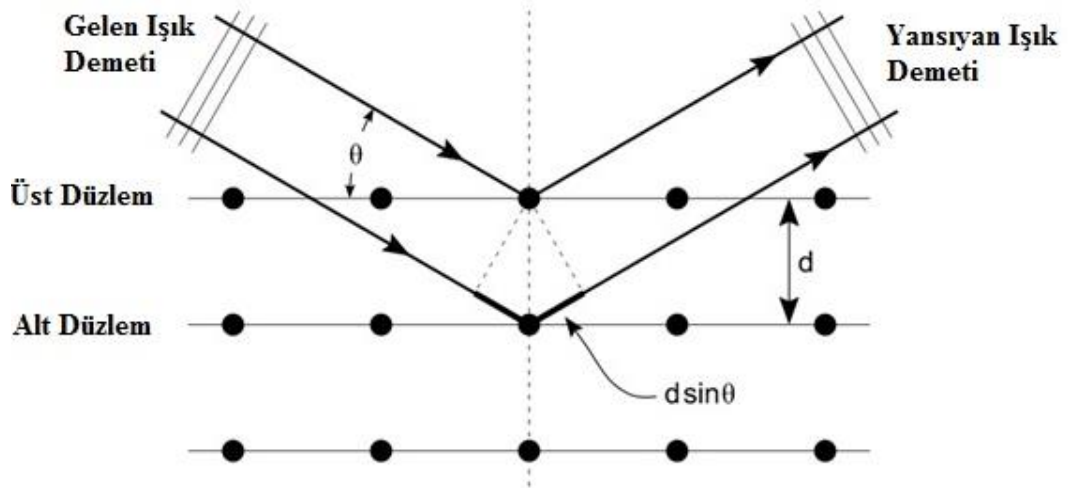
Tüm bunların içinde çökelme metodu kolay, uygun maliyetli, üretim için fazla malzeme gerektirmeyen ve en önemlisi nanoparçacık boyutta numune sentezlenebilmesi açısından başarılı bir yöntem olduğu için tercih edilebilirlikte ön sıralardadır (Dahage ve ark. 2003; Kan ve ark. 2002; Dahage ve ark. 2000; Jaydevan ve ark. 2000) . Ayrıca çökelme metodunda düşük sinterleme sıcaklığına ihtiyaç duyulması, diğer yöntemlere kıyasla parçacık boyutu kontrolü de sağlamaktadır.

2.3. Karakterizasyon Yöntemleri

2.3.1. X-Işını Difraksiyonu (XRD)

X-ışını kristalografisi bir kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan ve kristalleşmiş atomların bir X-ışını demetindeki ışınların kristale özel çeşitli yönlerde kırınımı olayına dayanan, bir yöntemdir. Bu yöntemle, kristal doğrultularını belirleme, kristalin mükemmelliği veya fazın saflığını belirleme, kristalin yapısını belirleme, kristalin örgü sabitlerini belirleme, kristal yapıdaki düzensizlikleri ve atomların kristal yapıdaki ortalama konumları tespit edilebilir (Çavdar, 2009; İnternet kaynağı-1).

Atomlar X-ışını dalgalarının birincil (primer) elektronları vasıtasıyla saçılmasına neden olur. Bir elektrona çarpan X-ışını dalgası elektrondan uzaklaşan ikincil (sekonder) küresel dalgalar oluşturur. Bu olay esnek saçılma olarak adlandırılır ve elektron saçılıcı olarak bilinir. Düzenli olarak yerleştirilmiş saçılııcılar düzenli küresel dalgalar oluşturur. Bu dalgalar yıkıcı girişimden dolayı çoğu yönlerde birbirini yok etseler de belli birkaç yönde birbirinin üstüne binerek yapıcı girişim oluştururlar ki, bu da Bragg saçılma kanunuyla bulunur:



Şekil 2.8. Bragg Kırınımı.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

Burada d kırınım yüzeyleri arasındaki mesafe, θ geliş açısı, n bir tam sayı ve λ demetin dalga boyudur. Şekil 2.8.'e göre, bir ışın demetinin düzlemlerden birisi ile θ açısı yapacak biçimde hem üstteki hem de alttaki atomların düzleminde yansımaktadır. Fakat geometrik çizim gösteriyor ki alt yüzeyden yansıyan demet üst yüzeyden yansıyandan daha fazla yol kat etmektedir. İki demet arasındaki etkin yol farkı $2d \sin \theta$ olmaktadır. Bu yol farkı, λ dalga boyunun tam katına eşit olduğundan, iki demet birbirini kuvvetlendirir (yapıcı girişim). Aynı şey, paralel düzlemlerin tamamından olan yansımalar için geçerlidir (Kittel, 1996). Buna göre yapıcı girişim koşulu (yansıyan dalgada maksimumumlar) Denklem 2.1 ile verilir. X-ışınları ile düzlemler arası uzaklık (d), dalga boyu (λ) ve θ açısı bilindiği sürece doğru olarak hesaplanabilmektedir (Serway, 1996).

2.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Çok küçük cisimlerin büyük görüntülerini oluşturmak için elektron mikroskopları kullanılır. Yüksek ayırma gücüne sahip bir teknik olan taramalı elektron mikroskobu katı yüzeyinin incelenmesi için geliştirilmiştir (Dönük, 2012). Taramalı elektron mikroskobu veya SEM (scanning electron microscope), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu

türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyi hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti raster tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturulur(İnternet kaynağı-2).

Mikroskopta yapılacak incelemelerde numuneler genellikle inorganik ve organik olarak iki grupta toplanabilir. Ayrıca inorganik numuneler de metal ve metal-olmayanlar şeklinde iki gruba ayrılabilir. Metal numuneler iletken oldukları için yüzeyleri kaplama yapılmadan incelenebilir. Ancak metal olmayan yalıtkan numunelerin yüzeyleri en fazla 20 nm mertebesinde iletkenliği sağlayan altın veya paladyum ile kaplanması gerekmektedir (İnternet kaynağı-3).

Taramalı elektron mikroskopunun çalışma prensibinde, vakum ortamında elektron tabancası ile elektron üretilerek cisme doğru gönderilir. Anottan geçen elektronlar manyetik mercekler sayesinde odaklanırlar. Örnek ile etkileşen elektron demeti farklı açılarda saçılarak dedektör (algılayıcı) tarafından toplanır ve toplanan verilerin mikroskobun yazılımınca analizi neticesinde görüntüleri elde edilir (İnternet kaynağı-4).

2.3.3. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (FT-IR)

FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) spektrofotometresi ile organik veya inorganik yapıdaki katı, sıvı veya gaz numunelerden, kızılötesi (infrared) spektrumu elde edilen bir tekniktir. FT-IR spektrometre cihazları ile aynı anda geniş bir spektrum aralığında spektral veriler almak mümkündür. H ve C gibi hafif elementleri içeren inorganik maddelerin (minerallerin) çalışılmasında, mineral yapı içerisindeki uçucu bileşenlerin konsantrasyonlarının belirlenmesinde, doğal ve sentetik mineraller arasındaki izotopik değişimlerin belirlenmesinde kullanılmaktadır (İnternet kaynağı-5).

Fourier Transform infrared cihazlarında monokromatör kullanılmaz ve ışık kaynağından gelen tüm frekansların örnek ile aynı anda etkileşmesi sağlanır ve tüm

frekansları kapsayan bu bilgilerin zamanla değişimi izlenir. Bu tür cihazlarda Michelson interferometresi adı verilen bir düzenek kullanılır (Yıldız ve Genç, 1993). FT-IR spektroskopisinin IR spektroskopisine pek çok üstünlükleri vardır. Her dalga boyunu tek tek taramak gerekmediği için spektrum birkaç saniyede kaydedilir. Yarık veya prizma kullanılmadığı için duyarlılık değişmeden yüksek ayırmalı bir spektrum elde edilir (Erdik, 1998).

2.3.4. UV-Vis Spektroskopisi

Organik maddeler için spektroskopik analiz, absorplanan ışımının frekansının ve şiddetinin ölçülmesiyle gerçekleşmektedir. Absorpsiyon spektrumlarının elde edilmesi için kullanılan cihazlara spektrofotometre ya da spektrometre denir. Elektromanyetik ışıma tabi tutulan bir molekül, ışımının enerjisi molekülün elektronik enerji seviyesine eşit olduğu zaman, bu ışıma molekül tarafından absorblanarak elektronlar bir üst elektronik enerji seviyesine çıkar. Bu nedenle UV spektroskopisine molekül orbitalleri arasında elektron geçişlerini inceleyen spektroskopi dalıda denilmektedir (Skoog ve ark. 1998).

Molekülün elektronik, titreşim ve dönme durumlarında meydana gelen değişiklik nedeniyle ortaya çıkan moleküler spektrumlara elektronik spektrumlar denir. UV spektrumu, moleküldeki pek çok elektronik geçişe karşılık gelen ve çoğu kez biri diğerinin bir bölümüyle veya tümüyle altında kalmış soğurma bantlarından oluşur.

2.3.5. Titreşen Örnek Magnetometresi (VSM)

Titreşimli Örnek Magnetometresi (Vibrating Sample Magnetometer), düzgün magnetik alan içinde titreşen örneğin bulunduğu ve bulk manyetizasyon ilmeğinin ölçüldüğü bir cihazdır. VSM'in çalışma prensibi elektromanyetik indüksiyon olayına dayanır. Bir örnek manyetik alanda titreşim yapar ve örneğin titreşim manyetik alanı Faraday İndüksiyon yasasına göre algılayıcı bir voltaj indükler. Faraday Yasasında emk, bobin içindeki manyetik akının zamanla değişim hızıyla orantılıdır (Jiles, 1991; Serway, 1996):

$$E = - d\Phi / dt \quad (2.2)$$

Burada E, elektromotor kuvveti (emk) ve ϕ örnek ile bobini ilişkilendiren manyetik akıdır. Boyutları ve doyum manyetizasyonu bilinen bir standart numune kullanılarak sistem tam manyetizasyon değerlerini verecek şekilde kalibre edilebilir. VSM kalibrasyondan sonra, ölçülen örnek için gerçek manyetik moment değerinin, uygulanan manyetik alana karşı değerini vermeye hazır duruma gelmiştir. Numune, tutucuya yatay ve düşey olarak yerleştirilip ölçüm alınabilir. Ayrıca farklı açılarda da tutucunun döndürülmesiyle manyetik analiz yapılabilir. İstenen değerler arasında, istenen aralıklarla uygulanan manyetik alana karşı ölçülen manyetik moment değeriyle numunenin histerisis eğrisi elde edilir (Demirbaş, 2008).

Titreşimli Örnek Magnetometresi (VSM) ile incelenen malzemenin manyetik karakterini ortaya koyan manyetizasyon eğrisi deneysel olarak elde edilmektedir. VSM sistemi, güç kaynağı, kontrol panelleri gibi elektronik kısımlar ile örnek titreştirici, elektro mıknatıs ve bunlara bağlanmış bir bilgisayardan oluşur. Ayrıca elektro mıknatısa bağlı bir soğutma sistemi kullanılmaktadır.

2.4. Dielektrik Malzemeler

Seramik ve polimer malzemelerin bazıları yalıtkan ve/veya kapasitör olarak kullanılabilir. Çoğu seramikler, cam, porselen, steatit ve mikanın dielektrik sabiti 6 ile 10 arasında değişir (Tablo 2.1.). Bu malzemeler yüksek bir boyut kararlılığı ve mekanik dayanıma sahiptir. Yüksek gerilim hatlarında, yalıtkan, elektrik anahtar tabanları ve ampül duyları tipik uygulamaları arasındadır. Titanya (TiO_2) ve titanyum seramikleri örneğin baryum titanatın ($BaTiO_3$) dielektrik sabiti oldukça yüksektir. Bu nedenle, bu seramik malzemeler bazı kapasitör uygulamaları için özellikle önemlidir. Seramikler daha büyük dipol momentine sahip oldukları için, seramik malzemelerin dielektrik sabiti değerleri çoğu polimerlerinkinden yüksektir. Polimerler için ϵ_r değerleri genellikle 2 ile 5 arasında olup bu malzemeler yaygın olarak ilave bazı kapasitörlerin yanı sıra tellerin, kabloların, motorların, jeneratörlerin vb. yalıtımında kullanılır (Callister ve Retwisch 2013).

Tablo 2.1. Farklı seramik ve polimer malzemelerin, 60 Hz ve 100 MHz'deki dielektrik sabiti değerleri (Callister ve Retwisch 2013).

Malzeme	Dielektrik Sabiti	
	60 Hz	1 MHz
Seramikler		
Mika	-	5,4-8,7
Steatit (MgO -SiO ₂)	-	5,5-7,5
Porselen	6,0	6,0
Ergitilmiş Silika	4,0	3,8
Polimerler		
Fenol formaldehit	5,3	4,8
Naylon 6,6	4,0	3,6
Polisitren	2,6	2,6
Polietilen	2,3	2,3
Politetrafloretillen	2,1	2,1

2.4.1. Dielektrik davranış

Metalik olmayan ve elektriksel olarak yalıtkan davranan malzemelere dielektrik malzeme denir. Bu malzemelere elektrik alan uygulanması durumunda, elektrik dipol yapısını kazanırlar. Molekül ve atomsal seviyede negatif veya pozitif olarak yüklenen nesneler elektrik dipolle birbirinden ayrılır. Dipolun elektrik alan ile etkileşime girmesi sonucunda ilave yükün kazanılması, dielektrik malzemelerin kapasitörlerde kullanılmasına imkân sağlamıştır (Callister ve Retwisch, 2013).

Kapasitans

Kapasitörün üzerine bir voltaj uygulandığında, pozitif kutuptan negatif kutba oluşan elektrik alanın etkisiyle levhanın (plaka) birisi pozitif, diğeri negatif olarak yüklenir. Bu kapasitans C , her bir levha üzerinde depolanan Q yükü ile;

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

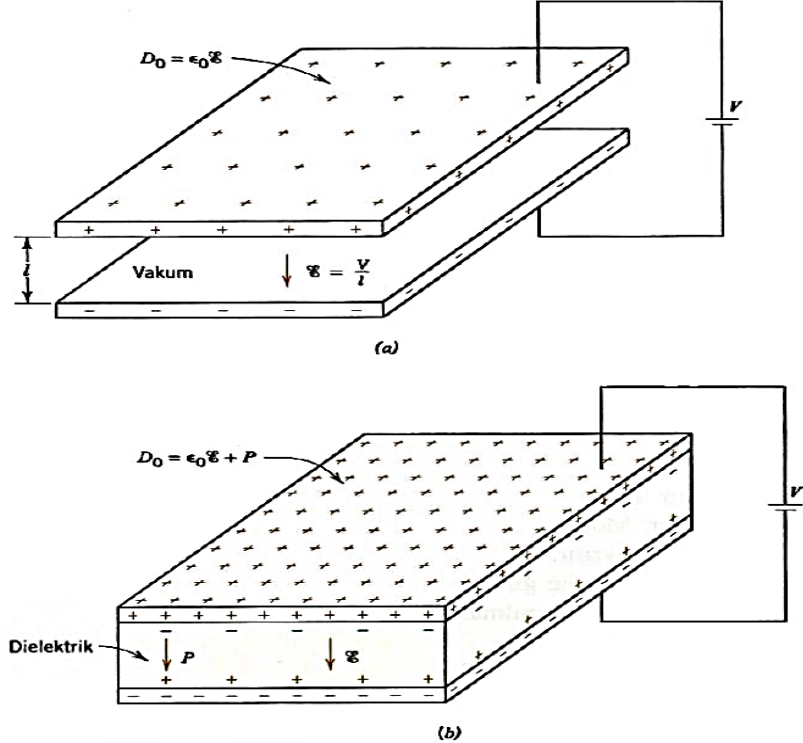
şeklinde ilişkilidir. Burada V kapasitörün üzerine uygulanan voltajdır. Kapasitansın birimi, volt başına coulombs veya farad (F)'dir.

Levhaları arasında vakum bulunan paralel bir kapasitör ele alalım (Şekil 2.9.a). Burada kapasitans değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

A levha alanını ve d levhalar arası mesafeyi gösterir. ϵ_0 parametresi vakuma ait geçirgenlik olarak adlandırılan evrensel bir sabit olup $8,85 \times 10^{-12}$ F/m değerine sahiptir. Levhalar arasına bir dielektrik malzeme konulması durumunda (Şekil 2.9.b), kapasitansa ait denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.5)$$



Şekil 2.9. Paralel levhalı bir kapasitör, levhalar arasında (a) vakumun bulunması (b) dielektrik malzemenin bulunması durumu (Callister 2013).

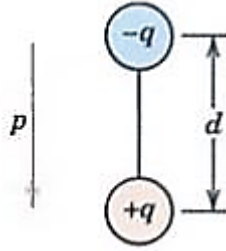
Burada ϵ dielektrik ortamın geçirgenliği olup, ϵ_0 değerinden büyüktür. Bağlı geçirgenlik ϵ_r genellikle dielektrik sabit olarak adlandırılır.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.6)$$

oranına eşit ve 1'den büyüktür. Bu ilişkiye göre, levhalar arasına dielektrik malzemenin yerleştirilmesiyle yük depolama kapasitesindeki artışı gösterir. Dielektrik sabit bir malzeme özelliği olup, kapasitör tasarımında birinci önceliğe sahiptir. Bazı dielektrik malzemelerin ϵ_r değerleri Tablo 2.1.'de verilmiştir (Callister ve Retwisch 2013).

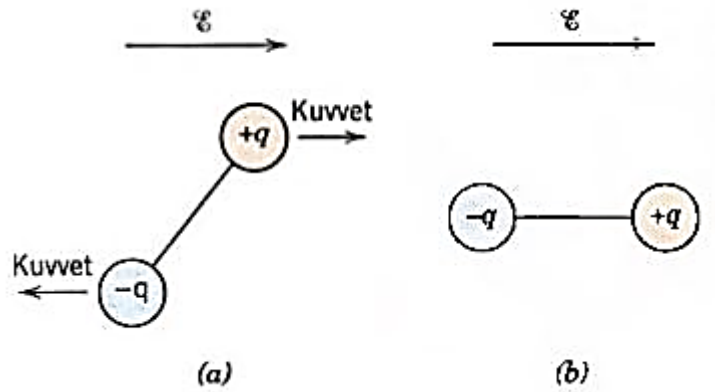
2.4.2. Alan vektörleri ve polarizasyon

Kapasitans olayını en iyi açıklayan belki de alan vektörü yardımıyla yapılan yaklaşımdır. Başlangıçta, Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi, her bir elektrik dipolünün pozitif ve negatif elektrik yükleri arasında bir mesafe mevcuttur. Bir elektrik dipol momentini p her bir dipol ile $p = qd$ ifadesiyle ilişkilidir:



Şekil 2.10. Aralarında d mesafesi bulunan iki elektrik yükü (q büyüklüğünde) tarafından üretilen bir elektrik dipolünün şematik gösterimi (Callister ve Retwisch 2013).

Burada q her dipole ait yük, d dipoller arasındaki mesafedir. Gerçekte, bir dipol momentini vektörel büyüklük olup Şekil 1'de gösterildiği gibi, negatiften pozitif doğruydu. Vektörel büyüklük olan elektrik alanın $\vec{E}$ etkimesi sonucunda oluşan bir kuvvet (dolayısıyla bir moment) elektrik dipolünü, Şekil 2.11.'de gösterildiği gibi, uygulanan alan doğrultusunda yönlendirir. Bu şekilde dipollerin düzenlenmesi olayına polarizasyon denir.



Şekil 2.11. (a) Elektrik alan tarafından bir dipole etkiyen kuvvetler (dolayısıyla moment oluşumu). (b) Uygulanan alan sonucu oluşan nihai dipol düzeni (Callister ve Retwisch 2013).

Yüzeydeki yük yoğunluğu D veya kapasitör levhası birim alanı başına yük yoğunluğu (C/m^2) elektrik alan ile orantılıdır. Vakum bulunması durumunda,

$$D_0 = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.7)$$

ϵ_0 orantı sabitidir. Dielektrik malzeme bulunması durumunda aşağıdaki benzer bir ilişki kullanılabilir.

$$D = \epsilon \vec{E} \quad (2.8)$$

Bazen D dielektrik ötelenme olarak da isimlendirilir.

Bir dielektrik malzemenin bulunması durumunda, kapasitörün levhaları yüzeyindeki yük yoğunluğu ile gösterilebilir.

$$D = \epsilon_0 \vec{E} + P \quad (2.9)$$

Burada Polarizasyon veya dielektrik malzemedan kaynaklanan vakum durumu için yük yoğunluğundaki artıştır. P 'nin birimi D ile aynıdır (C/m^2).

P polarizasyonu, aynı zamanda, dielektrik malzemenin birim hacmi başına toplam dipol momenti veya dışarıdan uygulanan elektrik alan şiddeti etkisiyle birçok atom veya molekül dipollerin birlikte düzenlenmesi sonucu dielektrik malzemedeki meydana gelen polarize olmuş elektrik alanı olarak düşünülebilir. Birçok dielektrik malzeme için P aşağıdaki ilişkiye göre $\vec{E}$ ile orantılıdır.

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)\vec{E} \quad (2.10)$$

Bu durumda ϵ_r , elektrik alanın büyüklüğünden bağımsızdır. Tablo 2.2.'de bazı dielektrik parametreler birimleriyle birlikte verilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli Elektrik Parametreleri ve Alan Vektörleri İçin Ana ve Türetilmiş Birimler (Callister ve Retwisch 2013).

Parametre	Sembol	Türetilmiş	SI Birimleri
			Ana
Elektriksel potansiyel	V	Volt	kg.m ² /s ² .C
Elektrik akımı	I	Amper	C/s
Elektrik alan şiddeti	$\vec{E}$	Volt/metre	kg.m/s ² .C
Direnç	R	Ohm	kg.m ² /s.C ²
Öz direnç	P	Ohm.metre	kg.m ³ /s.C ²
İletkenlik	Σ	(ohm.metre) ⁻¹	s.C ² /kg.m ³
Elektrik yükü	Q	Kulon	C
Kapasitans	C	Farad	s ² .C ² /kg.m ²
Geçirgenlik	ϵ	Farad/metre	s ² .C ² /kg.m ³
Dielektrik sabiti	ϵ_0	Boyutsuz	boyutsuz
Dielektrik öteleme	D	Farad.volt/m ²	C/m ²
Elektrik polarizasyon	P	Farad.volt/m ²	C/m ²

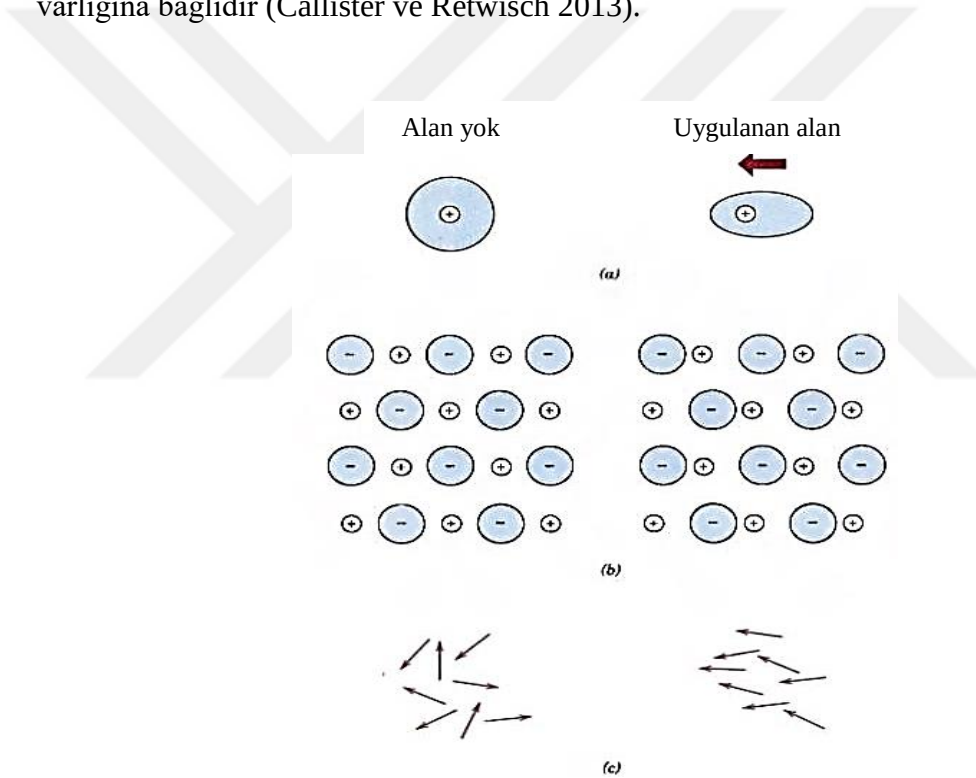
2.4.2.1. Polarizasyon türleri

Polarizasyon, dışarıdan uygulanan elektrik alan etkisiyle kalıcı veya uyarılmış atomsal veya moleküler dipol momentleridir. Elektronik, iyonik ve yönsel (polar) olmak üzere

üç tür polarizasyon vardır. Genel olarak dielektrik malzemeler, malzemeye ve dışarıdan uygulanan elektrik alanına bağlı olarak bu polarizasyon türlerinden birisini gösterir (Callister ve Retwisch 2013).

1. Elektronik polarizasyon

Elektronik polarizasyon, bütün atomlarda farklı mertebelerde meydana gelebilir ve uygulanan elektrik alan vasıtasıyla atomdaki negatif yüklü elektron bulutunun pozitif çekirdeğe göre ötelenmesi sonucu ortaya çıkar (Şekil 2.12.a.). Bütün dielektrik malzemelerde bulunan bu polarizasyon oluşumu, doğal olarak elektrik alanının varlığına bağlıdır (Callister ve Retwisch 2013).



Şekil 2.12. (a) Elektrik alan etkisindeki bir atomda, elektron bulutunun çarpılmasıyla meydana gelen elektronik polarizasyon. (b) Elektrik alan etkisinde iyonların bağıl olarak ötelenmesiyle meydana gelen polarizasyon, (c) Uygulanan etkisinde, iyonların etkisinde kalıcı dipollerin yönü (oklar) ve yönsel polarizasyon oluşumu (Wyatt ve Dew-Hughes, 1974).

2. İyonik polarizasyon

İyonik polarizasyon, sadece iyonik malzemelerde meydana gelir. Uygulanan bir elektrik alan, katyonları bir yöne, anyonları ise tersi yöne öteler ve bu şekilde net bir

dipol momenti oluşumuna neden olur. Bu olay Şekil 2.12.b.'de gösterilmiştir. Her bir iyon çifti için dipol momentinin büyüklüğü px bağlı ötelenme dt ve her iyon yükünün çarpımına eşittir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Callister ve Retwisch 2013):

$$p_i = qd_i \quad (2.11)$$

3. Yönsel polarizasyon (polar molekül)

Üçüncü tür olan yönsel polarizasyon, sadece kalıcı dipol momentine sahip maddelerde bulunur. Polarizasyon Şekil 2.12.c.'den anlaşılacağı üzere, kalıcı momentlerin uygulanan alan doğrultusunda dönmesi sonucu meydana gelir. Bu düzenlenme eğilimi atomların ısıl titreşimi tarafından önlenir. Dolayısıyla artan sıcaklıkla polarizasyonun azalması söz konudur (Callister ve Retwisch 2013).

Bir maddenin toplam polarizasyonu P sırasıyla elektronik, iyonik ve yönsel (P_e , P_i ve P_o) polarizasyonların toplamına eşittir;

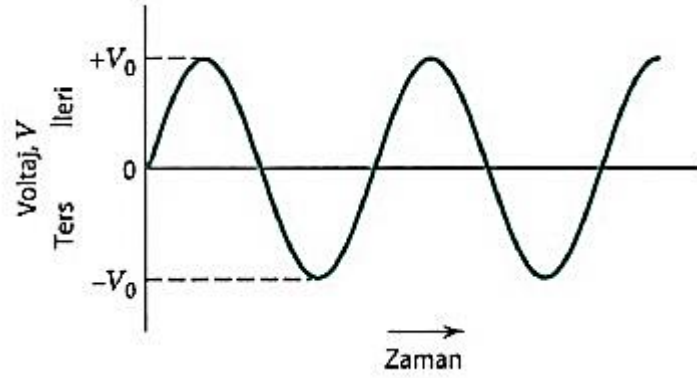
$$P = P_e + P_i + P_o \quad (2.12)$$

Toplam polarizasyon ifadesinde, bileşenlerin birbiri üzerinde herhangi bir etkisi yoktur veya ihmal edilebilir mertebededir. Örneğin; iyonik polarizasyon, kovalent bağlı malzemelerde mevcut değildir.

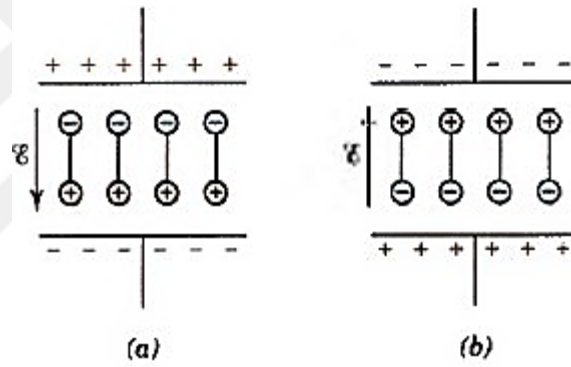
2.4.3. Dielektrik sabitinin frekansla değişimi

Çoğu pratik durumlarda akım alternatif (ac) türdedir, yani uygulanan voltaj veya elektrik alan Şekil 2.13.'de gösterildiği gibi, zaman ile yön değiştirir. Bir ac elektrik alanı ile polarize edilen bir dielektrik malzemeyi ele alalım. Her bir yön değişiminde, Şekil 2.13.'de gösterildiği gibi, dipoller uygulanan alan ile yeniden yönelme eğilimine girer. Bu yönelme belirli bir zaman alır. Her bir polarizasyon türü için, dipollerin düzenlenme kabiliyetine bağlı olarak değişen bir minimum yönelme

(yeniden) süresi vardır. Burada durulma (relaksasyon) frekansı minimum yönlenme süresinin tersi olarak alınır (Callister ve Retwisch 2013).

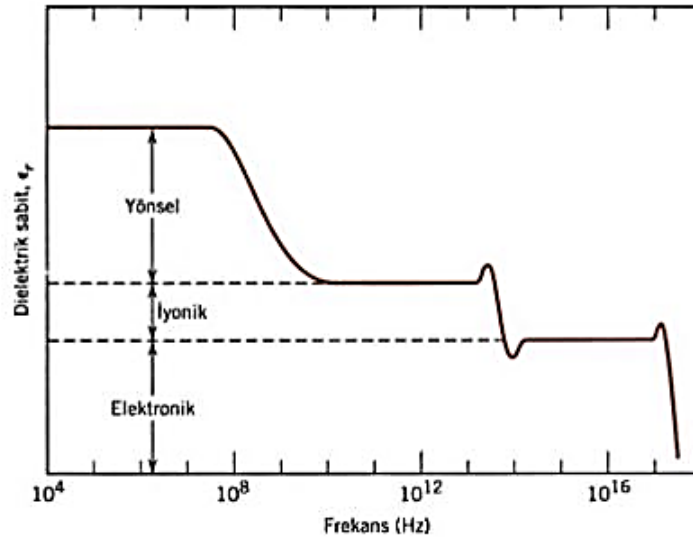


Şekil 2.13. Bir p-n doğrultma birleşimine ait voltaj-zaman ilişkisi (Callister ve Retwisch 2013).



Şekil 2.14. Dipol yönelmeleri (a) alternatif elektrik alanının oluşturduğu polarizasyon (b) ters polarizasyon (Finn ve Trojan, 1990).

Bir dipole uygulanan elektrik alanın frekansı onun gevşeme frekansını aştığında, dipol yönlenme doğrultusundaki ötelenme miktarını koruyamaz ve bu nedenle, dielektrik sabiti değerinde bir değişiklik oluşmaz. Bir dielektrik ortamda, üç tür polarizasyon için ϵ_r 'nin elektrik alan frekansına bağımlılığı Şekil 2.15.'te gösterilmiştir, frekans eksenini logaritmiktir. Şekil 2.15.'te görüldüğü gibi, polarizasyon mekanizmasının kesintiye uğraması durumunda, dielektrik sabitinde keskin bir düşüş meydana gelmektedir. Ters durumda ϵ_r neredeyse frekanstan bağımsız olmaktadır. Tablo 2.1.'de 60 Hz ve 1 MHz için dielektrik sabiti değerleri verilmiştir. Bunlar ϵ_r üzerindeki, düşük frekans değerlerinin etkisini göstermektedir.



Şekil 2.15. Bir alternatif elektrik alanının etkisinde, dielektrik sabitinin frekansla değişimi. Dielektrik sabitine elektronik, iyonik ve yönel polarizasyonun katkısı (Callister ve Retwisch 2013).

Alternatif elektrik alanı etkisindeki bir dielektrik malzemenin absorbladığı elektrik enerjisine dielektrik kayıp denir. Belirli bir malzemede ve gevşeme frekansına yakın elektrik alan frekanslarında, her bir dipol türü için bu kayıp önemli hale gelir. Uygulamada kullanılan frekans değerlerinde dielektrik kaybının düşük olması arzu edilir (Callister ve Retwisch 2013).

2.4.4. Dielektrik sonuçlarının analizi için önerilen modeller ve mekanizmalar

Dielektrik kutuplanma ve durulma mekanizmasının dielektrik alandaki davranışını mikroskobik düzeyde inceleyen bilim dielektrik bilimidir (Yüksel, 2010). Dielektrik malzemeler teorik olarak ilk kez Debye tarafından çalışılmıştır. İlerleyen zamanlarda yapılan çalışmaların Debye modeliyle tutarlılık göstermemesi sonucu yeni modellere ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır (Çavuş, 2005). Yeni modellere ihtiyaç duyulduğunun anlaşılması üzerine, bilim adamları kendi teorileri üzerinde çalışmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının yorumunu yapabilmek için bu teorik modellerle karşılaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada teorik modellerden Debye modeli, Cole-Cole modeli, Cole-Davidson modeli ve Havriliak-Negami modellerine yer verilmiştir.

2.4.4.1. Debye modeli

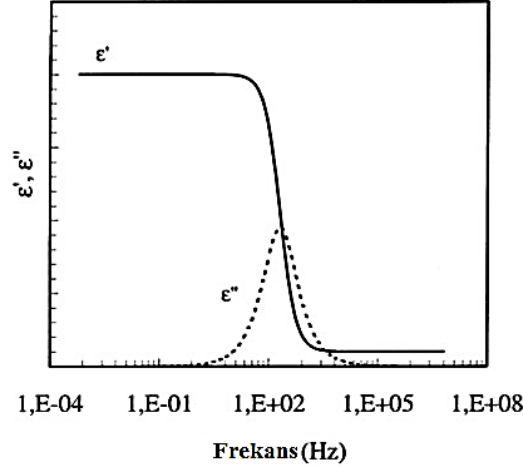
Debye modeli genellikle malzemelerin dielektrik davranışını tanımlamak için kullanılır. Deneysel sonuçların iyi bir açıklamasını yapmak için, çoğunlukla durulma zamanlarının bir dağılımı kullanılarak elde edilir.

Harici ac uygulanan alanlardaki malzemelerin dielektrik davranışı, yüksek bilimsel ve teknolojik önemi göz önüne alındığında çok sayıda makalenin odak noktası olmuştur. Ölçümler çok geniş frekans ve sıcaklık aralığında ve birçok materyal türü için yapılır. Jonscher konuyla ilgili kapsamlı bir inceleme yaptı ve dielektrik spektroskopi için çok gövdeli (many-body) bir model sundu. Bu model, dar yarı dolu bir bant oluşturan interaktif bir sistemdeki bireysel dipoller arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan maddedeki ilişkili durumlar fikrini ortaya koymaktadır. Sistemin tercih edilen yönelimleri, göreceli doluluklarının toplam kutuplaşmayı belirlediği iki potansiyel kuyuyla temsil edilebilir ve dış alanın uygulanması bu durumların iki kuyu arasında geçiş yapmasını sağlayacaktır. Araştırmacılar, üç geçiş türünü önermişlerdir. Bunlardan bir tanesi, Debye sürecinde yer alan durumdan ötürü, bir parçacıkların bir kuyudan diğerine doğru klasik termal olarak uyarılmış geçişine karşılık gelir. Bu modelin sonuçları, pek çok deneysel veriyle uyumludur, çünkü Evrensel yasaya benzer bir ifade verir. Örneğin depolarizasyon akımı $i(t)$ 'nin deneysel gözlemler sonucunda zamana (t) bağımlı olarak şu şekilde ifade edilebilir (Mantas, 1998):

$$i(t) \approx t^{-n} \quad (2.13)$$

Ayrıca, kayıp pik frekansının yanında, modelin Debye benzeri bir davranış sergilemesi de önemlidir.

Şekil 2.16. keyfi bir malzemenin kompleks (karmaşık) bağıl (relatif) geçirgenliğin (permittivite) gerçek ε' ve sanal ε'' kısımlarının frekansa göre değişimini göstermektedir.



Şekil 2.16. Dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmının Debye modeline göre frekansla değişimi.

Yüksek frekans bölgesinde, ϵ_∞ , boş alan katkısından ve malzemede çalışan mekanizmalar için tüm dielektrik duyarlılıklarının toplamından oluşur ve düşük frekans bölgelerinde ϵ_s , ϵ_∞ artı kayıp pik bölgesine karşılık gelen durulma mekanizmasından oluşur. Bu durumu ifade edebilmek için:

$$\epsilon(w)^* = \epsilon_\infty + f(w) \quad (2.14)$$

kullanılır. $w=0$ için $f(0) = \epsilon_s - \epsilon_\infty$ olur. Debye'yi takiben durağan bir alan kapatıldığında, polarizasyon, zaman sabiti τ ile üssel olarak azalmakta ve karakteristik durulma zamanı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$P(t) = P_0 e^{-t/\tau} \quad (2.15)$$

Frekans cevabı $f(w)$ elde etmek için, Laplace'ın dönüşümü kullanılır:

$$\begin{aligned} f(w) &= \int_0^\infty P(t) e^{i\omega t} dt \\ &= \frac{P_0}{-i\omega \tau} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$w = 0$ için, $f(w)$ durumunu kullanarak bilinen Debye eşitliği elde edilmiş olur.

$$\varepsilon(w)^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{-i\omega\tau + 1} \quad (2.17)$$

Gerçek ve sanal kısımların ayrılmasından sonra ise:

$$\varepsilon(w)' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.18)$$

$$\varepsilon(w)'' = \frac{\omega\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (2.19)$$

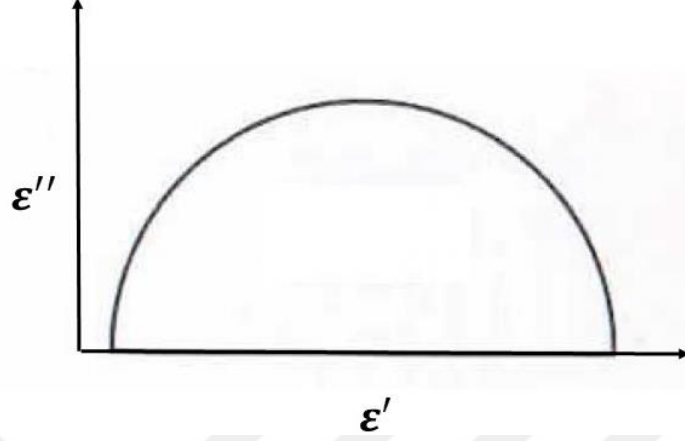
Bununla birlikte, ideal Debye modelinin malzemelerin çoğunun dielektrik tepkisini tarif etmediği ve bu modele başka yaklaşımların yapıldığı, yani dipollerin bir durulma zamanı dağılımına sahip olduğu varsayımının yapıldığı bilinmektedir (Mantas, 1998). Dielektrik kaybın maksimum değeri durulma olayının meydana geldiği frekanstır ve w_{max} olarak ifade edilir (İyibakar 2003). Sanal kısmın pik noktası için türevi durulma zamanını sayısal olarak verir.

$$\left. \frac{\partial \varepsilon''}{\partial w} \right|_{w=w_{max}} = 0 \quad (2.20)$$

$$w_{max} = \frac{1}{\tau} \quad (2.21)$$

τ durulma zamanıdır ve elektrik alanın bir periyot içinde değişim yapması sonucu dipolün yönelmesi için geçen süre olarak tanımlanır. Küçük frekanslı alanlarda kutuplanma kolaylıkla oluşur ve kayıplar ihmal edilebilir. Frekans artıp durulma bölgesine ulaşıncı kutuplanma, elektrik alana uymakta zorlanır ve kayıplar ihmal edilemez bir noktaya ulaşır. Frekans artmaya devam ettikçe kutuplanma oluşmaz, böylece dielektrik sabiti de hızla azalır. Dolayısıyla kutuplanma olmadığında dielektrik kayıp meydana gelmeyecektir. $w \gg w_{max}$ olduğunda dipoller elektrik alandan etkilenmez ve elektrik alan içinde serbest yük gibi davranarak iletkenliğe katkıda bulunurlar. Reel ve sanal kısmın frekansa bağlılığını ifade ettikten sonra sanal

ve reel kısmın aynı frekanslarda karşılaştırılması uygun olacaktır (Yüksel, 2010). Şekil 2.17.'de reel ve sanal dielektrik sabitinin birbirlerine göre davranışı gösterilmiştir:



Şekil 2.17. Debye Modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma bağlılığı (Yüksel, 2010).

Şekil 2.17.'de bir yarı daire görülmektedir. Dairenin merkezi reel eksen üzerindedir. Bu özellik Debye modelinin klasik özelliğidir.

Dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma oranı kayıp faktör olarak ifade edilir. Kayıp faktörün Debye modeli için ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon(\omega)''}{\varepsilon(\omega)'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty(\omega\tau)^2} \quad (2.22)$$

2.4.4.2. Cole Cole modeli

Cole-Cole'un ampirik denklemi (1941) dielektrik durulma özelliklerini yeterli formda tanımlayan ilk modellerden biridir (Friedrich ve Braun, 1992). Debye teorisinde ε_s ve ε_∞ değerleri arasındaki fark, dipol kutuplaşmasına atfedilir. Alternatif akım alanında polar moleküllerin yönelimi, termal sallanma ve moleküler etkileşimlerin etkilerinin zıttıdır (Cole ve Cole, 1941).

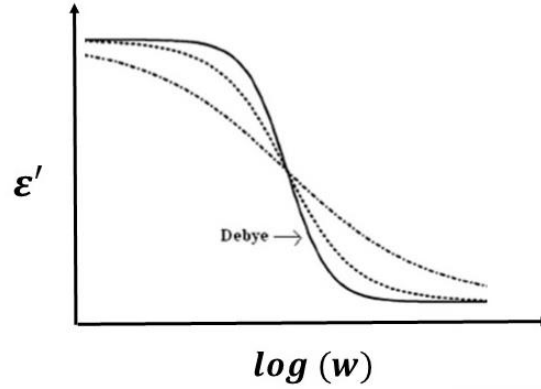
Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin karmaşık formu aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^\beta} \quad (2.23)$$

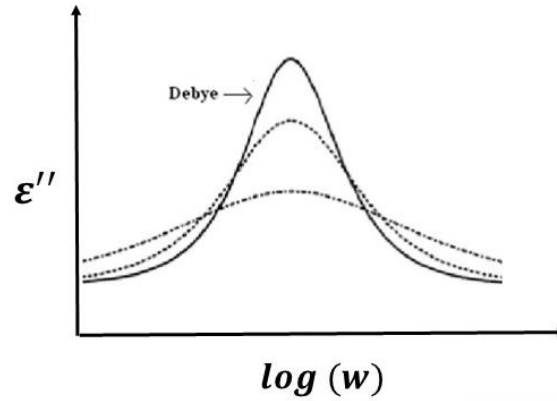
Burada Debye modelinden farklı olarak β parametresi kullanılmıştır ve durulma piklerin simetrik genişlemesini temsil eder. β değeri $0 < \beta \leq 1$ aralığında değerler alabilir. Karmaşık dielektrik sabitinden gerçekte ve sanal kısımları ayrıştırılarak aşağıdaki ifadeler bulunmuştur:

$$\varepsilon'(w) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{1 + (w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{1 + 2(w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) + (w\tau)^{2\beta}} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon''(w) = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{(w\tau)^\beta \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{1 + 2(w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) + (w\tau)^{2\beta}} \quad (2.25)$$



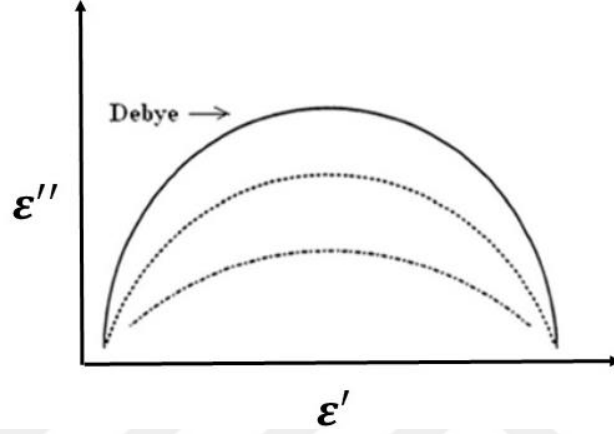
Şekil 2.18. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin reel kısmının frekansla değişimi (Yüksel, 2010).



Şekil 2. 19. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi (Yüksel, 2010).

Şekil 2.18. ve 2.19.'da Cole-Cole modele göre, dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısımlarının frekansla değişimleri gösterilmektedir.

Şekil 2.20.'de ise dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısımlarının aynı frekanslarda birbirlerine göre değişimi gösterilmiştir:



Şekil 2.20. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma bağılılığı (Yüksel, 2010).

Burada Debye eğrisinin altında kalan ve kesik çizgiler ile gösterilen eğriler Cole-Cole modelinde farklı β değerleri için çizilmiştir.

Dielektrik kayıp faktör, dielektrik sabitinin gerçekte kısmının sanal kısmına oranı olduğunu tanımlamıştık. Cole-Cole modeli için dielektrik kayıp faktör aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon(w)''}{\varepsilon(w)'} = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(w\tau)^\beta \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{\varepsilon_\infty \left(2(w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) + (w\tau)^{2\beta}\right) + \varepsilon_0 \left(1 + (w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)\right)} \quad (2.26)$$

2.4.4.3. Cole Davidson modeli

Cole-Davidson modeli, Cole-Cole modelinden sonra bu modele alternatif olarak sunulmuştur (1950) (Griffiths, 2005). Bazı malzemelerin sanal dielektrik sabitinin gerçekte kısma göre çizimi incelendiğinde bu grafiğin merkezden geçen eksene

asimetrik olduğu göze çarpmaktadır. Bu durumu temsilen Cole ve Davidson aşağıdaki denklemleri önermiştir (İyibakar, 2003; Ostroverkhova ve ark. 2005).

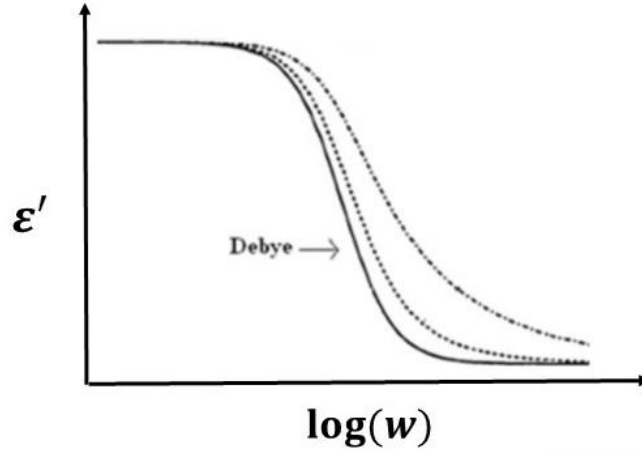
$$\varepsilon^*(w) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \frac{1}{(1+iw\tau\beta)^{\alpha}} \quad (2.27)$$

Cole-Davidson modelinde $\beta=1$ dir. α ise 1'den farklı olup $0 < \alpha < 1$ aralığında değerler almaktadır. Bu modele göre, karmaşık dielektrik sabiti ifadesinden yola çıkarak, dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısımları aşağıdaki şekilde çözümlenir.

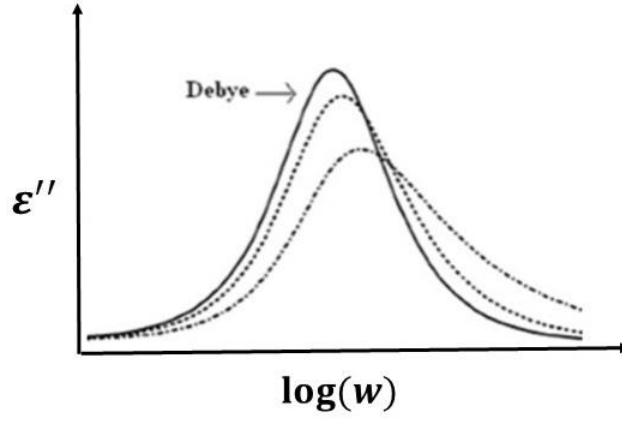
$$\varepsilon'(w) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})(\cos \Phi)^{\alpha} \cos \alpha \Phi \quad (2.28)$$

$$\varepsilon''(w) = (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})(\cos \Phi)^{\alpha} \sin \alpha \Phi \quad (2.29)$$

Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısmının frekansla değişimi sırasıyla Şekil 2.21. ve 2.22.'de gösterilmiştir.

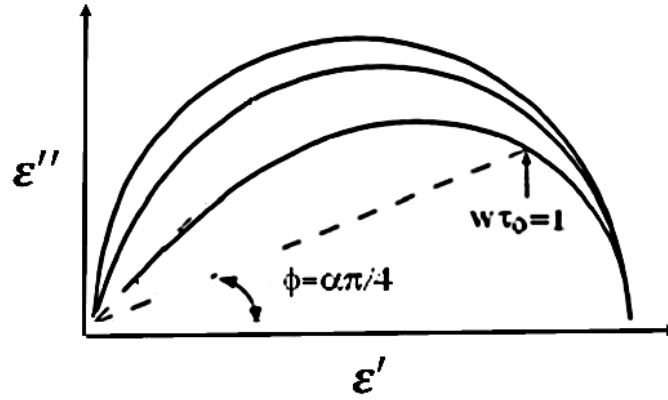


Şekil 2.21. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin reel kısmının frekansla değişimi (Yüksel, 2010).



Şekil 2.22. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi (Yüksel, 2010).

Dielektrik sabitinin gerçek kısmının sanal kısmına göre çizilmiş grafiği Şekil 2.23.'te gösterilmektedir:



Şekil 2.23. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma bağlılığı (Yüksel, 2010).

İçteki iki eğri Cole-Davidson modelini temsil etmektedir ve α 'nın farklı değerlerine göre çizilmiştir. Grafikte gösterilen τ_0 durulma zamanı, w ise maksimum frekanstır.

Cole-Davidson modeli için kayıp faktör aşağıda denklem ile ifade edilir:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(\cos \Phi)^\alpha \sin \alpha \Phi}{\varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(\cos \Phi)^\alpha \cos \alpha \Phi} \quad (2.30)$$

2.5. Elektriksel İletkenlik

Bir yapı veya bileşenin tasarımında, malzeme seçimi ve imalata ait işlem adımlarının kararlaştırılmasında malzemenin elektriksel özellikleri çoğu zaman önemli bir konu başlığını oluşturur. Örneğin, bir entegre devre paketinde kullanılan malzemelerin elektriksel davranışları farklıdır, bazılarının özellikle elektrik iletkenliğinin çok yüksek olması gerekirken (örneğin bağlantı telleri), bazılarının ise, örneğin paket koruma kapsülünde olduğu gibi, özellikle yalıtkan olması istenir (Callister ve Retwisch 2013).

Ohm Kanunu

Bir iletken katı malzemenin en önemli elektriksel özelliklerinden birisi, elektrik akımını kolaylıkla iletmesidir. Ohm kanunu, akım (I) veya yükün geçiş hızının, uygulanan voltaj (V) ile aşağıdaki şekilde ilişkilidir:

$$V = IR \quad (2.31)$$

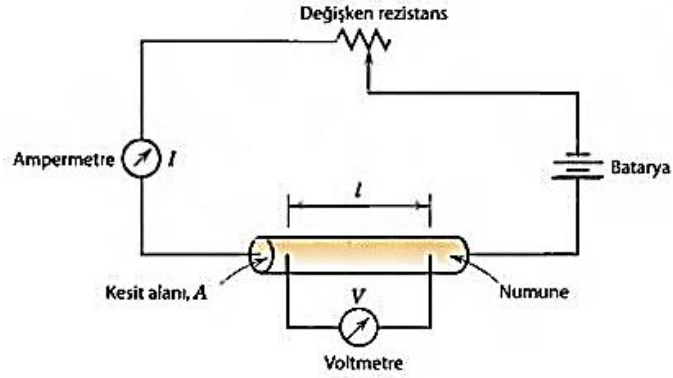
Burada R akımın geçtiği malzemenin direncidir. V , I ve R 'nin birimleri sırasıyla Volt (J/C), amper (C/s) ve ohm (V/A)'dir. R 'nin değeri numune geometrisiyle değişir ve birçok malzeme için akımdan bağımsızdır. Elektriksel öz direnç ρ ise numune geometrisinden bağımsızdır ve aşağıda ifade edildiği gibi R ile ilişkilidir (Serway, 1996):

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (2.32)$$

Burada l gerilimin (voltajın) ölçüldüğü iki nokta arasındaki mesafe, A ise akımın geçtiği yöne dik kesit alanıdır, ρ 'nun birimi ohm-metre ($\Omega.m$)'dir. Ohm kanunu ve Denklem 2.32 kullanılarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\rho = \frac{VA}{Il} \quad (2.33)$$

Şekil 2.24.'te elektriksel öz direnci ölçmede kullanılan bir düzeneğin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.24. Elektriksel öz direnci ölçmede kullanılan bir düzeneğin şematik gösterimi (Callister ve Retwisch 2013).

Elektrik İletkenliği

Bir malzemenin elektriksel özelliklerini belirtmek için, elektrik iletkenliği σ kullanılır. Bu basit olarak öz direncin tersidir;

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.34)$$

Bu, malzemenin elektrik akımını iletme kabiliyetinin bir göstergesidir, σ 'nın birimi ohm- metre'nin tersidir $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$ veya mho/m. Aşağıda elektriksel özelliklerle ilgili incelemede hem öz direnç, hem de iletkenlik kullanılmıştır.

Denklem 2.31ea ilave olarak Ohm kanunu aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$$J = \sigma \xi \quad (2.35)$$

Burada J akım yoğunluğu olup, numunenin birim alanından geçen akım değerine eşittir (I/A). ξ elektrik alan şiddetidir veya birbirinden belirli bir mesafedeki iki nokta arasındaki potansiyel (gerilim) farkıdır;

Katı malzemelerin elektrik iletkenliği birbirlerine göre 27 kat gibi, çok büyük bir aralıkta değişirken, diğer fiziksel özellikleri bu denli geniş bir aralığa sahip değildir. Malzemeleri sınıflandırmada kullanılan önemli bir özellik, elektrik akımını iletim kabiliyetidir ve bu sınıflandırmada iletkenler, yarı iletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç temel grup vardır. Metaller iyi bir iletkenlerdir, tipik olarak $10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$ mertebesinde elektrik iletkenliğine sahiptirler. Diğerleri ise 10^{-10} ile $10^{-20} (\Omega \cdot m)^{-1}$ arasında değişen çok düşük elektrik iletkenliğine sahip malzemelerdir; bunlar, elektriksel açıdan yalıtkan kabul edilir. Orta seviyede iletkenliğe sahip olanlar, genellikle 10^{-6} ile $10^4 (\Omega \cdot m)^{-1}$ arasında bir değere sahiptir ve yarı iletken olarak adlandırılır (Callister ve Retwisch 2013).

2.5.1. İletkenlik mekanizmaları

Düzensiz katılarda elektriksel iletkenlik mekanizmalarının incelenmesi malzemenin iç yapısına dair geniş bir bilgi birikimi sağlar.

2.5.2. Dc iletkenlik

Evrensel güç kanununa (Universal Power Law (UPL)) göre iletkenlik, doğru akım (Dc) ve alternatif akım (Ac) iletkenliklerinin toplamına eşittir (Bhattacharya ve Ghosh, 2003):

$$\sigma_{tot} = \sigma_{dc} + \sigma_{ac} \quad (2.36)$$

$$\sigma_{tot} = \sigma_{dc} + A\omega^s \quad (2.37)$$

Düşük sıcaklıklarda toplam iletkenliğin, sıcaklık bağımlılığı, Dc iletkenliğinkinden çok daha düşüktür. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda toplam iletkenliğin sıcaklığa bağımlılığı kuvvetlenir ve frekans bağımlılığı azalır. Yüksek sıcaklıklarda tüm frekanslardaki iletkenlik dc iletkenlik ile örtüşmektedir (Bhattacharya ve Ghosh, 2003).

Dc iletkenliğin deneysel sonuçlarını analiz edebilmek için farklı modeller önerilmiştir. Bu çalışmada bu mekanizmalardan başlıcalarına yer vereceğiz.

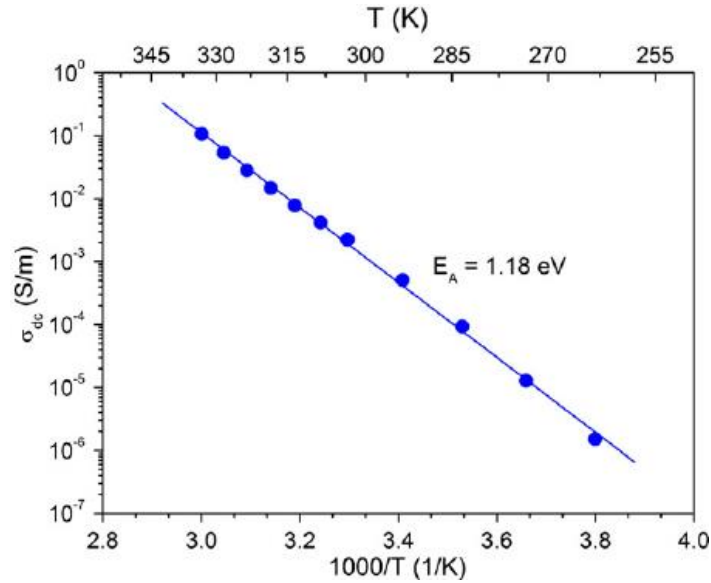
2.5.2.1. Arrhenius modeli

Oda sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda malzemelerin elektriksel iletkenliği termal olarak aktif bir süreç geçiriyorsa bu durum Arrhenius tipi iletkenlik olarak adlandırılır (Santic ve ark. 2011; Brahma ve ark. 2005) Sıcaklığa bağlı Dc iletkenlik eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_{dc} = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \quad (2.38)$$

Burada σ_0 üssel faktör, E_a aktivasyon enerjisi, k_B ise Boltzman sabitidir. E_a bir elektronun iletim sürecine katılabilmesi için aşması gereken potansiyel yüksekliği olarak görülebilir (Akbulut 2011). Aktivasyon enerjisi değerleri, dc iletkenliğin sıcaklıkla değişim grafiklerinden elde edilir (Brahma ve ark. 2005).

Şekil 2.25.'te tipik bir Arrhenius davranışı sergileyen örnek bir grafik verilmiştir.



Şekil 2.25. Arrhenius tipi dc iletkenlik örneği (Lavniczak ve ark., 2012).

2.5.2.2. Dc iletkenlik analizi için ikinci model

İkinci model Arrhenius modelinin üstünde küçük bir değişiklik yapılarak ve eşitliğe küçük bir ilave yapılarak oluşturulmuştur. Bu modelde hem polaron iletkenliği hem de iyonik iletkenlik kullanılır (Akbulut, 2011). Polaronlar, katı bir materyaldeki elektronlar ve atomlar arasındaki etkileşimleri anlamak için yoğunlaştırılmış madde fiziğinde kullanılan yalancı parçacıklardır (İnternet kaynağı-6).

$$\sigma_{dc} = \sigma_0 \left(\frac{1}{T} \right) \exp \left(\frac{-E_a}{k_B T} \right) \quad (2.39)$$

İki durumda da sıcaklığın 250 K'nin ($T \leq 250 K$) altında olduğu durumlarda, doğrusallıktan sapma ve $\log \sigma_{dc}$ 'nin karakteristik eğilimi gözlenir. $\log \sigma_{dc}$ 'nin $\frac{1}{T}$ 'ye göre karakteristik gerilimi, üssel gerilim (stretched exponential, ST) olarak adlandırılır (Brahma ve ark. 2005).

2.5.2.3. Değişken Mesafeli Hoplama Modeli (VRH)

Düşük sıcaklıklarda, iletim mekanizması yerleşmiş bölgeler arasındaki iletkenliğin değişken mesafeli hoplamasını (VRH) tanımlayan $T^{-1/4}$ yasasını kabul eder. Mott, bu hoplamanın, tercihen, en yakın komşunun ötesine geçebileceğini önermiştir. Değişken mesafeli hoplama (VRH) modeli aşağıdaki şekilde ifade edilir (Okutan ve ark. 2005):

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^\gamma \right] \quad (2.40)$$

$$\gamma = \frac{1}{4} \text{ (Paasch, 2002)} \quad (2.41)$$

σ_0 üssel fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sigma_0 = \left[\frac{N(E_f)}{2\pi\alpha k_B T} \right]^{1/2} \left(\frac{3e^4 v^2 \Phi_0}{2} \right)^{-1/2} \quad (2.42)$$

T_0 ise karakteristik sıcaklıktır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{k_B N(E_f)} \quad (2.43)$$

2.5.3. Ac iletkenlik

Ac iletkenliğin genel bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_{ac}(w) = Aw^s \quad (2.44)$$

A ve s deneysel veriler neticesinde çizilen $\ln\sigma_{ac} - \ln w$ grafiklerinden elde edilen parametrelerdir. s parametresi, 0 ile 1 arasında değerler alabilir (Akgül ve ark., 2008). s değerinin sıcaklığa karşı çizilen grafiklerinde Ac iletkenliğin hangi mekanizmaya uyduğu bulunabilir (Mohamed, 2000; Atta, 2009).

Frekansın üssü s parametresinin değeri 1 denkleminin logaritması alınarak tanımlanır (Okutan ve ark., 2005):

$$s = \frac{d \ln \sigma(w)}{d \ln w} \quad (2.45)$$

Malzemelerin elektriksel mekanizmalarını bulmak için, kuantum mekaniksel tünelleme (QMT), enerji bariyeri ile ilişkilendirilmiş hoplama (CBH), küçük polaron tünellemesi (SP) ve üst üste örtüşen büyük polaron tünellemesi (OLPT) gibi farklı teorik modeller geliştirilmiştir (Atta, 2009). Bu modelleri ayrıntılı olarak inceleyelim.

2.5.3.1. Kuantum Mekaniksel Tünelleme (QMT)

Kuantum mekaniksel modele göre s genellikle 0.8 değerine eşittir ve sıcaklıkla çok az azalır ya da sıcaklıktan bağımsızdır (Abo El Ata ve ark. 2004; Afifi ve ark., 2001). s değeri, tek bir değer haline geldiğinde tamamen sıcaklıktan bağımsız olur ve yük taşıyıcılarının transferi için QMT baskın mekanizma halini alır. Bu model ilk kez

Pollak ve Geballe (1961) tarafından ele alınmıştır. Bu mekanizma daha sonra Austin ve Mott (1969) tarafından yarıiletkenlere uygulanmıştır. Bu modelde taşıyıcıların hareketi, Fermi seviyesi yakınına yerleşmiş durumlar arasındaki kuantum mekaniksel tünelleme boyunca oluşur (El-Nahass ve ark., 2008).

QMT modeline göre w 'nin bir fonksiyonu olarak σ iletkenliğin gerçek kısmı şu şekilde ifade edilir:

$$\sigma(w) = \frac{\pi^4 e^2 k_B T}{24 \alpha} N^2(E_f) w R_w^4 \quad (2.46)$$

Burada, e elektrik yükü, k_B Boltzman sabiti, α yerleşmiş durumların dalga fonksiyonlarının bozulma parametresi, $N(E_f)$ Fermi seviyesine yakın durumların yoğunluğu ve R_w ise tünelleme mesafesidir:

$$R_w = (2\alpha)^{-1} \ln(1/w\tau_0) \quad (2.47)$$

QMT'ye göre:

$$s = 1 - 4 \ln(1/w\tau_0) \quad (2.48)$$

şeklinde verilmektedir.

2.5.3.2. Enerji Bariyeri İle İlişkilendirilmiş Hoplama (CBH)

Elliot tarafından geliştirilen enerji bariyeri ile ilişkilendirilmiş hoplama modeli, bariyerin üzerinden tünellemek yerine onları birbirinden ayıran potansiyel bariyer üzerinden alanlar arasındaki yük taşıyıcı hoptamasını tarif eder. Bu model tarafından ileri sürülen σ iletkenlik eşitliği şu şekilde ifade edilir (Altındal ve ark., 2005):

$$\sigma(w, T) = \frac{\pi^2 N^2 \varepsilon}{24} \left(\frac{8e^2}{\varepsilon W_{OB}} \right)^6 \frac{w^s}{\tau_0^B} \quad (2.49)$$

$$s = 1 - \beta = 1 - \frac{6k_B T}{W_{OB}} \quad (2.50)$$

ε dielektrik sabiti, W_{OB} optik bant aralığı, τ_0 karakteristik gevşeme zamanı, e elektrik yükü, k_B Boltzman sabiti ve N kusurlu durumların yerel yoğunluğu olarak verilir.

2.5.3.3. Küçük Polaron Tünellemesi (SP)

Küçük polaron tünellemesinde s sıcaklığa bağlıdır ve sıcaklık arttıkça değeri artar. Bu modelde iletkenlik için kuantum mekaniksel tünelleme ile aynı eşitlik kullanır. Buradaki fark tünelleme mesafesi ve s parametresinin eşitlikleridir (Gangopadhyay ve De, 2000):

$$R_w = (2\alpha)^{-1} \left[\ln \left(\frac{1}{w\tau_0} \right) - \frac{W_H}{k_B T} \right] \quad (2.51)$$

$$s = 1 - \frac{4}{\ln \left(\frac{1}{w\tau_0} \right) - \frac{W_H}{k_B T}} \quad (2.52)$$

2.5.3.4. Üst Üste Örtüşen Büyük Polaron Tünellemesi (OLPT)

Üst üste örtüşen büyük polaron tünellemesi (OLPT) modelinde, s parametresi artan sıcaklıkla azalarak bir minimum noktasına ulaşır, ardından artar. OLPT modeline ‘V’ tipi karakteristik davranış sergilemektedir denebilir. Bu modele göre iletkenlik ifadesi aşağıdaki eşitlikle verilmektedir (Şaşmaz Kuru ve ark., 2017):

$$\sigma'(\omega) = \frac{\pi^4}{12} \frac{e^2 (k_B T)^2 [N(E_F)]^2 \omega R_\omega^4}{2\alpha k_B T + W_{HO} r_p / R_\omega^4} \quad (2.53)$$

Bu modele göre, üst üste binmiş durumlar arasındaki yükün taşınması için gerekli aktivasyon enerjisi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$W_H = W_{HO} \left(1 - \frac{r_p}{R} \right) \quad (2.54)$$

Tüm durumlar için sabit olan W_{HO} eşitliği:

$$W_{HO} = e^2 / 4\epsilon_p r_p \quad (2.55)$$

ile verilir. Buna göre üst parametresinin sıcaklıkla değişimi:

$$S = 1 - \frac{8\alpha R_W + 6W_{HO}r_p / R_W kT}{(2\alpha R_W + W_{HO}r_p / R_W kT)^{2/3}} \quad (2.56)$$

şeklinde tanımlanır. Burada R_W tunelleme mesafesi, r_p polaron Radius, T mutlak sıcaklık ve α ise yerleşmiş durumlara ait dalga fonksiyonunun bozunma parametresidir. Buna göre polaronların tünelleme mesafesi ise:

$$R_W = \frac{1}{4\alpha} \left[\ln \left(\frac{1}{\omega \tau_0} \right) - \frac{W_{HO}}{kT} \right] + \frac{1}{4\alpha} \left\{ \left[\ln \left(\frac{1}{\omega \tau_0} \right) - \frac{W_{HO}}{kT} \right]^2 + \frac{8\alpha r_p W_{HO}}{kT} \right\}^{1/2} \quad (2.57)$$

2.6. Nem

Nem çevresel pek çok durumu etkileyip bozulmasına neden olan fiziksel ve kimyasal bir süreçtir. Bu özelliği sebebiyle nemden etkilenen pek çok alanda, nemi kontrol altında tutma gereksinimi duyulmaktadır. Nem sensörleri bu ihtiyaç doğrultusunda son yıllarda araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Nem sensörü ortamdaki bağıl nemi ölçmek için kullanılan bir cihazdır. RH nemi tanımlama için kullanılan en önemli parametredir ve su buharı basıncının doymuş su buharının basıncına oranı manasına gelmektedir (Zhao ve ark., 2013). Nem sensörleri günlük hayatımızda önemli rol oynar ve kullanım alanları çok geniştir. Kullanıldığı alanların başlıcaları, sağlık, meteoroloji, gıda depolama, kalite kontrol, kütüphane, müze, tarım, nükleer güç santralleri olarak sayılabilir (Zhao ve ark., 2013; Zhang ve ark., 2012; Geng ve ark., 2012; Liou ve ark., 2011; Anbia ve ark., 2011). Nem sensörü olarak çeşitli sensing malzemeleri kullanılmaktadır ve kullanılan malzeme sensörün kalitesinin en önemli bileşenidir (Geng ve ark., 2012; Liou ve ark., 2011).

Nem sensörünün çalışma prensibi nem ile empedans, akım, kapasitans, kütle ve hacim gibi bazı özellikleri değişmesi özelliğine dayanmaktadır (Geng ve ark., 2012; Faia ve Furtado, 2012; Okur ve ark., 2012). Değişen nemle verilen elektriksel cevap, farklı iletim mekanizmaları ile açıklanabilir (Ateş ve ark., 2012). Çalışılan numunenin impedansı, artan nem seviyesi ile azalıyorsa, kütle ve kapasitans gibi özellikler artar. Fiziksel özelliklerin değişim şekli, nem algılama özellikleri için önemli bir rol oynar. İyi bir nem sensöründen beklenen bazı özellikler vardır. Bunlar, yüksek hassasiyet, iyi fiziksel ve kimyasal kararlılık, çabuk tepki ve kurtarma zamanı, tekrarlanabilirlik ve düşük maliyettir (Zhang ve ark., 2012; Geng ve ark., 2012; Anbia ve ark., 2012).

Nem ölçümleri, incelenen numunenin nem ve iletkenlik mekanizması hakkında bilgi verir. İletim mekanizması iyonik ya da elektronik olabilir. İyonik iletkenlikte sensörün impedansı artan R_h ile azalır. Su moleküllerinin fiziksel absorpsiyonuna bağlıdır. Elektronik mekanizmada ise impedans, sensing malzemesinin n ya da p tipi yarıiletken olmasına bağlı olarak artar ya da azalır. Su moleküllerinin kimyasal absorpsiyonuna bağlıdır (Okur ve ark., 2012).

Seramikler, polimerler, yarıiletkenler, metal oksitler yaygın bir şekilde nem sensörü olarak kullanılmaktadır (Zhao ve ark., 2013; Geng ve ark., 2012; Anbia ve ark., 2012; Bauskar ve ark., 2012; Sheng ve ark., 2012). Son zamanlarda ferrit bazlı manyetik yarı iletken malzemelerin, yapısal, optik ve manyetik özellikleri sebebiyle nem sensörü çalışmalarında yoğun bir ilgi gördüğü bilinmektedir (Tholkappiyan ve Vishista, 2015; Aakash ve ark., 2016). Özellikle bu tür malzemelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi çok azdır. Ferritlerin nem sensörü olarak incelenmesinde impedans ölçümlerinin neredeyse bu güne kadar hiç yapılmamış olması bu çalışmanın ilgi alanlarından biri olmuştur. Bu sebeple, bu çalışmada ferrit tabanlı Al-Cd nanopartikül sisteminin nem algılama özellikleri için empedans ölçümleri ile araştırılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 3. NUMUNELERİN SENTEZİ VE KULLANILAN KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

3.1. Al-Cd Nanoparçacıkların Sentezi

Ferrit parçacıklarının boyutu ve özellikleri hazırlanma koşullarıyla değişebilir. Bu koşullar, pH derecesi, sentez için kullanılan çözücü, karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi, karıştırma hızı ve metal nitratin kullanılan oranı olarak sayılabilir (Raut ve ark., 2015).

Bu çalışmada Al-Cd ferrit nanoparçacıklarının sentezlenmesi için çökelme metodu kullanılmıştır. Çökelme metodu, bir çözücünün içinde nitrat, klorür ya da sülfat tuzlarının çözünmesi, ortama verilen bir baz sayesinde çökeltilinin oluşması ardından bu çökeltilinin istenilen fırın sıcaklığında kurutulması ve elde edilen tozların belli bir sıcaklıkta sinterlenmesi esasına dayanır.

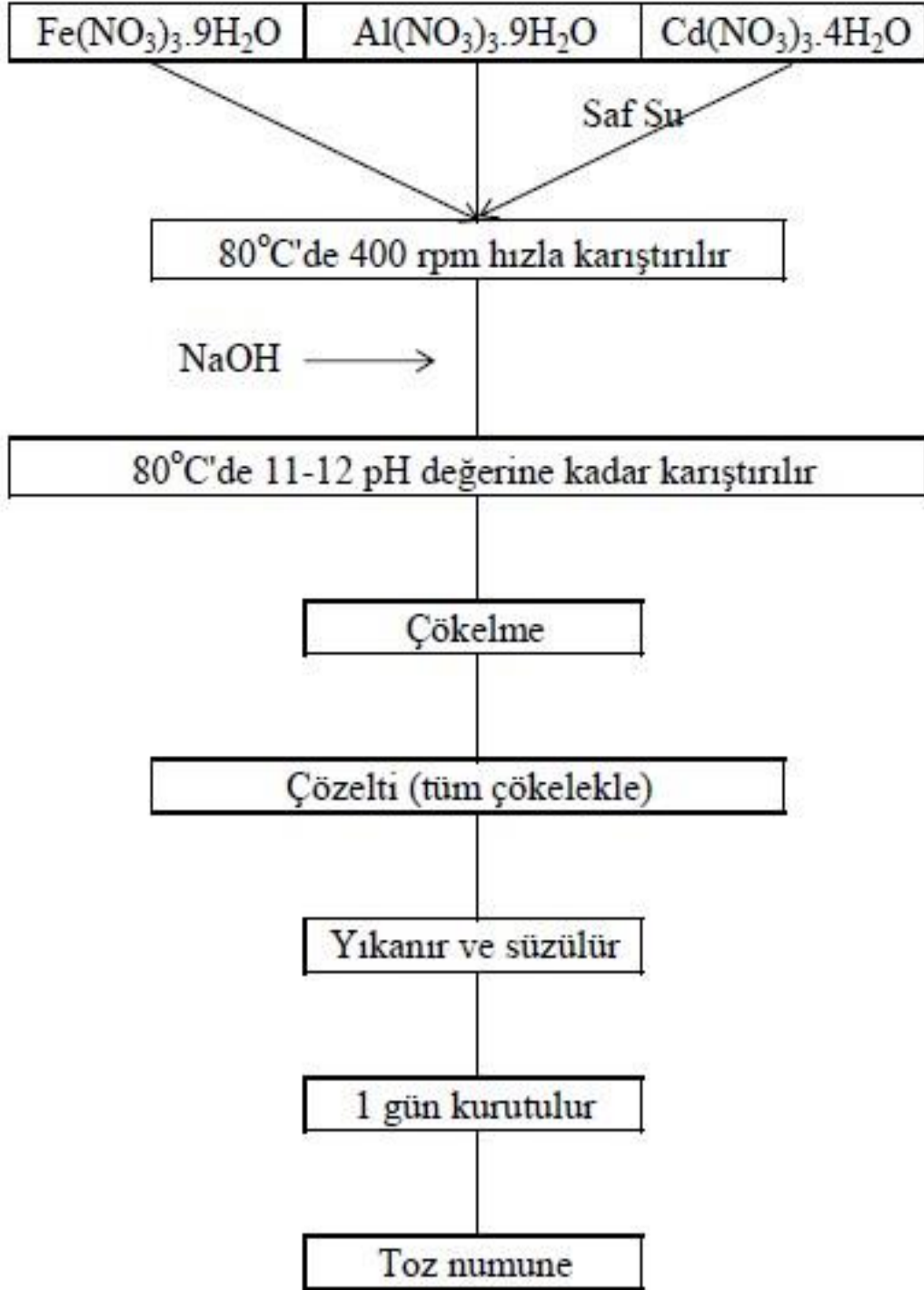
Al-Cd nanoparçacıkları üretmek için kullanılan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tuzları ile NaOH bazı Merck (Germany, >99.0%) firmasından temin edilmiştir. Numuneler $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ genel formülü ile $0 \leq x \leq 0,5$ aralığında, 0,1 birim aralıkları ile seri olarak üretilmiştir. 5 ml saf suda (Milli-Q ultra pure water) çözelti hazırlayarak, her bir numune için sitokiyometrik hesaplamalar doğrultusunda kullanılan tuz miktarları aşağıdaki tabloda verilmektedir:

Tablo 3.1. Al-Cd nanoparçacık üretmek için gerekli olan tuz miktarları.

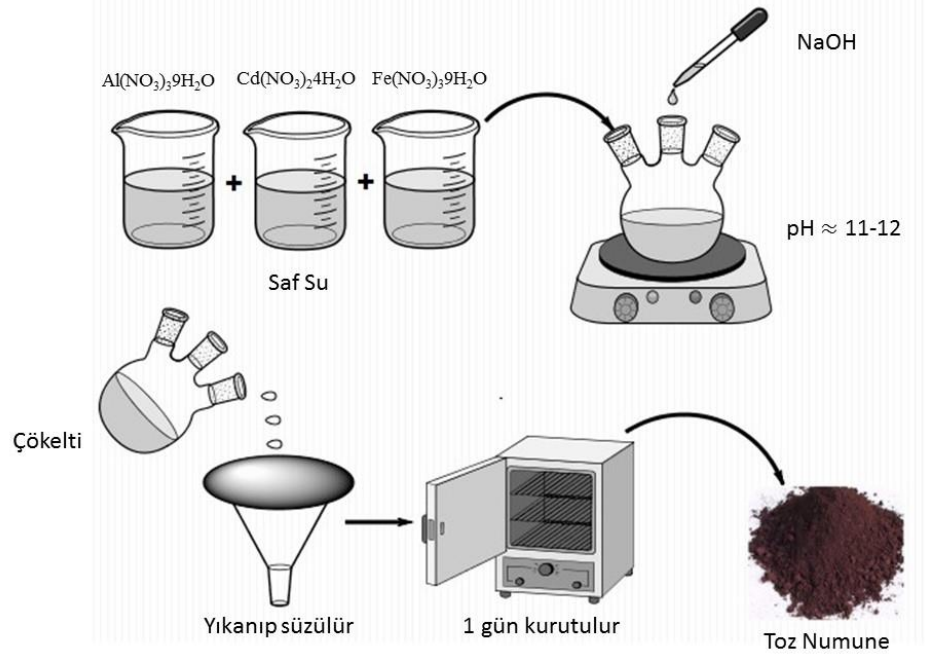
x	Al(NO ₃) ₃ 9H ₂ O (g)	Cd(NO ₃) ₂ 4H ₂ O (g)	Fe(NO ₃) ₃ 9H ₂ O (g)
0	0	1,5424	4,04
0,1	0,187565	1,38816	4,04
0,2	0,37513	1,23392	4,04
0,3	0,562695	1,07968	4,04
0,4	0,75026	0,92544	4,04
0,5	0,937825	0,7712	4,04

Sitokiyometrik hesaplamalar sonucu elde edilen tuz miktarı ile 5 ml saf su üç boyunlu balon jode karıştırıldı. Balon joje 80°C'ye ısıtılan su banyosuna daldırılarak homojen bir çözelti elde etmek için manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Homojen bir çözelti elde edildikten sonra içerisine 2M molar konsantrasyona sahip NaOH damla damla ilave edildi. Bu ilave süresince pH kontrol edilerek 11-12 seviyesine geldiğinde NaOH ilavesi durduruldu. Bu seviyeye ulaşana kadar yaklaşık 100 ml NaOH çözeltisi eklenmiştir. NaOH ilavesi sona erdikten sonra, çökelti bir kez de 700 rpm hızında mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak tamamen homojen bir hal alması sağlanmıştır. Çökelti en ince filtre kağıdı ile süzüldü. Ardından içinde kalabilecek yabancı maddeleri ve özellikle NaOH kalıntılarını uzaklaştırmak için saf su ile defalarca yıkanıp, tekrar tekrar süzüldü. Son olarak elde edilen süzüntü cam petri kaplarına koyularak 105°C'lik etüvde 24 saat bekletildi. Etüvden çıkardığımız tozlar mermer havanda topaklanmalar giderilene kadar öğütüldü. Elde edilen çok küçük boyutlardaki tozlar 8 saat 800°C'lik fırında saf ferrit nanoparçacık elde etmek için ısıtılma tabi tutuldu.

Al-Cd Ferrit



Şekil 3.1. Al-Cd ferrit üretiminde takip edilen basamaklar.



Şekil 3.2. Al-Cd ferrit üretiminin şematik gösterimi.

3.2. XRD Analizleri

XRD analizleri Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Bölümü bünyesinde bulunan Rigaku D/MAX/2200/PC model cihazla, $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($\lambda = 1,54050 \text{ \AA}$) kullanılarak, dakikada 1 derece tarama hızı ile $10\text{-}90^\circ$ aralığında yapılmıştır (Şekil 3.3). Her bir numunenin kristal boyutu Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır:

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

Burada, D kristal boyutu, θ gelen açı ($2\theta/2$), β en yüksek pikin yarı genişliği (full width at half maxima (FWHM)) ve λ gelen ışının dalga boyu şeklinde ifade edilir.

Kübik $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit nanoparçacık sisteminin örgü sabitinin (a) hesaplanabilmesi için d -uzayı ve hkl indisleri kullanılmıştır. Örgü sabiti denklemi aşağıdaki gibidir:

$$a = \frac{\lambda(h^2 + l^2 + k^2)^{1/2}}{2 \sin \theta} \quad (3.2)$$

Burada hkl Miller indisleri olarak bilinir.

Örgü sabiti değerlerini kullanarak numunelerin X-ışınları yoğunluklarını hesaplayabiliriz. Bu hesaplamaları yapmak için aşağıdaki eşiklik kullanılır:

$$\rho_{X-ray} = \frac{8M}{Na^3} \quad (3.3)$$

Burada, M numunenin moleküler ağırlığı, N avagadro sayısı, a ise örgü sabitidir. X-ışınları yoğunluğundan sonra numunelerin fiziksel yoğunlukları; numunelerin tartılması ve geometrik şekillerinden hacminin hesaplanması sonucu elde edilir. Elde edilen x-ışınları yoğunlukları ve fiziksel yoğunluk değerleri kullanılarak, numunelerin gözeneklilikleri hesaplanır. Bu hesaplama için aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$P = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_{X-ray}} \quad (3.4)$$



Şekil 3.3. XRD cihazı.

3.3. SEM Analizleri

SEM analizleri Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Bölümü bünyesinde bulunan JEOL JSM 6060 LV model taramalı elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir (Şekil 3.4.). Ferrit nanoparçacıkların morfolojisi ve mikroyapıları, 20 kV hızlanma voltajı ile elde edilmiştir. Ferrit parçacıkları tane boyutu hakkında bilgi

sahibi olmak için SemAfore 5.21 programı kullanılmış ve her bir numune için ortalama tanecik boyutu hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. SEM cihazı.

3.4. FT-IR Analizleri

FT-IR ölçümleri Perkın Elmer Spectrum 100 model cihazla alınmıştır (Şekil 3.5.). Cihaz 4000-450 cm^{-1} aralığında çalışmaktadır. Numunelerin spektroskopik kimyasal yapı analizi yapılmıştır.



Şekil 3.5. FT-IR cihazı.

3.5. UV Analizleri

UV-Visible ölçümleri, Sakarya Üniversitesi Kimya Bölümünde bulunan UV/Visible Spektrofotometre cihazı ile alınmıştır (Şekil 3.6.). Spektrum 200-1100 nm dalgaboyu aralığında alınmıştır.



Şekil 3.6. UV-Vis cihazı.

Optik özellikleri analiz etmek için optik transmitans ve reflektans spektrumları elde edilmelidir. Optik bant aralığı enerjisi (E_g) Kubelka-Munk teorisine göre dağınık yansıma verilerini kullanarak belirlenebilir (Güner ve ark., 2014; Baykal ve ark., 2014; Baykal ve ark., 2015). Kubelka-Munk fonksiyonu $F(R)$, doğrudan soğurma katsayısı α ile ilişkilidir. $F(R)$ aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$F(R) \equiv \alpha = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (3.5)$$

Burada R reflektanstır. Optik bant aralığı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.6)$$

Burada α soğurma katsayısı, $h\nu$ foton enerjisi, A bir sabit ve (E_g) optik bant aralığı enerjisidir. $(\alpha h\nu)^2$ ye karşı $(h\nu)$ grafiği çizildiğinde numunelerin bant aralığı enerjisi (E_g), grafiğin eğiminden bulunur.

3.6. VSM Analizleri

Manyetik ölçümler Gebze Teknik Üniversitesi, Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi laboratuvarında bulunan VSM opsiyonlu Quantum Design PPMS 9T cihazı ile alınmıştır (Şekil 3.7.). Ölçümde uygulanan manyetik alan -2 ve 2 Tesla aralığındadır. Her kompozisyon için, hazırlanan numunelerin manyetik özelliklerinin analizi öncelikle M-H histerezis eğrilerinin verilerinin elde edilmesi ile yapılır. M-H eğrilerinden saturasyon manyetizasyonu, kalıcı manyetizasyon ve koersivite gibi özellikler bulunabilir (Cullity, 1972).



Şekil 3.7. VSM cihazı.

Mıknatıslanma (manyetizasyon) bazı manyetik malzemelerin, bir manyetik alan tarafından etkilenme derecesini ve aynı zamanda malzemenin kendisinin oluşturduğu manyetik alanı belirten bir özelliktir. Manyetizasyon, birim hacim başına düşen manyetik moment miktarıdır. Mıknatıslanmayı oluşturan manyetik momentlerin kaynağı atomlarda elektron hareketinden dolayı üretilen mikroskobik elektrik akımları ya da elektronların spinleridir. Ferromanyetik malzemelerde mıknatıslanma, bir dış manyetik alan olmadan da var olabilir. Buna kendiliğinden mıknatıslanma denir. Diğer tür manyetik malzemelerde mıknatıslanma sadece dış manyetik alan uygulandığında indüklenmiş olur. Bu durum atomik dipollerin sıralanmasından kaynaklanarak malzemede oluşturulmuştur. Tüm atomik dipoller bir doğrultuda sıralandığında, saturasyon mıknatıslanması olarak da bilinen maksimum mıknatıslanma olur (Cullity, 1972).

Saturasyon mıknatıslanması, bir malzemenin maksimum mümkün mıknatıslanması olarak tanımlanır. Bir ferrit sisteminin saturasyon mıknatıslanması aşağıda sıralanan durumlar bilindiği takdirde bulunabilir (Cullity, 1972):

- a. Her iyonun momenti,
- b. A ve B bölgeleri arasındaki iyonların dağılımı,
- c. A ve B bölgeleri arasındaki değişim etkileşiminin negatif olması

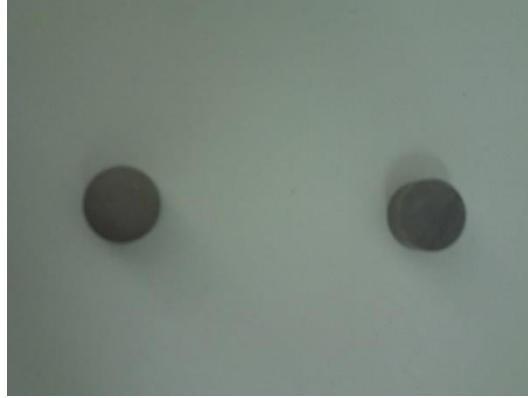
Saturasyon mıknatıslanmasının artan eğilimi Neel'in iki alt örgü modeli temeliyle açıklanabilirken, azalan eğilim ise B bölgelerinde Neel'in iki alt örgü modeli tarafından açıklanamayan üçgen tipi spin düzenlemelerinin bulunmasını önermektedir (Cullity, 1972).

Kalıcı mıknatıslanma, manyetik malzeme saturasyona ulaştıktan sonra mıknatıslanma kuvveti H , sıfıra indirildiğinde, manyetik malzemenin kalıcı manyetik alanı M 'nin bir ölçüsüdür (Cullity, 1972).

Koersivite malzemenin saturasyona uğradıktan sonra, tekrar mıknatıslanması için gerekli ters manyetik alanın bir ölçüsüdür (Cullity, 1972).

3.7. Dielektrik ve İletkenlik Analizleri

Çökelme metodu ile elde edilen toz numunelerin elektriksel ve dielektrik ölçümlerini yapabilmek için, tozlar bazı işlemlere tabi tutulmuştur. Elde edilen tozlar pres makinası ile pellet haline getirilerek geometrik bir şekle sahip olmuşlardır. Peletler fırında 1100 derecede 5 saat boyunca sinterlenmiştir. Pelletlerin yüzeyleri zımparalandıktan sonra gümüş boya ile iletken hale getirilmiştir. Böylece elde edilen numune ölçümler için elektrot formuna sahip olmuştur.



Şekil 3.8. Pelet haline getirilmiş toz numuneler.

Numunenin iletkenlik ve dielektrik ölçümlerini yapmak için GW Instek LCR-8110G cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9.). Ölçümler için 20 Hz-10 MHz aralığında logaritmik olarak dağılmış 26 test frekansı belirlenmiştir. 293-613 K sıcaklık aralığında, ölçümün yapıldığı sıcaklık değeri için bu frekanslar her defasında tekrarlanmıştır. Elde edilen sığa ve iletkenlik değerleri özel bir yazılım sayesinde gerekli parametrelere çevrilmiştir.



Şekil 3.9. Dielektrik ve iletkenlik ölçümleri için kullanılan LCR-metre.

3.8. Nem Analizleri

Ölçümler oda sıcaklığında ve 1 V potansiyel farkı altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 15-90 % nem aralığında 20 Hz-10 MHz frekans arasında logaritmik olarak dağılmış 31 farklı test frekansı için impedans ve faz açısı ölçümleri yapılmıştır. Nem odasının nem değeri ortama bir pipet yardımı ile damla damla verilen su ile sağlanarak, ortam nemi her 2-3% arttığında ölçümler yeni ortam nemi için tekrarlanmıştır.

İmpedans ölçümleri için LCR-8110G ve nem ölçümleri için CEM dt-615 hygrometre kullanılmıştır (Şekil 3.10.). Gerek impedansın frekansa göre taranması gerekse tepki ve kurtarma eğrisi için her 0,5 sn ara ile yapılan zamana göre tarama işlemi için özel yazılmış bir bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen veriler kullanılan özel yazılım vasıtasıyla bir bilgisayarda de toplanmıştır.

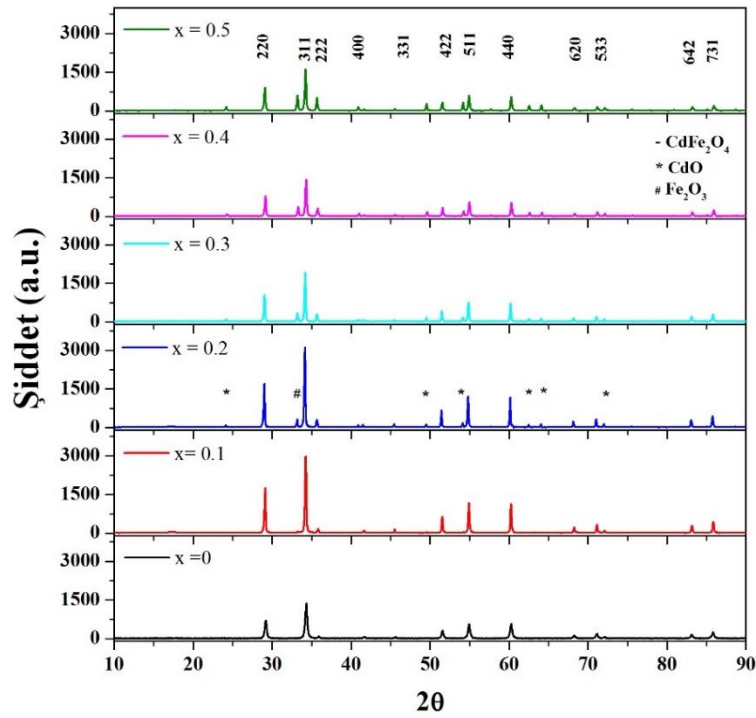


Şekil 3.10. Nem ölçümleri için kullanılan CEM dt-615 hygrometre cihazı.

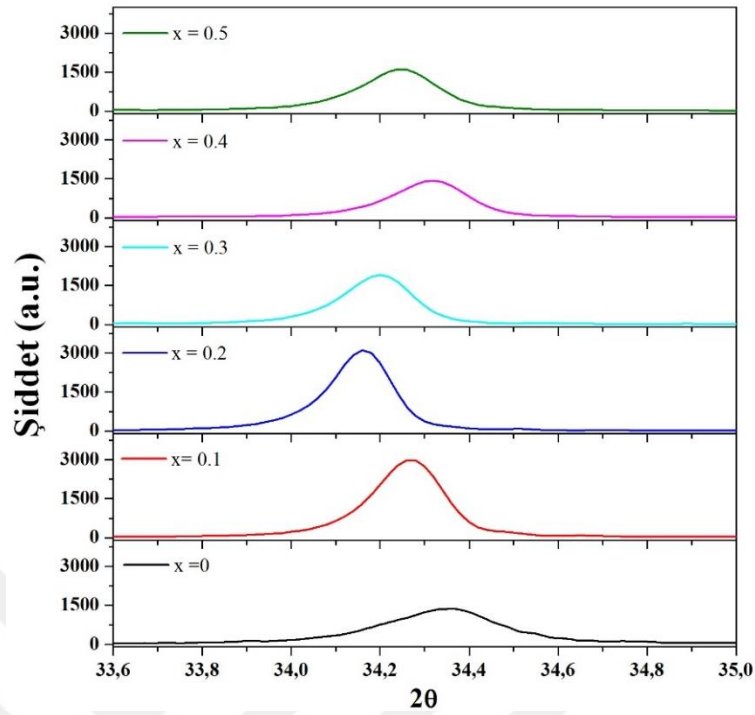
BÖLÜM 4. BULGULAR

4.1. XRD Sonuçları

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit sistemine ait XRD kırınım desenlerinin olduğu grafik şekilde gösterilmektedir. Bu desenler standart JCPDF 00-022-1063 ile kıyaslanmıştır. Şekil 4.1.'deki grafikte de gözlenebilen ihmal edilebilir CdO ve Fe_2O_3 kusurları haricindeki tüm pikler CdFe_2O_4 'ün kübik yapısı ile uyumludur. Al katkısı arttıkça, CdO ve Fe_2O_3 oluşumları da artmaktadır. CdFe_2O_4 'ün kübik yapısındaki kristalleşme, Al ilavesi ile onarılır. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından gözlenen, piklerin yoğunluğundaki artışla doğrulanmaktadır (Deraza ve Hessien, 2009).



Şekil 4.1. Al-Cd nanoparçacıklarının XRD pikleri.



Şekil 4.2. (311) pikine ait XRD analiz grafiği.

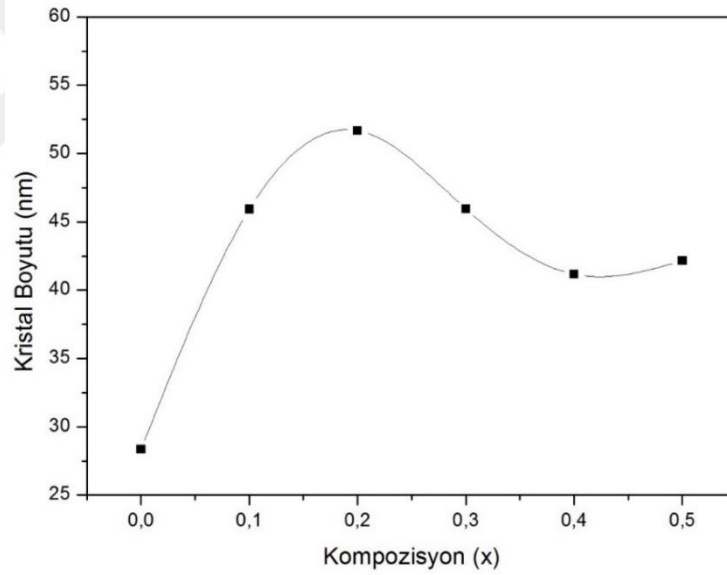
$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit serisine ait en baskın pik olan (311) pikine ait genişletilmiş XRD grafiği Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi pik şiddeti ve yarı pik genişliği (FWHM) Al katkısıyla değişmiştir. Bu değişim birbiriyle ters orantılı olarak değişmiştir. $x=0.2$ katkısında pik şiddeti 3109 a.u. değeri ile en yüksek şiddete ulaşmış iken yarı pik genişliğinin ise 0,168 derece değeri ile en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Bu değişimin kristal boyutu üzerindeki etkileri de açık bir şekilde görülmektedir. $x=0$ ile 0,5 arasındaki Al katkısına göre değişen XRD piklerindeki şiddet ile numunelerin kristal boyutu arasında doğrusal orantılı bir değişim olduğu gözlenmiştir.

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit serisi için Denklem 3.1'de verilen Scherrer formülünden kristal boyutları, Denklem 3.2'de verilen eşitlikten örgü sabitleri, Denklem 3.3'te verilen formülden X-ışınları yoğunluğu ve tartılan kütle yoğunluğu Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. XRD sonuçlarında elde edilen verilerle hesaplanan kristal boyutları, örgü sabitleri ve yoğunluklar.

Al miktarı	FWHM (2 θ)	Şiddet (a.u.)	Kristal Boyutu (nm)	a_{311} (Å)	ρ_{X-ray} (g/cm ³)	ρ_m (g/cm ³)	P
0,0	0,306	1365	28,37	8,6492	5,911	2,327	0,606
0,1	0,189	2969	45,93	8,6735	5,680	2,751	0,515
0,2	0,168	3109	51,69	8,6984	5,466	3,036	0,444
0,3	0,189	1892	45,95	8,6885	5,312	1,561	0,706
0,4	0,201	1419	41,17	8,6590	5,192	2,123	0,591
0,5	0,206	1607	42,16	8,6784	4,980	3,460	0,305

Kristal boyutu 28,37 nm ile 45,95 nm arasında, örgü sabiti ise 8,6492 Å ile 8,6984 Å arasında değişmektedir. Al katkısının, kristal boyutuna olan etkisi Şekil 4.3.'te gösterilmektedir:

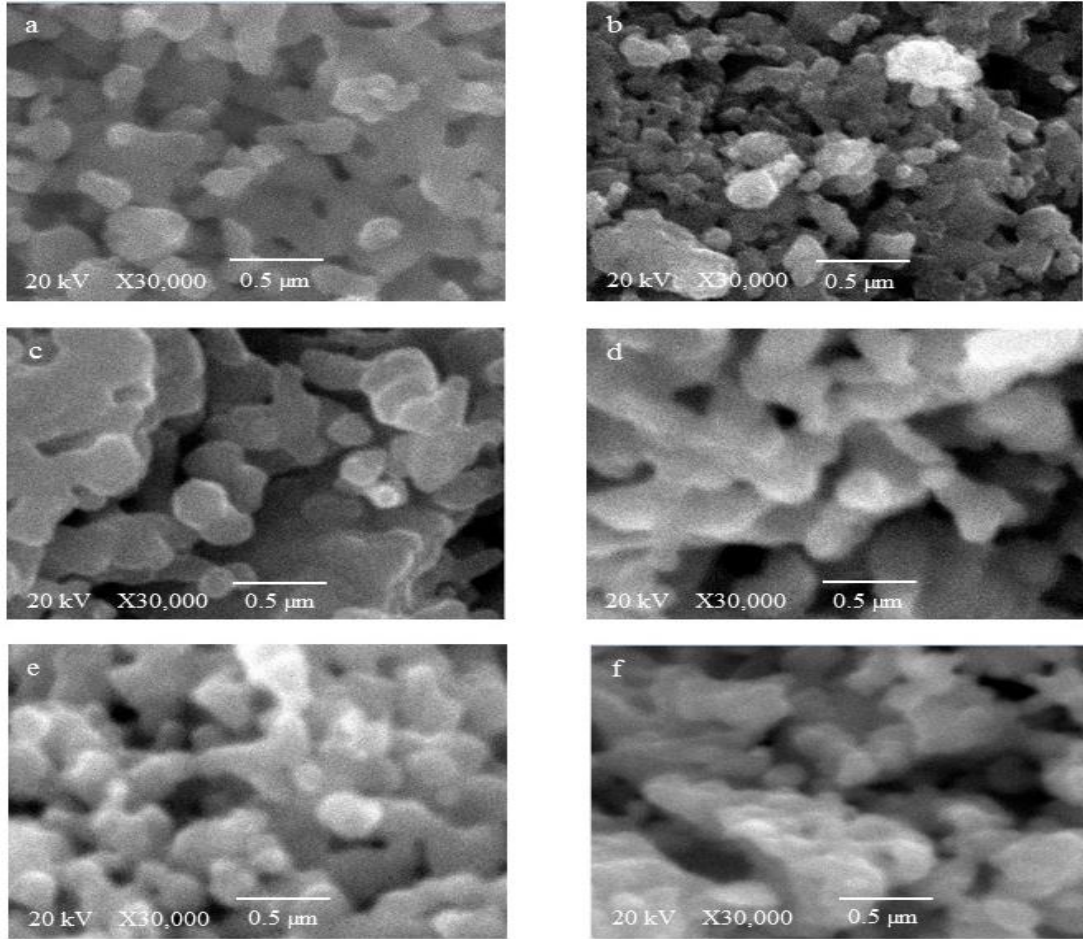


Şekil 4.3. Al katkısının, kristal boyutuna olan etkisi.

Al katkısının kristal boyutuyla olan değişimi birim hücrenin çeşitli sitelerden oluşmasından kaynaklanmaktadır. İlk olarak gözlemlenen kristal boyutundaki artış, alüminyumun (Al) tetrahedral bölgeden ziyade oktahedral bölgeye gitmesinden kaynaklanmaktadır, ancak Al katkısını arttırmaya devam ettikçe gerçekleşen kristal boyutunun küçülmesi Al^{3+} iyonlarının basınç dayanımı nedeniyle. Ayrıca Cd^{2+} iyonlarının moleküler ağırlığı Al^{3+} iyonlarından çok daha fazla olduğu için kompozisyonla azalan kristal boyutunu, Cd miktarının azalmasına da atfedebiliriz.

4.2. SEM Sonuçları

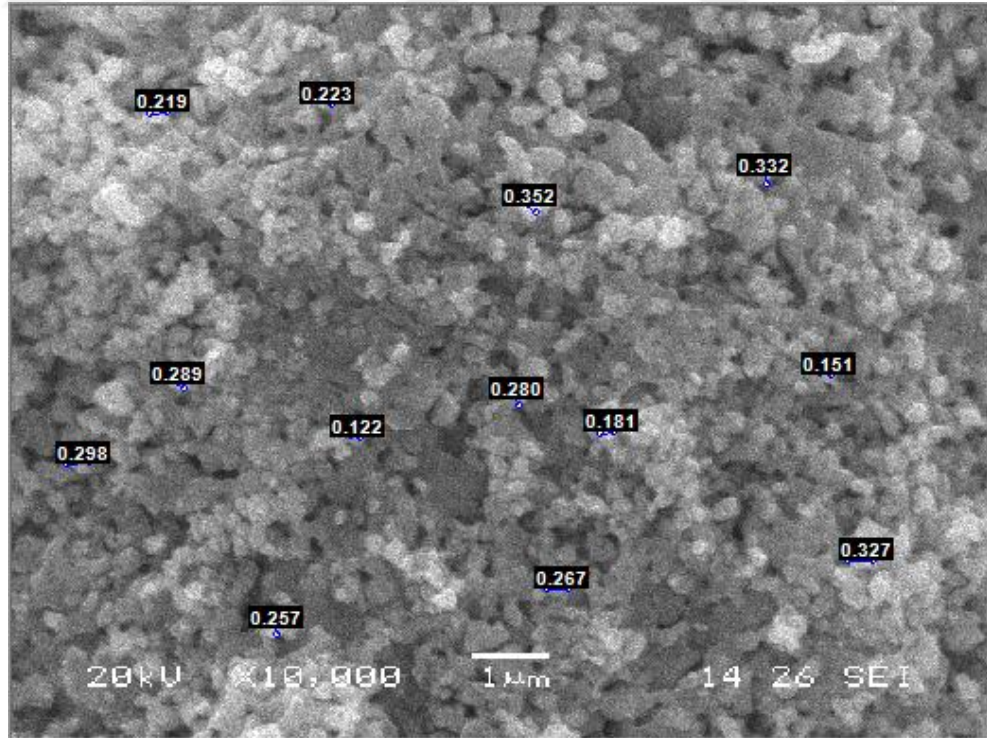
Farklı sitokiyometrik oranlarda $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ esaslı ferrit nanoparçacıklarının morfolojik yapısı ve tane şeklinin belirlenmesi, fiziksel ve elektriksel özelliklerini etkileyen temel faktörler olarak kabul edilmektedir (Shinde ve ark., 2010; Li ve ark., 2010; Ashiq ve ark., 2010). Bu sebeplerden $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit numunelerinin mikrografileri, 0 - 0,5 aralığında değişen x değerlerine göre SEM ile incelendi. Tüm numunelerin 30000 büyütme ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 4.4.'te gösterilmektedir:



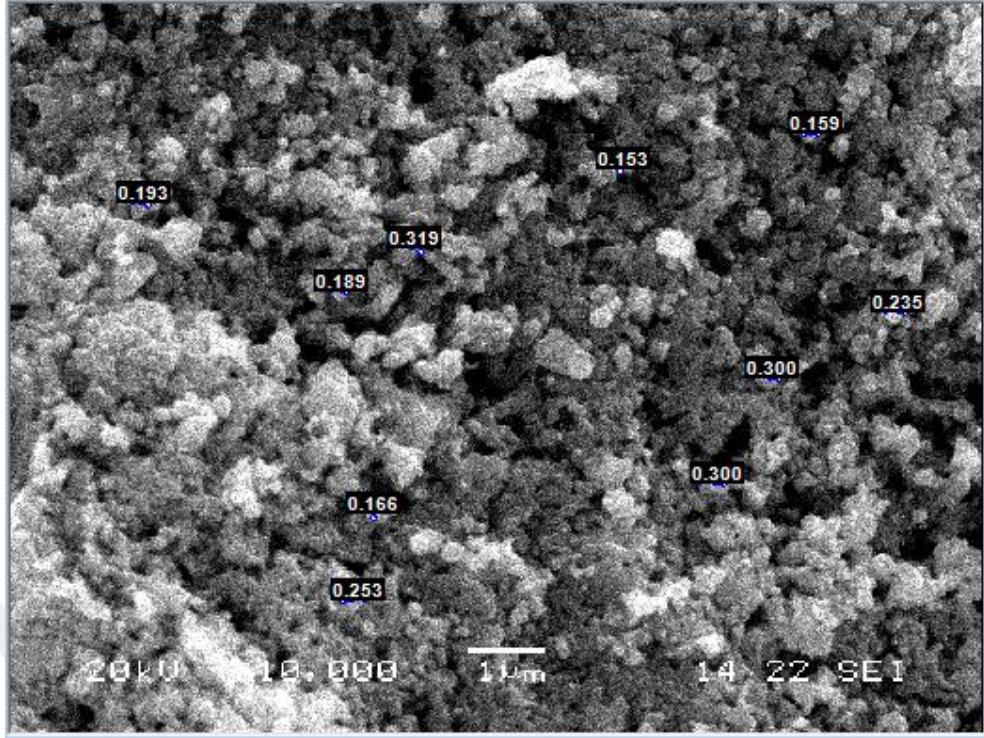
Şekil 4.4. Tüm numunelerin x30000 büyütmedeki Sem görüntüleri. **a)** x=0 **b)** x=0,1 **c)** x=0,2 **d)** x=0,3 **e)** x=0,4 **f)** x=0,5.

Genel olarak, ferrit nanoparçacıklarda topaklanma veya birikim oluşumu gözlenmiştir. Bu durum beklenenden daha büyük parçacık boyutlarının gözlenmesine neden olur. Bununla birlikte parçacık boyutlarının gerçek değerleri XRD sonuçları ile önceki bölümde hesaplanmıştır. Sitokiyometrik olarak artan x değerleri, numunelerin moleküler yapısındaki Fe atomlarının oranının azalmasına neden olur. SEM sonuçlarından, toz numunelerin bir araya toplanmasının Fe atomlarının sitokiyometrik oranına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca görüntülerde numunelerin toz formda olduğu açıkça belli olurken, topaklanma ve birikmelerin belli bir düzen içerisinde değil de rastgele dağıldığı görülmektedir. Bu oluşum, Cd ve Fe atomları arasındaki kütle dengesine atfedilir. Fe atomlarına göre Cd atomlarının daha düşük veya daha yüksek oranda olması, daha küçük nanopartikül oluşumu ile sonuçlanır. SEM görüntülerinde bazı düzlemsel veya spinel şekiller, özellikle x değeri 0,2 olduğunda gözlenmektedir.

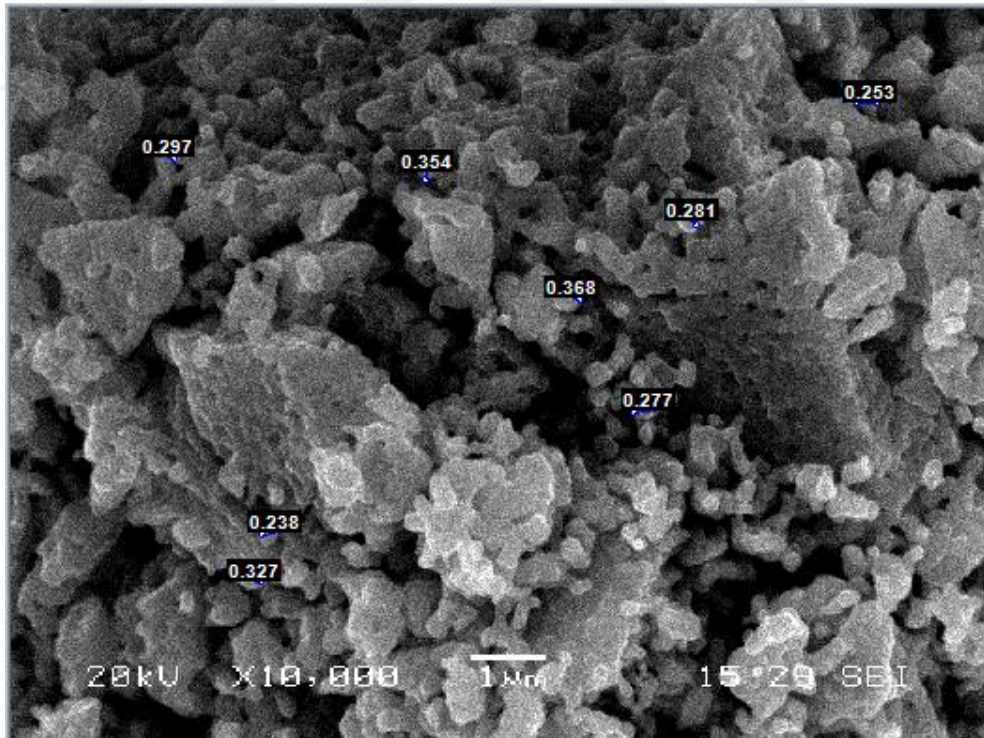
SemAfore5.21 programı ile SEM görüntüleri üzerinde ölçülen kristal boyutlarını içeren şekiller aşağıda gösterilmektedir:



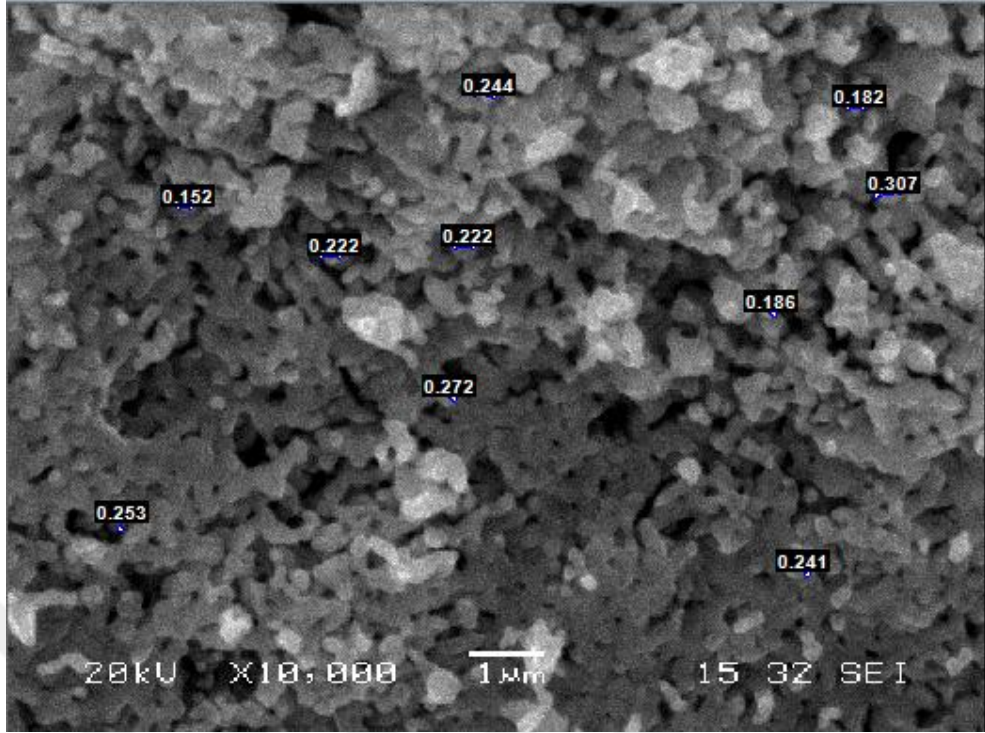
Şekil 4.5. $x=0$ için $\times 10000$ büyütmedeki tane boyutları.



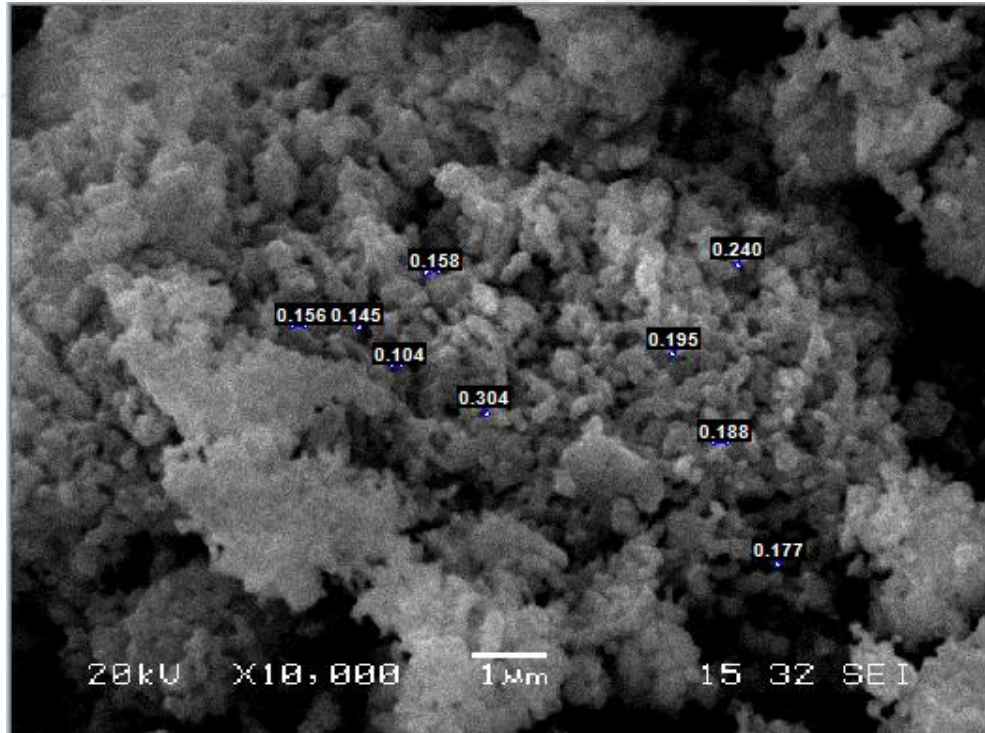
Şekil 4.6. $x=0,1$ için $\times 10000$ büyütmedeki tane boyutları.



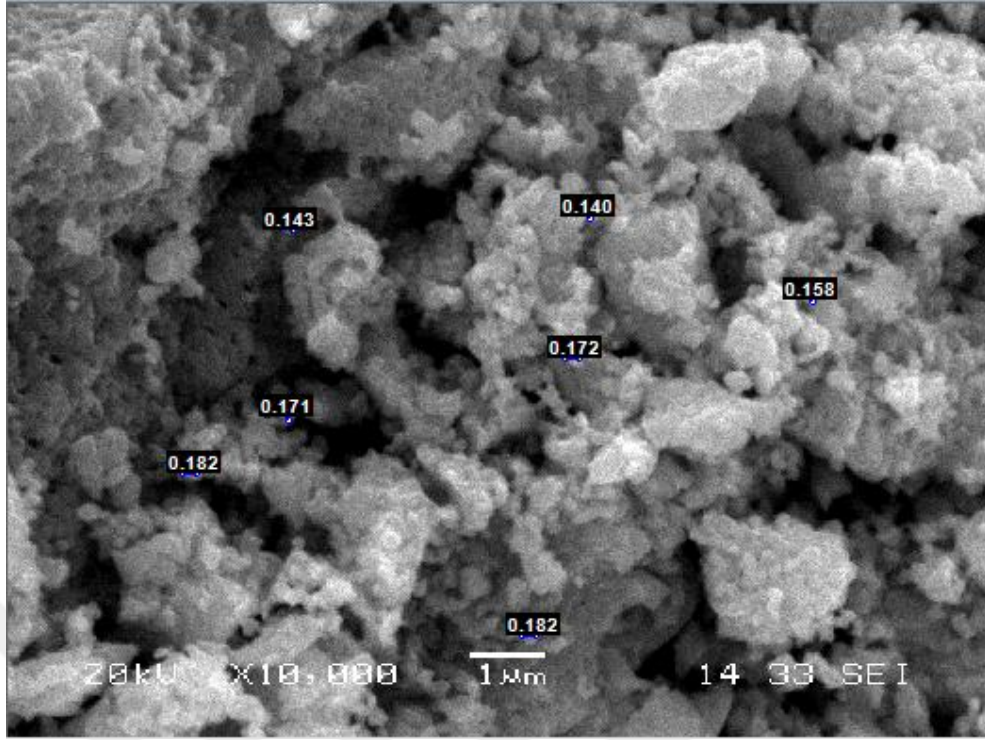
Şekil 4.7. $x=0,2$ için $\times 10000$ büyütmedeki tane boyutları.



Şekil 4.8. $x=0,3$ için $\times 10000$ büyütmedeki tane boyutları.



Şekil 4.9. $x=0,4$ için $\times 10000$ büyütmedeki tane boyutları.

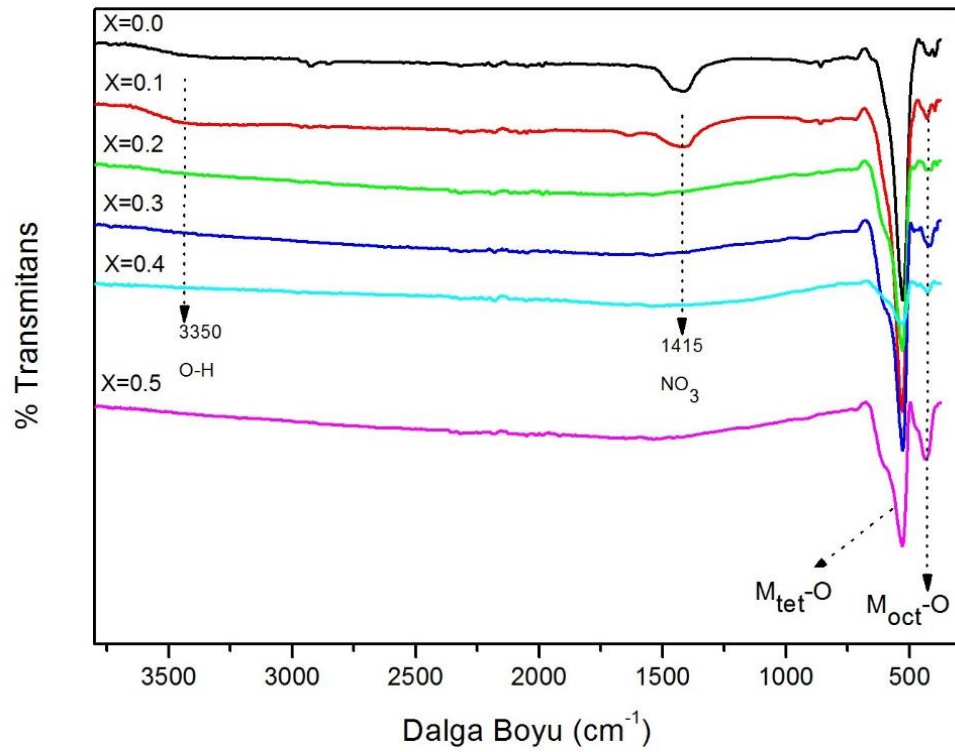


Şekil 4.10. $x=0,5$ için $\times 10000$ büyütmedeki tane boyutları.

Gözlenen tane büyüklüklerinin ortalaması alındığında, XRD sonuçlarından büyük olduğu ortadadır. Bu durum yine numunelerin topaklanmış ve birikime uğramış olmasına atfedilir.

4.3. FT-IR Sonuçları

Genellikle bütün spinel ferrit numunelerinin IR spektrumunda iki geniş metal oksijen bandı gözlemlenir. $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacıklarının FT-IR karakterizasyon sonuçları Şekil 4.11.'de gösterilmektedir. FT-IR spektrumuna göre, 530 cm^{-1} ve 430 cm^{-1} civarında iki ana absorpsiyon bandı görülmektedir. Genel olarak $620\text{--}550\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen en yüksek pik, ν_1 , 530 cm^{-1} de karşımıza çıkmış olup, tetrahedral bölgelerde metalin iç gerilme titreşimlerine atfedilir ($M_{\text{tetra-O}}$). Oysa, genellikle $450\text{--}385\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlenen küçük pik 430 cm^{-1} civarında oluşmuş, ν_2 , oktohedral bölgelerdeki metal gerilimine karşılık geldiği düşünülmektedir ($M_{\text{octa-O}}$). Spektrumda 1415 cm^{-1} 'de görünen absorpsiyon bandı NO_3 iyonlarına karşılık gelir. 2924 cm^{-1} ve 3350 cm^{-1} civarında görülen bant ise hidrojene bağlı O-H su gruplarının gerilme titreşimlerine karşılık gelir.

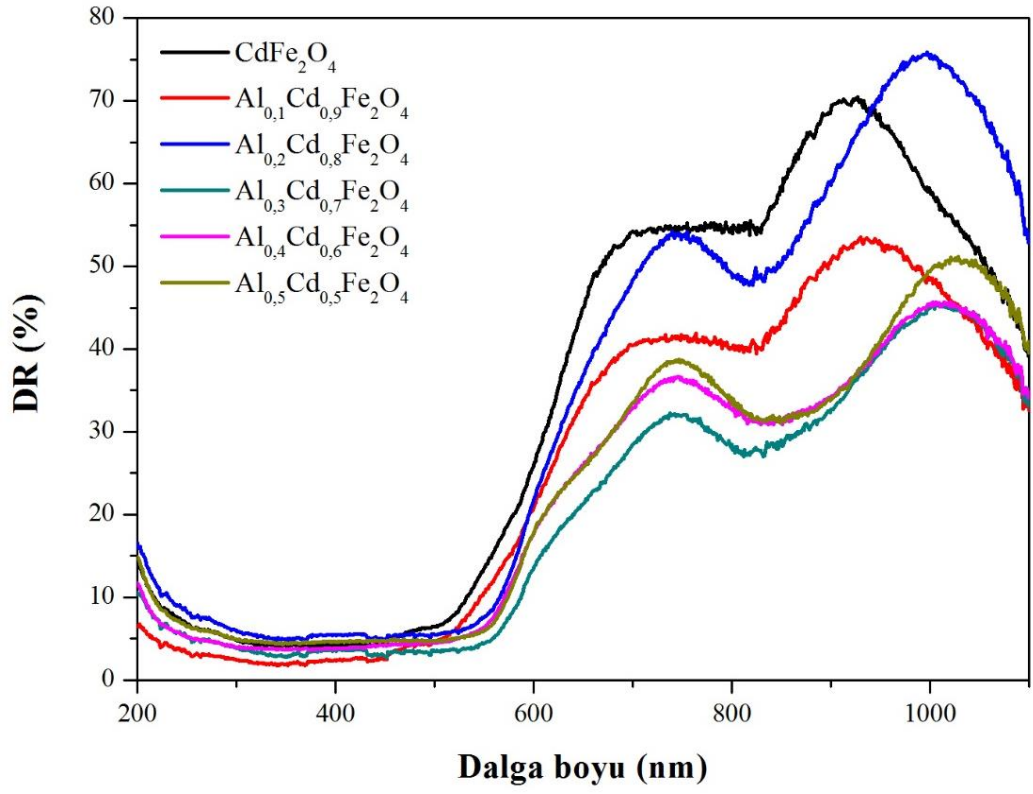


Şekil 4.11. Tüm numunelerin FT-IR pikleri.

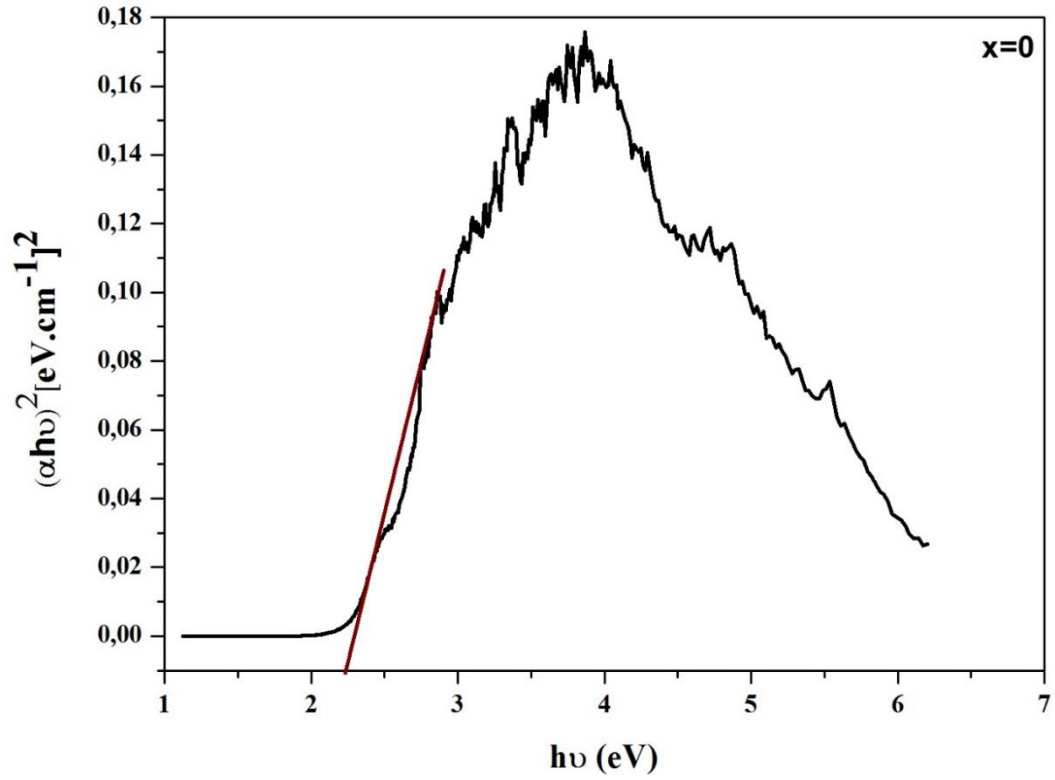
4.4. Optik Sonuçlar

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacık serisine ait UV-Vis spektrumu, Şekil 4.12.'de gösterilmektedir. Spektrum 200-1100 nm dalgaboyu aralığında kaydedilmiştir. Yansıtıcılık yüzdesi görünür bölgede, özellikle, 600 nm'den 800 nm'ye kadar, oldukça yüksektir (%25-55 arasında değişmektedir). Kızılötesi bölgede ise, $x=0$ ve 0,1 değerine sahip numunelerin daha da yüksek yansıtıcılık yüzdesine sahip olduğu gözlenmiştir.

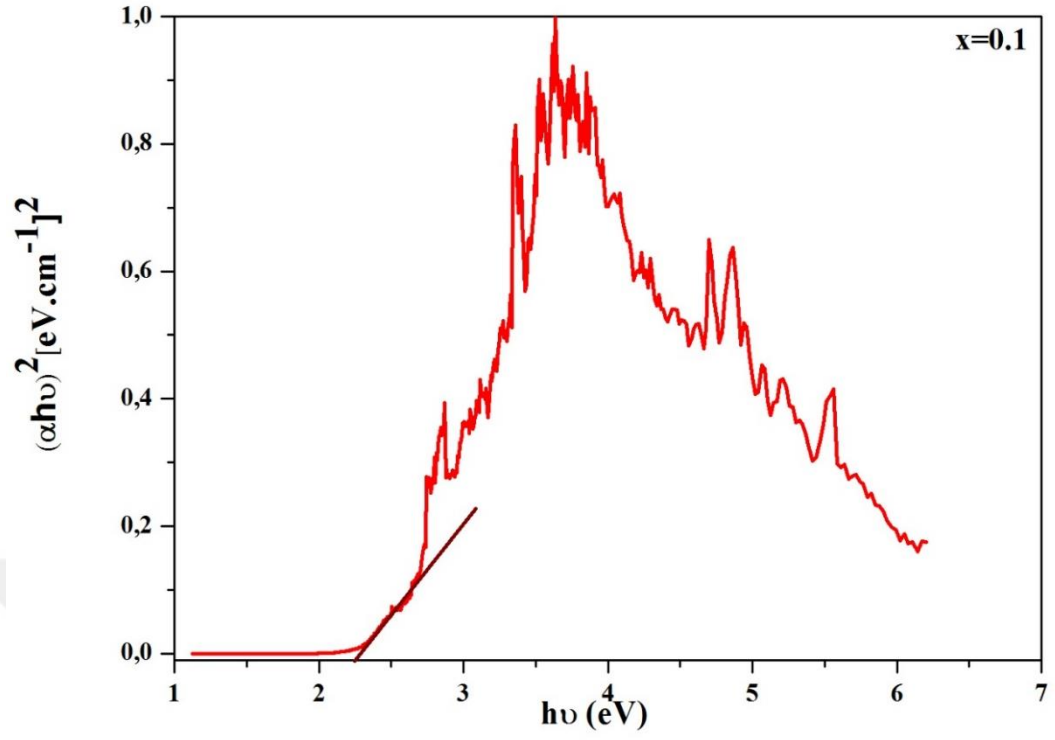
Denklem 3.5'e göre hesaplanan soğuruculuk katsayısının elde edilmesinden sonra her numune için ayrı ayrı çizilen Tauc grafikleri Şekil 4.13.'ten Şekil 4.18.'e kadar gösterilmiştir. Numunelere ait bant enerji aralıkları, grafiklerin eğimlerinden bulunmuştur ve Tablo 4.2.'de gösterilmiştir. Şekillerden ve tablodan anlaşılabacağı üzere, bant aralığı enerjileri 2,06 eV ile 2,24 eV değerleri arasında değişmektedir. Literatürde yarıiletken malzemelerin enerji bant aralığının 0,1-4 eV arasında değiştiği belirtilmektedir (Dikici, 2012). Bu sonuçlar da numunelerimizin yarıiletken ve yarıiletkeneye yakın yalıtkan karaktere sahip olduğunu gösterir.



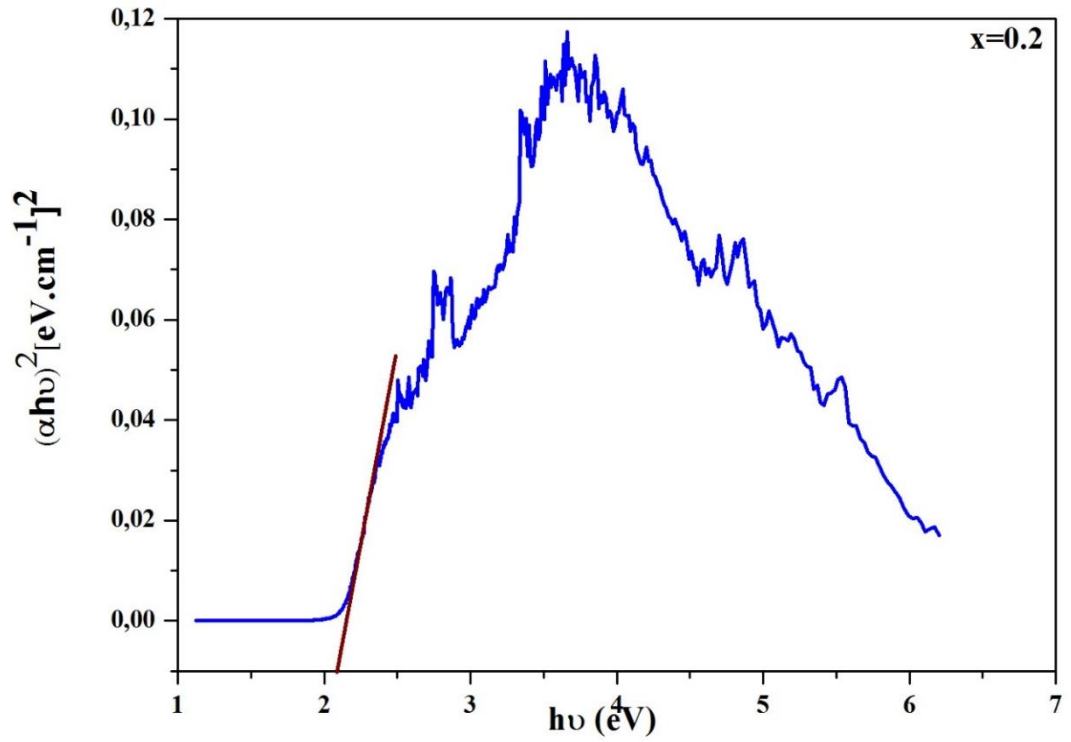
Şekil 4.12. $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacık serisine ait UV-Vis spektrumu.



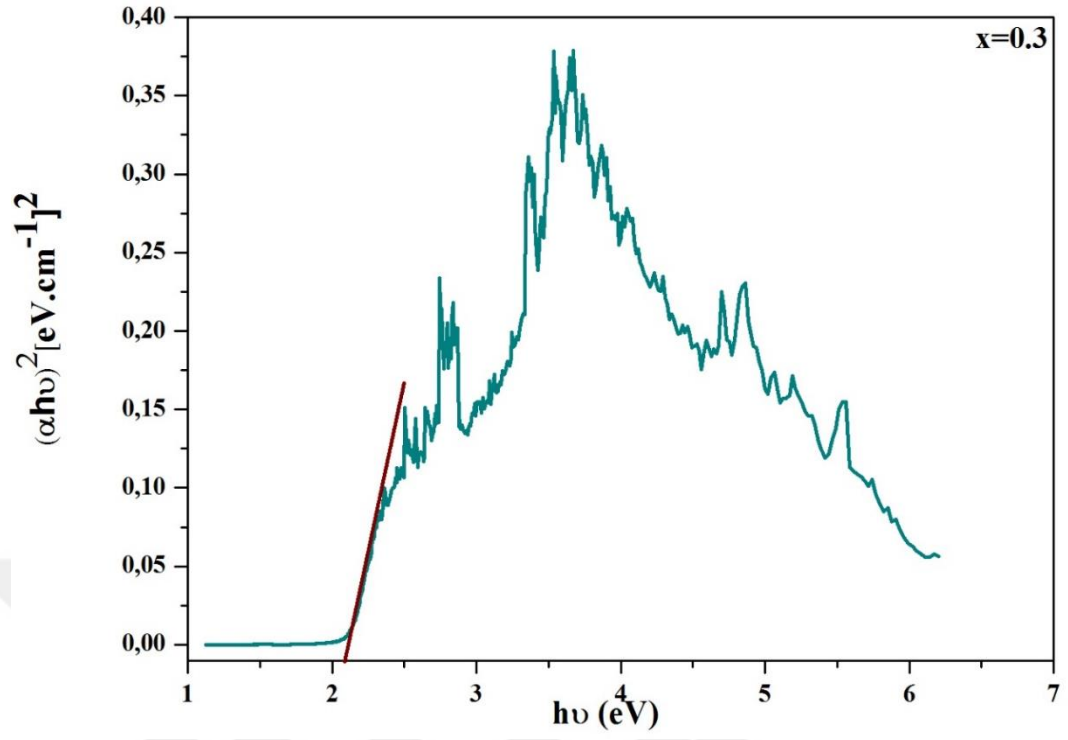
Şekil 4.13. $x=0$ için Tauc grafiği.



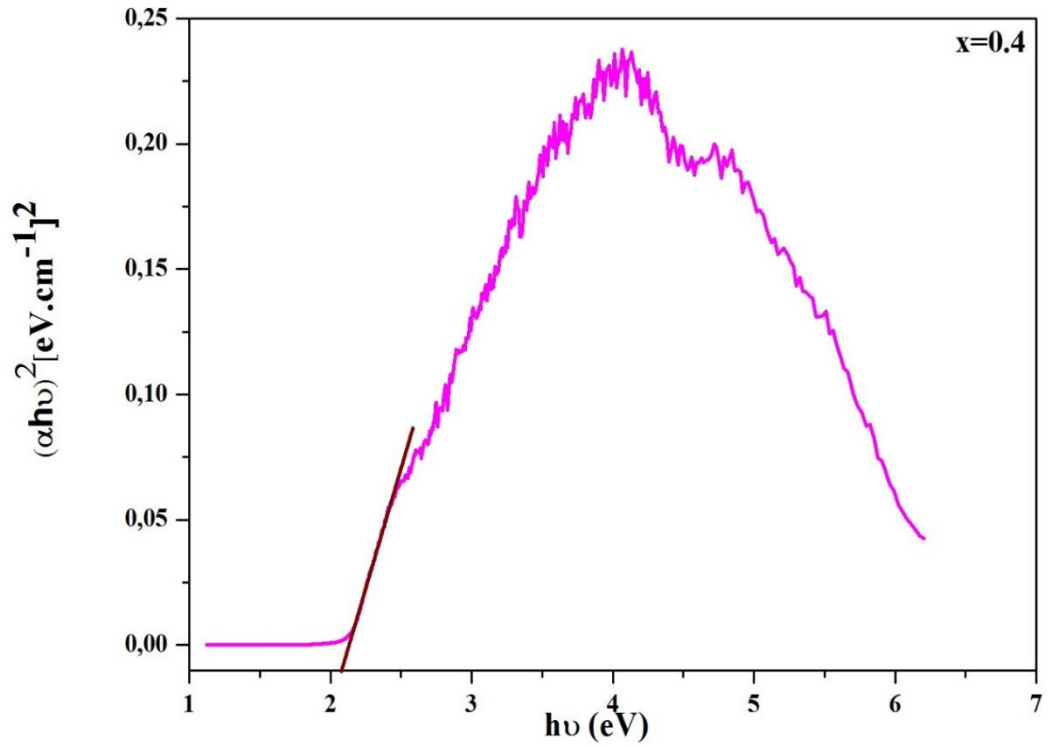
Şekil 4.14. $x=0,1$ için Tauc grafiği.



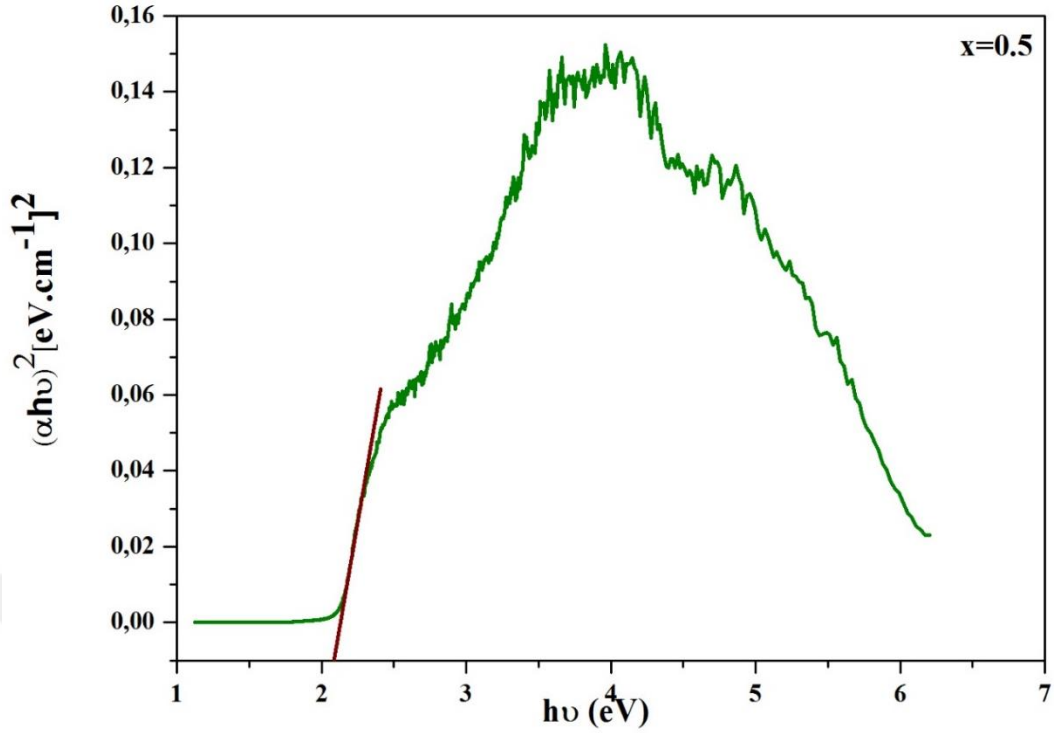
Şekil 4.15. $x=0,2$ için Tauc grafiği.



Şekil 4.16. $x=0,3$ için Tauc grafiği.



Şekil 4.17. $x=0,4$ için Tauc grafiği.



Şekil 4.18. $x=0,5$ için Tauc grafiği.

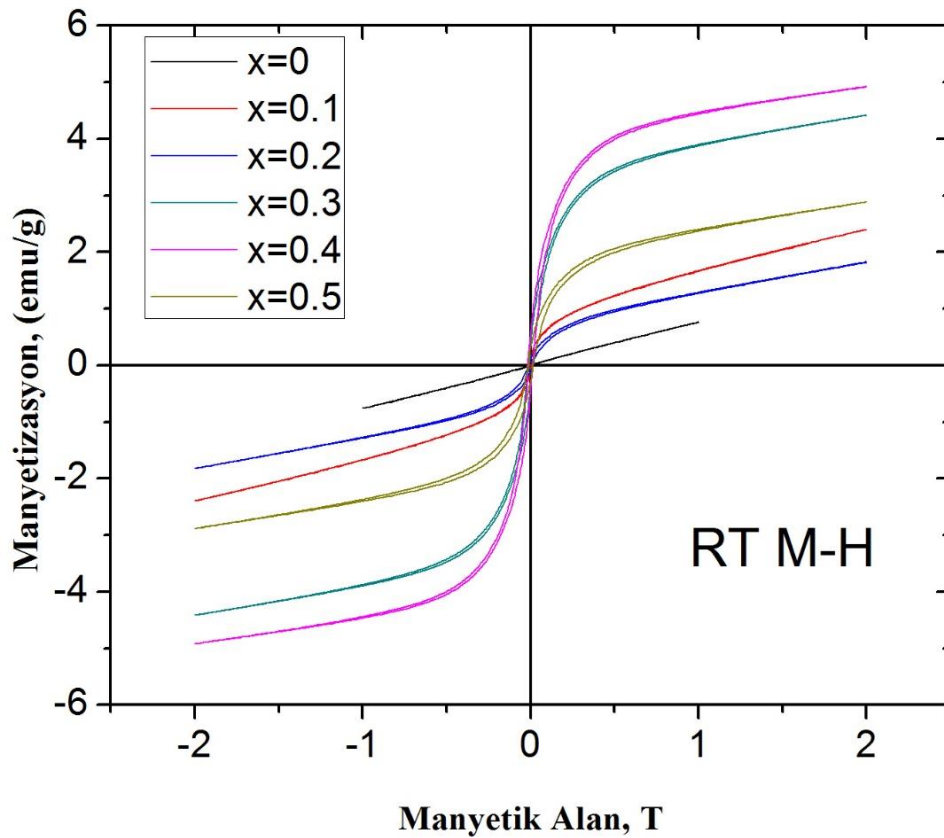
Tablo 4.2. $Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ nanoparçacık serisine ait bant enerjileri.

x	E_g (eV)
0	2,23
0,1	2,24
0,2	2,06
0,3	2,09
0,4	2,07
0,5	2,08

4.5. Manyetik Ölçümlerin Sonuçları

Şekil 4.19.'da, oda sıcaklığında ölçülen $Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ ferrit sisteminin M-H histerezis çevrimleri verilmiştir. Al katkısının olmadığı ($x=0$) $CdFe_2O_4$ durumunda, manyetik alan uygulandığında, M-H eğrisi göz önüne alındığında malzeme doyuma ulaşmadığı için paramanyetik ya da antiferromanyetik benzeri davranış sergilemiştir. Toz $CdFe_2O_4$ 'in antiferromanyetik düzeni ile normal spinel yapıya sahip olduğu daha önceki bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Desai, 2007). Al ilavesi ile bütün katkılı

konsantrasyonlar için manyetik alan yokluğunda sıfır olmayan manyetik momentler elde edilmiştir. Bu durum, küçük tane boyutuna ve ferromanyetizma için Neel'in teorisine göre, Al^{2+} iyonlarının manyetik olmayan doğalarına atfedilir. Tüm Al katkılı numuneler S şekilli dar histerezis çevrimlerine sahiptir. Dar histerezis çevrimleri ise bize numunelerin yumuşak ferrit olduğunu gösterir. 20 kOe manyetik alandaki saturasyon mıknatıslanması, kalıcı mıknatıslanma ve koersivite gibi manyetik değerler, Al konsantrasyonlarına karşılık gelecek şekilde tabloda verilmiştir. Bu manyetik parametrelerin büyüklüğü, tane büyümesi, ferritlerin A ve B bölgeleri arasındaki değişim etkileşimleri ve nanoparçacıkların boyutları gibi pek çok faktöre bağlıdır. Numunelerin, artan Al katkısıyla monoton bir davranış sergilemediği, şekilden ve tablodan açıkça görülmektedir. En büyük M_s ve H_C değerleri, $x=0,4$ değerine sahip numunede hesaplanmıştır. SEM görüntülerinden ve XRD hesaplamalarından en küçük tane büyüklüğü de bu konsantrasyona sahip $Al_{0,4}Cd_{0,6}Fe_2O_4$ numunesinde gözlemlendiğinden, M_s ve H_C değerlerinin neden $x=0,4$ değerinde en büyük değere sahip olduğu açıklanabilir.



Şekil 4.19. Oda sıcaklığındaki $Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ ferrit sisteminin M-H histerezis çevrimleri.

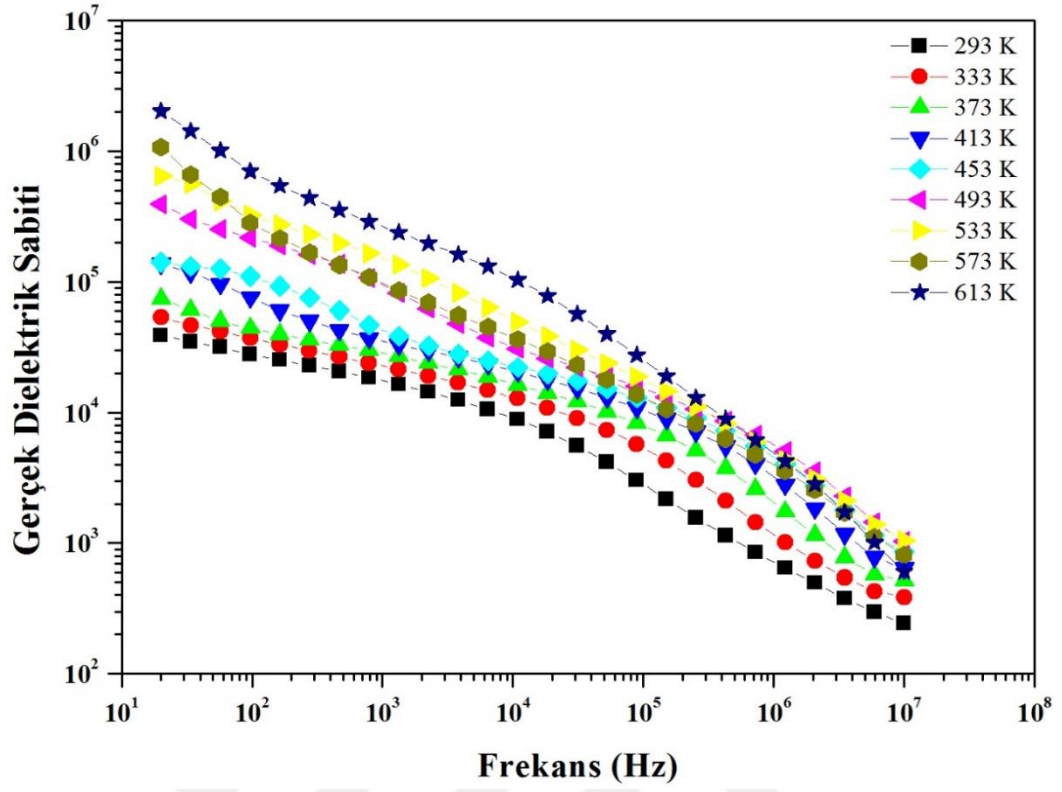
Tablo 4.3. Manyetik ölçüm sonuçlarından elde edilen manyetizasyon ve koersitive değerleri.

X	$M_s(\text{emu/g})$	$4\pi M_s(\text{gauss})$	$M_r(\text{emu/g})$	M_r/M_s	$H_C(\text{Oe})$
Konsantrasyonu					
0,1	2,39	30,01	0,08	0,03347	40,0
0,2	1,82	22,85	0,09	0,04945	125
0,3	0,43	5,400	0,03	0,06977	105
0,4	4,91	61,66	0,55	0,11202	155
0,5	2,88	36,17	0,30	0,10417	150

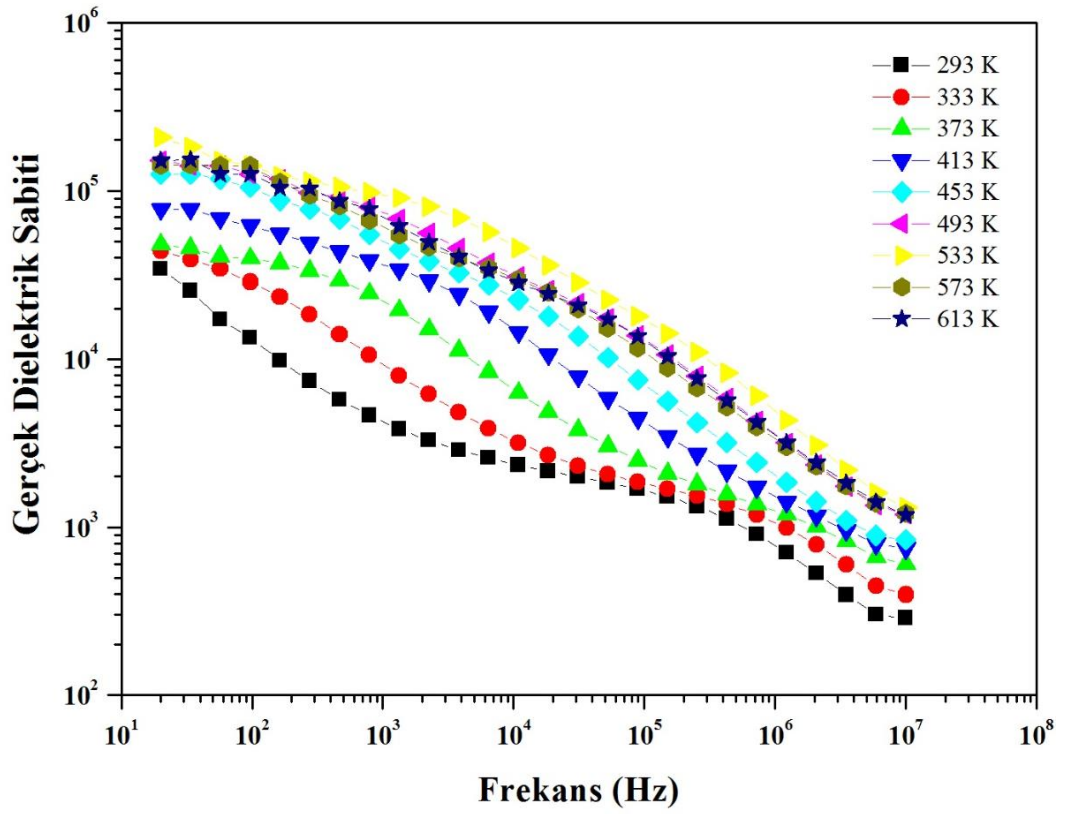
4.6. Dielektrik Ölçüm Sonuçları

4.6.1. Frekans bağımlılığı

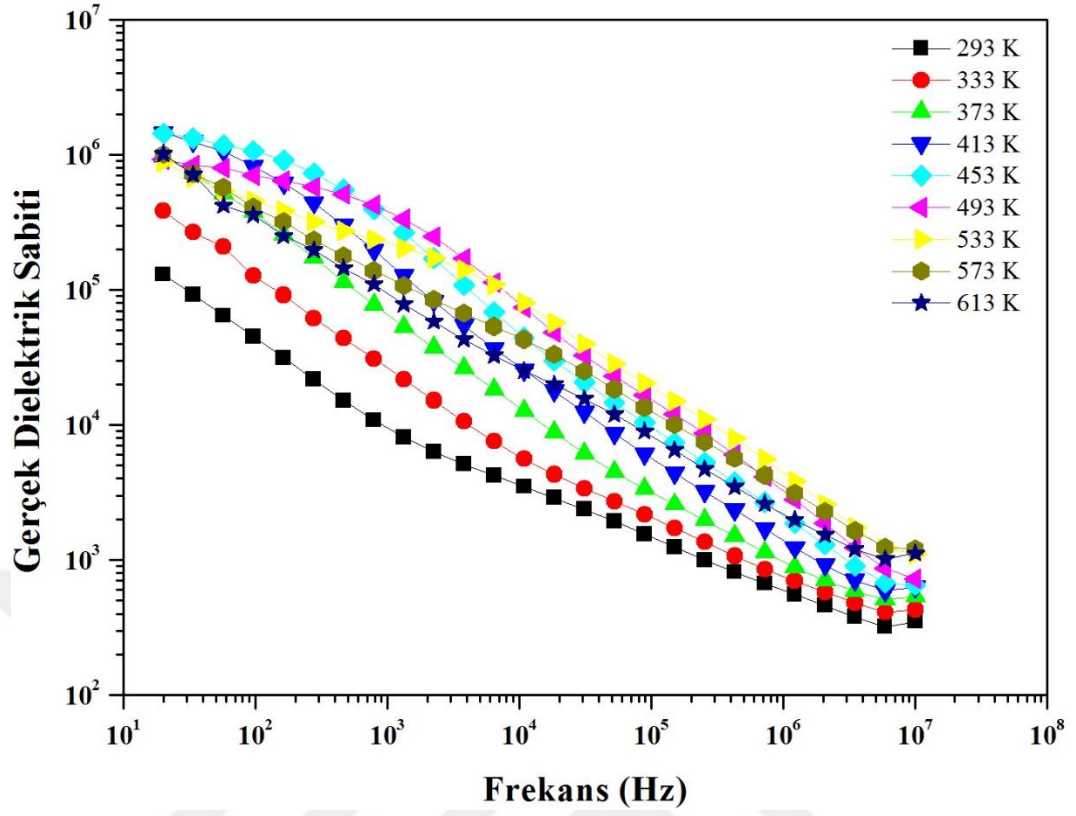
Şekil 4.20.'den Şekil 4.25.'e kadar tüm numunelerin gerçek dielektrik sabitinin 20 Hz - 10 MHz arasındaki değişimi farklı sıcaklık değerleri için verilmiştir. Düşük frekanslardaki büyük frekans dağılımını yüksek frekanslarda, neredeyse frekanstan bağımsız bir form takip etmiştir. Dielektrik sabitindeki düşüş, elektriksel durulma sürecine atfedilebilir. Aynı zamanda dielektrik sabitinin değeri tüm frekanslarda sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Dielektrik sabinin frekansla azalan bir tutum sergilemesi ferritler için normal bir durumdur ve Maxwell-Wagner tipi polarizasyon esaslarıyla açıklanabilir (Şaşmaz Kuru ve ark., 2017). Bu modele göre ferritlerin yapılarının iki tabakadan oluştuğu varsayılmaktadır. İlk büyük taneciklerden oluşan iletim tabakasıdır. Diğer tabaka ise iletim olarak zayıf olan tane sınırlarından oluşur. Ferritlerdeki polarizasyon, iletim sürecine benzer bir mekanizma ile elektronların Fe^{+2} ve Fe^{+3} iyonları arasında atlaması ile oluşur. Dışarıdan uygulanan elektrik alan ile azalan frekansla polarizasyon azalır. Çünkü yüksek frekanslarda Fe^{+2} ve Fe^{+3} arasındaki değişim uygulanan alanı yakalayamaz. Düşük frekanslardaki yüksek ϵ' mikroyapı farklılıkları, morfolojik faz sınırları, gözenekler, kusurlar sonucudur. Yüksek frekanslardaki düşük dielektrik sabiti değeri numunenin uygulamada kullanılabilirliğini gösterir.



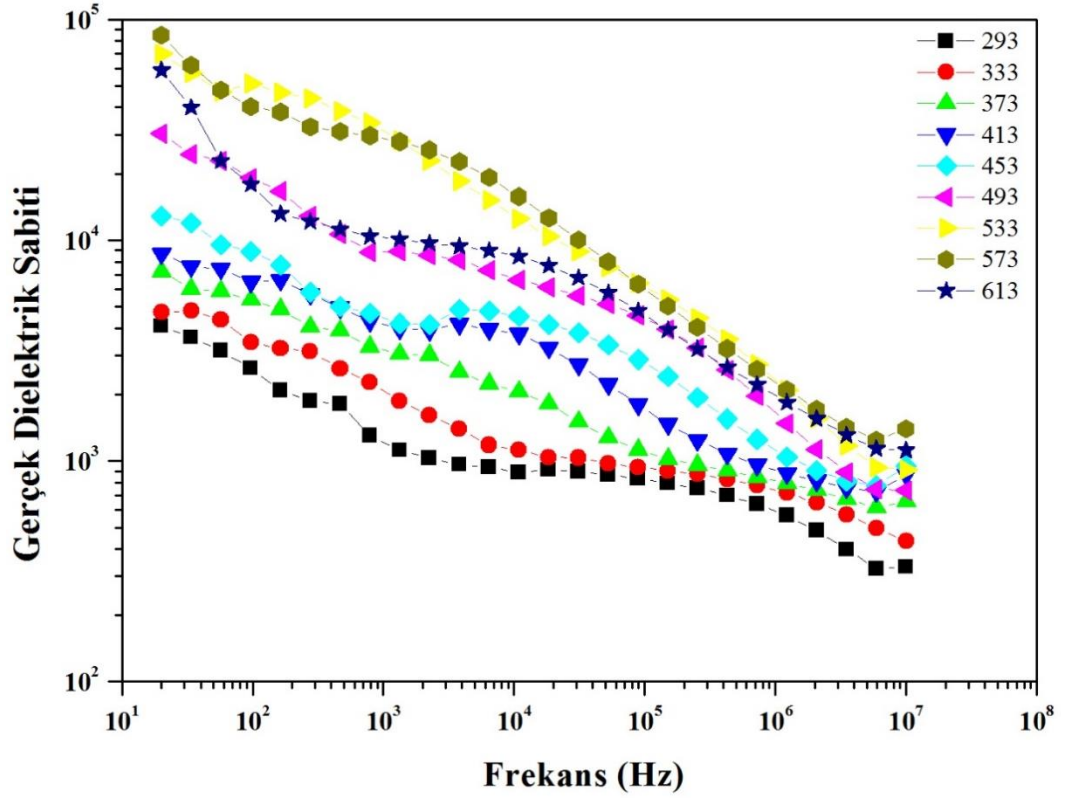
Şekil 4.20. $x=0$ için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



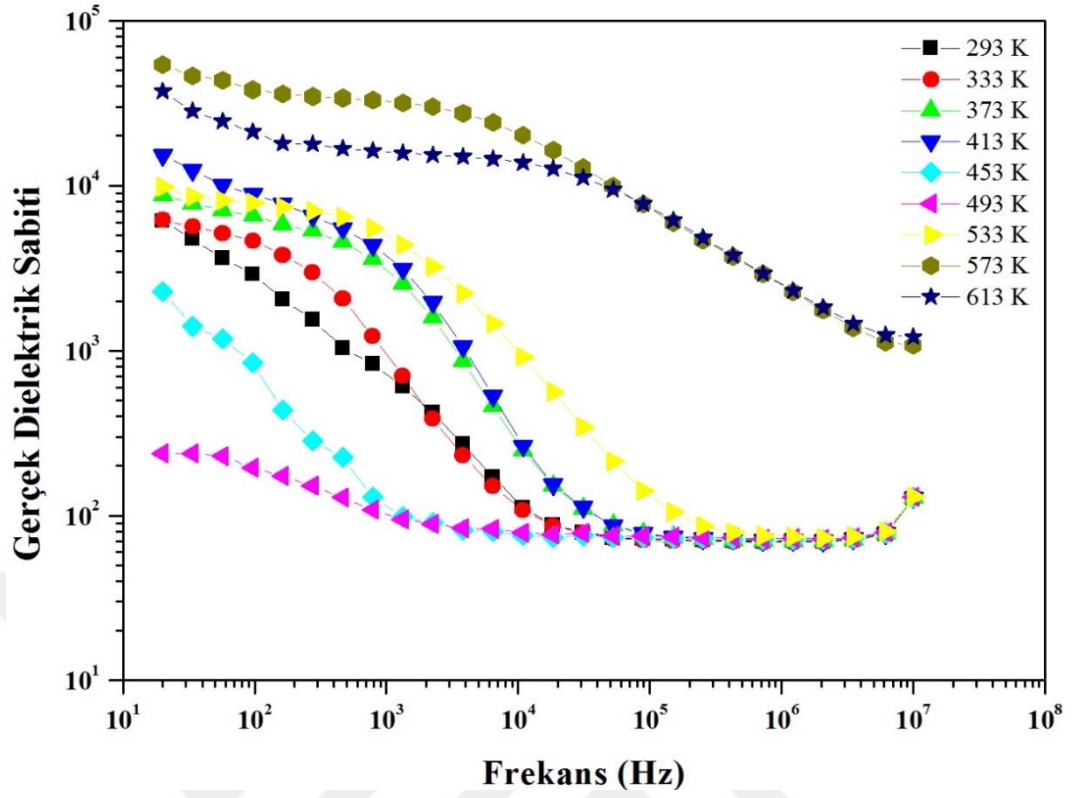
Şekil 4.21. $x=0,1$ için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



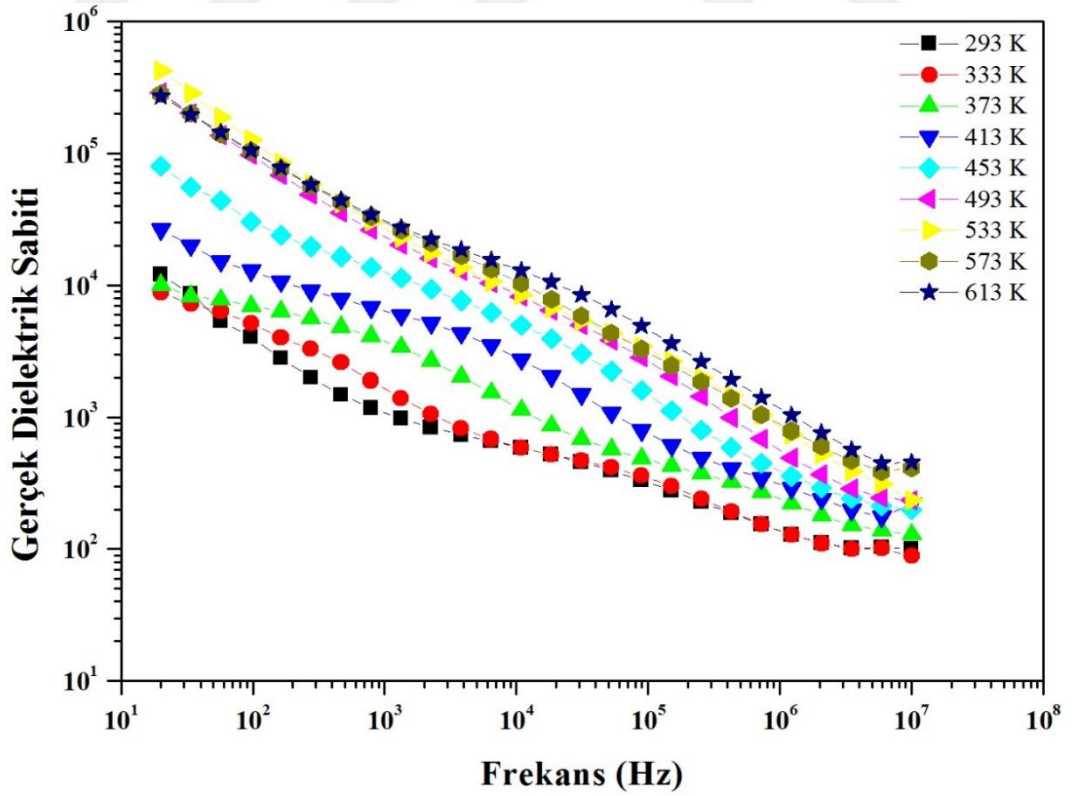
Şekil 4.22. $x=0,2$ için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.23. $x=0,3$ için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



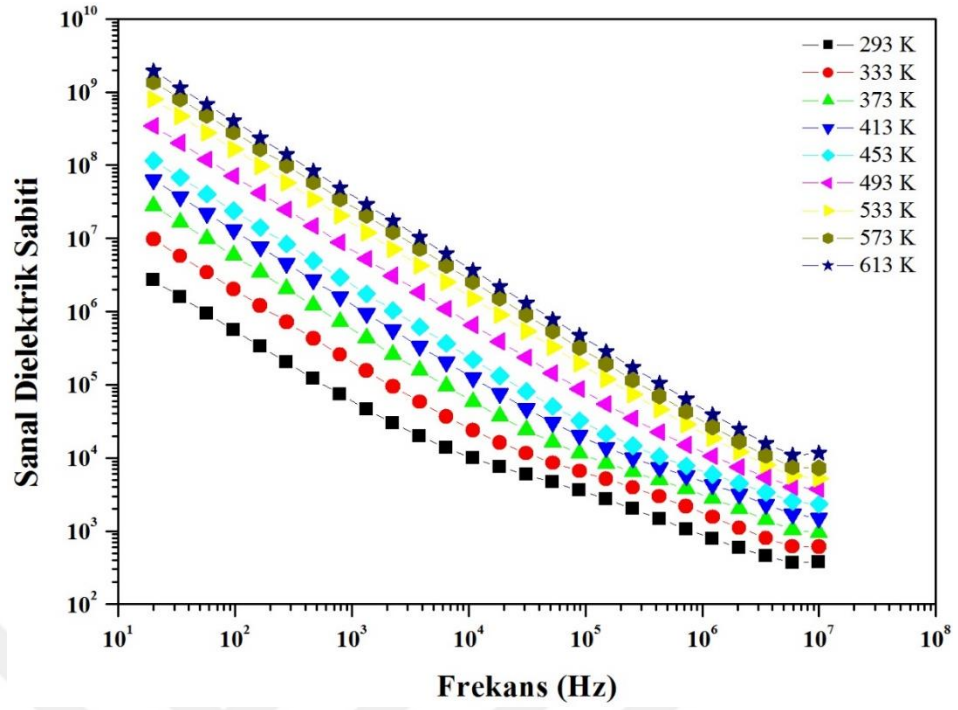
Şekil 4.24. $x=0,4$ için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



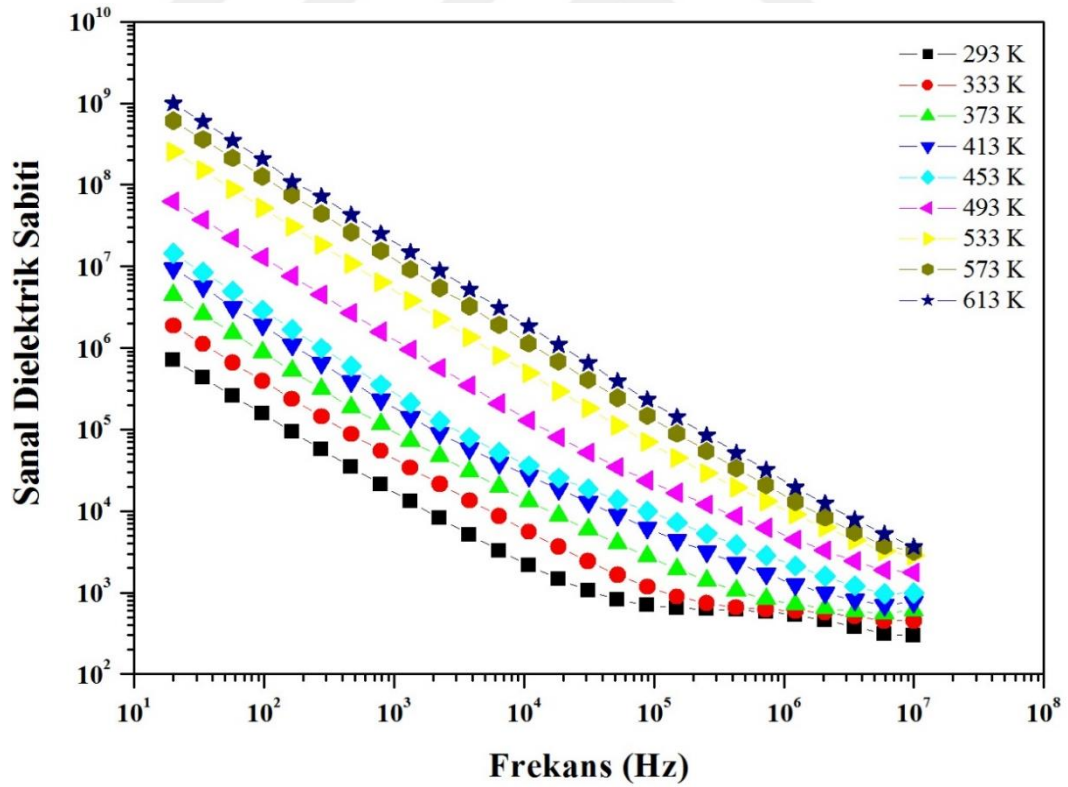
Şekil 4.25. $x=0,5$ için gerçek dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.

Şekil 4.26.'dan Şekil 4.31.'e kadar tüm numuneler için dielektrik geçirgenliğin sanal kısmının frekansa bağlı değişimi farklı sıcaklıklar için gösterilmiştir. Sanal dielektrik geçirgenlik değeri dielektrik kayıp olarak da tanımlanabilir. Dielektrik geçirgenliğin sanal kısmı artan frekansla azalarak bir minimum değere ulaşmıştır. Tane sınırları düşük frekanslarda, tanecikler ise yüksek frekanslarda aktif olduklarından, tane sınırlarındaki polarizasyon için düşük frekanslarda daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulur ve dolayısı ile enerji kaybı yüksek olur. Bununla birlikte yüksek frekanslardaki tanecikler polarizasyon için daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar ve yüksek frekanslardaki enerji kaybı daha azdır. Polarizasyon mekanizmasına ilişkin söylenebilecek şeyler şunlardır: yüzeyel polarizasyon düşük frekanslarda baskınken, elektronik ve iyonik polarizasyonlar yüksek frekanslarda görülür. Bu durum, yüzey ve sınırlardaki dipollerde dalgalanmalara yol açabilir. Dahası, dielektrik kayıp yüksek frekanslarda sıcaklık ve frekansın her ikisine de duyarlı hale gelir. Ayrıca dielektrik kayıp düşük frekanslarda sonsuz olabilirken, yüksek frekanslarda önemsizdir.

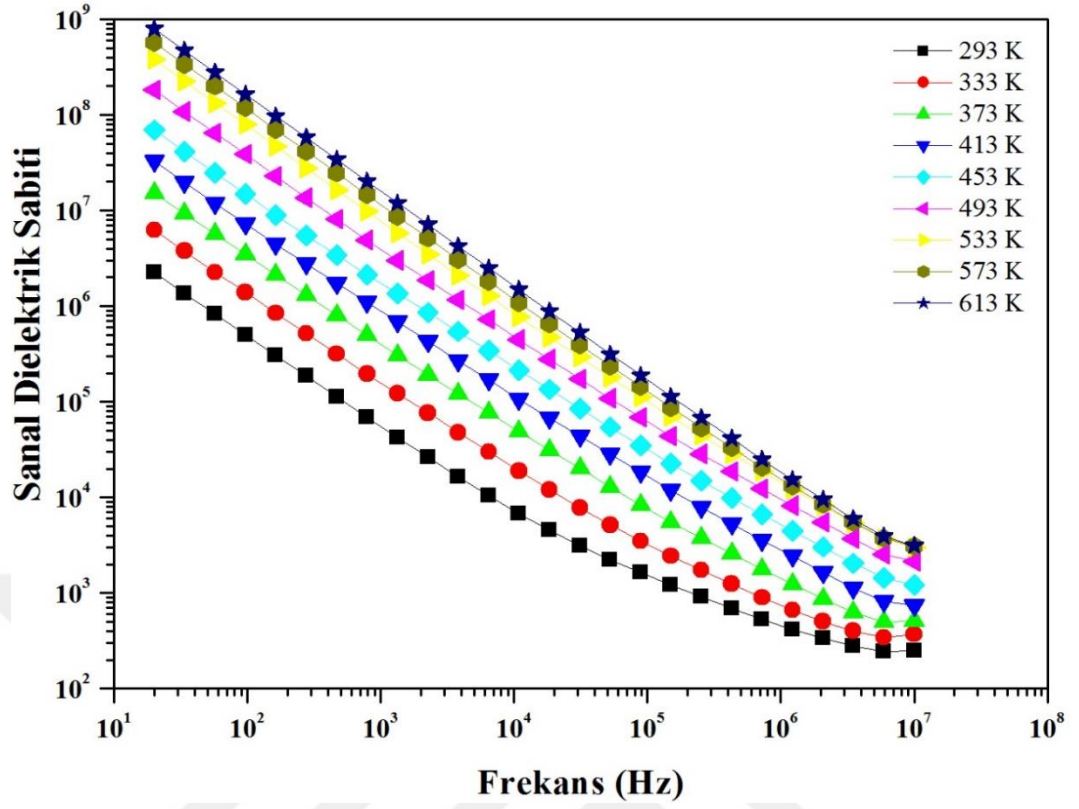
Durulmaya atfedilebilecek hiç maksimum pik görülmemiş olmasını, numunemiz için çalışılan sıcaklık ve frekans aralığının sınırlı olmasından kaynaklan bir durum olarak yorumlayabiliriz.



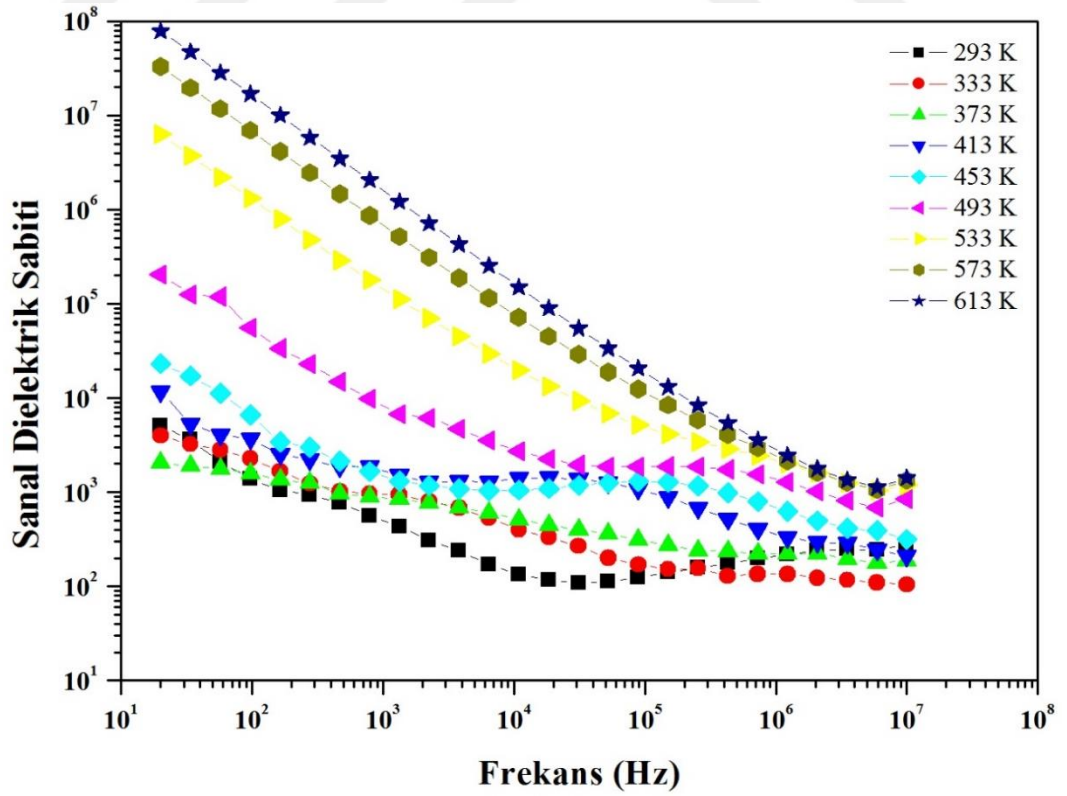
Şekil 4.26. $x=0$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



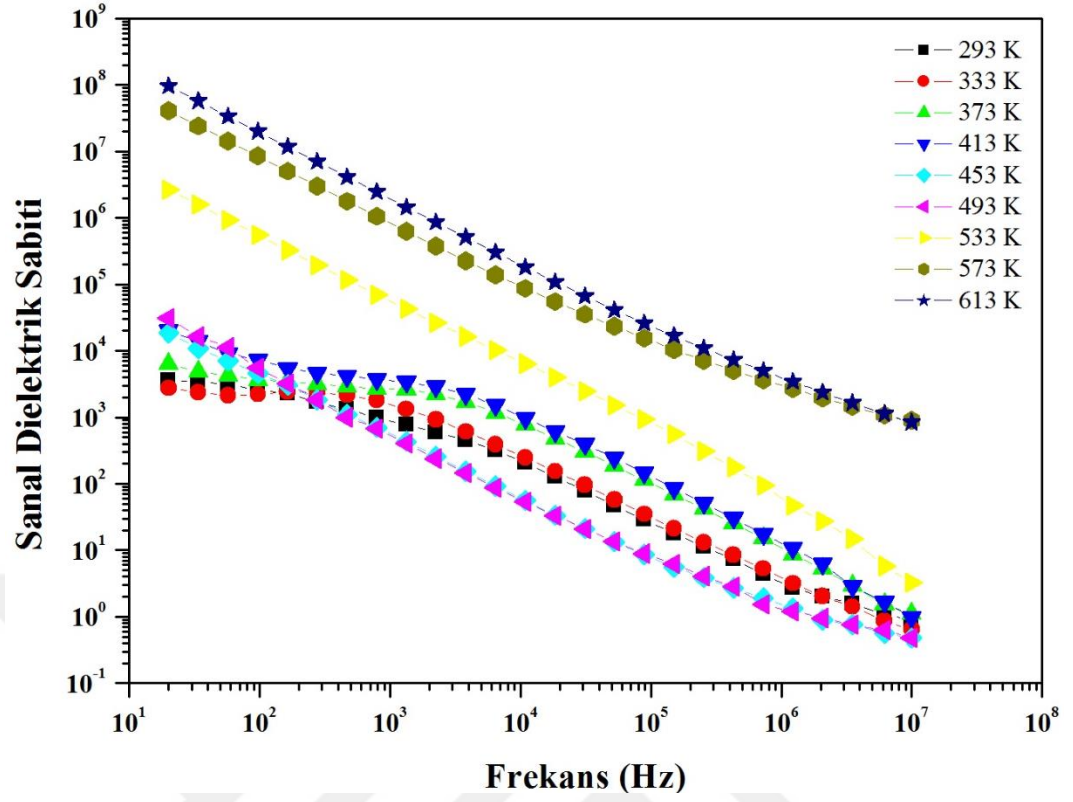
Şekil 4.27. $x=0.1$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



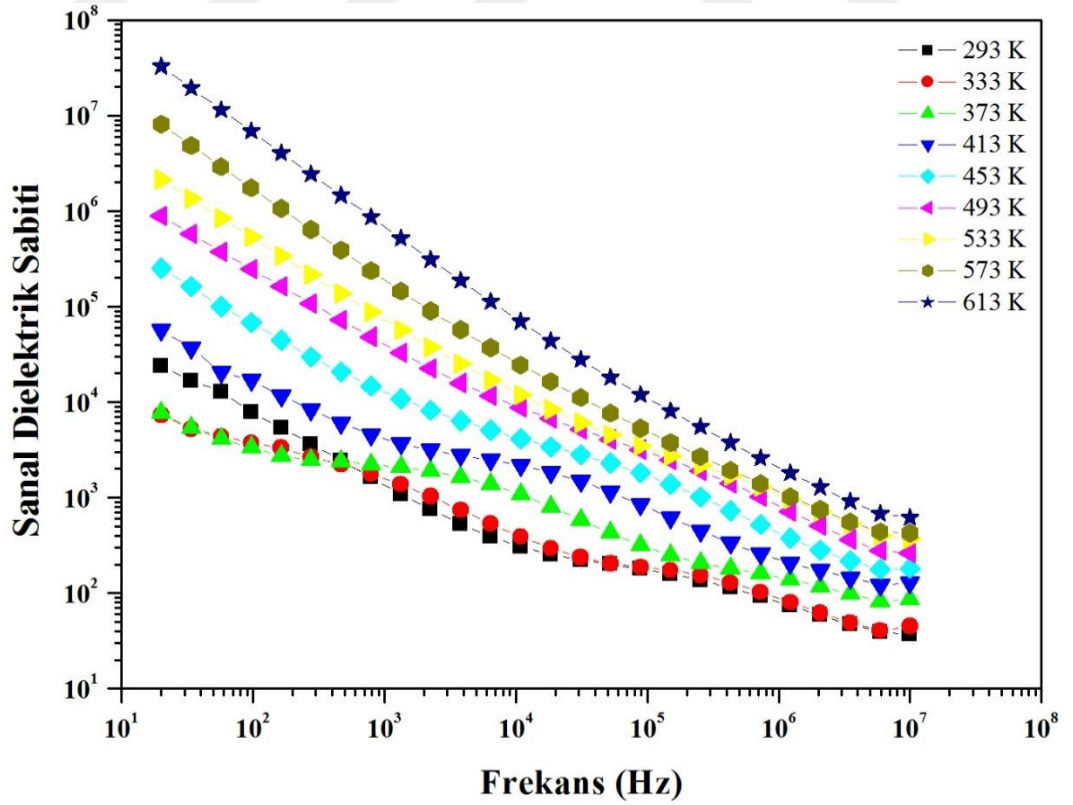
Şekil 4.28. $x=0,2$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.29. $x=0,3$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.

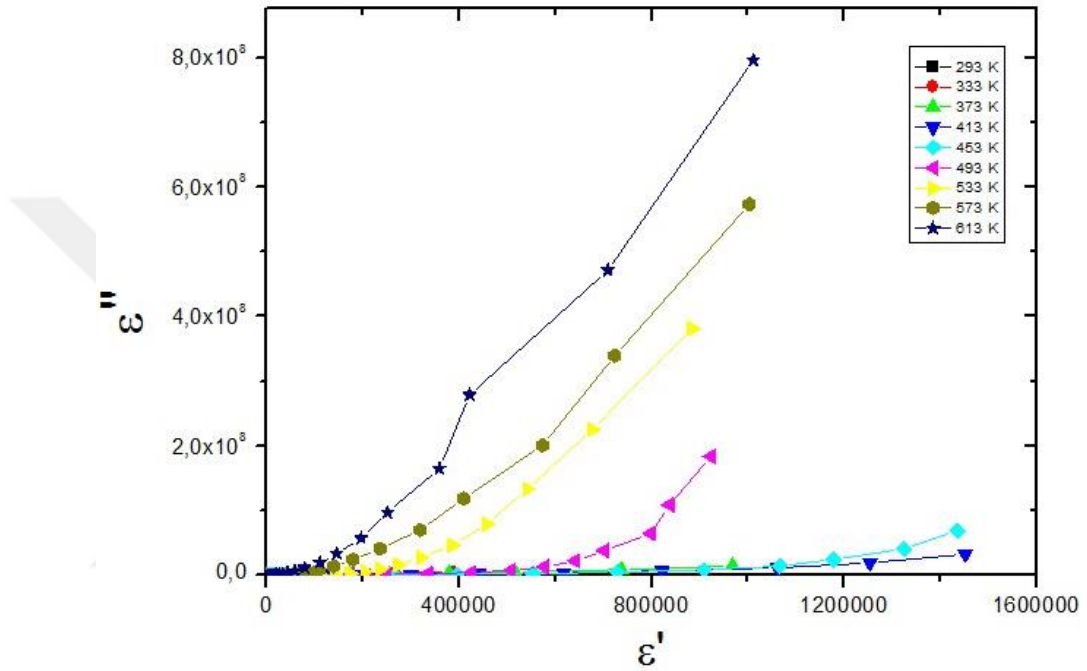


Şekil 4.30. $x=0,4$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.31. $x=0,5$ için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişim grafiği.

Şekil 4.32.'de dielektrik davranışın analiz edilebilmesi için $x=0,2$ numunesine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına karşı çizilmiş grafiği gösterilmiştir. Şekil 4.32.'den açıkça görülebildiği gibi karmaşık geçirgenliğin reel kısmının sanal kısmına karşı çizilen grafiğinde durulma gözlenmediği için impedans grafiklerine ihtiyaç duyulur.



Şekil 4.32. $x=0,2$ numunesine ait dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına karşı çizilmiş grafiği.

İletkenlik, dielektrik sabiti gibi dielektrik malzemelerin elektriksel özelliklerine, tane ve tane sınırlarının katkısını iyi inceleyebilmek için impedans spektroskopisi tekniği kullanılır. Maxwell- Wagner kapasitans modeli kullanılarak ϵ' ve ϵ'' değerleri kullanılarak reel ve sanal impedans değerleri hesaplanabilir.

$$\epsilon' = \frac{Z''}{\omega C_0(Z'^2 + Z''^2)} \quad (4.1)$$

$$\epsilon'' = \frac{Z'}{\omega C_0(Z'^2 + Z''^2)} \quad (4.2)$$

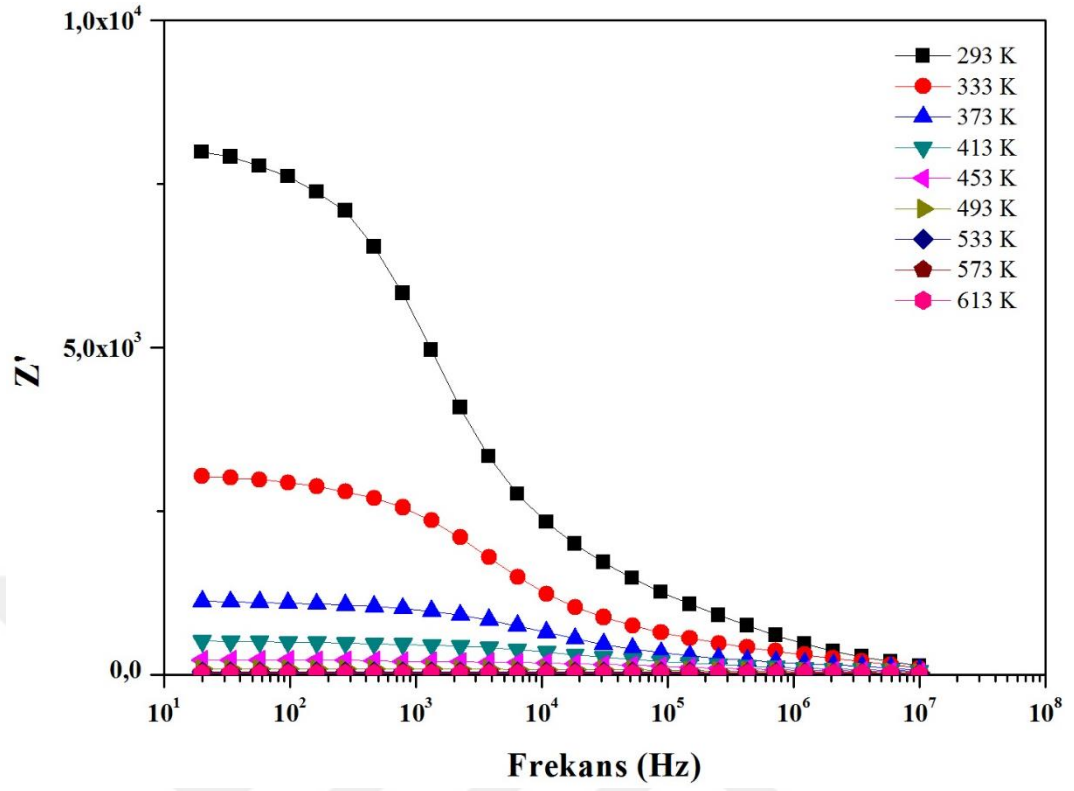
Bu denklemlerden türettiğimiz impedansın gerçek ve sanal kısımları aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir:

$$Z' = \frac{\tan \theta}{\omega C_0 \epsilon' (\tan^2 \theta + 1)} \quad (4.3)$$

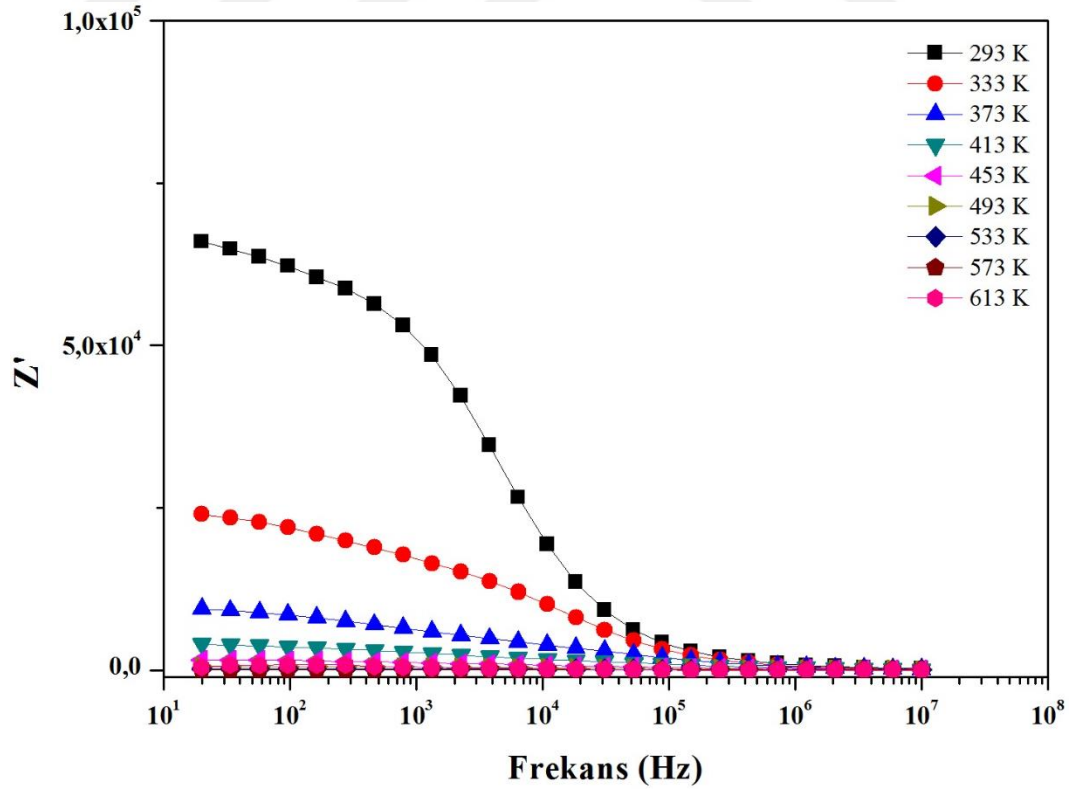
$$Z'' = \frac{1}{\omega C_0 \epsilon' (\tan^2 \theta + 1)} \quad (4.4)$$

Şekil 4.33.'ten Şekil 4.38.'e kadar tüm numuneler için gösterilen Z' -f grafiklerinden görüldüğü üzere, düşük frekanslarda Z' neredeyse sabit ve artan frekansla monoton bir şekilde azalmaktadır. Yüksek frekanslarda ise Z' neredeyse sabit ve frekanstan bağımsız bir tutum sergiler. Düşük sıcaklık ve düşük frekans bölgelerindeki yüksek Z' değerinin fazla polarizasyondan kaynaklandığı düşünülebilir. Ayrıca dirençli tane sınırlarının da iletken hale geldiği söylenebilir.

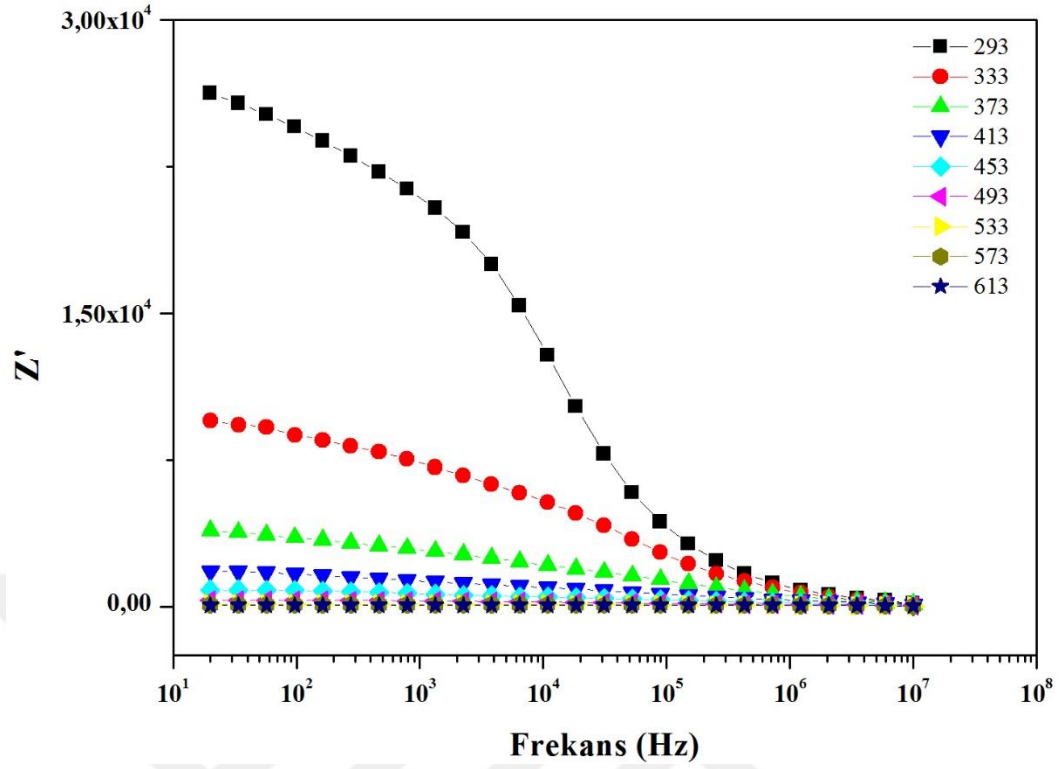
Tane sınırlarının neredeyse çok yüksek sıcaklık ve frekanslarda durulmaya uğramadığı gözlenmiştir. Şekil 4.39.'dan Şekil 4.44.'e kadar gösterilen sanal impedansa karşılık frekans grafiklerinde, sıcaklık arttığında Z'' piklerinin belirgin genişlemeleri sistemdeki durulma sürecinin sıcaklık bağımlı olduğunu belirtir. Durulma süreci farklı sıcaklıklardaki hareketsiz yüklerin varlığı sebebiyle oluşabilir. Şekil aynı zamanda durulma zamanının yaygınlığına dikkat çeker. Durulma süreci sıcaklığa bağlıdır ve burada açıkça tek bir durulma zamanı yoktur. Bu yüzden farklı sıcaklıklarda oluşan pikler kendi durulma zamanlarına sahiptirler. Bu davranış net bir şekilde yüzey yükü polarizasyonu ile ilişkilidir.



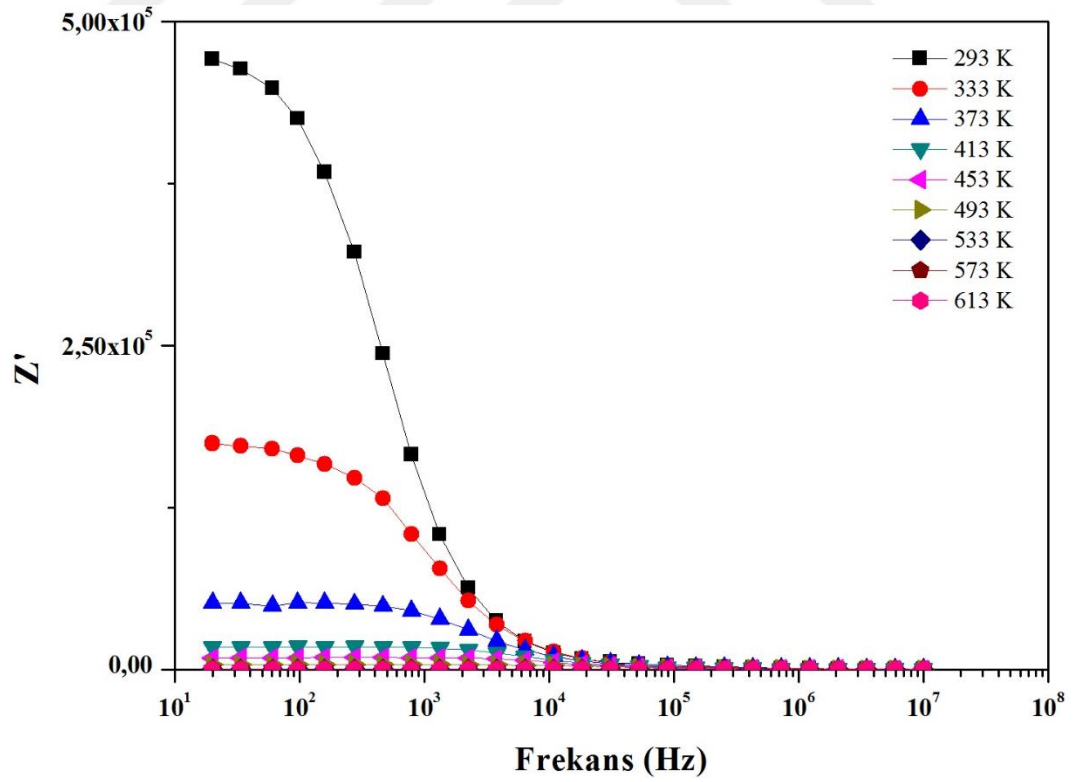
Şekil 4.33. $x=0$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.



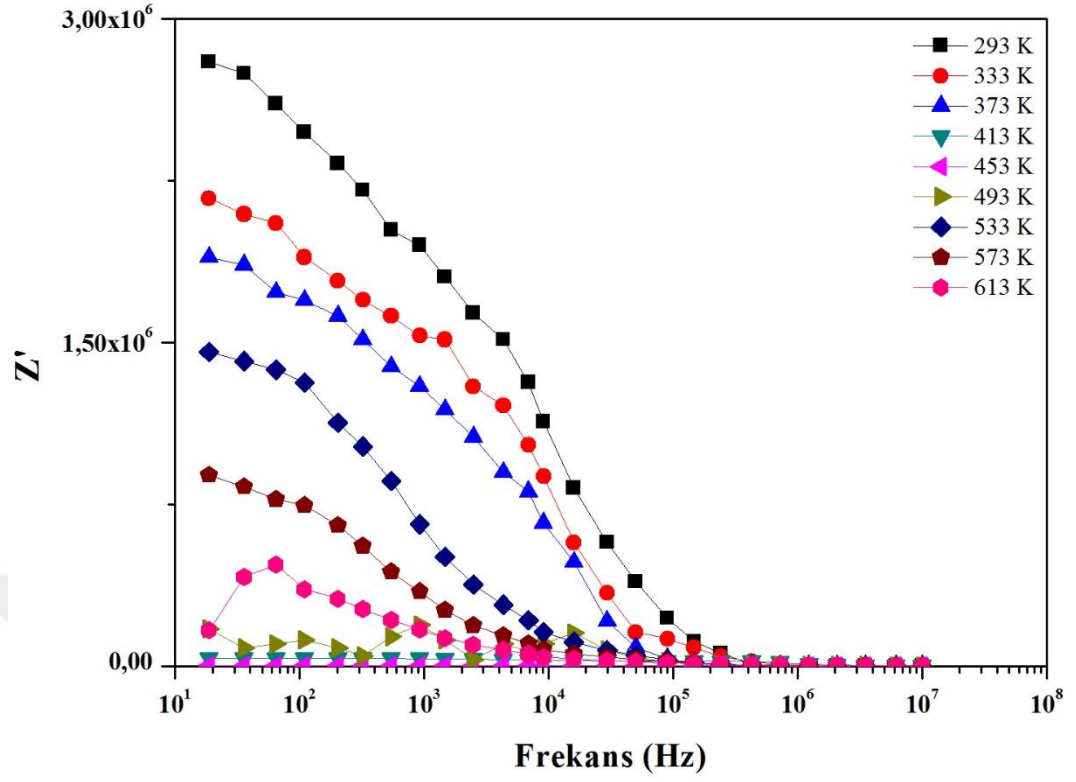
Şekil 4.34. $x=0.1$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.



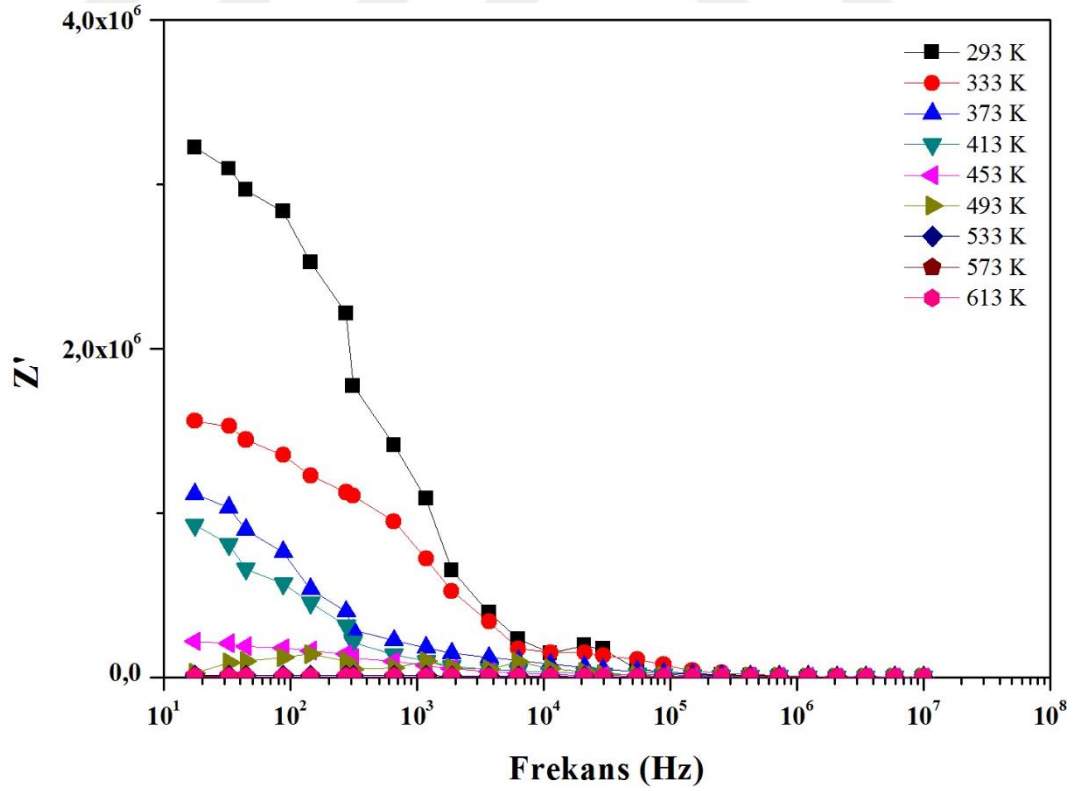
Şekil 4.35. $x=0,2$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.



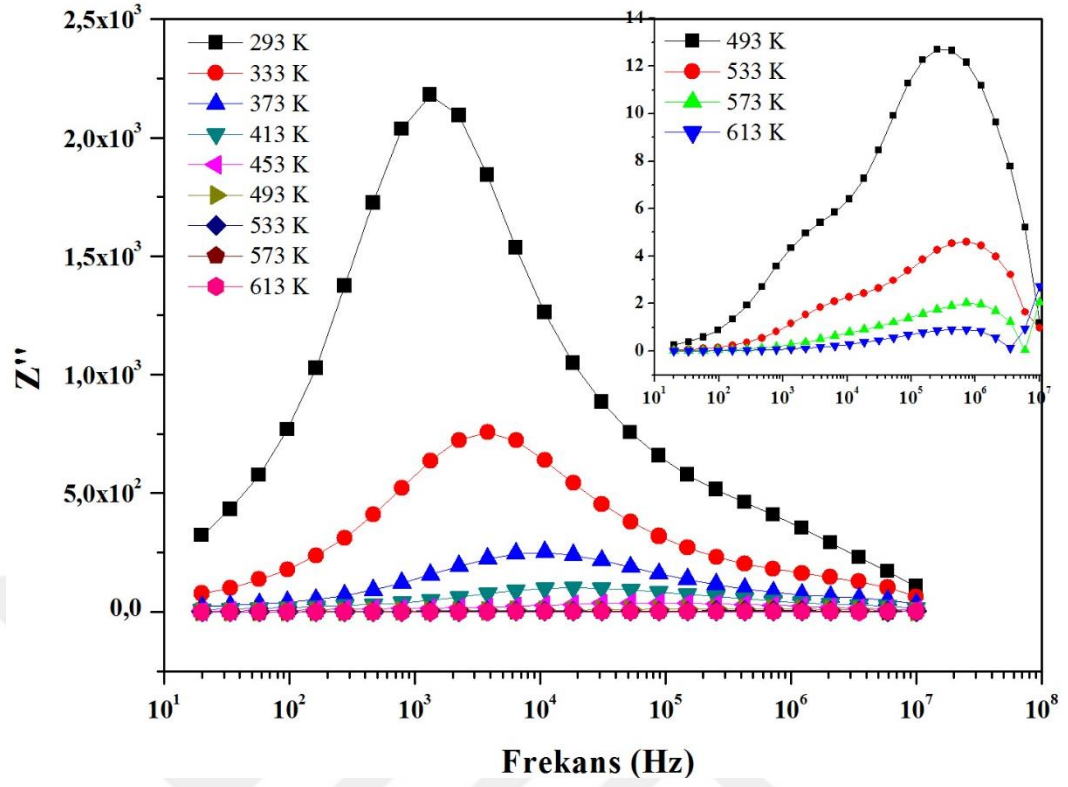
Şekil 4.36. $x=0,3$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.



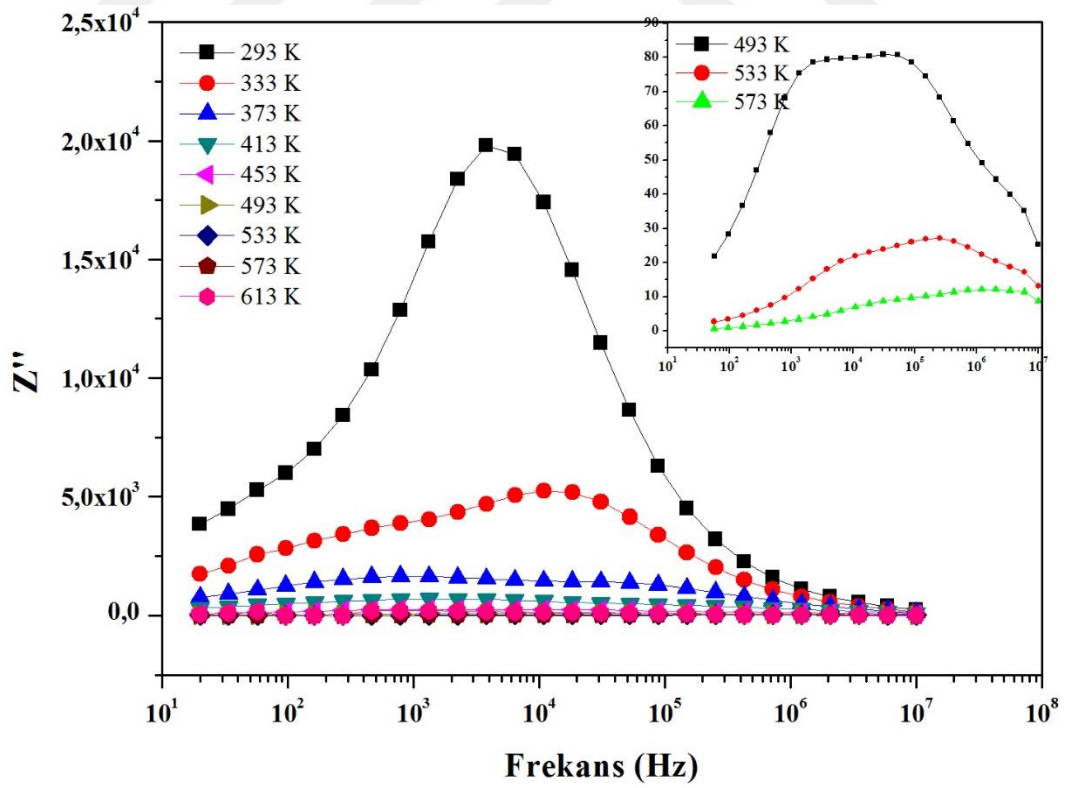
Şekil 4.37. $x=0,4$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.



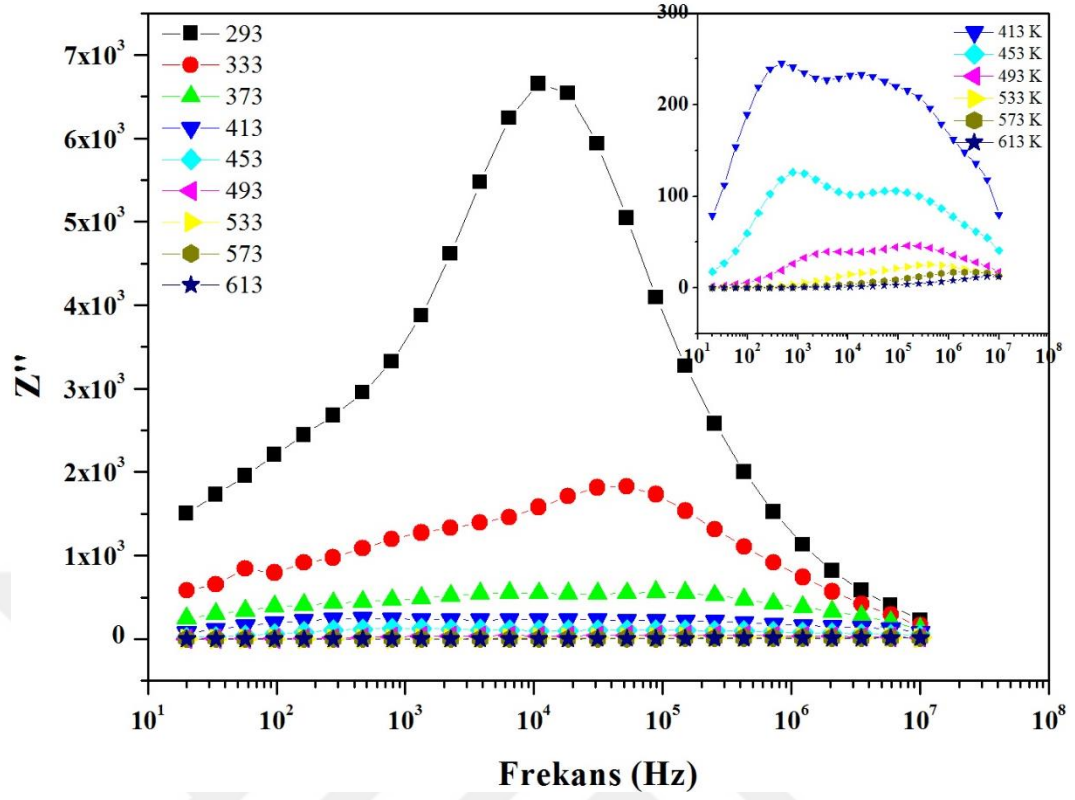
Şekil 4.38. $x=0,5$ için gerçek impedansın frekansa göre değişim grafiği.



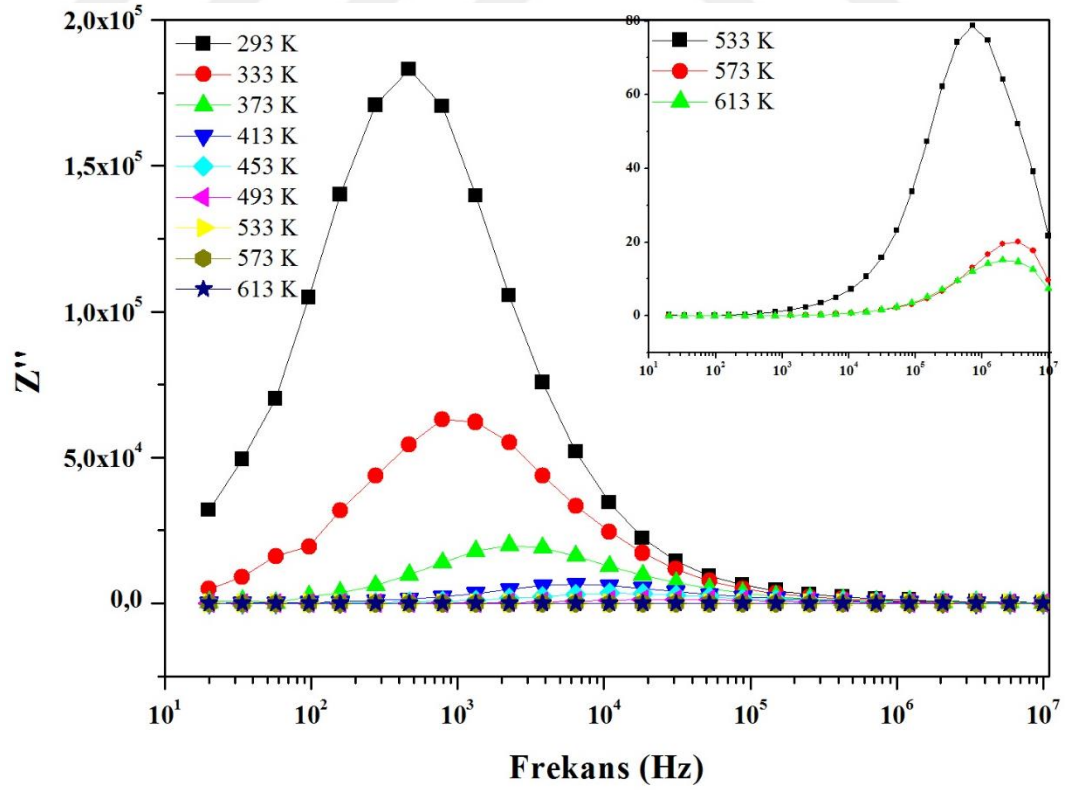
Şekil 4.39. $x=0$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.



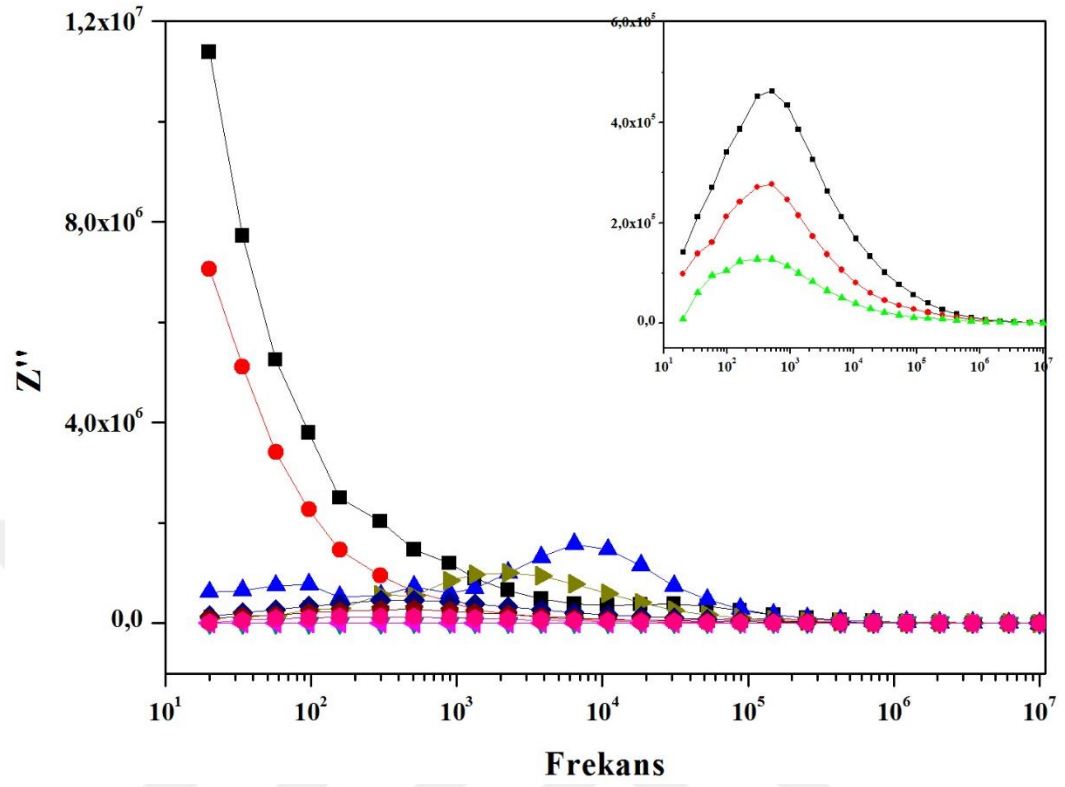
Şekil 4.40. $x=0.1$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.



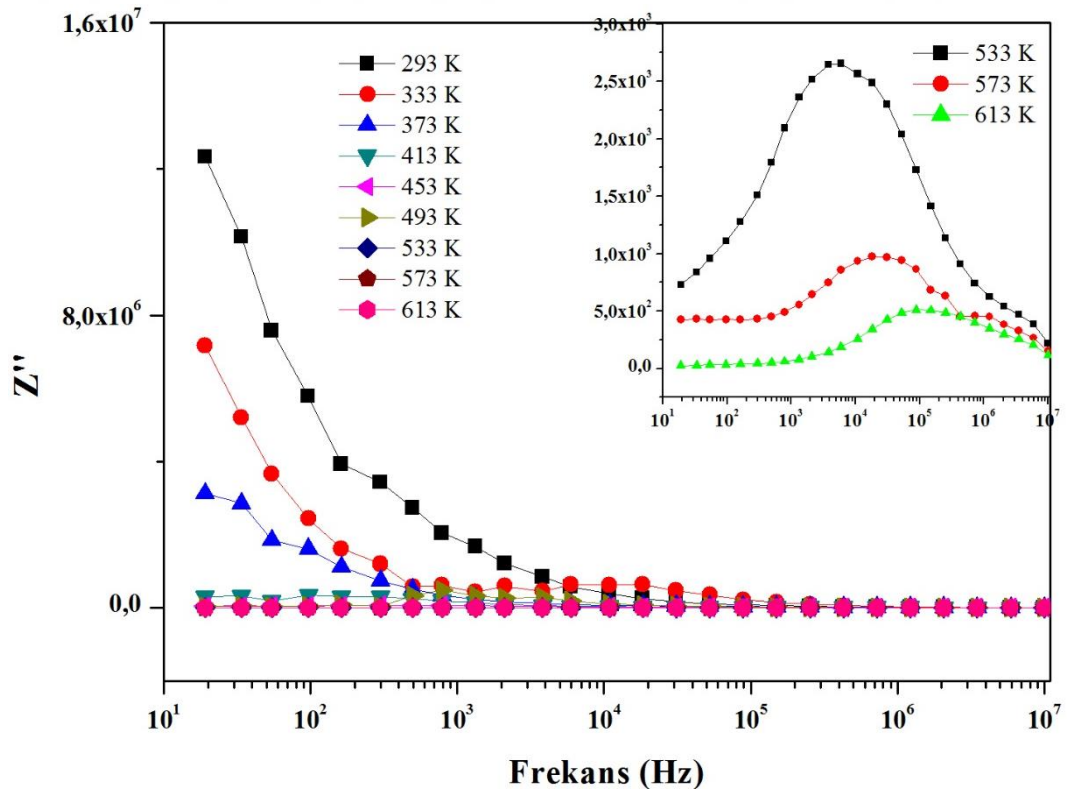
Şekil 4.41. $x=0,2$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.42. $x=0,3$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.

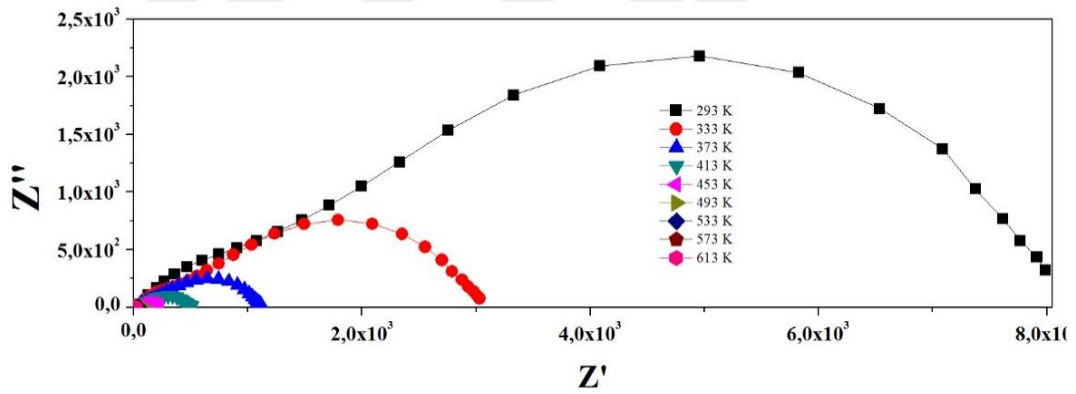


Şekil 4.43. $x=0,4$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.

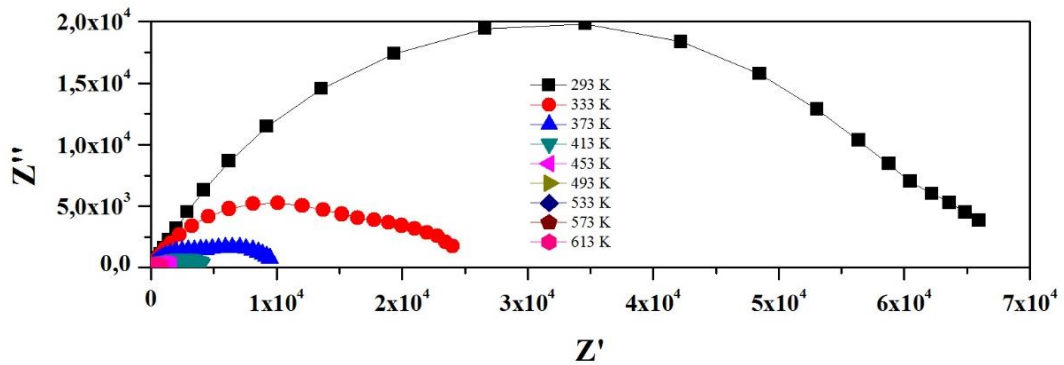


Şekil 4.44. $x=0,5$ için sanal impedansın frekansa göre değişim grafiği.

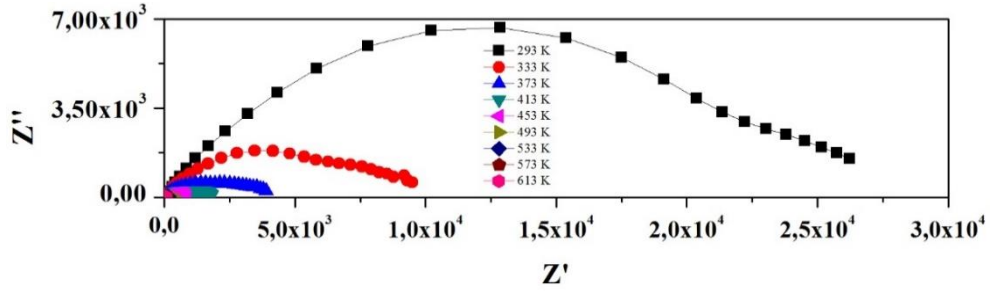
Şekil 4.45.'ten, Şekil 4.50.'ye kadar tüm numuneler için sanal impedans değerlerinin gerçek impedans değerlerine göre değişimi gösterilmektedir. Bu grafikler, her konsantrasyon için, farklı sıcaklıklardaki dielektrik davranış hakkında bilgi vermektedir ve durulma mekanizmalarının analizi sanal impedans değerlerinin gerçeğe göre değişimi üzerinden yapılır. Her bir sıcaklık için eğriler üst üste binmiş farklı büyüklükteki çemberlerden oluşmaktadır. Sıcaklık arttıkça eğrilerin ve yarıçaplarının küçüldüğü açıktır. Ayrıca her eğrinin merkezinin gerçek impedans ekseninin altında kalması durulma mekanizmasının Cole-Cole modeli ile açıklanmasına imkân verir (Tabip ve ark., 2015). Bu model durulma olayında birbiri ile etkileşen dipolleri baz alır ve her sıcaklıktaki durulmanın bir dağılım gösterdiğini kabul eder. Ayrıca üst üste binmiş çemberlere karşılık gelen eşdeğer devre birbirine paralel bağlı bir sığa ve direnç setinden iki tanesinin seri bağlı hali ile temsil edilir (Şentürk ve ark, 2013). Bu eşdeğer devre Şekil 4.51.'de gösterilmektedir.



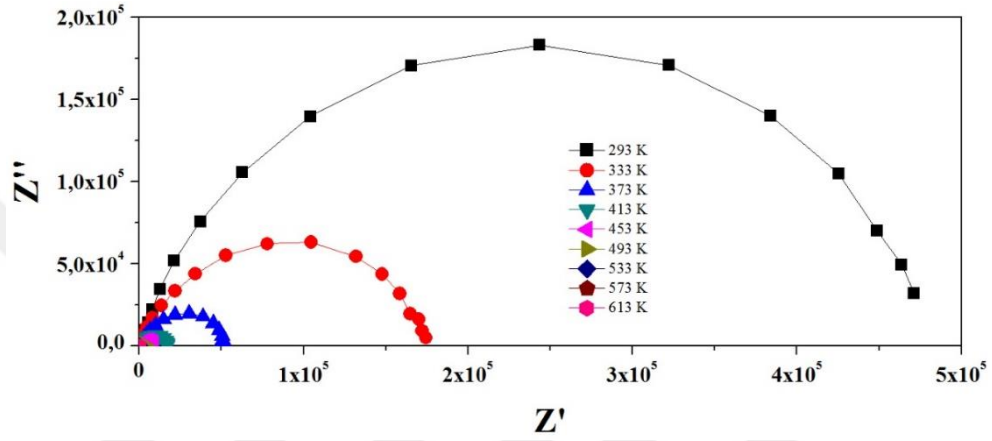
Şekil 4.45. $x=0$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.



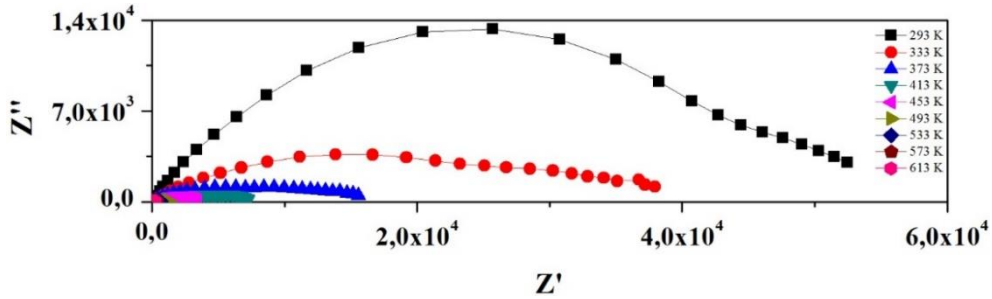
Şekil 4.46. $x=0,1$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.



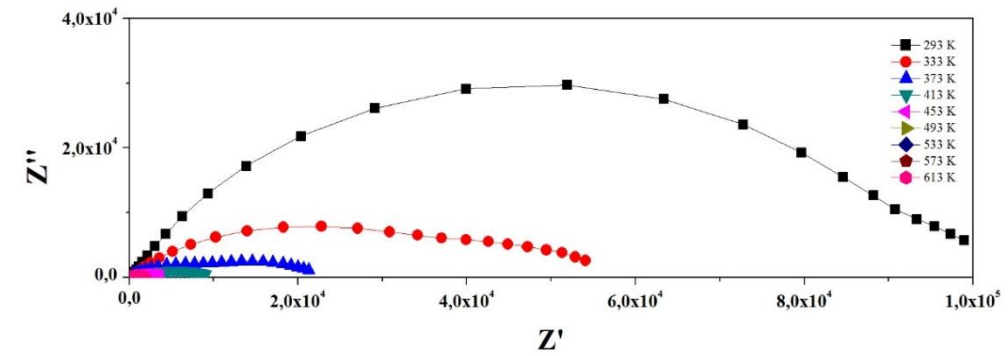
Şekil 4.47. $x=0.2$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.



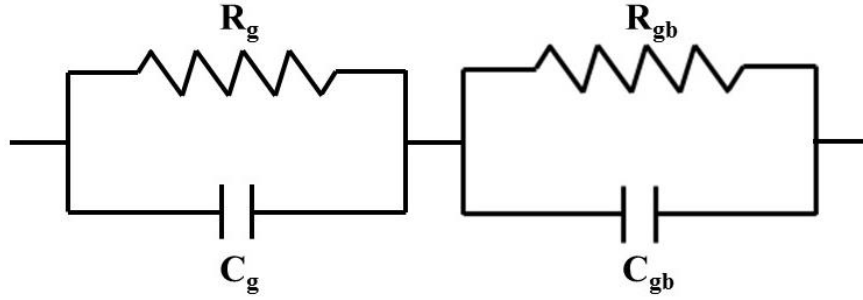
Şekil 4.48. $x=0.3$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.49. $x=0.4$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.50. $x=0.5$ için sanal impedansın gerçek impedansa göre değişim grafiği.



Şekil 4.51. Eşdeğer devre gösterimi.

Burada R_g tanelerin (grain) direncini, R_{gb} tane sınırlarının (grain boundary) direncini, C_g tanelerin sığasını ve C_{gb} ise tane sınırlarının sığasını temsil etmektedir.

İmpedans eğrilerindeki yarım çember eğrilerin numunenin tane sınırları ve tanelerden gelen etkin katkılarından oluştuğu beklenmektedir (Şentürk ve ark., 2013). Gözlemlenen yarım çemberler durulma sürecinin varlığını gösterir. Durulma zamanı Denklem 4.5 ile gösterilir:

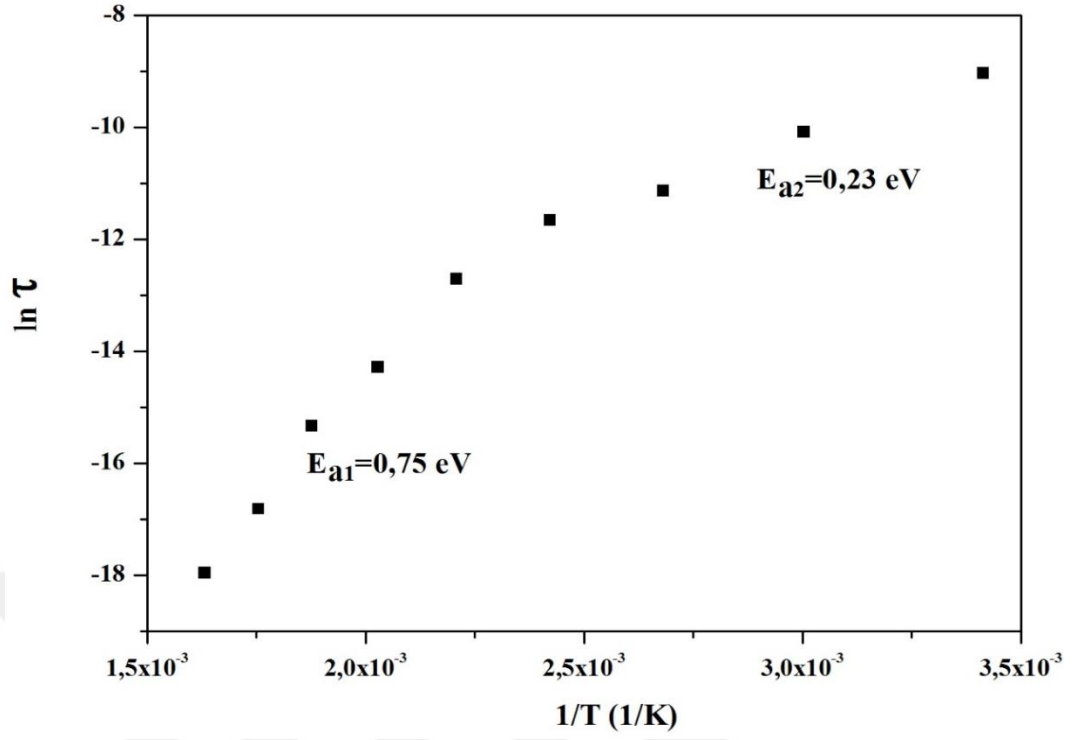
$$\tau = \frac{1}{\omega_{max}} \quad (4.5)$$

Burada τ durulma zamanı, ω_{max} ise durulmaya ulaşılan maksimum pikin açısal frekansıdır. Daha önce de söz ettiğimiz gibi her bir sıcaklık için farklı durulma zamanları olduğu düşünüldüğünden her bir eğri için durulma zamanları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ile $\ln \tau - 1/T$ grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.52.- Şekil 4.57.).

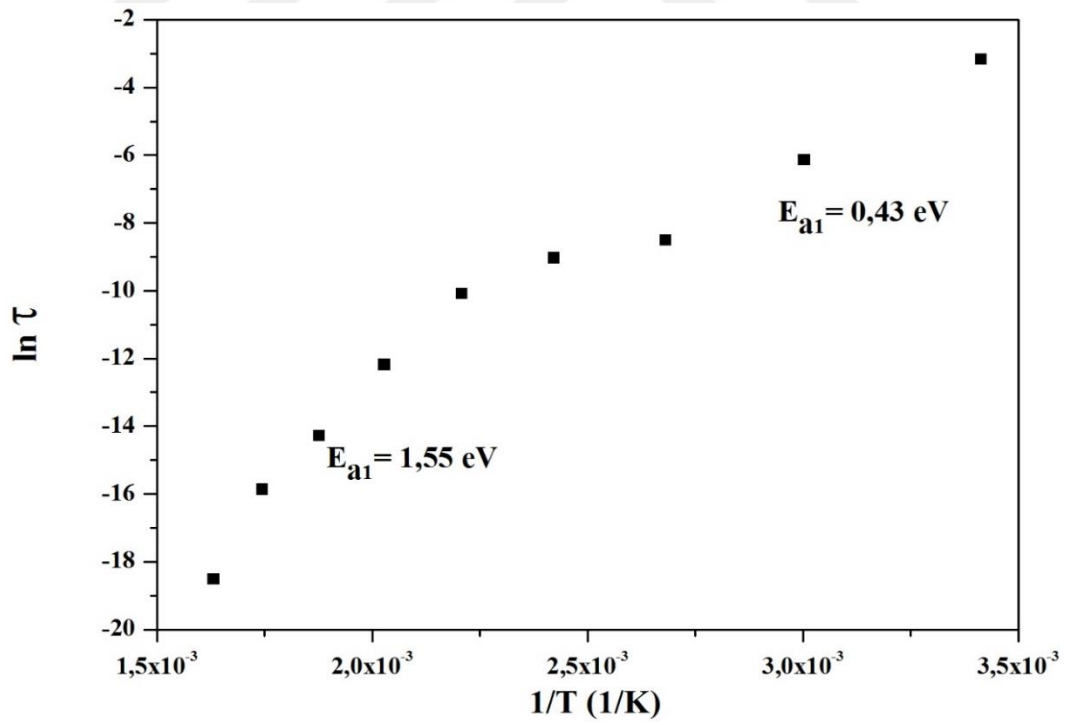
Hesapladığımız durulma zamanları bize aktivasyon enerjisini hesaplamamızda da yardımcı olur. Durulma zamanın üstel denklemi aşağıdaki gibidir (Denklem 4.6):

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_b T}\right) \quad (4.6)$$

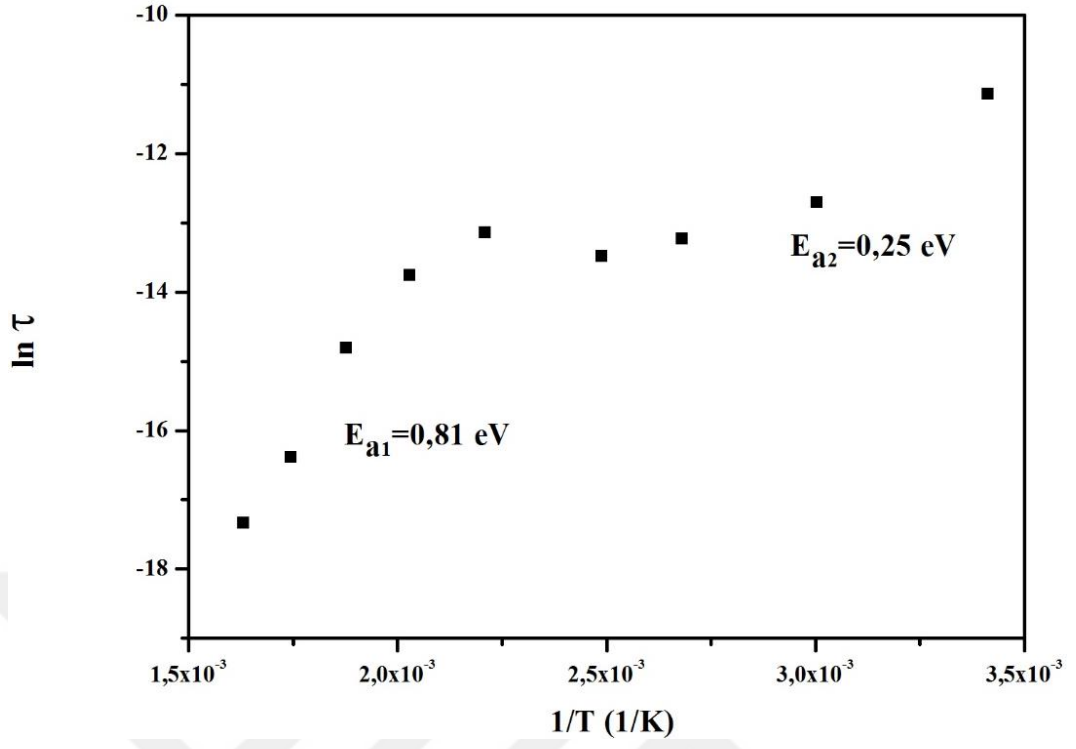
Bu eşitlikten yararlanarak $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiklerinin eğiminden aktivasyon enerjileri hesaplanabilir.



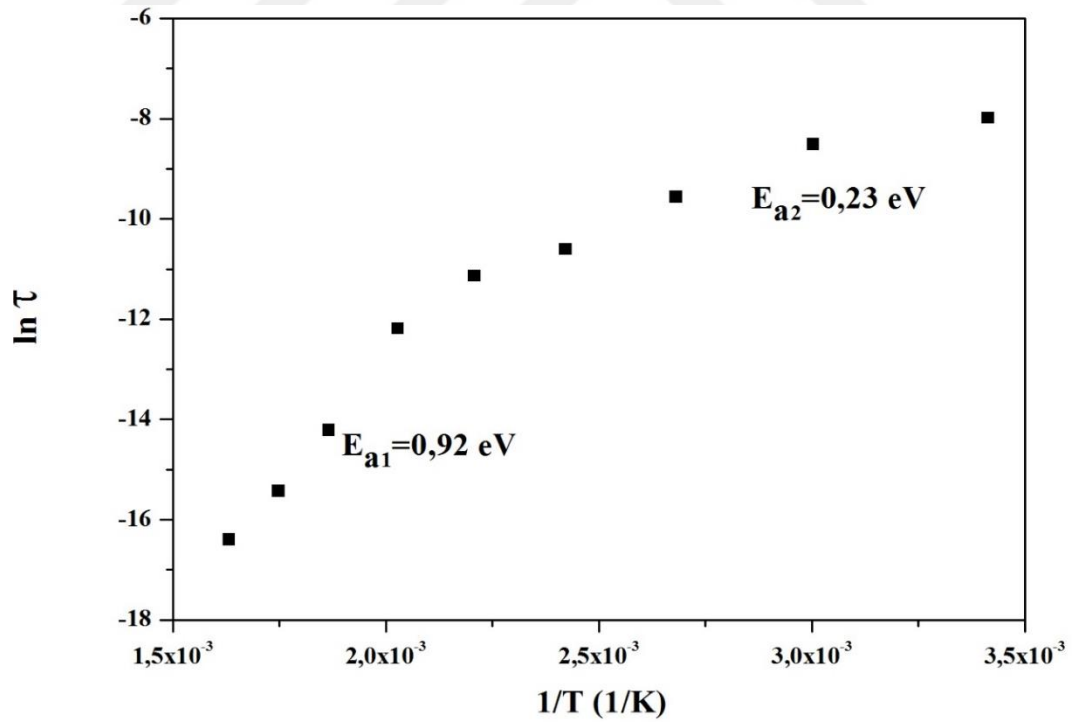
Şekil 4.52. $x=0$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.



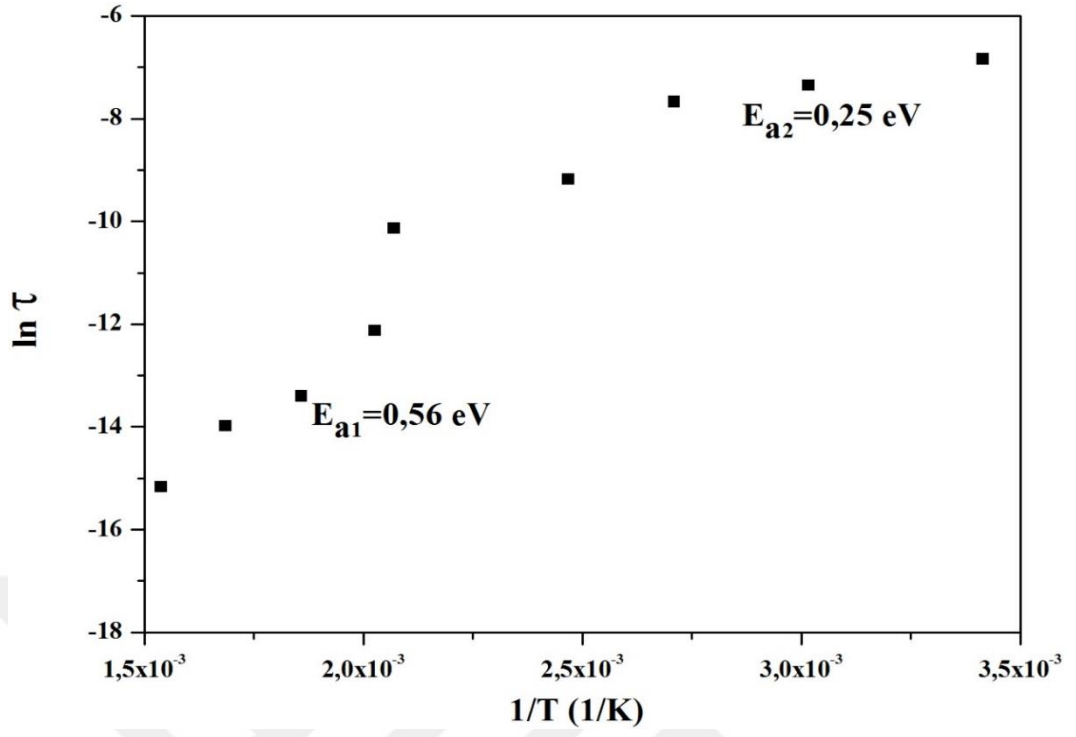
Şekil 4.53. $x=0,1$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.



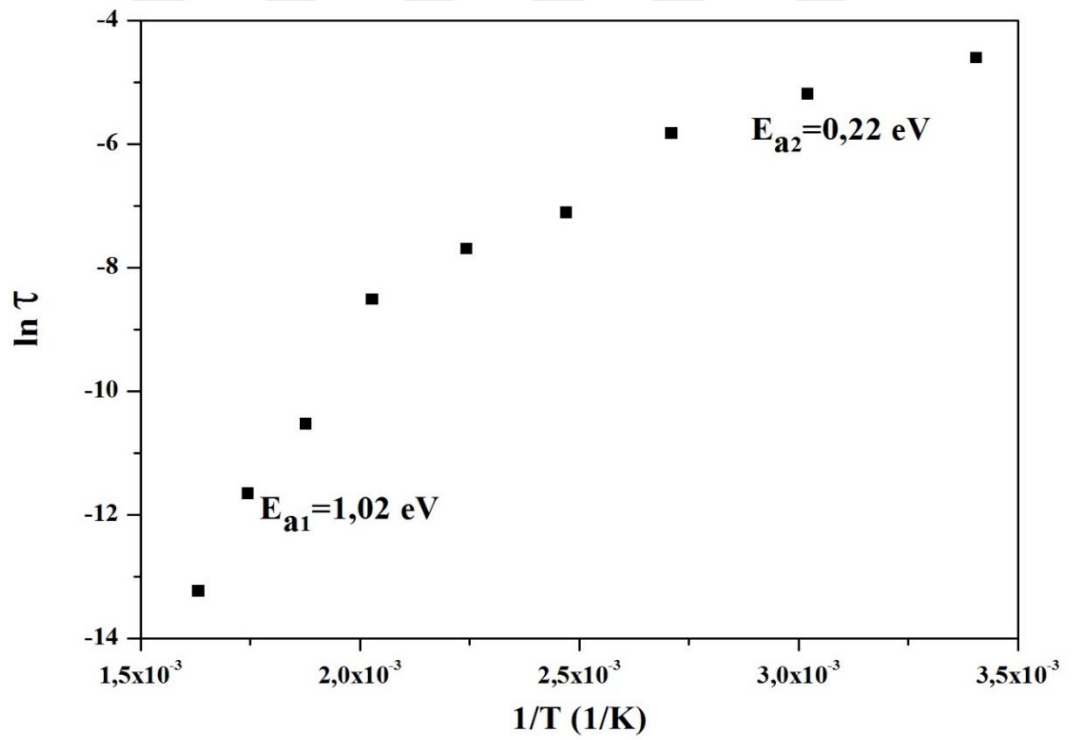
Şekil 4.54. $x=0,2$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.



Şekil 4.55. $x=0,3$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.



Şekil 4.56. $x=0,4$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.



Şekil 4.57. $x=0,5$ için $\ln \tau - \frac{1}{T}$ grafiği.

Her bir numune için iki farklı aktivasyon enerjisi olduğu Tablo 4.4.'te açıkça gösterilmiştir. Bu iki aktivasyon enerjisi bize düşük konsantrasyon, yüksek sıcaklık ve yüksek frekans bölgelerinde ortaya çıkan ikinci bir durulma pikini anlamamızda yardımcı olur. Bu iki durum, numuneler için iki durulma olayının gerçekleştiğini göstermektedir.

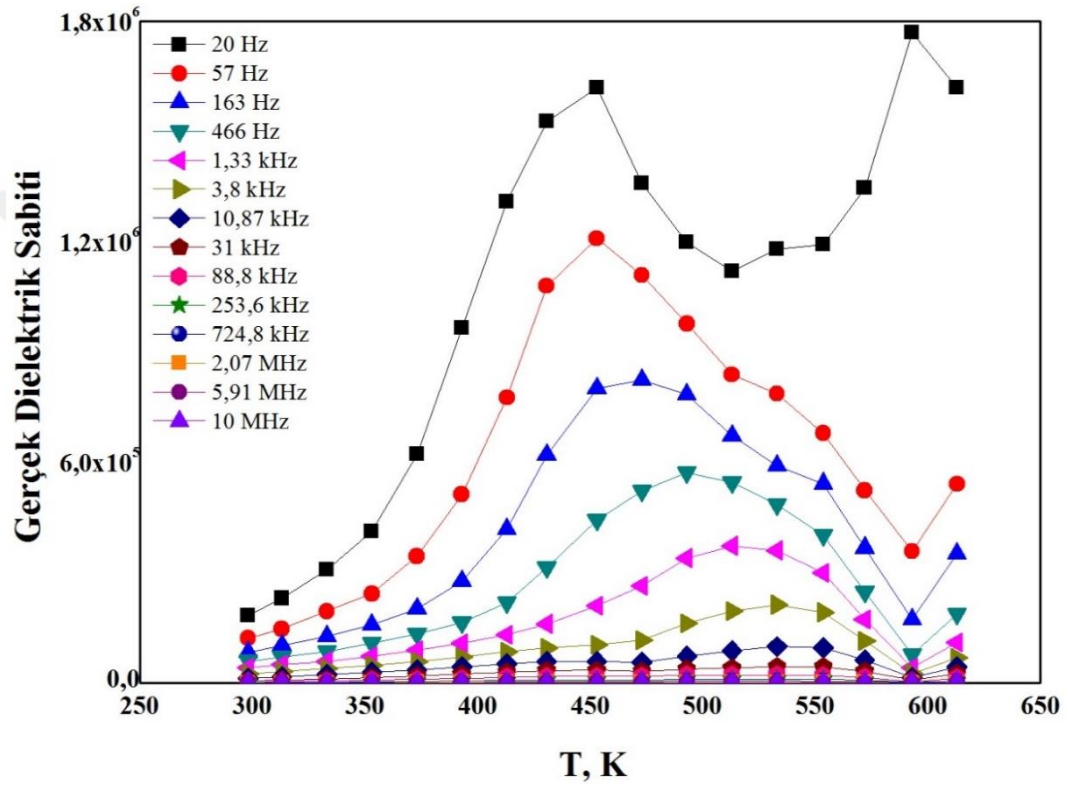
Tablo 4.4. Tüm numuneler için durulma zamanlarına karşılık gelen 1. ve 2. Aktivasyon enerjileri.

x	E _{a1} (eV)	E _{a2} (eV)
0	0,75	0,23
0,1	1,55	0,43
0,2	0,81	0,25
0,3	0,92	0,23
0,4	0,56	0,25
0,5	1,02	0,22

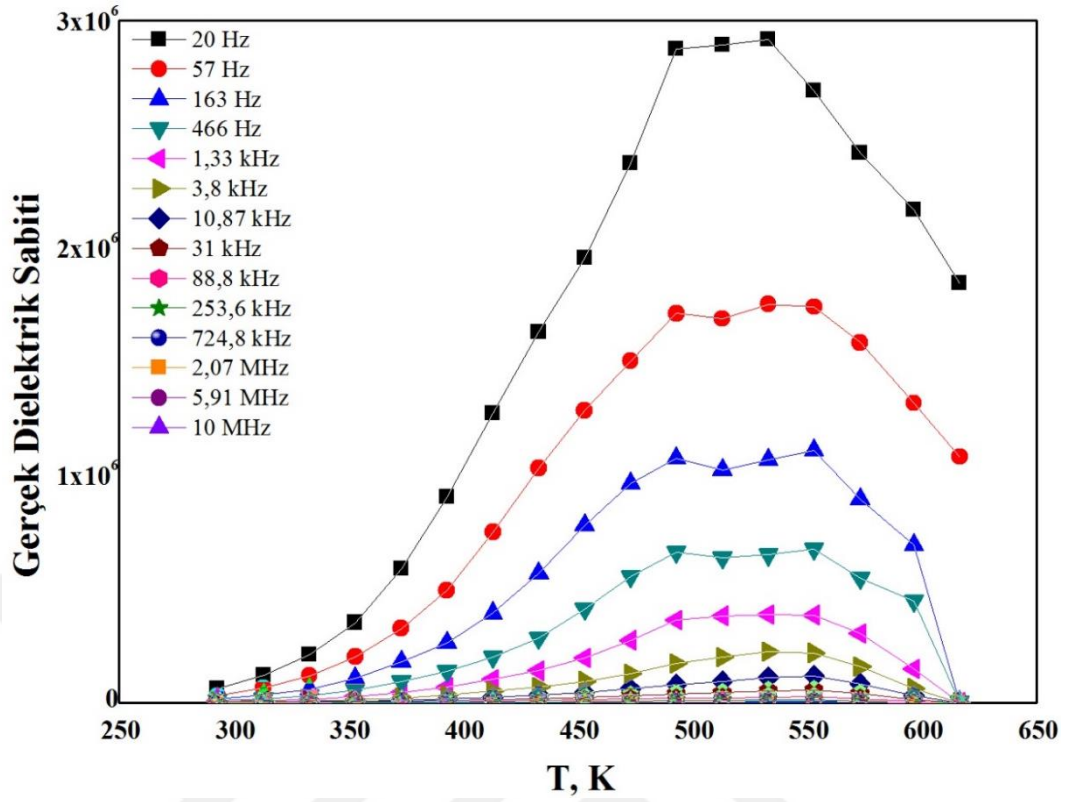
4.6.2. Sıcaklık bağıllığı

Şekil 4.58.'den Şekil 4.63.'e kadar tüm numunelerin, sıcaklığa bağlı dielektrik özellikleri 293-613K sıcaklık aralığında farklı frekanslar için gösterilmektedir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi numune hem sıcaklık hem de frekans bağımlıdır. İncelenen sıcaklık bölgesinde dielektrik sabitinin orta sıcaklıklarda tüm frekans değerlerinde pik gösterdiği, yüksek sıcaklıklarda ve düşük frekans değerlerinde de ikinci bir pik ortaya çıktığı gözlenmektedir. Ana pikleri değerlendirecek olursak, piklerin genişlikleri artan frekansla artmakta ve genlikleri artan frekansla azalmaktadır. Aynı zamanda maksimum dielektrik sabitinin (ϵ') değeri artan frekansla azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda dielektrik sabitinin küçük frekans bağımlılığı göstermesi, bu sıcaklıklarda yük taşıyıcılarının termal enerjisinin kristal boyunca özgürce hareket edebilmek için yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yerleşmiş dipoller, alan doğrultusu boyunca dönebilmek için yetenezsizdirler ve bu da düşük sıcaklık bölgelerinde dielektrik sabitinin çok küçük olmasına neden olur. Bu iyonik katkıların gösterdiği genel bir davranıştır. Ne var ki yüksek sıcaklıklarda büyük sıcaklık bağıllığı ve güçlü frekans bağıllığı gözlenmiştir. Yük taşıyıcılar, polarizasyondan kaynaklanan kristal boyunca özgürce hareket edebilmek

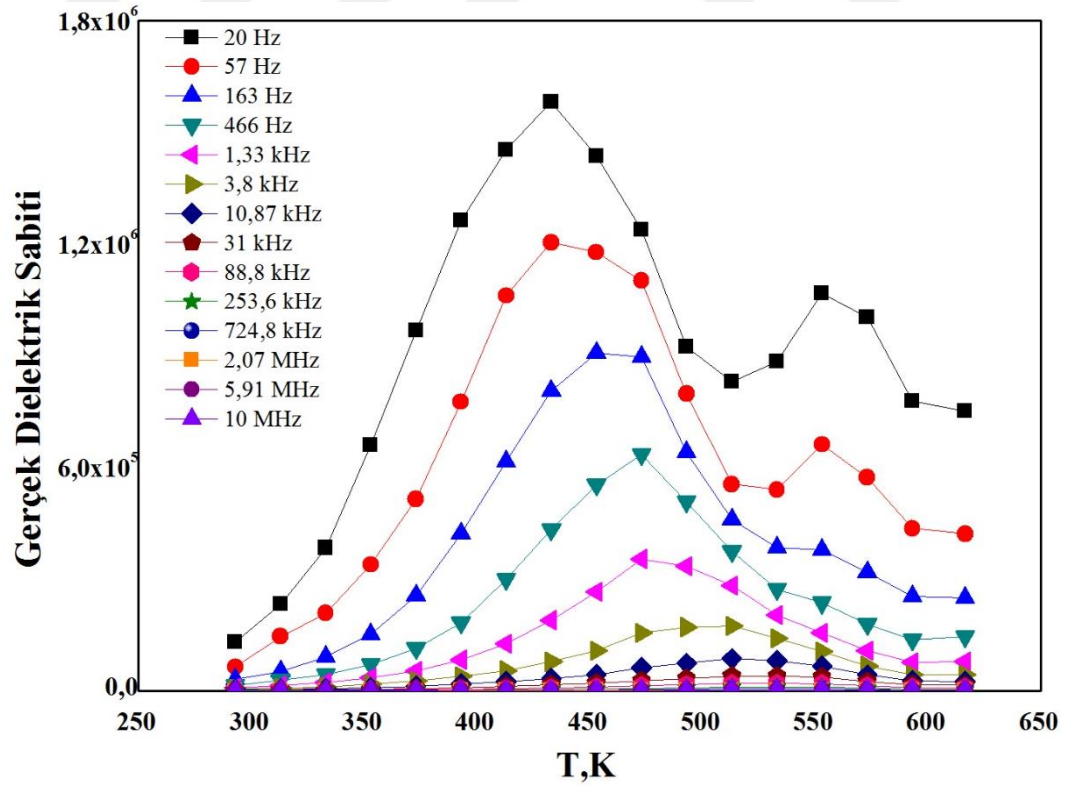
için yeterli enerjiye sahiptir ve malzemenin dielektrik sabitinin artmasına neden olmaktadır. Dielektrik sabiti sıcaklıkla artarak T_m sıcaklığında maksimum değerine ulaşmaktadır ve ardından yine artan sıcaklıkla azalmaktadır. T_m yüksek frekanslarda, yüksek sıcaklıklara doğru kaymaktadır. Faz geçişi sıcaklığı, sistemin düşük simetri fazından yüksek simetri fazına geçiş yaptığı sıcaklık olarak bilinir. Böyle bir geçiş, örgüdeki iç gerilimin bir fonksiyonudur.



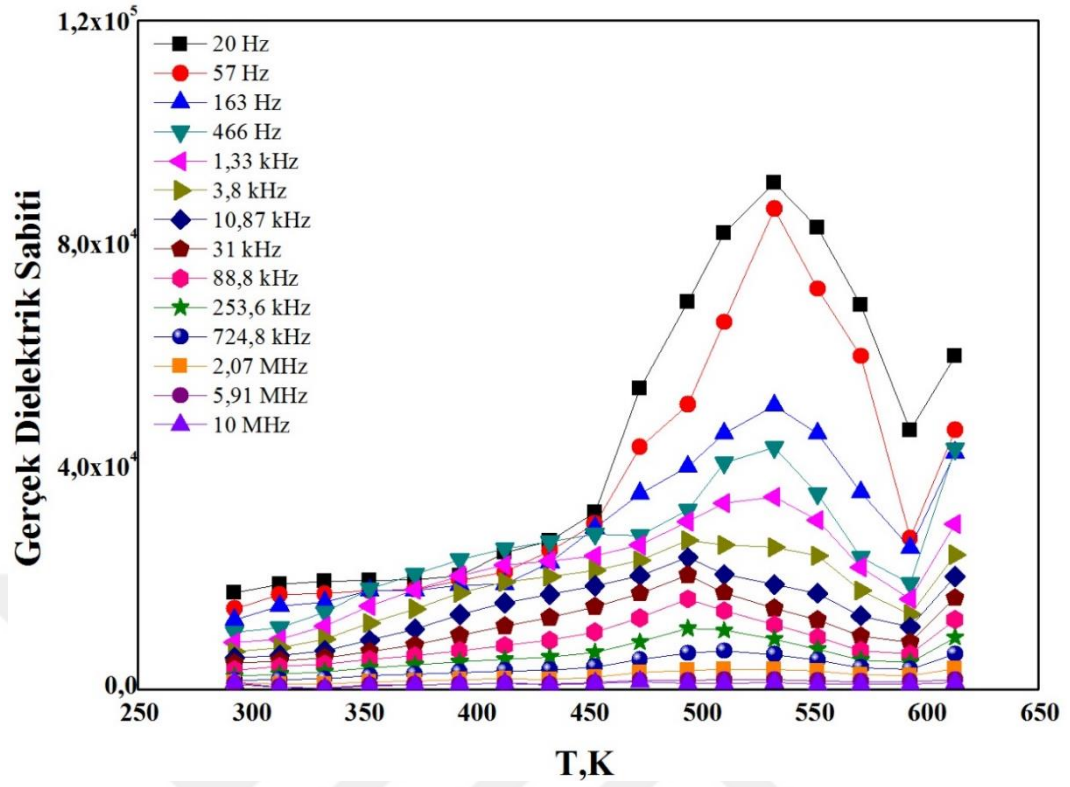
Şekil. 4.58. $x=0$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.



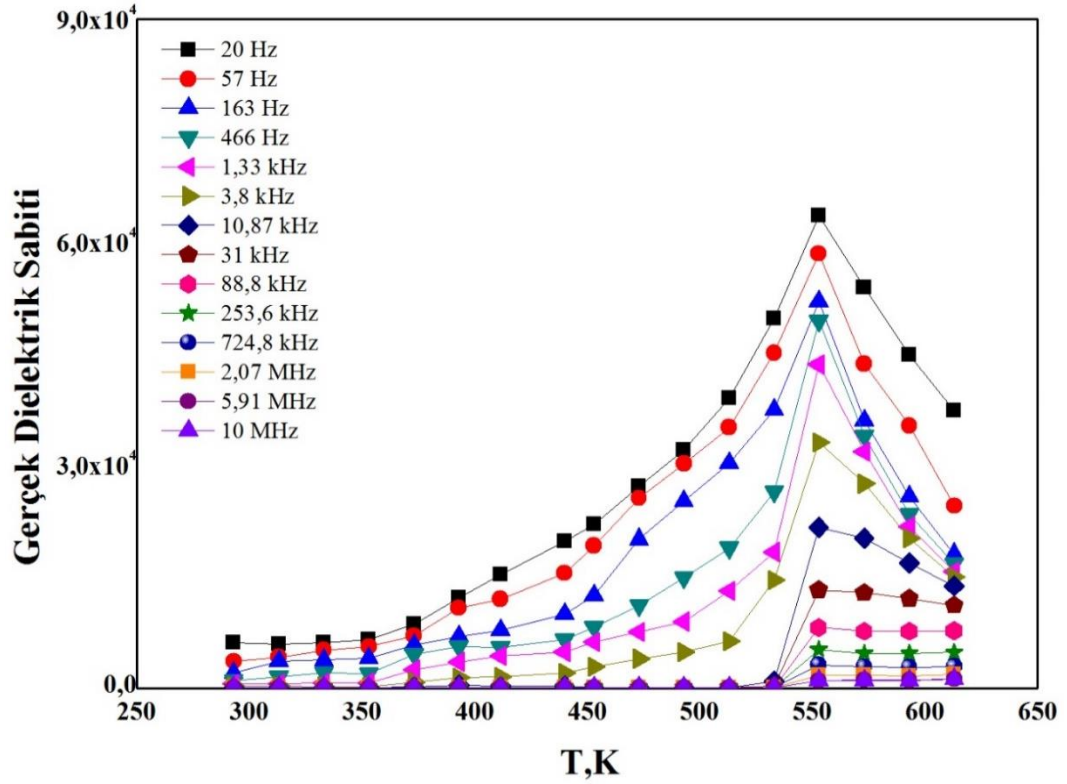
Şekil. 4.59. $x=0,1$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.



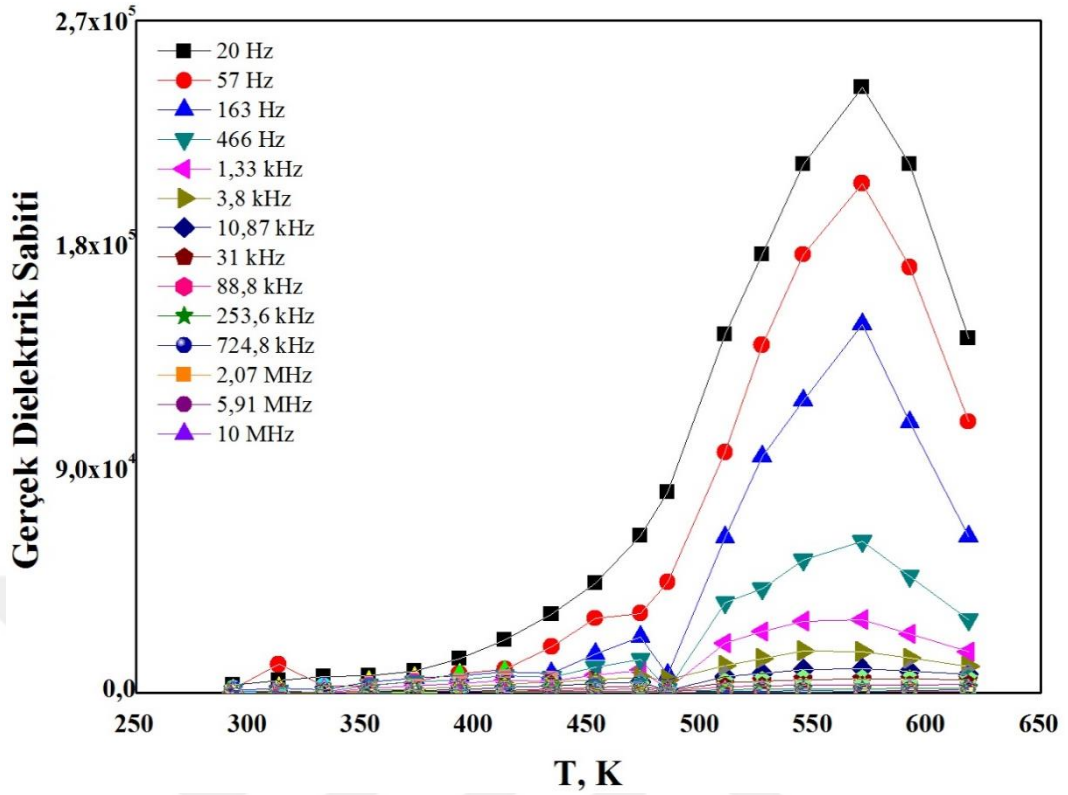
Şekil. 4.60. $x=0,2$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil. 4.61. $x=0,3$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil. 4.62. $x=0,4$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.

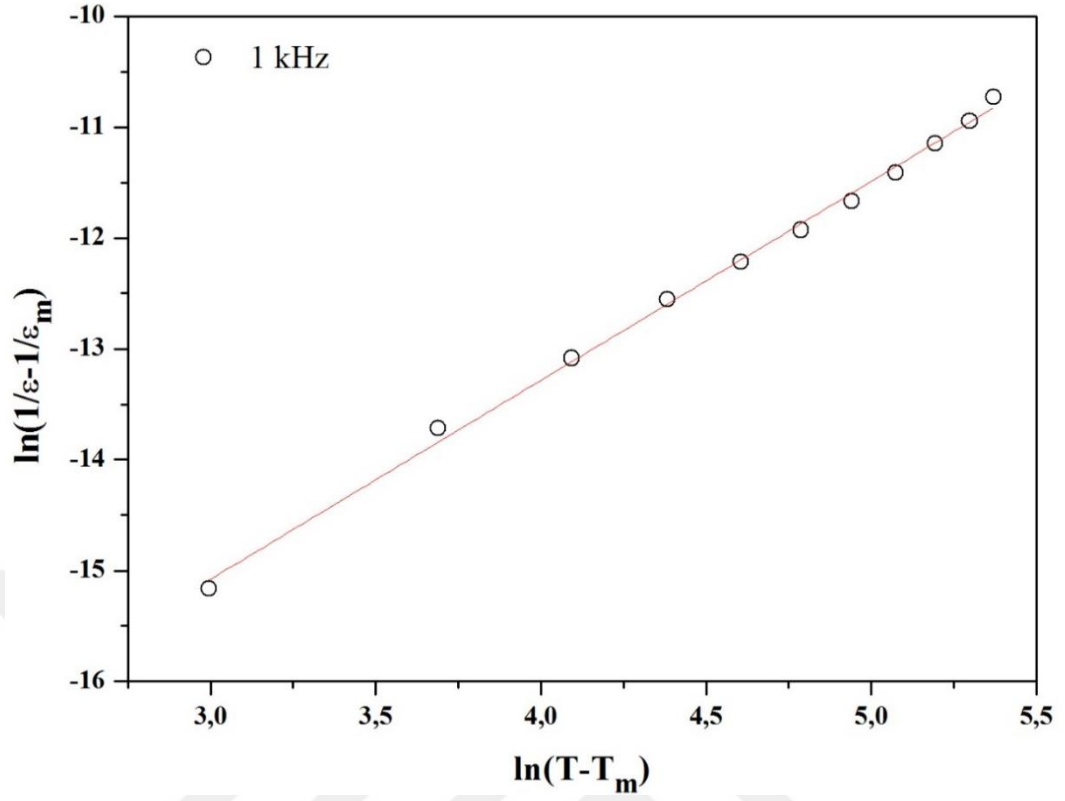


Şekil. 4.63. $x=0,5$ numunesinin farklı sıcaklıkları için gerçek dielektrik sabitinin sıcaklıkla değişimi.

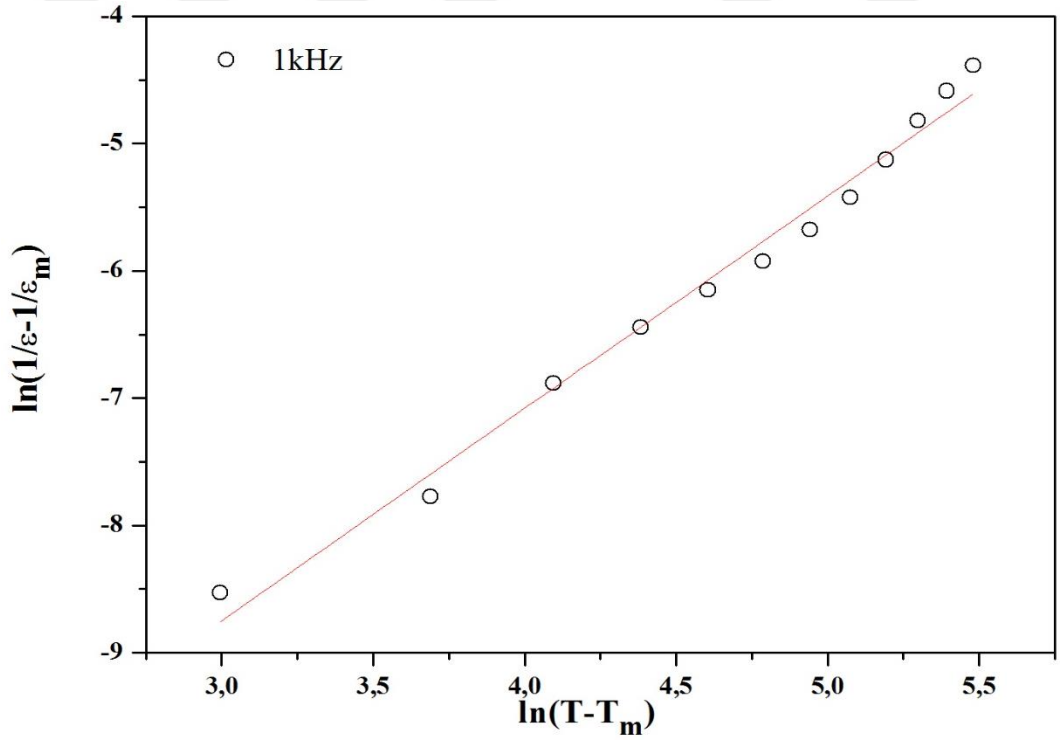
Yaygınlık derecesi, düzenlenmiş Curie-Weiss yasası ile hesaplanabilir:

$$\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_m} = \frac{(T - T_m)^\gamma}{C} \quad (4.7)$$

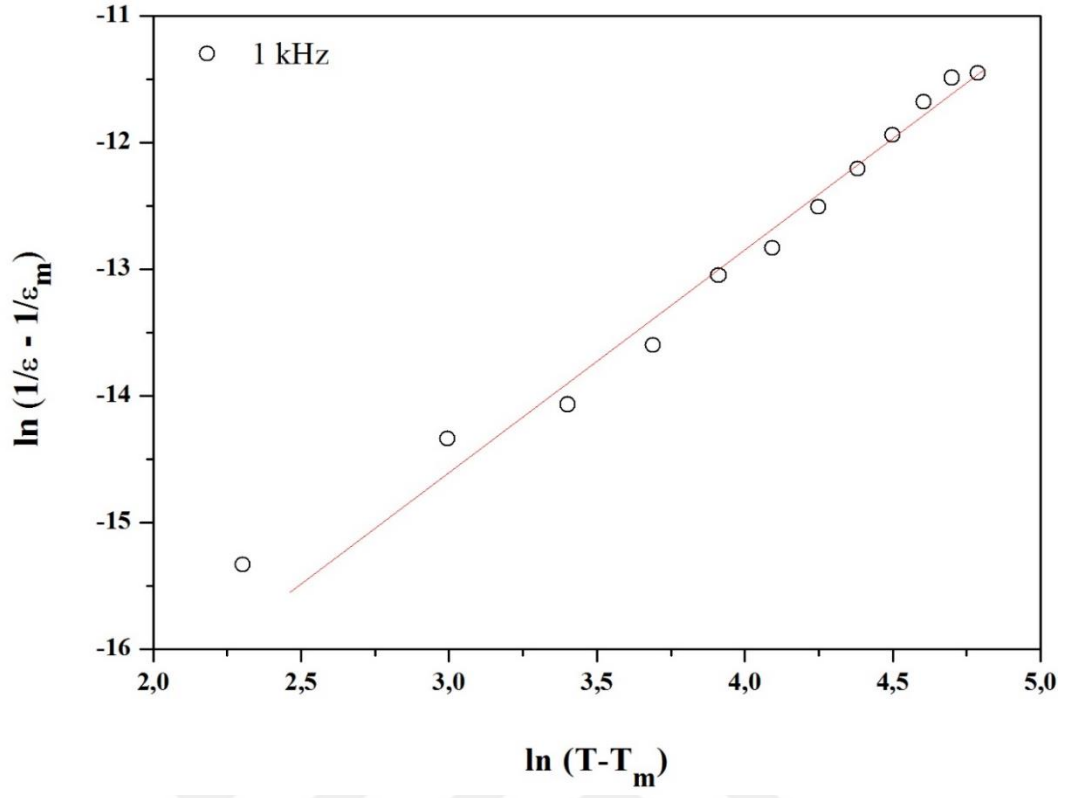
Burada ε_m , T_m sıcaklığındaki dielektrik sabiti, C Curie-Weiss sabiti ve γ ise faz geçişinin yaygınlık derecesidir. $\gamma = 1$ olduğunda, normal ferroelektrik olarak, $1 < \gamma < 2$ olduğunda relaksör ferroelektrik, $\gamma = 2$ olduğunda ise tamamlanmış yaygın geçiş fazı olarak adlandırılır. Buradan yola çıkarak γ değeri, $\ln(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_m})$ 'i $\ln(T - T_m)$ 'nin bir fonksiyonu olarak çizdiğimizde eğimden hesaplayabiliriz (Bhandari ve ark., 2016).



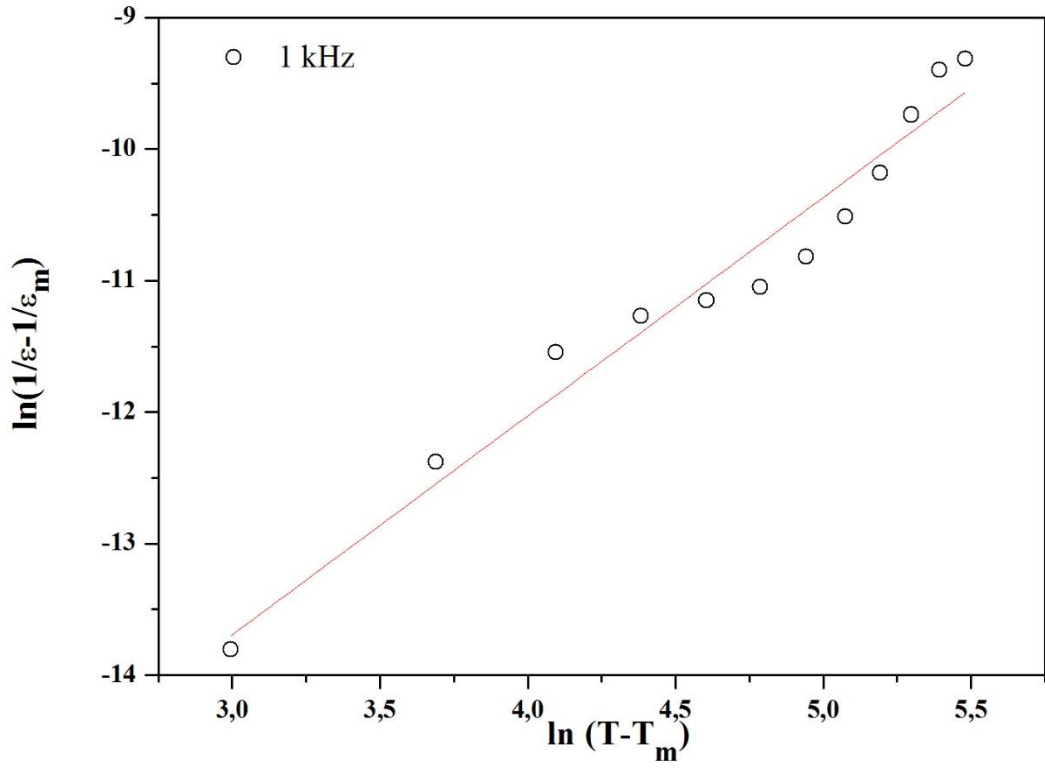
Şekil 4.64. $x=0$ için $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_m}\right) - \ln(T - T_m)$ grafiği.



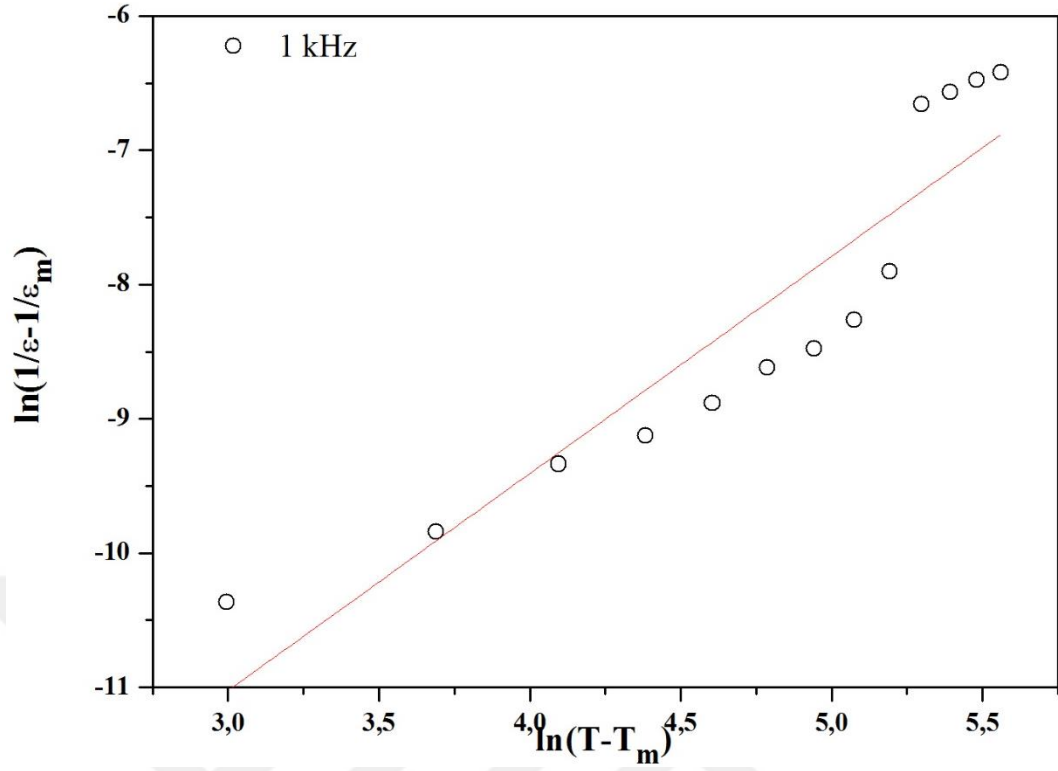
Şekil 4.65. $x=0,1$ için $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_m}\right) - \ln(T - T_m)$ grafiği.



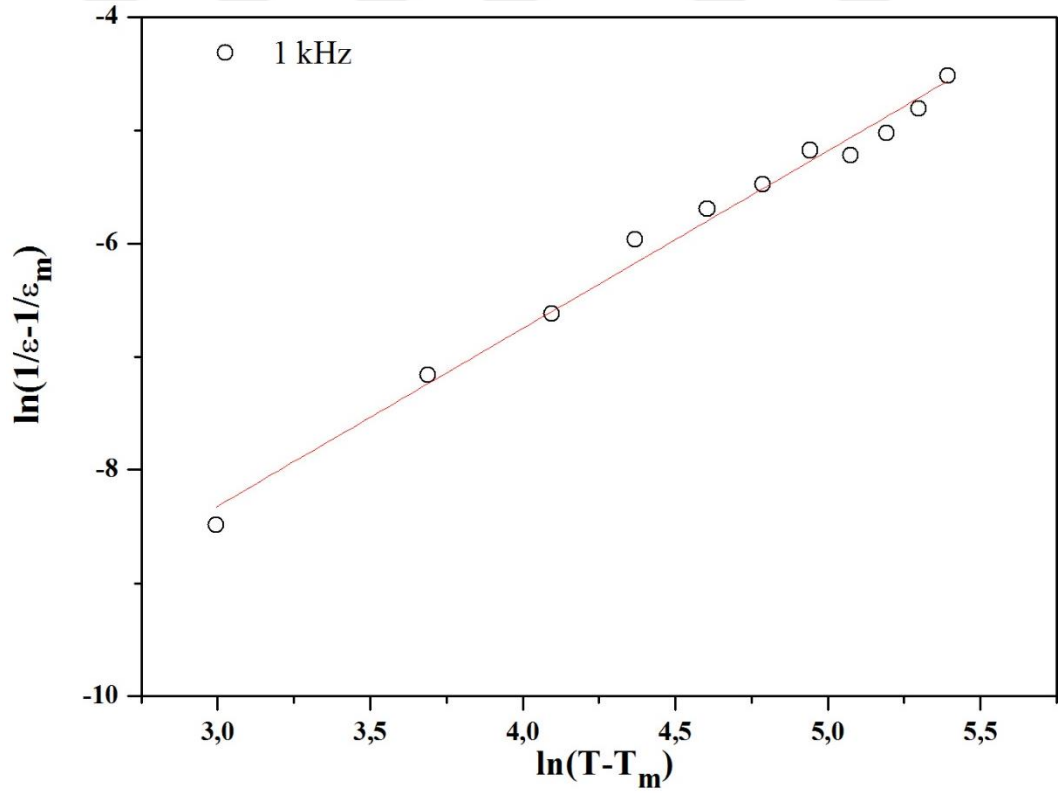
Şekil 4.66. $x=0,2$ için $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_m}\right) - \ln(T - T_m)$ grafiği.



Şekil 4.67. $x=0,3$ için $\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_m}\right) - \ln(T - T_m)$ grafiği.



Şekil 4.68. $x=0,4$ için $\ln\left(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m}\right) - \ln(T - T_m)$ grafiği.



Şekil 4.69. $x=0,5$ için $\ln\left(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_m}\right) - \ln(T - T_m)$ grafiği.

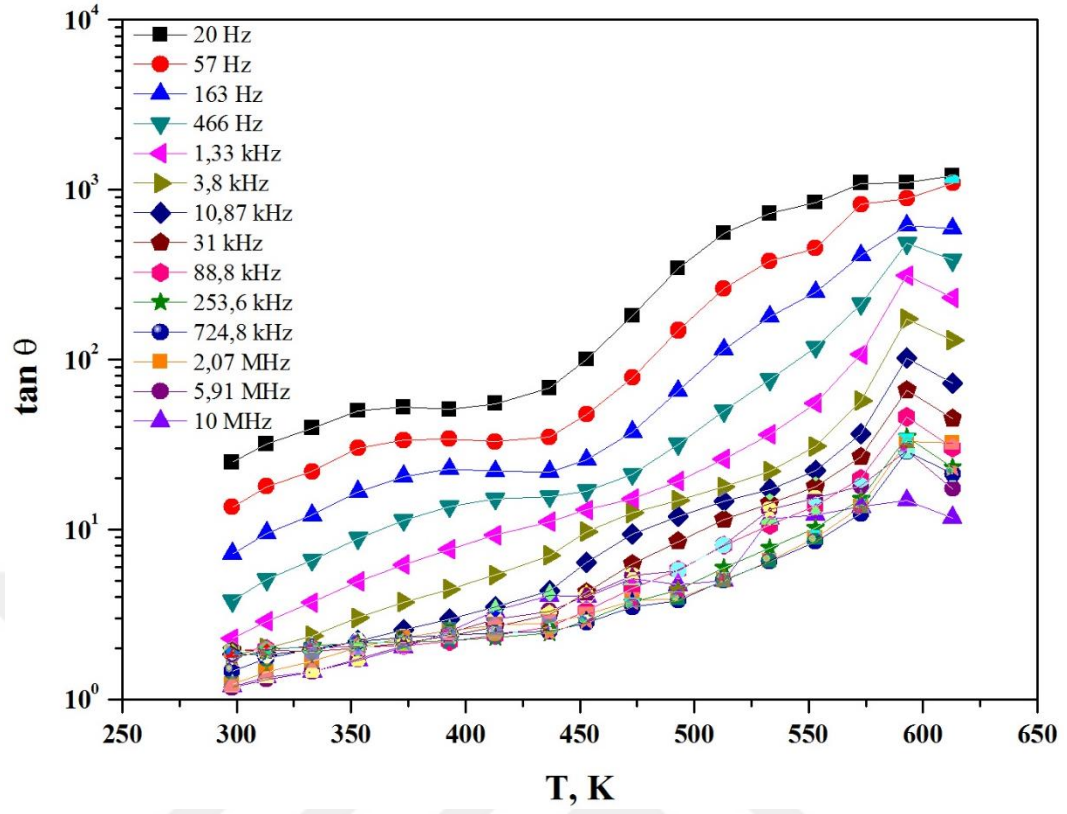
Tüm numuneler için bulunan γ değerleri aşağıdaki Tablo 4.5.'te gösterilmektedir:

Tablo 4.5. x-konsantrasyonlarına karşılık gelen γ değerleri.

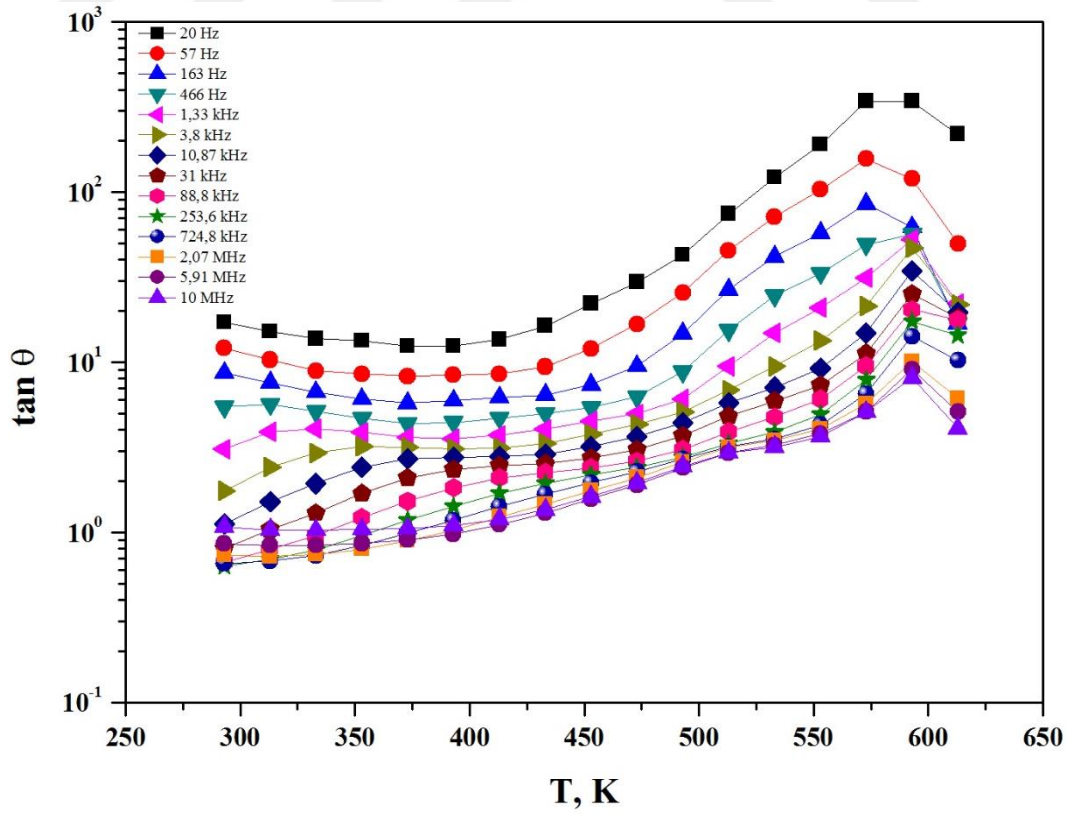
x	γ
0	1,72
0,1	1,66
0,2	1,62
0,3	1,66
0,4	1,61
0,5	1,56

Açıkça görüldüğü üzere tüm numunelerin relaksör tipi ferroelektrik olduğu anlaşılmıştır.

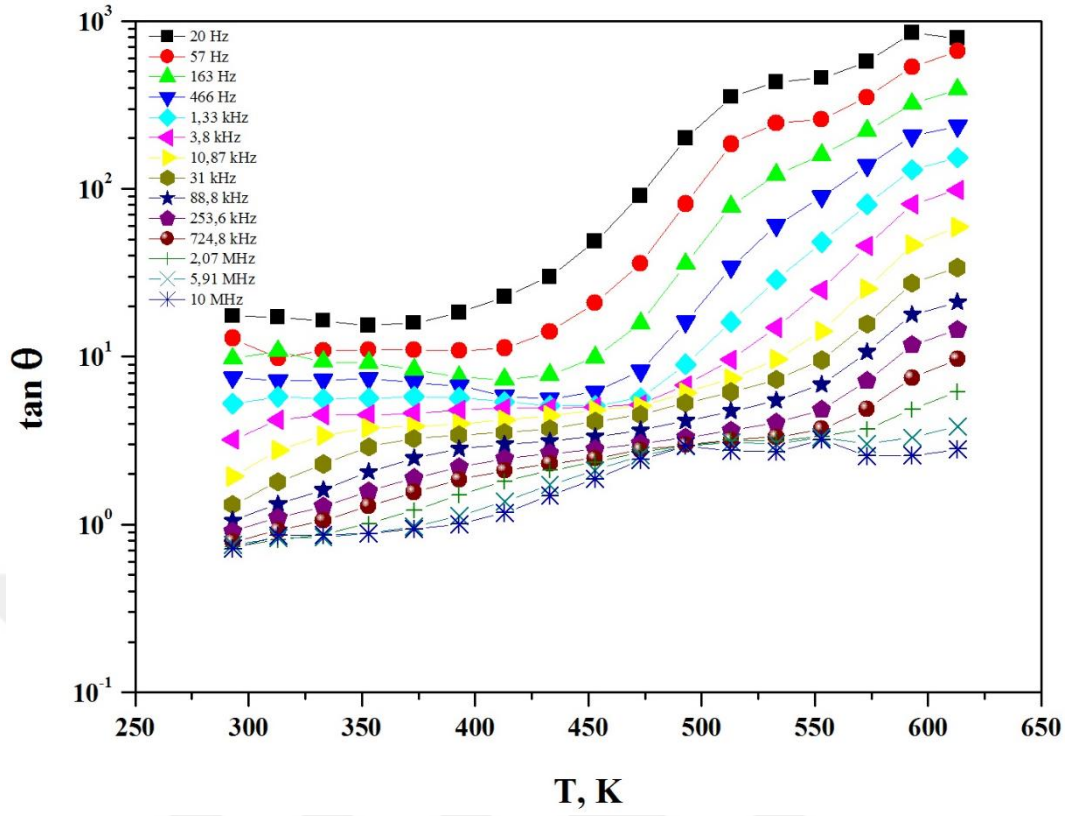
Şekil 4.70.'ten Şekil 4.75.'e kadar bütün numuneler için $\tan\theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi farklı frekanslar için verilmiştir. $\tan\theta$ frekansa bağımlılık gösterir ve sıcaklıkla artar. $\tan\theta$ 'nın bu kendine has davranışı yük taşıyıcılarının atlama davranışına atfedilebilir. Sıcaklıktaki artış $\tan\theta$ 'nın artmasının bir sonucu olarak durulma zamanının azalmasına sebep olur. Yüksek sıcaklıklarda iletkenlikteki artış $\tan\theta$ değerindeki keskin artıştan sorumlu olabileceği düşünülmektedir. Frekans bağımlı olan $\tan\theta$ pikinin genliği artan frekansla azalmaktadır. Bu tip davranış önemli miktarda Fe boşluğu ve sinterleme süresi boyunca malzemenin içinde üretilen yük taşıyıcılarının varlığı sebebiyle gözlenmiştir. Sıcaklık bağımlı dielektrik sonuçları Fe^{+2} ve Fe^{+3} iyonları arasındaki taşıma sebebiyle güçlülce etkilenmiştir.



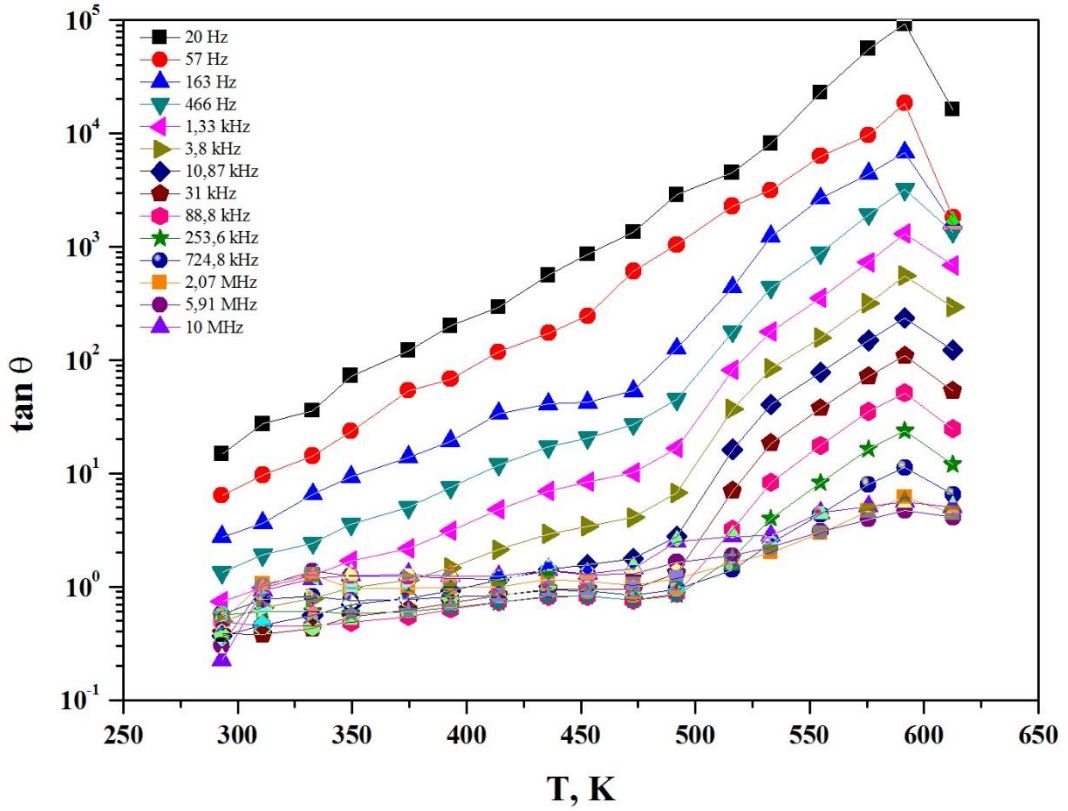
Şekil 4.70. $x=0$ için farklı frekanslarda $\tan \theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.



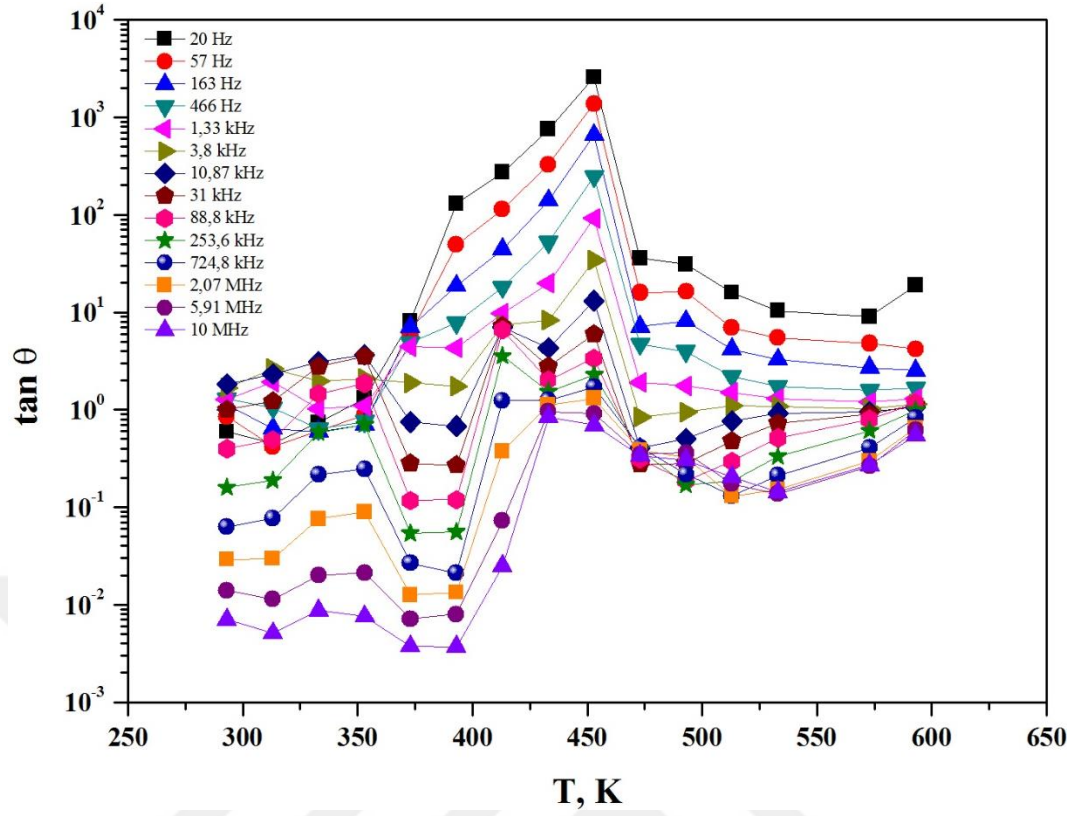
Şekil 4.71. $x=0,1$ için farklı frekanslarda $\tan \theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.



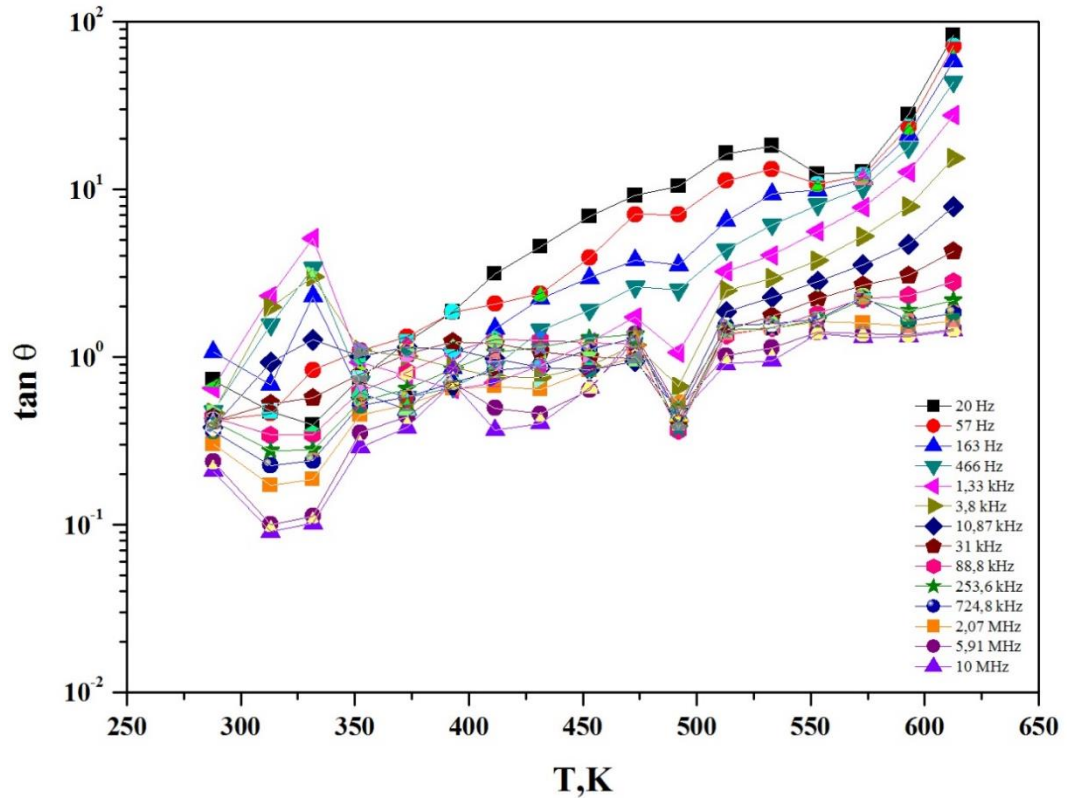
Şekil 4.72. $x=0,2$ için farklı frekanslarda $\tan \theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.



Şekil 4.73. $x=0,3$ için farklı frekanslarda $\tan \theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.



Şekil 4.74. $x=0,4$ için farklı frekanslarda $\tan \theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.



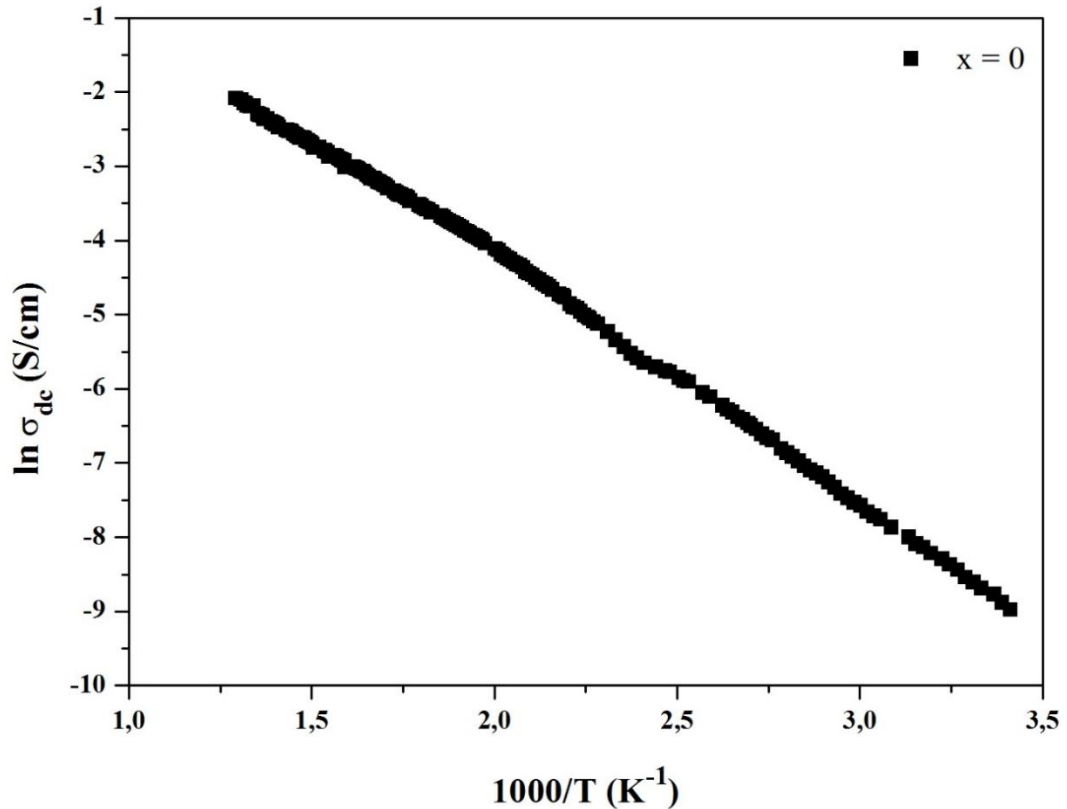
Şekil 4.75. $x=0,5$ için farklı frekanslarda $\tan \theta$ 'nın sıcaklıkla değişimi.

4.7. İletkenlik Sonuçları

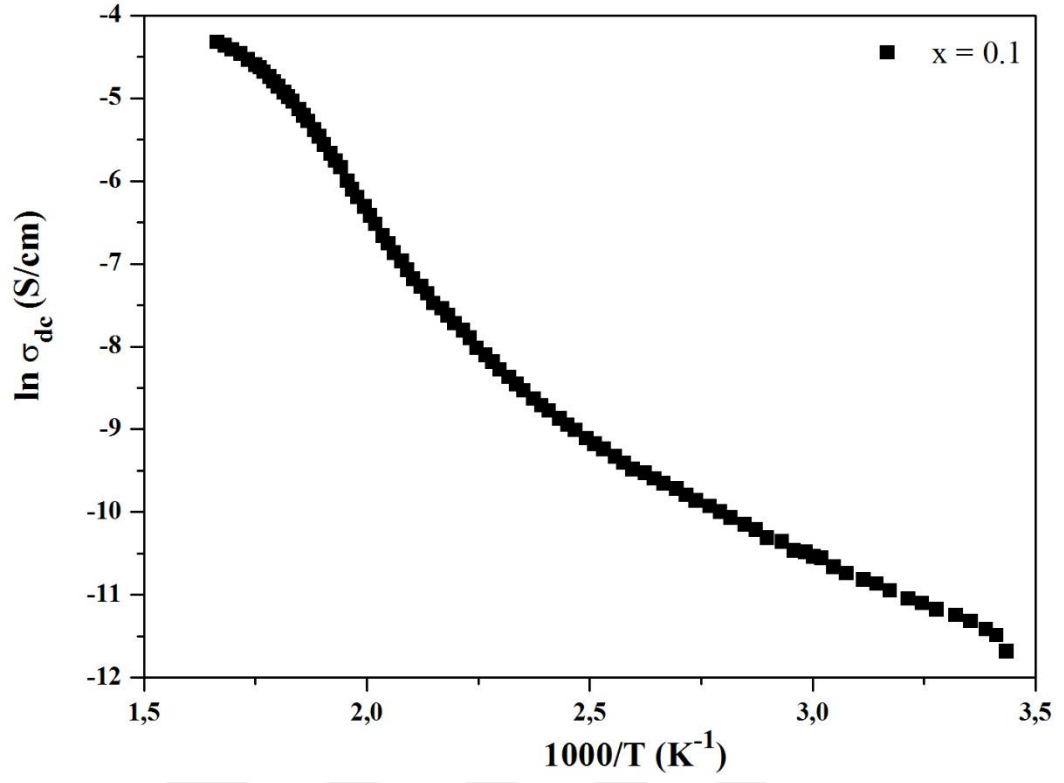
4.7.1. Dc iletkenlik sonuçları

295-625K aralığındaki sıcaklık ile Dc iletkenlik değişimi Şekil 4.76.'dan Şekil 4.81.'e kadar tüm numuneler için gösterilmektedir. Dc iletkenlik güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır. Grafikten açıkça görüleceği gibi Arrhenius davranışı sergilemiştir. Bu davranıştan yola çıkarak, grafiğin eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanabilir (Denklem 2.46).

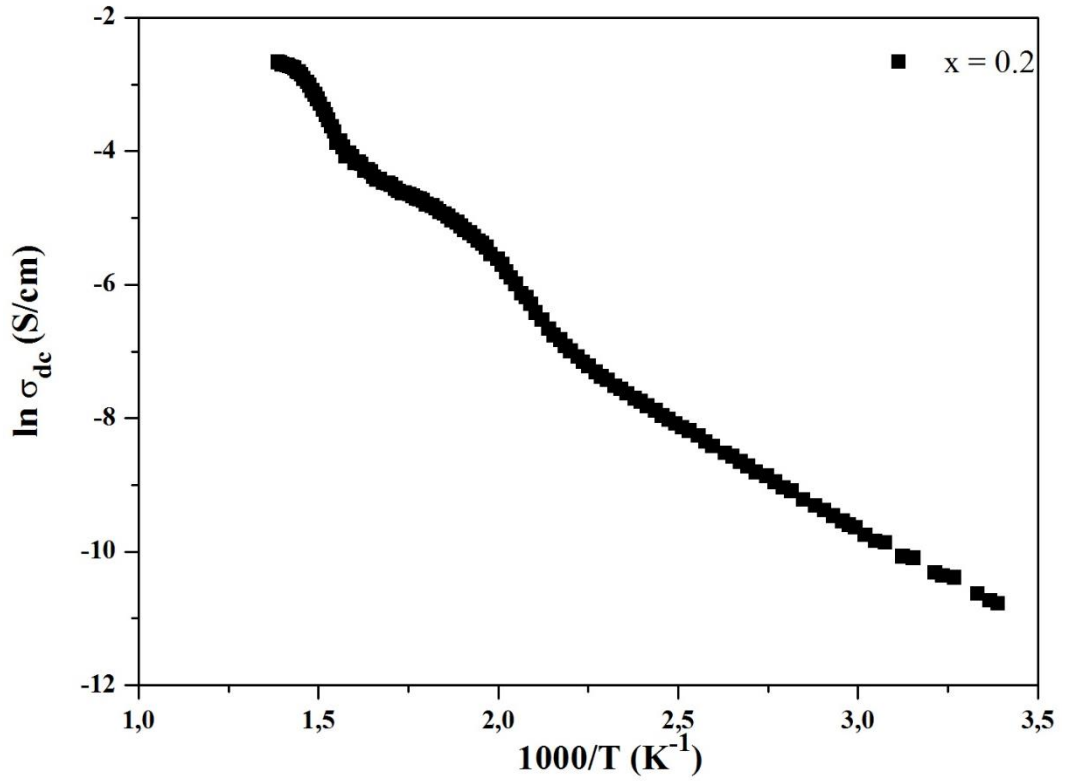
Özellikle yüksek sıcaklıklardaki DC iletkenlikte tane sınırları katkısı aktiftir. Bu kadar büyük miktardaki değişim tane sınırlarının rezistansının azalması ile ilgilidir. Öyle ki bu durum sıcaklığın artması ile tane sınırlarının iletkenliğe yardımcı olan yük taşıyıcılarının hareketliliğini engelleyen bariyerin azalmasının bir sonucudur.



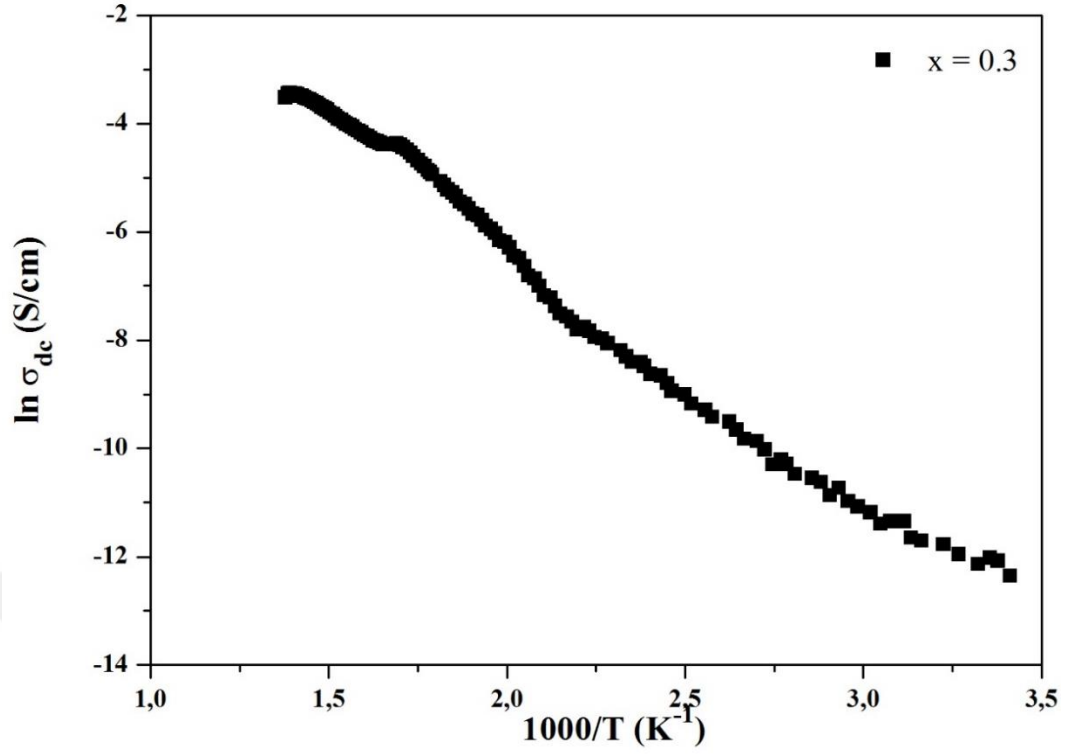
Şekil 4.76. x=0 için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.



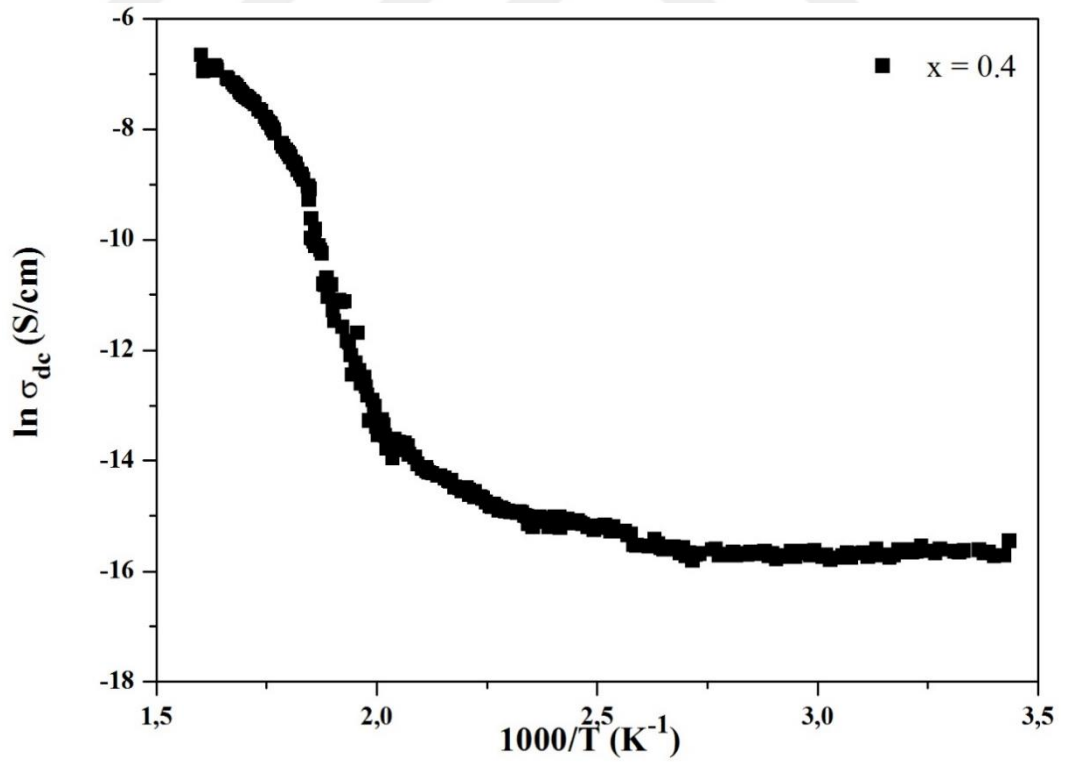
Şekil 4.77. $x=0,1$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.



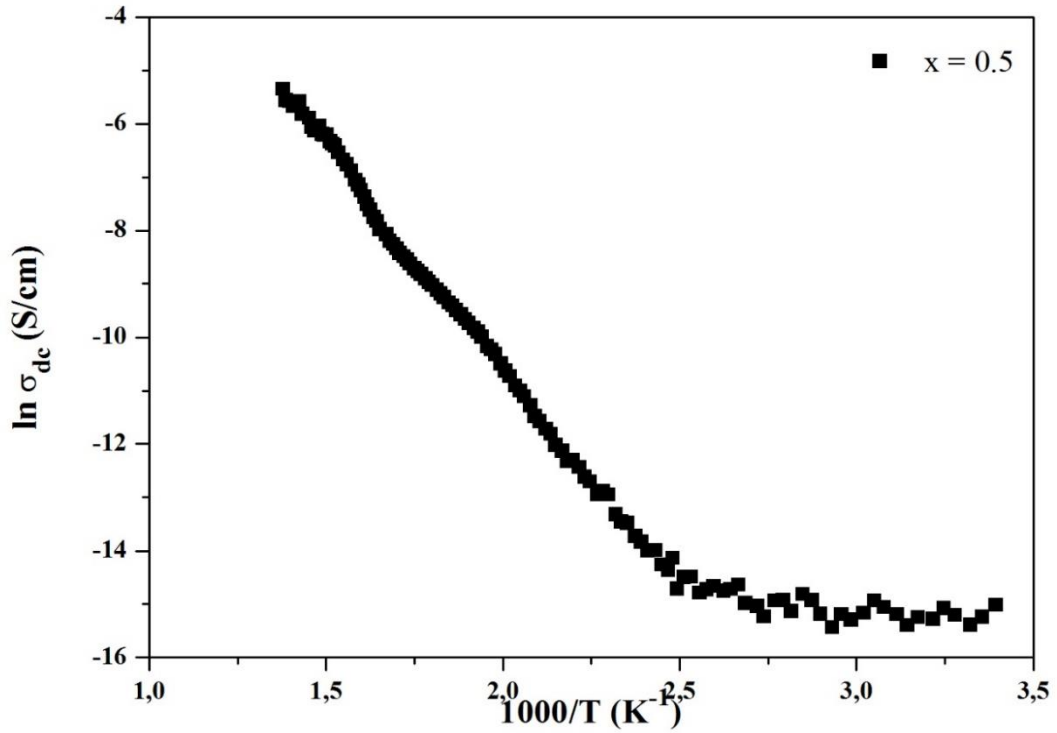
Şekil 4.78. $x=0,2$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 4.79. $x=0,3$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 4.80. $x=0,4$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.



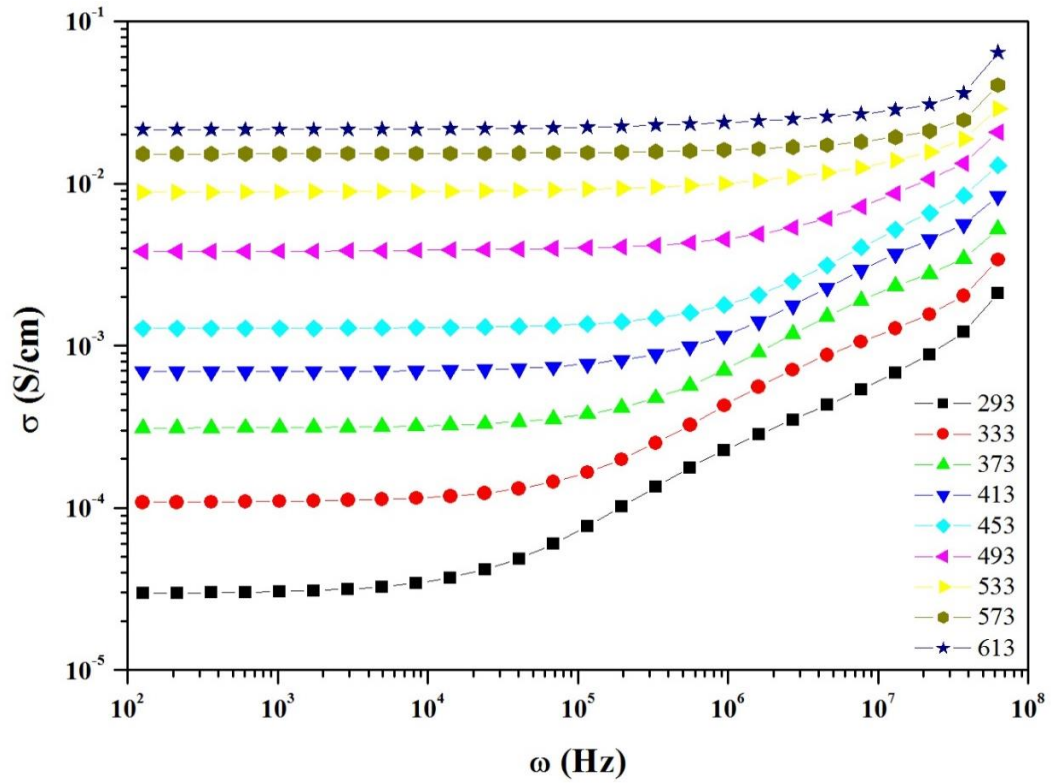
Şekil 4.81. $x=0,5$ için Dc iletkenliğin sıcaklıkla değişimi.

4.7.2. Ac iletkenlik sonuçları

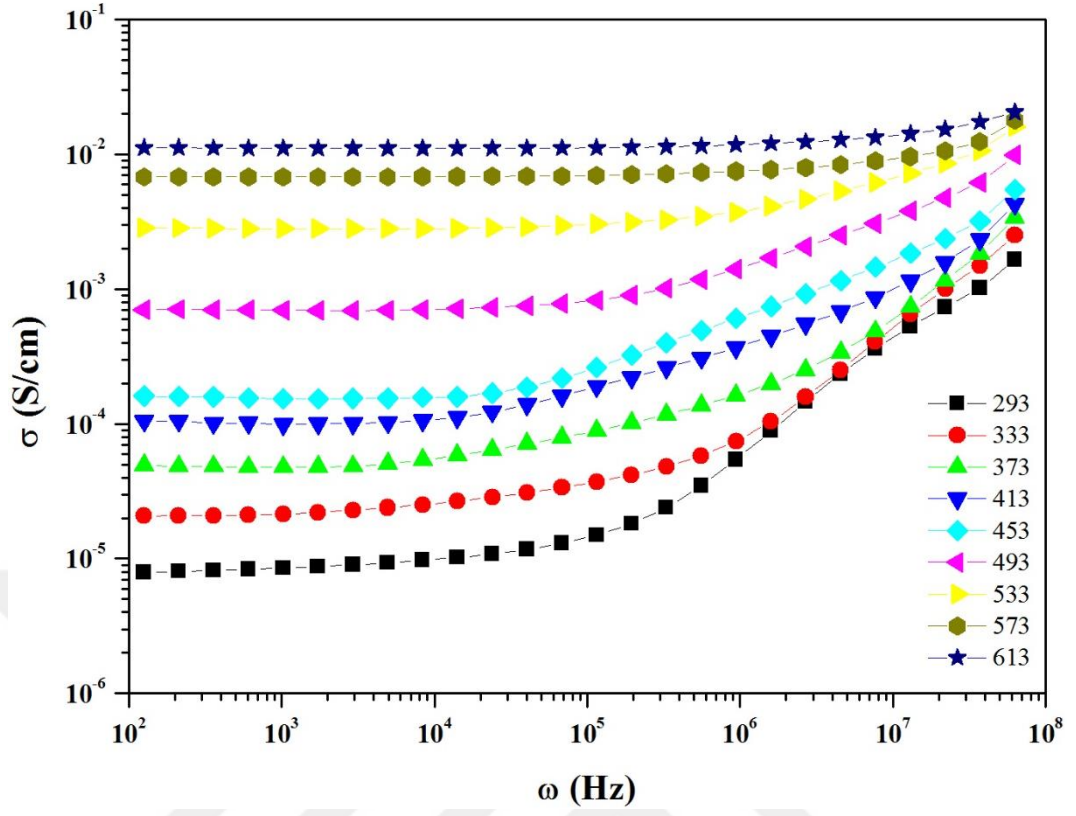
Şekil 4.82.'den Şekil 4.87.'ye kadar gösterilen Ac iletkenlik grafiklerinde iki bölge görülmektedir. İlk bölge düşük frekans bölgesidir ve burada iletkenlik frekansa hemen hemen bağımsız ve neredeyse sabit bir tutum izlemektedir. İkinci bölge yüksek frekans bölgesidir ve iletkenlik artan frekansa ile yükselmektedir. Gözlenen iletkenlik değişiklikleri şu şekilde açıklanabilir. Düşük frekanslarda numunenin içindeki tanecikler geliş güzel bir şekilde yerleşirler ve buna bağlı olarak tane sınırları da düzensiz bir yapıdadırlar. Eğer frekans artarsa tanecikler daha iyi organize olurlar ve daha kapasitif davranış sergilerler. Bu da yüksek elektriksel iletkenliğe neden olur. Aynı zamanda AC iletkenlik grafikten görüldüğü üzere sıcaklığa da bağımlıdır. Sonuç olarak AC iletkenlik artan frekansla ve sıcaklıkla artmaktadır.

İletkenliğin farklı frekanslardaki genlik farkı iyonik iletkenlik için güçlü bir ipucudur. Hareketli iyonların konsantrasyonları ve onların hareketlilikleri iyonik iletkenliği etkiler. Yük taşıyıcılarının atlaması da iletkenliğe katkıda bulunur.

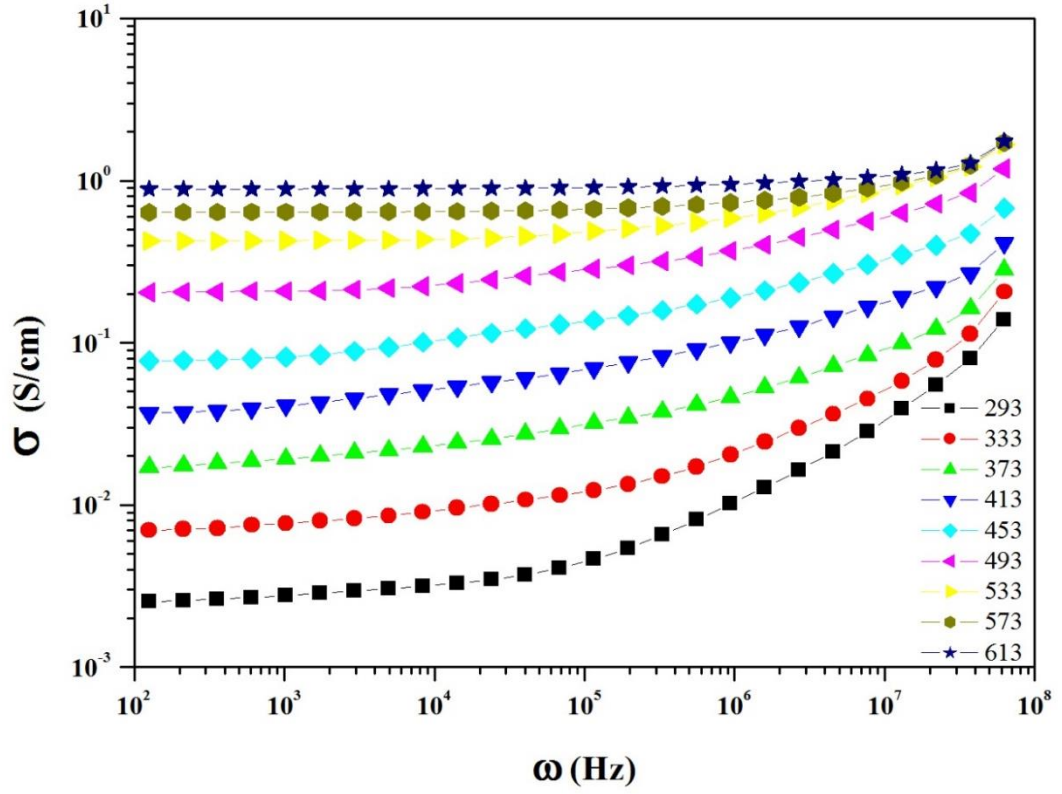
Buradan yola çıkarak numune düşük ve yüksek frekanslarda sıcaklığa bağımlı olduğunu söyleyebiliriz. Sıcaklık ile numunenin iletkenliği kayda değer bir şekilde (10^3 kez) artmıştır. Yüksek frekanslardaki doğrusal artış yarıiletken davranışa işaret eder. AC iletkenlik Fe^{+3} ile Fe^{+2} iyonları arasındaki atlama sebebiyle oluşur. Frekans arttığında Fe^{+3} ve Fe^{+2} arasındaki elektron atlaması da artar. Sonuç olarak AC iletkenlik artar.



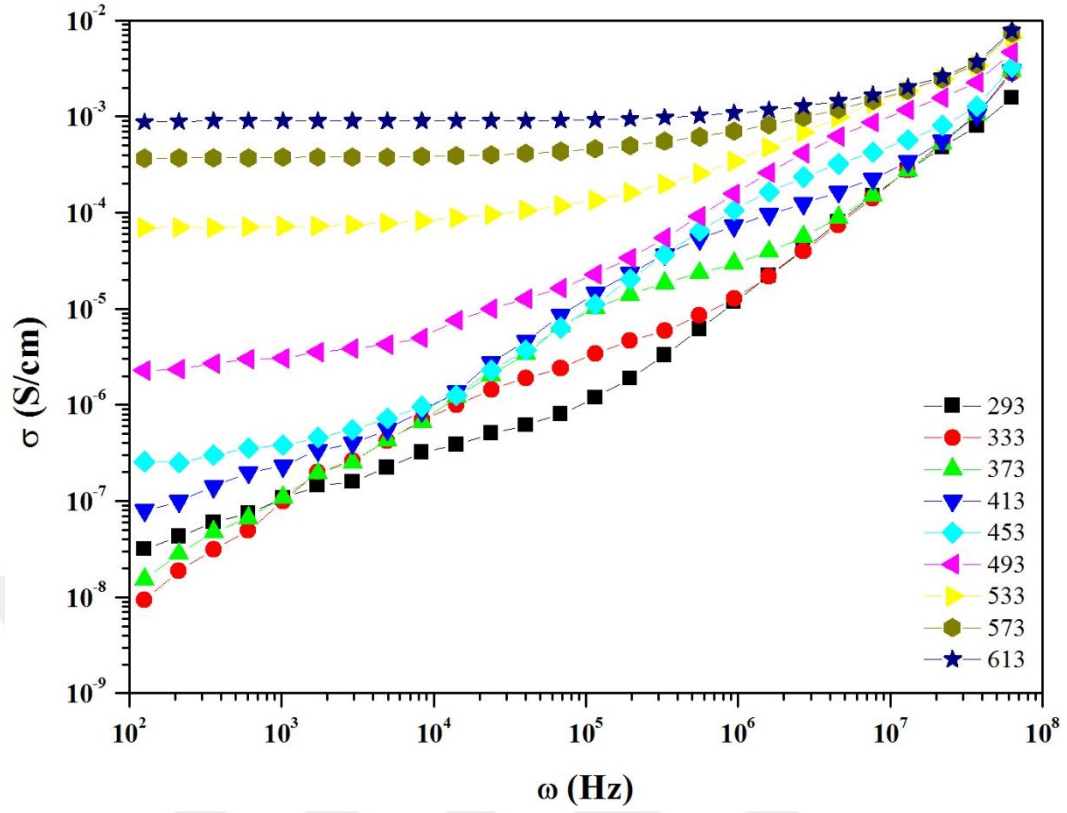
Şekil 4.82. $x=0$ için farklı sıcaklıklardaki AC iletkenliğin frekansla değişimi.



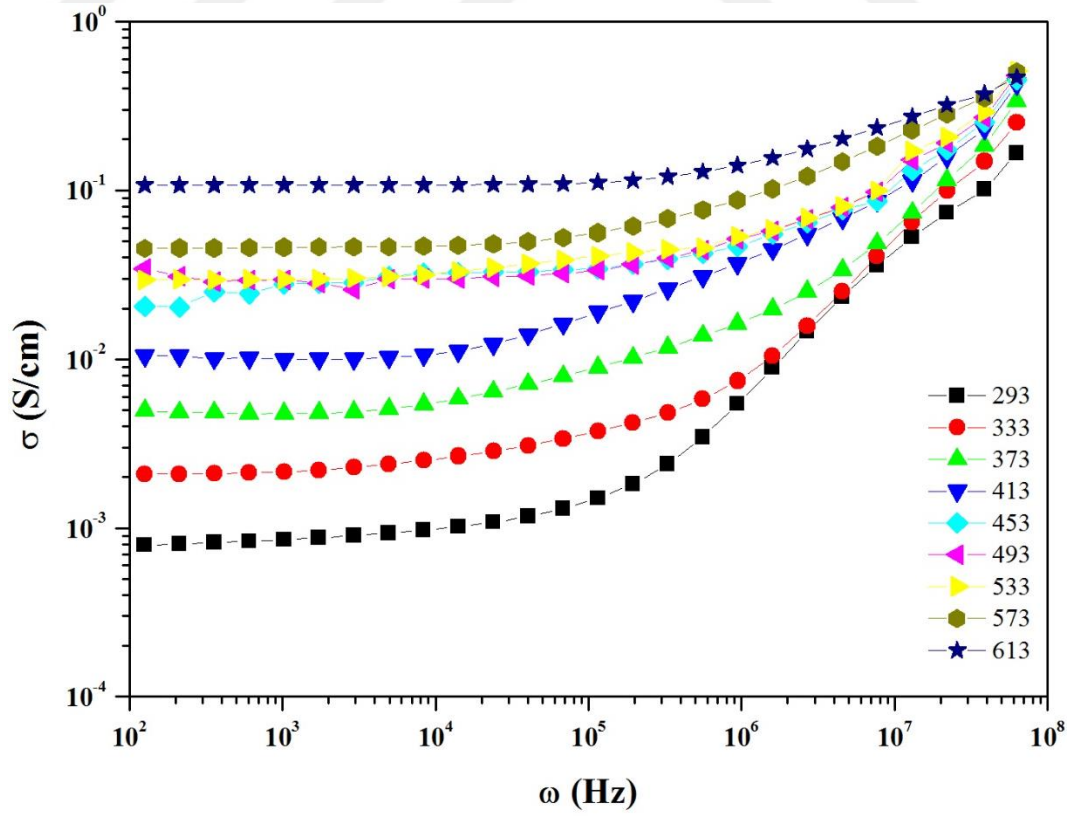
Şekil 4.83. $x=0,1$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi.



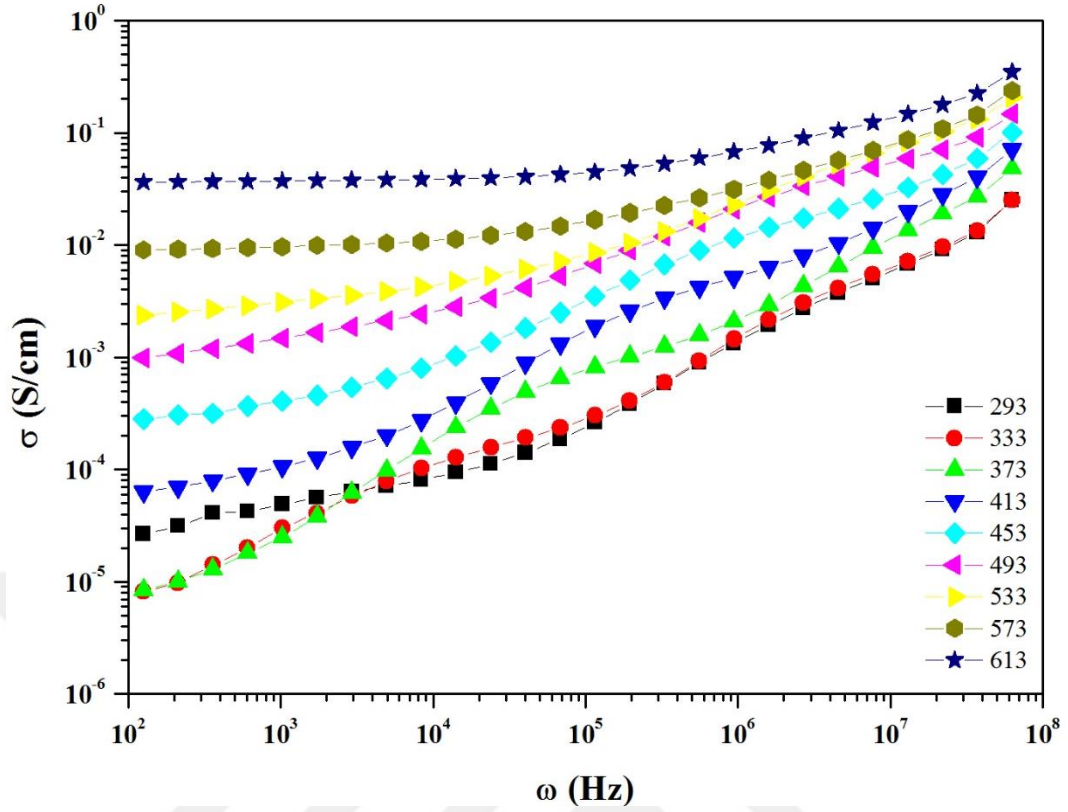
Şekil 4.84. $x=0,2$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi.



Şekil 4.85. $x=0,3$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi.

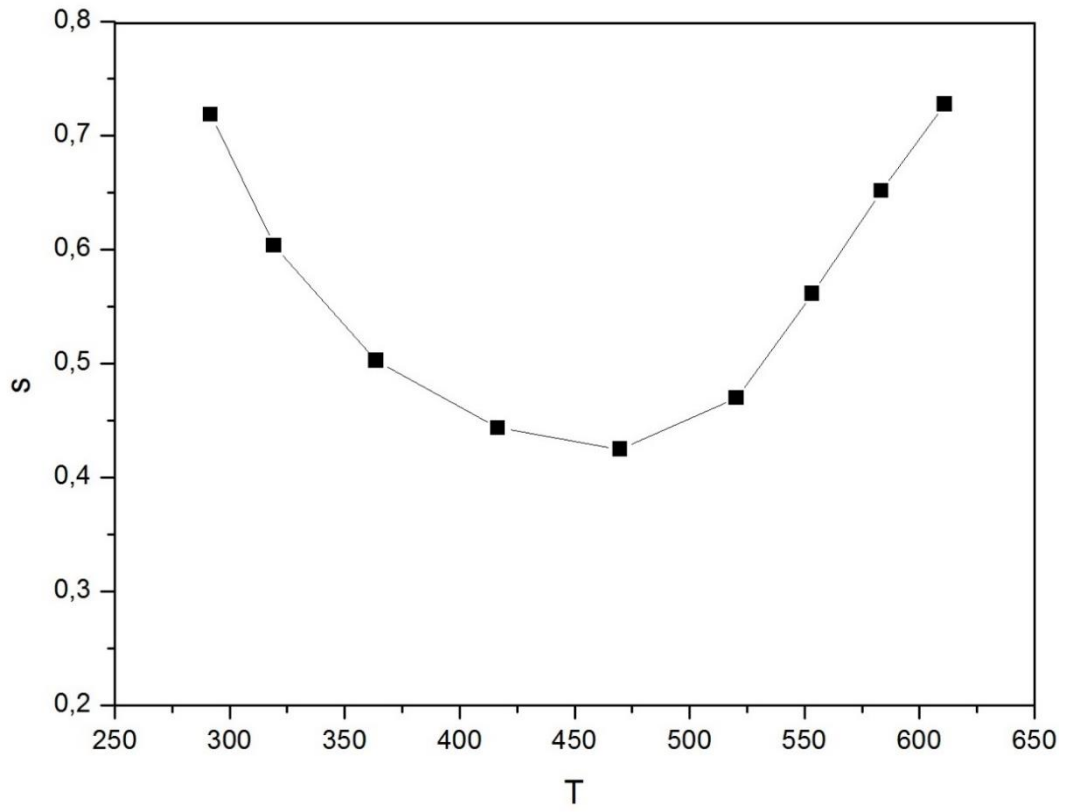


Şekil 4.86. $x=0,4$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi.

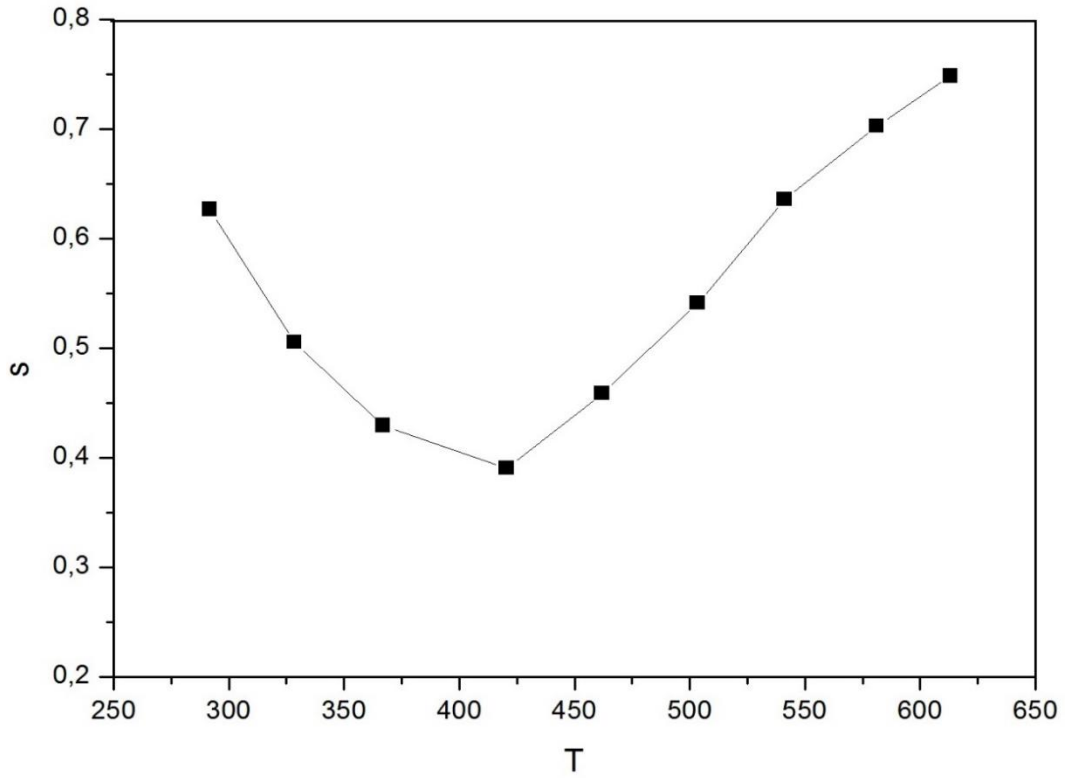


Şekil 4.87. $x=0,5$ için farklı sıcaklıklardaki Ac iletkenliğin frekansla değişimi.

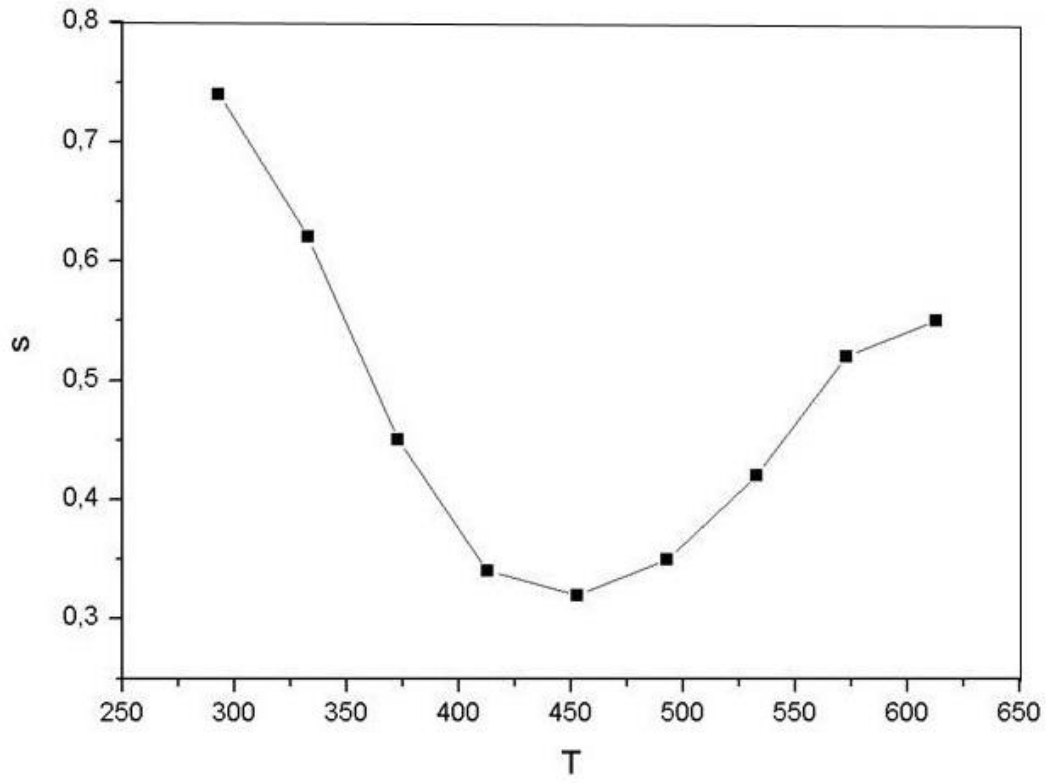
Genel σ_{ac} davranışı Jonscher bağıntısıyla tanımlanabilir (Denklem 2.52). Burada s 0 ile 1 arasında bir sabittir ve yük taşıyıcılarının atlama yaptığı düzensiz malzemelerin bir parametresidir. A ise sıcaklığa bağlı üstel bir fonksiyondur. s değeri, tüm numuneler için tüm sıcaklıklarda grafiğin eğiminden hesaplanmıştır ve sıcaklığa karşı grafikleri Şekil 4.88.'den Şekil 4.93.'e kadar gösterilmektedir.



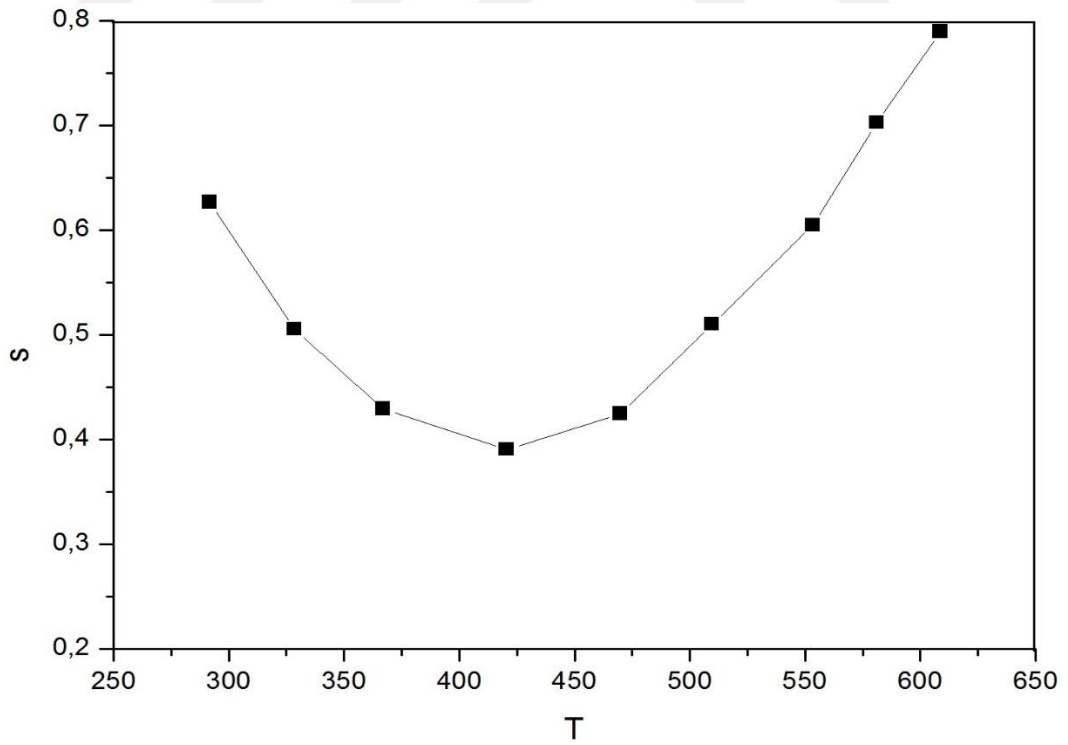
Şekil 4.88. $x=0$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.



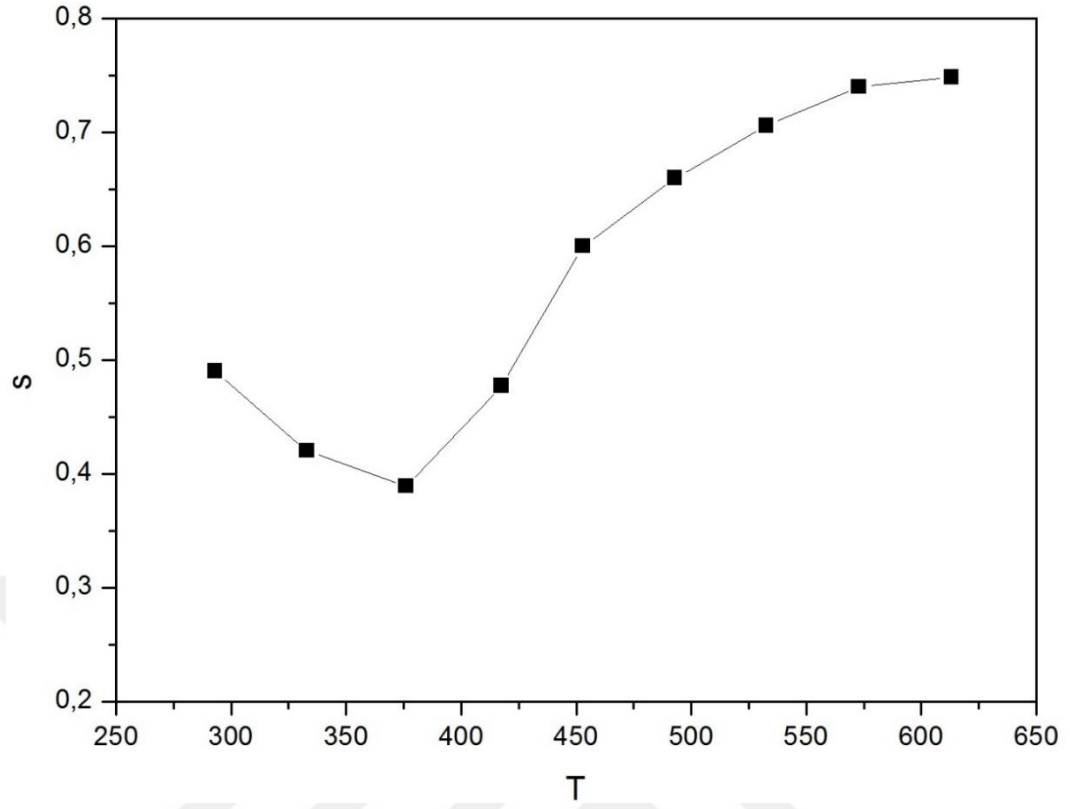
Şekil 4.89. $x=0.1$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.



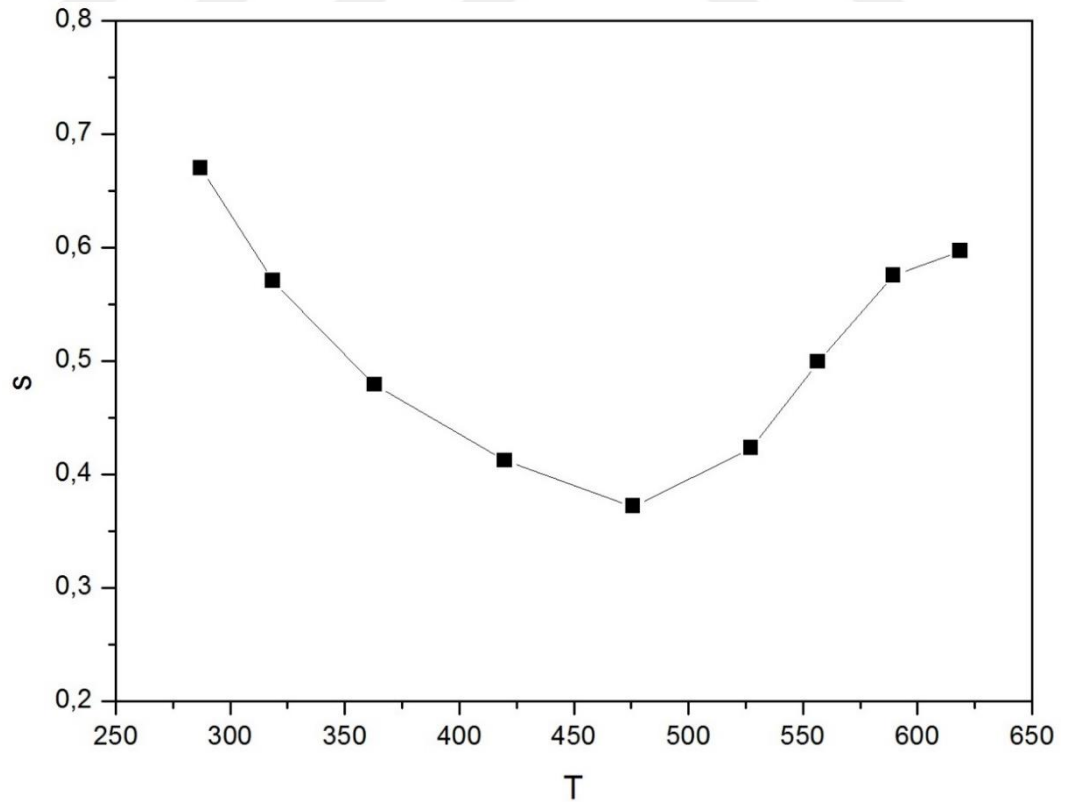
Şekil 4.90. $x=0,2$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 4.91. $x=0,3$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 4.92. $x=0,4$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.



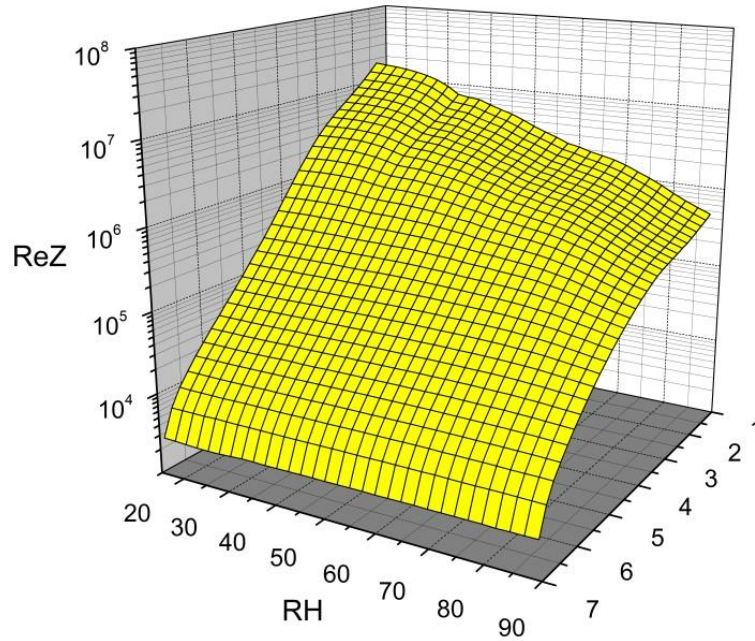
Şekil 4.93. $x=0,5$ için s parametresinin sıcaklıkla değişimi.

İncelediğimiz numunelerde s değeri artan sıcaklıkla azalıp bir minimum değere ulaştıktan sonra artmaya başlamıştır. Numunenin göstermiş olduğu bu özellik overlapping large polaron tunnelling (OLPT) modeline tam olarak uymaktadır.

Çizilen s - T grafiği bu eşitliklerle fit edildiğinde bulunan sonuçlar birbiriyle uyum göstermektedir. Bu uyum bize iletim mekanizmamızın OLPT modeli ile açıklanabileceğinin ispatıdır. Bu tarz iletkenlik Fe^{2+} ve Fe^{3+} siteleri arasında polaronların tünelleme yapması şeklinde ele alınabilir.

4.8. Nem Sonuçları

Gözenekli maddelerde nemin absorbe edilmesi temelde yüzey mekanizması ile gerçekleşir (Zhang ve ark. 2011). Numunedeki yüzey/hacim oranının büyük olması yüzeyden su moleküllerinin absorpsiyonunun çok kolayca olmasını sağlar (Qi ve ark. 2009). Absorpsiyon miktarına ve uygulanan alan frekansına bağlı olarak numunenin impedansı değişir. Şekil 4.94.'te Al-Cd ferritlerin impedansının nem ve frekansa göre değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi numunenin impedansı hem nem hem de frekansa aşırı bağlıdır. Bu sebeple grafiği iki farklı açıdan okumak mümkündür; frekansa ve neme göre; grafikten görüldüğü gibi sabit bir test frekansında nem arttıkça impedans azalmaktadır. Düşük frekanslardaki azalma yüksek frekanslara nazaran çok daha fazladır. Hatta bu değişim çok yüksek frekanslarda nerdeyse bir düz davranışa dönüşmektedir. 15 % ve 90 % nem aralığı için impedanstaki azalma miktarı 20 Hz test frekansında 17.28 M Ω dan 1.36 k Ω olarak gerçekleşmiştir. 10 MHz test frekansı için ise azalma aynı nem aralığında 0.45 M Ω dan 1.35 k Ω olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak düşük frekanstaki azalma dört on kat (logaritmik eksen düşünüldüğünde) olurken yüksek frekansta ise sadece iki on kat kadardır. Frekans arttıkça impedansın azalması genel manada absorbe edilen su miktarı ile belirlenir.



Şekil 4.94. İmpedansın nem ve frekansla değişimi.

Düşük nem değerlerinde az miktarda su molekülü absorbe edilir. Nem miktarı arttıkça absorbe edilen su molekülü miktarı da artar. Kapasitans frekansa aşırı bağlıdır ve absorbe edilen suyun dielektrik özelliği kapasitansın hızlı artmasına sebep olur. Yani düşük frekansta polarize olabilen su moleküllerinden dolayı sığa hızlı azalır. Yüksek frekansta absorbe edilen su molekülleri polarize olamadıkları için dielektrik olayı görülmez. Böylece yüksek frekansta azalma yok denecek kadar azdır. Böylece nemin artmasıyla kapasitansın yüksek frekanslardaki azalması düşük frekanslara nazaran daha yavaştır.

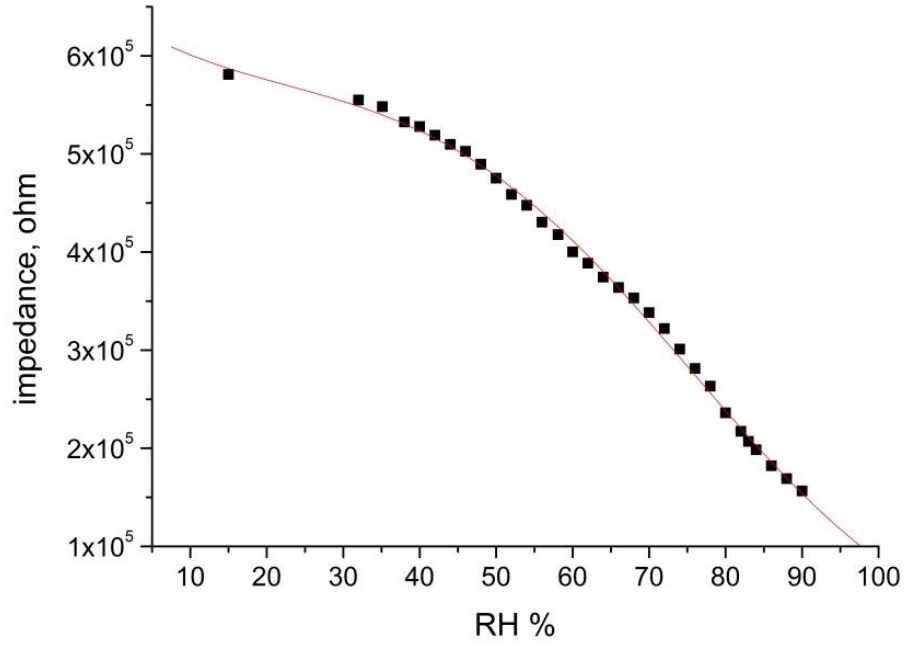
20 Hz-10 MHz frekans aralığındaki düşük bir nem değerinde ise dielektrik sabitin azalması yüksek nem değerine nazaran daha hızlıdır. İmpedans hem sığa hem de dirençten oluşan bir niceliktir. Düşük frekanstaki hızlı ve yüksek frekanstaki yavaş azalmadan tamamen absorbe edilen su molekülleri sorumludur. Nem oranı düşükken absorbe edilen su molekülleri numune yüzeyinde süreksiz bir su tabakası oluşturur. Bu durumda bu durumda yük transportu zayıftır. Sonuç olarak iletkenlik düşük direnç değeri ise yüksek olur (Wanga ve ark. 2003). Bu durumda numunenin impedansı frekansa bağlı olan sığadan ibaret olur. Nem oranı daha da arttığında ise

iletkenlik artar impedans ise azalır. Sonuç olarak numunenin impedansı düşük nem değerlerinde absorbe edilen su moleküllerinin sığalarından dolayı daha hızlı azalır.

Şekil 4.95.'te impedansın RH a göre değişimi gösterilmiştir. Ölçümler 1 kHz frekansında ve oda sıcaklığında, 15-90% RH aralığında yapılmıştır. İmpedans değeri %15 nemde $5 \times 10^5 \Omega$ iken %90 nem değerinde $1,5 \times 10^5 \Omega$ a azalır ve %15 nemdeki cevap %90'dakinden yaklaşık 4 kat daha fazladır. Buradaki yüksek hassasiyet, Al-Cd ferritlerin nem hassasiyeti olduğunu ifade eder. Bunun yanında şekilden açıkça görülebildiği gibi numune %15ten %90 RH a lineer bir tutum sergilemektedir. Ve yine bu da numunenin nem hassasiyetine atfedilir ve numunenin bu aralıkta RH izlenmesinin güvenilir olduğu tahmin edilebilir. Al-Cd ferritte İmpedansın Rh a karşı gösterdiği tutum su varlığında proton değişimi olarak düşünülebilir. Su buharı, Fe atomlarındaki bağlanmamış elektron çiftleri ile etkileşimi sayesinde proton taşıyıcısı olarak önemli bir rol oynar. Böylece, artan nem numunedeki yük taşıyıcı konsantrasyonlarının artmasına sebep olur. Relatif nemin, impedansla değişimi aşağıdaki eşitlikle uyum halinde olmalıdır:

$$Z = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (4.8)$$

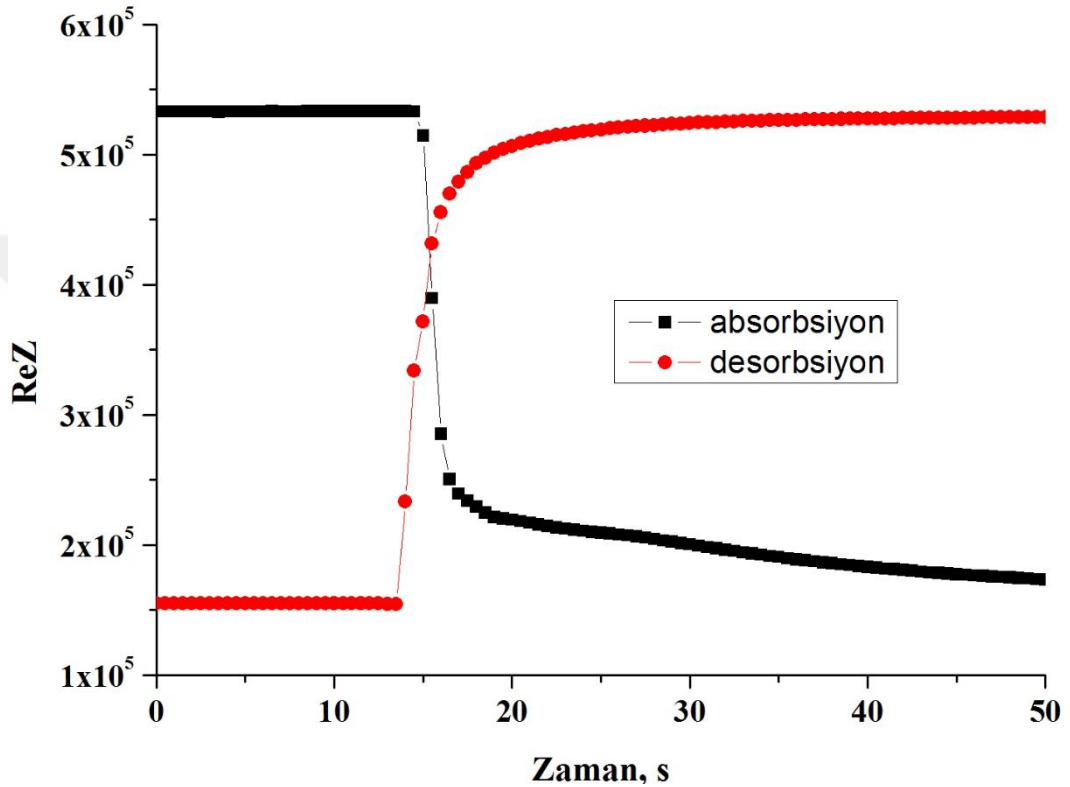
Burada, a, logaritmik ekseninde, yüksek nem değerlerindeki impedans değeri, b ise üssel faktördür. Eşitlikteki değerler, $a = 5,48 \text{ M}\Omega$, $b = 4009,5 \Omega/\text{RH}$, $c = -129,7 \Omega/\text{RH}^2$ ve $d = 0,39 \Omega/\text{RH}^3$ alınırsa, en iyi uyum elde edilmiş olur. Şekil 4.28.'de de görüldüğü üzere eşitlik ve deneysel sonuçlar arasında tutarlılık vardır.



Şekil 4.95. İmpedansın bağıl nemine göre değişimi.

Tepki ve kurtarma zamanı nem sensörlerinin performansını, tekrar edilebilirliğini ve kalitesini belirlemede çok önemli bir faktördür. Literatüre göre, sensörde toplam impedans değişiminin %90'ına ulaşınca kadar geçen süre tepki ya da kurtarma zamanı olarak adlandırılır. Tepki ve kurtarma zaman ölçümleri farklı iki RH seviyesinde 1 V ve 1 kHz'te sensorün impedansını kaydederek gerçekleştirildi. Öncelikle belirtilmelidir ki, sensör nem ortamı değişiminde laboratuvar atmosferine maruz kalır. Laboratuvar atmosferinin sensör üzerindeki etkisini azaltmak için ortam değişikliğini mümkün olduğunca kısa sürede tamamlamak gerekir. Tepki cevabı için düşük nem ortamından yüksek nem ortamına alınan sensörün impedans değeri sabitleninceye kadar beklenmiş, ardından aynı işlem yüksek nemden düşük neme tekrarlanmıştır. Bu süreçlere absorpsiyon ve desorpsiyon süreçleri denir. Numunenin tepki-kurtarma zamanı Şekil 4.96.'da sergilenmektedir. Şekilden açıkça görüleceği gibi, sensör çok hızlı tepki ve kurtarma zamanlarına sahiptir. Sensörün impedansı %90 Rh'dan %15 Rh'a 5,5 saniyede çıkarak sabitlenmiştir ve tersi süreç 8 saniyede tamamlanmıştır. Böylece tepki zamanı yaklaşık 5,5 saniye iken kurtarma zamanı yaklaşık 8 saniyedir. Tepki zamanı kurtarma zamanından biraz daha fazladır. Bu durum farklı şekillerde açıklanabilir. Bunlardan biri, nem ortamındaki absorbe suyun desorpsiyon süreci buna karşılık gelen absorpsiyon sürecinden daha yavaştır. Bir

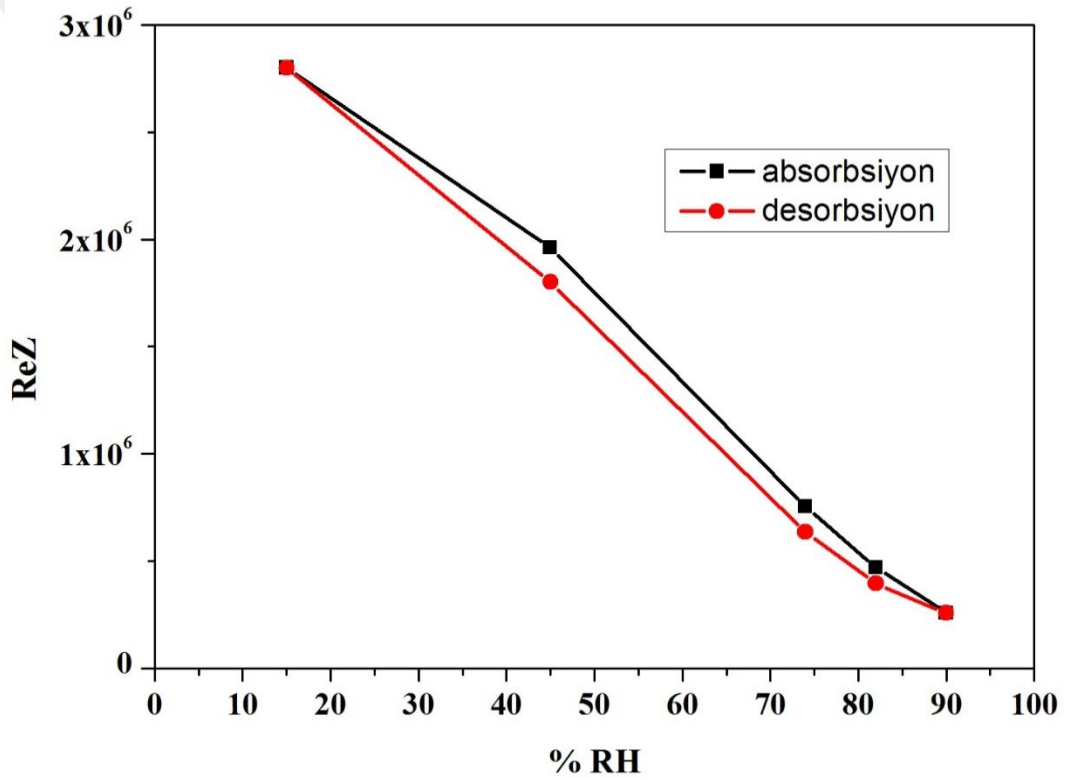
diğer değişle su buharının absorbsiyon ve desorbsiyon süreçleri egzotermik ve endotermik süreçlere karşılık gelir. Ve endotermik hız egzotermik hızdan daha yavaştır. Böylece tepki zamanı kurtarma zamanından daha uzundur (Li ve ark. 2015). Son olarak, tepki ve kurtarma zamanından yola çıkarak, Al-Cd ferrit sensörün tekrarlanabilir olduğu söylenebilir.



Şekil 4.96. Tepki ve kurtarma zamanları.

Nem sensörlerinde güvenilirliği karakterize etmek için histerezis önemli bir parametredir (Li ve ark. 2015). Histerezis absorbsiyon ve desorbsiyon süreçlerindeki zaman kaymasıdır (Liang ve ark. 2012). 1 V ve x Hz altında oda sıcaklığında yapılan ölçümler Şekil 4.97.'de gösterilmektedir. Nem histerezisleri, nem ortamını artırarak ve sonrasında tersi işlemi yaparak ölçülmüştür (Li ve ark. 2015). Siyah çizgi absorbsiyon sürecini temsil eden düşük Rh tan yüksek Rh a olan süreç, kırmızı çizgi ise ters yönde desorbsiyon sürecini temsil eder (Li ve ark. 2015). Şekilden görüldüğü gibi sensörün nem düşüş hassasiyet eğrileri nem artış hassasiyet eğrilerine yakındır. Ancak yine de desorbsiyon sürecinin impedansı absorbsiyon sürecinin impedansından biraz daha azdır. Çünkü absorbe suyun desorbsiyon süreci

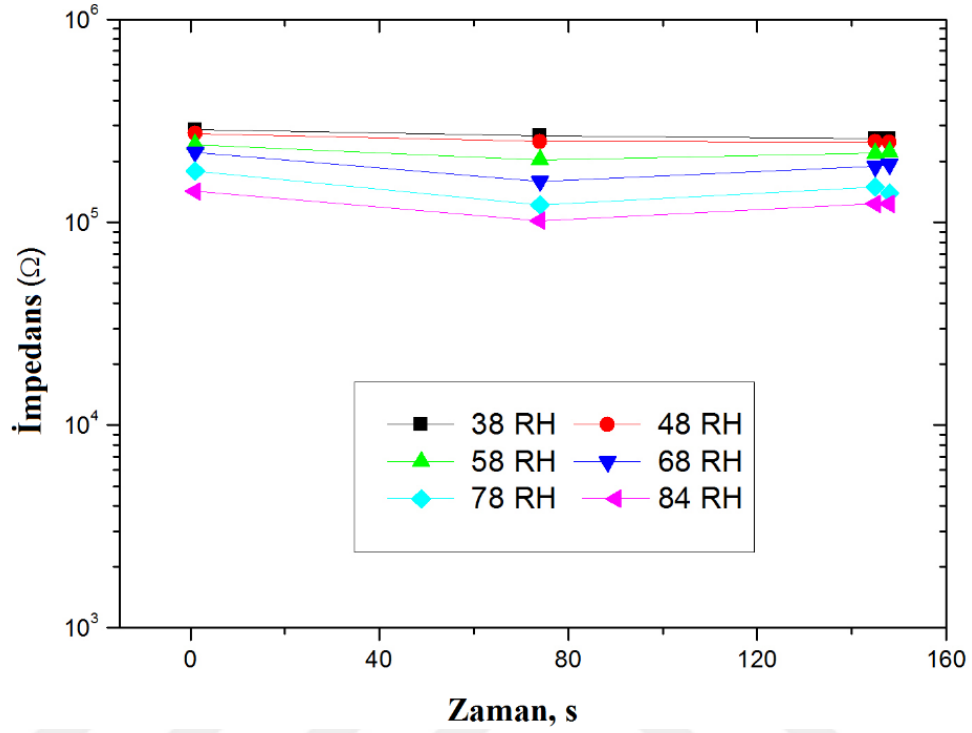
absorbsiyon sürecinden daha yavaştır. Bir başka deyişle, absorpsiyon egzotermik ve kendiliğinden gelişen bir süreçtir. Bunun yanında su molekülleri ve sensör malzemesinin yüzeyi arasındaki bağlanma enerjisi yüksek olduğundan desorpsiyon zordur. Bu yüzden bu durum absorpsiyon ve desorpsiyon süreçleri arasında histerezise neden olmaktadır (Zhao ve ark. 2013). Sonuç olarak nem sensörü dar bir histerezis göstermiştir. En fazla nem histerezisi orta nemin altında tüm RH aralığı içinde %5 RH tır. Ve logaritmik skalada da iyi hassasiyet doğruluğu göstermiştir. Bu dar histerezisten yola çıkarak bu malzemenin nem sensörü olarak iyi performans gösterdiğini ve ümit vadeden bir nem sensörü malzeme türü olduğunu kabul edebiliriz.



Şekil 4.97. Histerezis eğrileri.

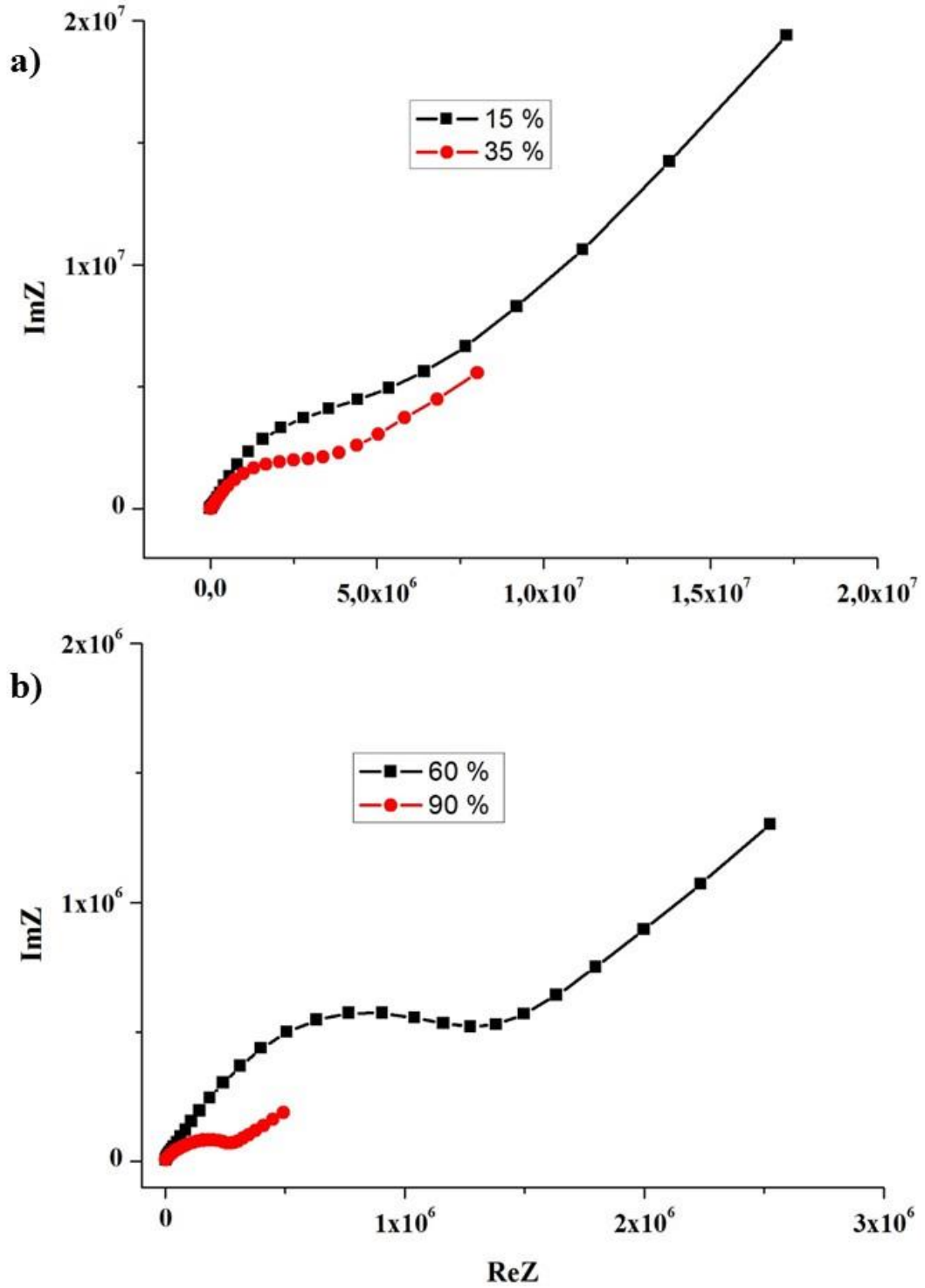
Nem sensörleri için uzun zaman kararlılığı günlük uygulamalarda önemli bir parametredir. Al-Cd ferritin uzun zaman kararlılığı Şekil 4.98.'de gösterilmektedir. Burada, farklı nem koşulları altında, 148 günlük bir süreçte sensörün impedans değişimleri gözlenmiştir. Görüldüğü üzere, sensörün impedansı ölçüm yapılan süreç içerisinde neredeyse hiç değişmemiştir. Bu durum sensörün iyi uzun zaman

kararlılığına sahip olduğunu kanıtlar. Ayrıca sensör pratik uygulamalar için umut vaat edicidir.



Şekil 4.98. Uzun zaman kararlılığı.

Numunenin karmaşık impedansının analizi yük taşıma mekanizmasının ortaya konması açısından tercih edilir. Bunun için sensörün sanal impedansının gerçek impedansa göre değişimi önemlidir. Şekil 4.99.a ve b'de ferrit tabanlı malzemenin farklı nem ortamlarında elde edilen karmaşık impedans eğrileri gösterilmiştir. Eğriler için 20 Hz-10 MHz frekans aralığında 31 test frekansı seçilerek oluşturulmuştur. Her bir nem ortamı için ölçüm yaklaşık 15-20 saniye kadar sürmüştür. Şekilden görüldüğü gibi her bir nem ortamı için eğriler iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birisi yarım çember parçası ve diğeri bir doğrusal kısımdır. Bu çemberler durulma olayının bir göstergesidir. Çemberlerin çapı reel eksenin altında kalmaktadır. Bu sebeple durulma mekanizması Cole-Cole modeli ile temsil edilir. Model birbiri ile kuvvetli etkileşen elektriksel dipolleri temel alır. Modele göre artan nem ile durulma dağılım parametresi de azalır. Sonuç olarak durulma zamanının da azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.99. a. %15 ve %35 nem değerleri için Cole- Cole eğrileri b. %60 ve %90 nem değerleri için Cole- Cole eğrileri.

Numunenin impedans davranışı bir eşdeğer devre ile temsil edilir. Bu eşdeğer devre paralel bağlı bir sığa ve direnç ile onlara seri bağlı başka dirençten oluşur. Seri direnç yüksek frekanstaki impedans değerinden paralel direnç ise çemberin reel eksen

üzerine karşılık gelen giriş uzunluğundan kolayca tahmin edilir. Nem değeri arttıkça hem çemberlerin büyüklüğü hem de düşük frekanslardaki kuyruk küçülür. Bu sebeple çok kolaylıkla artan nem ile birlikte paralel direncin $9.12 \text{ M}\Omega$ değerinden $0.36 \text{ M}\Omega$ değerine seri direncin ise $1.36 \text{ k}\Omega$ değerinden $1.34 \text{ k}\Omega$ değerine azaldığı söylenebilir.

Schaub mekanizmasına göre numunedeki kusurlar yerel olarak yüksek bir yük yoğunluğu ve kuvvetli bir elektrik alan sergiler. Bu yüksek yoğunluk ve uygulanan alan su ve malzemenin içerdiği moleküllerin ayrışmasını yardımcı olur (Khadse ve ark. 2014). Bu ayrışma proton ve bazı iyonların hoplama transportu ile yük taşınmasına sebep olur. Nem oranı düşükken suyun numune yüzeyinde süreksiz olması sebebiyle bu iyonların taşınması zordur. RH arttıkça yüzeyde sürekli bir su tabakası meydana gelir ve böylece hoplama transportu kolaylaşır. Böylece iletim artar direnç azalır (Qi ve ark. 2009).

Düşük frekanslardaki düz doğru parçası elektrot-numune ara yüzeyindeki impedansa karşılık gelir. Bu dirence Warburg impedansı da denir. Bu direnç numune ile elektrot arasındaki elektroaktif türlerin difüzyonuna sebep olur (Fei ve ark. 2014). Bu sebeple yük transport mekanizmasından elektroaktif türlerden Fe^{3+} iyonunun sorumlu olduğu düşünülmektedir (Qi ve ark. 2008). Buradaki iyon difüzyonu için durulma zamanının yük transferine göre daha uzun olduğu için düşük frekanslarda düz bir çizgi gözükür (Wang ve ark. 2013).

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacıklar sentezlenmiş, sentezlenen bu malzemelerin yapısal, optik, manyetik ve elektriksel özellikleri üzerinde kompozisyonun etkisi incelenmiştir. Sentezlenme yöntemi olarak çökelme metodu kullanılmıştır. Bu metot ile elde edilen nano boyutlu $\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit nanoparçacıkları nanokristal yapıyı oluşturmak ve mümkün olduğunca homojen bir yapı dağılımı elde etmek için pelet formuna getirilmiştir.

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacıklar çökelme metodu ile üretilirken saf su çözücü olarak kullanılmıştır. Literatür taraması sonucunda en uygun karıştırma hızı ve sıcaklığı bulunarak çökeltiler elde edilmiş, safsızlık atomlarından arındırmak için defalarca yıkanıp süzölmüş en uygun sinterleme sıcaklığında toz formuna dönüştürölmüştür.

Sentezlenen örneklerin yapısal özellikleri x-ışını toz kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FT-IR) ile, optik özellikleri UV-Vis spektrometresi ile, manyetik özellikleri ise Titreşen Örnek Magnetometresi (VSM) yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

XRD verilerinin analizi, üretilen örneklerin her birinin kübik spinel yapıda olduklarını göstermiş ve XRD verileri kullanılarak ortalama parçacık boyutları Scherrer eşitliğine göre hesaplanmıştır. Ayrıca yine XRD verileri aracılığıyla örgü sabitleri ve yoğunluklar da tüm numuneler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Alüminyum konsantrasyonun, kristal boyutuna etkisi araştırılmıştır.

XRD verilerinden hesaplanan bu değerler ile 20 kV hızlanma voltajında taramalı elektron mikroskobundan elde edilen veriler karşılaştırıldığında, sonuçların uyum

içerisinde olduğu anlaşılmıştır. Üretilen toz numunelerin, SEM görüntülerinde karşılaşılan topaklanmış ve birleşmiş form sergilemeleri manyetik özelliklerinin baskın olmasına atfedilir. Görüntülerde numunelerin toz formu açık şekilde fark edilebiliyorken, topaklanma ve birleşmelerin de bir düzen içerisinde değil rastgele bir şekilde dağıldığı gözlenmektedir.

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacıklarının FT-IR spektrumunda iki geniş metal oksijen bandı gözlemlenir. FT-IR spektrumu, 530 cm^{-1} ve 430 cm^{-1} civarında iki ana absorpsiyon bandı göstermektedir.

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacık serisine ait UV-Vis spektrumu, 200-1100 nm dalgaboyu aralığında kaydedilmiştir. Her numune için soğurma katsayılarının hesaplanması ve grafiklerinin çizilmesi neticesinde bant aralığı enerjileri hesaplanmıştır. Tüm numuneler için elde edilen sonuçlar 2 eV civarında bulunduğu için numunelerimizin yarıiletken ve yarıiletkeneye yakın yalıtkan bant aralığında davranış sergilediği yorumunu yapmak doğru olacaktır.

$\text{Al}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrit sisteminin oda sıcaklığında yapılan manyetik ölçümleri sonucu M-H histerizis çevrimleri elde edilmiştir. Al katkısının olmadığı ($x=0$) CdFe_2O_4 durumunda, manyetik alan varlığında, sıfır manyetik momenti ile paramanyetik ya da antiferromanyetik benzeri davranış sergilenmiştir. Diğer tüm numuneler için elde edilen S şekilli dar histerizis çevrimleri bize numunelerin yumuşak ferrit olduğunu gösterir.

Numunelerin dielektrik sonuçları frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak verilmiştir. Ölçümler için 20 Hz-10 MHz frekans ve 293 K-316 K sıcaklık aralığında çalışılmıştır. Dielektrik sabiti frekansla azalan bir davranış sergilerken, sıcaklıkla yaygın bir gevşeme davranışına sahip olduğu gözlenmiştir. Dielektrik sabitin frekansla azalan bir tutum sergilemesi ferritler için normal bir durumdur ve Maxwell-Wagner tipi polarizasyon esaslarıyla açıklanabilir. Bu modele göre ferritlerin yapılarının iki tabakadan oluştuğu varsayılmaktadır. İlk büyük taneciklerden oluşan iletim tabakasıdır. Diğer tabaka ise iletim olarak zayıf olan tane sınırlarından oluşur.

Dielektrik sabinin sıcaklıkla olan değişiminden ise relaksör tipi ferroelektrik olduğu bulunmuştur.

Dielektrik ya da empedans spektroskopisi olarak anılan, dielektrik ölçümlerden elde edilen deneysel sonuçları farklı teorik modellere dayandırma uygulamaları için dielektrik sonuçlardan elde edilemeyen çevrimler, empedans verilerine dönüştürülerek elde edilmiştir. Sonuçlarımızın Cole-Cole modelle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

$Al_xCd_{1-x}Fe_2O_4$ ferrit sisteminin iletkenlik sonuçları dc ve ac iletkenlik olarak iki başlıkta incelenmiştir. Dc iletkenlik için elde edilen veriler ve çizilen grafikler neticesinde, tüm numunelerimizin Arrhenius davranışı sergilediği açıktır. Ac iletkenlik için ise tüm numunelerin iletkenlik mekanizmasının overlapping large polaron tunnelling (OLPT) modeline tam olarak uyduğu açıkça elde edilmiştir.

$x=0,5$ numunesi için yapılan nem ölçümlerinde, pelet halindeki nanporçacık sistemimizin cihaz olarak kullanılabileceği, numunenin empedansının sertçe düşmesinden, sistemin kararlılığından, hızlı tepki ve kurtarma zamanlarından, dar histerizis döngüsünden ve uzun zaman sabitliğinden anlaşılmaktadır. Bu özelliklerin hepsi nem sensörleri için arzu edilen niceliklerdir.

Tüm bunlarla birlikte, çalışılmış numunelerin geliştirilmesi için, üretim ve ölçüm aşamalarında farklılıklar yapılabilir. Üretilen serinin numune sayısı ne kadar çok olursa tutarlılığı ya da monoton davranış beklentisini karşılaması o kadar az olacağından, serideki numune sayısını az tutmak gerekebilir. Bununla birlikte üretim koşullarında bir takım değişiklikler yapılabilir. Örneğin çözücü cinsini, üretim ve sinterleme sıcaklığını değiştirerek, numunelerin yapısal, optik, manyetik ve elektriksel özelliklerine etkisi araştırılabilir. Manyetik ölçüm aralığı genişletilebilir. Çalışmamızda gözlemleyemediğimiz yüksek frekans ve sıcaklık etkilerini araştırabilmek için ölçüm aralığını genişletmeyi önerebiliriz.

KAYNAKLAR

- Aakash, Choubey, R. Das, D. Mukherjee, S. 2016. Effect of doping of manganese ions on the structural and magnetic properties of nickel ferrite, *Journal of Alloys and Compounds*, 668: 33-39.
- Abdeen, A.M. Hemeda, O.M. Assem, E.E. El-Sehly, M.M. 2002. Structural, electrical and transport phenomena of Co ferrite substituted by Cd, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 238: 75–83.
- Abo El Ata, A. M. Attia, S. M. Meaz, T. M. 2004. AC conductivity and dielectric behavior of $\text{CoAl}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$, *Solid State Sciences*, 6: 61-69.
- Afifi, M. A. Bekheet, A. E. Abd Elwahhab, E. Atyia, H. E. 2001. Ac conductivity and dielectric properties of amorphous In_2Se_3 films, *Vacuum*, 61: 9-17.
- Ahmad, R. Gul, I. H. Zarrar, M. Anwar, H. Niazi, M. B. Khan, A. 2016. Improved electrical properties of cadmium substituted cobalt ferrites nano-particles for microwave application, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 405: 28-35.
- Ajrouti, L. Mliki, N. Bessais, L. Madigou, V. Villain, S. Leroux, Ch. 2014. Magnetic, electric and thermal properties of cobalt ferrite nanoparticles, *Materials Research Bulletin*, 59: 49-58.
- Akbulut, S. 2011. Polimerik Tabanlı Spinel Nanokompozit $(\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4)_x(\text{CoFe}_2\text{O}_4)_{3-x}$ Ferritlerinin Dielektrik Ve İletkenlik Özellikleri, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Akgul, Ü. Ergin, Z. Sekerci, M. Atici, Y. 2008. AC conductivity and dielectric behavior of $[\text{Cd}(\text{phen})_2(\text{SCN})_2]$ *Vacuum*, 82: 340-345.
- Akhter, S. Hakim M. A. 2010. Magnetic properties of cadmium substituted lithium ferrites, *Materials Chemistry and Physics*, 120: 399-403.
- Altındal, A. Abdurrahmanoğlu, Ş. Bulut, M. Bekaroğlu, Ö. 2005. Charge transport mechanism in bis(double-decker lutetium(III) phthalocyanine) (Lu_2Pc_4) thin film, *Synthetic Metals*, 150: 181-187.
- Amer, M. A. ve Hemeda, O. M. 1994. ^{57}Fe Mössbauer and infrared studies of the system $\text{Co}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, *Hyperfine Interactions*, 96: 99-109.

- Amer, M. A. Meaz, T. M. Mostafa, A. G. El-Kastawi, M. Ghoneim, A. I. 2014. Characterization and spectral studies of Co^{3+} -doped $\text{Cd}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrites, *Ceramics International*, 40: 241-248.
- Amer, M. A. Meaz, T. M. El-Kestawy, M. Ghoneim, A. I. 2016. Magnetic and structural studies of trivalent Co-substituted Cd-Mn ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 405: 137-144.
- Anbia, M. Moosavi Fard, S. E. 2011. Humidity sensing properties of La^{3+} and K^{+} co-doped $\text{Ti}_{0.9}\text{Sn}_{0.1}\text{O}_2$ thin films, *Journal Of Rare Earths*, 29(7): 668-674.
- Anbia, M. Fard, S. E. M. 2012. Humidity sensing properties of Ce-doped nanoporous ZnO thin film prepared by sol-gel method, *Journal Of Rare Earths*, 30(1): 38-45.
- Anil, Raut, V. Kurmude, D. V. Shengule, D. R. Jadhav, K. M. 2014. Effect of gamma irradiation on the structural and magnetic properties of Co-Zn spinel ferrite nanoparticles, *Materials Research Bulletin*, 63: 123-128.
- Anjum, S. Tahir, H. M. Hussain, K. Khaleeq-ur-Rahman, M. Rafique, M. S. Naseem S. 2011. Structural and magnetic properties of cadmium substituted Ni-Al ferrites, *Physica B*, 406: 2555-2558.
- Ashiq, M. N. Bibi, N. Malana, M. A. 2010. Effect of Sn-Ni substitution on the structural, electrical and magnetic properties of mixed spinel ferrites, *J Alloy Compd*, 490: 594-597.
- Ates, T. Tatar, C. Yakuphanoglu, F. 2013. Preparation of semiconductor ZnO powders by sol-gel method: Humidity sensors, *Sensors and Actuators A*, 190: 153-160.
- Atta, A. A. 2009. AC conductivity and dielectric measurements of bulk magnesium phthalocyanine (MgPc), *Journal of Alloys and Compounds*, 480: 564-567.
- Austin, I. G. Mott, N. F. 1969. *Adv. Phys.* 18: 41
- Bara, J.J. Bogacz, B.F. Hankiewicz, J. Pajak Z. 1996. The hyperfine field distribution in copper-cadmium ferrites studied by Mössbauer and NMR spectroscopies, *Journal of Alloys and Compounds* 232: 169-173.
- Batoo, K. M. Kumar, S. Lee, C. G. Alimuddin, 2009. Finite size effect and influence of temperature on electrical properties of nanocrystalline Ni-Cd ferrites, *Current Applied Physics*, 9: 1072-1078.
- Bauskar, D. Kale, B. B. Patil, P. 2012. Synthesis and humidity sensing properties of ZnSnO_3 cubic crystallites, *Sensors and Actuators B*, 161: 396-400.
- Baykal, A. Güner, S. Demir, A. Esir, S. Genç, F. 2014. Effect of Zinc substitution on magneto-optical properties of $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ nanocomposites, *Ceramics International*, 40(8): 13401-13408.
- Baykal, A. Güner, S. Demir, A. 2015. Synthesis and magneto-optical properties of triethylene glycol stabilized $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 619: 5-11.
- Belavi, P.B. Chavan, G.N. Naik, L.R. Somashekar, R. Kotnala, R.K. 2012. Structural, electrical and magnetic properties of cadmium substituted nickel-copper ferrites, *Materials Chemistry and Physics*, 132: 138-144.

- Bellad, S.S. ve Chougule, B.K. 1997. Microstructure-Dependent Magnetic Properties Of Li-Cd Ferrites, *Materials Research Bulletin*, 33(8): 1165–1173.
- Bellad, S.S. Pujar, R.B. Chougule, B.K. 1998. Structural and magnetic properties of some mixed Li-Cd ferrites, *Materials Chemistry and Physics*, 52: 166-169.
- Bellad, S.S. Watawe, S.C. Chougule, B.K. 1999. Microstructure and permeability studies of mixed Li-Cd ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 195: 57-64.
- Bhandari, S. et al. 2016. Enhanced microstructure and electrical properties of Mn-modified $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.65}\text{K}_{0.35})_{0.5}\text{TiO}_3$ ferroelectric ceramics, *Ceramics International* 42: 4274-4284.
- Bhattacharya, S. Ve Ghosh, A. 2003. ac relaxation in silver vanadate glasses, *Physical Review B* 68: 224202.
- Bhukal, S. Bansal, S. Singhal, S. 2014. $\text{Co}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.2}\text{Cd}_x\text{Fe}_{1.8-x}\text{O}_4$ ($0.2 \leq x \leq 0.8$) magnetic ferrite nano-particle: Synthesis, characterization and photo-catalytic degradation of methyl orange, *Journal of Molecular Structure*, 1059: 150-158.
- Bhukal, S. Mor, S. Bansal, S. Singh, J. Singhal, S. 2014. Influence of Cd^{2+} ions on the structural, electrical, optical and magnetic properties of Co–Zn nanoferrites prepared by sol gel auto combustion method, *Journal of Molecular Structure*, 1071: 95-102.
- Bhukal, S. Namgyal, T. Mor, S. Bansal, S. Singhal, S. 2012. Structural, electrical, optical and magnetic properties of chromium substituted Co–Zn nanoferrites $\text{Co}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Cr}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) prepared via sol–gel auto-combustion method, *Journal of Molecular Structure*, 1012: 162-167.
- Cebeci, C. B. 2016. Characterization Of Fe_3O_4 And MnZn Ferrite Nanoparticles Produced By Co-Precipitation Method, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Chinnasamy, C. N. Narayanasamy, A. Ponpandian, N. 2001. Mixed spinel structure in nanocrystalline NiFe_2O_4 , *Physical Review B*, 63: 1-6.
- Cole, K S. Cole, R. H. 1941. Dispersion and Absorption in Dielectrics, *Journal Of Chemical Physics*, 9: 341-351.
- Cullity, B.D. 1972. *Introduction to Magnetic Materials*, Addison Wesley Publishing Company.
- Çavdarlı, M. 2009. Bazı Kobalt Ferrit Nano Sistemlerin Elektriksel Özelliklerinin Dielektrik Spektroskopi Yöntemi İle İncelenmesi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.
- Çavuş. M.S., S. Bozdemir sunumu, 12. Ankara Yoğun Madde Fiziği Toplantısı, Ankara Üniversitesi, 2005
- Demirbaş, Ö. 2008. NiCoFe Filmlerin Elektrodpozisyon Tekniği İle Üretimi Ve Depozisyon Parametrelerinin Karakterizasyona Etkisi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.

- Demirci, Ç. E. 2012. Demir Bazlı Nanoparçacıkların Sentezi, Yapısal Ve Manyetik Karakterizasyonu, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Deraz, N.M. Hessien, M.M. 2009. Structural and magnetic properties of pure and doped nanocrystalline cadmium ferrite, *Journal of Alloys and Compounds*, 475: 832-839.
- Desai, R, Mehta, R. V. Upadhyay, R. V. Gupta, A. Praneet, A. and Rao, K. V. 2007. Bulk magnetic properties of $\text{CdFe}_{(2)}\text{O}_{(4)}$ in nano-regime *Bull. Mat. Sci.* 30: 197-203.
- Dhage, S. R. Kholam, Y. B. Deshpande, S. B. Ravi, V. 2003. Co-precipitation technique for the preparation of nanocrystalline ferroelectric $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, *Materials Research Bulletin*, 38: 1601-1605.
- Dikici, M. 2012. Katıhal Fiziği, Seçkin Yayıncılık.
- Din, M. F. Ahmad, I. Ahmad, M. Farid, M. T. Asif Iqbal, M. Murtaza, G. Akhtar, M. N. Shakir, I. Warsi, M. F. Khan, M. A. 2014. Influence of Cd substitution on structural, electrical and magnetic properties of M-type barium hexaferrites co-precipitated nanomaterials, *Journal of Alloys and Compounds*, 584: 646-651.
- Dönük, Ç. 2012. CoNiCu İnce Film Alaşımlarının Xrd Ve Xrf İle İncelenmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- El-Hagary, M. Matar, A. Shaaban, E. R. Emam-Ismail M. 2013. The influence of Cd doping on the microstructure and optical properties of nanocrystalline copper ferrite thin films, *Materials Research Bulletin*, 48: 2279-2285.
- El-Nahass, M. M. Farid, A. M. Abd El-Rahman, K. F. Ali, H. A. M. 2008, Ac conductivity and dielectric properties of bulk tin phthalocyanine dichloride (SnPcCl_2), *Physica B*, 403: 2331-2337.
- Eraky, M. R. S.M. Attia, Transport properties of Ti–Ni spinel ferrites, *Physica B* 462 (2015) 97–10398
- Erdik E. Organik Kimyada Spektroskopik Yöntemler, 2. Baskı, Gazi Kitabevi, Ankara, (1998), 166.
- Faia, P. M. Furtado, C. S. 2013. Effect of composition on electrical response to humidity of $\text{TiO}_2\text{:ZnO}$ sensors investigated by impedance spectroscopy, *Sensors and Actuators B*, 181: 720-729.
- Farea, A.M.M. Kumara, S. Batoo, K. M. Yousef, A. Lee, C. G. Alimuddin, 2008. Structure and electrical properties of $\text{Co}_{0.5}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$ ferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, 464: 361-369.
- Farea, A.M.M. Kumar, S. Batoo, K. M. Yousef, A. Alimuddin, 2008. Influence of frequency, temperature and composition on electrical properties of polycrystalline $\text{Co}_{0.5}\text{Cd}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$ ferrites, *Physica B*, 403: 684-701.
- Fei, T. Kai Jiang, Sen Liu, Tong Zhang, Humidity sensors based on Li-loaded nanoporous polymers, *Sensors and Actuators B* 190 (2014) 523– 528

- Friedrich, C. ve Braun H. 1992. Generalized Cole-Cole behavior and its rheological relevance, *Rheol Acta* 31:309-322
- Gadkari, A.B. Shinde, T.J. Vasambekar, P.N. 2008. Structural analysis of Y^{3+} -doped Mg-Cd ferrites prepared by oxalate co-precipitation method, *Materials Chemistry and Physics*, 114: 505-510.
- Gadkari, A.B. Shinde, T.J. Vasambekar, P.N. 2009. Structural analysis of Sm^{3+} doped nanocrystalline Mg-Cd ferrites prepared by oxalate co-precipitation method, *Materials Characterization*, 60:1328-1333.
- Gadkari, A. B. Shinde, T. J. Vasambekar, P. N. 2010. Magnetic properties of rare earth ion (Sm^{3+}) added nanocrystalline Mg-Cd ferrites, prepared by oxalate co-precipitation method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322: 3823-3827.
- Gadkari, A. B. Shinde, T. J. Vasambekar, P. N. 2011. Synthesis, characterization and magnetic properties of La^{3+} added Mg-Cd ferrites prepared by oxalate co-precipitation method, *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 966-972.
- Gadkari, A. B. Shinde, T. J. Vasambekar, P. N. 2013. Influence of rare earth ion (Y^{3+}) on the magnetic and dc electrical properties of high density nanocrystalline Mg-Cd ferrites, *Materials Research Bulletin*, 48: 476-481.
- Gangopadhyay, R ve De, A. 2000. Transport properties of polypyrrole-ferric oxide conducting nanocomposites, *Journal of Applied Physics*, 87(5): 2363-2371.
- Geng, W. Yuan, Q. Jiang, X. Tu, J. Duan, L. Gu, J. Zhang, Q. 2012. Humidity sensing mechanism of mesoporous MgO/KCl-SiO₂ composites analyzed by complex impedance spectra and bode diagrams, *Sensors and Actuators B*, 174: 513-520.
- Ghatak, S. Chakraborty, G. Sinha, M. Pradhan, S. K. Meikap, A. K. 2011. Dielectric relaxation and magnetic field dependent alternating current conductivity of nanocrystalline cadmium-zinc ferrite below roomtemperature, *Physica B*, 406: 3261-3266.
- Gillota, B. Thiebaut, D. Laarj, M. 1999. Synthesis of stoichiometric cadmium substituted magnetites and formation by oxidation of solid solutions of cadmium ferrite and γ -iron oxide, *Thermochimica Acta* 342: 167-174.
- Grenèche, J.M. Teillet, J. Pascard, H. 1995. A mixed nickel-cadmium ferrite investigated by Mössbauer spectrometry, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 140(144): 2087-2088.
- Griffiths. D.J., *Elektromagnetik Teori*, Çev: Prof. Dr. B. Ünal, Gazi Kitabevi, 166-170, Eylül 2005.
- Gupta, M. Gupta, M. Anu, Mudsainiyan, R. K. Randhawa, B. S. 2015. Physico-chemical analysis of pure and Zn Doped Cd ferrites ($Cd_{1-x}Zn_xFe_2O_4$) nanofabricated by Pechini sol-gel method, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 116: 75-85.
- Gupta, M. Gupta, M. Anu, Mudsainiyan, R. K. Randhawa, B. S. 2016. Aqueous ammonia as 'CPCA' in sol-gel combustion method for nanofabrication of $CdFe_2O_4$, *Materials Today: Proceedings*, 3: 319-324.

- Gupta, M. Gupta, M. Randhawa B. S. 2015. Influence of Mg concentration on physico-chemical properties of Cd ferrites ($\text{CdMg}_{1.5-x}\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$) synthesized by sol-gel combustion method, *Journal of Alloys and Compounds*, 626: 421-427.
- Güner, S. Esir, S. Baykal, A. Demir, A. Bakış, Y. 2014. Magneto-optical properties of $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles, *Superlattices and Microstructures*, 74: 184-197.
- Hafiz M. I. Abdallah, Moyo, T. Superparamagnetic behavior of $\text{Mn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel nanoferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 361(2014)170–174
- Hakim, M. A. Nath, S. K. Sikder, S. S. Maria, K. H. 2013. Cation distribution and electromagnetic properties of spinel type Ni–Cd ferrites, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74: 1316-1321.
- Hankare, P. P. Sanadi, K. R. Pandav, R. S. Patil, N. M. Garadkar, K. M. Mulla, I. S. 2012. Structural, electrical and magnetic properties of cadmium substituted copper ferrite by sol-gel method, *Journal of Alloys and Compounds*, 540: 290-296.
- Harish, K. N. Bhojya Naik, H. S. Prashanth Kumar, P. N. Viswanath, R. 2012. Synthesis, enhanced optical and photocatalytic study of Cd–Zn ferrites under sunlight, *Catal. Sci. Technol.*, 2: 1033-1039.
- Hashim, M. Alimuddin, Shirsath, S. E. Kotnala, R. K. Meena, S. S. Kumar, S. Roy, A. Jotania, R. B. Bhatt, P. Kumar, R. 2013. Influence of Ni^{2+} substitution on the structural, dielectric and magnetic properties of Cu–Cd ferrite nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 573: 198-204.
- Hemeda, O.M. Barakat, M.M. 2001. Effect of hopping rate and jump length of hopping electrons on the conductivity and dielectric properties of Co-Cd ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 223: 127-132.
- Islam, A. I. M. U. Ashiq, M. N. Khan, H. M. Iqbal, M. A. Najam-Ul-Haq, M. 2014. Effect of Eu–Ni substitution on electrical and dielectric properties of Co–Sr–Y-type hexagonal ferrite, *Materials Research Bulletin*, 49: 338-344.
- İnternet kaynağı-1: https://tr.wikipedia.org/wiki/X_ışını_kristalografisi, Erişim Tarihi: 17 Kasım 2016.
- İnternet kaynağı-2: https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramalı_elektron_mikroskobu, Erişim Tarihi: 17 Kasım 2016.
- İnternet kaynağı-3: www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/sem.htm. 09.12.2011, Erişim Tarihi: 18 Kasım 2016.
- İnternet kaynağı-4: http://www.jeolusa.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX/Download.aspx?Command=Core_Download&EntryId=598&PortalId=2&TabId=320, Erişim Tarihi: 18 Kasım 2016.
- İnternet kaynağı-5: <http://www.mta.gov.tr/v2.0/birimler/laboratuvarlar/index.php?id=FTIR>, Erişim Tarihi: 18 Kasım 2016.
- İnternet kaynağı-6: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polaron>. Erişim Tarihi: 22 Kasım 2016.

- İyibakar. G., Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansla Değişimlerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir, 2003
- Jacob, B. P. Thankachan, S. Xavier, S. Mohammed, E. M. 2011. Effect of Gd^{3+} doping on the structural and magnetic properties of nanocrystalline Ni–Cd mixed ferrite, *Phys. Scr.* 84 (045702): 6.
- Jauhar, S. Goyal, A Lakshmi, N. Chandra, K. Singhal, S. 2013. Doping effect of Cr^{3+} ions on the structural, magnetic and electrical properties of Co–Cd ferrites: A study on the redistribution of cations in $CoCd_{0.4}Cr_xFe_{1.6-x}O_4$ ferrites, *Materials Chemistry and Physics*, 139: 836-843.
- Jiles D., Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman and Hall, (London-1991)
- Karanjkar, M. M. Tarwal, N. L. Vaigankar, A. S. Patil P. S. 2013. Structural, Mössbauer and electrical properties of nickel cadmium ferrites, *Ceramics International*, 39: 1757-1764.
- Karche, B.R. Khasbardar, B.V. Vaingankar, A.S. 1997. X-ray, SEM and magnetic properties of Mg–Cd ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 168: 292-298.
- Kaur, M. Rana, S. Tarsikka, P. S. 2012. Comparative analysis of cadmium doped magnesium ferrite $Mg_{1-x}Cd_xFe_{2-x}O_4$ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$) nanoparticles, *Ceramics International*, 38: 4319-4323.
- Kaur, H. Singh, J. Randhawa, B. S. 2014. Essence of superparamagnetism in cadmium ferrite induced by various organic fuels via novel solution combustion method, *Ceramics International*, 40:12235-12243.
- Khadse, V. R. Sharada Thakur, K.R. Patil, Pradip Patil, Humidity-sensing studies of cerium oxide nanoparticles synthesized by non-isothermal precipitation, *Sensors and Actuators B* 203 (2014) 229–238
- Kharabe, R.G. Jadhav, S.A. Shaikh, A.M. Patil, D.R. Chougule, B.K. 2001. Magnetic properties of mixed Li–Ni–Cd ferrites, *Materials Chemistry and Physics* 72: 77-80.
- Kharabe, R.G. Devan, R.S. Chougale, B.K. 2008. Structural and electrical properties of Cd-substituted Li–Ni ferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, 463: 67-72.
- Kittel, C. 1996. "Katı Hal Fizikine Giriş", BilgiTek Yayıncılık, İstanbul, 1996
- Kolekar, C. B. Kamble, P. N. Kulkarni, S. G. Vaingankar A. S. 1995. Effect of Gd^{3+} substitution on dielectric behaviour of copper-cadmium ferrites, *Journal Of Materials Science* 30: 5784-5788.
- Kolekar, C.B. Lipare, A.Y. Ladgaonkar, B.P. Vasambekar, P.N. Vaingankar, A.S. 2002. The effect of Gd^{3+} and Cd^{2+} substitution on magnetization of copper ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 247: 142-146.
- Kotnala, R.K. Verma, V. Pandey, V. Awana, V.P.S. Aloysius, R.P. Kothari, P.C. 2007. The effect of nano- SiO_2 on the magnetic and dielectric properties of lithium cadmium ferrite, *Solid State Communications* 143: 527-531.

- Kumar, P. Parmod Kumar, Ashish Kumar, R.C. Meena, Renu Tomar, F. Chanda, K. Asokan, Structural, morphological, electrical and dielectric properties of Mn doped CeO₂, Journal of Alloys and Compounds, Volume 672, 5 July 2016, Pages 543–548
- Ladgaonkar, B.P. Vaingankar, A.S. 1998. X-ray diffraction investigation of cation distribution in Cd_xCu_{1-x}Fe₂O₄ ferrite system, Materials Chemistry and Physics 56: 280-283.
- Li, Q. Wang, W. Yongfei, W. 2010. Fabrication and characterization of Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ nanofibers, J Alloy Compd, 494: 315-318.
- Li, P. XuejunZheng, YongZhang, MengjiaoYuan, BinJiang, ShuifengDeng, Humidity sensor based on electrospun (Na_{0.5}Bi_{0.5})_{0.94}TiO₃– Ba_{0.06}TiO₃ nanofibers, Ceramics International 41 (2015) 14251–14257
- Liang, Q. Hongliang Xu, Jianxun Zhao, Shang Gao, Micro humidity sensors based on ZnO–In₂O₃ thin films with high performances, Sensors and Actuators B 165 (2012) 76– 81
- Liou, H. J. Suyambrakasam, G. Tsai, T. C. Wu, R. J. Chavali, M. 2011. Preparation of nanostructured organic/inorganic polymer hybrids and their humidity sensing properties, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 42: 868-873.
- Mantas, P. Q. 1998. Dielectric Response of Materials: Extension to the Debye Model, P I I : S0955-2219(98)00273–8.
- Mohamed, R. I. 2000. AC conductivity and dielectric constant of poly(vinyl alcohol) doped with MnSO₄, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 61: 1357-1361.
- Mostafa, N. Y. Zaki, Z. I. Heiba, Z. K. 2013. Structural and magnetic properties of cadmium substituted manganese ferrites prepared by hydrothermal route, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 329: 71-76.
- Mustafa, G. Islam, M. U. Zhang, W. Anwar, A. W. Jamil, Y. Murtaza, G. Ali, I. Hussain, M. Ali, A. Ahmad, M. Influence of the divalent and trivalent ions substitution on the structural and magnetic properties of Mg_{0.5-x}Cd_xCo_{0.5}Cr_{0.04}Tb_yFe_{1.96-y}O₄ ferrites prepared by sol-gel method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 387: 147-154.
- Namgyal, T. Singh, J. Chandra, K. Bansal, S. Singhal, S. 2012. δ-Phase evolution in Cd-doped lithium ferrites: Their thermal, electrical and magnetic properties, Journal of Molecular Structure, 1019: 103-109.
- Naseri M. 2015. Optical and magnetic properties of monophasic cadmium ferrite (CdFe₂O₄) nanostructure prepared by thermal treatment method, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 392: 107-113.
- Nath, S. K. Maria, K. H. Noor, S. Sikder, S. S. Hoque, S. M. Hakim, M. A. 2012. Magnetic ordering in Ni-Cd ferrite, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 324: 2116-2120.
- Nikolov, T. G. Valchev, V. C. 2009. Nanocrystalline magnetic materials versus ferrites in power electronics, Procedia Earth and Planetary Science 1: 1357-1361.

- Nikumbh, A. K. Misal, S. B. Nighot, D. V. Nagawade, P. A. Karale, N. J. Deshpande, A. S. Gugale, G. S. Nagawade, A. V. 2016. Synthesis and properties of cobalt substituted strontium cadmium W-type hexaferrites nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 683: 346-356.
- Nongjai, R. Shakeel Khan, K. Asokan, Hilal Ahmed, Imran Khan, Magnetic and electrical properties of In doped cobalt ferrite nanoparticles, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 112, 084321 (2012)
- Noor, S. Hakim, M. A. Sikder, S. S. Hoque, S. M. Maria, K. H. Nordblad, P. 2012. Magnetic behavior of Cd^{2+} substituted cobalt ferrites, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73: 227-231.
- Okur, S. Uzar, N. Tekgüzel, N. Erol, A. Arıkan, M. Ç. 2012. Synthesis and humidity sensing analysis of ZnS nanowires, *Physica E*, 44: 1103-1107.
- Okutan, M. Bakan, H. İ. Korkmaz, K. Yakuphanoglu, F. 2005. Variable range hopping conduction and microstructure properties of semiconducting Co-doped TiO_2 , *Physica B*, 355: 176-181.
- Ostroverkhova. O., He. M., Twieg. R.J., Moerner. W.E., *Chemphyschem*, Role of Temperature in Controlling Performance of Photorefractive Organic Galsses.
- Paasch, G. Lindnera, T. Scheinert, S. 2002. Variable range hopping as possible origin of a universal relation between conductivity and mobility in disordered organic semiconductors, *Synthetic Metals*, 132: 97-104.
- Patil, S.A. Mahajan, V.C. Ghatage, A.K. Lotke, S.D. 1998. Structure and magnetic properties of Cd and Ti/Si substituted cobalt ferrites, *Materials Chemistry and Physics*, 57: 86-91.
- Pogorzelec-Glaser, K. Rachocki, A. Ławniczak, P. Łapiński, A. Tritt-Goc J. 2012. Synthesis and characterization of a new proton-conducting material based on imidazole and selenic acid, *Solid State Ionics*, 227: 96-101.
- Pollak, M. Gabelle, T. H. 1961. *Phys. Rev.* 122: 1742
- Prabhakar Vattikuti S. V. Byon, C. Shim, J. Reddy, C. V. 2015. Effect of temperature on structural, morphological and magnetic properties of $\text{Cd}_{0.7}\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 393: 132-138.
- Prasad, S. R. Prasad, B.B.V.S.V. Rajesh, B. Rao, K.H. Ramesh, K.V. 2011. Magnetic properties and DC electrical resistivity studies on cadmium substituted nickel–zinc ferrite system, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323: 2115-2121.
- Qi, Q. Feng, Y. Zhang, T. Zheng, X. Lua, G. 2009. Influence of crystallographic structure on the humidity sensing properties of KCl-doped TiO_2 nanofibers, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 139(2): 611-317.
- Qi, Q. Tong Zhang, Shujuan Wang, Xuejun Zheng, Humidity sensing properties of KCl-doped ZnO nanofibers with super-rapid response and recovery, *Sensors and Actuators B* 137 (2009) 649–655

- Qi, Q. Tong Zhang, Xuejun Zheng, LifengWan, Preparation and humidity sensing properties of Fe-doped mesoporous silica SBA-15, *Sensors and Actuators B* 135 (2008) 255–261
- Rai, R. Verma, K. Sharma, S. Nair, S. S. Valente, M. A. Kholkin, A. L. Sobolev, N. A. 2011. Study of structural and ferromagnetic properties of pure and Cd doped copper ferrite, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 72: 862-868.
- Rai, R. Verma, K. Sharma, S. Nair, S. S. Valente, M. A. Kholkin, A. L. Nikolai, A. Sobolev, N. A. 2011. Structure and magnetic properties of Cd doped copper ferrite, *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 7585-7590.
- Raut, A. V. Kurmude, D. V. Shengule, D. R. Jadhav, K. M. Effect of gamma irradiation on the structural and magnetic properties of Co–Zn spinel ferrite nanoparticles, *Materials Research Bulletin*, 63: 123-128.
- Ravinder, D. 1999. Effect of sintering temperature on electrical conductivity of mixed lithium-cadmium ferrites, *Materials Letters*, 40: 198–203.
- Ravinder, D. Alivelu Manga, T. 1999. Elastic behaviour of Ni–Cd ferrites, *Materials Letters* 41: 254–260.
- Ravinder, D. ve Seshagiri Rao, T. 1990. Electrical conductivity and thermoelectric power of lithium-cadmium ferrites, *Crystal Research and Technology*, 25(8): 963-969.
- Ravinder, D. 2000a. Thermoelectric power and electrical conductivity of cadmium-substituted manganese ferrites, *Materials Letters* 44: 130–138.
- Ravinder, D. 2000. Electrical transport properties of cadmium substituted copper ferrites, *Materials Letters* 43: 129-138.
- Ravinder, D. Alivelu Manga, T. 2000. Elastic behaviour of Cu–Cd ferrites, *Journal of Alloys and Compounds* 299: 5-8.
- Ravinder, D. Alivelu Manga, T. 2001. Room temperature elastic behaviour of cadmium substituted manganese ferrites, *Materials Letters* 49: 1-6.
- Ravinder, D. Srinivasa Rao, S. Shalini P. 2003. Room temperature electric properties of cadmium-substituted nickel ferrites, *Materials Letters* 57: 4040-4042.
- Reddy, C. V. Byon, C. Narendra, B. Baskar, D. Srinivas, G. Shim, J. Prabhakar Vattikuti S. V. 2015. Investigation of structural, thermal and magnetic properties of cadmium substituted cobalt ferrite nanoparticles, *Superlattices and Microstructures*, 82: 165-173.
- Reddy, C. V. Prabhakar Vattikuti S. V. Ravikumar, R. V. S. S. N. Moon, S. J. 2015. Influence of calcination temperature on $\text{Cd}_{0.3}\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles: Structural, thermal and magnetic properties, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 394: 70-76.
- Saravanan, M. Sabari Girisun, T. C. 2015. Nonlinear optical absorption and optical limiting properties of cadmium ferrite, *Materials Chemistry and Physics*, 160: 413-419.

- Sattar, A. A. 2003. Temperature Dependence of the Electrical Resistivity and Thermoelectric Power of Rare Earth Substituted Cu-Cd ferrite, *Egypt. J. Sol.*, 26(2): 113-121.
- Serway, R.A. 1996 “Fen ve Mühendislik için Fizik 2”, Palme Yayıncılık, 1086-1087, Ankara, 1996 .
- Shelar, M.B. Jadhav, P.A. Chougule, S.S. Mallapur, M.M. Chougule, B.K. 2009. Structural and electrical properties of nickel cadmium ferrites prepared through self-propagating auto combustion method, *Journal of Alloys and Compounds*, 476: 760-764.
- Shelar, M.B. Jadhav, P. A. Patil, D. R. Chougule, B. K. Puri, V. 2010. Chemical synthesis and studies on structural and magnetic properties of fine grained nickel cadmium ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322: 3355-3358.
- Sheng, M. Gu, L. Kontic, R. Zhou, Y. Zheng, K. Chen, G. Mo, X. Patzke, G. R. 2012. Humidity sensing properties of bismuth phosphates, *Sensors and Actuators B*, 166(167): 642- 649.
- Shinde, T. J. Gadkari, A. B. Vasambekar, P. N. 2010. Effect of Nd³⁺ substitution on structural and electrical properties of nanocrystalline zinc ferrite, *J Magn Magn Mater*, 322: 2777-2781.
- Shrivastava, V. Microwave processed SrBi₂Nb₂O₉ ferroelectric ceramics with controlled dielectric relaxation and metallic conduction, *Ceramics International*, Volume 42, Issue 8, June 2016, Pages 10122-10126.
- Singhal, S. Jauhar, S. Singh, J. Chandra, K. Bansal, S. 2012. Investigation of structural, magnetic, electrical and optical properties of chromium substituted cobalt ferrites (CoCr_xFe_{2-x}O₄, 0 ≤ x ≤ 1) synthesized using sol gel auto combustion method, *Journal of Molecular Structure*, 1012: 182-188.
- Silva, O. Morais, P. C. 2005. Investigation of anisotropy in cadmium ferrite-based ionic magnetic fluid using magnetic resonance, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 289: 136-138.
- Singhal, S. Jauhar, S. Lakshmi, N. Bansal, S. 2013. Mn³⁺ substituted Co–Cd ferrites, CoCd_{0.4}Mn_xFe_{1.6-x}O₄ (0.1 ≤ x ≤ 0.6): Cation distribution, structural, magnetic and electrical properties, *Journal of Molecular Structure* 1038: 45-51.
- Smit, J. H.P.J. Wijn, Ferrites, Jhon Wiley and Sons, New York, (1959).
- Standley, K. J. 1972. *Oxide Magnetic Materials* 2nd ed., Oxford University Press.
- Su, H. Zhang, H. Tang, X. Zhong, Z. Jing, Y. 2009. *J. Mater. Scie. And Engine. B* 162: 22.
- Sun, K. Lan, Z. Yu, Z. Jiang, X. Huang, J. 2011. *J. Magn. Magn. Mater.* 323: 927.
- Suryawanshi, S.S. Deshpande, V.V. Deshmukh, U.B Kabur, S.M. Chaudhari, N.D. Sawant, S.R. 1999. XRD analysis and bulk magnetic properties of Al³⁺ substituted Cu-Cd ferrites, *Materials Chemistry and Physics* 59: 199-203.
- Şaşmaz Kuru, T. Şentürk, E. Eyüpoğlu, V. 2017. Overlapping Large Polaron Conductivity Mechanism and Dielectric Properties of Al_{0.2}Cd_{0.8}Fe₂O₄ Ferrite Nanocomposite, *J Supercond Nov Magn.* 30 (3): 647–655.

- Şentürk, E. Köseoğlu, Y. Şaşmaz, T. Alan, F. Tan, M. 2013. RC circuit and conductivity properties of $\text{Mn}_{0.6}\text{Co}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanocomposite synthesized by hydrothermal method. *Journal of Alloys and Compounds*. 578: 90-95.
- Tabip, A. Sdiri, N. Elhouichet, H. Ferid, M. 2015. Investigations on electrical conductivity and dielectric properties of Na doped ZnO synthesized from sol gel method, *Journal of alloys and compounds*. 622: 687-694.
- Tarwal, N. L. Patil, A. R. Harale, N. S. Rajgure, A. V. Suryavanshi, S. S. Bae, W. R. Patil, P. S. Kim, J. H. Janga, J. H. 2014. Gas sensing performance of the spray deposited Cd-ZnO thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 598: 282-288.
- Thakur, S. S. Pathania, A. Thakur, P. Thakur, A. HwaHsue, J. 2015. Improved structural, electrical and magnetic properties of Mn-Zn-Cd nanoferrites, *Ceramics International*, 41: 5072-5078.
- Thakur, S. Radheshyam Rai, Seema Sharma, Structural characterization and magnetic study of NiFe_xO_4 synthesized by co-precipitation method, *Materials Letters* 139(2015)368–372
- Tholkappian, R. Vishista, K. 2015. Combustion synthesis of Mg–Er ferrite nanoparticles: Cation distribution and structural, optical and magnetic properties, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 40: 631-642.
- Tianshu, Z. Hing, P. Jiancheng, Z. Lingbing, K. 1999. Ethanol-sensing characteristics of cadmium ferrite prepared by chemical coprecipitation, *Materials Chemistry and Physics* 61: 192-198.
- Valenzuela, R. 1994. *Magnetic ceramics*. Cambridge University Press.
- Vasambekar, P.N. Kolekar, C.B. Vaingankar, A.S. 1998. Cation distribution and susceptibility study of Cd-Co and Cr^{3+} substituted Cd-Co ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 186: 333-341.
- Vasambekar, P.N. Kolekar, C.B. Vaingankar, A.S. 1999. Magnetic behaviour of Cd^{2+} and Cr^{3+} substituted cobalt ferrites, *Materials Chemistry and Physics* 60: 282-285
- Vasambekar, P. N. Kolekar, C. B. Vaingankar, A. S. 1999. Crystallographic and d.c. electrical resistivity study of Cd-Co and Cr^{3+} substituted Cd-Co ferrites, *Journal of Materials Science: Materials In Electronics* 10: 667-671.
- Venkataraju, C. Sathishkumar, G. Sivakumar, K. 2011. Effect of Cd on the structural, magnetic and electrical properties of nanostructured Mn–Zn ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323: 1817-1822.
- Verma, V. Gairola, S.P. Mathpal, M. C. Annapoorni, S. Kotnala, R.K. 2009. Magnetic and electrical properties of manganese and cadmium co-substituted lithium ferrites, *Journal of Alloys and Compounds* 481: 872-876.
- Verma, V. Dar, M. A. Pandey, V. Singh, A. Annapoorni, S. Kotnala, R.K. 2010. Magnetic properties of nano-crystalline $\text{Li}_{0.35}\text{Cd}_{0.3}\text{Fe}_{2.35}\text{O}_4$ ferrite prepared by modified citrate precursor method, *Materials Chemistry and Physics*, 122: 133-137.
- Vijaya, M. S. Rangarajan, G. *Materials Science*, McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1999-2000, p. 447.

- Wang, J. Kun Xub, B. Ping Ruanb, S. Ping Wang, S. 2003 Preparation and electrical properties of humidity sensing films of BaTiO₃/polystyrene sulfonic sodium, *Materials Chemistry and Physics*, 78(3): 746-750.
- Wang, Z. Yi Lu, Shuai Yuan, Liyi Shi, Yin Zhao, Meihong Zhang, Wei Deng, Hydrothermal synthesis and humidity sensing properties of size-controlled Zirconium Oxide (ZrO₂) nanorods, *Journal of Colloid and Interface Science* 396 (2013) 9–15
- Watawe, S.C. Keluskar, S. Gonbare, Tangsali, R. 2006. Preparation and magnetic properties of cadmium substituted lithium ferrite using microwave-induced combustion, *Thin Solid Films* 505: 168-172.
- Watawe, S.C. Bamne, U.A. Gonbare, S.P. Tangsali, R.B. 2007. Preparation and dielectric properties of cadmium substituted lithium ferrite using microwave-induced combustion, *Materials Chemistry and Physics* 103: 323-328.
- Widanarto, W. Sahar, M. R. Ghoshal, S. K. Arifin, R. Rohani, M. S. Effendi, M. 2013. Thermal, structural and magnetic properties of zinc-tellurite glasses containing natural ferrite oxide, *Materials Letters*, 108: 289-292.
- Yıldız A., Genç Ö., Ensrümental Analiz, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, (1993), 109.
- Yokoyama, M. Ohta, E. Sato, T. 1998. Magnetic properties of ultrafine particles and bulk material of cadmium ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 183:173-180.
- Yüksel, T. 2014. Yüksek Sıcaklıklarda Wollastonit Katkılı Nr-Sbr Elastomer Esaslı Polimerlerin Dielektrik Spektroskopi Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Zahir, R. Chowdhury, F. U. Z. Uddin, M. M. Hakim, M. A. 2016. Structural, magnetic and electrical characterization of Cd-substituted Mg ferrites synthesized by double sintering technique, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 410: 55-62.
- Zhang, W. Feng, C. Yang, Z. 2012. An inward replacement/etching route to controllable fabrication of zinc sulfide nanotube arrays for humidity sensing, *Sensors and Actuators B*, 165: 62- 67.
- Zhang, Y. Zheng, X. Zhang, T. 2011. Characterization and humidity sensing properties of Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃–Bi_{0.5}K_{0.5}TiO₃ powder synthesized by metal-organic decomposition, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156 (2): 887-892.
- Zhao, J. Yinping Liu, Xiaowei Li, Geyu Lu, Lu You, Xishuang Liang, Fengmin Liu, Tong Zhang, Yu Du, Highly sensitive humidity sensor based on high surface area mesoporous LaFeO₃ prepared by a nanocasting route, *Sensors and Actuators B* 181 (2013) 802– 809.
- Zhao, J. Liu, Y. Li, X. Lu, G. You, L. Liang, X. Liu, F. Zhang, T. Du, Y. Highly sensitive humidity sensor based on high surface area mesoporous LaFeO₃ prepared by a nanocasting route, *Sensors and Actuators B*, 181: 802- 809.

ÖZGEÇMİŞ

Tuğba Şaşmaz Kuru 20 Haziran 1986'da Adapazarı'nda doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Akyazı'da tamamladı. 2004 yılında Akyazı Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2005 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nü 2009 yılında bitirdi. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2011 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fizik Bölümü'nde doktora eğitimine başladı. 2013 yılında Okan Üniversitesi SHMYO bünyesinde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen Okan Üniversitesinde çalışmakta olup, evli ve çok mutlu yaşamaya devam etmektedir.