

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YİTRİYUM VE EVROPIYUM BAZLI BAKIR OKSİT
TABAKALI SERAMİKLER: ÜRETİMİ, EMPEDANS
ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ VE YAPAY ZEKÂ İLE
TAHMİNİ

Serlin İÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Doç. Dr. Mehmet KILIÇ

Eş Danışman

Doç. Dr. Önder EYECİOĞLU

Haziran, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YİTRİYUM VE EVROPIYUM BAZLI BAKIR OKSİT
TABAKALI SERAMİKLER: ÜRETİMİ, EMPEDANS
ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ VE YAPAY ZEKÂ İLE
TAHMİNİ**

Serlin İÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mehmet KILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç. Dr. Önder EYECİOĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet KILIÇ, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Murat ODUNCUOĞLU, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özden ASLAN ÇATALTEPE, Üye

Gedik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Mehmet KILIÇ ve eş danışmanın Doç. Dr. Önder EYECİÖĞLU sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Yitriyum ve Evropiyum Bazlı Bakır Oksit Tabakalı Seramikler: Üretimi, Empedans Özelliklerinin Tespiti ve Yapay Zekâ ile Tahmini” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serlin İÇ

İmza

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FYL-2021-4786 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Aileme

ve

sevdiklerime

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca akademik anlamda beni yönlendiren ve her konuda desteğini esirgeyemeyen; bitirme çalışmamın her adımında bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan saygı değer danışmanım Doç. Dr. Mehmet KILIÇ’a

Her zaman görüş ve önerileri ile tez çalışmama yön veren, samimiyetinden ve iyi niyetinden şüphe etmediğim, sadece çalışmalar boyunca değil her konuda beni destekleyen Prof. Dr. Zeynep GÜVEN ÖZDEMİR’e

Tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen, benim için zamanlarını ayıran sevgili arkadaşlarım Arş. Gör. Nazlıcan ŞAHİN’e, Arş. Gör. Emre Beyazay’a, Nureddin Ertuğrul Kalkan’a ve nice dostlarıma,

Yüksek lisans öğrenimimi BİDEB 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs programı, 1649B022100081 başvuru numarası ile destekleyen TÜBİTAK’a

Ve yine yüksek lisans tezimi FYL-2021-4786 proje kodu ile destekleyen YTÜ BAPK’a

Sadece tez çalışmalarım boyunca değil yıllardır zamanını bana ayıran, gerektiğinde derdimi dert edip kendi işlerini bir kenara bırakan sevgili Şahin BARMAKSIZ’a,

Son olarak, her konuda beni destekleyen, güvenlerini ve desteklerini her daim bana hissettiren annem Talin İÇ başta olmak üzere, babam Orhan İÇ ve kardeşim Sarin İÇ’e teşekkürlerimi sunarım.

Serlin İÇ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	v
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	10
1.3 Hipotez	10
2 GENEL BİLGİLER	11
2.1 Seramik Kavramı	11
2.2 Seramikler Hakkında Genel Bilgiler	11
2.3 Seramik Malzemelerin Sınıflandırılması	11
2.4 Seramik Malzemelerin Elektriksel Özellikleri	15
2.5 Seramiklerin Frekansa ve Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Özellikleri	17
2.6 Makine Öğrenmesi	28
3 MATERYAL VE METOD	31
3.1 Malzemeler	31
3.2 Makine Öğrenmesi	39
4 BULGULAR	46
4.1 $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ Seramiklerine Ait Bulgular	46
4.2 $(\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ Seramiğinin Yapay Zekâ İncelemesi	61
5 SONUÇ	65
KAYNAKÇA	67
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	78

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal frekans
I	Akım
σ_{ac}	Alternatif akım iletkenliği
$\text{\AA}$	Angstrom (10^{-10} m)
R^2	Belirleme katsayısı
ϵ_0	Boşluğun elektriksel geçirgenliğidir
$\tan\delta$	Dielektrik kayıp faktörü
R	Direnç
μ	Dipol moment
σ_{dc}	Doğru akım iletkenliği
E	Elektrik alan
d	Elektrotlar arası mesafe
Z	Empedans
θ	Faz açısı
f	Frekans
s	Frekansın üssü
V	Gerilim
f_c	Geçiş frekansı
e	Hareketli yük taşıyıcıların yükü
m	Hareketli yük taşıyıcıların kütlesi
L	İndüktör
x_L	İndüktans
x_C	Kapasitans
T_c	Kritik sıcaklık
C	Kondansatör
ϵ^*	Kompleks elektriksel geçirgenlik fonksiyonu
ϵ'	Kompleks dielektrik fonksiyonunun gerçek bileşeni
ϵ''	Kompleks dielektrik fonksiyonunun sanal bileşeni
Z^*	Kompleks empedans fonksiyonu
Z'	Kompleks empedansın gerçek bileşeni
Z''	Kompleks empedansın sanal bileşeni
σ^*	Kompleks iletkenlik fonksiyonu
σ'	Kompleks iletkenliğin gerçek bileşeni
σ''	Kompleks iletkenliğin sanal bileşeni
n	Kırılma indisi
κ	Ortamın alınganlığı (süseptibilitesi)
a, b ve c	Örgü parametreleri
π	Pi sayısı
ω_p	Plazmonik rezonans açısal frekansı
P	Polarizasyon (kutuplanma)
τ	Relaksasyon (gevşeme) süresi
f_{maks}	Relaksasyon frekansı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
C	Sığa
Γ	Sönümlenme sabiti

P	Yük taşıyıcıların atlama olasılığı
n	Yük taşıyıcı yoğunluğu
Q	Yük miktarı
A	Yüzey alanı

KISALTMA LİSTESİ

AC/ac	Alternatif akım
BSCCO	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$
Cu-K_β	Bakır K _{alfa} ışını
CBH	Correlatde barrier hopping
SVM	Destek Vektör Makinesi
DC/dc	Doğru akım
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
Eu-123	$\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+x}$
ENZ	ϵ' değeri sıfıra yakın (ϵ' near zero)
eV	Elektronvolt
GPR	Gauss süreci regresyonu
Hz	Hertz
HBCCO	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$
JUPL	Jonscher'in Evrensel Güç Yasası
DT-R	Karar ağacı regresyonu
K	Kelvin
k-NN	k-En yakın komşu regresyonu
kHz	Kilohertz
KS	Kufeki taşı
LR	Lineer Regresyon
MHz	Megahertz
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
NRP	Negatif Gerçek Geçirgenlik (Negative real permittivity)
NSK	Negatif Sıcaklık Katsayısı
NCL	Neredeyse sabit kayıplı (Nearly constant loss)
MSE	Ortalama kare hata (Mean square error)
MAE	Ortalama mutlak hata (Mean absolute error)
LaBaCuO	La-Ba-Cu-O
OGA-ISVR	Optimize edilmiş genetik algortima ile aralıklı destek vektör regresyonu algoritması
Pa	Pascal
PUS/AgNWs	Poliüretan sünger/gümüş nanotel
PPy	Polipropil
PANI	Polianilin
OLS	Sıradan en küçük kareler (Ordinary least square)
STO	SrTiO_3
SDC	Stokastik Gradyan Azalma (Stochastic Gradient Descent)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TBCCO	$\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$
SCP	Uzay yükü polarizasyonu (space-charge polarization)
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$
YZ	Yapay zekâ
XRD	X-ışını kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1	Seramik malzemelerin yapılarına göre sınıflandırılması [41].	14
Şekil 2. 2	Malzemelerin iletkenlik özelliklerine göre iletkenlik ve valans bantları [43].	15
Şekil 2. 3	1911 yılında süperiletkenliğin keşfinden bu yana kritik sıcaklığın gelişimi [48].	16
Şekil 2. 4 a)	Kondansatörün içi boşken b) kondansatörün içi dielektrik malzeme ile doluyken mevcut hali [49].	19
Şekil 2. 5	Dielektrik malzeme içerisindeki polarizasyon mekanizması [50].	20
Şekil 2. 6	Bir malzeme içerisinde gerçekleşen farklı polarizasyon mekanizmaları [58].	24
Şekil 2. 7	Bir atomun a) elektik alan yokken b) dışarıdan elektrik alan uygulandığında yük dağılımı.	25
Şekil 2. 8	Bir atomun a) elektik alan yokken b) dışarıdan elektrik alan uygulandığında yük dağılımı.	26
Şekil 2. 9	Bir atomun a) elektik alan yokken b) dışarıdan elektrik alan uygulandığında yük dağılımı.	26
Şekil 2. 10	Arayüzey polarizasyon mekanizmasının şematik gösterimi gösterimi [63].	27
Şekil 2. 11	Polarizasyon mekanizmaları ve frekans ile değişimleri [64].	27
Şekil 3. 1	Numune hazırlama adımları.	32
Şekil 3. 2 a)	EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,5} Eu _{0,5})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , d) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve e) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin pellet (sol taraf) ve toz (sağ taraf) formlarının SEM görüntüleri.	35
Şekil 3. 3 a)	EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,5} Eu _{0,5})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , d) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve e) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin gözlenen ve hesaplanan XRD desenleri.	37
Şekil 3. 4	Frekans ve sıcaklığa bağlı empedans analizör deney düzeneği.	39
Şekil 3. 5	Makine öğrenmesi iş akışı diyagramı.	40
Şekil 3. 6	ϵ' için girdi verilerindeki değişkenler arasındaki Pearson korelasyonları.	42
Şekil 3. 7	ϵ'' için girdi verilerindeki değişkenler arasındaki Pearson korelasyonları.	42
Şekil 3. 8	Uygulanan DTR ve kNN modellerinin ϵ' parametresi üzerindeki performans hesaplaması.	44
Şekil 3. 9	Uygulanan DTR ve kNN modellerinin ϵ'' parametresi üzerindeki performans hesaplaması.	44

Şekil 4. 1 YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} seramiğinin ortorombik birim hücresi [81].....	47
Şekil 4. 2 a) EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve d) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin kompleks geçirgenlik fonksiyonunun gerçek kısmının (ϵ') frekansa bağıllığı.	48
Şekil 4. 3 Geçiş frekansının hem sıcaklığa hem de seramiğin Y içeriğine göre değişimi, burada x seramikteki Y içeriğini göstermektedir.	49
Şekil 4. 4 a) EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve d) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin kayıp tanjant spektrumları.	51
Şekil 4. 5 a) EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve d) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin kompleks geçirgenlik fonksiyonunun sanal kısmının açısal frekansa bağımlılığı.	53
Şekil 4. 6 a) EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve d) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin $\ln\sigma ac$ - $\ln\omega$ eğrileri.	55
Şekil 4. 7 a) dc iletkenliğin Arrhenius grafikleri, seramiklerin sıcaklığa bağlı b) s parametreleri ve c) $-\ln A$ değerleri.	57
Şekil 4. 8 a) EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve d) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin kompleks empedansının gerçek bileşenlerinin frekansa bağımlılığı.	59
Şekil 4. 9 a) EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} , b) (Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} , c) (Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} ve d) YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiklerinin sanal bileşenlerinin frekansa bağımlılığı. Ekli küçük grafikler, düşük frekans bölgesinin yakınlaştırılmış halini göstermektedir.	60
Şekil 4. 10 (Y _{0,5} Eu _{0,5})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiğinin farklı sıcaklıklardaki frekansa bağlı a) ϵ' ve b) ϵ'' spektrumları.	61
Şekil 4. 11 (Y _{0,5} Eu _{0,5})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiğinin DTR algoritması kullanılarak elde edilen farklı sıcaklıklardaki frekansa bağlı a) ϵ' ve b) ϵ'' spektrumları.	62
Şekil 4. 12 (Y _{0,5} Eu _{0,5})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5} seramiğinin kNN algoritması kullanılarak elde edilen farklı sıcaklıklardaki frekansa bağlı a) ϵ' ve b) ϵ'' spektrumları.	63

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1 Seramik malzemelerin kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılması [39].	12
Tablo 2. 2 Seramik malzemelerin fonksiyonlarına göre sınıflandırılması [38].	13
Tablo 2. 3 Seramik malzemelerin yapılarına göre sınıflandırılması	14
Tablo 2. 4 Direnç, kondansatör ve indüktörün empedans gösterimleri ve akım-gerilim bağıntıları.	18
Tablo 3. 1 Başlangıç aşamasındaki bileşikler saflik dereceleri ve molekül ağırlıkları.	33
Tablo 3. 2 Örnek hazırlamada kullanılan oksitlerin miktarları.	33
Tablo 3. 3 Veri kümesinin istatistiksel temel özellikleri.	41
Tablo 3. 4 DTR, kNN modellerinin 10 katlı çapraz doğrulamasına ait belirleme katsayısı değerleri.	43
Tablo 3. 5 DTR ve kNN modellerinin belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama kare hata (MSE) değerleri.	45
Tablo 4. 1 Farklı sıcaklıklarda seramik numuneler için $\varepsilon'' = \sigma_{dc}\varepsilon_0\omega - 1$ uydurma fonksiyonu ile elde edilen (S/cm) birimindeki dc iletkenlik değerleri.	54
Tablo 4. 2 Seramiklerin dc plato ve dispersif bölgeleri için doğrusal uydurma (linear fitting) ile elde edilen (S/cm) biriminde dc iletkenlik (σ_{dc}), A değeri ve frekansın üs değerleri (s).	56
Tablo 4. 3 Farklı sıcaklıklardaki seramikler için (Hz) biriminde f_{maks} değerleri.	60

Yitriyum ve Evropiyum Bazlı Bakır Oksit Tabakalı Seramikler: Üretimi, Empedans Özelliklerinin Tespiti ve Yapay Zekâ ile Tahmini

Serlin İÇ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mehmet KILIÇ

Eş-Danışman: Doç. Dr. Önder EYECİOĞLU

Bu tez çalışması kapsamında, x : 0; 0,4; 0,6; 1 olan $(Y_xEu_{1-x})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ perovskit seramiklerinin dielektrik, ac iletkenlik ve kompleks empedans özellikleri oda sıcaklığından 523 K'e kadar 1 Hz ve 20 MHz frekans aralığında incelenmiştir. Seramikler katı hal reaksiyon yöntemi ile sentezlenmiştir. Ayrıca bu seramik örnekler ek olarak $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ malzemesi aynı yöntem ile sentezlenmiş, diğer seramik örnekler ile aynı koşullarda mikroyapısal ve dielektrik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bunlara ek olarak, $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ seramiği için dielektrik ölçümlerinde işlenmemiş farklı sıcaklık değerlerinde, ϵ' ve ϵ'' parametreleri makine öğrenmesi yardımıyla tahmin edilerek, deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Örneklerin XRD analizleri sonucunda, ortorombik yapıda kristalleştikleri görülmüştür. En yüksek ortorombiklik faktörü $YBa_2Cu_3O_{6,5}$ seramiği için gözlenirken, diğer seramiklerdeki düşük ortorombiklik Eu ikamesi ile ilişkilendirilmiştir. Öte yandan, numunelerin dielektrik analizleri, Eu ikame oranı

ve sıcaklıktan bağımsız olarak tüm seramiklerin negatif gerç k geçirgenlik (NRP)  zelliğini ortaya çıkarmıştır. NRP fenomeninin kökeni Drude modeline dayalı olarak açıklanmıştır. Bununla birlikte, NRP'nin geçerli olduğu frekans aralığının $x \geq 0,6$ olduğu değerlerde ve yüksek sıcaklıklarda ($T > 500$ K) maksimum olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, NRP ile seramiklerin indüktif karakteri arasında bir korelasyon kurularak numunelerin hem empedans hem de kayıp tanjant spektrumları değerlendirilmiştir. DC iletkenliği ve kompleks empedans analizlerinin gerçek bileşeni, seramiklerin yarı iletken doğasını ve direncin negatif sıcaklık katsayısını (NSK) işaret etmektedir. AC iletkenlik analizleri de $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ hariç seramiklerde baskın bir CBH yük taşıma mekanizmasına işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Seramikler, nadir toprak elementi eklemesi, negatif ger k geçirgenlik, yük taşıma mekanizmaları, makine  ğrenmesi.

Yttrium and Europium Based Ceramics with Cooper Oxide Layers: Production, Determination of Impedance Properties and Prediction with Artificial Intelligence

Serlin İÇ

Department of Physics

Master of Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet KILIÇ

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Önder EYECİOĞLU

In the present study, the dielectric, AC conductivity, and complex impedance properties of $(Y_xEu_{1-x})Ba_2Cu_3O_{6.5}$ perovskite ceramics where x : 0; 0,4; 0,6; 1 have been examined from room temperature to 523 K between 1 Hz and 20 MHz frequency range. The ceramics have been synthesized by solid-state reaction method. In addition to these ceramic samples, $(Y_{0.5}Eu_{0.5})Ba_2Cu_3O_{6.5}$ material was synthesized by the same method and its microstructural and dielectric properties were experimentally investigated under the same conditions as the other ceramic samples. In addition, ϵ' and ϵ'' parameters for $(Y_{0.5}Eu_{0.5})Ba_2Cu_3O_{6.5}$ ceramic at different temperature values in the dielectric measurements were estimated by machine learning and compared with experimental data. The XRD analyses of the samples pointed out that they crystallize in an orthorhombic structure. While the highest orthorhombicity factor has been observed for $YBa_2Cu_3O_{6.5}$ ceramic, the reduced orthorhombicity in the other ceramics has been associated with the Eu substitution. On the other hand, the dielectric analyses of the samples have revealed a negative real permittivity (NRP) property of all ceramics regardless of the Eu substitution ratio and temperature. The origin of the NRP phenomenon has been

explained based on the Drude model. However, it has been reported that the frequency interval at which the NRP is valid is maximum for $x \geq 0.6$ at high temperatures ($T > 500$ K). Additionally, both impedance and loss tangent spectra of the samples have been evaluated by establishing a correlation between NRP and the inductive character of the ceramics. The dc conductivity and the real component of complex impedance analyses imply the semiconducting nature and the negative thermal coefficient (NTC) of resistance of the ceramics. AC conductivity analyses also indicate a pre-dominant CBH charge transport mechanism in the ceramics except for $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$.

Keywords: Ceramics, rare earth metal substitution, negative real permittivity, charge transport mechanism, machine learning.

1.1 Literatür Özeti

Seramik malzemeler yüksek erime noktaları, sertlikleri, sıcaklık ve/veya basınç altında kararlılıklarını sürdürebilmeleri, düşük elektriksel ve termal iletkenlikleri ve kimyasal reaksiyona girmemeleri gibi özellikleri ile dikkat çekmektedir. Öte yandan seramikler yalıtkan olmaları nedeniyle özellikle enerji depolama ve elektriksel yalıtım gerektiren uygulamalarda tercih edilen malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple seramik malzemelerin enerji depolama kabiliyetlerinin ve dielektrik özelliklerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda, son yıllarda yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevreye ve insan sağlığına vermiş olduğu olumsuz etkilerin açığa çıkması sonucu yenilenebilir ve çevre dostu enerji malzemelerinin üretimi ve üretilen enerjinin depolanması üzerine yapılan çalışmaların hızla artmasına yol açmıştır.

Seramik malzemelerin kolay üretim ve işlenebilir olmaları nedeniyle farklı alanlarda kullanımına yönelik olarak çeşitli takviye edici malzemelerin katkılanmasıyla seramiklerin elektrik, mekanik gibi özelliklerinin geliştirilmesi potansiyeli yüksektir. Seramik malzemelerin, sıcaklık sensörlerinde [1], mikroelektronik cihazlarda [2], süper kapasitör uygulamalarında [3], meta malzeme kaplama uygulamalarında [4], birçok medikal uygulamalarda [5], süperiletken küçük döngü antenlerinde [6] ve enerji depolama kabiliyetleri sebebi ile elektronik uygulamalarda [7] kullanılabilir olmasına istinaden günümüze kadar birçok bilimsel yayın rapor edilmiştir. Bu noktadan yola çıkarak, bu tez çalışmasında yitrium temelli bakır oksit katmanlı seramik malzemeye farklı oranlarda evropiyum nadir toprak elementinin eklenmesi ile oluşacak yeni seramiklerin dielektrik özelliklerinin incelenmesine odaklanılmıştır.

Bu bağlamda literatürde, hem seramik malzemelere yitrium katkısı ile hem de yitrium temelli seramik malzemelere eklenen farklı katkıları ile üretilen yeni seramik malzemelerin dielektrik özelliklerinin geliştirilmesini amaçlayan çalışmalar bulunmaktadır.

Salama ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı çalışmada, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ seramik malzemesine ağırlıkça %0,1-%0,5 arasında değişen oranlarda farklı metal oksit nano parçacık (Mn_3O_4 , Co_3O_4 ve Cr_2O_3) katkılanmıştır. Dielektrik özelliklerin incelendiği çalışmanın sonuçları Y-temelli perovskit yapıların enerji depolama sistemleri için son derece umut verici özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada Mn_3O_4 , Co_3O_4 ve Cr_2O_3 nano parçacık katkılı seramiklerin 50 Hz'deki ϵ' (kompleks geçirgenliğin gerçek kısmı) değerleri sırasıyla $9,45 \times 10^5$, $9,5 \times 10^5$ ve $1,138 \times 10^6$ gibi oldukça yüksek olarak ölçülmüştür [8]. Youssef ve arkadaşlarının 2018 yılında $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ (YBCO) malzemesine ağırlıkça %0,1-%0,5 arasında değişen oranlarda CuO ve SnO_2 metal oksitlerini katkılادıkları çalışmada ise, CuO-YBCO malzemesinde en yüksek dielektrik sabitinin ağırlıkça %0,2, SnO_2 -YBCO malzemesinde ise en yüksek dielektrik sabitinin ağırlıkça %0,4 katkısında görüldüğünü rapor etmişlerdir [9]. Çok yakın geçmişte Yang ve arkadaşları tarafından, $(\text{Y}_x\text{Bi}_{1-x})_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ formülüne sahip $x=0$ ile $x=0,30$ değerleri arasında seramikler hazırlanmış ve dielektrik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak, $x=0,2$ değerine sahip seramiğin dielektrik sabitinin 7400 gibi nispeten yüksek bir değere ve dielektrik kayıp faktörünün de 0,055 değerine sahip olduğu tespit edilmiştir [10].

Yine 2012 yılında Liang ve arkadaşları tarafından, katıhal reaksiyon yöntemi ile sentezlenen $\text{Y}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ seramik malzemesinin yapısal ve dielektrik özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları sentezlenen seramik için oda sıcaklığında dielektrik kaybın 0,033 gibi oldukça küçük bir değere, dielektrik sabitinin ise $1,1 \times 10^4$ gibi oldukça yüksek bir değere sahip olduğunu ortaya koymuştur [11].

Ayrıca literatürde hem evropiyum tabanlı hemde evropiyum katkılı seramiklerin dielektrik özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. 2014 yılında Salame ve arkadaşları Eu_2CuO_4 seramiğinin dielektrik özelliklerini 0,1 Hz-10 MHz frekans aralığında, -100 °C'den 150 °C'ye değişen sıcaklıklarda incelenmiş ve bu seramiğin dielektrik sabitinin 1 kHz ve 50 °C'de 2×10^3 gibi yine yüksek bir değer aldığı rapor etmişlerdir. Araştırmacılar, Evropiyum bazlı bakır oksit tabakalı seramik malzemelerin düşük frekans bölgesindeki yüksek dielektrik sabitleri nedeniyle mikro-elektronik uygulamalar için yüksek potansiyele sahip olduğu belirtilmişlerdir [2]. Yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler bellek cihazları, süper kapasitörler gibi çeşitli mikroelektronik uygulamalar için oldukça öneme sahiptir. Buna istinaden Özdemir ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada,

katıhal reaksiyon yöntemi ile sentezlenmiş evropiyum içeren bakır oksit katmanlı perovskit yapıya sahip $\text{EuBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{9-x}$ (Eu-1223) seramiğinin dielektrik özellikleri 5 Hz-13 MHz frekans ve 298 K ile 408 K sıcaklıkları arasında incelenmiştir. ϵ' değerinin düşük frekans bölgesinde sıcaklık birlikte arttığı ve en yüksek $2,5 \times 10^3$ değerine ulaştığı bildirilmiştir. Ayrıca Eu-1223 malzemesinin artan sıcaklıkla birlikte direncindeki azalma sebebi ile elektronik devrelerde ısıya duyarlı direnç olarak kullanılabileceği öngörülmüştür [12]. Yine benzer başka bir çalışmada, $\text{Eu}_x\text{Bi}_{1-x}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$ ($x=0, 0,3$ ve $0,5$ için) seramikleri üretilmiştir. Üretilen seramiklerin yapısal ve dielektrik özellikleri incelenmiş olup, $\text{Eu}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$ malzemesinin $\text{BiSr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$ malzemesine göre yüksek dielektrik sabiti ve düşük dielektrik kaybı olduğu belirtilmiştir. Buna ek olarak, Bi-Sr-Ca-Cu-O seramik yapısının dielektrik sabiti yüksek kalırken nadir toprak elementi katkılamamanın dielektrik kaybını azalttığı rapor edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda araştırmacılar, $\text{Eu}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$ malzemesinin yüksek dielektrik sabiti ve düşük dielektrik kaybı gerektiren uygulamalar için umut vaadedici potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir [13]. 2018 yılında yapılan bir çalışmada, sentezlenen $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ ve $\text{SrBi}_{1,6}\text{Eu}_{0,4}\text{Nb}_2\text{O}_9$ seramiklerinin dielektrik özellikleri oda sıcaklığında 5 kHz ile 1 MHz frekans aralığında incelenmiş olup, evropiyum katkısının dielektrik sabitini arttırdığı görülmüştür [14]. Sati ve arkadaşları farklı oranlarda Bi ve Eu içeren $\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{FeO}_3$ ($x=0-0,015$) seramiğinin dielektrik özelliklerini incelemiş ve evropiyum katkısının dielektrik sabit ve kaybın frekanstan bağımsız bölgede iyileşmeye neden olduğunu ortaya koymuştur [15]. 2019 yılında rapor edilen bir başka çalışmada ise farklı sıcaklıklarda (1175°C , 1220°C ve 1225°C) sinterlenen farklı oranlarda Eu_2O_3 katkılı SrTiO_3 (STO) seramiğinin oda sıcaklığında 20 Hz ile 120 MHz frekans aralığında gerçekleştirilen dielektrik ölçümlerinde, Eu_2O_3 katkısının artmasıyla birlikte dielektrik sabitinde azalma olduğu gözlenmiştir. En yüksek dielektrik sabitinin ise 1225°C sıcaklıkta sinterlenmiş 0,1 g Eu_2O_3 katkısı ile elde edildiği bildirilmiştir [16].

Yttriyum ve evropiyum tabanlı/katkılı seramikler dışında diğer seramiklerde de genel olarak dielektrik özelliklerin belirlenmesi ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar literatürde bulunmaktadır. 2004 yılında Lunkenheimer ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ seramik malzemesinin dielektrik sabitinin oda sıcaklığında 1 kHz frekans değerinde yaklaşık olarak 2×10^3 gibi

yüksek bir değere sahip olduğu belirtilmiştir [17]. 2001 yılından yapılan diğer bir çalışmada, $\text{Bi}_3\text{Zn}_2\text{Sb}_3\text{O}_{14}$ seramiğinin 5 Hz-13 MHz frekans ve 100°C ile 500°C sıcaklık aralığında yapılan dielektrik ölçüm ve analizleri, 400°C'ye kadar dielektrik kayıpta önemli bir değişikliğe neden olmamakla birlikte bu sıcaklığın üzerinde dielektrik kayıpta güçlü bir artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca artan frekans ile birlikte dielektrik kayıp parametresinde bir azalma meydana geldiği de rapor edilmiştir [18].

Bunlara ek olarak negatif dielektrik sabiti ve negatif elektriksel geçirgenlik gibi negatif elektromanyetik özelliklere sahip malzemeler hem iletişim hem de savunma sanayinde büyük bir ihtiyaç yaratmaktadır [19]. Özellikle negatif geçirgenliğe sahip malzemeler kapasitörlerde, elektromanyetik kalkanlarda ve güç filtrelerinde kullanım için büyük bir potansiyele sahiptir [20-24]. Negatif elektromanyetik özelliklere sahip malzemeler genellikle metamalzemeler olarak adlandırılır. Metamalzemeler bazı yapay olarak düzenlenmiş geometrik dizi yapılarında ve bazı iletken malzemelerle güçlendirilmiş kompozit yapılarda gözlemlenir [25]. Özellikle yapay periyodik yapılarda gözlenen negatif elektromanyetik özelliklerin gözlenmesi, bazen kendiliğinden bazen de sıcaklık, elektrik alan ve ışık gibi dışarıdan uygulanan faktörlere bağlı olarak bir rezonansın oluşması ile ortaya çıkar [26]. Bu tür rezonans yapan plazma durumlarına, doğada atmosferdeki iyonosfer tabakasında ve metallerde rastlanmaktadır. Ayrıca, bu ortamlarda serbest hareket eden yükler olduğu da unutulmamalıdır. Optik açıdan bakıldığında, bir malzemeye gönderilen ışığın açısız frekansı (ω), malzemedeki plazmonik rezonans açısız frekansından (ω_p) daha düşük ise, gelen ışık malzemedeki serbest yüklerin hareketini indükler ve gelen ışık malzeme tarafından yansıtılır. Tam tersi durumda ($\omega > \omega_p$), yükler gelen elektromanyetik alana hızlı bir tepki veremediğinden, gelen ışık perdelenemez ve malzemenin içinden geçmek zorunda kalır. Bu yaklaşım metalik malzemelere uygulandığında, iletim elektronlarının hareketinin plazmonik plazma açısız frekansı, gelen elektromanyetik dalganın açısız frekansından daha büyük olduğu sürece, metal dalgayı yansıtarak gelen elektromanyetiği koruyacaktır. Bu, Drude modeline göre negatif gerçek geçirgenlik (NRP-Negative Real Permittivity) kavramına açıklık getirmektedir. Bu nedenle, NRP olgusunu ayarlamak için hareketli yük taşıyıcı konsantrasyonuna ve dolayısıyla plazma frekansını değiştirmek gerekmektedir. Bu bağlamda, hem hazırlama sürecinde hem

de sonrasında malzemeye yapılacak müdahalelerle (hazırlama yöntemindeki değişiklikler, iletken nano boyutlu katkı maddeleri, iletken nano boyutlu katkı maddeleri kullanımı, sıcaklık eğişimi vb.) NRP olgusunun gözlemlendiği frekans aralığı üzerinde ayarlamalar yapmak mümkündür. Bugüne kadar bazı kompozit yapılar ve seramiklerde NRP gözlemlendiğini bildiren çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Xie ve arkadaşları, öncü çözeltilerdeki reaktanları ve katalitleri değiştirerek elde ettikleri düşük yoğunluklu nanoyapılı karbon aerogellerde negatif geçirgenlik tespit etmişlerdir. Gözlemledikleri NRP fenomenini, yapıdaki karbon ağlarının düşük frekanslı plazmonik rezonansına bağlamışlardır [27]. Öte yandan, Wang ve arkadaşları tarafından, poliüretan sünger/gümüş nanotel (PUS/AgNWs) kompozitleri hazırlanmış ve kompozitlerin gümüş nanotel içeriklerine bağlı olarak Lorentz benzeri ve Drude benzeri NRP gözlemlenmiştir. Sıkıştırılmış elastik deformasyonun, nanokompozitlerin NRP davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş ve elektron yoğunluğundaki artışa bağlı olarak Drude benzeri NRP gözlemlendiği vurgulanmıştır [28].

2010 yılında Kılıç ve arkadaşları tarafından rapor edilen çalışmada, katıhal reaksiyon yöntemi ile sentezlenmiş ($\text{Bi}_{0,3}\text{Eu}_{0,7}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$) seramiğinin yapısal ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. $\text{BiSr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$ seramiğinin yapısındaki bizmut yerine belirli bir oranda evropiyum konulması ile elde edilen seramiğin dielektrik özelliklerinin iyileştiği ve üretilen bu seramiğin teknolojik önemi de büyük olan düşük frekans bölgesinde negatif dielektrik sabite sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle üretilen ($\text{Bi}_{0,3}\text{Eu}_{0,7}\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$) seramiğinin sıcaklık sensörlerinde kullanılabilmek potansiyeli taşıdığı vurgulanmıştır [1].

2017 yılında Özdemir ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+x}$ (Eu-123) seramiğinin düşük frekans bölgesinde negatif dielektrik sabitli bir malzeme olduğu bildirilmiştir [29]. Ek olarak, Kılıç ve arkadaşları, ($\text{Bi}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6,5}$) perovskit seramik için NRP'yi $x=0,7$ olan belirli bir Bi/Eu oranında rapor etmişlerdir [1]. Bu çalışmalara ek olarak, Wei ve arkadaşları tarafından, düşük elektron yoğunluğu ile plazma frekansını düşürerek daha yüksek frekans bölgesinde NRP gözlemlenebileceğini belirtilmiştir. Bu bakış açısıyla, $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ perovskit yapılı seramiklere odaklanılmıştır. Araştırmaları, plazma benzeri NRP'nin düşük elektron yoğunluğunun kolektif salınımından kaynaklandığını göstermiştir [30].

Tüm bu güncel literatür ışığında, (Y_xEu_{1-x}) $Ba_2Cu_3O_{6.5}$ perovskit seramiklerinin yapısındaki nadir toprak elementlerinin hem oranlarındaki değişim hem de sıcaklık artışlarına bağlı olarak yapılacak dielektrik özellikler kapsamındaki bir inceleme bu seramik setinde NRP olgusunun belli frekans aralıklarında gözlenme ihtimalini de ortaya koymaktadır.

Yapay zekâ (YZ) malzeme karakterizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Malzeme karakterizasyonu, malzemelerin yapısı, bileşimi ve özellikleri hakkında bilgi edinmeyi içeren bir süreçtir. Geleneksel olarak, malzemelerin karakterizasyonu deneyler, analizler ve gözlemler yoluyla gerçekleştirilirken, yapay zekâ teknikleri bu süreci daha etkili ve verimli hale getirebilir. Yapay zekâ, büyük veri kümelerini işleme, desen tanıma, örüntü analizi ve tahmin yapma gibi yeteneklere sahiptir. Bu yetenekler, malzeme karakterizasyonunda birçok avantaj sağlar:

1. *Veri analizi ve işleme:* Malzeme karakterizasyonu sırasında büyük miktarda veri üretilir. Yapay zekâ algoritmaları, bu verileri hızlı bir şekilde analiz edebilir ve anlamlı bilgileri çıkarabilir. Bu, araştırmacıların veri analizinde zaman kazanmasına ve daha doğru sonuçlara ulaşmasına yardımcı olur.

2. *Desen tanıma ve örüntü analizi:* Malzeme karakterizasyonu sürecinde belirli desenler veya örüntüler aranır. Yapay zekâ, bu desenleri tanımlama ve sınıflandırma yeteneğine sahiptir. Örneğin, bir malzemenin mikroyapısını incelemek için görüntü işleme algoritmaları kullanılabilir. Bu sayede, malzeme özelliklerinin belirlenmesi daha hassas ve güvenilir hale gelir.

3. *Tahmin ve optimizasyon:* Yapay zekâ, eldeki verilere dayanarak malzeme özelliklerini tahmin etme yeteneğine sahiptir. Bu, malzemelerin özelliklerini optimize etmek veya gelecekteki davranışlarını tahmin etmek için kullanılabilir. Örneğin, bir malzemenin dayanıklılığını veya iletkenliğini tahmin edebilir ve buna göre malzeme bileşimini veya işleme parametrelerini ayarlamak için önerilerde bulunabilir.

4. *Veri tabanı oluşturma:* Yapay zekâ algoritmaları, malzeme karakterizasyonundan elde edilen verileri analiz ederek kapsamlı veri tabanları oluşturabilir. Bu veri tabanları, gelecekteki araştırmalar için bir kaynak oluşturabilir ve malzeme özellikleri hakkında geniş bir bilgi birikimini sağlayabilir.

Bu nedenlerle, yapay zekâ malzeme karakterizasyonunda önemli bir araç haline gelmiştir. Yapay zekâ algoritmalarının kullanımıyla malzemelerin daha iyi anlaşılması, yeni malzemelerin tasarlanması ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesi mümkün hale gelmektedir. Makine öğrenmesi ise bir bilgisayar sistemine verilen verilerden örüntüleri ve ilişkileri otomatik olarak tanıyabilme ve öğrenebilme yeteneği olan bir yapay zekâ alt alanıdır. Makine öğrenmesi, bilgisayarların belirli bir görevi gerçekleştirmek için verilerden öğrenme yapabilmesini sağlar, böylece programlama talimatlarına ihtiyaç duymadan işlem ve tahmin gerçekleştirebilir. Geleneksel yazılım geliştirme sürecinde, bir programcı, belirli bir sorunu çözecek talimatları belirler ve bu talimatları bilgisayara kodlar. Makine öğrenmesinde ise, programcılar yerine algoritmalara öğrenme yeteneği verilir. Bu algoritmalar, büyük miktardaki verileri analiz eder, desenleri tanır ve sonuçları tahmin etmek veya kararlar vermek için kullanır.

Makine öğrenmesi, genellikle deney ve veriye dayalı bir yaklaşımı benimser. Bir makine öğrenmesi modeli, eğitim verileri adı verilen örnekler kümesiyle beslenir. Eğitim verileri, giriş verileri (özellikler) ve bu girişlere karşılık gelen hedef çıktılar (etiketler veya sınıflar) içerir. Model, bu verileri kullanarak örüntüleri öğrenir ve gelecekteki girişlere dayanarak sonuçlar üretebilir. Makine öğrenmesi, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Sınıflandırma, regresyon, kümeleme, boyut indirgeme, doğal dil işleme, görüntü ve ses tanıma gibi birçok farklı görevde kullanılabilir. Makine öğrenmesi, verilerin büyüklüğü ve karmaşıklığıyla başa çıkabilme yeteneği sayesinde bilgi işleme ve karar verme süreçlerini iyileştirebilir. Ancak, başarılı bir makine öğrenmesi uygulaması için iyi bir veri setinin yanı sıra doğru algoritma seçimi, veri ön işleme, model eğitimi, hiperparametre ayarı ve modelin doğrulanması gibi faktörler de önemlidir.

Son zamanlarda yapay zekâ ve alt alanları fizik ve malzeme biliminde yukarıda sayılan özellikleri nedeniyle hem zaman hem maliyet tasarrufları nedeniyle sıklıkla malzemelerin karakterizasyonu ve optimizasyonunda kullanılmaktadır.

2020 yılında Chen ve arkadaşları polimer malzemelerin frekansa bağlı dielektrik sabitinin (ϵ') belirlenmesi, çeşitli uygulamalarda kullanılan ve belirli özelliklere sahip polimer malzemelerin tayin edilebilmesine yönelik olarak makine öğrenmesi yöntemini kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucu Gauss süreci regresyon (GPR) algoritmasının bu süreçte kullanılabilir olduğunu rapor etmişlerdir [31]. Yine

makine öğrenmesi algoritmalarının kullanıldığı başka bir çalışmada, Kılıç ve arkadaşlarınca malzemelerin dielektrik özelliklerin tespiti için Lineer Regresyon (LR), Destek Vektör Makinesi (SVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (GPR) algoritmalarının kullanılabileceği ortaya konmuştur. Söz konusu çalışmada Kılıç ve arkadaşları tarafından, ağırlıkça farklı oranlarda PANI katkılı alçak yoğunluklu polietilen (LDPE) polimer kompozitleri hazırlanmış ve dielektrik spektroskopisi yardımıyla belirli bir sıcaklık aralığında frekansa bağlı kompleks dielektrik fonksiyonunun gerçek ve sanal bileşenleri (ϵ' ve ϵ'') belirlenmiştir. Daha sonra dielektrik parametrelerinin tahmini için LR, SVM ve GPR algoritmalarının performansı karşılaştırılmış ve deneysel verilerle en yüksek oranda örtüşmenin GPR algoritmasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda deneysel olarak üretilmemiş örnekler için sıcaklık ve frekansa bağlı dielektrik parametreleri makine öğrenmesi yoluyla belirlenmiştir [32]. 2022 yılında yapılan başka bir çalışmada, Polipirol (PPy) esaslı Kufeki taşı (KS) katkılı (PPy/KS) kompozitlerin frekans ve sıcaklığa bağlı dielektrik parametrelerinin (ϵ' ve ϵ'') tahmini için Doğrusal Regresyon (LR), Destek Vektör Makinesi (SVM) ve Gauss Süreç Regresyonu (GPR) modelleri gibi farklı makine öğrenmesi modelleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, frekansa ve sıcaklığa bağlı dielektrik parametrelerinin tahmini için en uygun algoritmanın GPR modeli olduğu bildirilmiştir. Deneysel veriler ve GPR algoritması ile yapılan tahminler ışığında, PPy'nin kapasitör uygulamaları için bazı spesifik Kufeki taşı katkı yüzdesi, frekans aralıkları ve çalışma sıcaklığı önerilmiştir [33]. 2021 yılında Eyecioğlu tarafından yapılan bir çalışmada, iki tip Bazalt/PANI kompozitlerinin kompleks dielektrik fonksiyonunun gerçek ve sanal bileşenlerine (ϵ' ve ϵ''), açısal frekansa (ω) ve ağırlıkça belirli oranlarda PANI konsantrasyonuna bağlı lineer olmayan değişimlerin tahmin edilmesi üzerine farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan algoritmalar, Doğrusal Regresyon (LR), k- En yakın komşu regresyonu (k-NN), Karar ağacı regresyonu (DT-R) algoritmalarıdır. Karar ağacı regresyonu modelinin, gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') parametrelerinin hesaplanmasında uygun bir model olduğu sonucuna varılmıştır [34]. Yi ve arkadaşları, polimer malzemelerin frekansa bağlı dielektrik sabiti (ϵ') tahmini için optimize edilmiş genetik algortima ile aralıklı destek vektör regresyonu algoritması (OGA-ISVR) önermişlerdir. Çalışmanın sonucunda, önerilen yöntem ile yaygın olarak kullanılan destek vektör regresyon yöntemi karşılaştırıldığında, önerilen modelin daha yüksek tahmin doğruluğuna

sahip olduğu bildirilmiştir. Önerilen modelin polimer malzemelerin dielektrik özellikleri için doğru tahminlerde bulunduğu saptanmıştır [35].

Yapay zekâ ve alt alanlarının kullanıldığı çalışmalar hemen hemen tüm araştırma alanları için hızla artarken bu tez çalışmasının konusu da olan seramik malzemelerin özelliklerinin tespiti ve optimizasyonuna yönelik kullanımlar son derece sınırlıdır. Örneğin, 2018 yılında Yuting He ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek enerji depolama sistemlerine olan gereksinimin artması ve yüksek dielektrik geçirgenliğine sahip malzemeler geliştirmek üzerine yoğunlaşılması nedeniyle, çalışmalara umut verici BaTiO₃ seramik malzemesine farklı oranlarda Sn/Ca katkılanmıştır. Elde edilen malzemelerin makine öğrenmesi modellerinden Gauss Süreç Regresyonu (GPR) modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışma doğrultusunda optimum bileşimin 13°C'deki ϵ_r değerinin $2,0 \times 10^4$ gibi nispeten yüksek bir elektriksel geçirgenliğe sahip olan Ba_{0,86} Ca_{0,14} Ti_{0,86} Sn_{0,14}O₃ malzemesinin olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, geleneksel yöntemle numune hazırlama sayısının, makine öğrenmesi yardımıyla %5,5 oranında bir düşüş sağladığı görölmüştür [36]. Başka bir çalışmada ise, seramik malzemelerin elektriksel geçirgenliğini tahmin etmek için makine öğrenmesi modellerinden 5 farklı regresyon algoritması kullanılmıştır. Seramik malzemelerin elektriksel geçirgenliği (permittivite) tespitinde rastgele orman modeli ile radyal tabanlı fonksiyon çekirdeği modelinden elde edilen verilerin deneysel veriler ile uyutuğu bildirilmiştir [37].

İlgili tez çalışmasının, hem belirli bir frekans aralığında yüksek dielektrik sabitine sahip hem de başka bir frekans aralığında ve/veya sıcaklık diliminde negatif dielektrik sabitine sahip çok fonksiyonlu bir malzeme üretme potansiyeli mevcuttur. Dolayısıyla, tez çalışması boyunca üretilen seramik malzemelerin dielektrik özelliklerinin makine öğrenmesi yardımıyla yüksek bir doğrulukla öngörölüp öngörölemeyeceğinin tespiti de ayrıca amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, enerji depolama sistemlerinde dielektrik katman olarak kullanılmak üzere yitriyum ve evropiyum temelli bakır oksit katmanlı yüksek performanslı yeni seramik malzeme serisinin üretimi planlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda üretilen seramik malzemelerin yapısal özellikleri SEM ve XRD analizleri ile enerji depolama kabiliyetlerinin ve elektriksel iletkenliklerinin sıcaklık ve frekans ile değişimlerinin deneysel incelemesi dielektrik spektroskopisi yöntemiyle gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Ek olarak, üretilen seramiklerin dielektrik özelliklerinin farklı koşullardaki davranışlarının belirlenmesi ve istenilen optimum parametrelerin eldesinde makine öğrenmesi yönteminin kullanılabilirliğinin testi planlanmıştır. Bu şekilde deneysel veri ve makine öğrenmesinin birlikte kullanılması ile birlikte hem zaman hem de maliyet açısından bir avantaj sağlanacağı öngörülmektedir.

1.3 Hipotez

Bu yüksek lisans tezinin temel hipotezi Yitriyum (Y) yerine artan oranlarda Evropiyum (Eu) nadir toprak elementini yerine koyma suretiyle ($\text{Eu}_x/\text{Y}_{1-x}$) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ kimyasal formülüne sahip yeni seramik malzemelerin dielektrik özelliklerinde ve enerji depolama kabiliyetlerinde iyileşme olması beklenmektedir. Bu noktadan hareketle, birden fazla işlevi olan ileri fonksiyonel seramik malzemeler elde edileceği düşünülmektedir. Ayrıca, bu hipotezleri test etmek amacı ile hem deneysel verilerden hem de makine öğrenmesi yardımı ile elde edilecek çeşitli derin öğrenme algoritmalarının da kullanılabileceği öngörülmektedir. Özellikle, kullanılan bu algoritmaların deneysel olarak üretilen ($\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5}$) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği için ölçümü yapılmamış sıcaklıklarda dielektrik özelliklerini (ϵ' ve ϵ'') tahmin edebileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, ilgili araştırmanın hem deneysel hem de makine öğrenmesi ile gerçekleştirilmesi sebebiyle hem zaman hem de maliyet açısından büyük bir avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

2 GENEL BİLGİLER

Bu bölümde seramik malzemelerin tarihçesinden, sınıflandırılmasından ve elektriksel özelliklerinden bahsedilecektir. Ayrıca dielektrik spektroskopisinin genel işleyişi hakkında bilgi verilecektir.

2.1 Seramik Kavramı

Seramikler, metal ve metal olmayan elementlerin oluşturduğu inorganik bileşiklerdir. “Seramik” kelimesi, adını “keramik” anlamına gelen Yunan *keramos*undan alır, bu da yanmak anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, eski Yunan’da seramikler yanmış madde veya yanmış toprak anlamında kullanılmıştır [38].

2.2 Seramikler Hakkında Genel Bilgiler

Seramik malzemeler genel olarak sert ve kırılğan bir yapıya, düşük elektrik iletkenliğine, iyi kimyasal ve ısı kararlılığı ve yüksek ergime derecesine sahip malzemelerdir. Seramik malzemeler farklı bileşimlerinde kristal ve cam yapı fazlar bulundurmaları ile belirli miktarlarda gözenek içerirler. Bu yapılar ile gözeneklerin miktarı ve dağılımı seramik malzemelerin özelliklerini etkileyen faktörlerdendir. Örneğin, belirli bir yapıda bulunan seramik malzemenin mevcut durumda olan fazlarının yerleşim düzeni değiştirildiğinde, yalıtkan olan seramik malzeme iletken hale gelebilmektedir [39].

2.3 Seramik Malzemelerin Sınıflandırılması

Seramik malzemeler kimyasal bileşimlerine, fonksiyonlarına ve yapılarına göre sınıflandırılabilir. Seramik malzemeler Tablo 2.1’de de görüleceği üzere bileşimlerine göre metal oksitler, silikatlar, karbürler, nitrürler ve borürler şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2. 1 Seramik malzemelerin kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılması [39].

Kimyasal bileşimlerine göre seramik malzemeler
Metal Oksitler
Silikatlar
Karbürler
Nitrürler
Borürler

Oksitlerde seramiği oluşturan atomlar arasındaki bağlar iyonik bağdır. Bu tür seramiklere örnek olarak Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve Zr_2O_3 verilebilir. Karbürler de hem iyonik hem kovalent bağ görülebilmektedir. İyonik bağ yapan karbürler yüksek derecede sertliğe ve yüksek ısı kararlılığına sahiptir. Nitrürler ve borürlerde de seramiği oluşturan atomlar arasındaki bağlar kovalent bağdır [39]. Fonksiyonlarına göre seramik malzemelerin sınıflandırılmasına bakıldığında Tablo 2.2'deki gibi bir sınıflandırma yapılabilir.

Tablo 2. 2 Seramik malzemelerin fonksiyonlarına göre sınıflandırılması [38].

Fonksiyon	Sınıf	Kimyasal Bileşim
Elektriksel	İzolasyon	α -Al ₂ O ₃ , MgO, Porselen
	Ferroelektrik	BaTiO ₃ , SrTiO ₃
	Piezoelektrik	PbZr _{0,5} Ti _{0,5} O ₃
	Hızlı iyon iletimi	β -Al ₂ O ₃ , dop edilmiş ZrO ₂
	Süperiletkenler	Ba ₂ YCu ₃ O _{7-x}
Manyetik	Yumuşak ferrit	Mn _{0,4} Zn _{0,6} Fe ₂ O ₄
	Sert ferrit	BaFe ₁₂ O ₁₉ , SrFe ₁₂ O ₁₉
Nükleer	Yakıt	UO ₂ , UO ₂ -PuO ₂
	Koruma kalkanı	SiC, B ₄ C
Optik	Işık hafızası	Dop edilmiş PbZr _{0,5} Ti _{0,5} O ₃
	Renkler	Dop edilmiş-ZrSiO ₄ , -ZrO ₂ , -Al ₂ O ₃
Mekanik	Yapısal refrakter	α -Al ₂ O ₃ , MgO, SiC, Si ₃ N ₄ , Al ₆ Si ₂ O ₁₃
	Aşınma direnci	α -Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiC, Si ₃ N ₄ , toklaştırılmış Al ₂ O ₃
	Kesici takım	α -Al ₂ O ₃ , MgO, TiC, Sialon, Si ₃ N ₄
	Aşındırıcı	α -Al ₂ O ₃ , SiC, toklaştırılmış α -Al ₂ O ₃ , Sialon
	Yapı	α -Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , Porselen
Isıl	İzolasyon	ZnO, ZrO ₂ , SiO ₂
	Radyatör	ZrO ₂ , TiO ₂
Kimyasal	Gaz sensörü	ZnO, ZrO ₂ , SnO ₂ , Fe ₂ O ₃
	Katalist taşıyıcı	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ , α -Al ₂ O ₃
	Elektrodlar	TiO ₂ , TiB ₂ , SnO ₂ , ZnO
	Filtreler	SiO ₂ , α -Al ₂ O ₃
Biyolojik	Yapısal protezler	α -Al ₂ O ₃ , Porselen
	Çimentolar	CaHPO ₄ .2H ₂ O
Estetik	Sanat seramiği, çömlek	Beyaz pişen seramik, porselen
	Karo, beton	Beyaz pişen seramik, CaO-SiO ₂ -H ₂ O

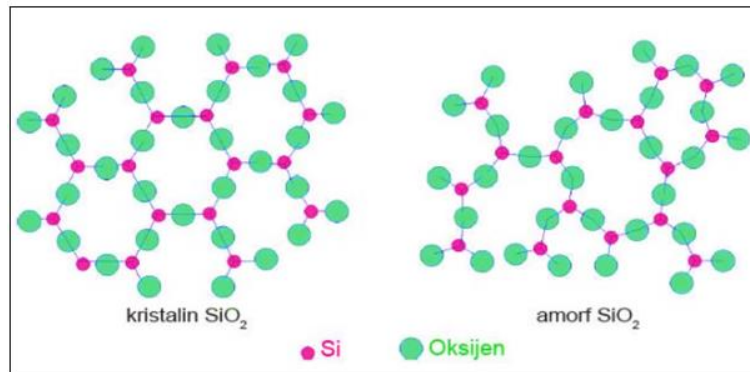
Bu tez kapsamında kullanılan YBa₂Cu₃O_{7-x} seramik malzemesi ileri teknolojik seramiklerde yer alan süperiletken seramikler grubunda yer almaktadır. Bazı seramik malzemeler sıvı azottan (77 K) daha düşük sıcaklıklarda süperiletken

özellik göstermektedir. Son olarak seramik malzemeler yapılarına göre Tablo 2.3'teki gibi kristal ve cam esaslı olarak iki grupta incelenmektedir.

Tablo 2. 3 Seramik malzemelerin yapılarına göre sınıflandırılması

Yapılarına göre seramik malzemeler	
Cam Esaslı	○ Amor yapılı camlar ○ Kristal yapılı camlar
Kristal yapılı	

Seramik malzemeler bileşimlerinde birden fazla bileşik bulundurabildiklerinden amorf yapıda olabilecekleri gibi amorf/kristalin ve kristalin yapılar da ortaya çıkabilmektedir. Amorf yapıya sahip seramiklerde moleküller arası düzen yoktur, gelişmiş güzel bir dizilim söz konusudur. Dolayısıyla amorf yapıdaki seramik malzemelerde tane ve tane sınırı da bulunmamaktadır. Kristal yapıya sahip seramik malzemelerin yapıları, atomların bağ kuvvetleri yardımıyla bir araya gelerek düzenli bir dizilim göstermektedir. Kristal yapıya sahip seramikler tek kristal veya polikristal (çok kristal) olabilir. Tek kristal yapıya sahip malzemelerde özellikler yöne bağlı olarak değişmektedir, çok kristal yapıda ise malzeme özellikleri yönden bağımsızdır. Tablo 2.3'te silikatlar grubunda yer alan SiO_2 malzemesine ait amorf ve kristal yapı verilmiştir (Şekil 2.1). Bu malzeme amorf yapıya sahipken cam adı verilir [40].

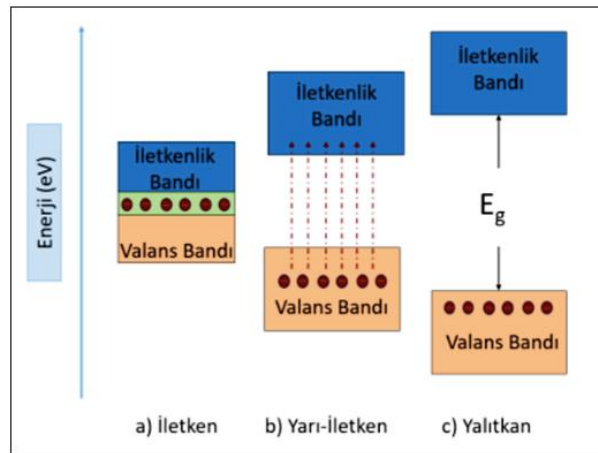


Şekil 2. 1 Seramik malzemelerin yapılarına göre sınıflandırılması [41].

Bazı cam türleri, yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlemi ile şekillendirme işlemi yapılması sonrası amorf yapıdan kristal yapıya geçirilebilir.

2.4 Seramik Malzemelerin Elektriksel Özellikleri

Malzemeler iletkenlik özellikleri bakımından 3 kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; yalıtkan, yarı-iletken ve iletkenir. Bir malzemenin enerji aralığı ilgili elektronun geçişini zorlaştıracak kadar büyük ise bu malzeme yalıtkan olur. Enerji aralığı azaldıkça bir miktar da olsa elektron geçişi gözlenir ve malzeme yarı-iletken olur. Malzeme iletken olduğunda ise, enerji aralığı neredeyse yok olur ve iletkenlik bandı ile valans bandı üst üste çakışır dolayısıyla elektronlar serbest bir şekilde hareket etmeye başlar. İletkenlik özelliklerine göre malzemelerin iletkenlik ve valans bandı Şekil 2.2’de verilmiştir [42].



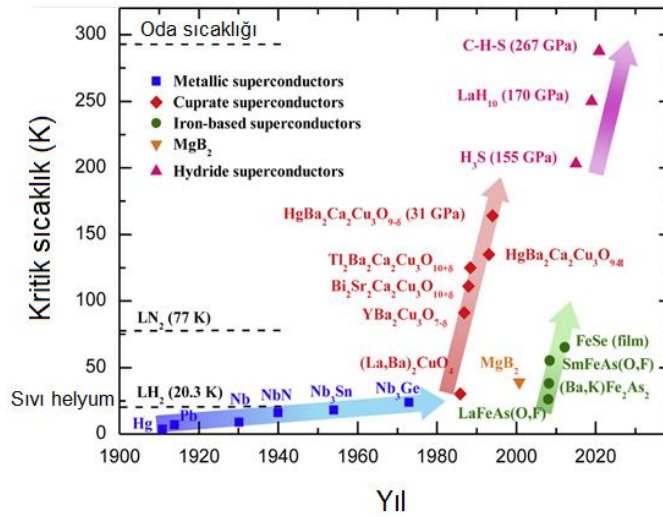
Şekil 2. 2 Malzemelerin iletkenlik özelliklerine göre iletkenlik ve valans bantları [43].

İletkenlik kavramı bir devreye uygulanan akım ve gerilimin malzeme içerisinde bir uçtan diğer uca kadar taşınırken elektronların geçişini etkileyen ve geciktiren zorluklar ile karşılaşır ve bu etkilere direnç denir. Bazı malzemeler belirli bir sıcaklığın altında elektrik akımına karşı herhangi bir direnç göstermezler. Bu tür malzemelere süperiletken denir. Süperiletken malzemeler elektrik akımına karşı bir direnç göstermedikleri için enerji kaybı meydana gelmez [44].

Heike Kamerling Onnes 1908 yılında kaynama noktası 4,2 K olan helyumu sıvılaştırması sonucu süperiletken kavramı literatüre kazandırılmıştır. 1911 yılında ise metalik cıvanın kritik sıcaklık (T_c) değerinin altında soğutulmasıyla elektriksel direncinin neredeyse sıfır değerine düştüğünü gözlemlemiştir. Direncin sıfıra düştüğü değerdeki sıcaklığa ise “kritik sıcaklık (T_c)” denir. H. K. Onnes yaptığı bu çalışmalar ile 1913 yılında Nobel Fizik Ödülü’ne layık görülmüştür [45].

Süperiletken seramik malzemelerin keşfi ise J. Bendroz ve K. A. Müller tarafından 1986 yılında La-Ba-Cu-O (LaBaCuO) bileşiğinin kritik sıcaklık değerinin yaklaşık 40 K olduğu saptanmıştır ve böylece IBM Laboratuvarında ilk seramik süperiletken malzeme sentezlenmiştir. Normal şartlarda bu seramik malzemenin yalıtkan olması beklenmektedir ancak yapının süperiletken özellik göstermesi ile lantan elementi yerine yitrium (Y) elementi konularak YBaCuO seramik sistemi sentezlenmiş ve kritik sıcaklık değeri 92 K olarak kayıtlara geçilmiştir [45, 46]. Bu çalışmayla birlikte ilk kez sıvı azottan yani 77 K'den daha yüksek sıcaklıklarda bir kritik sıcaklık değerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla, bu sistemin keşfi, sıvı helyum (4,2 K) kullanmak yerine daha ucuz olan sıvı azotun (77 K) kullanılmasına imkân vererek süperiletkenlik çalışmaları için dönüm noktası oluşturmuştur. Bununla birlikte 1988 yılında $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO) ve $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (TBCCO) bileşikleri sentezlenmiş ve sırasıyla kritik sıcaklıkları 110 K ve 125 K olarak bildirilmiştir. Son yıllarda ise $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ (HBCCO) bileşiğinin 133 K'de süperiletken özellik gösterdiği keşfedilmiştir [44, 47].

1900 yılından başlayarak günümüze kadar keşfedilmiş olan süperiletkenlerin tarihsel gelişimi Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2. 3 1911 yılında süperiletkenliğin keşfinden bu yana kritik sıcaklığın gelişimi [48].

Bu tez çalışmasında ise, Y-Ba-Cu-O ailesinden bir süperiletken malzemeye nadir bir toprak elementi olan Evropiyum (Eu) elementinin kristal yapıya sokulması suretiyle elde edilen yeni bir seramik malzemenin üretimine odaklanılmıştır.

2.5 Seramiklerin Frekansa ve Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Özellikleri

Bu bölümde üretilen seramik örneklerin enerji/yük depolama kabiliyetleri, elektriksel iletkenliklerinin ve empedans analizlerini hem frekansa hem de sıcaklığa bağlı olarak incelemekte kullanılan dielektrik spektroskopisi ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

2.5.1 Empedans Spektroskopisi

Empedans spektroskopisi, bir devrenin alternatif akım (AC) veya gerilim uygulamasına verdiği tepkiyi frekansa bağlı olarak incelenmektedir. Empedans spektroskopisi sayesinde malzemelerin frekansa bağlı olarak elektriksel özellikleri (karmaşık empedansın sanal ve gerçek bileşenleri, kompleks (karmaşık) elektriksel geçirgenlik fonksiyonunun gerçek ve sanal bileşenleri, kompleks elektriksel modülüsün gerçek ve sanal bileşenler, AC (alternatif akım) iletkenlik, kayıp faktörü ve faz açısı) tespit edilmektedir. DC bir devrede, devre elemanının elektrik akımına karşı gösterdiği mukavemet direnç (R) olarak adlandırılmaktadır. (2.1)'de verilen denkleme göre, devreye uygulanan potansiyel farkın (V) akıma (I) oranı direnç olarak tanımlanmaktadır ve bu yasaya Ohm Yasası denmektedir.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

AC devrede ise, eğer devreye sıfırdan farklı bir frekansta akım uygulanırsa;

$$V = IZ \quad (2.2)$$

ifadesi yazılır.

AC devrelerde dirence ek olarak kondansatör (C) ve indüktör (L)'de elektrik akımına karşı koyarlar ve bu yüzden denklem (2.1)'de R yerine empedans (Z) yer almaktadır. Direnç, kondansatör ve indüktör gibi devre elemanlarından oluşan bir sistemde ise Ohm Yasası denklem (2.3)'teki gibi olur.

$$Z' = \frac{V'(t)}{I'(t)} = \frac{V \sin(\omega t)}{I \sin(\omega t + \phi)} = Z \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \phi)} \quad (2.3)$$

Sonuç olarak, doğru akım devrelerinde direnç skaler bir değer alırken, alternatif akım devrelerinde empedans (Z^*) kompleks bir fonksiyon olarak ifade edilmektedir. Bu ifade denklem (2.4)'te verilmiştir.

$$Z^*(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \frac{R}{1+\omega\tau} - j \frac{R\omega\tau}{1+(\omega\tau)^2} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'te yer alan Z' , kompleks empedansın gerçekte kısmını, Z'' sanal kısmını ve τ relaksasyonu (gevşeme) temsil etmektedir. j sayısı ise $\sqrt{-1}$ değerini almaktadır. Bu durumda,

$$Z' = R \quad (2.5)$$

$$Z'' = x_L - x_C \quad (2.6)$$

Empedansın faz açısı ve büyüklüğü ise sırasıyla denklem (2.7) ve (2.8)'de gösterilmiştir.

$$\theta = \arctg\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \quad (2.7)$$

$$Z^* = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (2.8)$$

Tablo 2. 4 Direnç, kondansatör ve indüktörün empedans gösterimleri ve akım-gerilim bağıntıları.

		Elektriksel Bağını	Empedans
Direnç		$V = IR$	$Z^*=Z' = R$
Kondansatör		$I = C \frac{dV}{dt}$	$Z^* = Z'' = j \frac{1}{\omega C}$
İndüktör		$V = L \frac{dI}{dt}$	$Z^* = Z'' = j\omega L$

Tablo 2.4'te gösterildiği gibi; empedans kompleks bir fonksiyondur ve faz açısının sıfır olduğu durumda ($\theta=0$) sadece gerçekte bileşene sahiptir. Empedansın frekanstan bağımsız olduğu durum lineer (doğrusal) dirence karşılık gelmektedir ($Z^*=Z' = R$). Empedansın frekansa bağlı olduğu durumlarda ise indüktif ve kapasitif durumlardır ve sadece imajiner (sanal) bileşen içermektedir.

2.5.2 Empedans Spektroskopisi ile Dielektrik Parametrelerinin Belirlenmesi

Dielektrik spektroskopisi, kullanılan malzemenin veya bir ortamın dielektrik sabitini ve kayıp faktörünü frekansın bir fonksiyonu olarak karakterize eden bir empedans spektroskopisidir. İki iletken plaka/cam arasına dielektrik özellikleri belirlenmek istenen malzeme yerleştirilerek empedans analizör ile ölçümler

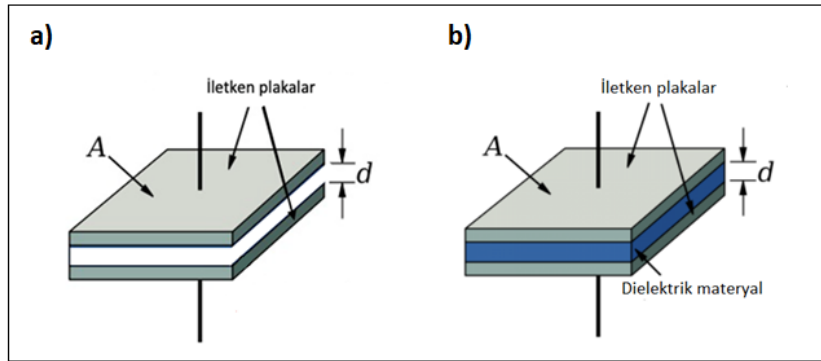
gerçekleştirilmektedir. İletken plakalar arasına dielektrik malzeme yerleştirildiğinde paralel plakalı kondansatör elde edilmektedir. Kondansatörün kapasitansı (sığası) frekansa bağlı olarak ölçülmektedir ve bunun sonucunda dielektrik sabitinin gerçek kısmı hesaplanmaktadır.

d mesafesine sahip ve yüzey alanı A olan iki paralel plakalı bir kondansatörün, V potansiyel farkı altında plakalarda oluşan elektrik alan şiddeti,

$$E = V/d \quad (2.9)$$

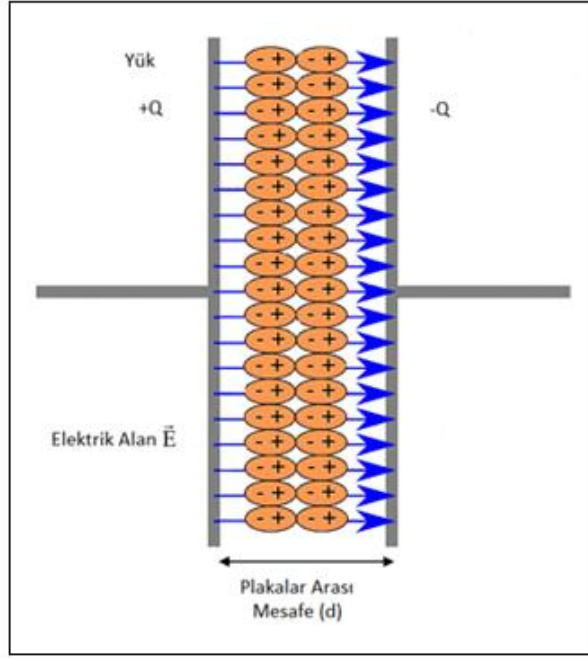
ile hesaplanmaktadır.

Şekil 2.4'te paralel plakalı bir kondansatörün hem plakaları arasında herhangi bir malzeme olmadan hem de dielektrik malzeme ile doluyken olan mevcut hali temsili olarak verilmiştir.



Şekil 2. 4 a) Kondansatörün içi boşken **b)** kondansatörün içi dielektrik malzeme ile doluyken mevcut hali [49].

Bir kondansatöre dış bir elektrik alan uygulandığında, dielektrik malzeme içerisindeki negatif yükler pozitif elektroda doğru yönelir ve pozitif yükler de negatif elektroda doğru kayar, böylece malzeme içerisinde polarizasyon gerçekleşmiş olur. Yalıtkan malzeme içerisinde yükler serbestçe hareket edemediği için, uygulanan elektrik alana karşı gelen polarizasyon etkisi yükleri elektrotlara doğru çeker ve böylece kondansatörde enerji depolanır. Bir malzeme ne kadar kolay polarize edilirse, kondansatörde depolanabilecek yük miktarı da o kadar fazla olur.



Şekil 2. 5 Dielektrik malzeme içerisindeki polarizasyon mekanizması [50].

İletken plakalar arası hava ile doluyken hesaplanan kondansatörün sığası C_0 (2.10) denklemi ile, dielektrik malzeme ile doldurulduğunda hesaplanan sığa C ise (2.11) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$C_0 = \varepsilon_0 A/d \quad (2.10)$$

$$C = \varepsilon' \varepsilon_0 A/d \quad (2.11)$$

(2.10) ve (2.11) denklemlerinde verilen, $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m değerine sahip olup boşluğun elektriksel geçirgenliğidir. Kompleks elektriksel geçirgenlik fonksiyonunun gerçek kısmı (ε'), açısal frekansa bağlıdır. Kompleks elektriksel geçirgenliğin frekansa bağlı olarak gerçek ve sanal olmak üzere iki bileşeni sırasıyla Denklem (2.12) ve (2.13)'teki gibidir.

$$\varepsilon'(\omega) = C/C_0 \quad (2.12)$$

$$\varepsilon''(\omega) = 1/R\omega C_0 \quad (2.13)$$

Kompleks elektriksel geçirgenlik fonksiyonu (ε^*) ise,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.14)$$

denklemini ifade edilmektedir. Bu denklemin kompleks empedansa (Z^*) bağı olarak ifadesi ise,

$$\varepsilon^* = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = -j/\omega C_0 Z^*(\omega) \quad (2.15)$$

$$Z' = \omega C_0 \varepsilon'' |Z^*|^2 \quad (2.16)$$

$$Z'' = -\omega C_0 \varepsilon' |Z^*|^2 \quad (2.17)$$

şeklindedir. (2.14) ve (2.15) denklemlerinde yer alan j , $\sqrt{-1}$ değerini almaktadır. Kompleks elektriksel geçirgenlik fonksiyonunda yer alan ε' ve ε'' sırasıyla gerçek ve sanal bileşenleri temsil etmektedir. Gerçek bileşen malzemenin enerji depolama kapasitesinin bir ölçüsü iken sanal bileşen malzemenin iyonik iletim veya kutuplanmasından kaynaklanan dielektrik enerji kaybının bir ölçüsüdür. Dielektrik özelliğe sahip malzemenin elektriksel geçirgenliği, sanal kısmın dielektrik kayıpla bağlantılı olduğu ve malzeme üzerine uygulanan elektrik alanın frekansına bağlı kompleks bir fiziksel niceliktir. Frekansa bağımlılığı ise, elektromanyetik spektrumda yer alan dispersiyon davranışlarının varlığını yansıtmaktadır [51].

Ayrıca, kompleks empedansın hem sanal hem de gerçek kısmı ile kompleks elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmı arasında doğrudan Denklem (2.18)'deki gibi bir ilişkisi söz konusudur:

$$\varepsilon' = -\frac{Z''}{2\pi f C_0 [(Z')^2 + (Z'')^2]} \quad (2.18)$$

Burada C_0 , plakalar arası hava ile doluyken alınan ölçümden elde edilen kapasitansdır (sığadır). Karmaşık elektriksel geçirgenlik, bir malzemenin elektriksel tepkisini tanımlayan bir parametredir. Bu geçirgenlik, genellikle kompleks bir sayı olarak ifade edilir ve gerçek (reel) bileşen ile sanal (imajiner) bileşen içerir. Gerçek bileşen, malzemenin dirençsel davranışını temsil eder. Bir malzeme, gerçek bileşeni pozitif olan bir karmaşık elektriksel geçirgenlik gösteriyorsa, bu, malzemenin kapasitif bir davranış sergilediğini gösterir. Kapasitif davranış, elektriksel yük biriktiren ve depolayan bir elemanın varlığına işaret eder. Kapasitif davranış, genellikle frekans arttıkça etkisini daha fazla gösterir.

Sanal bileşen, malzemenin indüktif davranışını temsil eder. Bir malzeme, gerçek bileşeni negatif olan bir karmaşık elektriksel geçirgenlik gösteriyorsa, bu, malzemenin indüktif bir davranış sergilediğini gösterir. İndüktif davranış, bir

elektrik akımına tepki olarak manyetik alanı üreten bir elemanın varlığına işaret eder. İndüktif davranış genellikle frekans düştükçe daha fazla etkisini gösterir.

Denklem 2.18'e göre kapasitif davranıştan indüktif davranışa geçerken karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmının işareti pozitifken negatif olmaktadır. Son zamanlarda birçok çalışmada, karmaşık elektriksel geçirgenliğin pozitif gerçek bileşeninin kapasitif davranış ile, negatif gerçek bileşeninin ise indüktif davranış ile karakterize edildiği bildirilmiştir [52-55].

Bunlara ek olarak, ε' ve ε'' ifadeleri arasında Denklem (2.19)'daki gibi bir bağıntı vardır:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'daki $\tan\delta$ ifadesi, dielektrik malzemede meydana gelen enerji kaybının depolayabileceği enerji miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır. $\tan\delta$ dielektrik kayıp faktörü, dielektrik relaksasyon, elektriksel iletkenlik ve dielektrik rezonans parametrelerini de içermektedir. Rezonans, bir malzeme üzerine uygulanan elektrik alan frekansının, malzeme içerisindeki yük taşıyıcıların atlama (hopping) frekansı ile çakışmasıdır. Dielektrik relaksasyon süresi, dışarıdan uygulanan elektrik alanının kaldırılması sonucu elektrik dipollerinin orijinal yönelimlerine dönmeleri için geçen süreyi ifade etmektedir [43]. Relaksasyon süresi τ ile gösterilmektedir. Relaksasyon frekansı (f_{max}) ile relaksasyon süresi arasında,

$$2\pi f_{max}\tau = 1 \quad (2.20)$$

şeklinde bir bağıntı vardır. Ek olarak, yük taşıyıcıların atlama olasılığı (P) ile relaksasyon süresi arasında Denklem (2.21)'deki gibi bir ilişki söz konusudur [56]:

$$P \propto \frac{1}{2\tau} \quad (2.21)$$

Malzemelerin kompleks iletkenliği (σ^*),

$$\sigma^* = \sigma' + j\sigma'' \quad (2.22)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada σ' ve σ'' ifadeleri kompleks iletkenliğin gerçek ve sanal bileşenleridir. Kompleks iletkenliğin gerçek kısmı Denklem (2.23) ile gösterilebilir.

$$\sigma' = \varepsilon_0 \omega \varepsilon'' \quad (2.23)$$

Kompleks iletkenliğin gerçek kısmı doğru akım ve alternatif akımın toplamı şeklinde yazılabilir. Bu durumda, Denklem (2.24)'teki ifade elde edilir.

$$\sigma' = \sigma_{dc} + \sigma_{ac} = \sigma_{dc} + A\omega^s \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'te ifade edilen σ_{dc} , doğru akım (DC) iletkenliği ifade etmektedir. σ_{ac} ise alternatif akımı (AC) ifade etmekle birlikte Jonscher'in Evrensel Güç Yasası ile açıklanabilmektedir.

$$\sigma_{ac} = A\omega^s \quad (2.25)$$

Jonscher'in Evrensel Güç Yasası'na göre, (2.25) denklemindeki A bir sabit, s ise sıcaklığa bağlı ve 0 ile 1 arasında değeri olan frekansın üssüdür [57] s'nin sıcaklık bağımlılığına bağlı olarak, dielektrik malzemelerdeki baskın ac iletkenlik mekanizmasını önermek mümkündür [1].

İki plaka arasında herhangi bir malzeme olmadan depolanan yük miktarı (2.26) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$Q_0 = A\varepsilon_0 E \quad (2.26)$$

Dielektrik sabiti ε olan bir malzeme plakalar arasına yerleştirildiğinde, depolanan yük miktarı ise,

$$Q = A\varepsilon_0 \varepsilon E \quad (2.27)$$

denklemi ile tanımlanmaktadır. Dielektrik sabiti boşluk için bir değerini alırken, herhangi bir malzemenin ε değeri birden büyük bir değere sahiptir. Dolayısıyla, Denklem (2.27)'ye göre iki plaka arasında herhangi bir malzeme varken depolanan yük miktarında bir artış meydana gelir. Depolanan yük miktarındaki artış ise Denklem (2.28)'deki gibidir:

$$Q = Q_1 - Q_0 = AE\varepsilon_0(\varepsilon - 1) \quad (2.28)$$

Bu durumda sistem ise oluşan fazla yükler sebebiyle Denklem (2.29) ile verilen bir dipol moment oluşturacaktır.

$$\mu = AE\varepsilon_0(\varepsilon - 1)d \quad (2.29)$$

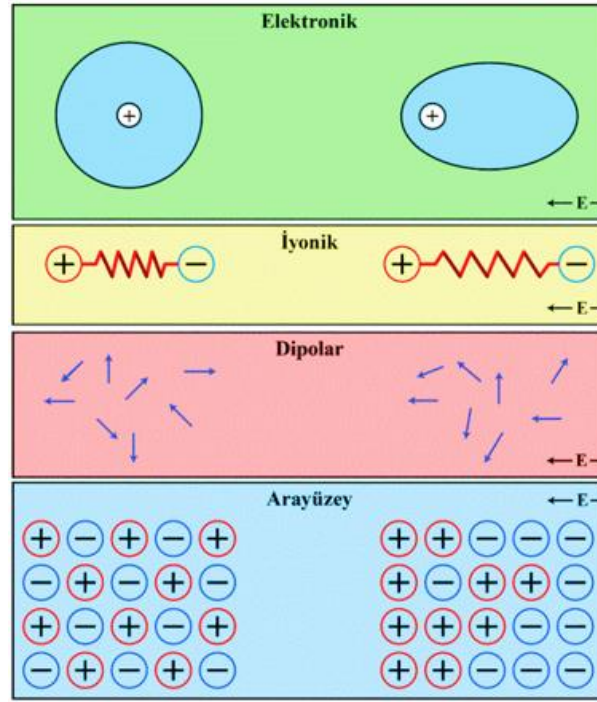
İki iletken plaka arasına yerleştirilen dielektrik malzemenin hacmi $V = Ad$ olmak üzere, birim başına oluşan dipol moment Denklem (2.30) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{\mu}{Ad} = E\epsilon_0(\epsilon - 1) = \kappa\epsilon_0 E \quad (2.30)$$

P ifadesi polarizasyon (kutuplanma) olarak adlandırılmaktadır ve birimi ise C/m^2 'dir. κ sabiti bir ortamın alınganlığını veya süseptibilitesini ifade etmektedir.

2.5.3 Polarizasyon (Kutuplanma) Mekanizmaları

Serbest yüklerin hareketinden dolayı oluşan elektrik polarizasyon dört ana grupta incelenmektedir.

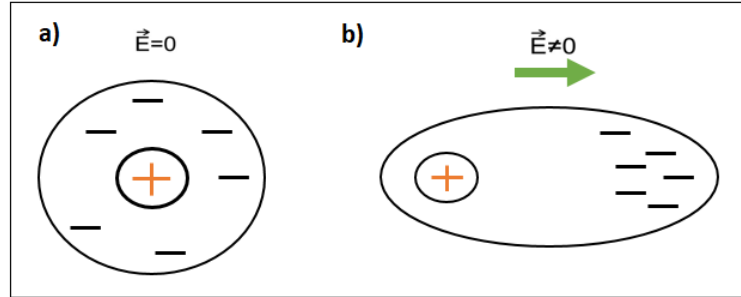


Şekil 2. 6 Bir malzeme içerisinde gerçekleşen farklı polarizasyon mekanizmaları [58].

İşleyiş mekanizmaları Şekil 2.6'da da gösterildiği gibi bu polarizasyonlar elektronik, iyonik, yönelimli ve ara yüzey polarizasyonu olarak sıralanabilir.

2.5.3.1 Elektronik Polarizasyon

Klasik atom modeline göre; bir atom çekirdeği, Şekil 2.7 (a)'dan görüleceği üzere, pozitif yüklü proton ve yüksüz nötronlardan oluşmakta ve etrafında kapalı bir dairesel yörüngede negatif yüke sahip elektronlar hareket etmektedir.



Şekil 2. 7 Bir atomun **a)** elektrik alan yokken **b)** dışarıdan elektrik alan uygulandığında yük dağılımı.

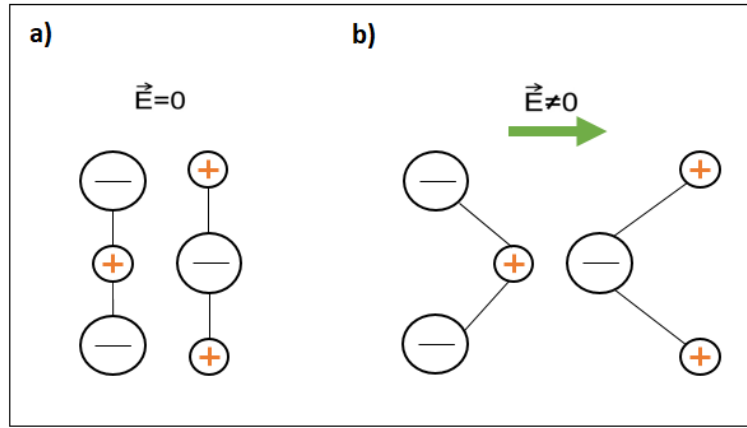
Atoma dış bir elektrik alan uygulandığında protonlar ve elektronlar zıt yönlerde doğru yönelirler. Bunun sonucu olarak, elektron bulutunun merkezinin, çekirdeğe göre konumunda değişiklik meydana gelir. Herhangi bir atom içinde negatif yükten pozitif yüke doğru bir dipol moment oluşur ve buna elektronik polarizasyon denir. Bu tür polarizasyon mor ötesi frekans aralığında ($\approx 10^{15}$ Hz) gözlenir. Elektronik polarizasyon meydana gelen malzemelerde optik kırılma indisi ile dielektrik sabiti arasında,

$$n^2 = \varepsilon \quad (2.31)$$

ile ifade edilen Maxwell bağıntısı bulunmaktadır [59].

2.5.3.2 Atomik ve İyonik Polarizasyon

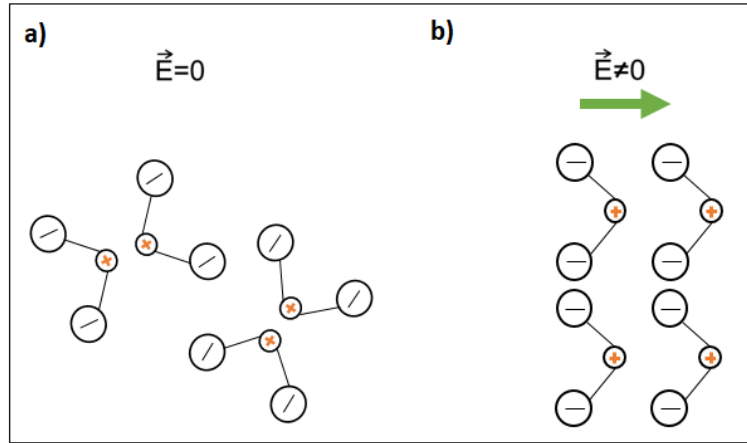
İyonik polarizasyon, çoğu seramik malzemede yaygın olarak görülen bir polarizasyon çeşididir [58]. İyonik polarizasyon, malzemeye dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında pozitif ve negatif yüklü iyonların birbirlerine göre yer değiştirmesi sonucu ortaya çıkar (Şekil 2.8). Bu tür polarizasyon kızıl ötesi frekans bölgesinde ($\approx 10^{12} - 10^{13}$ Hz) gerçekleşir [43, 60].



Şekil 2. 8 Bir atomun **a)** elektik alan yokken **b)** dışarıdan elektrik alan uygulandığında yük dağılımı.

2.5.3.3 Dipolar (Yönelimli) Polarizasyon

Bu tür polarizasyon çeşidi seramik malzemelerde nadiren görülür çünkü dipoller, kristal yapıları bozulmadan yeniden yönlendirilemezler [58, 61].



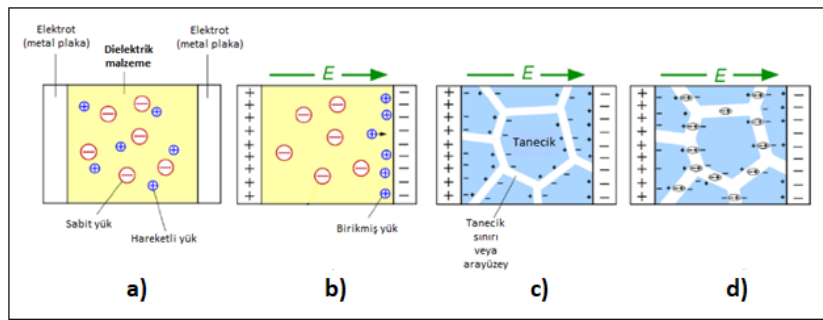
Şekil 2. 9 Bir atomun **a)** elektik alan yokken **b)** dışarıdan elektrik alan uygulandığında yük dağılımı.

Bu tür polarizasyon, herhangi bir elektrik alan uygulanmadan dipol momente sahip moleküllerde görülmektedir. Dipolar veya yönelimli polarizasyon ismini, dipollerin elektrik alan ile aynı yöne yönelmesinden dolayı almıştır. Şekil 2.9’da gösterildiği gibi dış elektrik alan ile dipoller yönelir ve elektrik alan kaldırıldığında ise ilk konumlarına dönerler. Bunun sonucunda dipol moment sıfır olur [62].

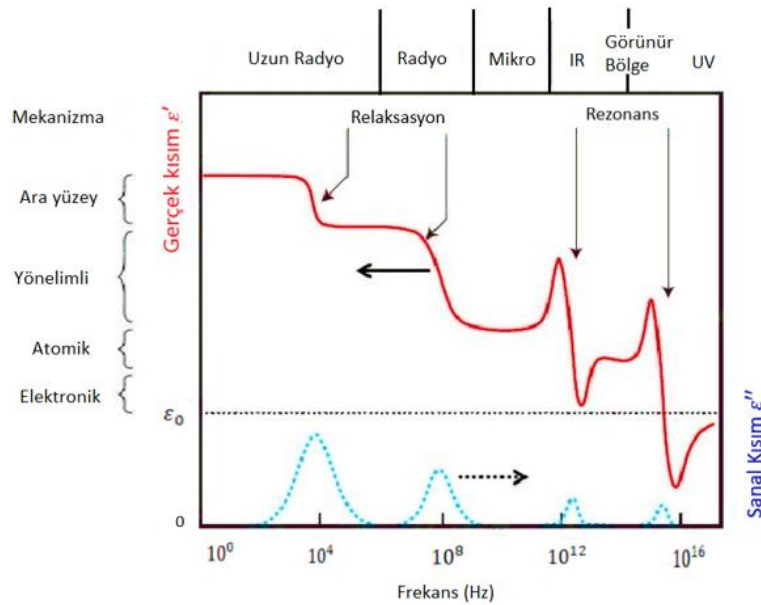
2.5.3.4 Arayüzey (Uzay-Yük) Polarizasyonu

Ara yüzey polarizasyonu, uzay yükü polarizasyonu olarak da bilinmektedir. Akım geçirilen bir malzemedeki yüklerin, malzeme içerisinde hareketleri sonucu yerel olarak birikmesinin bir sonucu olarak meydana gelir. Bu sebeple, ara yüzey polarizasyonu diğer üç polarizasyondan farklıdır. Yüklerin malzeme içerisinde hareket ettiği iki ortam birbirinden farklı iletkenliğe sahip ise, yükler yüzey sınırlarında birikir. Bunun sonucunda ortamlar arasında bir ara yüzey bölgesi oluşur ve bu olaya ara yüzey veya uzay yükü polarizasyonu denir [59].

Arayüzey polarizasyonunun elektrik alan altında nasıl davrandığı ilişkin görsel Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2. 10 Arayüzey polarizasyon mekanizmasının şematik gösterimi gösterimi [63].



Şekil 2. 11 Polarizasyon mekanizmaları ve frekans ile değişimleri [64].

Şekil 2.11’de ise bahsedilen polarizasyon mekanizmaları, ϵ' ve ϵ'' parametreleri ve frekans arasındaki değişimler gösterilmiştir.

2.6 Makine Öğrenmesi

Makine Öğrenmesi, literatür özetinde de belirtildiği gibi bilgisayar bilimlerinin sonuçları otomatik olarak tahmin ettiği bir metodolojidir. Seramik malzemelerin dielektrik özelliklerinin deneysel olarak saptanmasının yanı sıra yapay zekâ uygulaması ile tahmini doğrultusunda ölçülebilir ve net sonuçlar elde edilmektedir. Burada yola çıkarak, makine öğrenmesi uygulaması hem zamandan hem de maliyet bakımından bir avantaj sağlanmaktadır. Tez çalışması kapsamında üretilen seramik malzemelerin de dielektrik özelliklerinin makine öğrenmesi yardımıyla yüksek bir doğrulukla tespiti amaçlanmıştır.

Makine öğrenmesi kapsamında girdi olarak sunulan veri setinin çözülmesi için bazı adımlar bulunmaktadır. Bunlar:

- Girdi verisinin tanımlanma süreci
- Girdi verisinin analiz edilmesi
- Verilerin hazırlanma süreci
- Modelin oluşturulma süreci
- Modelin değerlendirilme süreci
- Modelin test edilme süreci

şeklinde. İlk adım olan girdi verisinin açık bir şekilde tanımlanması, makine öğrenmesinin doğru yorumlama yaparak bir tahmin vermesi için çok önemlidir. İkinci adımda ise girdi setine en uygun verilerin analiz edilmesi sürecidir. Bu süreç iki şekilde gerçekleşebilir. Bunlardan ilki, mevcut olan veri tabanlarından girdilere en uygun verilerin seçilmesi, ikincisi ise araştırmacının gerçekleştirdiği ölçümler, anketler vb. çalışmalar doğrultusunda elde ettiği verilerdir. Bir sonraki adımda ise, ilgili verilerin makine öğrenmesi algoritmalarının kullanabilmesi için uygun hale getirilmesidir. Uygun hale getirilme sürecinde veriler birtakım işlemlerden geçirilmelidir. Bunlar, veri temizleme, veri bütünleştirme ve veri indirgeme süreçleridir. Modelin kurulması aşamasında, en uygun yöntem deneme-yanılma yoluyla karar verilerek uygulanacak algoritma belirlenmektedir. Bu aşamada birçok modelin deneniş olması modelin doğruluğunu arttıracaktır. Çok fazla

model ve algoritma tekniği uygulanırsa, veri setinden verim alma yüzdesi artmış olacaktır. Modelin değerlendirilmesi aşamasında uygulanan model ve algoritma tekniklerinin karşılaştırılması gerçekleştirilir. Son aşama olan modelin test edilmesinde ise, girdi seti için en iyi doğrulukta tahmin veren model, artık ilgili girdi setinin ana modeli olmaktadır. Daha sonraki süreçlerde benzer veri setleri ile bu modelin kullanılabileceği sonucuna varılır [65].

2.6.1 Makine ğrenmesi Algoritmaları

Makine ğrenmesi algoritmaları, girdi ve çıktı setleri arasında en uygun ilişkiyi veren modeli kurmak için kullanılan yaklaşımlardır. Makine ğrenmesi algoritmalarından birkaçı lineer regresyon (LR), karar ağacı regresyonu (DT-R), destek vektör makinesi (SVM) modeli, k-en yakın komşu regresyonu (k-NN), ve Gauss süreç regresyonu (GPR) algoritmalarıdır.

- *Lineer Regresyon Modeli (LR)*: Lineer regresyon modeli bağımsız değişken sayısına bağlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; basit doğrusal regresyon modeli ve çoklu doğrusal regresyon modelleridir. Genel olarak regresyon modeli bir bağımlı ve bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi bulmaya yarayan bir modeldir. LR yönteminde, birden çok bağımsız değişken kullanılması durumunda “oklu doğrusal regresyon” adı verilir. Girdi setinin özelliklerini kullanan bu model, doğrusal bir kombinasyon ile bilinmeyen veri setinin değerini tahmin etmektedir. Bu regresyon modelinin amacı, bağımlı değişkeni en iyi tahmin eden modeli bulmak ve bağımsız değişkenlerden hangisinden daha çok etkilendiğini bulmaktır [66, 67].
- *Karar Ağacı Regresyon Modeli (DT-R)*: Karar ağaçları, sınıflandırma ve tahmin etmede kullanılan bir modeldir. Karar ağaçlarının sınıflandırma ve tahmin etme işleminde kullanılması řu şekilde gerçekleşir: Öncelikle eğitim verisi kullanılarak karar ağacı modeli oluşturulur. Daha sonra bu model, test verisi kullanılarak değerlendirilir. Son olarak ise, ilgili model daha sonraki değerleri tahmin etmek için kullanılır [68].
- *Destek Vektör Makinesi (SVM)*: Bu algoritma modelinde, bir düzlem üzerinde yer alan noktaları ayırmak için eşit uzaklıkta düz bir doğru çizilir. Bu çizilen doğruya +1 ve -1 uzaklığında iki tane sınıflandırıcı çizgi çizilir. Dolayısıyla, hiperdüzlem oluşturulmuş olur. -1 ve +1 doğruları arasında

kalan bu alana marjin adı verilmektedir. Marjin alanı ne kadar büyük olursa sınıflandırıcının daha sonraki verilerde başarılı olmak ihtimali artacaktır [69].

- *k-en yakın komşu regresyonu (k-NN)*: k-NN regresyonu adını İngilizce “k-nearest neighbor”’dan alır. Bu regresyon modelinin tercih edilmesinin sebebi kolay ve basit olmasıdır. k-NN’deki k, var olan veri kütüphanesi ile girdi setinin birbiri arasındaki yakınlık ölçüsünü ifade etmektedir. Dolayısıyla, bu algoritma modeli, yeni oluşan bir veri setini k en yakın komşusunun yer aldığı kategoriye atar. Tahminin iyi olması için, girdi setinin kalabalık ve k değerinin büyük olması gerekmektedir [70].
- *Gauss süreç regresyonu (GPR)*: İngilizcesi Gauss Process Regression (GPR) olan bu model, doğrusal olmayan birden çok değişkeni bulunan regresyon ve problemlerin çözümü için kullanılır. Bu yöntem, sonuçlar üzerinde belirsizlik yapabilir ve parametrik olmayan daha küçük veri setlerinde bile doğru tahminler yapabilir, bu durum en büyük avantajlarından biridir [71, 72].

Bu bölümde $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramik malzemelerinin sentezi ve üretilen seramiklerin bazı yapısal karakterizasyonları (XRD ve SEM) verilecektir. Ayrıca üretilen seramiklerin enerji depolama özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan deneysel ölçüm sistemi ve makine öğrenmesi algoritmaları hakkında bilgi sunulacaktır.

3.1 Malzemeler

Çalışması kapsamında üretilen $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerini oluşturan malzemelerin oksit bileşiklerinin (Y_2O_3 (ürün kodu: 205168), Eu_2O_3 (ürün kodu: 323543), BaO (ürün kodu: 554847) ve CuO (ürün kodu: 203130)) tamamı %99,99 saflıktadır ve Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir.

3.1.1 Materyal Karakterizasyonu İçin Kullanılan Cihazlar ve Özellikleri

- **X-Işını Kırınımı (XRD Analizi):** Hazırlanan bütün numunelerin XRD analizi XPERT HighScore Plus cihazından elde edilen XRD deseni ile belirlenmiştir.
- **Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM):** Elde edilen örneklerin yüzey morfolojisi ve mikro metre mertebesindeki ortalama tanecik boyutlarının tayini Apreo 2S model SEM ile gerçekleştirilmiştir.

3.1.2 Seramik Malzemelerin Sentezi ve Karakterizasyonu

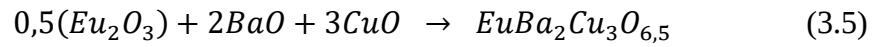
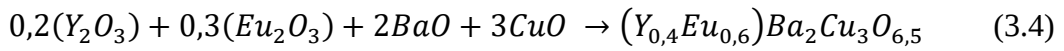
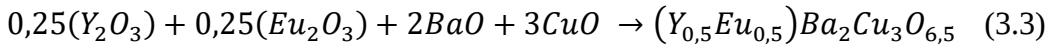
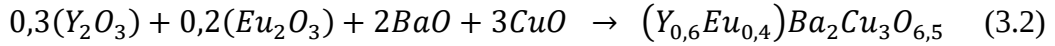
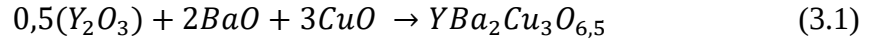
Bu bölümde $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramik malzemelerinin sentezi ile XRD deseni ve SEM analizlerine yer verilmiştir. Seramik malzemeler kullanılması planlanan uygulamaya göre farklı yöntemlerle hazırlanabilmektedir. Bunlar, katıhal tepkime yöntemi, çözelti-jel yöntemi, cam seramik yöntemi, ince ve kalın film üretme yöntemleridir [73]. Bu tez çalışması kapsamında üretilen seramik malzemeler katıhal tepkime yöntemi ile hazırlanmıştır. Kısaca katıhal tepkime yöntemi, başlangıç tozlarının uygun oranlarda tartılması, homojen bir şekilde öğütülmesi, uygun bir kalıp ile soğuk pres uygulanması ve belirli bir sıcaklık ve

sürede ısıtma işlemi uygulaması süreçlerini içermektedir [74]. Üretilen seramiklerin sentezi Şekil 3.1’de detaylandırılmış aşamaları takip ederek hazırlanmıştır.



Şekil 3. 1 Numune hazırlama adımları.

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, öncelikle başlangıç karışımını hazırlamak için bileşiklerin miktarları mol oranlarına göre aşağıdaki reaksiyon denklemleri ile hesaplanmıştır.



Başlangıç aşamasındaki bileşiklerin saflık dereceleri ve molekül ağırlıkları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1 Başlangıç aşamasındaki bileşikler saflik dereceleri ve moleköl ağırlıkları.

Bileşik	Saflik Derecesi (%)	Molekül Ağırlığı (g/mol)
Y_2O_3	%99.99	225,81
Eu_2O_3	%99.99	351,926
BaO	%99.99	153,33
CuO	%99.99	79,545

(3.1), (3.2), (3.3), (3.4) ve (3.5) reaksiyon denklemlerine göre 2 g toz halindeki seramiğı elde etmek için gerekli başlangıç oksitlerinin miktarları Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Örnek hazırlamada kullanılan oksitlerin miktarları.

Seramik \ Oksit	Y_2O_3 (g)	Eu_2O_3 (g)	BaO (g)	CuO (g)
$YBa_2Cu_3O_{6,5}$	0,3430	0	0,9318	0,7251
$(Y_{0,6}Eu_{0,4})Ba_2Cu_3O_{6,5}$	0,1982	0,2059	0,8974	0,6983
$(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$	0,1636	0,2551	0,8892	0,6919
$(Y_{0,4}Eu_{0,6})Ba_2Cu_3O_{6,5}$	0,1297	0,3033	0,8811	0,6856
$EuBa_2Cu_3O_{6,5}$	0	0,4879	0,8503	0,6617

Başlangıç oksitleri uygun stokiyometrik oranlarda (Tablo 3.2) 0,001 hassasiyetindeki dijital bir terazide tartılmıştır. Daha sonra tartılan tozlar agat havana alınarak homojen hale gelene kadar yaklaşık bir saat boyunca karıştırılarak ezilmiştir. Elde edilen toz karışımı soğuk baskı makinesinin yardımıyla yaklaşık olarak 10^9 Pa basınç altında disk şeklinde bir tablet haline getirilmiştir. Tablet haline getirilen numune, alumina (Al_2O_3) seramik bota konularak yüksek sıcaklık kül fırınında, oda sıcaklığından $1^\circ C/dak.$ hızla $850^\circ C$ ’ye kadar ısıtılmış ve numune bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir.

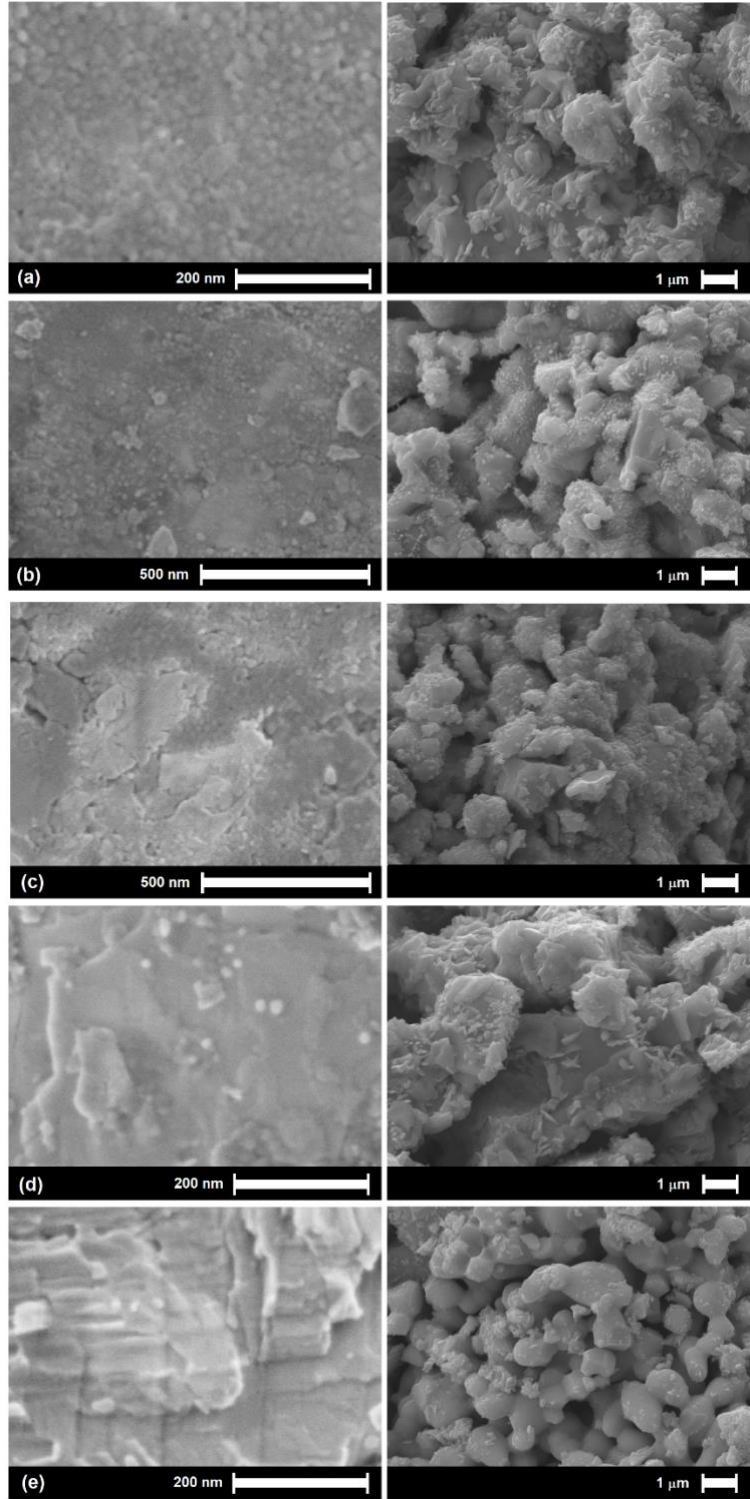
Fırınlama aşamasından sonra tablet şeklindeki örnek tekrar agat havanda ince bir toz haline gelene kadar öğütölmüştür. Toz haline gelen numune tekrar baskı makinesinin yardımıyla 10^9 Pa basınç altında preslenerek disk şekline getirilmiş ve

yeniden fırında oda sıcaklığından 1 °C /dak. hızla 850 °C 'ye kadar ısıtılarak bu sıcaklıkta 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda oda sıcaklığına kadar fırında soğumaya bırakılan numune fırından çıkartılmıştır. Bu aşamada numunenin siyah/gri renkte olduğu görülmüştür. Üretilen tüm numuneler için benzer süreç tekrarlanmıştır.

XRD ve numunelerin toz halindeki SEM görüntülerinin analizi için siyah/gri renkte olan numuneler agat havanda öğütülerek toz haline getirilmiştir. Daha sonra dielektrik ölçümler ve yüzeyden çekilecek SEM görüntüleri için numuneler tekrardan tablet (pelet) formunda preslenmiştir.

3.1.3 Seramiklerin Mikroyapısal Özellikleri

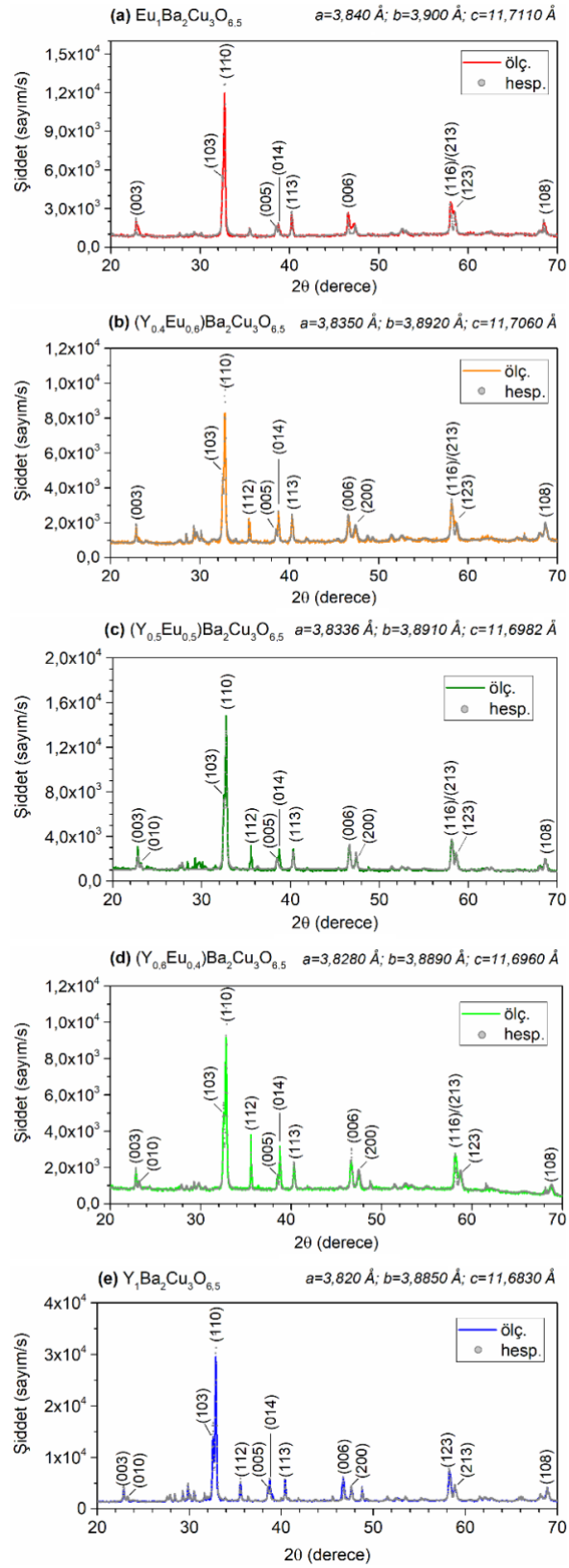
Üretilen seramik örneklerin pelet ve toz haldeki mikroyapısal özellikleri Apreo 2S model SEM ile belirlenmiştir. Seramiklerin morfolojik özellikleri hem toz hem de pelet formundaki seramiklerden alınan SEM görüntüleri ile değerlendirilmiş ve SEM görüntüleri Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3. 2 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, **b)** $(\text{Y}_{0.4}\text{Eu}_{0.6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, **c)** $(\text{Y}_{0.5}\text{Eu}_{0.5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, **d)** $(\text{Y}_{0.6}\text{Eu}_{0.4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ ve **e)** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ seramiklerinin pellet (sol taraf) ve toz (sağ taraf) formlarının SEM görüntüleri.

Toz halindeki seramiklerin SEM görüntülerinden de görüleceği üzere, 1 mol Eu içeren seramikte gözlenen kaya benzeri katmanlı yapı morfolojisinin, artan stokiometrik oranda Eu'nun Y ile yer değiştirmesiyle, boyutları 1 ile 3 μm arasında değişen yontulmuş parçacık yapısına dönüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, seramikteki Y içeriği arttıkça taneler ve tane sınırları daha belirgin hale gelmektedir. Öte yandan, pelet halindeki seramikten alınan SEM görüntüleri incelendiğinde, seramikler için gözenekli bir yapı olmadığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca, pelet halindeki numunelerin yüzeylerinden alınan SEM mikrografları değerlendirildiğinde, $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiğinin yüzey morfolojisi çoğunlukla küresel taneli iken, Eu yerine Y ikamesi yüzeyi daha kaya benzeri bir görünüme dönüştürmektedir.

Seramik örneklerin kristalografik özellikleri Rigaku Smartlab X-ışını Difraktometresi ile 1,5444 Å dalga boyunda $\text{Cu-}K_\beta$ x-ışınları kullanılarak belirlenmiştir. Kristal yapıyı analiz etmek için XRD desenleri X'Pert HighScore Plus yazılımı ile incelenmiştir. Şekil 3.3'te seramiklerin gözlenen deneysel XRD desenleri, $2\theta = 20^\circ - 70^\circ$ aralığında hesaplanan desenler ile birlikte verilmiştir. $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin XRD desenlerinin uydurulması için sırasıyla 96-154-0792 ve 96-100-0031 referans kodları kullanılmıştır. Diğer seramiklerin XRD desenleri bu iki referans kodu kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, hesaplanan yapısal özellikler mevcut deneysel verilerle uyumludur. Seramiklerin hesaplanan ve gözlenen XRD desenleri ise $2\theta = 20^\circ - 70^\circ$ aralığında Şekil 3.3'te verilmiştir. Uyumlandırmalara göre, tüm seramikler Pmmm uzay grubu ve 47 uzay grubu sayısı ile ortorombik bir örgü içerisinde kristalleşmektedir. Ayrıca ilgili seramiklerin örgü parametreleri Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3. 3 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, b) $(\text{Y}_{0.4}\text{Eu}_{0.6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, c) $(\text{Y}_{0.5}\text{Eu}_{0.5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, d) $(\text{Y}_{0.6}\text{Eu}_{0.4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ ve e) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ seramiklerinin gözlenen ve hesaplanan XRD desenleri.

Şekil 3.3 (a) ve (d)'de verilen $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin örgü parametreleri literatür ile uyum içerisinde. [75, 76]. 1 mol Y yerine 1 mol (Y/Eu) karışımı kullanılarak sentezlenen $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramikleri de YBaCuO seramiği gibi ortorombik yapıda kristalleşmiştir. Bununla birlikte, diğer seramik örnekler Eu eklemesi nedeniyle YBaCuO seramiğinin orijinal Bragg zirvelerinin gözlemlendiği 2θ açılarından biraz farklı değerlerde Bragg kırınım zirveleri sergilemektedir. Bu hafif kayma, örgü içerisinde ilave kaynaklı mikro gerilme oluşumu ile ilişkilendirilebilir. Sistemde Y yerine Eu elementinin kademeli olarak eklenmesinin, daha büyük iyonik çaplı Eu elementinin örgü yapısına dâhil olması nedeniyle örgüde bir mikro gerilme yarattığı düşünülmektedir. Ayrıca, artan Eu katkısı nedeniyle Bragg zirvelerinde daha küçük açılara doğru ($0,1^\circ - 0,2^\circ$ arasında değişen) küçük sapmalar gözlenmiştir. Bu durum, Bragg yasasına uygun olarak düzlemler arası mesafenin artması nedeniyle örgünün genişlemesine neden olmuştur. Sonuç olarak, Y'nin Eu ile kısmi olarak yer değiştirmesi tüm örgü parametrelerinde doğrusal olmayan bir artışa yol açmıştır. Özellikle $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin örgü parametreleri karşılaştırıldığında, $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ malzemesinin a , b ve c örgü parametrelerinin $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ malzemesinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise seramik yapıda Y^{+3} iyonlarının, daha büyük iyon yarıçapına sahip Eu^{+3} iyonları ile yer değiştirmesidir. Ayrıca, ilgili örgü parametrelerinin ortorombikliği $(b-a)/(b+a)$ formülü [77] kullanılarak hesaplandığında, en yüksek ortorombiklik faktörü $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği için gözlenmiştir. Seramiklerdeki Eu oranının azalmasıyla ortorombiklik artmakla birlikte (110) ve (103) piklerindeki ayırım yani (103) piki daha belirgin hale gelmektedir.

3.1.4 Üretilen Seramiklerin Dielektrik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Düzeneği ve Yöntem

Üretilen 5 seramiğin soğuk pres yardımıyla tablet haline getirilmesi süreci Bölüm 3.1.2'de verilmiştir. Hazırlanan numunelerin frekansa ve sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleri NOVO Kontrol Geniş Bandlı Dielektrik/Empedans Analizörü ile gerçekleştirilmiştir. Örneklerin dielektrik özellikleri, 1 Hz ile 20 MHz frekans aralığında, 296 K, 323 K, 373 K, 423 K ve 523 K sıcaklıklarında kayıp tanjantı ile birlikte kompleks geçirgenlik fonksiyonunun gerçek ve sanal bileşenleri incelenmiştir. Sentez boyunca 10 mm çapında ve numune kalınlıkları 1,53 mm ile

3,18 mm arasında değişen tablet formunda hazırlanan numuneler 10 mm çapında iki platin elektrot arasına yerleştirilmiştir. Deney düzeneğine ait görsel şekil 3.4'te verilmiştir.



şekil 3. 4 Frekansa ve sıcaklığa bağlı empedans analizör deney düzeneği.

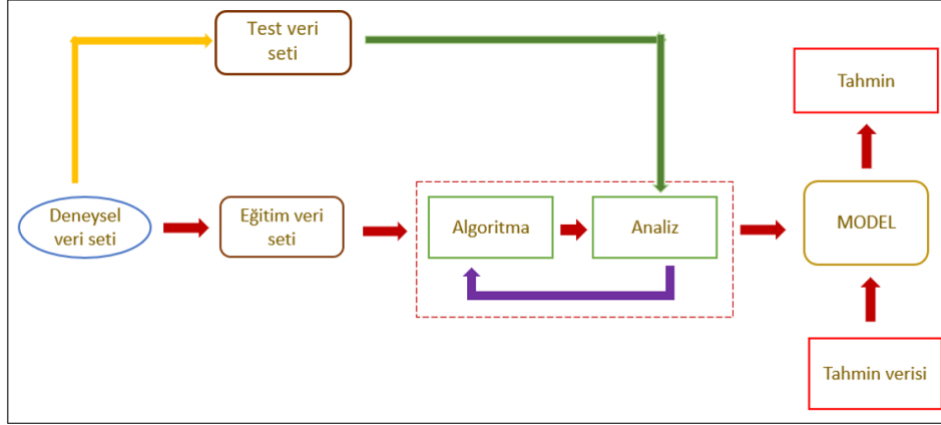
Ölçümler her bir numune için yaklaşık 3 saat kadar sürmektedir ve çıktılar hem frekansa hem de sıcaklığa bağlı olarak ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$, Z' , Z'' ve σ_{ac} gibi çeşitli elektriksel parametreler belirlenmektedir.

3.2 Makine ğrenmesi

Son yıllarda yeni seramik malzemelerin üretimi ve dielektrik özelliklerinin belirlenmesi enerji depolama uygulamaları için önemli bir hale gelmiştir. Bu bağlamda, yapay zekâ uzmanları ve malzeme bilimcilerinin yaptığı işbirliği ile hem zaman hem de maliyet konusunda büyük avantaj sağlanabilir.

Genel olarak, makine öğrenmesi bilgisayarların sonuçları otomatik olarak tahmin ettiği bir yapay zekâ uygulamasıdır. Makine ğrenmesi iş akışı dört aşamadan oluşur ve bu akışlar belirli bir makine öğrenmesi uygulaması anında başlatılan adımlardır. Makine öğrenmesine ait iş akış diyagramı şekil 3.5'te verilmiştir. şekil 3.5'e bakıldığında bu aşamaların verilerin toplanması ve hazırlanması, modelin eğitilmesi, modelin doğrulanması ve sonuçların değerlendirilmesi olduğu

görülmektedir. İlk önce veriler toplanır daha sonra bu veriler düzenlenerek veri bütünlüğü sağlanır. Ardından veri seti eğitim ve test olmak üzere ikiye ayrılır. Eğitim kümesinde veriler modelin doğrulanması için, test kümesindeki veriler ise kullanılan modelin performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. En son, alınan geri bildirimlere göre doğruluğu arttırmak, çıktı ayarlarını yapmak veya modeli gerektiği gibi dağıtmak için modelin değerlendirilmesi yapılmaktadır.



Şekil 3. 5 Makine öğrenmesi iş akışı diyagramı.

Buradan yola çıkılarak bu çalışmada, $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ seramiğinin deneysel olarak ölçülmemiş sıcaklıklardaki ε' ve ε'' dielektrik parametrelerinin makine öğrenmesi yardımıyla tahminine çalışılmıştır. Girdi veri setini $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ seramiğinin bazı sıcaklık değerlerinde ölçümü yapılmış olan ε' ve ε'' parametreleri oluşturmaktadır. Deneysel ölçümler 296-523 K ve 1 Hz-20 MHz aralığında gerçekleştirilmiştir. Makine öğreniminde kullanılan deneysel verilerin ε' ve ε'' parametrelerinin frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimi sırasıyla Şekil 4.10 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.

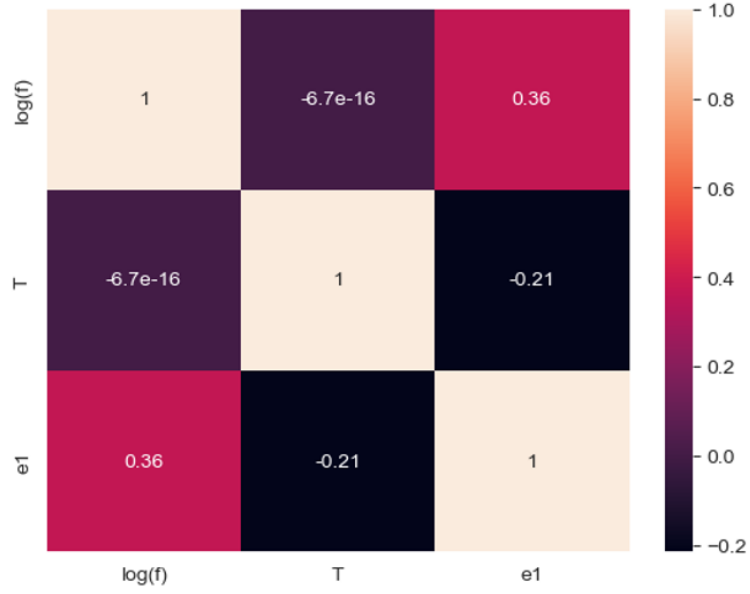
ε' ve ε'' parametrelerinin tahminleri için Denetimli Makine Öğrenmesi Regresyon Algoritmaları kullanılmıştır. Model seçiminde ise, Ordinary Least Squares (OLS), SupportVector Regression (SVR), Nearest Neighbors Regression (kNN), Gaussian Process Regression (GPR), Decision Tree Regression (DTR) ve Stochastic Gradient Descent (SDG) modelleri denenmiştir. Makine öğrenmesi algoritmalarının python programlama dilinde implementasyonu için “Sci-Kit Learn” kütüphanesi kullanılmıştır. Girdi veri seti ve çıktı veri setinin uygulanması için “Pandas” kütüphanesi kullanılmıştır. Veri kümesi, frekans ve sıcaklık olacak şekilde iki bağımsız girdi değişkeninden (öz değişkenler) ve ε' veya ε'' olacak

şekilde bağımlı değişkenden (veya hedef değişken) oluşmaktadır. Kullanılan ilgili girdi veri seti 396 örneklemden oluşmaktadır. Girdi veri setine olasılık dağılım fonksiyonunu bozmayacak şekilde logaritma ve hedef değişkenlere de minimum-maksimum ölçeklendirme işlemleri uygulanmıştır. Tablo 3.3'te değişkenlerin istatistiksel temel özellikleri verilmiştir.

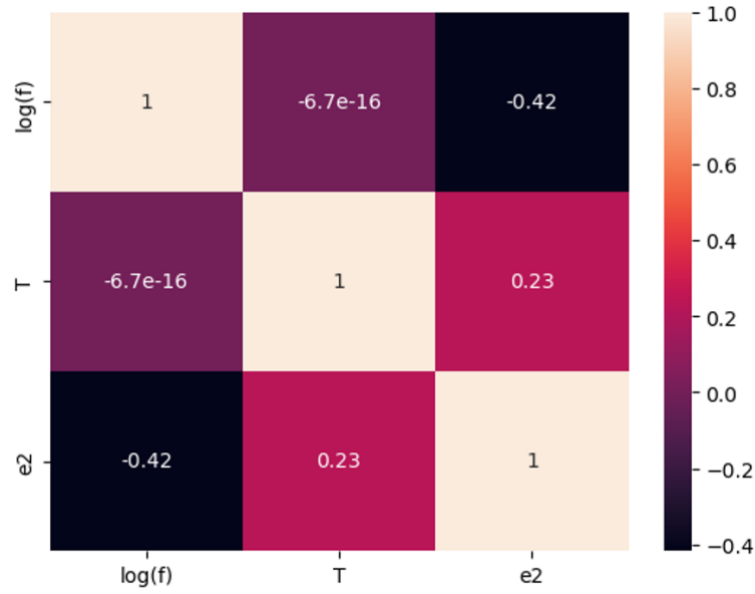
Tablo 3. 3 Veri kümesinin istatistiksel temel özellikleri.

Parametre	$\log(f)$ (Hz)	T (K)	ε'	ε''
Aralık	396	396	396	396
Ortalama değer	3,599466	401,833333	0,974659	0,029100
Standart sapma	2,170721	80,143779	0,102299	0,105830
En düşük değer	0	296	0,000000	0,000000
En yüksek değer	7,301030	523	1,00000	1,000000

Veri seti, makine öğrenmesi eğitim ve test aşamaları sırasında kullanılmak üzere ikiye ayrılmıştır. Veri setinin (396 adet) %20'si test (72 adet), %80'i eğitim (324adet) verisi olmak üzere ikiye bölünmektedir. Girdi veri setinde bulunan bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbiri ile olan ilişkilerini anlamak ve korelasyonu tahmin etmek için Pearson korelasyon analizi yöntemi kullanılmıştır. Bu korelasyon ile değişkenler arasında bir matris oluşturulur ve bu matrisin köşegen elemanları her zaman 1'dir. ε' ve ε'' değerleri için giriş veri kümesindeki tüm özelliklere ait dağılım sırasıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3. 6 ε' için girdi verilerindeki değişkenler arasındaki Pearson korelasyonları.



Şekil 3. 7 ε'' için girdi verilerindeki değişkenler arasındaki Pearson korelasyonları.

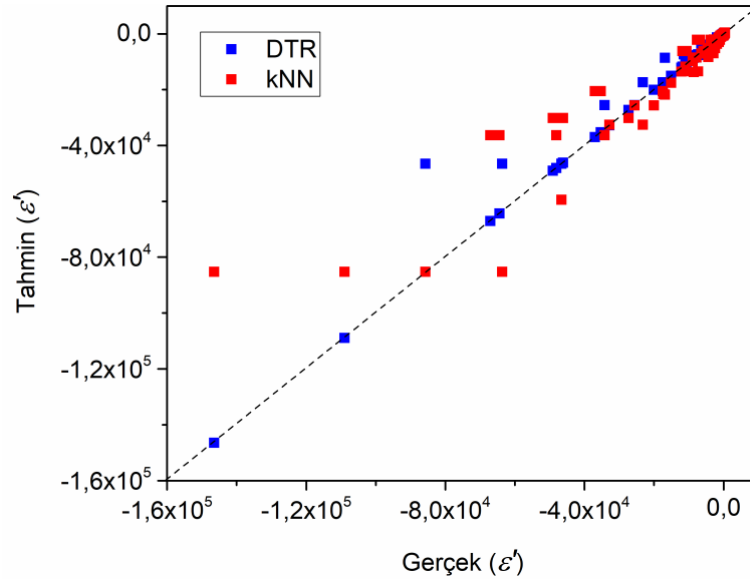
Korelasyon grafiğine bakıldığında, hedef değişken olan ε'' , logaritma frekansı tarafından -0,42 oranında etkilenmektedir ve bu etkileme negatif yöndedir. Dolayısıyla, frekans artarken ε'' azalma eğilimindedir. Yine grafiğe bakıldığında, sıcaklık ile frekansın birbirlerini etkilemediği çok küçük bir oranda etkilediği görülmektedir. Sıcaklık ve frekansın ε'' değerine etkisine bakıldığında, negatif yönde de olsa frekansın sıcaklığa göre daha fazla etkilediği görülmektedir.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da gösterilen grafikler, makine öğrenmesi modellerinin eğitim sonrası performanslarını analiz etmek için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan modellerin geçerliliğinin testi için k-kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. k=10 alınarak, on kere %20’lik data rastgele seçilir ve R^2 değeri ölçülür. Kullanılan algoritmalardan en doğru tahmini veren DTR ve kNN algoritmasının k-kat çapraz doğrulama analizi Tablo 3.4’te verilmiştir.

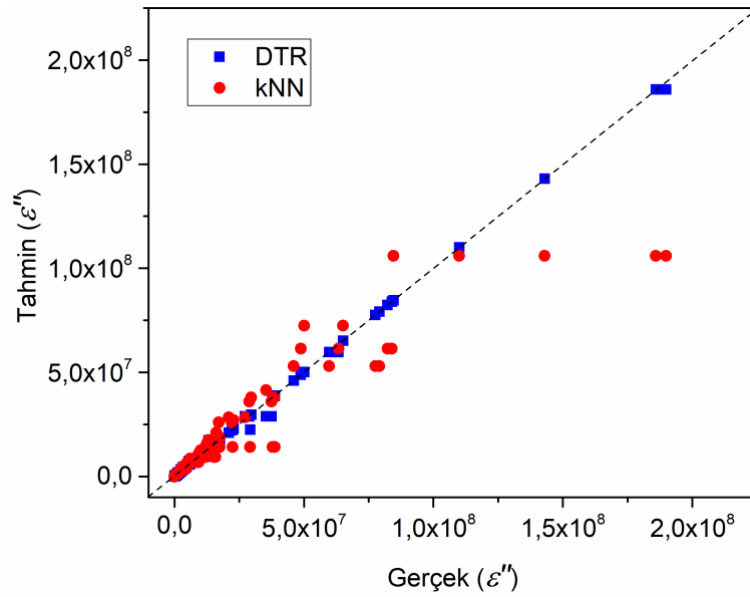
Tablo 3. 4 DTR, kNN modellerinin 10 katlı çapraz doğrulamasına ait belirleme katsayısı değerleri.

k	DTR		kNN	
	ε'	ε''	ε'	ε''
1	0,852882	0,96049	0,926807	0,960492
2	0,907042	0,61349	0,585788	0,613490
3	0,906423	0,72942	0,981696	0,729416
4	0,680354	0,81799	0,577992	0,817988
5	0,936911	0,55648	0,586524	0,556483
6	0,884854	0,89651	0,941338	0,895606
7	0,996860	0,95022	0,635627	0,950225
8	0,843939	0,83474	0,654330	0,834738
9	0,778909	0,84454	0,752353	0,844541
10	0,9616199	0,76601	0,832473	0,766013

DTR ve kNN modellerinin ε' ve ε'' değerlerinin tespit edilmesindeki performansı ise deneysel (gerçek) veriler ile ilgili modellerin tahmin değerlerinin karşılaştırılması ile değerlendirilmiştir. ε' ve ε'' parametrelerinin DTR ve kNN modellerinin performans değerlendirmeleri sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3. 8 Uygulanan DTR ve kNN modellerinin ε' parametresi üzerindeki performans hesaplaması.



Şekil 3. 9 Uygulanan DTR ve kNN modellerinin ε'' parametresi üzerindeki performans hesaplaması.

Kullanılan makine öğrenmesi modellerinin performansını belirlemek için klasik üç performans istatistiği metriği kullanılmıştır. Bunlar; belirleme katsayısı (R^2), Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE) ve Ortalama Kare Hata (Mean Square Error-MSE)'dir. ε' ve ε'' değerleri için model istatistik metrikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3. 5 DTR ve kNN modellerinin belirleme katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE) ve ortalama kare hata (MSE) değerleri.

Model	Model İstatistikleri	Parametreler	
		ϵ'	ϵ''
DTR	R^2	0,938781	0,981914
	MSE	0,001177	0,000391
	MAE	0,007957	0,003710
kNN	R^2	0,936421	0,923439
	MSE	0,000889	0,001191
	MAE	0,005943	0,010709

Tablo 3.5'e bakıldığında, R^2 'nin 1 değerine yakın, MSE ve MAE değerlerinin de çok küçük olması beklenmektedir. Bu noktada en uygun hangi algoritma ise onun ile devam edip edilmeyeceği kararı verilir.

4

BULGULAR

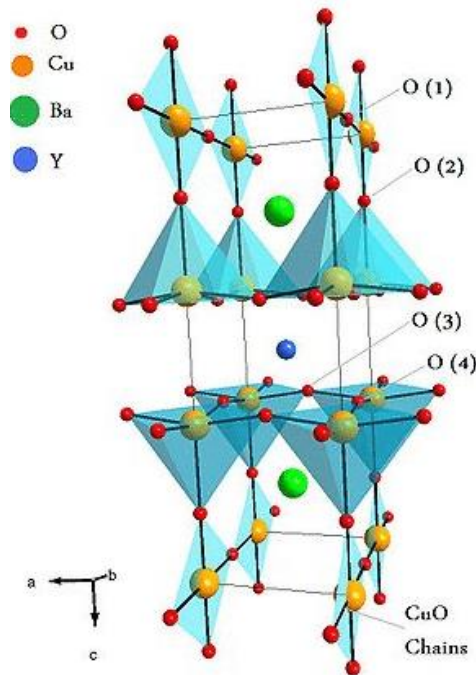
Bu bölümde tablet formunda hazırlanan $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin dielektrik özelliklerine, kayıp tanjant spektrumlarına, AC iletkenlik ve empedans özelliklerine ilişkin deneysel sonuçlar paylaşılacaktır. Ayrıca, $(\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramik numunesi için makine öğrenmesinin ε' ve ε'' parametrelerini farklı sıcaklıklarda tahmin edip edemediği incelenecektir.

4.1 $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ Seramiklerine Ait Bulgular

4.1.1 $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ Seramiklerinin Dielektrik Özellikleri

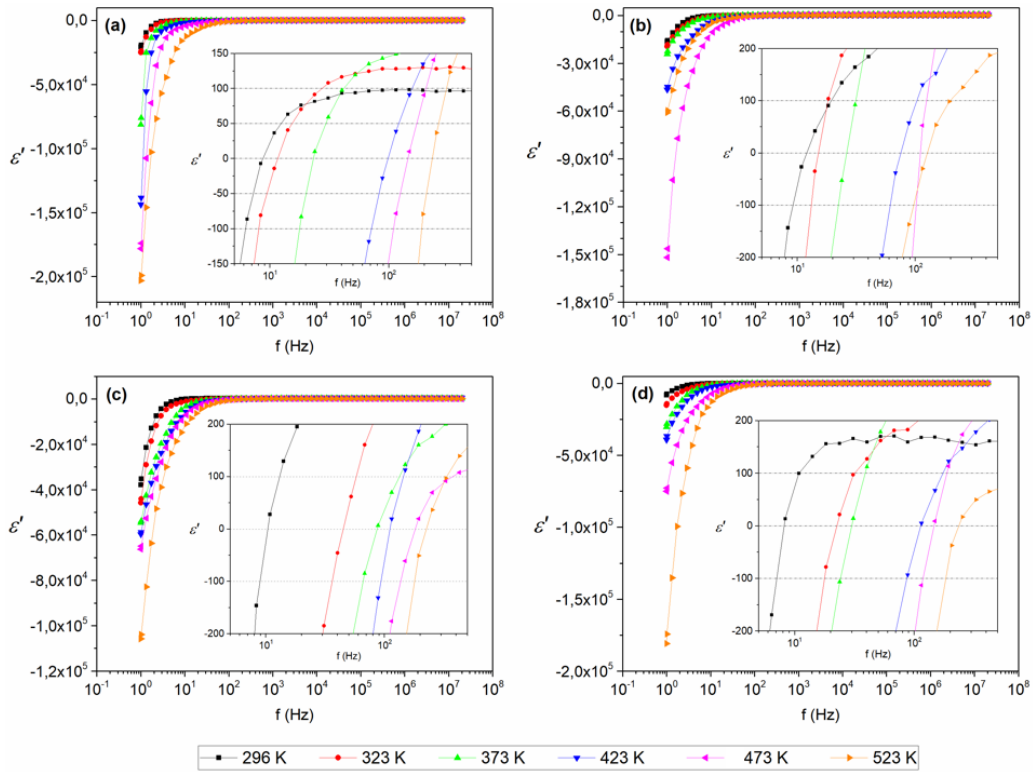
Seramik örnekler için frekansa bağlı olan elektriksel özellikler içerisinde ayrıntılı olarak incelenen ilk parametre ε' (kompleks geçirgenlik fonksiyonunun gerçekte bileşeni) parametresidir ve bu parametre enerji depolama kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. İncelenen seramiklerin ε' parametresinin frekansa bağlı değişimi 1 Hz ile 20 MHz frekans aralığında elde edilmiştir. Seramiklerin kompleks geçirgenlik fonksiyonunun gerçekte bileşeninin (ε') frekansla değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de frekansa bağlı eğriler ε' ’nün mutlak değeri açısından ele alındığında, tüm seramik örnekler 1 Hz ile 200 Hz frekans aralığında güçlü bir frekansa bağımlılık göstermektedir, daha yüksek frekans değerlerinde ise frekanstan bağımsız bir satürasyon (doyum) değeri olan ε' değerine yakınsamıştır. Bu davranış, seramiklerde uzay yükü polarizasyonunun (SCP-space-charge polarization) bir göstergesidir. Prijamboedi ve arkadaşları tarafından bildirildiği üzere, en yüksek dielektrik sabitine yol açan SCP, yüzeylerdeki, tane veya faz sınırlarındaki yüklerin bir sonucu olarak gözlenmektedir. Öte yandan, SCP genellikle tane veya faz sınırlarının doğal olarak bulunduğu polikristal dielektrik malzemelerde gözlenir [78]. Ayrıca, Shivaraja ve arkadaşları, $\text{Pb}_{0,9}\text{Bi}_{0,1}\text{Fe}_{0,7}\text{W}_{0,3}\text{O}_3$ perovskit yapıdaki seramik malzemesinde SCP kaynağının bileşimsel heterojenik olduğunu belirtmiştir [79]. Bilindiği üzere Y-Ba-Cu-O seramikleri, bakır oksitlerin üçgen piramit ve kare düzlemler şeklinde olduğu kusurlu bir perovskit yapıda kristalleşir.

Her katmanın sınırı, 4 köşeyi paylaşan kare düzlemsel CuO_4 birimlerinin düzlemleri ile tanımlanır. Bu düzlemlere dik olarak iki köşeyi paylaşan CuO_2 şeritleri bulunmaktadır. Y atomları CuO_4 düzlemleri arasında konumlanırken, Ba atomları ise CuO_2 şeritleri ve CuO_4 düzlemleri arasında yer almaktadır. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ seramikleri için $\delta=1$ olduğu durumda, seramik bir yalıtkandır, Cu(1) katmanındaki O(1) bölgeleri boştur ve hücre yapısı tetragonaldir. Bununla birlikte, $\delta \approx 0$ olduğunda, faz süperiletkendir ve hareketli deliklere sahiptir. Ayrıca, O(1) bölgelerinin neredeyse tamamı doludur. Tez çalışması kapsamında üretilen seramik malzemesinin durumunda olduğu gibi $\delta < 0,65$ için kristalin b eksenini boyunca Cu-O zincirleri oluşmaktadır. b-ekseninin uzaması yapıyı tetragonal halden ortorombiğe dönüştürmektedir. Oksijen içeriği O₇'den O₆'ya değiştikçe, c-ekseni de genişlemektedir [80]. Çalışma boyunca üretilen seramik malzemesinin durumuna bakıldığında ise, $\delta \approx 0,5$ olduğundan, Cu(1) katmanlarındaki O(1) bölgelerindeki oksijenlerin bir kısmı boştur. Bu oksijen boşlukları iyonizedir ve SCP'nin kaynağı olan uzay yükleri olan elektronlar oluşturabilir. Yitrium elementinin kısmen veya tamamen Eu elementi ile yer değiştirdiği diğer seramiklerde oksijen içeriği aynı olduğundan, bu seramiklerdeki O(1) bölgelerinde de boşluklar mevcuttur. Bu durumda SCP, diğer seramikler örneklerde de gözlenmektedir. Şekil 4.1'de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ seramik malzemesine ait ortorombik birim hücresi verilmiştir.



Şekil 4. 1 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ seramiğinin ortorombik birim hücresi [81].

Şekil 4.2'ye bakıldığında, sıcaklık, oda sıcaklığından 523 K'e yaklaştıkça ϵ' değerinin frekansa bağıllığı artmaktadır. Artan sıcaklıkla birlikte bu güçlü polarizasyon, seramiklerde termal olarak aktive edilmiş dielektrik süreçlerine işaret etmektedir. İlgili grafiklerden çıkarılabilecek ikinci ama daha önemli sonuç, seramiklerin hem sıcaklığa hem de Yitriyum içeriğine bağlı olarak farklı düşük frekans bölgelerinde gözlenen negatif gerçek geçirgenliğidir (NRP). Dikkat çeken bir diğer nokta ise, tüm örneklerin oda sıcaklığında negatif gerçek geçirgenliğe (NRP) sahip olmasıdır.

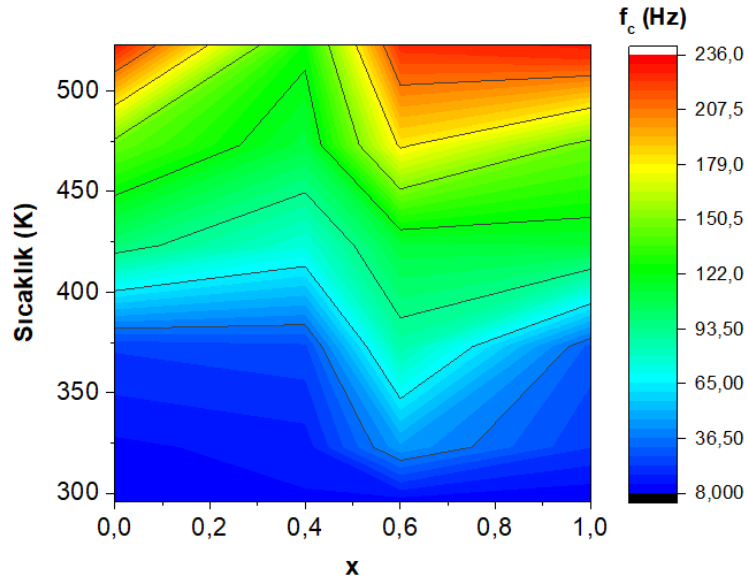


Şekil 4. 2 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **b)** $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **c)** $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve **d)** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin kompleks geçirgenlik fonksiyonunun gerçek kısmının (ϵ') frekansa bağıllığı.

Şekil 4.2'deki iç grafiklerde, geçirgenliğin gerçek bileşeni, Y (yitriyum) içeriğine bağlı olarak farklı geçiş frekanslarında (f_c) negatif değerden pozitif değere geçiş yaparken, genel olarak her seramik malzeme için f_c değeri sıcaklık arttıkça daha yüksek bir değere doğru kaymaktadır. Başka bir deyişle, oda sıcaklığında düşük ϵ' ve küçük f_c değerleri ile karakterize edilen seramiklerin doğal bir özelliği olarak

sergilenen NRP özelliği, sıcaklık artış faktörü ile daha geniş bir frekans aralığında daha büyük ε' değerleri ile gözlenmektedir.

Geçiş frekansının (f_c), sıcaklık ve Y içeriğine bağımlılığını ortaya koymak için, ilgili parametrelere göre gradian haritalama şeklinde bir grafik Şekil 4.3'te verilmiştir.

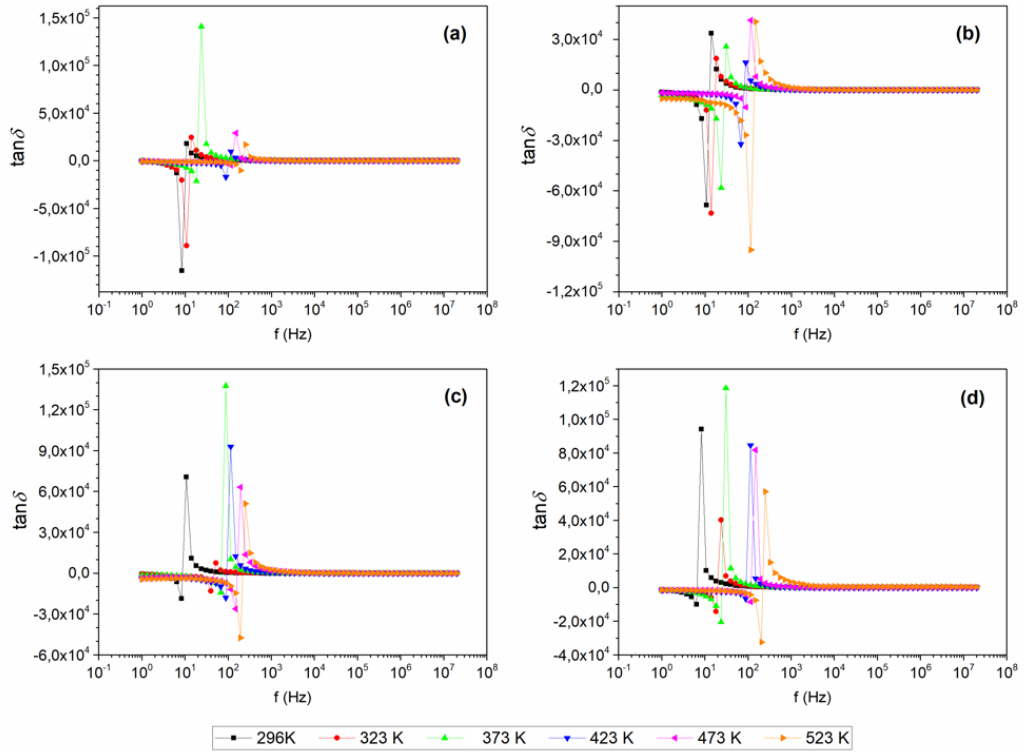


Şekil 4. 3 Geçiş frekansının hem sıcaklığa hem de seramiğin Y içeriğine göre değişimi, burada x seramikteki Y içeriğini göstermektedir.

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, seramiklerdeki Yttriyum içeriğinden bağımsız olarak, oda sıcaklığı civarlarında, genellikle düşük frekanslarda negatif ε' değerinden pozitif ε' değerine doğru bir geçiş vardır. Öte yandan, en yüksek f_c frekanslarının, $x \geq 0,6$ olduğu değerlerde ve 500 K ve üzeri gibi yüksek sıcaklıklarda olduğu gözlenmiştir. En yüksek f_c frekansı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği için 230,86 Hz olarak belirlenmiştir ki bu değer, ultra düşük radyo dalgaları bölgesine karşılık gelmektedir. Başka bir bakış açısıyla, f_c frekansı $\varepsilon' = 0$ koşulunun gözlemlendiği frekans olarakta görülebilir. Geçiş frekansında gözlenen $\varepsilon' = 0$ özelliği, başka bir metamatizeme sınıfı olarak düşünülebilecek ε' değeri sıfıra yakın (ENZ- ε' near zero) olan malzemelerin tasarlanması için umut vericidir. ENZ malzemelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bunun sebebi ise, metamatizeme sınıfı faz tutarlılığı, tünelleme etkisi ve dalgaboyu uzaması gibi olağanüstü egzotik özellikler sergilemesidir [82, 83]. ENZ özelliği bazı metaller ve yüksek katkılı yarı iletken malzemeler için yüksek plazma frekanslarında rapor edilmiş olmasına rağmen,

radio frekansları gibi daha düşük frekanslar için de nadiren rapor edilmiştir [84]. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği için elde edilen f_c frekansı, ENZ açısından benzer bir perovskit yapı olan $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ ile karşılaştırıldığında, $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ için bildirilen f_c frekansının 130 kHz olduğu ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiğinden yaklaşık 1000 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve ayrıca diğer seramikler ($(\text{Y}_x\text{Eu}_{1-x})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ burada $x:0; 0,4; 0,6$) için bu kadar düşük bir frekansta ENZ tespiti, gelişmiş antenler, zamanlayıcı ve kondansatör gibi ENZ metalmalzemeye uygulamalarına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, hem seramiğin Y/Eu içeriğini ayarlayarak hem de çalışma sıcaklığını değiştirerek ENZ frekansını daha yüksek veya daha düşük frekansa kaydırmak mümkündür.

Seramik malzemelerin NRP özelliklerini anlamak için, seramiklerin kayıp tanjant spektrumları incelenmelidir çünkü kayıp tanjantlarda gözlenebilen relaksasyon zirvesi ile NRP arasında dolaylı bir ilişki olabilir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, seramiklerin kayıp tanjant spektrumu, tüm seramik malzemeler için çalışılan her sıcaklıkta biri negatif tarafta diğeri ise pozitif tarafta olmak üzere iki maksimum göstermektedir. İlk olarak, kayıp tanjant spektrumunda bu tür zirvelerin değerlerin görülmesi relaksasyon dipollerinin varlığına işaret etmektedir. Dahası, sıcaklık arttıkça bu zirve değerlerin konumu daha yüksek frekanslara doğru kaymaktadır. Bu eğilim, artan sıcaklıkla birlikte gevşeme süresinin (relaksasyon süresi) azaldığını göstermektedir. Ayrıca, kayıp tanjant değerleri her sıcaklıkta, geçiş frekansına denk gelen kritik bir frekansta negatiften pozitifte geçiş yapar. Dolayısıyla, kayıp tanjant spektrumunun bu davranışı NRP yanıtı ile tutarlıdır.



Şekil 4. 4 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, **b)** $(\text{Y}_{0.4}\text{Eu}_{0.6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$, **c)** $(\text{Y}_{0.6}\text{Eu}_{0.4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ ve **d)** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ seramiklerinin kayıp tanjant spektrumları.

Bilindiği üzere kayıp tanjantı, bir malzemedeki elektrik dipollerinin uygulanan elektrik alan ile aynı yönde yönlendirilmesi için gereken enerjiyi ifade etmektedir. Kayıp tanjantında gözlenen pozitif bir tepe, aynı zamanda bu yönelim nedeniyle sistemde en yüksek miktarda enerji kaybını veya başka bir deyişle absorbe edildiğini gösterir. İlgili enerji kaybı veya emilimi genellikle yüklerin relaksasyon davranışı ile ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, böyle bir pozitif kayıp tepe noktası, uygulanan elektrik alan kaldırıldığında yüklerin orijinal durumlarına dönmeleri için gereken enerjiye de karşılık gelmektedir. Öte yandan, incelenen seramiklerde pozitif kayıp tanjant tepe noktasına eşlik eden ve ondan hemen sonra ortaya çıkan ve daha düşük frekanslarda gözlenen negatif kayıp tanjant zirvesi de aynı fikre dayanarak malzemenin bir enerji emisyonu olarak yorumlanabilir. Bu bağlamda, pozitif kayıp tanjantı malzemenin ilgili frekans bölgesindeki kapasitif davranışı gösterirken; negatif kayıp tanjantı tepe noktası da aynı malzemenin başka bir frekans bölgesindeki indüktif karakterini vurgulamaktadır [85]. Bu noktadan hareketle, frekansa bağlı olarak malzemenin indüktif karakterden kapasitif karaktere geçişi ve kayıp tanjantında gözlenen relaksasyon zirveleri, indüktör-

kapasitör devrelerinin davranışı ve bu devrede gözlenen rezonansları ile ilişkilendirilebilir. Öte yandan, Wu ve arkadaşları, NRP'den indüktif karakterin sorumlu olduğu sonucuna varmışlardır [28]. Dolayısıyla NRP fenomeni, sistemdeki delokalize elektronların plazma rezonans salınımları göz önünde bulundurularak Drude Modeli bağlamında incelenebilir. Wu ve arkadaşları tarafından NRP'nin, enerji depolamadan ziyade serbest elektronların sönümlü hareketi ile açıklanabildiği bildirilmiştir [86]. Bilindiği üzere Drude modeli, ε' ve açısal frekans ile ilişkilendirilir (Denklem 4.1).

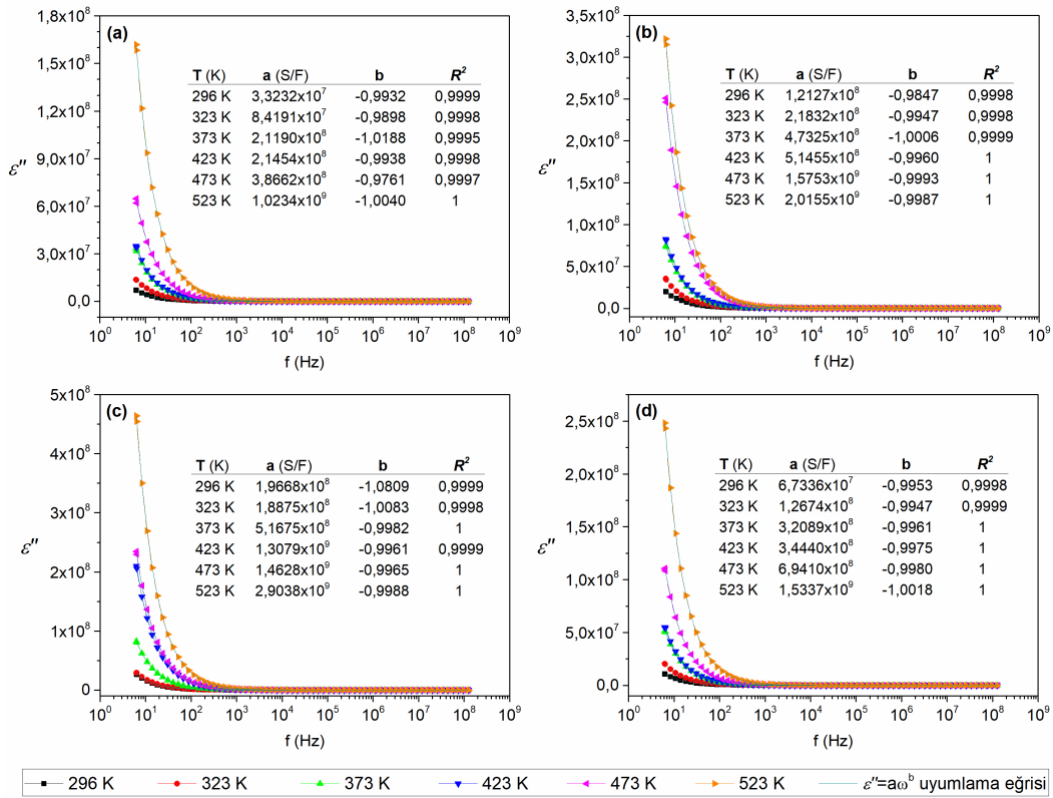
$$\varepsilon'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \Gamma^2} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de, Γ sönümleme sabiti, $\omega_p (= \sqrt{\frac{ne^2}{m\varepsilon_0}})$ plazmon frekansı, n yük taşıyıcı yoğunluğu ve sırasıyla m ve e ise, hareketli yük taşıyıcıların kütlesi ve yüküdür. Sönümleme sabiti, ω ile kıyaslandığında yeterince küçük ise ihmal edilir.

Bu sınırın altında NRP'yi gözlemlemek için $\frac{\omega_p^2}{\omega^2} > 1$ koşulunun sağlanması gerekmektedir. Ek olarak, NRP değerinin bu orana büyük ölçüde bağlı olduğu vurgulanabilir. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, NRP değeri dikkate alınan tüm seramikler için sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Bu gerçeklik ile Denklem (7) arasında $\Gamma \rightarrow 0$ sınırında bir korelasyon kurulduğunda, sıcaklık artışının ω_p değerini arttırdığı ve dolayısıyla yük taşıyıcı yoğunluğunda bir artışa neden olduğu sonucuna varılabilir. Bu durum, artan sıcaklıkla birlikte numunelerin iletkenliğinde bir artış olduğunu gösterebilir. Bu öngörü, seramiklerin AC iletkenlik analizlerinin incelenmesinde doğrulanacaktır. Bu noktadan hareketle, yük taşıyıcı yoğunluğu arttıkça, ε' değerlerinin daha negatif hale geldiği sonucuna varılabilir, bu da seramiklerde güçlü kolektif plazma salınıminin olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bu bağlamda, oda sıcaklığından başlayarak daha yüksek sıcaklıklara kadar tüm seramiklerde gözlenen NRP özelliği, ilgili seramik yapılarda içsel Drude benzeri NRP özelliğine atfedilebilir.

Kayıp tanjanta ek olarak, seramik malzemelerin kompleks elektriksel geçirgenliğinin sanal bileşeni olan ε'' değerinin açısal frekansla değişimi (Şekil 4.5) incelendiğinde, NRP'nin gözlemlendiği bölgede artan frekansla birlikte ε''

değerinin keskin bir şekilde azalması dikkat çekmektedir. Daha sonra ε'' , yüksek frekanslarda bir saturasyon (doygunluk) sergileyerek küçük bir sabit değere yaklaşma eğilimi göstermektedir. ε'' değerinin keskin düşüşü iletimden kaynaklanan kayıpla ilişkiliyken, saturasyon bölgesi ise polarizasyondan kaynaklanan kayıpla ilgilidir [30]. $\varepsilon'' = f(\omega)$ eğrileri $\varepsilon'' = a\omega^b$ denkleminde göre uyandırıldığında, b parametreleri -1 civarında bulunmuştur ($R^2 \cong 1$ güvenilirlik faktörü ile), bu da incelenen seramiklerde meydana gelen kaybın çoğunlukla elektrik iletiminden kaynaklandığını göstermektedir [19]. Bu açıdan bakıldığında, a parametresi $\frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0}$ oranına karşılık gelir, burada σ_{dc} , dc iletkenliğidir. Uyum parametreleri ve ayrıca seramikler için her bir sıcaklıktaki dc iletkenlik değerleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Tablo 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, b) $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, c) $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve d) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin kompleks geçirgenlik fonksiyonunun sanal kısmının açısıl frekansa bağımlılığı.

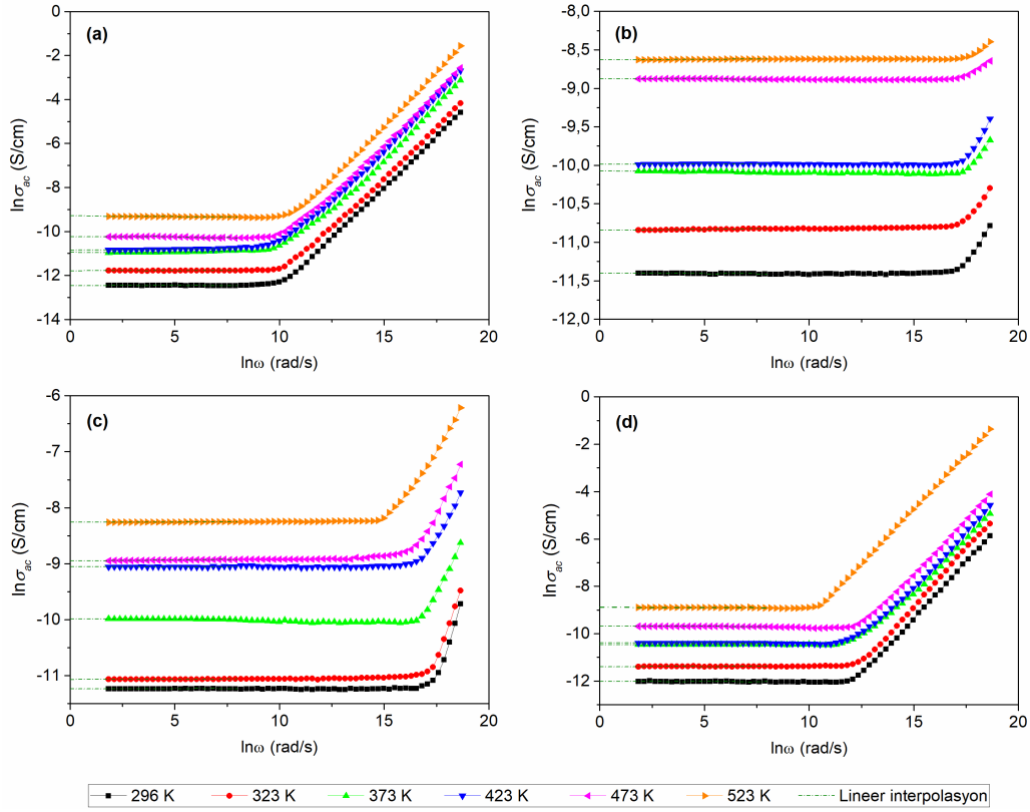
Tablo 4. 1 Farklı sıcaklıklarda seramik numuneler için $\varepsilon'' = \frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0} \omega^{-1}$ uydurma fonksiyonu ile elde edilen (S/cm) birimindeki dc iletkenlik değerleri.

Seramik	296 K	323 K	373 K	423 K	473 K	523 K
EuBa ₂ Cu ₃ O _{6,5}	3,83×10 ⁻⁶	7,45×10 ⁻⁶	1,88×10 ⁻⁵	1,90×10 ⁻⁵	3,42×10 ⁻⁵	9,06×10 ⁻⁵
(Y _{0,4} Eu _{0,6})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5}	1,07×10 ⁻⁵	1,93×10 ⁻⁵	4,19×10 ⁻⁵	4,55×10 ⁻⁵	1,39×10 ⁻⁴	1,78×10 ⁻⁴
(Y _{0,6} Eu _{0,4})Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5}	1,74×10 ⁻⁵	1,67×10 ⁻⁵	4,57×10 ⁻⁵	1,16×10 ⁻⁴	1,29×10 ⁻⁴	2,57×10 ⁻⁴
YBa ₂ Cu ₃ O _{6,5}	5,96×10 ⁻⁶	1,12×10 ⁻⁵	2,84×10 ⁻⁵	3,05×10 ⁻⁵	6,14×10 ⁻⁵	1,38×10 ⁻⁴

Tablo 4.1’de gösterildiği üzere, numunelerin dc iletkenliği, dikkate alınan tüm seramikler için sıcaklık artışıyla birlikte artmaktadır. Bu davranış, elektrik iletkenliğinin yarı iletken doğasına işaret etmektedir.

4.1.2 Seramiklerin AC İletkenlik Özellikleri

Seramiklerin dc iletkenlikleri, dielektrik kayıp eğrileri kullanılarak incelendikten sonra, bu bölümde seramiklerin iletkenliklerinin açısal frekansa bağımlılığı detaylı olarak incelenmiştir. Seramiklerin ac iletkenliklerinin frekansa bağımlılığı Şekil 4.6’da e-tabanında çift logaritmik ölçekte gösterilmiştir.



Şekil 4. 6 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **b)** $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **c)** $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve **d)** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin $\ln \sigma_{ac}$ - $\ln \omega$ eğrileri.

Şekil 4.6’da gösterildiği gibi, çalışılan her sıcaklıkta tüm seramiklerin $\ln \sigma_{ac} - \ln \omega$ eğrileri benzer eğilimler göstermektedir: bir dc (doğru akım) platosu (atlama frekansına kadar ω ’dan bağımsız) ve ω ile güçlü bir şekilde artan dispersif bölge [87]. Buna ek olarak, açılal frekansa bağlı olarak iletkenliğin iki farklı davranışı, tüm seramiklerin ac-iletkenliğinin, termal olarak aktive edilmiş bir iletim mekanizmasına işaret ettiği ve sıcaklıkla arttığı gözlenmiştir [88]. Öte yandan, ac iletkenliği dispersif bölgede açılal frekansla arttığından, yük taşıma mekanizması baskın olarak Jonscher’in Evrensel Güç Yasası (JUPL) kullanılarak lokalize edilmiş durumlar arasında küçük polaron atlaması yoluyla gerçekleşir [89]. Bu bağlamda, alternatif akım (ac) iletkenliği iki terimin kombinasyonu ile yazılabilir [90].

$$\sigma_{ac} = \sigma_{dc} + A\omega^s \quad (4.2)$$

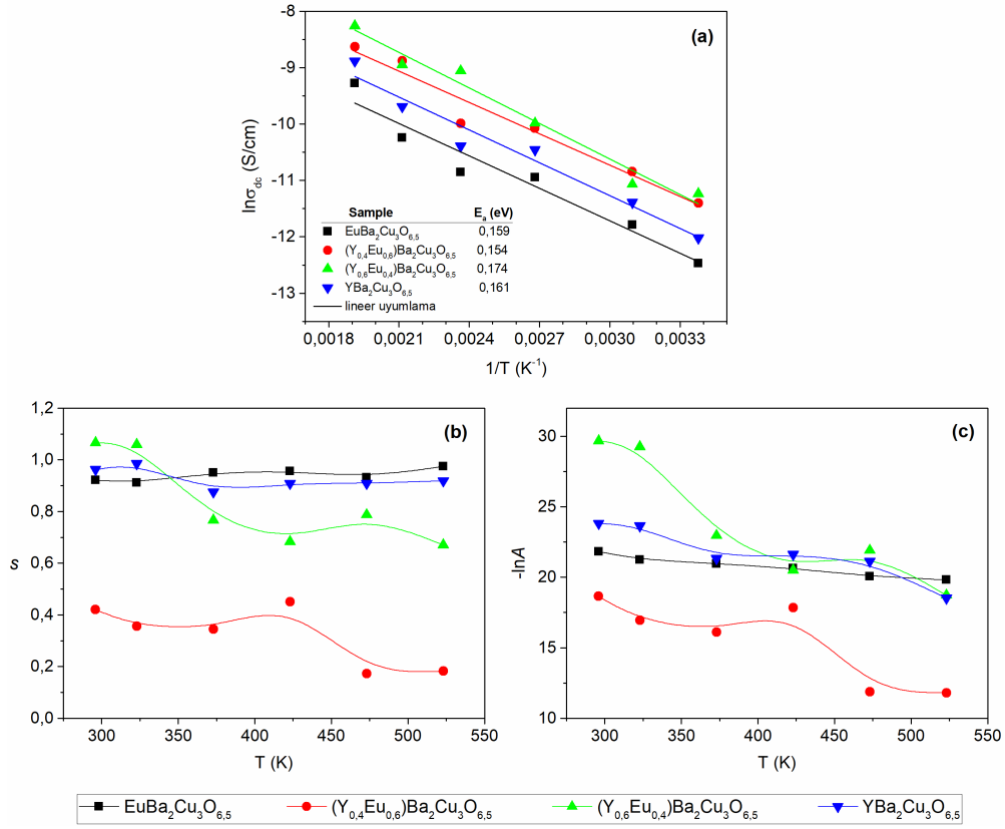
Denklem 4.2’ye göre, $\sigma_{ac} - \omega$ eğrileri uydurulmuş ve σ_{dc} , A ve s değerleri belirlenmiştir. Uyumlamaların güvenilirlik faktörü $R^2 \cong 1$ ’dir. İlgili parametreler Tablo 4.2’de listelenmiştir.

Tablo 4. 2 Seramiklerin dc plato ve dispersif bölgeleri için doğrusal uydurma (linear fitting) ile elde edilen (S/cm) biriminde dc iletkenlik (σ_{dc}), A değeri ve frekansın üs değerleri (s).

Örnek/ Parametre		296 K	323 K	373 K	423 K	473 K	523 K
(Eu) Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5}	σ_{dc}	3,85×10 ⁻⁶	7,59×10 ⁻⁶	1,76×10 ⁻⁵	1,94×10 ⁻⁵	3,57×10 ⁻⁵	9,94×10 ⁻⁵
	A	3,30×10 ⁻¹⁰	5,91×10 ⁻¹⁰	7,90×10 ⁻¹⁰	1,09×10 ⁻⁹	1,93×10 ⁻⁹	2,47×10 ⁻⁹
	s	0,921	0,911	0,950	0,956	0,932	0,974
(Y _{0,4} Eu _{0,6}) Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5}	σ_{dc}	1,12×10 ⁻⁵	1,96×10 ⁻⁵	4,21×10 ⁻⁵	4,59×10 ⁻⁵	1,39×10 ⁻⁴	1,79×10 ⁻⁴
	A	8,01×10 ⁻⁹	4,33×10 ⁻⁸	1,00×10 ⁻⁷	1,80×10 ⁻⁸	7,04×10 ⁻⁶	7,52×10 ⁻⁶
	s	0,420	0,356	0,344	0,451	0,172	0,182
(Y _{0,6} Eu _{0,4}) Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5}	σ_{dc}	1,32×10 ⁻⁵	1,56×10 ⁻⁵	4,61×10 ⁻⁵	1,17×10 ⁻⁴	1,30×10 ⁻⁴	2,59×10 ⁻⁴
	A	1,30×10 ⁻¹³	1,98×10 ⁻¹³	1,07×10 ⁻¹⁰	1,24×10 ⁻⁹	3,05×10 ⁻¹⁰	7,38×10 ⁻⁹
	s	1,066	1,059	0,766	0,683	0,787	0,670
(Y) Ba ₂ Cu ₃ O _{6,5}	σ_{dc}	6,02×10 ⁻⁶	1,13×10 ⁻⁵	2,87×10 ⁻⁵	3,06×10 ⁻⁵	6,17×10 ⁻⁵	1,38×10 ⁻⁴
	A	4,58×10 ⁻¹¹	5,40×10 ⁻¹¹	5,43×10 ⁻¹⁰	4,08×10 ⁻¹⁰	6,69×10 ⁻¹⁰	9,14×10 ⁻⁹
	s	0,962	0,985	0,875	0,908	0,908	0,918

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de listelenen σ_{dc} değerleri karşılaştırıldığında, bu değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Öte yandan, dc iletkenliği artan sıcaklıkla birlikte hiyerarşik olarak artmaktadır. Bu da yine termal olarak aktive edilmiş bir iletim sürecine işaret etmektedir.

Şekil 4.7 (a)'da gösterilen dc iletkenliğinin Arrhenius grafiği, seramiklerin 0,159 eV ($\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ için) ile 0,174 eV ($(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ için) arasında değişen aktivasyon enerjilerini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. 7 a) dc iletkenliğin Arrhenius grafikleri, seramiklerin sıcaklığa bağlı b) s parametreleri ve c) $-\ln A$ değerleri.

Tablo 4.2'den görüldüğü üzere, 296 K ve 323 K sıcaklığındaki $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği hariç diğer tüm seramik malzemeler için s değerleri 1'den küçüktür. Bilindiği gibi $s < 1$ durumu ani bir atlama (hopping) ile öteleme hareketine karşılık gelirken, $s > 1$ durumu komşu bölgeler arasında lokalize bir atlamanın meydana geldiğini göstermektedir [91]. Bu açıdan bakıldığında, $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin çalışılan her sıcaklıkta ani bir atlama (hopping) ile öteleme hareketi yoluyla elektrik iletim mekanizması sergilediği ileri sürülebilir. Ancak $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği sıcaklığa bağlı olarak hem ani hem de lokalize atlama sergilemektedir. Öte yandan, Şekil 4.7 (b)'de gösterildiği gibi, $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ hariç diğer seramik örnekler, her seramik için farklı olan bir sıcaklık dışında, artan sıcaklıkla açılal frekansın üssü

olan s parametresi azalan bir eğilim sergilemektedir. Benzer bir eğilim Şekil 4.7 (c)'de gösterilen $-\ln A$ değerinin sıcaklığa bağlı grafiğinde de gözlenmiştir.

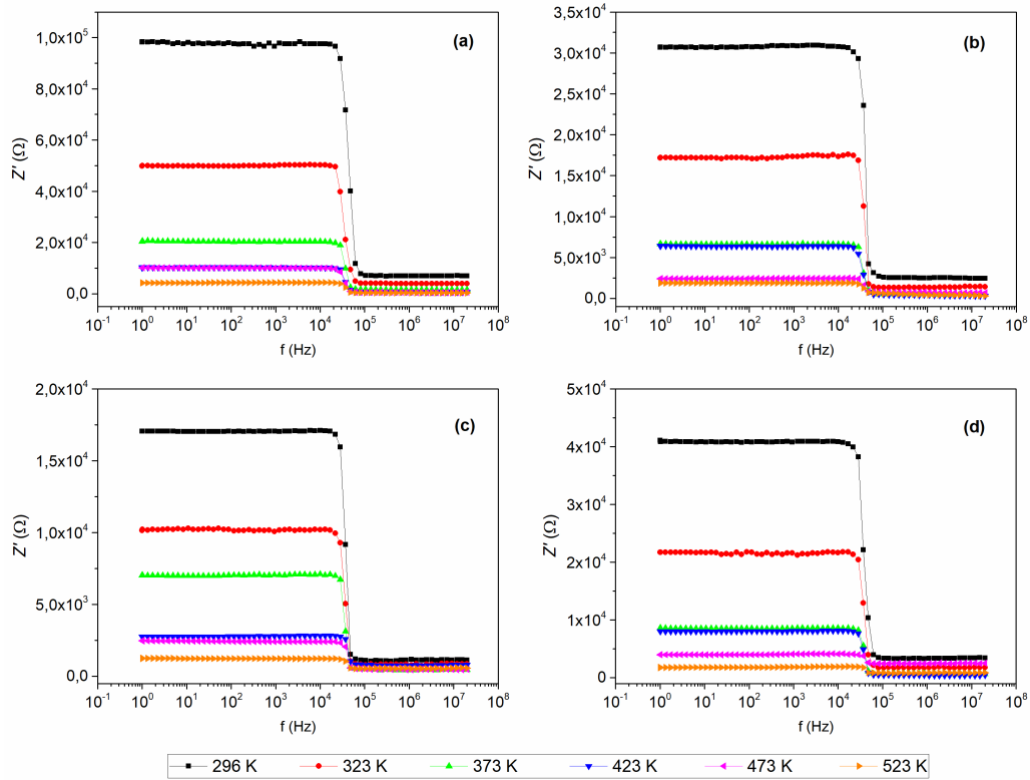
$-\ln A$ ve s değerlerinin sıcaklıkla benzer değişiklikler göstermesi, muhtemelen JUPL'nin belirli bir yapıya bağlı olmayan genel bir özelliğe sahip olduğu fikrini güçlendirmektedir [92].

Seramiklerin birincil iletkenlik mekanizmasının belirlenmesine odaklanıldığında, Y katkısına sahip seramiklerin kısmen veya tamamen elektrik iletimini baskın olarak CBH (Correlated Barrier Hopping) mekanizması ile gerçekleştirdiği sonucuna varılabilir. CBH mekanizmasında s parametresi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır [93, 94]. $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ seramiği için s değerleri 0,91 ile 0,97 arasında değişiklik gösterdiğinden, baskın iletim mekanizması Neredeyse Sabit Kayıplı (NCL-Nearly Constant Loss) olarak yorumlanabilir [95]. NCL mekanizması, alternatif akım (AC) elektrik iletkenliğinin uygulanan gerilimin frekansı ile neredeyse doğrusal bir şekilde arttığı düzensiz malzemelerde gözlenen bir olaydır [96].

4.1.3 Seramiklerin Empedans Özellikleri

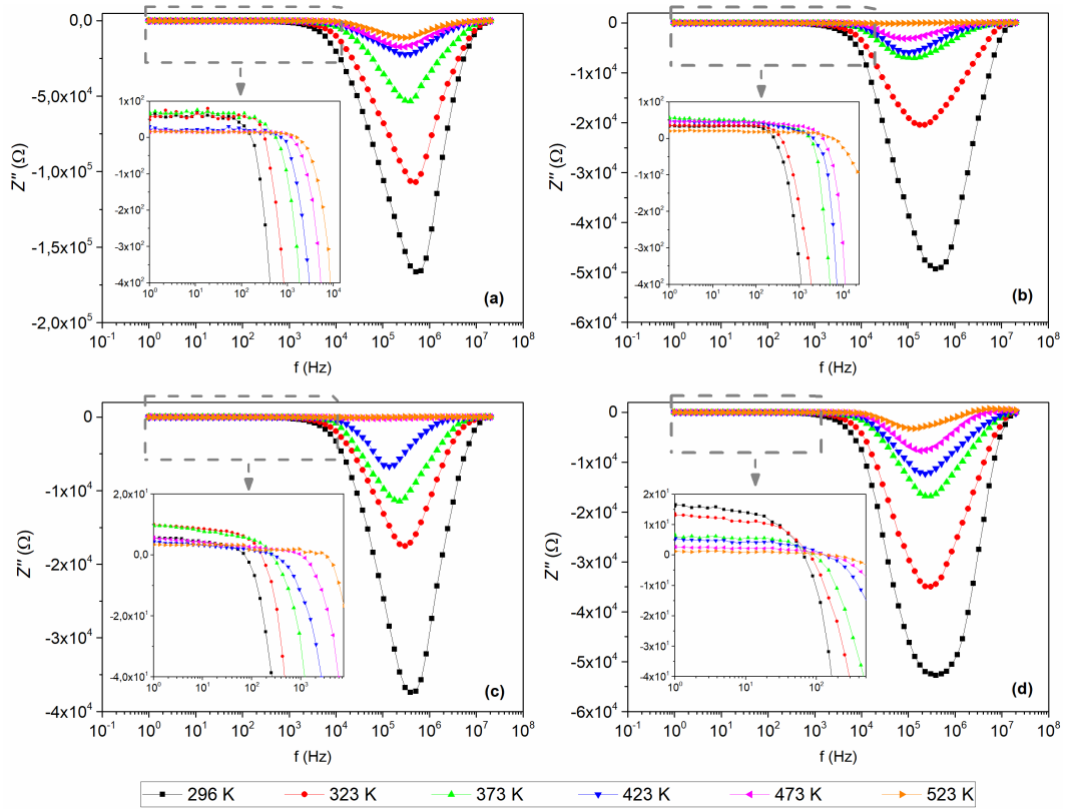
Bu tez çalışması kapsamında, seramiklerin relaksasyon sürecini incelemek için, kompleks empedansın gerçek ve sanal bileşenlerinin frekansa bağımlılıkları da incelenmiştir (Şekil 4.8 ve 4.9). Şekil 4.8'de gösterildiği gibi, sentezlenen dört seramik numune için çalışılan tüm sıcaklıklarda, düşük ve orta frekans bölgelerinde artan frekansla birlikte Z' azalmaktadır. Ayrıca, en yüksek Z' değeri, düşük ve orta frekans bölgelerini kapsayan bir plato olarak gözlenmektedir. Bu davranış, uzay yükü polarizasyonunun (SCP) bir göstergesidir. Öte yandan, artan sıcaklıkla birlikte Z' değerleri keskin bir şekilde azalmaktadır. Sıcaklığa bağlı bu düşüş, seramiklerin direncinin negatif sıcaklık katsayısını (NSK) ortaya çıkarmaktadır [97]. NSK'lar, bulundukları ortamın ya da temas ettiklerin yüzeyin sıcaklığının artmasıyla birlikte elektriksel dirençlerinin azaldığı devre elemanlarıdır [98]. NSK malzemeleri sıcaklık izleme ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır [99-101]. Z' kompleks empedansın direnç bileşenini tanımladığından, sabit Z' değerinin artan sıcaklıkla birlikte azalması seramiklerin yarı iletken doğasına işaret etmektedir.

Ayrıca, NSK özelliğinin gözlenmesi, seramiklerin sıcaklık sensörü uygulamalarında bir algılama malzemesi olarak kullanılma potansiyelini de ortaya koymaktadır. Bu açıdan sıcaklık sensörleri için tez çalışmaları kapsamında üretilen numuneler önerilebilir.



Şekil 4. 8 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **b)** $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **c)** $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve **d)** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin kompleks empedansının gerçek bileşenlerinin frekansa bağımlılığı.

Şekil 4.9’da gösterildiği gibi, tüm seramik örnekler için Z'' spektrumları artan sıcaklık ve frekans ile aynı eğilimi göstermektedir. Frekansın etkisi tek başına incelendiğinde, kritik bir frekans değerine ($f_{maks.}$) kadar $|Z''|$ artmakta ve ardından azalarak en düşük satürasyon (doyum) değerine ulaşmaktadır. Bu bağlamda, Z'' tepelerinin gözlenmesi bir relaksasyon (gevşeme) sürecine işaret etmektedir [102]. Sıcaklığın etkisi de Z'' değerinin frekans bağımlılığına eklendiğinde, tüm seramikler için zirvelerin yüksekliğinin azaldığı ve $f_{maks.}$ frekansının daha düşük frekanslara doğru kaydığı gözlenmiştir (Tablo 4.3). Zirvelerin yüksekliğindeki azalma, seramiklerin hacimsel direncindeki azalma ile ilişkilendirilebilir [103]. Bu özellikler aynı zamanda termal olarak aktive edilen bir relaksasyon sürecinin varlığına işaret etmektedir.



Şekil 4. 9 a) $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **b)** $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, **c)** $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve **d)** $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiklerinin sanal bileşenlerinin frekansa bağımlılığı. Ekli küçük grafikler, düşük frekans bölgesinin yakınlaştırılmış halini göstermektedir.

Tablo 4. 3 Farklı sıcaklıklardaki seramikler için (Hz) biriminde f_{maks} değerleri.

Örnek	296 K	323 K	373 K	423 K	473 K	523 K
$\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$	$5,64 \times 10^5$	$4,89 \times 10^5$	$3,76 \times 10^5$	$3,18 \times 10^5$	$2,82 \times 10^5$	$2,64 \times 10^5$
$(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$	$4,08 \times 10^5$	$2,02 \times 10^5$	$1,30 \times 10^5$	$1,06 \times 10^5$	$9,23 \times 10^4$	$3,43 \times 10^4$
$(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$	$4,45 \times 10^5$	$3,00 \times 10^5$	$2,18 \times 10^5$	$1,36 \times 10^5$	$8,22 \times 10^4$	$2,70 \times 10^4$
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$	$4,06 \times 10^5$	$2,78 \times 10^5$	$2,46 \times 10^5$	$2,27 \times 10^5$	$1,84 \times 10^5$	$1,15 \times 10^5$

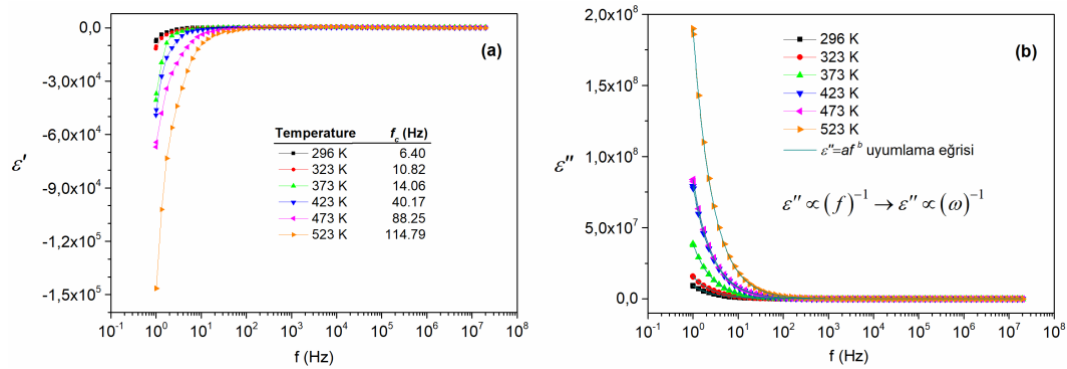
Öte yandan, seramiklerin Z'' - f grafiklerine bakıldığında, her bir seramiğin geçiş frekansını (f_c) kapsayan düşük frekans bölgesine yakınlaştırılığında, f_c frekansında pozitif Z'' değerinden negatif Z'' değerine geçişler gözlenmiştir (Şekil 4.9'daki ekler). $Z'' = X_L - X_C$ olduğundan, $Z'' > 0$ 'dan $Z'' < 0$ 'a geçiş durumu, örneklerin indüktif karakterden kapasitif karaktere geçtiği anlamına gelmektedir [104]. Bu açıdan bakıldığında, kapasitif karakter $\varepsilon' > 0$ durumuna karşılık

gelirken, indüktif karakter $\varepsilon' < 0$ durumu ile ilgilidir. Denklem 2.17'nin varlığı da bu yorumu doğrulamaktadır.

4.2 (Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba₂Cu₃O_{6,5} Seramiğinin Yapay Zekâ İncelemesi

Üretilen (Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba₂Cu₃O_{6,5} seramiğinin ε' ve ε'' parametrelerini belirlemek üzere 1 Hz-20 MHz aralığında ve 296, 323, 373, 423, 473, 523 K sıcaklıklarında dielektrik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca bu seramik için deneysel olarak ölçümü yapılmayan 348, 398, 448, 498, 548 ve 598 K sıcaklıklarında makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak ε' ve ε'' parametre tahminleri yapılmıştır.

(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba₂Cu₃O_{6,5} seramiğinin deneysel olarak yapılan ölçümlerin frekansa bağlı ε' ve ε'' değişimleri Şekil 4.10'da verilmiştir.

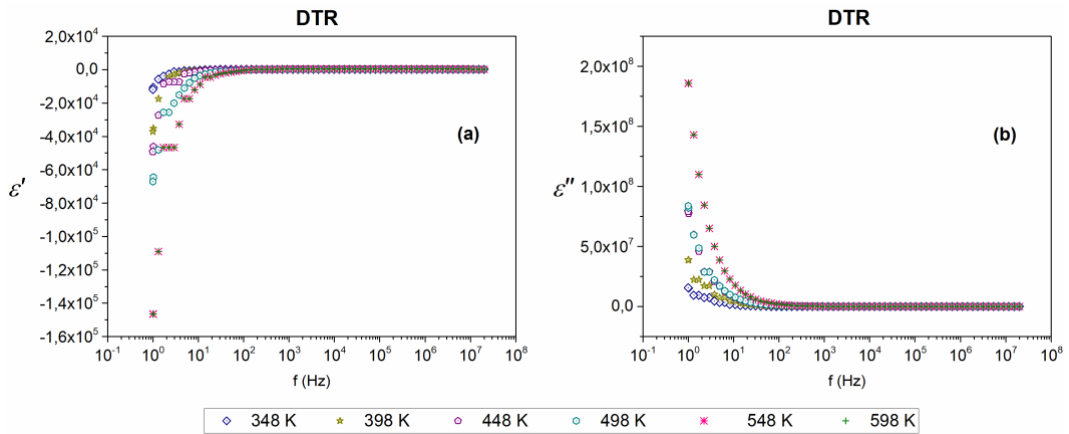


Şekil 4. 10 (Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba₂Cu₃O_{6,5} seramiğinin farklı sıcaklıklardaki frekansa bağlı **a) ε'** ve **b) ε''** spektrumları.

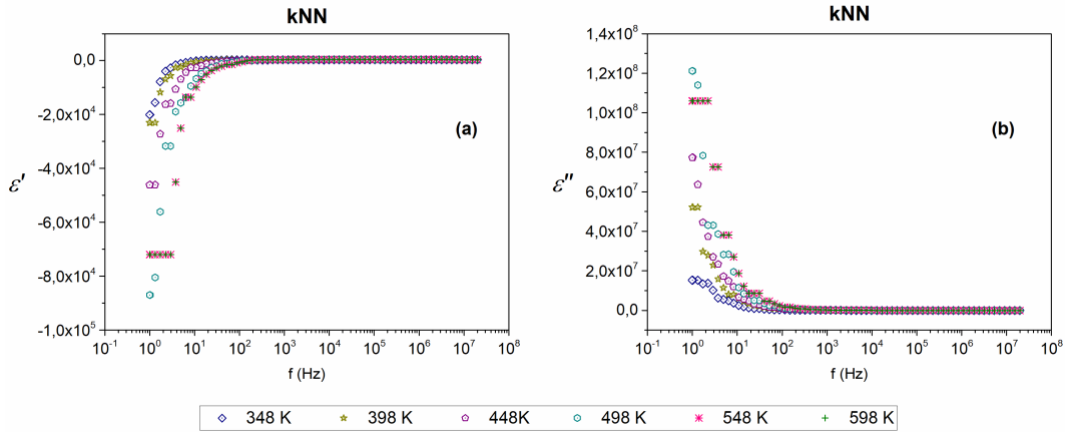
Şekil 4.10(a)'da gösterildiği gibi, ε' değeri hem düşük hem de orta frekans bölgesinde güçlü bir frekansa bağımlılık sergilemektedir ve NRP çalışılan her sıcaklıkta gözlenmektedir. Bilindiği üzere, empedans analizörü ile gerçekleştirilen ölçümlerde, seramik malzemeye uygulanan ac elektrik alanı seramik malzemede salınımlı elektron hareketine yol açmaktadır. Ayrıca, sıcaklık arttıkça seramik malzeme, hiyerarşik olarak artan geçiş frekanslarında (f_c) $\varepsilon' < 0$ durumundan $\vare' > 0$ durumuna bir geçiş gösterir. Ek olarak, NRP gözlenen frekans aralığına odaklanıldığında, artan sıcaklıkla birlikte mutlak değer bakımından $\vare'$ değeri artmaktadır. Söz konusu frekans aralığındaki sıcaklıktaki bu önemli artış, tane-tane sınır arayüzeylerinde biriken yük taşıyıcı sayısındaki artış olarak da yorumlanabilir. $\vare''$ değerinin frekansa bağımlılığı, artan frekansla birlikte $\vare''$ değerlerinin azalması ve düşük ve orta frekans bölgelerinde artan sıcaklıkla birlikte kaybın artmasını

göstermektedir. Temel olarak, bir elektrik alanının etkisi altındaki enerji kaybı, bir malzemedeki elektrik iletimi, yönelim ve uzay yükü polarizasyon işlemlerinden kaynaklanır. Şekil 4.10(b)'ye bakıldığında, $\varepsilon'' = f(\omega)$ eğrileri $\varepsilon'' = a\omega^b$ denkleminde göre uydurulduğunda, b parametresi -0,9999 civarında bulunmuştur ($R^2 \cong 1$ güvenilirlik faktörü ile), bu da incelenen seramikte meydana gelen kaybın çoğunlukla elektrik iletiminden kaynaklandığını göstermektedir. Ek olarak, tane sınırlarında lokalize yüklerin kutuplaşması da toplam kayba bir miktar katkıda bulunmaktadır [19]. Bu bilgiler doğrultusunda, $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ seramiğinin Bölüm 4.1.1'deki diğer seramik örnekler ile deneysel olarak aynı karakteristiği gösterdiği görülmektedir.

Üretilen $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ seramiğinin 348, 398, 448, 498, 548 ve 598 K sıcaklıklarında makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak ε' ve ε'' parametre tahminleri yapılmıştır. Kullanılan algoritmalarından en doğru tahmini veren DTR ve kNN algoritmasının sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4. 11 $(Y_{0,5}Eu_{0,5})Ba_2Cu_3O_{6,5}$ seramiğinin DTR algoritması kullanılarak elde edilen farklı sıcaklıklardaki frekansa bağlı **a)** ε' ve **b)** ε'' spektrumları.



Şekil 4. 12 $(Y_{0.5}Eu_{0.5})Ba_2Cu_3O_{6.5}$ seramiğinin kNN algoritması kullanılarak elde edilen farklı sıcaklıklardaki frekansa bağlı **a)** ϵ' ve **b)** ϵ'' spektrumları.

Her iki algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel olarak elde edilen frekansa bağlı ϵ' ve ϵ'' parametrelerine uygun karakteristik göstermektedir. Gerek deneysel sıcaklıkların arasında kalan sıcaklıklarda (296-523 K) gerekse deneysel ölçüm sıcaklıklarının dışında kalan sıcaklıklarda (548-598 K) görülen bazı anomaliler göz önüne alındığında kNN algoritmasının DTR'ye göre daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Model performansını değerlendiren metriklerle (R^2 , MSE ve MAE) bakıldığında DTR algoritmasının daha başarılı sonuç elde etmesine rağmen özellikle 548K ve 598K tahmin sonuçlarında birbirini tekrar ettiği görülmektedir. Karar ağacı regresyon algoritmasındaki bu anomali modelin yapısından kaynaklanmaktadır. DTR algoritması, veri kümesini kullanarak bir ağaç yapısı oluşturur. Bu ağaç, soruların sırasıyla özelliklerin değerleriyle yanıtlandığı bir dizi düğümden oluşur. Her iç düğüm, bir özelliği ve bu özelliğin değerine göre bir alt düğüm seçimi yapar. Yaprak düğümlerinde ise sonuç değerleri bulunur. Regresyon problemlerinde, karar ağacı her iç düğümden bir özelliği seçer ve bu özelliği kullanarak veri kümesini ikiye böler. Bölme işlemi, belirli bir özellik değerinin altındaki verileri bir alt düğüme ve bu değer üzerindeki verileri diğer alt düğüme yerleştirilerek gerçekleştirilir. Bu bölme işlemi, veri kümesinin homojenliğini artırarak ve hedef değerin tahminini yaparken hatayı minimize ederek gerçekleştirilir. Fakat çalışılan problemde, sıcaklık artışına bağlı olarak ϵ' değerleri arasındaki fark üstel olarak azalmakta ve yüksek sıcaklıklarda bu fark görece olarak çok küçük hale gelmektedir. Karar ağaçlarında bu fark, modelin minimize edilen hata değerinden daha küçük bir

değere ulaştığında, 548K ve 598K tahminlerinde aynı sonucu üretmektedir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için kullanılacak olan karar ağacı modelindeki referans hata değerini gerektiği kadar küçültebilecek şekilde ağaç derinliğini arttırmak ve uygun derinliği tespit etmek için modelin tekrarları gerekmekte, bu da hem ağaç derinliğinin artmasından dolayı hem de deneme sayısının artmasından dolayı hesaplama iş gücü kullanımını üstel olarak arttıracaktır. Bu nedenle bu seramik için yapılan sıcaklığa bağlı dielektrik parametrelerinin tahmininde kabul edilebilir ve daha başarılı performans değerleri verebilen kNN algoritmasının kullanılması daha uygun olacaktır.

Bu çalışmada, katı hal reaksiyon yöntemiyle hazırlanan dört perovskit seramiğin ($\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,4}\text{Eu}_{0,6})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$, $(\text{Y}_{0,6}\text{Eu}_{0,4})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ ve $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$) dielektrik, AC iletkenlik ve kompleks empedans özellikleri ele alınmıştır. Seramiklerin kristal yapıları ortorombik olarak belirlenmiştir. Eu ikamesi nedeniyle, seramiklerin ortorombikliği $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ 'e göre azalmaktadır. Seramiklerin frekansa bağlı elektriksel özellikleri 296K-523 K aralığında, frekans 1 Hz ile 20 MHz arasında değişirken incelenmiştir. Tüm seramiklerin kompleks geçirgenliğinin gerçek bileşenleri, Eu ikamesine ve çalışılan sıcaklığa bağlı olarak farklı geçiş frekanslarında negatif ε' değerinden pozitif ε' değerine bir geçiş sergilemiştir. Daha yüksek geçiş frekansları $x \geq 6$ ve yüksek sıcaklıklarda ($T > 500$ K) gözlenmiştir. Seramiklerin NRP davranışı, Drude modeli bağlamında sistemdeki delokalize elektronların plazma rezonans salınımları olarak açıklanmıştır. Ayrıca negatif gerçek geçirgenlik (NRP-Negative Real Permittivity), çapraz geçiş frekansında gözlemlenen ε' sifıra yakın (ENZ) özellik bağlamında da tartışılmıştır. Bu çalışmada hazırlanan seramiklerin ultra düşük radyo frekansı aralığında ε' sifıra yakın özelliğe sahip olduğu ve bunun gelişmiş iletişim uygulamaları tasarlamak için umut verici bir fikir sağlayabileceği gösterilmiştir. Karmaşık geçirgenliğin sanal bileşeninin frekansa bağımlılığı da kaybın esas olarak bu seramiklerdeki elektrik iletiminden kaynaklandığını göstermektedir. Dahası, NRP davranışı, karmaşık empedansın sanal bileşeninde gözlemlenen indüktif bir davranış olarak kendini göstermektedir. Öte yandan, karmaşık geçirgenliğin gerçek kısmının frekans tepkisi, seramiklerin sıcaklık sensörlerinde bir algılama malzemesi olarak olası kullanımına işaret etmiştir. Ayrıca, karmaşık empedansın gerçek bileşeninin ve dc iletkenliğin sıcaklık tepkileri seramiklerin yarı iletken doğasını ima etmiştir. AC iletkenlik analizleri ise, $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ haricindeki seramiklerde CBH'nin baskın yük taşıma mekanizması olduğunu göstermiştir.

Ayrıca bu tür seramiklerin frekansa bağlı dielektrik özelliklerinin belirlenmesinde makine öğrenmesi algoritmalarının kullanılabilirliği üretilen $(\text{Y}_{0,5}\text{Eu}_{0,5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$ seramiği için test edilmiştir. Deneysel verilerin girdi olarak kullanıldığı çalışmada deneyel olarak ölçümü yapılmamış sıcaklıklar için farklı makine öğrenmesi

algoritmaları kullanılarak tahminler yapılmış ve kNN algoritmasının başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Elde edilen başarılı sonuçlar, makine öğrenmesinin bu ve benzeri malzemelerin dielektrik parametrelerinin belirlenmesinde ve malzeme dizaynında hem zaman hem de üretim maliyetlerinde tasarruf sağlaması bakımından önemli bir yöntem olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

İleriki çalışmalarda, negatif sıcaklık bölgesinde ilgili numunelerin deneysel olarak dielektrik, empedans ve AC iletkenlik özellikleri incelenip, makine öğrenmesi yardımıyla da bu çalışma zenginleştirilebilir. Ayrıca, çalışma boyunca sentezlenen seramik malzemelerin süperkapasitör uygulamalarında kullanılıp kullanılmayacağı incelenebilir.

- [1] M. Kılıç, Z. G. Özdemir, Y. Karabul, Ö. Karataş, and Ö. A. Çataltepe, "Negative real permittivity in (Bi_{0.3}Eu_{0.7}) Sr₂CaCu₂O_{6.5} ceramic", *Physica B: Condensed Matter*, vol. 584, pp. 412080, 2020.
- [2] P. Salame, R. Drai, O. Prakash, and A. Kulkarni, "IBLC effect leading to colossal dielectric constant in layered structured Eu₂CuO₄ ceramic", *Ceramics International*, vol. 40, (3), pp. 4491-4498, 2014.
- [3] J.-W. Lee, and J.-H. Koh, "Grain size effects on the dielectric properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics for supercapacitor applications", *Ceramics International*, vol. 41, (9), pp. 10442-10447, 2015.
- [4] Ö. A. Çataltepe, Z. G. Özdemir, M. Kılıç, and Ü. Onbaşı, "Impact of oxygen doping on AC impedance, complex dielectric and electrical modulus spectra of a Hg-Ba-Ca-Cu-O ceramic", *Materials Testing*, vol. 61, (7), pp. 685-689, 2019.
- [5] M. Vallet-Regí, "Ceramics for medical applications", *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, (2), pp. 97-108, 2001.
- [6] O. Ishii, and O. Michikami: "Superconductive Small Loop Antennas Made of Ag-YBCO Ceramics", *Advances in Superconductivity VI: Proceedings of the 6th International Symposium on Superconductivity (ISS'93), October 26-29, 1993, Hiroshima Volumes 1 and 2, 1994: Springer*, pp. 1173-1176
- [7] Z. G. Özdemir, Ü. Alkan, M. Kılıç, and Y. Karabul, "Mechanical and dielectric behavior of LDPE/Bi-1212 films", *Materials Testing*, vol. 62, (9), pp. 913-920, 2020.
- [8] A. Salama, A. Youssef, Y. Rammah, and M. El-Khatib, "YBCO as a transition metal oxide ceramic material for energy storage", *Bulletin of the National Research Centre*, vol. 43, (1), pp. 1-11, 2019.
- [9] A. M. Youssef, Salama, A.H., Rammah, Y.S., "YBCO-based supercapacitor with ultrahigh dielectric materials", *Proc. 9th Global Chemistry Congress Lisbon, Portugal*, 2018.

- [10] L. Yang, L. Song, Q. Li, and T. Zhang, "Dielectric properties and electrical response of yttrium-doped $\text{Bi}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics", *Journal of Advanced Dielectrics*, vol. 11, (01), pp. 2150007, 2021.
- [11] P. Liang, Z. Yang, X. Chao, and Z. Liu, "Giant dielectric constant and good temperature stability in $\text{Y}_{2/3}\text{Cu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 95, (7), pp. 2218-2225, 2012.
- [12] Z. G. Özdemir, M. Kılıç, Y. Karabul, B. S. Mısırlıoğlu, Ö. A. Çataltepe, and O. İçelli, "Synthesis and characterization of $\text{EuBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{9-x}$: the influence of temperature on dielectric properties and charge transport mechanism", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 63, pp. 196-202, 2017.
- [13] Z. G. Özdemir, M. Kılıç, Y. Karabul, S. Erdönmez, and O. İçelli, "The influence of the partially europium substitution on the AC electrical properties of $\text{BiSr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{6.5}$ ceramics", *Processing and Application of Ceramics*, vol. 13, (4), pp. 323-332, 2019.
- [14] M. Afqir, A. Tachafine, D. Fasquelle, M. Elaatmani, J.-C. Carru, A. Zegzouti, M. Daoud, S. Sayouri, T.-d. Lamcharfi, and M. Zouhairi, "Structural, electric and dielectric properties of Eu-doped $\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ ceramics obtained by co-precipitation route", *Processing and Application of Ceramics*, vol. 12, (1), pp. 72-77, 2018.
- [15] P. C. Sati, M. Kumar, S. Chhoker, and M. Jewariya, "Influence of Eu substitution on structural, magnetic, optical and dielectric properties of BiFeO_3 multiferroic ceramics", *Ceramics International*, vol. 41, (2), pp. 2389-2398, 2015.
- [16] M. Islam, S. Parven, S. Paul, and M. Miah, "Study of Di-electric Constant dependency of Eu_2O_3 Doped SrTiO_3 Nano-ceramic on Temperature and Frequency", *J Nanosci Curr Res*, vol. 4, (1000129), pp. 2572-0813.1000129, 2019.
- [17] P. Lunkenheimer, R. Fichtl, S. G. Ebbinghaus, and A. Loidl, "Nonintrinsic origin of the colossal dielectric constants in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ", *Physical review B*, vol. 70, (17), pp. 172102, 2004.
- [18] M. Nobre, and S. Lanfredi, "Dielectric properties of $\text{Bi}_3\text{Zn}_2\text{Sb}_3\text{O}_{14}$ ceramics at high temperature", *Materials Letters*, vol. 47, (6), pp. 362-366, 2001.

- [19] H. Xu, X. Yin, M. Zhu, M. Li, H. Zhang, H. Wei, L. Zhang, and L. Cheng, "Constructing hollow graphene nano-spheres confined in porous amorphous carbon particles for achieving full X band microwave absorption", *Carbon*, vol. 142, pp. 346-353, 2019.
- [20] M. Han, Z. Shi, W. Zhang, K. Zhang, H. Wang, D. Dastan, and R. Fan, "Significantly enhanced high permittivity and negative permittivity in Ag/Al₂O₃/3D-BaTiO₃/epoxy metacomposites with unique hierarchical heterogeneous microstructures", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 149, pp. 106559, 2021.
- [21] C. Liang, P. Song, H. Qiu, Y. Zhang, X. Ma, F. Qi, H. Gu, J. Kong, D. Cao, and J. Gu, "Constructing interconnected spherical hollow conductive networks in silver platelets/reduced graphene oxide foam/epoxy nanocomposites for superior electromagnetic interference shielding effectiveness", *Nanoscale*, vol. 11, (46), pp. 22590-22598, 2019.
- [22] P. Song, B. Liu, H. Qiu, X. Shi, D. Cao, and J. Gu, "MXenes for polymer matrix electromagnetic interference shielding composites: A review", *Composites Communications*, vol. 24, pp. 100653, 2021.
- [23] L. Sun, Z. Shi, B. He, H. Wang, S. Liu, M. Huang, J. Shi, D. Dastan, and H. Wang, "Asymmetric trilayer all-polymer dielectric composites with simultaneous high efficiency and high energy density: a novel design targeting advanced energy storage capacitors", *Advanced Functional Materials*, vol. 31, (35), pp. 2100280, 2021.
- [24] S. Sun, Z. Shi, L. Sun, L. Liang, D. Dastan, B. He, H. Wang, M. Huang, and R. Fan, "Achieving concurrent high energy density and efficiency in all-polymer layered paraelectric/ferroelectric composites via introducing a moderate layer", *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 13, (23), pp. 27522-27532, 2021.
- [25] K. Sun, R. Fan, X. Zhang, Z. Zhang, Z. Shi, N. Wang, P. Xie, Z. Wang, G. Fan, and H. Liu, "An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer", *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 6, (12), pp. 2925-2943, 2018.
- [26] W. A. Murray, and W. L. Barnes, "Plasmonic materials", *Advanced materials*, vol. 19, (22), pp. 3771-3782, 2007.

- [27] P. Xie, W. Sun, Y. Liu, A. Du, Z. Zhang, G. Wu, and R. Fan, "Carbon aerogels towards new candidates for double negative metamaterials of low density", *Carbon*, vol. 129, pp. 598-606, 2018.
- [28] Z. Wang, K. Sun, H. Wu, P. Xie, Z. Wang, X. Li, and R. Fan, "Compressible silver nanowires/polyurethane sponge metacomposites with weakly negative permittivity controlled by elastic deformation", *Journal of Materials Science*, vol. 55, pp. 15481-15492, 2020.
- [29] Z. G. Özdemir, M. Kılıç, Y. Karabul, Ö. A. Çataltepe, O. İçelli, and Ü. Onbaşlı, "Structural and dielectric properties of Europium based copper oxide layered perovskite material", *Ferroelectrics*, vol. 510, (1), pp. 121-131, 2017.
- [30] Z. Wei, Z. Wang, C. Xu, G. Fan, X. Song, Y. Liu, and R. Fan, "Defect-induced insulator-metal transition and negative permittivity in $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{CoO}_3$ perovskite structure", *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 112, pp. 77-84, 2022.
- [31] L. Chen, C. Kim, R. Batra, J. P. Lightstone, C. Wu, Z. Li, A. A. Deshmukh, Y. Wang, H. D. Tran, and P. Vashishta, "Frequency-dependent dielectric constant prediction of polymers using machine learning", *npj Computational Materials*, vol. 6, (1), pp. 61, 2020.
- [32] M. Kılıç, Ö. Eyecioğlu, Z. G. Özdemir, and Ü. Alkan, "Estimation of dielectric parameters of LDPE/PANI composite films depending on temperature and PANI additive concentration by GRNN DYPE/PANI kompozit filmlerin sıcaklığa ve PANI katkı konsantrasyonuna bağlı olarak dielektrik parametrelerinin GRSA ile tahmini", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 35, (2)2020.
- [33] Ö. Eyecioğlu, Y. Karabul, M. Kılıç, and Z. G. Özdemir, "Application of Supervised Machine Learning Regression Algorithm to Prediction of Dielectric Properties of PPy/Kufeki Stone Composites for Energy Implementations", *Gazi University Journal of Science*, vol. 35, (1), pp. 235-254, 2022.
- [34] Ö. Eyecioğlu, "Bazalt/PANI Kompozitlerinin Dielektrik Özelliklerinin Tahmini için Makine Öğrenmesi Modellerinin Karşılaştırılması", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), pp. 817-826, 2021.

- [35] Y. Yi, L. Wang, and Z. Chen, "Adaptive global kernel interval SVR-based machine learning for accelerated dielectric constant prediction of polymer-based dielectric energy storage", *Renewable Energy*, vol. 176, pp. 81-88, 2021.
- [36] Y. He, W. Yan, Y. Liu, Y. Wang, Z. He, R. Yao, J. Gao, L. Zhong, and Q. Yu, "Searching high dielectric permittivity in barium titanate based material by machine learning prediction," in *2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, IEEE, pp. 983-986, 2018.
- [37] J. Qin, Z. Liu, M. Ma, and Y. Li, "Machine learning approaches for permittivity prediction and rational design of microwave dielectric ceramics", *Journal of Materiomics*, vol. 7, (6), pp. 1284-1293, 2021.
- [38] H. Ş. Soykan, *Seramik Malzemeler*, İkinci Basım edn, 2007.
- [39] MBM 301 Seramikler Ders Notu, <https://avesis.erciyes.edu.tr/resume/downloadfile/nuriburak?key=78fffaaf-71cc-4c1f-82e3-f82790ab8f98>, 28.12.2022
- [40] MAL 201-Malzeme Bilgisi, <https://web.itu.edu.tr/~arana/mal201.pdf>, 29.12.2022.
- [41] Seramikler, <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/eminerdin@hititedutr131220172B9N1W2Z.pdf>, 29.12.2022.
- [42] P. Chandrasekhar, *Conducting Polymers, Fundamentals and Applications*.Springer, 2018.
- [43] E. Beyazay, "X-ışını ve düşük enerjili gama ışınları zırhlama özelliğine sahip enerji depolayıcı polimer temelli nano kompozitlerin üretimi ", *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2022.
- [44] R. A. M. Arebat, "Katıhal reaksiyon yöntemi ile üretilen Co katkılı polikristal YBCO-358 süperiletkenlerinin yapısal, elektriksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2018.

- [45] D. Yazıcı, "Tek Fazlı BSCCO Süperiletken Malzeme Üretimi ve Malzemenin Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması", Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [46] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, "Theory of superconductivity", Physical review, vol. 108, (5), pp. 1175, 1957.
- [47] Y. G. Gücüm, "YBCO süperiletken ince filmin Ni-W altlık üzerine PED sistemi ile üretimi ve film özelliklerinin incelenmesi", Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [48] C. Yao, and Y. Ma, "Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications", Iscience, vol. 24, (6), pp. 102541, 2021.
- [49] Seramik ve elektrolitik kondansatör arasındaki fark, <https://tr.weblogographic.com/difference-between-ceramic>, 17.12.2022.
- [50] <https://www.pngwing.com/tr/free-png-hnhmw>, 17.12.2022.
- [51] Z.-M. Dang, J.-K. Yuan, J.-W. Zha, T. Zhou, S.-T. Li, and G.-H. Hu, "Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites", Progress in materials science, vol. 57, (4), pp. 660-723, 2012.
- [52] C. Xu, G. Fan, Y. Qu, Y. Liu, Z. Zhang, and R. Fan, "Core-shell structured tungsten carbide/polypyrrole metacomposites with tailorable negative permittivity at the radio frequency", Polymer, vol. 188, pp. 122125, 2020.
- [53] Y. Qu, Y. Du, G. Fan, J. Xin, Y. Liu, P. Xie, S. You, Z. Zhang, K. Sun, and R. Fan, "Low-temperature sintering Graphene/CaCu₃Ti₄O₁₂ nanocomposites with tunable negative permittivity", Journal of Alloys and Compounds, vol. 771, pp. 699-710, 2019.
- [54] G. Fan, Y. Zhao, J. Xin, Z. Zhang, P. Xie, C. Cheng, Y. Qu, Y. Liu, K. Sun, and R. Fan, "Negative permittivity in titanium nitride-alumina composite for functionalized structural ceramics", Journal of the American Ceramic Society, vol. 103, (1), pp. 403-411, 2020.
- [55] G. Fan, P. Xie, Z. Wang, Y. Qu, Z. Zhang, Y. Liu, and R. Fan, "Tailorable radio-frequency negative permittivity of titanium nitride sintered with different oxidation pretreatments", Ceramics International, vol. 43, (18), pp. 16980-16985, 2017.

- [56] R. K. Kotnala, Ahmad, S., Ahmed, A. S., Shah, J., Azam, A., "Investigation of structural, dielectric, and magnetic properties of hard and soft mixed ferrite composites", Journal of Applied Physics, vol. 112, (5), pp. 054323, 2012.
- [57] A. K. Jonscher, "Dielectric relaxation in solids", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 32, (14), pp. R57, 1999.
- [58] T. Midilli, "Kurşun içermeyen BNBT6 piezoelektrik seramiklerin elektriksel özellikleri üzerine Fe₂O₃, Nb₂O₅ ve Ta₂O₅ ilavelerinin etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [59] G. G. Raju, Dielectrics in electric fields: Tables, Atoms, and Molecules. CRC press, 2017.
- [60] A. M. Suvarıklı, "Organik maddelerde dielektrik polarizasyon olayın incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
- [61] C. B. Carter, and M. G. Norton, Ceramic materials: science and engineering. Springer, 2007.
- [62] H. Fröhlich, Theory of Dielectrics. Oxford University Press, 1987.
- [63] Dielectric Properties of Materials, <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~ksongpho/308/B.pdf>, 28.04.2022
- [64] M. USMAN, "Studies of Ferroelectric and Multiferroic Behavior in [Ba (Zr, Ti) O₃] 1-y:[CoFe₂O₄] y System", Quaid-i-Azam University, Islamabad, 2015.
- [65] E. Şanlıtürk, "Makine öğrenme algoritmalarıyla hatalı ürün tahmini", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [66] E. Kalkan, "Lineer regresyonda küçültme yöntemlerinin karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [67] Doğrusal Regresyon (Linear Regression), <https://bernatas.medium.com/do%C4%9Frusal-regresyon-linear-regression-8f562c19aadf>, 13.04.2022.
- [68] O. Aytuğ, "Şirket iflaslarının tahminlenmesinde karar ağacı algoritmalarının karşılaştırmalı başarımlar analizi", Bilişim Teknolojileri Dergisi, vol. 8, (1)2015.

- [69] G. Mutlu, "Makine öğrenmesi algoritmalarında kullanılan paralel hesaplama yaklaşımlarının zaman ve bellek performanslarının kıyaslanması", Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022.
- [70] N. J. Nilsson, "Introduction to Machine Learning, 1997", Standford University 2006.
- [71] M. A. ULAŞ, "Gauss Süreç Regresyonu ve Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Değerlendirilen Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Deneysel Veri İle Doğrulanması", Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 35, (1), pp. 379-388, 2023.
- [72] M. Korkmaz, A. Doğan, and V. Kirmaci, "Karşıt akışlı ranque-hilsch vorteks tüpünün lineer regresyon, destek vektör makineleri ve gauss süreç regresyonu yöntemi ile performans analizi", Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 8, (2), pp. 361-370, 2022.
- [73] M. E. Aytekin, "BSCCO süperiletkenler üzerine uygulanan yüksek peletizasyon basıncının etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [74] M. Çalış, "BSCCO süperiletkenler üzerine V-Na katkısının etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [75] V. Huse, V. Mote, and B. Dole, "Role of Pr in Eu-123 high Tc nanometer-sized superconductors", Ceramics International, vol. 39, (7), pp. 7317-7321, 2013.
- [76] C. Vijayakumar, M. Brightson, S. Rayar, and P. Selvarajan, "Development of YBa₂Cu₃O_{7-δ} superconducting thick film on Ba₂SmSbO₆ substrate material synthesised by combustion technique", Journal of Experimental Nanoscience, vol. 9, (5), pp. 525-532, 2014.
- [77] B. Sahoo, K. L. Routray, B. Panda, D. Samal, and D. Behera, "Excess conductivity and magnetization of CoFe₂O₄ combined with Y₁Ba₂Cu₃O_{7-δ} as a superconductor", Journal of Physics and Chemistry of Solids, vol. 132, pp. 187-196, 2019.
- [78] B. Prijamboedi, H. Takashima, R. Wang, A. Shoji, and M. Itoh, "Large dielectric constant arising from space-charge polarization in a SrTiO₃ thin film

grown on an $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ layer", *physica status solidi (a)*, vol. 202, (14), pp. R152-R154, 2005.

[79] I. Shivaraja, S. Matteppanavar, S. Deshpande, S. Rayaprol, and B. Angadi, "Investigation of space charge polarization behavior in $\text{Pb}_{0.9}\text{Bi}_{0.1}\text{Fe}_{0.7}\text{W}_{0.3}\text{O}_3$ ceramic", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 800, pp. 334-342, 2019.

[80] R. Cava, B. Batlogg, C. Chen, E. Rietman, S. Zahurak, and D. Werder, "Oxygen stoichiometry, superconductivity and normal-state properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ", *Nature*, vol. 329, (6138), pp. 423-425, 1987.

[81] S. Banerjee, C. Dasgupta, S. Mukerjee, T. Ramakrishnan, and K. Sarkar: "High temperature superconductivity in the cuprates: Materials, phenomena and a mechanism", in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2005, no. 1:AIP Publishing LLC, pp. 020001, 2018.

[82] N. Engheta, "Pursuing near-zero response", *Science*, vol. 340, (6130), pp. 286-287, 2013.

[83] M. G. Silveirinha, and N. Engheta, "Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using ϵ near-zero metamaterials", *Physical Review B*, vol. 76, (24), pp. 245109, 2007.

[84] Z. Wang, K. Sun, H. Wu, Y. Qu, J. Tian, L. Ju, and R. Fan, "Epsilon-near-zero response derived from collective oscillation in the metacomposites with ultralow plasma frequency", *Composites Science and Technology*, vol. 227, pp. 109600, 2022.

[85] A. Raza, I. Sultana, A. Bashir, S. Q. Hussain, Z. Ullah, S. H. M. Jafri, N.-U. Haq, S. Atiq, Y. Kim, and E.-C. Cho, "Morphological, Dielectric, and Impedance Study of Ag-Coated Lead Oxide–Lignocellulose Composite Sheets for Energy Storage and Tunable Electric Permittivity Applications", *Energies*, vol. 15, (21), pp. 8256, 2022.

[86] H. Wu, Z. Mu, G. Qi, Y. Zhang, X. Wang, P. Xie, N. Wu, H. Yuan, K. Sui, and R. Fan, "Negative permittivity behavior in Ti_3AlC_2 -polyimide composites and the regulation mechanism", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, pp. 10388-10397, 2021.

- [87] X. Yan, J. Gu, G. Zheng, J. Guo, A. M. Galaska, J. Yu, M. A. Khan, L. Sun, D. P. Young, and Q. Zhang, "Lowly loaded carbon nanotubes induced high electrical conductivity and giant magnetoresistance in ethylene/1-octene copolymers", *Polymer*, vol. 103, pp. 315-327, 2016.
- [88] A. Shukla, and R. Choudhary, "Study of aliovalent modification on dielectric and ac conductivity properties in lead titanate nanoceramics", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 22, pp. 1222-1228, 2011.
- [89] R. Devan, and B. Chougule, "Effect of composition on coupled electric, magnetic, and dielectric properties of two phase particulate magnetoelectric composite", *Journal of Applied Physics*, vol. 101, (1), pp. 014109, 2007.
- [90] A. K. Jonscher, "The 'universal' dielectric response", *nature*, vol. 267, (5613), pp. 673-679, 1977.
- [91] B. Parida, P. R. Das, R. Padhee, S. Behera, and R. Choudhary, "Structural, dielectric and electrical properties of a new tungsten bronze ferroelectric ceramics", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 25, pp. 2618-2626, 2014.
- [92] B. M. Greenhoe, M. K. Hassan, J. S. Wiggins, and K. A. Mauritz, "Universal power law behavior of the AC conductivity versus frequency of agglomerate morphologies in conductive carbon nanotube-reinforced epoxy networks", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 54, (19), pp. 1918-1923, 2016.
- [93] S. Elliott, "Ac conduction in amorphous chalcogenide and pnictide semiconductors", *Advances in physics*, vol. 36, (2), pp. 135-217, 1987.
- [94] S. Mollah, K. Som, K. Bose, and B. Chaudhuri, "ac conductivity in $\text{Bi}_4\text{Sr}_3\text{Ca}_3\text{Cu}_y\text{O}_x$ ($y=0-5$) and $\text{Bi}_4\text{Sr}_3\text{Ca}_3-z\text{Li}_z\text{Cu}_4\text{O}_x$ ($z=0.1-1.0$) semiconducting oxide glasses", *Journal of applied physics*, vol. 74, (2), pp. 931-937, 1993.
- [95] A. Linares, M. Canovas, and T. Ezquerro, "Nearly constant dielectric loss behavior in ionomers", *The Journal of chemical physics*, vol. 128, (24), pp. 244908, 2008.
- [96] W. Dieterich, and P. Maass, "Non-Debye relaxations in disordered ionic solids", *Chemical physics*, vol. 284, (1-2), pp. 439-467, 2002.

- [97] B. Behera, P. Nayak, and R. Choudhary, "Impedance spectroscopy study of NaBa₂V₅O₁₅ ceramic", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 436, (1-2), pp. 226-232, 2007.
- [98] A. F. Işık, "Sensör çeşitleri, robotik alanda kullanılan sensörler ve FSR sensör uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [99] J. Becker, C. Green, and G. Pearson, "Properties and uses of thermistors—Thermally sensitive resistors", *Electrical Engineering*, vol. 65, (11), pp. 711-725, 1946.
- [100] J. Park, "Microstructural and electrical properties of Y_{0.2}Al_{0.1}Mn_{0.27-x}Fe_{0.16}Ni_{0.27-x}(Cr_{2x})_{0y} for NTC thermistors", *Ceramics International*, vol. 41, (5), pp. 6386-6390, 2015.
- [101] B. Zhang, Q. Zhao, A. Chang, H. Ye, S. Chen, and Y. Wu, "New negative temperature coefficient thermistor ceramics in Mn-doped CaCu_{3-x}MnxTi₄O₁₂ (0 ≤ x ≤ 1) system", *Ceramics International*, vol. 40, (7), pp. 11221-11227, 2014.
- [102] U. Hanifah, and D. Triyono: "Dielectric properties enhancement of Mg-doped LaFeO₃ perovskite materials at room temperature", in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2242, no. 1:AIP Publishing LL, pp. 020004, 2020.
- [103] Z. G. Özdemir, D. Ş. Daşdan, P. Kavak, J. Pionteck, P. Pötschke, B. Voit, and B. S. Mısırlıoğlu, "MWCNT induced negative real permittivity in a copolyester of Bisphenol-A with terephthalic and isophthalic acids", *Materials Research Express*, vol. 7, (1), pp. 015337, 2020.
- [104] Y. Li, and N. Engheta, "Capacitor-inspired metamaterial inductors", *Physical Review Applied*, vol. 10, (5), pp. 054021, 2018.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. S. İç, N. E. Kalkan, Y. Karabul, Z. G. Özdemir, M. Kılıç, “Analyses of negative real permittivity behavior, AC conductivity and impedance properties of $(Y_xEu_{1-x})Ba_2Cu_3O_{6.5}$ ceramics”, *Ceramics International*, 2023.

Konferans Bildirileri

1. S. İç ve M. Kılıç, “Temperature and frequency dependent electrical properties of Eu substituted Y-Ba-Cu-O perovskite ceramic”, 4th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, (Eurasian SciEnTech 2022), Ankara, Türkiye.

Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü FYL-2021-4786 numaralı Yüksek Lisans projesi-Araştırmacı. “Yitriyum ve Evropiyum Bazlı Bakır Oksit Tabakalı Seramikler: Üretimi, Empedans Özelliklerinin Tespiti ve Yapay Zekâ ile Optimizasyonu”.
2. 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı, TÜBİTAK.