

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



PARİLEN-C TABANLI PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

UTKU GÜDÜLOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK

HAZİRAN - 2024

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Utku GÜDÜLOĞLU tarafından hazırlanan “**PARİLEN-C TABANLI PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **11.06.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Ahmet Tolga TAŞÇI Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Gazi Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Utku GÜDÜLOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PARİLEN-C TABANLI PİEZOELEKTRİK MALZEMELERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

UTKU GÜDÜLOĞLU

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler, elektrik enerjisinin günlük hayatta kullanımını önemli ölçüde artırmış ve bu durum elektrik enerjisinin depolanmasıyla ilgili uygulamaları kritik bir araştırma konusu haline getirmiştir. Dielektrikler, enerji depolamaya uygun malzemeler oldukları için, bu malzemelerin dielektrik özelliklerinin anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Piezoelektrik bir polimer olan Parilen-C, üstün elektriksel, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle bu uygulamalar için potansiyel bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda polimer malzemelere genellikle seramik, oksit, metal malzemeler katkılanarak dielektrik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında ise, Parilen-C polimeri kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle sentezlenmiş ve ağırlıkça çeşitli oranlarda poliüretan (PU), poli (metil metakrilat) (PMMA) ve aktif karbon katkısı eklenerek üretilen kompozitlerin dielektrik özellikleri incelenmiştir. Kompozitlerde kullanılan malzemelerin saf veya başka malzemelerle katkılanmış numunelerinin dielektrik özelliklerini inceleyen çalışmalar mevcut olsa da bu tez çalışmasında üretilen kompozitlerin dielektrik özelliklerini inceleyen bir çalışma mevcut değildir. Üretilen numunelerin dielektrik özellikleri 1-10 MHz frekans aralığında incelenmiştir. Numunelerin kapasitans, tanjant kaybı, empedans, direnç ve reaktans değerleri empedans analizörü kullanılarak ölçülmüş, dielektrik geçirgenlik ve dielektrik kayıplar hesaplanmıştır. Daha sonra numuneler polarize edilerek dielektrik özellikleri yeniden ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda, malzemelerin ölçüm yapılan frekans aralığında rezonans frekansları ve bu frekanslarda gösterdiği tepkiler gözlemlenmiş, malzemenin rezonans frekansından yüksek frekans değerlerinde indüktif davranış sergilediği görülmüştür. Yapılan katkılarla ile rezonans frekansında artma ve azalma yönünde değişimler görülmüştür. Polarizasyon işleminden sonra bazı numunelerde dielektrik geçirgenlik değerlerinde artışlar gözlemlense de dielektrik kayıp değerlerindeki artışlar çok daha fazladır. Dielektrik geçirgenlik değeri rezonans frekansı bölgesinde polarizasyon işleminden sonra en fazla 5,58 kat artış göstererek en yüksek 246 değerini almış, dielektrik kayıp değerleri ise bazı numunelerde 20.000 kat artarak 5000'e kadar ulaşmıştır. Dielektrik kayıp değerleri rezonans frekansına yaklaştıkça arttığı için, bu durum metamalzemelerin uygulamaları için gereken kayıp değerlerinden daha yüksek kayıplar elde edildiğini göstermektedir. Malzemenin gösterdiği kapasitif ve indüktif davranış empedans, direnç ve reaktans grafiklerinde de gösterilmiştir. Direnç ve reaktans değerleri kullanılarak Cole-Cole grafikleri oluşturulmuş ve malzemenin dağılımı ve yapısal özellikleri hakkında analizler yapılmıştır. Malzemelerin tam bir yarım daire gösterdiği görülmüş, dielektrik gevşeme dağılımının ölçüsü olan α değerleri hesaplanarak numunelerin homojenlik düzeyi hakkında kıyaslamalar yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER:Parilen-C, Piezoelektrik, Dielektrik, Rezonans frekansı, Kapasitans, Empedans

Haziran 2024, 89 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

DIELECTRIC PROPERTIES OF THE PARYLENE-C BASED DOPED PIEZOELECTRIC MATERIALS

UTKU GÜDÜLOĞLU

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR: PROF. DR. ÖZGÜR ÖZTÜRK**

Recent technological advancements have significantly increased the daily use of electrical energy, thereby making energy storage applications a critical area of research. Dielectrics, being suitable materials for energy storage, underscore the importance of understanding their dielectric properties. Parilen-C, a piezoelectric polymer, emerges as a potential material for these applications due to its superior electrical, physical, and chemical properties. While previous studies aimed to enhance the dielectric properties of polymer materials by adding ceramics, oxides, or metals, this thesis focuses on synthesizing Parilen-C polymer via chemical vapor deposition and investigating the dielectric properties of composites produced by adding varying proportions of polyurethane (PU), polymethyl methacrylate (PMMA), and activated carbon. While studies exist on examining the dielectric properties of composites using pure or other added materials, this thesis represents the first examination of composites produced in this manner. The dielectric properties of the produced samples were examined in the 1-10 MHz frequency range. Measurements including capacitance, dissipation factor, impedance, resistance, and reactance were conducted using an impedance analyzer, and dielectric permittivity and losses were calculated. Subsequently, the samples were polarized, and their dielectric properties were re-measured. The measurements revealed resonance frequencies of the materials within the tested frequency range and their responses at these frequencies, showing inductive behavior at frequencies higher than the resonance frequency. Changes in resonance frequency were observed following the additions made, both increasing and decreasing. While increases in dielectric permittivity were observed in some samples after polarization, increases in dielectric loss were much more significant. The dielectric permittivity value showed an increase of up to 5.58 times in the resonance frequency region after polarization, reaching a maximum value of 246, whereas dielectric loss values increased up to 20,000 times in some samples, reaching up to 5000. Since dielectric loss values increased as they approached the resonance frequency, this indicates that the losses obtained are higher than those required for metamaterial applications. The capacitive and inductive behaviors exhibited by the material were also illustrated in impedance, resistance, and reactance graphs. Cole-Cole plots were created using resistance and reactance values, and analyses were conducted regarding the distribution and structural properties of the material. It was observed that the materials exhibited a perfect semicircle, and the α values, were calculated to make comparisons about the homogeneity of the samples.

KEYWORDS: Parylene-C, Piezoelectric, Dielectric, Resonance frequency, Capacitance, Impedance

June 2024, 89 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve yüksek lisans eğitimim süresince bana kıymetli bilgi birikimi ve görüşleriyle rehberlik eden, TÜBİTAK projesinde bursiyer olarak çalışarak önemli tecrübeler edinmemi sağlayan çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Özgür ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince deneyimlerini ve kıymetli fikirlerini benimle paylaşan, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Öğr. Gör. Dr. Sedat KURNAZ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez savunma sınavıma jüri olarak katılan ve değerli fikirleri ile tez çalışmama katkıda bulunan Prof. Dr. Ahmet Tolga TAŞÇI ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA hocalarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışması sürecinde TÜBİTAK 120M636 nolu projenin olanaklarından yararlanılmıştır. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve yüksek lisans eğitimim süresince beni cesaretlendiren aileme de sonsuz teşekkür ederim.

UTKU GÜDÜLOĞLU

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER.....	4
2.1 Kapasitans ve Rezonans Frekansı.....	4
2.1.1 Kapasitans.....	4
2.1.2 Rezonans Frekansı	7
2.2 Dielektrik Sabiti ve Tanjant Kayıpları	8
2.2.1 Kompleks Dielektrik Sabiti	8
2.2.2 Tanjant Kaybı	9
2.3 Polarizasyon ve Dielektrik Gevşeme	10
2.4 Empedans, Direnç ve Reaktans.....	18
2.5 Kullanılan Malzemeler.....	19
3. LİTERATÜR ÖZETİ.....	21
4. YÖNTEM VE GEREÇLER.....	24
4.1 Parilen C'nin Sentezlenmesi	24
4.2 Numunelerin Üretim Süreci	25
4.3 Dielektrik Özelliklerin Ölçümü	26
5. BULGULAR	28
5.1 Kapasitans, Dielektrik Geçirgenlik ve Kayıplar	28
5.1.1 Kapasitans.....	28
5.1.2 Dielektrik Geçirgenlik	34
5.1.3 Dielektrik Kayıp	41
5.1.4 Tanjant Kaybı	46
5.2 Empedans, Direnç ve Reaktans.....	52
5.2.1 Empedans.....	52
5.2.2 Direnç.....	58
5.2.3 Reaktans.....	63
5.3 Cole-Cole Grafikleri	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ.....	89

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Parilen-C'nin kimyasal yapısı.....	3
Şekil 2.1 Ferroelektrik malzemeler için Landau-Ginzburg-Devonshire modelinin gösterimi (a) Ferroelektrikte serbest enerji F'nin elektrik polarizasyonu P'ye bağlı olarak gösterimi, (b) Serbest enerji F'den türetilen ferroelektrik polarizasyon-elektrik alanı ($P-E_F$) grafiği	6
Şekil 2.2 Seri kapasitör modelinin temsili gösterimi	6
Şekil 2.3 PAC tabanlı numunenin pozitif kapasitans ve negatif kapasitans bölgeleri ile yeşil oklarla gösterilen tepe değerleri	7
Şekil 2.4 Dipol moment vektörünün gösterimi	11
Şekil 2.5 Dielektrik malzemelerin elektrik alan uygulanmadığında ve uygulandığında gösterdiği yönelimler (a) polar dielektrikler, (b) polar olmayan dielektrikler.....	12
Şekil 2.6 Polarizasyon türlerinin şematik gösterimi	13
Şekil 2.7 Moleküler polarizasyonda harici bir elektrik alanına bağlı olarak kalıcı elektrik dipollerinin yönelimi, (a) Elektrik alan uygulanmadan önce, (b) elektrik alan uygulandıktan sonra (moleküller arası etkileşimler hariç) ve (c) elektrik alanı uygulandıktan sonra, (moleküller arası etkileşimler dahil).....	13
Şekil 2.8 Polarizasyon türlerinin görüldüğü frekans aralıklarının gösterimi	14
Şekil 2.9 PAC tabanlı numunelerin Cole-Cole grafiği.....	17
Şekil 2.10 PMMA'nın kimyasal yapısı	19
Şekil 2.11 PU'nun kimyasal yapısı	20
Şekil 4.1 (a) Parilen-C'nin polimerasyonu için üretim düzeneği ve (b) Parilen-C'nin monomer, dimer ve polimer formunun 2 boyutlu yapısı	24
Şekil 4.2 Parilen-C bazlı numunelerin üretim süreci	25
Şekil 4.3 (a) çözeltinin beher içerisindeki hali, (b) petri kabına dökülmesi ve kurutma işlemi sonrasındaki hali.....	26
Şekil 4.4 Wayne Kerr 6500B empedans analizörünün fotoğrafı	27
Şekil 5.1 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	30
Şekil 5.2 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	31
Şekil 5.3 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	32
Şekil 5.4 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	33
Şekil 5.5 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	37

Şekil 5.6 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	38
Şekil 5.7 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	39
Şekil 5.8 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	40
Şekil 5.9 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ'' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	42
Şekil 5.10 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ'' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	43
Şekil 5.11 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ'' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	44
Şekil 5.12 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ'' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	45
Şekil 5.13 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	48
Şekil 5.14 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	49
Şekil 5.15 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	50
Şekil 5.16 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	51
Şekil 5.17 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	54
Şekil 5.18 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	55
Şekil 5.19 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	56
Şekil 5.20 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	57
Şekil 5.21 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin Z'-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	59

Şekil 5.22 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin Z' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	60
Şekil 5.23 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin Z' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	61
Şekil 5.24 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin Z' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	62
Şekil 5.25 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin Z'' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	65
Şekil 5.26 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin Z'' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	66
Şekil 5.27 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin Z'' -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	67
Şekil 5.28 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin Z'' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri	68
Şekil 5.29 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC (c) %50 PAC, polarizasyon sonrası (b) %25 PAC (d) %50 PAC içeren numunelerin Cole-Cole grafikleri ve (e) %25 PAC (f) %50 PAC içeren numunelerin polarizasyon sonrası yakınlaştırılmış Cole-Cole grafikleri	71

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Debye ve Cole-Cole gevşeme modelleri, formülleri ve referanslar	16
Tablo 4.1 Ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimleri ve yüzdesel oranları	26
Tablo 5.1 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası rezonans frekansları ile rezonans frekanslarının polarizasyona bağlı değişimi	34
Tablo 5.2 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası kapasitans tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	34
Tablo 5.3 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası dielektrik geçirgenlik tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	41
Tablo 5.4 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası dielektrik kayıpların tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	46
Tablo 5.5 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası tanjant kaybı tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	52
Tablo 5.6 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası empedans tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	58
Tablo 5.7 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası direnç tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	63
Tablo 5.8 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası reaktans tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi	69
Tablo 5.9 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası α değerleri ve polarizasyon sonrası değişimi	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
C	: Kapasitans
f	: Frekans
kV	: Kilovolt
L	: İndüktans
MHz	: Megahertz
$\text{M}\Omega$	: Megaohm
nF	: Nanofarad
pF	: Pikofarad
Q	: Yük
$\tan\delta$	: Tanjant kaybı
V	: Gerilim
Z	: Empedans
Z'	: Direnç
Z''	: Reaktans
ϵ^*	: Kompleks dielektrik sabiti
ϵ'	: Dielektrik geçirgenlik
ϵ''	: Dielektrik kayıp

Kısaltmalar

AC	: Aktif karbon
MEMS	: Mikro-elektro-mekanik sistemler
PAC	: Parilen-C
PMMA	: Poli (metil metakrilat)
PU	: Poliüretan

1. GİRİŞ

Günümüzdeki teknolojik ilerlemeler sayesinde, elektrik enerjisinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisi şu anda dünya genelindeki birincil enerjinin yaklaşık %40'ını oluşturmakta olup, güneş, rüzgar ve gelişmiş nükleer enerji gibi enerji kaynaklarının kullanımının artması nedeniyle elektrik enerjisine olan talebin 2030 yılına kadar %50 oranında artması beklenmektedir (Li vd., 2019). Elektrik enerjisinin depolanması ile ilgili yapılan çalışmalar, bu talebin karşılanması ve elektriğin daha etkin ve verimli bir şekilde taşınabilmesi ve kullanılabilmesi için büyük önem taşımaktadır (Kalair vd., 2021). Elektrik enerjisinin depolanmasıyla ilgili gelişmeler, elektrik enerjisinin daha güvenli ve verimli bir şekilde depolanmasını sağlamakla birlikte ulaşım, iletişim ve elektrik dağıtımı gibi birçok alanda hayatımızda önemli değişikliklere neden olabilecek potansiyele sahiptir (Baer vd., 2017; Tan vd., 2006). Bu sebeple, elektrik enerjisinin verimli bir şekilde üretimi ve depolanması üzerine yoğun bir şekilde araştırma yapılmaktadır (Psarras, 2018). Dielektrikler, polarize olabilme özellikleri ve yük depolama kapasiteleri nedeniyle elektrik enerjisinin depolanmasına uygun malzemelerdir (Psarras, 2018). Dielektrik özelliklerin ölçülmesi ve yorumlanması, malzemelerin elektriksel karakterizasyonu, performans ve kalitesinin değerlendirilmesi ve bu malzemelerle yapılan katma değerli üretim süreçlerinin tasarımı gibi konularda araştırmacılara yol göstermektedir. Polimer nanokompozitler, seramikler ve diğer birçok malzemenin dielektrik özellikleri araştırma konusu olmuştur (Evans vd., 2007; Jilani vd., 2012; Khaled vd., 2015). Malzemelerin dielektrik özellikleri, malzeme bilimi, tıp, fizik, tarım gibi birçok uygulama alanında önemli bir rol oynamaktadır (Amin vd., 2019; Aydınalp vd., 2021; Lee vd., 2021).

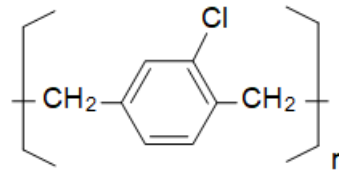
Dielektrik malzemeler, elektriksel olarak yalıtkan özellik gösteren ancak harici bir elektrik alan uygulandığında enerji depolama yeteneğine sahip olan malzemelerdir. Benzersiz elektriksel özellikleri nedeniyle dielektrik malzemeler, elektronik cihazlardan güç sistemlerine kadar birçok endüstriyel uygulama alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Dielektrik malzemeler, çeşitli uygulama alanlarında yarıiletkenlerin performansını artırmada önemli bir role sahiptir. Uygulamalarda kullanılacak doğru

dielektrik malzemenin seçilmesi, yarıiletken cihazların stabilitesi, moleküler yapısı, yüzey özellikleri, taşıyıcı hareketliliği gibi birçok özelliği önemli ölçüde etkilemektedir (Jung vd., 2008; Li vd., 2016). Elektronik uygulamalarda en sık kullanılan dielektrik malzemeler arasında polimerler, seramikler ve polimer mikro veya nanokompozitler bulunmaktadır (Cheng vd., 2015; Pleşa vd., 2016; Prateek vd., 2016).

Dielektrik malzemeler içerisinde yer alan polimer malzemeler, benzersiz özellikleri ve çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Polimerler mekanik mukavemet göstermeleri, yüksek sıcaklıklardaki kararlılıkları, düşük iyonik iletkenlikleri, düşük dielektrik kayıpları gibi özellikleri nedeniyle kapasitif enerji depolama, transistör ve çeşitli sensör uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir (Hoang vd., 2017; Liu vd., 2017; Li vd., 2021; Marszalek vd., 2017; Nasrallah vd., 2020). Ayrıca literatürde polimer malzemelerin elektronik ve elektrik güç sistemleri uygulamalarında boyut ve ağırlık açısından ciddi avantajlar sağladığı da belirtilmektedir (Liu vd., 2017; Sonoda vd., 2011). Polimerlerin dielektrik özellikleri, geliştirilmiş özelliklere sahip polimer kompozitler oluşturmak için inorganik malzemeler gibi katkı maddeleri veya dolgu maddelerinin eklenmesiyle artırılabilir (Xie vd., 2013). Bunun yanında yüksek dielektrik sabitlerine sahip polimer nanokompozitlerin geliştirilmesi, mükemmel dielektrik performansı elde etmek için araştırılan polimer matrislere yüksek dielektrik sabitli seramik nano dolgu maddelerinin dahil edilmesi gibi yöntemlerle araştırmanın odak noktası olmuştur (Yang vd., 2013). Bu uygulamalarda kullanılan polimer malzemelere örnek olarak poliviniliden florür (PVDF), polietereterketon (PEKK), ve silseskioksan gibi malzemeler verilebilir (Billah, 2019).

Polimer malzemelerden biri olan Parilen-C (poly(chloro-para-xylylene), PAC), iyi elektriksel yalıtım göstermesi, biyouyumluluğu, kimyasal dayanıklılığı ve esnek ve şeffaf bir malzeme olması nedeniyle dielektrik kapasitör uygulamaları için iyi bir alternatif olabilir. Ayrıca, piezoelektrik polimer malzemeler, mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) alanında sensör ve aktüatör uygulamalarında sıkça tercih edilen malzemelerdir. PAC, piezoelektrik özellik göstermesi, kolay üretilebilir olması, hafif ve sağlam bir yapıya sahip olması nedeniyle bu tür uygulamalarda kullanılacak

malzemelerden biridir. PAC'ın uygulama alanları arasında tentler, defibrilatörler, giyilebilir sensör uygulamaları, mikrovalfler, ivmeölçerler, esnek elektrotlar, ilaç salım sistemleri, hücre kültürü altlıkları ve nöral proplar gibi birçok uygulama bulunmaktadır (Chen vd., 2022; Chindam vd., 2015; Chou vd., 2021; Khawaji vd., 2017; Schwerdt vd., 2018; Song vd., 2021; Zhang vd., 2018). Şekil 1.1'de Parilen-C'nin kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Parilen-C'nin kimyasal yapısı

Bu tez çalışmasında ise üretimi gerçekleştirilen PAC polimerine belirli oranlarda poliüretan (PU), poli (metil metakrilat) (PMMA) ve aktif karbon eklenerek kompozit numuneler üretilmiş ve frekansa bağlı dielektrik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Sonrasında, bu malzemelere polarizasyon işlemi uygulanarak ölçümler tekrarlanmış ve her bir numunenin dielektrik özelliklerinin polarizasyon öncesi duruma göre gösterdiği değişimler analiz edilmiştir. Literatürde PAC'ın saf halde ve metal, oksit katkılarla yapılmış halde dielektrik özelliklerini inceleyen çalışmalar mevcut olsa da bu tez çalışmasında üretimi yapılan kompozitlerin dielektrik özelliklerini inceleyen bir çalışma mevcut değildir. Yapılan ölçümlerin sonucunda tüm numunelerin rezonans frekansları gözlemlenmiş, pozitif ve negatif rezonans tepeleri görülmüştür. Rezonans frekansından büyük frekans değerlerinde negatif kapasitans değerleri gözlemlenmiş, malzemenin indüktif davranış gösterdiği görülmüştür. Ayrıca numunelerin Cole-Cole grafikleri incelenmiş, malzemelerin yapısı ve dielektrik gevşeme davranışları analiz edilmiştir.

2. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER

Dielektrik özellikler, yüzyılı aşkın bir süredir elektronik ve malzeme bilimi alanlarında önemli bir araştırma konusudur. Dielektrikler hakkındaki araştırmalarda, dielektrik geçirgenlik, malzemelerin elektrik alanları altındaki davranışları ve dielektrik gevşeme mekanizmalarına odaklanılmaktadır (Haertling vd., 1999; Ke vd., 2006; Sinclair vd., 2002). Bir sistemin elektrik yükü depolama kapasitesi olan kapasitans, malzemelerin dielektrik özelliklerinin açıklanmasında önemli bir parametredir. Dielektrik geçirgenlik, bir malzemenin elektrik alanını ne kadar iletebildiğinin bir ölçüsüdür ve kapasitans ile doğru orantılıdır. Dielektrik kayıp ise bir dielektrik malzeme alternatif bir elektrik alanına maruz kaldığında ısı olarak dağılan enerjidir. Dielektrik kayıpların dielektrik geçirgenliğe oranı ise tanjant kaybı olarak adlandırılır. Ayrıca empedans, direnç ve reaktans parametreleri de malzemelerin dielektrik karakteristiğini açıklayan parametrelerdir. Empedans, bir devrenin alternatif akıma karşı gösterdiği toplam direnci ifade eder. Direnç, bir devrenin doğru akıma karşı gösterdiği zorluktur. Reaktans ise bir devrenin alternatif akıma karşı gösterdiği direncin sanal bileşenidir. Ayrıca malzemelerin, enerji yoğunluğu, esnekliği, frekansa bağıllığı gibi özellikleri de dielektrik özelliklerin açıklanmasında kullanılan özelliklerdendir (Hiremath vd., 2021; Ibach ve Lüth, 1991; Şakıyan vd., 2007). Dielektrik gevşeme ise bir dielektrik malzemenin kutuplanmasının, uygulanan elektrik alan kaldırıldıktan sonra zamanla azalmasıdır. Polar, iyonik, elektronik, arayüzey gevşemeleri gibi birçok dielektrik gevşeme mekanizması bulunmaktadır (Bravard, 2000).

2.1 Kapasitans ve Rezonans Frekansı

2.1.1 Kapasitans

Malzemelerin dielektrik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir parametre olan kapasitans (C), bir kapasitörde depolanmış olan elektrik yükünün uygulanan voltaja oranını ifade eden bir değerdir (Bravard, 2000; Lu, 2008). Kapasitansın yük (Q) ve gerilim (V) ile olan bağıntısı Denklem 2.1’de verilmiştir.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

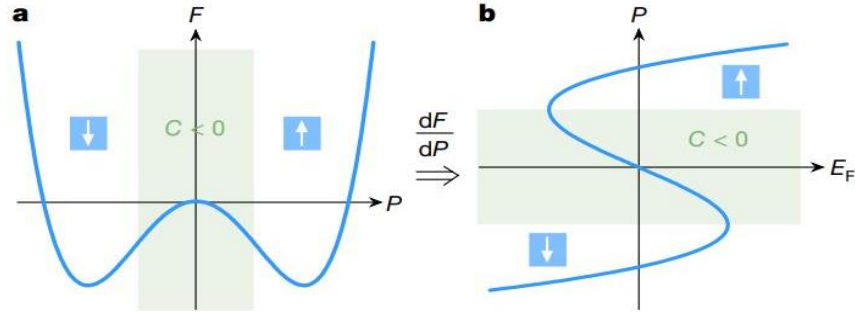
Bunun yanı sıra kapasitansın, kapasitörde depolanan elektrik enerjisi ile ilişkisi Denklem 2.2’de verilmektedir (Iniguez vd., 2019).

$$U = \frac{Q^2}{2C} \quad (2.2)$$

Denklemde U , depolanan elektrik enerjisini göstermektedir. Elektriksel potansiyel enerji, kapasitörde depolanan enerji olarak tanımlanır ve daima pozitif bir değer alır. Bu yüzden Denklem 2.2’ye göre, kapasitansın daima pozitif bir değer alması gereklidir (Iniguez vd., 2019). Ancak bazı özel durumlarda negatif kapasitans değeri elde edilebilir. Negatif kapasitanslı bir kondansatörde yük arttıkça enerji azaldığından, negatif kapasitanslı bir kondansatör kendiliğinden şarj olur (Iniguez vd., 2019). Negatif kapasitansın elektronik devrelerde avantaj sağladığı varsayımı nedeniyle negatif kapasitans durumu uzun süredir ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur (Behr ve Tarpley, 1932; Harty, 2002; Verman, 1931).

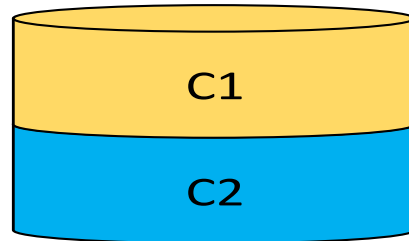
Ferroelektrik malzemelerdeki negatif kapasitans etkisi çok düşük güç tüketimi ile nanoelektronik uygulamalara olanak sağladığından ötürü araştırmacıların dikkatini çekmiştir (Iniguez vd., 2019; Wang vd. 2020; Wong ve Salahuddin, 2018). Ferroelektriklerde negatif kapasitans ilk olarak 1976 yılında Landauer tarafından önerilmiş, sonrasında da malzeme optimizasyonu, ultra düşük güçlü nanoelektronik uygulamaları, voltaj amplifikasyonu gibi birçok alandaki uygulamalara olanak tanınması nedeniyle önemli bir araştırma konusu olmuştur (Iniguez vd., 2019). Bir malzemede negatif kapasitansın varlığı, indüktif davranışa eşdeğer olmakla birlikte sistemin doğası gereği geometrisi bir kapasitans önereceği için negatif bir kapasitans olarak ifade edilir (Jones vd., 1998). Ferroelektrik malzemelerdeki olayları modelleyen Landau-Ginzburg-Devonshire modeli, negatif kapasitans tanımının ortaya çıkışını açıklamaktadır. Bu modele göre, polarizasyon değerinin 0’a ($P \approx 0$) yakın olduğu enerji minimumları arasındaki enerji bariyeri bölgesinde ferroelektrik negatif kapasitansa sahiptir. Bu durum Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Hoffmann vd., 2019). Negatif kapasitenin bir başka açıklaması da ferroelektrik anahtarlama sırasında kapasitör üzerindeki etkili voltajın azalmasıdır. Günümüzde negatif kapasitans

malzemelerinin potansiyel uygulamalarına örnek olarak alan etkili transistörler, enerji depolama, yüksek güçlü mikrodalga filtreleri verilebilir (Hoffmann vd., 2019; Sun vd., 2019).



Şekil 2.1 Ferroelektrik malzemeler için Landau-Ginzburg-Devonshire modelinin gösterimi (a) Ferroelektrikte serbest enerji F 'nin elektrik polarizasyonu P 'ye bağlı olarak gösterimi, (b) Serbest enerji F 'den türetilen ferroelektrik polarizasyon-elektrik alanı ($P-E_F$) grafiği

Malzemelerin negatif kapasitans durumunda kararlı bir davranış sergilememesi nedeniyle negatif kapasitansın ölçümü zor olmuştur. Ancak negatif kapasitans davranışı gösteren malzemeler seri indüktör-kondansatör devresinin özelliklerini gösterdiğinden seri kapasitör modeli kullanılarak negatif kapasitans durumunun ölçümü gerçekleştirilebilir (Khan vd., 2015; Wang vd., 2020). Seri kapasitör modelinin gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Seri kapasitör modelinde, toplam kapasitans her dielektrik kapasitansın seri eşdeğerine eşittir ($1/C_{top}=1/C_1+1/C_2$) ve frekans $f=1/2\pi(\sqrt{LC})$ değerini aldığı anda "dielektrik rezonans" meydana gelir, böylece negatif kapasitans rezonans frekansı bölgesinde açıkça elde edilir (Iniguez vd., 2019; Wang vd., 2020). Bu denklemde L değeri indüktansı ifade eder.



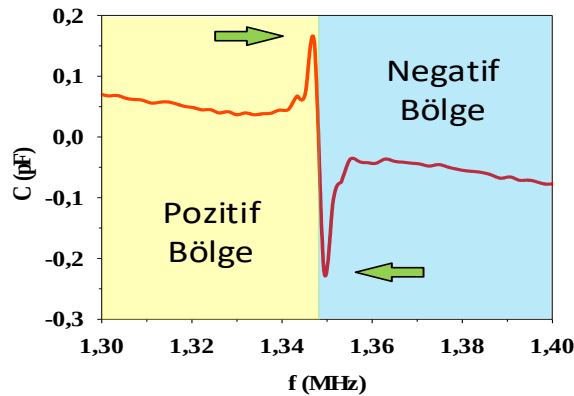
$$1/C_{top}=1/C_1+1/C_2$$

Şekil 2.2 Seri kapasitör modelinin temsili gösterimi

Dielektrik rezonans, antenler, metamatzemeler ve elektronik cihazların tasarımında önemli rol oynamaktadır. Dielektrik malzemelerin rezonans özellikleri teorik analizler ve sayısal hesaplamalar kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Kaneki ve Kobayashi, 1984; Yadav vd., 2009). Bu incelemeler dielektrik rezonatörler gibi dielektrik malzemelerin rezonans davranışını anlamak için önemlidir.

2.1.2 Rezonans Frekansı

Rezonans frekansı, bir sistemin doğal titreşim frekansına eşit olan ve sistemin maksimum enerji emdiği frekanstır. Polimerlerin dielektrik özelliklerinin incelenmesinde çok önemli bir parametredir. Bir malzemenin geçirgenlik ve kayıp tanjanı gibi dielektrik özelliklerinde bir rezonans tepkisi sergilediği frekansı ifade eder. Şekil 2.3'teki grafik bu rezonans tepkisine örnek olarak verilmiştir. Polimerlerin rezonans frekansını anlamak, malzemenin elektromanyetik alanlar altındaki davranışı ve dielektrik rezonatör antenleri gibi alanlardaki potansiyel uygulamaları için önem taşımaktadır (Oliveira vd., 2015). Ayrıca, polimerlerin dielektrik özellikleri, moleküler polarizasyon, atomik polarizasyon ve elektron polarizasyonu gibi belirli doğal frekanslarla ilişkili farklı türdeki polarizasyon mekanizmalarından etkilenir (He vd., 2022). Polimer kompozitlerin rezonans frekansı, çeşitli dolgu maddeleri veya katkı maddeleri dahil edilerek değiştirilebilir (Hanemann vd., 2011). İnorganik dolgu maddelerinin veya organik katkı maddelerinin eklenmesi, polimerlerin dielektrik sabitini değiştirerek geçirgenliğin artmasına yol açabilir (Hanemann vd., 2011).



Şekil 2.3 PAC tabanlı numunenin pozitif kapasitans ve negatif kapasitans bölgeleri ile yeşil oklarla gösterilen tepe değerleri

2.2 Dielektrik Sabiti ve Tanjant Kayıpları

2.2.1 Kompleks Dielektrik Sabiti

Kompleks dielektrik sabiti (ϵ^*) malzemelerdeki elektrik dipollerinin harici bir elektrik alanını ne kadar iletebildiğinin ölçüsü olan bir parametredir. Kompleks dielektrik sabitinin reel (gerçek) kısmı (ϵ') dielektrik geçirgenlik, sanal kısmı (ϵ'') ise dielektrik kayıp olarak adlandırılır (Xie vd., 2022). Dielektrik geçirgenlik bir malzemenin elektrik enerjisini bir elektrik alanında depolayabilme yeteneğini tanımlayan temel bir parametredir. Bir malzemenin uygulanan bir elektrik alanı tarafından ne ölçüde polarize edilebileceğini ölçerek, onun kapasitansını ve genel dielektrik davranışını etkiler (Ibach ve Lüth, 1991). Kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları ile ilişkisi Denklem 2.3'te gösterilmektedir.

$$(\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'') \quad (2.3)$$

Dielektrik sabiti ile kapasitans arasındaki bağıntı Denklem 2.4 ile ifade edilebilir:

$$C = \epsilon A/d \quad (2.4)$$

Denklemde C malzemenin kapasitansını, ϵ dielektrik sabitini, A üretilen malzemenin yüzey alanını ve d ise malzemenin kalınlığını (alt ve üst yüzey arasındaki mesafe) ifade etmektedir. $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon'$ bağıntısı Denklem 2.4'te yerine yazıldığında Denklem 2.5 elde edilir.

$$C = \epsilon_0 \epsilon' A/d \quad (2.5)$$

formülü elde edilir. ϵ_0 boşluğun dielektrik katsayısını ifade eder ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Farad/metre) (Badalı, 2015).

Kapasitans ile dielektrik geçirgenlik doğru orantılı olduğundan kapasitans negatif olduğunda dielektrik geçirgenlik de negatif değerler alır. Negatif geçirgenlik, tipik olarak MHz ve üzerindeki frekanslarda meydana gelen bir olgudur (Yan vd., 2013). Drude ve Lorentz modelleri, negatif dielektrik geçirgenliğin açıklanmasında önemli

bir yere sahiptir. Drude modeli, metallerdeki elektronların taşıma özelliklerini anlamada önemli bir kavramdır. Bu model, katılarda elektron iletkenliğini, elektronik polarizasyonu dikkate alarak açıklar (Jiang vd., 2010). Drude modeline göre, iletken malzemenin katkısı belirli bir eşiği aştığında, yapı iletken hale gelir ve elektronların hareketi negatif geçirgenliğe neden olur. Lorentz rezonans modeli, özellikle elektromanyetik fenomenler bağlamında, rezonans sistemlerinin davranışını anlamada temel bir kavramdır. Bu modelde rezonanslar, malzemenin rezonans frekansının malzemenin geometrik özelliklerine olan bağıntısı olarak tanımlanır (Li vd., 2021). Bu model, optik, malzeme bilimi ve fizik gibi çeşitli alanlarda, rezonans sistemlerinin dış uyarıcılara tepkisini analiz etmek ve tahmin etmek için yaygın olarak kullanılır (Oughstun ve Cartwright, 2003; Romano vd., 2014). Lorentz modeline göre dielektrik geçirgenliğin değeri Denklem 2.6'da verilmektedir. Bu dipoller, rezonans yaratarak dielektrik geçirgenliğin rezonans frekansından büyük frekans değerlerinde negatif bir değere düşmesine neden olur. Ancak, literatürde bu iki modelin dielektrik davranışı net bir şekilde açıklayamadığı da belirtilmektedir (Leng vd., 2020). Ayrıca negatif geçirgenlik, yüklerin uygulanan voltaj yönünün tersine hizalandığını gösteren bir durumdur.

$$\epsilon' = 1 + \frac{\omega_p^2 (\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega \omega_r^2} \quad (2.6)$$

$\omega_0 = 2\pi f_0$ karakteristik frekans, ω açısal frekans, ω_r sönümlenme frekansı ve ω_p ise örgü titreşiminin enine frekansıdır.

Dielektrik kayıp (ϵ''), bir dielektrik malzeme alternatif bir elektrik alanına maruz kaldığında ısı olarak dağılan enerjiyi ifade eder. Çeşitli uygulamalarda dielektrik malzemelerin verimliliğini ve performansını değerlendirmek için kritik bir parametredir (Hiremath vd., 2021).

2.2.2 Tanjant Kaybı

Tanjant kaybı, dielektrik malzemelerin karakterizasyonunda kritik bir parametredir. Düşük tanjant kaybının elde edilmesi, dielektrik malzemelerin kalite faktörünü en üst düzeye çıkarmak, daha küçük bileşenlerin daha yüksek verimlilik ve daha düşük

maliyetle üretilmesini sağlamak için gereklidir. Tanjant kayıpları dielektrik sabitinin imajiner kısmının reel kısmına oranıdır (Knight ve Nur, 1987). Bu ilişki Denklem 2.7’de verilmektedir.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.7)$$

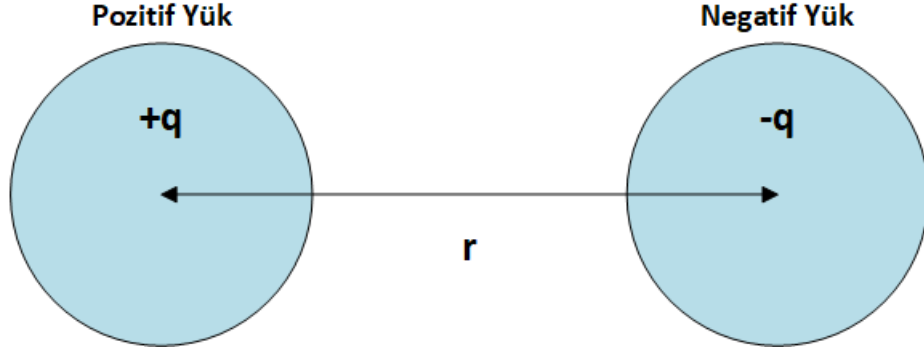
Tanjant kaybı, özellikle enerji emiliminin hassas kontrolünün ve ısı kayıplarının önemli olduğu uygulamalarda önemli bir faktördür (Gabriel vd., 1998). Ayrıca, literatürde tanjant kaybının yüksek hızlı ve yüksek frekanslı uygulamalar için düşük kayıplı dielektrik malzemelerde karakterize edildiği ve yüksek frekanslı işlemlerde dielektrik malzemelerin enerji dağılımı ve verimliliği hakkında önemli bilgiler sağladığı belirtilmektedir (O’Connell vd., 2008). Literatürde tanjant kaybının %5 değerinden daha az olduğunda düşük olduğu belirtilmiştir (Dang vd., 2012; Dang vd., 2013; Shen vd., 2007).

2.3 Polarizasyon ve Dielektrik Gevşeme

Polarizasyon ve dielektrik gevşeme, malzemenin dielektrik özellikleri konusunda iki temel mekanizmadır. Polarizasyon, elektrik alanın etkisi altındaki yüklerin belirli bir konumdan diğerine hareket etmesi, yani kutuplanması olarak tanımlanabilir, dielektrik gevşeme ise elektrik alan kaldırıldıktan sonra kutuplanmanın zamanla azalarak yüklerin eski konumuna dönmelerini ifade eden bir kavramdır. Dielektrik polarizasyon ve gevşemenin miktarı, zaman ve frekansa bağlı olarak ölçülebilir (Sy, 1996).

Yük dağılımının elektrik dipol momenti (μ), negatif yük merkezinden pozitif yük merkezine doğru bir vektör olarak tanımlanır ve Denklem 2.8’deki gibi gösterilebilir (Psarras, 2018).

$$\vec{\mu} = q\vec{r} \quad (2.8)$$



Şekil 2.4 Dipol moment vektörünün gösterimi

q , pozitif veya negatif yük miktarının mutlak değerini, r ise yük merkezlerinin arasındaki uzaklığı ifade eder. Bir malzemede farklı türden dipoller mevcut olması durumunda dipol sayısı i ise, net dipol moment Denklem 2.9 ile ifade edilir.

$$\vec{M} = \sum_i q_i \vec{r}_i \quad (2.9)$$

Bir dielektrik malzemedeki polarizasyon ise net dipol momentin (M) birim hacime (V) oranı ile bulunur, bu bağıntı Denklem 2.10'da verilmiştir.

$$\vec{P} = \frac{\vec{M}}{V} \left(\frac{C}{m^2} \right) \quad (2.10)$$

Elektrik alan (E), bir alan içerisindeki birim yük başına düşen kuvvet olarak tanımlanır, bu bağıntı Denklem 2.11'de verilmektedir.

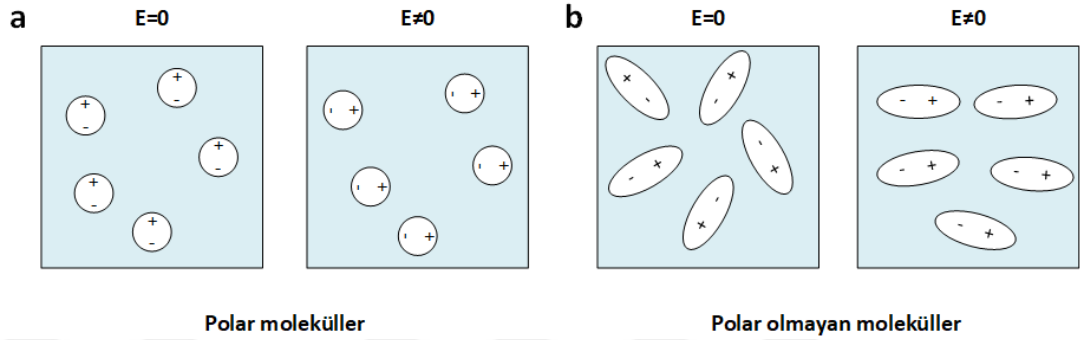
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.11)$$

Elektriksel yer değiştirme ile elektrik alan arasındaki ilişki Denklem 2.12'de verilmektedir.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.12)$$

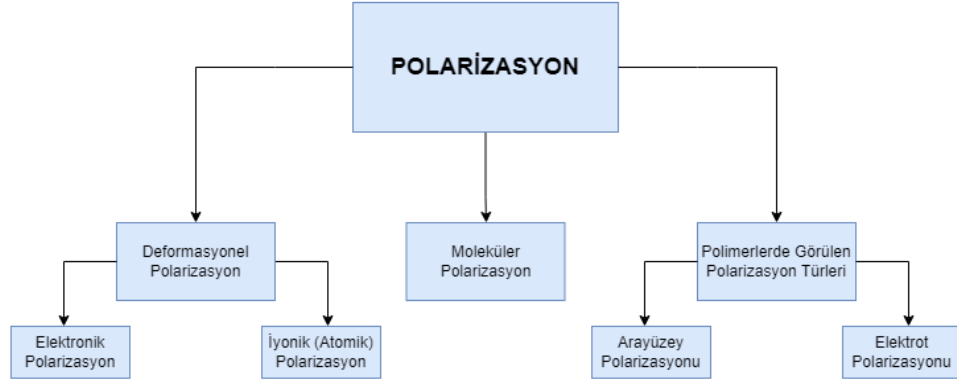
Dielektrik malzemeler polar ve polar olmayan dielektrikler olarak iki temel kategoriye ayrılabilir. Polar dielektrik molekülleri, pozitif ve negatif yüklerin dağılım merkezleri çakışmadığından bir elektrik alanı uygulanmadığında da kalıcı elektrik dipol momenti

sergiler. Polar olmayan dielektrik molekülleri, pozitif ve negatif yüklerin simetrik dağılımı nedeniyle kalıcı elektrik dipol momentleri sergilemezler. Ancak dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında, alan uygulanan yönde indüklenen dipol momentler oluşur (Psarras, 2018).

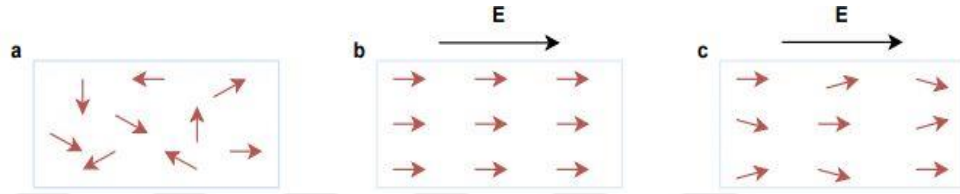


Şekil 2.5 Dielektrik malzemelerin elektrik alan uygulanmadığında ve uygulandığında gösterdiği yönelimler (a) polar dielektrikler, (b) polar olmayan dielektrikler

Polarizasyonun iki türü bulunmaktadır, bunlar deformasyonel polarizasyon ve moleküler (dipolar) polarizasyondur. Deformasyonel polarizasyon, elektronik ve iyonik (atomik) polarizasyon olmak üzere ikiye ayrılır. Elektronik polarizasyon, dış bir elektrik alanı uygulandığında elektronların dengeli konumlarından hareket etmesi sonucunda indüklenen bir dipol oluşturulmasıyla gerçekleşir. İyonik polarizasyonda ise harici bir elektrik alanının varlığında denge durumlarından ayrılan atomlar tarafından paylaşılan elektron bulutlarının dağılımı nedeniyle bir molekülde ortalama bir dipol momentleri indüklenebilir. Moleküler (dipolar) polarizasyon ise polar dielektriklerde dış elektrik alanın dipolleri kendi yönü ile aynı hizaya gelmeye zorlayarak başlangıçtaki rastgele yönelimlerini değiştirmesi olarak açıklanabilir. Bu değişim Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Ayrıca polimer malzemelerde karşılaşılan bazı farklı polarizasyon türleri vardır. Bunlardan biri, heterojen sistemlerde ara yüzeyde veya ara fazda yük birikmesinden kaynaklanan arayüzey polarizasyonudur (Senturia ve Sheppard, 1986). Diğeri ise elektrot polarizasyonu olarak adlandırılır ve elektrot ile polimer arasındaki arayüzde yüklerin birikmesinden kaynaklanır (Adamec, 1972; Kienle ve Race, 1934; MacDonald, 1987).

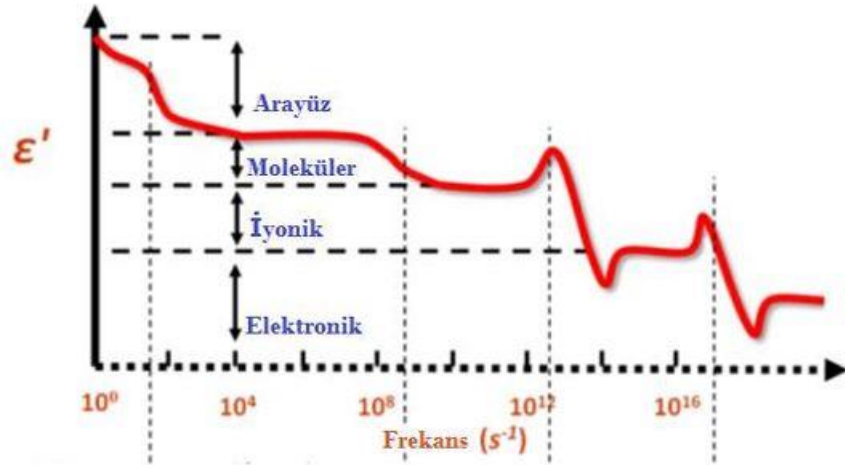


Şekil 2.6 Polarizasyon türlerinin şematik gösterimi



Şekil 2.7 Moleküler polarizasyonda harici bir elektrik alanına bağlı olarak kalıcı elektrik dipollerinin yönelimi, (a) Elektrik alan uygulanmadan önce, (b) elektrik alan uygulandıktan sonra (moleküller arası etkileşimler hariç) ve (c) elektrik alanı uygulandıktan sonra, (moleküller arası etkileşimler dahil)

Moleküler polarizasyon, polimerlerin özel moleküler yapıları nedeniyle dipol yönelimlerinin malzemenin stabilitesine ve dielektrik tepkisine etki etmesinden dolayı polarizasyon mekanizmaları arasında en önemlisi olarak kabul edilir. Ayrıca moleküler polarizasyon, iyi ferroelektrik özelliklere ve yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip malzemelerin tasarlanmasında da önemlidir. Bu nedenle moleküler polarizasyondan dolayı meydana gelen dielektrik gevşemenin incelenmesi, polimerlerin yapısal özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlayabilir (Sy, 1996). Şekil 2.8'de polarizasyon türlerinin gösterdiği tepki süreleri dielektrik geçirgenliğin frekansa bağlı grafiğinde gösterilmektedir (Şener, 2020). Moleküler polarizasyon 10^4 - 10^8 Hz frekans aralığında meydana gelmektedir (Zhang, 2013).



Şekil 2.8 Polarizasyon türlerinin görüldüğü frekans aralıklarının gösterimi (Şener, 2020)

Bir malzemeye dışarıdan sabit bir dielektrik alan uygulandığında zamanla artan ve bir süre sonra sabit bir değere ulaşan elektriksel yer değiştirme (D) meydana gelir. Alan uygulandıktan sonra zaman içerisinde yer değiştirme sıfıra doğru azalır, bu duruma dielektrik gevşeme denir. Doğrusal bir sistemde dielektrik alan ile elektriksel yer değiştirme arasındaki ilişki Denklem 2.13 ile ifade edilebilir (Horowitz vd., 1989).

$$\varepsilon = \vec{D}/\vec{E} \quad (2.13)$$

Elektriksel yer değiştirme zamana bağlı olarak ifade edilirse;

$$\vec{D}(t) = [\varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \Phi(t)]\vec{E} \quad (2.14)$$

denklemini elde edilir (ε_{∞} $t=0$ için gevşeme olmadan önceki dielektrik geçirgenliği, ε_0 ise $t=\infty$ için gevşeme sonrası dielektrik geçirgenliği ifade eder).

$\Phi(t)$ ise Denklem 2.15 ve Denklem 2.16'daki şartları sağlayan normalize edilmiş dielektrik fonksiyonu ifade eder.

$$\Phi(t) = 1 - \phi(t) = 0 \quad (t = 0) \quad (2.15)$$

$$\Phi(t) = 1 - \phi(t) = 1 \quad (t = \infty) \quad (2.16)$$

$\phi(t)$ ise polarizasyon için normalize edilmiş bozunma fonksiyonunu ifade eder.

$t=0$ anında dielektrik alan uygulanmaya başladığında elektriksel yer değıştirme miktarındaki artış $t=\Theta$ zamanında Denklem 2.17 ile ifade edilebilir.

$$d\vec{D} = \varepsilon_{\infty} d\vec{E} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \Phi(t - \Theta) d\vec{E} \quad (2.17)$$

Süperpozisyon ilkesi uygulanırsa, değışen bir elektrik alanı $E(\Theta)$ tarafından t zamanında neden olunan toplam yer değıştirme, tüm artışların toplamına (dD) eşit olur, bu eşitlik Denklem 2.18’de verilmektedir.

$$\vec{D}(t) = \varepsilon_{\infty} \vec{E}(t) + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \int_{-\infty}^t \frac{d\vec{E}(\Theta)}{d\Theta} \Phi(t - \Theta) d\Theta \quad (2.18)$$

Denklem 2.18, $E=E_0 \exp(i\omega t)$ ve $t-\Theta = u$ yazılarak düzenlenirse:

$$\varepsilon^*(\omega) = D(t)/\vec{E}(t) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \exp(-i\omega u) \frac{d\phi(u)}{du} du \quad (2.19)$$

denklemini elde edilir. Denklemdaki $\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$ kompleks dielektrik sabitini ifade eder. Denklem 2.18 düzenlenirse Denklem 2.20 elde edilir.

$$\frac{\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}} = \int_0^{\infty} \frac{d\phi}{dt} \exp(-i\omega t) dt \quad (2.20)$$

Bu denklem, malzemenin frekans alanındaki dielektrik tepkisinin zamana bağılı olarak bozunmasıyla olan ilişkisini ifade eder. İntegralin çözümü bozunum fonksiyonunun bilinmesini gerektirir. Yalnızca tek bir gevşeme süresi varsayılarak bozunma fonksiyonu Denklem 2.21’deki gibi ifade edilebilir:

$$\phi(t) = \exp(-\frac{t}{\tau}) \quad (2.21)$$

Yukarıdaki denklemde τ ifadesi gevşeme süresini ifade eder.

Denklem 2.21’deki ifade Denklem 2.20’de yerine yazılırsa:

$$\frac{\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}} = \frac{1}{1 + i\omega\tau} \quad (2.22)$$

Denklemini (Debye denklemi) elde edilir. Ayrıca dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları da aşağıdaki denklemlerle (Denklemler 2.23 ve Denklem 2.24) ifade edilebilir:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.24)$$

Debye denklemi her ne kadar dielektrik gevşeme mekanizmasını açıklayan bir denklem olsa da çoğu malzeme bu denkleme uymaz ve bu durum farklı gevşeme mekanizmalarının geliştirilmesine neden olmuştur. Bu mekanizmalardan biri olan Cole-Cole modelinin formülü Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1 Debye ve Cole-Cole gevşeme modelleri, formülleri ve referanslar

Formül	Model	Referans
$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2}$	Debye	(Debye, 1912)
$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) \frac{1}{1 + i\omega\tau^{1-\alpha}}$	Cole-Cole	(Cole ve Cole, 1941)

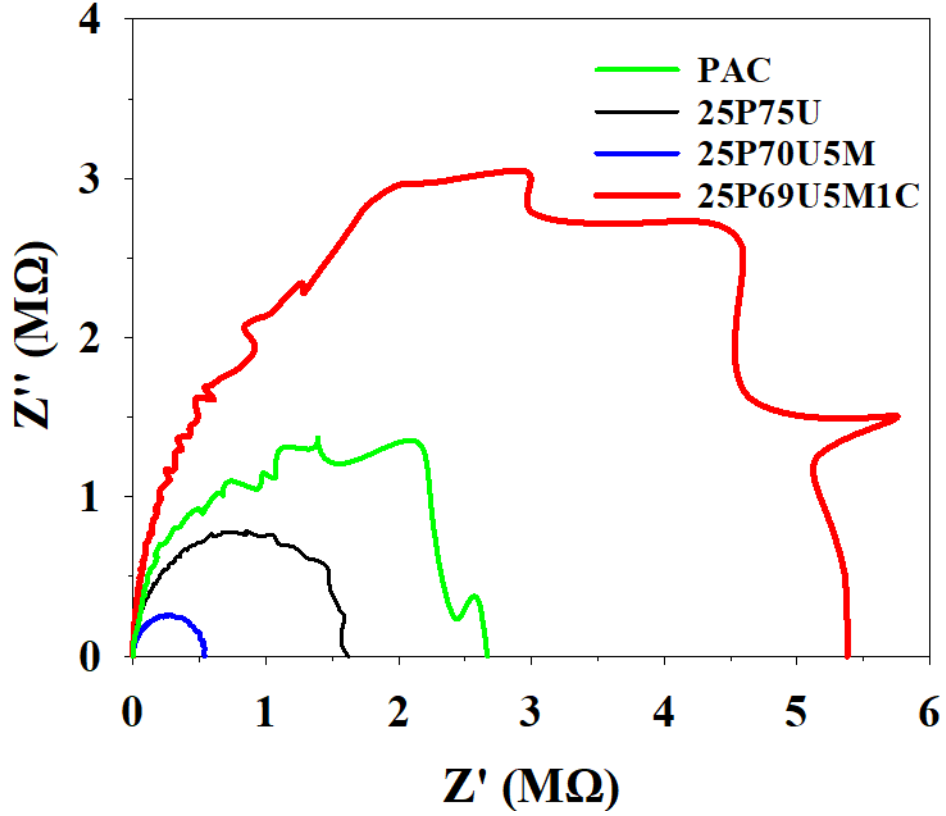
Yukarıdaki denklemlerde α gevşeme zamanının dağılımını ifade eder ($0 < \alpha < 1$). α değeri elde edilen yarım dairelerin merkezinin yatay eksenden ne kadar uzaklaştığı ile ölçülebilir. α değeri Denklem 2.25 ile hesaplanabilir.

$$\alpha = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{R_C}{R_0/2}\right) \quad (2.25)$$

Denklemlerde R_C Cole-Cole grafiğindeki dairenin yarıçapını, R_0 ise dairenin yatay eksenle kesiştiği noktaların arasındaki uzaklığı ifade etmektedir.

Debye denklemi tek bir gevşeme süresi üzerine bir denklemdir. Tek gevşeme süresi, dipolar polarizasyonun değişim hızının dengeden uzaklaşmasıyla orantılı olduğunu varsayar. Debye denkleminin frekans bazlı iyi bir sonuç vermemesi nedeniyle Cole ve Cole, tek gevşeme zamanı modelinin frekans alanı gösterimlerini genişletme parametresi ekleme yoluyla ($\alpha < 1$) değiştirdi (Cole ve Cole, 1941). Cole ve Cole bu

denklemleri direnç ve reaktansın grafiğine uyarlayarak geliştirdiler. Şekil 2.9’da örnek bir Cole-Cole grafiği verilmiştir.



Şekil 2.9 PAC tabanlı numunelerin Cole-Cole grafiği

Cole-Cole grafikleri, polimerlerin dielektrik özelliklerinin incelenmesinde değerli bir araçtır. Bu grafikler, genellikle polimer karışımlarının uyumluluğunu ve homojenliğini değerlendirmek için kullanılır (Ardakani vd., 2014). Heterojen polimerik sistemlerde, Cole-Cole grafiği bir gevşeme süresi dağılımına dayanarak viskoelastik özellikleri, viskozite ve modülü de içeren şekilde tanımlar (Cheng vd., 2016). Dahası, birçok polimer karışımı için Cole-Cole grafikleri iki yayı gösterir; bu yaylar, farklı gevşeme zamanlarına sahip iki malzeme fazının eşzamanlı olarak meydana gelmesini temsil eder (Li vd., 2011). Grafikler ayrıca dolgu maddeleri eklenirken çapraz bağlı polimerlerdeki yapısal değişikliklere de ışık tutabilir (Abraham vd., 2018; Joseph, 2023). Ayrıca, Cole-Cole grafiği dielektrik karışımlar, ferrit filmler, iyonik sıvılar ve kablo izolasyon yağı gibi farklı malzemelerin ve kompozitlerin karakterize edilmesinde önemli bir araçtır (Ojha vd., 2019). Dielektrik özelliklerin incelenmesinde, Cole-Cole grafiği çeşitli katı hal malzemelerinin dielektrik gevşeme

ve elektrik iletkenliğini analiz etmek için kullanılır (Sagar vd., 2006). Ayrıca, iletken dolgularla polimerlerin ve nanokompozitlerinin dinamiklerini değerlendirmede kullanılır; düzensiz dielektrikler ve kesirli mertebe kapasitörler hakkında bilgi sağlar (Shah ve Khanday, 2021).

2.4 Empedans, Direnç ve Reaktans

Empedans, direnç ve reaktans malzemelerin elektriksel özelliklerini incelemek ve karakterize etmek için kullanılan parametrelerdir. Bu parametrelerin frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülmesi, malzemenin kapasitif, indüktif veya dirençli davranışları hakkında bilgi verir. Empedans ölçümleri, güneş hücreleri, hücre izleme, polimer malzemelerde iyon taşıma, yakıt hücrelerinde elektrolit direncinin analizi gibi birçok alanda sistemlerin elektriksel özellikleri hakkında araştırmacılara veri sunmaktadır (Aziz ve Abidin, 2014; Benson vd., 2013; Bisquert vd., 2012; Makharia vd., 2005).

Empedans, bir malzemenin alternatif akıma karşı direncini gösteren kompleks bir parametredir. Empedans değeri Denklem 2.26 veya Denklem 2.27 ile ifade edilebilir:

$$Z = R + jX \quad (2.26)$$

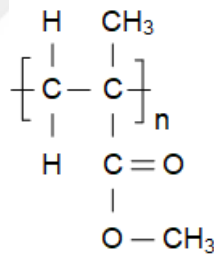
$$Z = Z' + jZ'' \quad (2.27)$$

Burada R veya Z' , empedansın gerçek kısmı olup, elektrik akımına karşı gösterilen direnç değerini ifade etmektedir. X veya Z'' ise empedansın sanal kısmı olup, malzemenin elektrik alanındaki değişikliklere frekansa bağlı olarak verdiği tepkiyi tanımlayan reaktans değerini ifade etmektedir (El Nahass vd., 2014; Sankara vd., 2022). Literatürde empedans analizinin önemini kanıtlayan çalışmalar mevcuttur. Direnç ve reaktans, nanoteknoloji ve malzeme bilimi de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalardaki sistemlerin performanslarını optimize etmek, süper iletkenlerin yüzey direncini belirlemek gibi birçok alanda önemli parametrelerdir. Ayrıca reaktans ve dielektrik geçirgenlik arasındaki ilişki de malzemenin dielektrik davranışını anlamaya yardımcı olmaktadır (Krupka, 2021; Mitra ve Manju, 2023; Volksen vd., 2009). Empedans analizleri polimer malzemeleri karakterize etmek için kullanılmış ve analizlerden elde edilen sonuçlardan yararlanılarak kapasitörler, sensörler gibi

cihazların üretimi gerçekleştirilmiştir (Raja vd., 2004). Reaktans akım ve gerilim arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitif veya indüktif olabildiğinden dolayı reaktans ölçümlerinin analizi malzemenin kapasitif ve indüktif davranışlarının gözlemlenmesi açısından önem taşımaktadır (Rutkove, 2009).

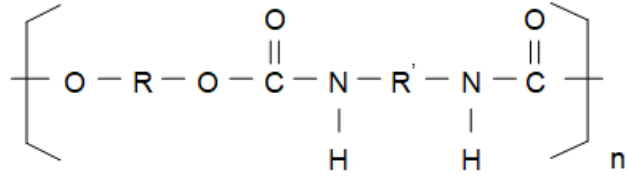
2.5 Kullanılan Malzemeler

Poli metil metakrilat (PMMA) çok iyi optik ve mekanik özelliklere, termal stabiliteye, elektriksel özelliklere ve kolay şekillendirilmeye sahip bir termoplastik malzemedir (Abomostafa vd., 2018; Hoang vd., 2015; Kaur ve Samra, 2018; Maji vd., 2017). PMMA bu özellikleri nedeniyle biyomedikal, optik, güneş enerjisi, sensörler, pil elektrolitleri, nanoteknoloji, viskozite, pnömatik çalıştırma, moleküler ayırmalar, polimer iletkenlik ve ilaç salım sistemleri alanlarında kullanımı artan bir malzeme olarak dikkat çekmektedir (Ali vd., 2015; Schade ve Roukis, 2010). PMMA'nın kimyasal yapısı Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 PMMA'nın kimyasal yapısı

Poliüretan (PU) iyi termal stabilitesi, kimyasal ve fiziksel dayanıklılığı yüksek olmasına rağmen esnek bir yapıya sahip olması ve kolay işlenebilirliği nedeniyle koruyucu tabaka, yapıştırıcı ve sızıntı önleyici malzeme olarak sıkça kullanılan bir polimer malzemedir (Akindoyo vd., 2016; Chen vd., 2016; Da Cruz, 2015; Devletbaeva vd., 2021; Zia vd., 2007;). PU'nun kimyasal yapısı Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 PU'nun kimyasal yapısı

Aktif karbon (AC) gözenekli yapıya, yüksek fiziko-kimyasal kararlılığa, yüksek mekanik dayanıklılığa, yüksek yüzey reaktivitesine sahip, karbon içeren iletken bir malzemedir (Kurnaz, 2023; Yahya vd., 2015). Yapısının büyük bir çoğunluğu karbondan, geri kalan küçük kısmı ise hidrojen, oksijen, kükürt ve azottan oluşmaktadır (Küçükgül, 2004).

3. LİTERATÜR ÖZETİ

PAC polimeri, düşük dielektrik sabiti, yüksek elektriksel mukavemeti, düşük dielektrik kaybı, biyouyumluluğu, düşük üretim maliyeti gibi özellikleri nedeniyle organik alan etkili transistörler (OFET), elektriksel yalıtım uygulamaları, giyilebilir cihazlar gibi birçok uygulama alanındaki çalışmalar için ilgi çekici olmuştur (Chen vd., 2022; Kahouli vd., 2009; Seymour vd., 2009;).

Kahouli vd. (2009) PAC ince filmlerin yapısal ve dielektrik özellikleri üzerine yaptıkları çalışmada gevşeme mekanizmaları üzerine sıcaklığa bağlı olarak çalışmış ve bu çalışmalarla Elektro-ıslatma uygulamaları (EWOD) ve OFET uygulamaları için veriler elde etmişlerdir. Ayrıca PAC'ın dielektrik sabitinin gerçek ve imajiner kısımlarının değerlerinin 1Hz-1 MHz aralığında frekansa bağlı sonuçları verilmiş ve dielektrik geçirgenliğin 1 MHz frekans değerinde oda sıcaklığında 3'e yakın bir değere sahip olmuş olsa da bu değerlerin literatürde verilen değerlerden daha yüksek olduğu da not edilmiştir (Kahouli vd., 2009).

Mokni vd. (2019) PAC ince filmlere gümüş katkılayarak dielektrik özelliklerine olan etkilerini oda sıcaklığında $1-10^6$ Hz frekans aralığında incelediler ve oluşan nanokompozit malzemenin dielektrik performansının OFET'ler için kapı yalıtım malzemeleri olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da ince filmlerin dielektrik özelliklerine dair ölçümler yapılmış ve PAC numunesinin 1 kHz frekans değerindeki dielektrik geçirgenlik değerinin 3,15 olduğu belirtilmiştir. 1 MHz değerinde ise dielektrik geçirgenlik değerinin 3 olduğu görülmektedir. Tanjant kayıpları ise saf PAC için düşük frekanslarda 0,07 olsa da 1MHz değeri için 0,03 olarak görülmektedir. Dielektrik geçirgenliğin frekansa bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiş ve bu duruma C-Cl bağının dipolar gevşemesinin (β -gevşemesi) neden olduğu belirtilmiştir (Mokni vd., 2019).

Yoon vd. (2021) PAC'nin MEMS uygulamalarında bir katman malzemesi olarak kullanılabildiğini belirtmişlerdir ve platinyum üzerine Parilen-C kaplayarak yapılan termal tavlamanın etkilerini radyo frekansı uygulamaları için yüksek frekans bölgelerinde incelemişlerdir. Yapılan termal tavlamanın Parilen-C'nin dielektrik

geçirgenliği üzerinde bir değişime sebep olmadığı belirtilmiştir. 10^5 - 10^{11} Hz frekans aralığında yapılan ölçümlerde dielektrik geçirgenlik değerinin 3 civarında sabit olduğu görülmüştür. Ayrıca elde edilen sonuçların metal-polimer arayüzü kullanılarak Parilen bazlı biyomedikal MEMS cihazlarının tasarımına yardımcı olabileceği belirtilmiştir (Yoon vd., 2021).

Wan vd. (2018) bakır titanyum oksit/PU kompozit filmlerinin dielektrik özelliklerini inceleyen bir çalışma yaptılar ve sonuç olarak bu kompozit filmlerin enerji depolama kapasitörlerinde ve diğer elektronik cihazlarda kullanılmak için iyi bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde saf PU numunesinin dielektrik geçirgenlik değerinin 10 Hz-1 MHz frekans aralığında 10'un altında değerler aldığı ve frekans arttıkça hafif bir azalma gösterdiği kalsiyum bakır titanat oranı %40'a kadar arttığında dielektrik geçirgenliğin 10^6 Hz değerinde 25'e çıktığı belirtilmiştir. Tanjant kayıpları frekans arttıkça önemli ölçüde bir artış gösterse de 1 MHz frekansta en fazla kaybın 0,16 değerine sahip olduğu ve kabul edilebilir bir değer olduğu belirtilmiştir (Wan vd., 2018).

Liebscher vd. (2023) ısıyla sertleşen PU'nun dielektrik geçirgenliğinin neme olan bağlılığını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada dielektrik geçirgenlik ve kayıplarla birlikte empedans değerinin de ölçümü mevcuttur. Empedans değeri çeşitli nem değerlerine göre değişiklik gösterse de 1 MHz frekans değerinde $10^2 \Omega$ ile $10^3 \Omega$ arasında değerler aldığı görülmektedir. Aynı frekans değerinde dielektrik geçirgenliğin 4-6 aralığında, dielektrik kayıpların ise 1'in altında değerler aldığı görülebilmektedir. Bu çalışmada PU'nun silikon ve akrilik gibi bazı malzemelerden yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip olması nedeniyle aktüatör uygulamalarında dielektrik elastomer olarak tercih edilebilecek malzemelerden biri olduğu belirtilmiştir (Liebscher vd., 2023).

Gaur vd. (2016) çalışmasında Çinko oksit/PMMA döndürmeli kaplama ile üretilen nano hibrit ince filmlerin dielektrik özellikleriyle alakalı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada PMMA'nın yüksek yumuşama noktası, yüksek mukavemeti gibi fizikokimyasal özelliklerinin yanı sıra iyi optik özellikleri ve biyouyumluluğu gibi özelliklerinden ötürü polimer nanokompozitlerde sıkça tercih edilen bir malzeme

olduğu belirtilmiştir. Çalışmada PMMA ve katkılanmış ince filmlerin oda sıcaklığında yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmış, PMMA'nın 10 kHz frekans değerindeki dielektrik geçirgenliği 2 olarak ölçülmüş, katkılanmış malzemede ise 30-60 aralığında değerler elde edilmiştir. PMMA dahil tüm ölçümlerde tanjant kayıplarının 0.05 değerinin altında olduğu yani düşük değer aldığı belirtilmiştir (Gaur vd., 2016).

Gupta vd. (2020) %1 ile %8 arasında Demir (III) klorür (FeCl_3) katkılama yapılmış PMMA örneklerinin dielektrik analizini yapmışlardır. Dielektrik geçirgenlik değeri en az %1 katkılı numunede olup, 10 kHz frekans değerindeki dielektrik geçirgenlik 2'ye yakın bir değer olarak ölçülmüştür. Katkılama oranı arttıkça dielektrik geçirgenlik ve dielektrik kayıpların arttığı, tanjant kayıplarının ise azaldığı görülmektedir (Gupta vd., 2020).

Wang vd. (2020) negatif kapasitansın doğrudan kararlı bir şekilde ölçümünü sağlayan seri kapasitör modelini önerdiler ve Strontiyum Titanat (SrTiO_3)/Baryum titanat (BaTiO_3) heteroyapılarında negatif kapasitans durumu üzerine çalışmışlardır. Ayrıca rezonans frekansı bölgesinde negatif geçirgenliğin yüksek kayıpla sonuçlandığını ve genelde bunun metamalzeme uygulamalarını kısıtladığını belirtirler de yüksek dielektrik geçirgenlik ve düşük kaybın belirli bir aralıkta elde edilebileceğini ve bu aralığın metamalzemelerle ilgili uygulamalarda çok kullanışlı bir aralık olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada reaktans ve indüktif davranış arasındaki ilişki anlatılmıştır (Wang vd., 2020). Öte yandan Kwok (2003) çalışmasında Drude modelinden yararlanarak organik polimerlerdeki negatif kapasitansın modellenmesini yapmıştır. Bu çalışmada DC öngerilim küçük olduğunda organik polimerlerde negatif kapasitansın gözlenebileceği belirtilmiştir (Kwok, 2003).

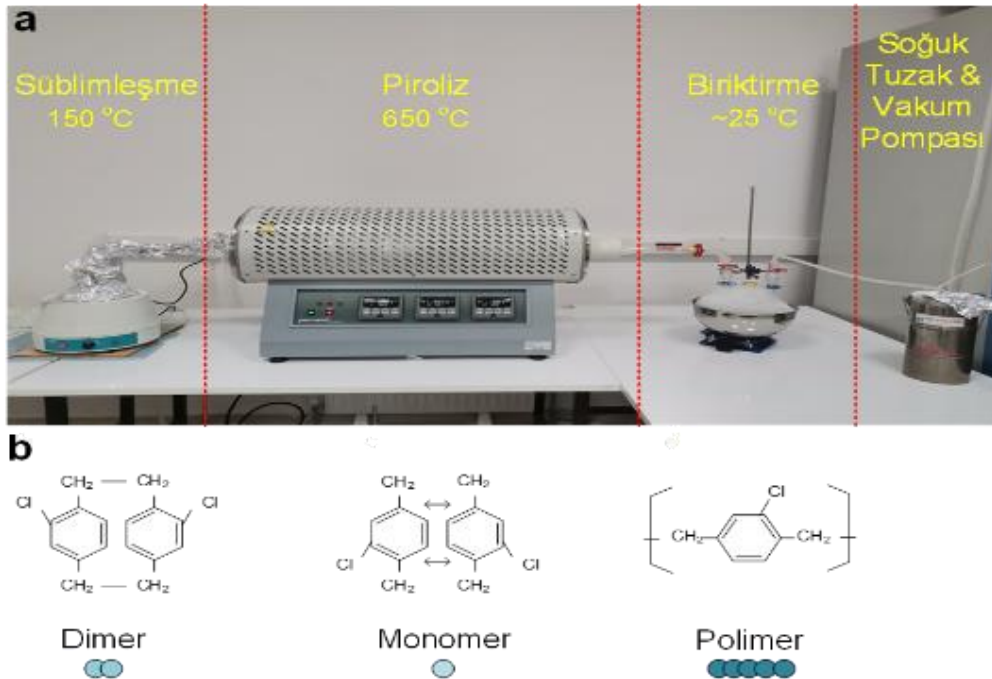
Literatürdeki çalışmalarda bu tez çalışmasında kullanılan malzemelerin saf ve katkılanmış örneklerinin dielektrik özelliklerine ve negatif kapasitansın ölçülmesine dair incelemeler yapılmış olsa da bu tez çalışmasında üretimi yapılan piezoelektrik kompozitlerin dielektrik özelliklerine dair herhangi bir çalışma mevcut değildir.

4. YÖNTEM VE GEREÇLER

4.1 Parilen C'nin Sentezlenmesi

Parilen C'nin sentezlenmesi kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Süblimleşme, piroliz, biriktirme ve soğuk tuzak olmak üzere dört aşamada üretim gerçekleştirilmiş olup, Şekil 4.1a'da üretim düzeneği ve Şekil 4.1b'de ise parilen-C'nin monomer, dimer ve polimer formunun 2 boyutlu (2D) yapısı yer almaktadır.

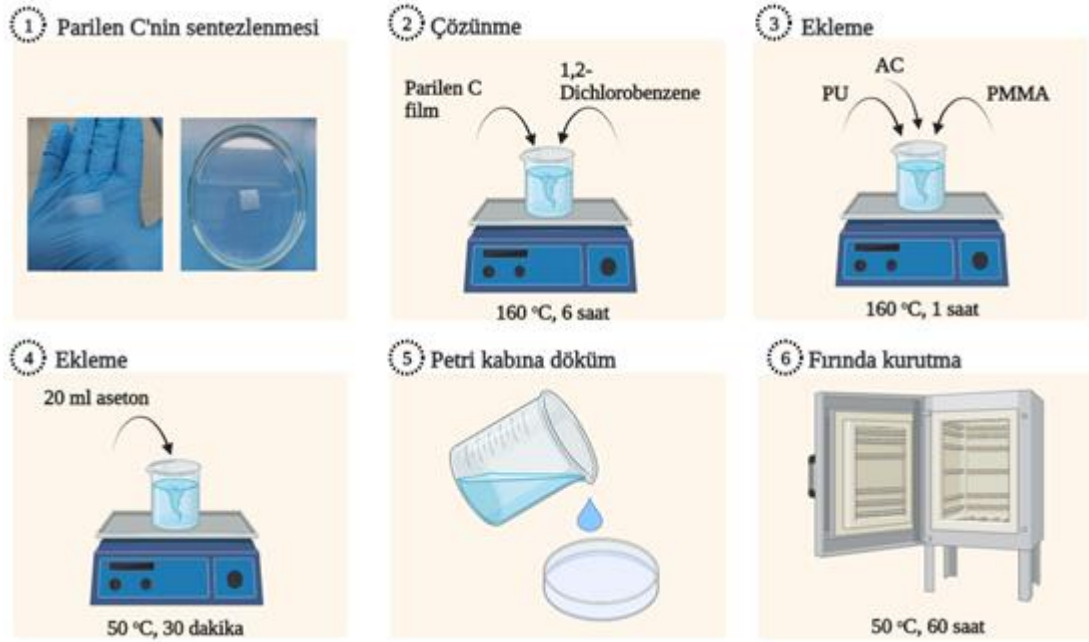
İlk olarak dimer formunda parilen-C, üç ağızlı balon içerisine konulmuştur. Balon ısıtıcı yaklaşık 150°C'de ısıtılarak, dimer parilen-C'nin süblimleşmesi sağlanmıştır. Vakum altında üretim düzeneğine argon gazı yollanarak, süblimleşen dimer yapı fırın içerisine taşınmış ve 650°C'de piroliz işlemi ile monomer oluşturulması sağlanmıştır. Fırından çıkan gaz monomerlerin oda sıcaklığında polimerizasyonu ile üç ağızlı balon üzerine biriktirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında birikmesi gerçekleşmeyen Parilen-C'nin sıvı azot tuzağında hapsolması sağlanmıştır. Balon üzerinde biriken Parilen-C, aseton ile balon üzerinden kaldırılarak çıkarılmıştır (Kurnaz, 2023).



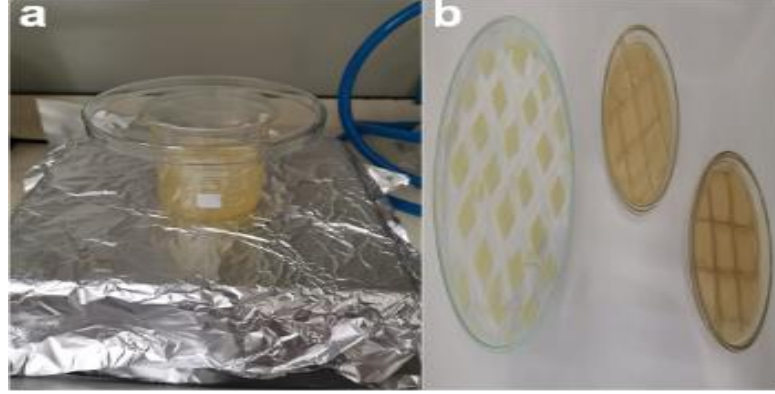
Şekil 4.1 (a) Parilen-C'nin polimerasyonu için üretim düzeneği ve (b) Parilen-C'nin monomer, dimer ve polimer formunun 2 boyutlu yapısı

4.2 Numunelerin Üretim Süreci

Sentezlenen parilen-C, 50 ml 1,2 diklorobenzen içerisinde 160°C’de 6 saat karıştırarak çözdürülmüştür. Aynı sıcaklıkta, ağırlıkça çeşitli oranlarda PU, PMMA ve AC eklenerek, çözeltinin 1 saat boyunca homojen karışması sağlanmıştır. Parilen C, PMMA ve PU Hunan Solar Chemical Co. şirketi tarafından tedarik edilmiştir. Aktif karbon da Tekkim şirketi tarafından tedarik edilmiştir. Çözelti soğutma işlemi esnasında 50°C’de 20 ml aseton eklenerek, 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Böylece, PU’nun çözelti içinde daha iyi karışması sağlanmıştır (Şekil 4.2). Fotoğraf 4.1a’da çözeltilerin homojen bir şekilde karışması ile beherdeki hali yer almaktadır. Fotoğraf 4.1b’de hazırlanan çözeltinin petri kabına dökülmüş ve etüv içerisinde 50°C’de 60 saat kurutma sonucundaki hali yer almaktadır. Ağırlıkça çeşitli oranlarda hazırlanmış 7 adet numunelerin isimlendirilmesi ve içerdiği malzemelerin yüzdesel oranları Tablo 4.1’de yer almaktadır (Kurnaz, 2023).



Şekil 4.2 Parilen-C bazlı numunelerin üretim süreci



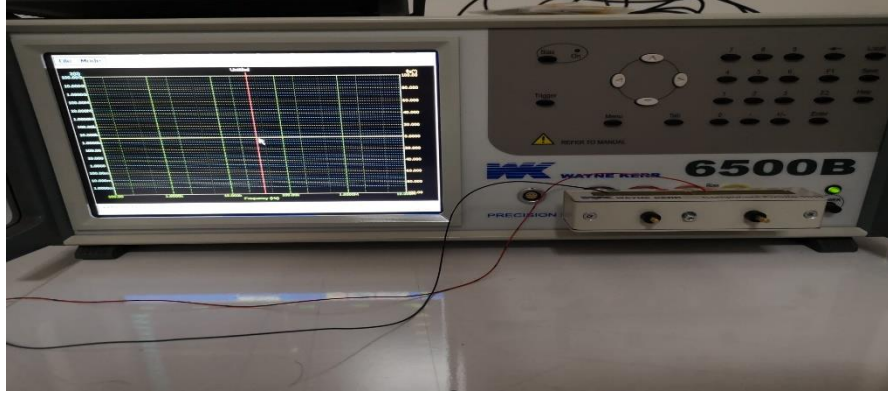
Şekil 4.3 (a) çözeltinin beher içerisindeki hali, (b) petri kabına dökülmesi ve kurutma işlemi sonrasındaki hali

Tablo 4.1 Ağırlıkça hazırlanan numunelerin isimleri ve yüzdesel oranları

Numune Adı	PAC (%)	PU (%)	PMMA (%)	AC (%)
25P75U	25	75	0	0
25P69U5M1C	50	44	5	1
25P70U5M	25	70	5	0
50P50U	50	50	0	0
50P44U5M1C	50	44	5	1
50P45U5M	50	45	5	0
PAC	100	0	0	0

4.3 Dielektrik Özelliklerin Ölçümü

Üretimleri yapılan numunelerin dielektrik özelliklerinin ölçümü Wayne Kerr 6500B empedans analizörü yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kapasitans, dielektrik geçirgenlik, dielektrik kayıp, tanjant kayıpları, empedans, direnç ve reaktans parametrelerinin ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen değerler ve rezonans tepkileri analiz edilmiştir. Parilen-C'ye yapılan PU, PMMA ve AC katkılarının dielektrik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Tüm ölçümler oda sıcaklığında ve 1-10 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Daha sonrasında tüm numuneler 60°C sıcaklıkta 10 dakika boyunca 1kV voltaj uygulanarak polarize edilmiş ve numunelerin dielektrik özelliklerinin ölçümü yeniden gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar polarizasyon öncesi sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.4 Wayne Kerr 6500B empedans analizörünün fotoğrafı

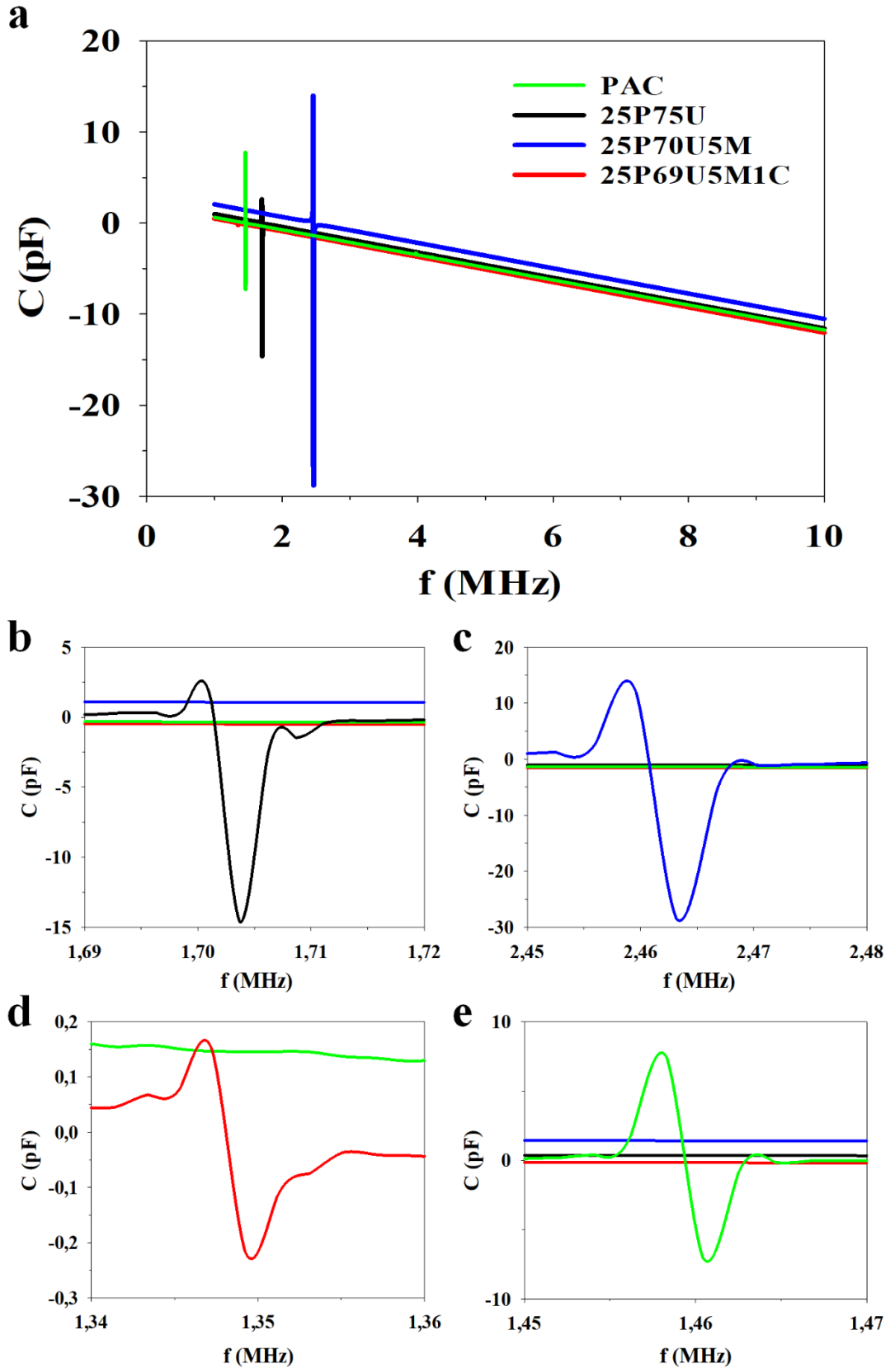
5. BULGULAR

5.1 Kapasitans, Dielektrik Geçirgenlik ve Kayıplar

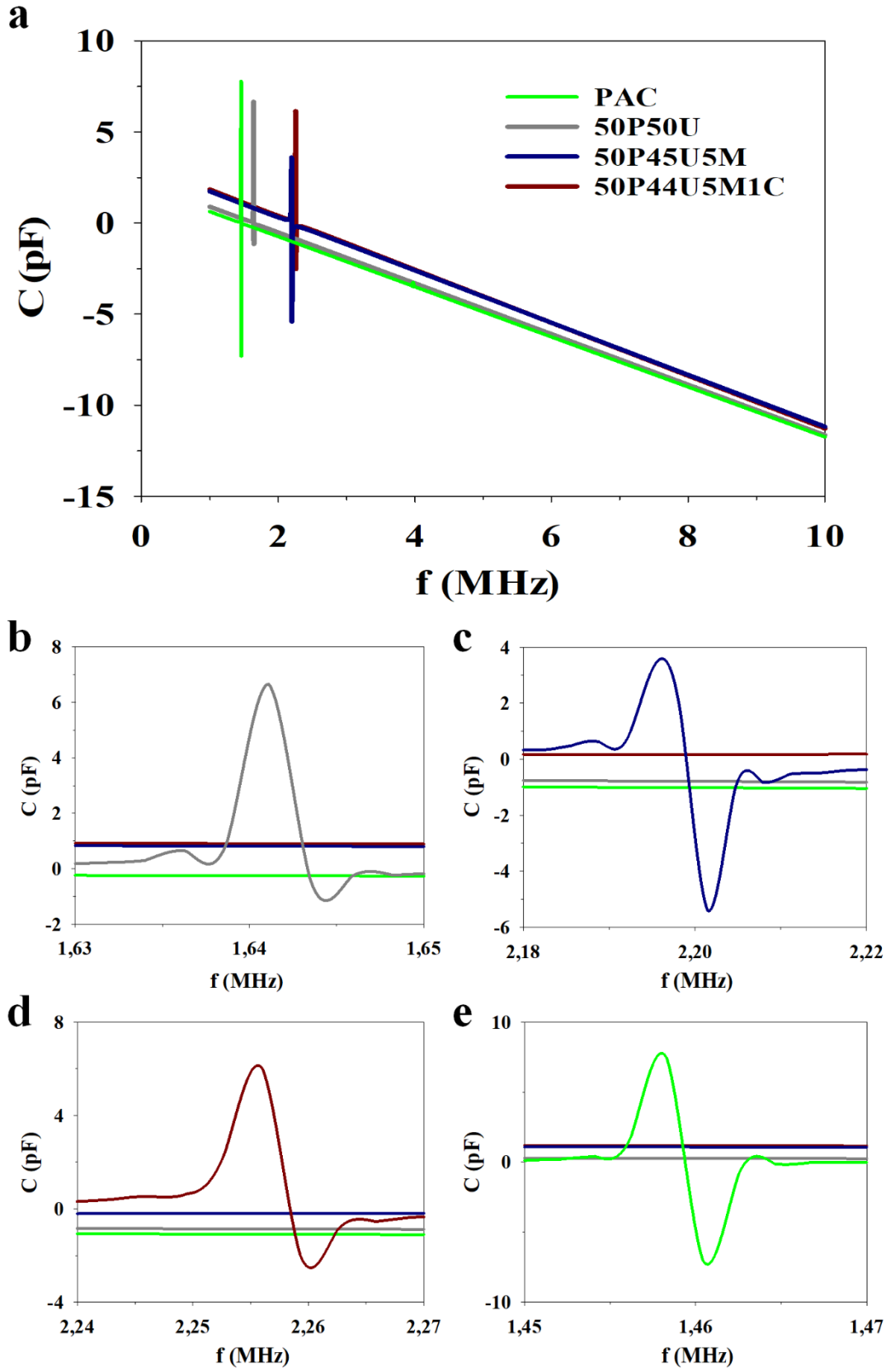
5.1.1 Kapasitans

Numunelerin Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de polarizasyon öncesi, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te ise polarizasyon sonrası frekansa bağlı kapasitans grafikleri gösterilmektedir. Grafiklerde tüm numunelerde 1-10 MHz frekans aralığında dielektrik rezonans meydana geldiği ve rezonans frekansından büyük frekanslarda negatif kapasitans durumunun meydana geldiği gözlemlenmektedir. Tüm numunelerin rezonans frekansı değerleri Tablo 5.1’de verilmektedir. Rezonans frekansının polarizasyon öncesinde en yüksek değeri 25P70U5M numunesinde 2,460 MHz olarak, en düşük değeri ise 25P69U5M1C numunesinde 1,348 MHz olarak görülmektedir. Rezonans frekansının polarizasyon sonrasında en yüksek değeri 50P50U numunesinde 2,691 MHz olarak, en düşük değeri ise 25P69U5M1C numunesinde 1,312 MHz olarak görülmektedir. Polarizasyon işleminden sonra 50P50U numunesinde rezonans frekansında polarizasyon öncesine göre yaklaşık 1,05 MHz artış meydana geldiği, diğer numunelerde ise artışların 0,02 MHz ile 0,12 MHz arasında olduğu, 25PAC69U5M1C numunesinde ise rezonans frekansı değerinin 0,03 MHz azaldığı görülmektedir. Kapasitans tepe değerleri Tablo 5.2’de verilmektedir. Kapasitans değerinin polarizasyon öncesi ve sonrası pozitif bölgede en yüksek değeri 25P70U5M numunesinde sırasıyla 11,852 pF ve 21,871 pF olarak görülmektedir. 25P70U5M, 50P44U5M1C, 50P45U5M ve PAC numunelerinde polarizasyon sonrası pozitif tepe noktasındaki kapasitans değerlerinde artış görülürken, 25P75U, 25P69U5M1C ve 50P50U numunelerinde azalma görülmektedir. Ayrıca pozitif ve negatif bölgedeki tepe değerleri arasındaki en yüksek genlik de 25P70U5M numunesinde 40,327 pF olarak görülmektedir. 25P75U ve 25P70U5M numunelerinde polarizasyon sonrasında genlik azalmakta, 25P69U5M1C, %50 PAC içeren numuneler ve PAC numunelerinde ise artmaktadır. İdeal durumda polarizasyon sonrasında dipol momentlerin hizalanması nedeniyle kapasitans tepe değerleri arasındaki genliğin artması beklenir, ancak numunenin arayüzeylerindeki etkileşimler ölçüm sonuçlarında değişik

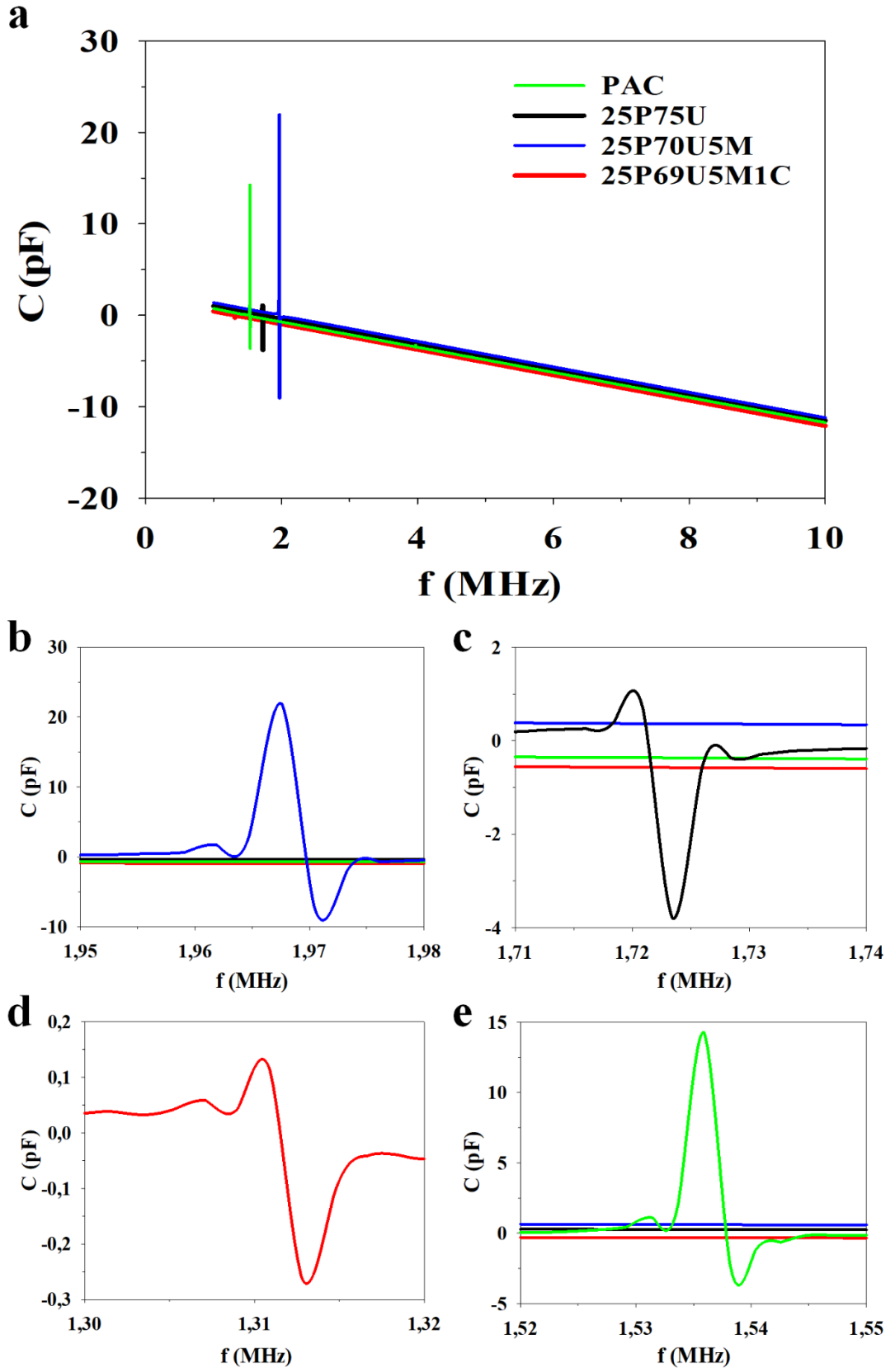
tepkilerin görülmesine neden olmaktadır (Cui vd., 2014). Öte yandan kullanılan malzemeler arasında PAC kapasitansı en düşük olan malzeme iken, yapılan katkılarının malzemelerin kapasitansını artırması beklenir, ancak elde edilen değerlere göre beklenen durumun tam tersi sonuçlar mevcuttur (Kahouli vd., 2009; Wan vd., 2018; Gupta vd., 2020). Bu durum da arayüzey etkileşimleri nedeniyle olmaktadır. Polimer malzemeler yalıtım malzemeleri olduklarından kapasitanslarının seramik ve oksit gibi malzemelere göre düşük olması gerekir. Elde edilen sonuçlar da bu durumu doğrulamaktadır. Örneğin Wang vd. (2020) çalışmalarında Strontiyum Titanat (SrTiO_3)/Baryum titanat (BaTiO_3) yapılarının kapasitansını rezonans frekansında pozitif bölgede 20 nF olarak elde etmişlerdir (Wang vd. 2020). Bu tez çalışmasında yapılan ölçümlerde ise polarizasyon sonrasında kapasitansta artışlar olmasına rağmen elde edilen en yüksek kapasitans tepe değeri 21,871 pF olmuştur. Dolayısıyla ürettiğimiz kompozitlerin düşük kapasitanslı numuneler olduğu söylenebilir.



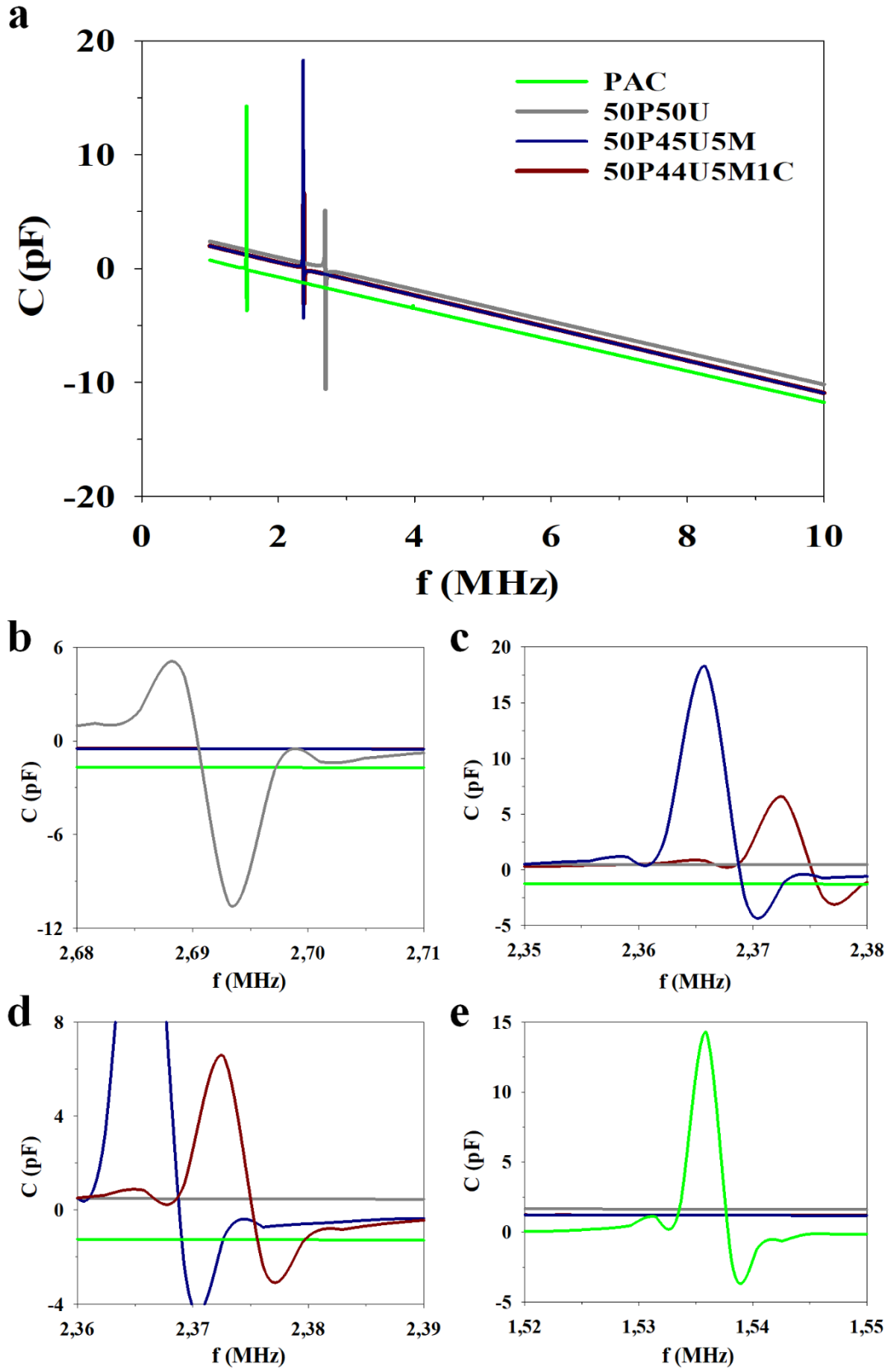
Şekil 5.1 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.2 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.3 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.4 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin C-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

Tablo 5.1 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası rezonans frekansları ile rezonans frekanslarının polarizasyona bağlı değişimi

Numune Adı	Polarizasyon Öncesi		Polarizasyon Sonrası		Rezonans
	Rezonans Frekansı		Rezonans Frekansı		Frekansının
	Pozitif (MHz)	Negatif (MHz)	Pozitif (MHz)	Negatif (MHz)	Değişimi (MHz)
PAC	1,458	1,460	1,536	1,538	0,078
25P75U	1,701	1,703	1,721	1,724	0,020
25P69U5M1C	1,347	1,349	1,311	1,313	-0,036
25P70U5M	2,460	2,463	1,968	1,970	-0,492
50P50U	1,641	1,644	2,690	2,693	1,049
50P44U5M1C	2,256	2,259	2,373	2,376	0,117
50P45U5M	2,195	2,198	2,362	2,366	0,167

Tablo 5.2 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası kapasitans tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

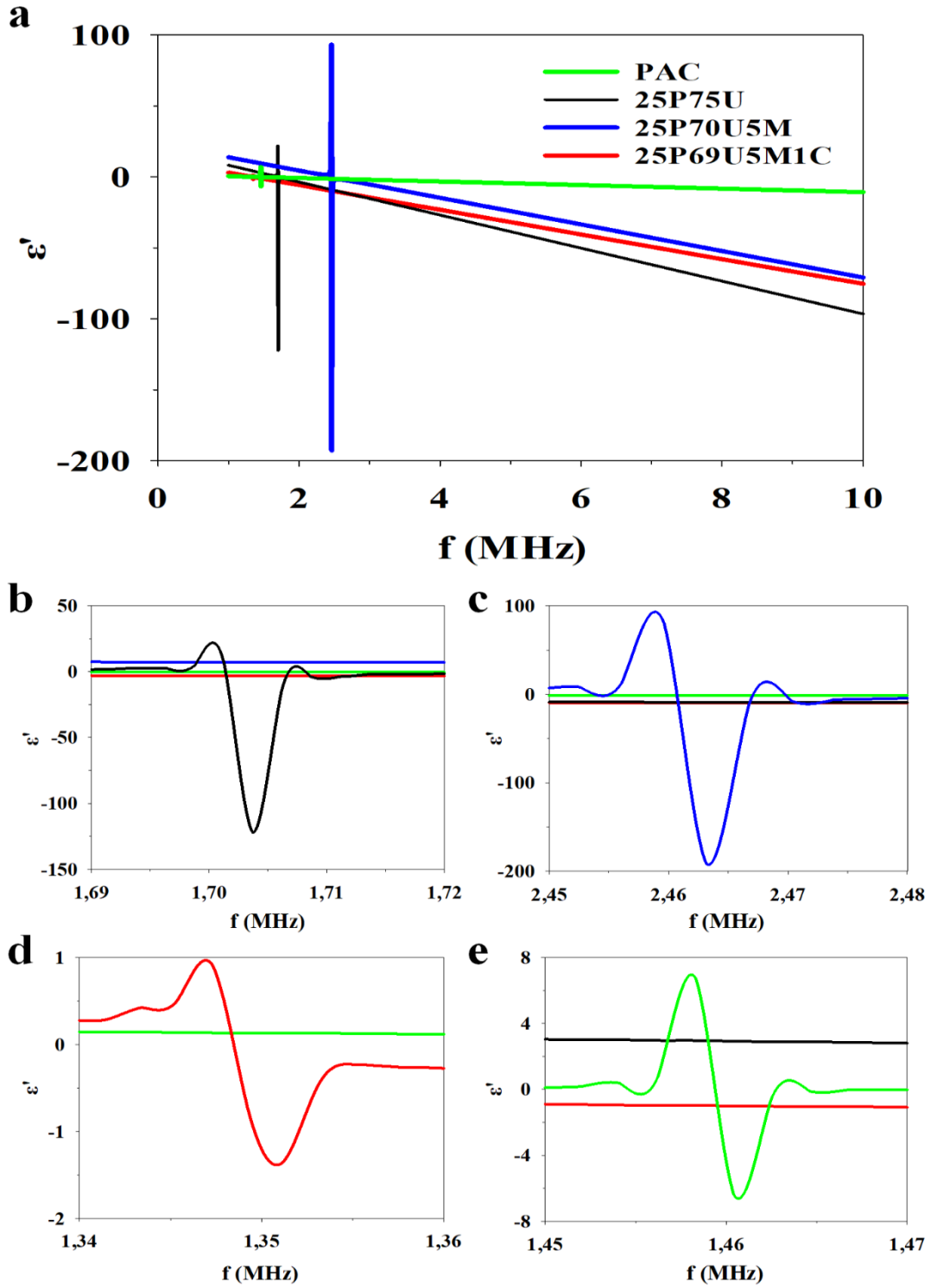
Numune Adı	Polarizasyon Öncesi		Polarizasyon Sonrası		Tepe Noktalarının	
	Tepe Noktaları		Tepe Noktaları		Değişimi	
	Pozitif (pF)	Negatif (pF)	Pozitif (pF)	Negatif (pF)	Pozitif (pF)	Negatif (pF)
PAC	7,394	-7,009	14,273	-2,013	6,879	4,996
25P75U	0,862	-14,625	0,619	-3,801	-0,243	10,824
25P69U5M1C	0,147	-0,215	0,112	-0,263	-0,035	-0,048
25P70U5M	11,852	-28,475	21,871	-7,195	10,019	21,280
50P50U	6,661	-0,338	4,051	-10,510	-2,610	-10,172
50P44U5M1C	5,998	-1,970	6,555	-2,367	0,557	-0,397
50P45U5M	3,278	-5,399	18,277	-2,317	14,999	3,082

5.1.2 Dielektrik Geçirgenlik

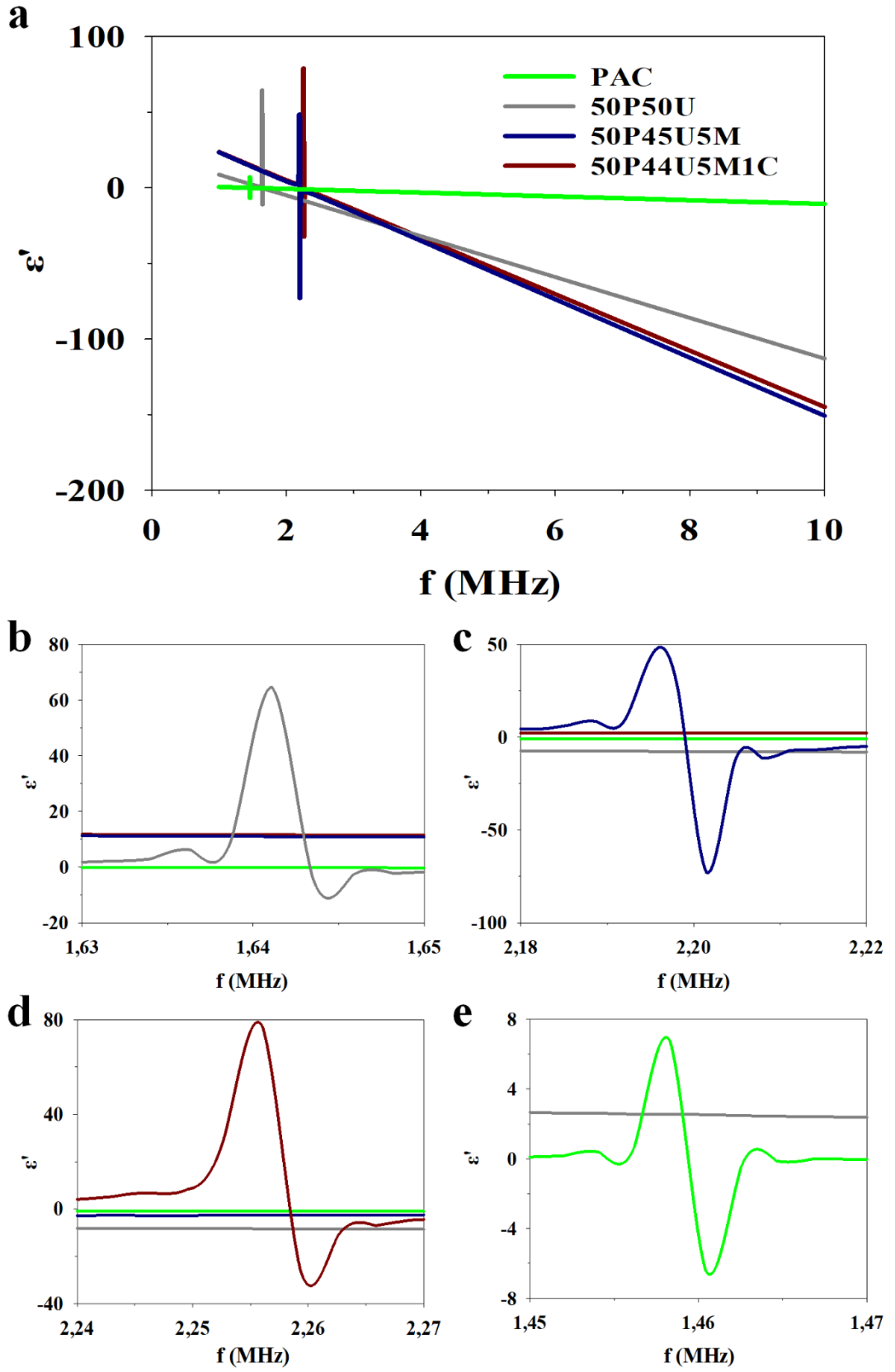
Numunelerin dielektrik geçirgenlik değerleri Denklem 2.4 kullanılarak hesaplanmış, frekansa bağlı değerlerinin polarizasyon öncesi grafikleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da, polarizasyon sonrası grafikleri ise Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir. Grafiklerde görülen pozitif ve negatif tepe noktalarındaki dielektrik geçirgenlik değerleri Tablo 5.3'te gösterilmektedir. Dielektrik geçirgenlik, kapasitans ile doğru orantılı bir parametredir. Dolayısıyla dielektrik geçirgenlik de rezonans frekansından büyük

frekanslarda negatif değerler almaktadır. Negatif geçirgenlik fiziksel olarak yüklerin uygulanan elektrik alanına zıt yönde hizalanmasını temsil etmektedir (Yan vd., 2013). Rezonans frekansı bölgesinde dielektrik geçirgenliğin pozitif ve negatif tepe değerleri grafiklerde görülmektedir. Dielektrik geçirgenliğin polarizasyon öncesi en yüksek pozitif tepe değeri 25P70U5M numunesinde 79,894 olarak, en düşük tepe değeri ise 25P69U5M1C numunesinde 0,922 olarak görülmektedir. Dielektrik geçirgenliğin polarizasyon sonrası en yüksek tepe değeri 50P45U5M numunesinde 246,600 olarak, en düşük tepe değeri ise 25P69U5M1C numunesinde 0,703 olarak elde edilmiştir. Dielektrik geçirgenlik hesaplamalarında numunelerin yüzey alanı ve kalınlığı da etkilidir. Bu nedenle, dielektrik geçirgenlikteki değişimler kapasitans değerlerindeki değişimlerden farklılık gösterebilir. Öte yandan aktif karbon katkısının kapasitansı, dolayısıyla da dielektrik geçirgenliği artırması beklenir ancak arayüzey etkileşimlerinin fazlalığı 25P69U5M1C numunesinde kapasitans ve dielektrik sabitinin tepe değerlerinin düşük olmasına neden olmuştur. Numunelerin kapasitanslarının ve dielektrik geçirgenliklerinin artış ve azalış bakımından polarizasyona karşı gösterdiği tepkiler büyük oranda aynı olmakla birlikte sadece 50P44U5M1C numunesinde polarizasyon sonrası pozitif tepe değerinde kapasitans değerinin aksine bir miktar azalma olmuştur. Oransal olarak bakıldığında polarizasyon sonrasında dielektrik geçirgenliğin pozitif tepe değerlerindeki en büyük artış 50P45U5M numunesinde %554, en büyük düşüş ise 50P50U numunesinde %39,2 olarak grlmştir. Ayrıca frekans değeri arttıķa kapasitans ve dielektrik geçirgenlik değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma malzemelerdeki moleküler hareketler (β gevşemesi) nedeniyle olmaktadır (Kahouli vd., 2009). Polimerlerin dielektrik geçirgenliğin ölçülmesi ile alakalı çalışmalarda genellikle 1 MHz ve altındaki frekans değerlerindeki yorumlamalara odaklanmıştır. Bu çalışmalarda verilen grafikler bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler içerisinde en düşük dielektrik geçirgenliğe sahip olan malzemenin PAC olduğunu göstermektedir (Abomostafa vd., 2018; Kahouli, 2012; Liebscher vd., 2023; Mokni vd., 2019). Elde edilen sonuçlarda da yapılan PU, PMMA ve AC katkılarının malzemenin dielektrik geçirgenliğini artırdığı grlmştir. Çalışmalarda sık kullanılan polimerlerin dielektrik geçirgenlik değerleri 2-12 aralığında iken, iletkenliği yüksek olan seramik malzemelerin dielektrik geçirgenlikleri 100.000'e kadar çıkabilmektedir (Billah, 2019). Bu çalışmada kullanılan numunelerde dielektrik geçirgenlik değerleri

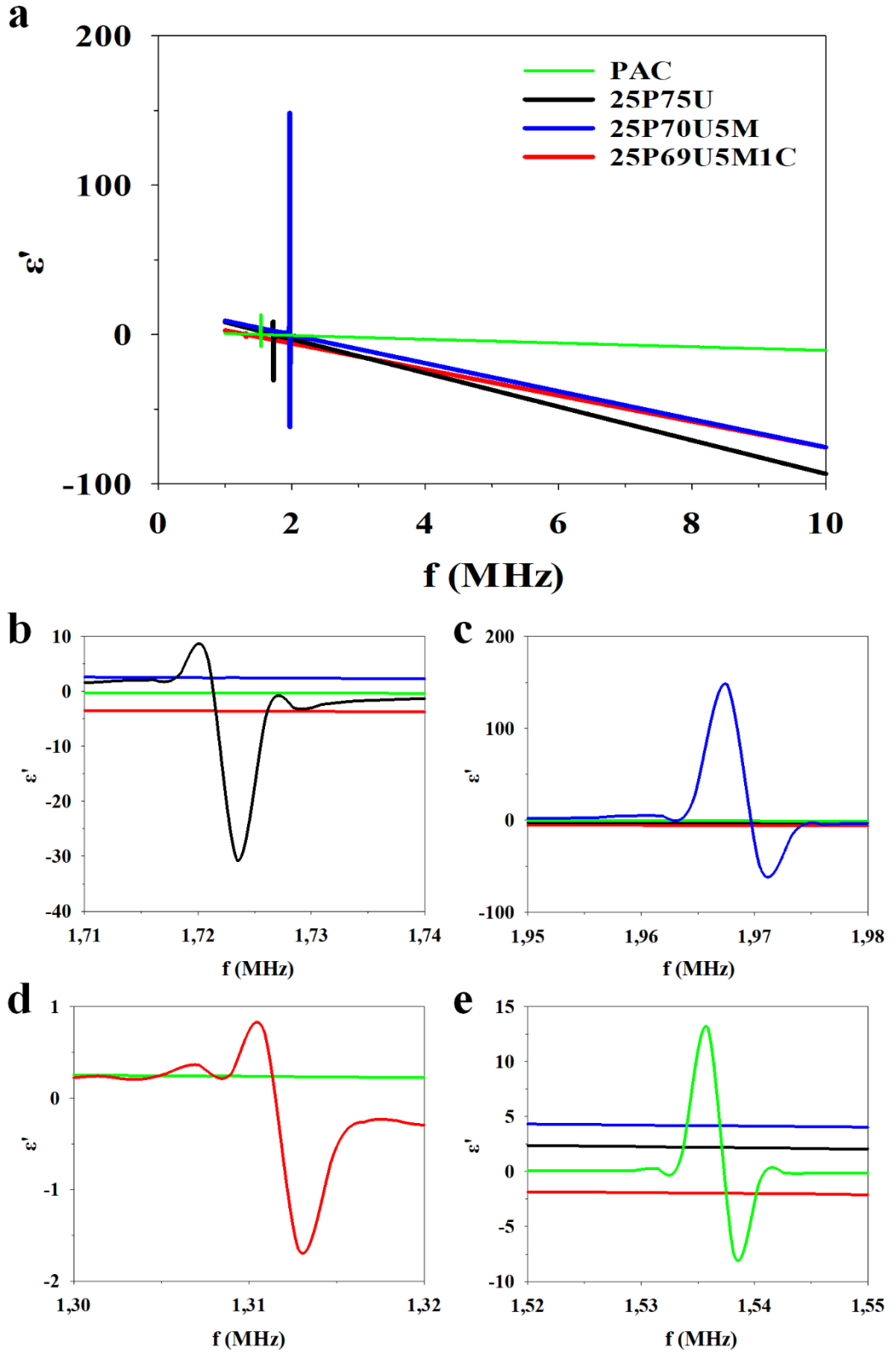
polarizasyon sonrası en yüksek 246,600'e ulaşmaktadır. Polarizasyon ve rezonans etkileri dielektrik geçirgenliği artırsa da yüksek iletkenlik gösteren seramiklerin dielektrik geçirgenlik değerine yaklaşmadığı anlaşılmaktadır. Rezonans frekansı bölgesindeki tepe değerleri değişkenlik gösterse de pozitif dielektrik geçirgenlik bölgesinde polarizasyon öncesi 1 MHz frekans değerinde dielektrik geçirgenliğin en düşük değeri PAC numunesinde 1,536 olarak, en yüksek değeri de 50P44U5M1C numunesinde 23,717 olarak elde edilmiştir. Literatürde yüksek enerji depolama kapasitesi gerektiren uygulamalarda dielektrik sabitinin 400 ve üzeri olması gerektiği, yüksek dielektrik dayanımının ve düşük dielektrik kaybın istendiği elektronik uygulamalar için ise 20-120 arasında olması gerektiği belirtilmektedir (Kumbaragurubaran vd., 2015; Prashantha vd., 2010). Bu durumda Tablo 5.3'teki tepe değerleri incelendiğinde hiçbir numunenin 1-10 MHz frekans aralığındaki değerlerin en fazla 246,600 olduğu için yüksek dielektrik sabiti gerektiren uygulamalarda kullanılmaya uygun olmadığı, 25P75U, 25P69U5M1C ve PAC numunelerinin polarizasyon öncesi ve sonrasındaki dielektrik sabiti tepe değerlerinin yüksek dielektrik dayanımın istendiği elektronik uygulamalar için uygun olmadığı görülmektedir. 25P70U5M, 50P50U, 50P44U5M1C ve 50P45U5M numunelerinin tepe değerlerinin ise rezonans frekansı bölgesinde yüksek dielektrik dayanımın istendiği elektronik uygulamalar için uygun olabileceği görülmektedir. İdeal durumda polarizasyon sonrasında dipol momentlerin hizalanması nedeniyle dielektrik geçirgenliğin artması beklenir, ancak bazı numunelerde tepe noktalarının daha düşük değerde olduğu görülmüştür, bunun nedeni de kapasitans değerlerinde olduğu gibi arayüzey etkileşimleridir (Cui vd., 2014).



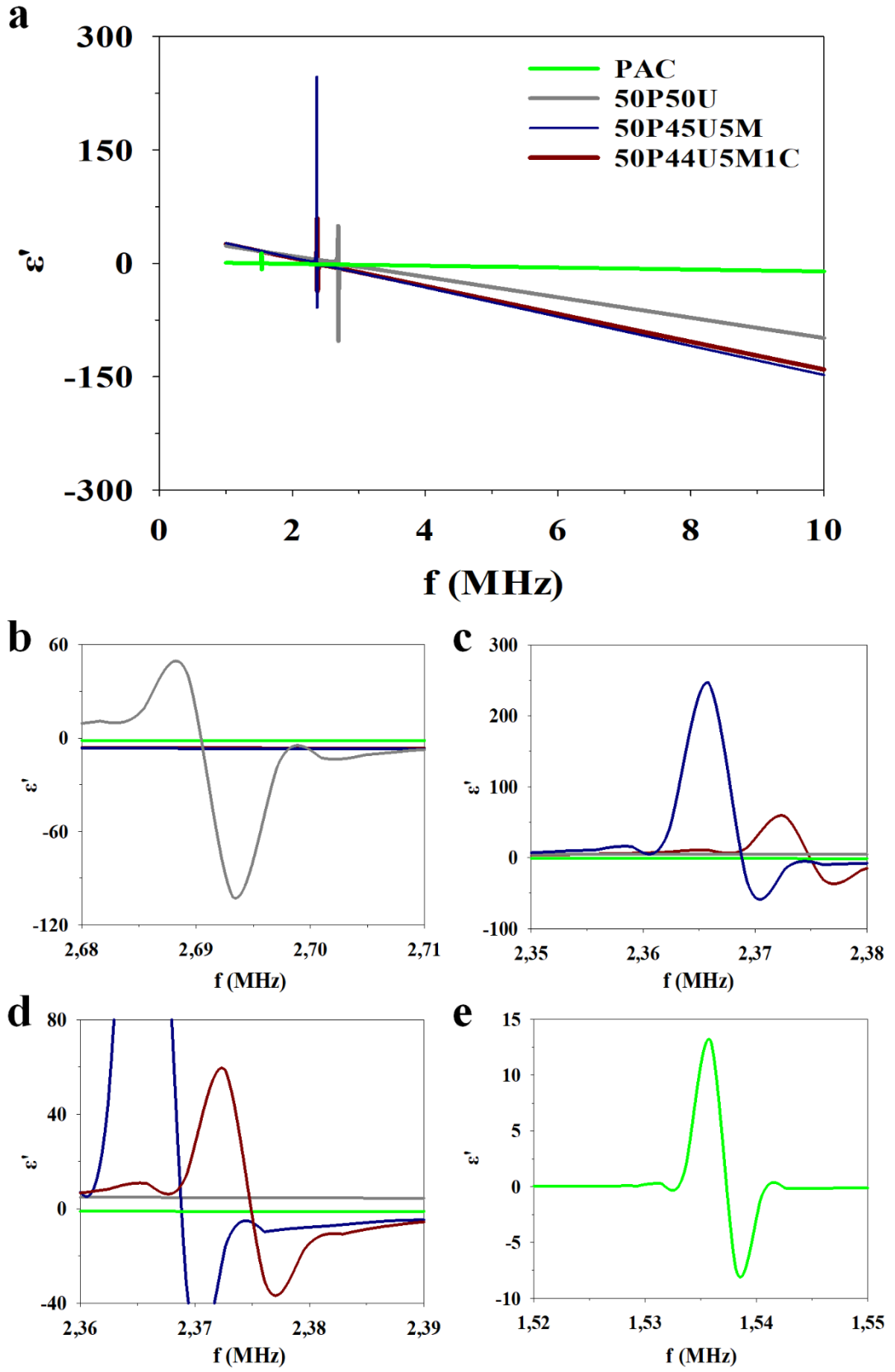
Şekil 5.5 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.6 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ'' - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.7 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.8 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ' - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

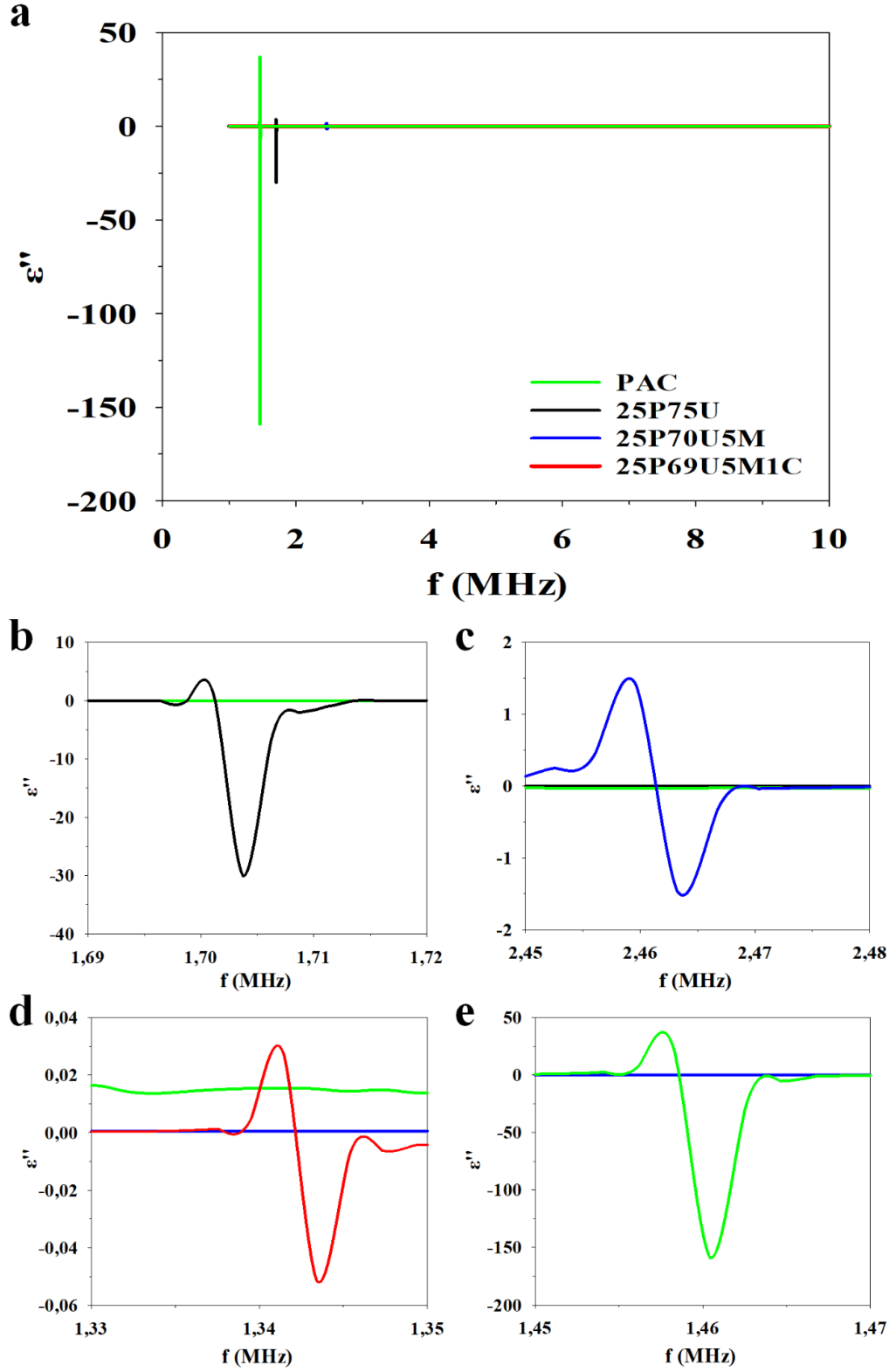
Tablo 5.3 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası dielektrik geçirgenlik tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

Numune Adı	Polarizasyon Öncesi Tepe Noktaları		Polarizasyon Sonrası Tepe Noktaları		Tepe Noktalarının Değişimi	
	Pozitif	Negatif	Pozitif	Negatif	Pozitif	Negatif
PAC	6,738	-6.387	13,006	-7,302	6,268	-0,915
25P75U	7,201	-122,160	5,010	-30,772	-2,209	91,388
25P69U5M1C	0,922	-1,354	0,703	-1,643	-0,219	-0,289
25P70U5M	79,894	-191,957	147,432	-48,500	67,538	143,457
50P50U	64,643	-3,280	39,316	-101,992	-25,327	-98,712
50P44U5M1C	77,016	-25,340	58,585	-30,447	-18,431	-5,107
50P45U5M	44,233	-72,851	246,600	-31,259	202,367	41,592

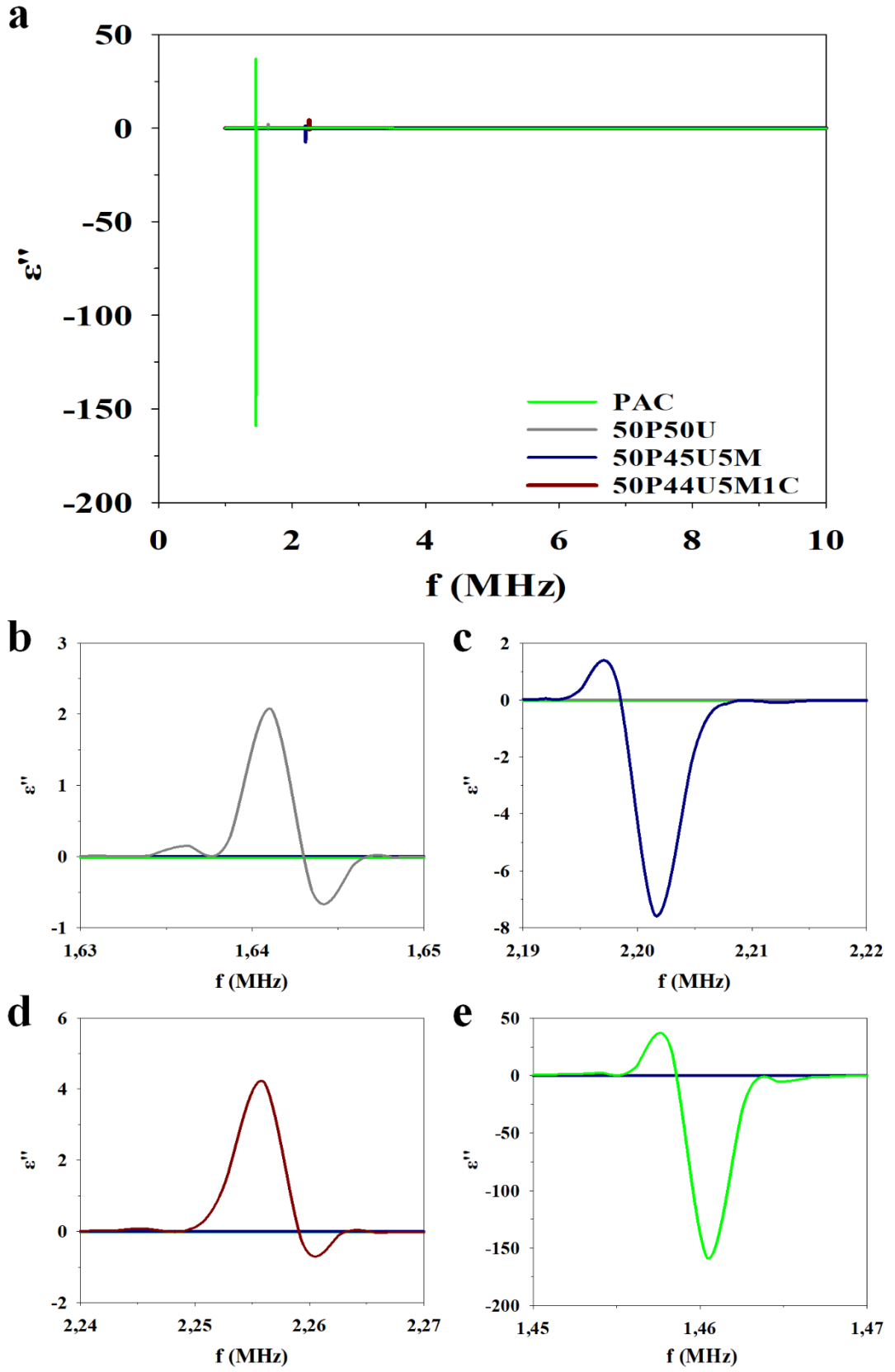
5.1.3 Dielektrik Kayıp

Numunelerin dielektrik kayıp değerleri Denklem 2.7 kullanılarak hesaplanmış, frekansa bağlı değerlerinin polarizasyon öncesi grafikleri Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da, polarizasyon sonrası grafikleri ise Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir. Grafiklerde görülen pozitif ve negatif tepe noktalarındaki dielektrik kayıp değerleri Tablo 5.4'te gösterilmektedir. Dielektrik kayıpların polarizasyon öncesi en yüksek pozitif tepe değeri PAC numunesinde 19,844 olarak, en düşük tepe değeri ise 25P69U5M1C numunesinde 0,027 olarak görülmektedir. Polarizasyon sonrası ise en yüksek tepe değeri 25P70U5M numunesinde 5073,095 olarak, en düşük tepe değeri ise 25P69U5M1C numunesinde 42,913 olarak görülmektedir. Dielektrik malzemeleri polarize etmenin amacı yüksek geçirgenlik elde etmektir ancak bunun belli bir miktarda enerji kaybına yol açması kaçınılmazdır. Bu nedenle, çalışmalarda kabul edilebilir bir enerji kaybı maliyetiyle yüksek geçirgenliğe ulaşmaya çalışmak amaçlanmaktadır (Qiu vd., 2022). Ancak polarizasyon işleminden sonra yapılan ölçümlerde polarizasyon öncesine göre kayıplarda dielektrik geçirgenlikteki artışlara göre çok daha büyük artışlar olduğu görülmektedir. Tablo 5.3'te görüldüğü gibi dielektrik geçirgenliğin pozitif tepe değerindeki artış en fazla 50P45U5M numunesinde 5,58 kat olarak görülürken, Tablo 5.4'te görüldüğü gibi dielektrik kayıplardaki artışlar 25P75U numunesinde 22.055 kata kadar çıkmaktadır. Yapılan hesaplama sonucunda rezonans frekansından büyük frekans değerlerinde negatif dielektrik kayıp değerleri görülmektedir. Negatif dielektrik kayıp kapasitif özelliklerin

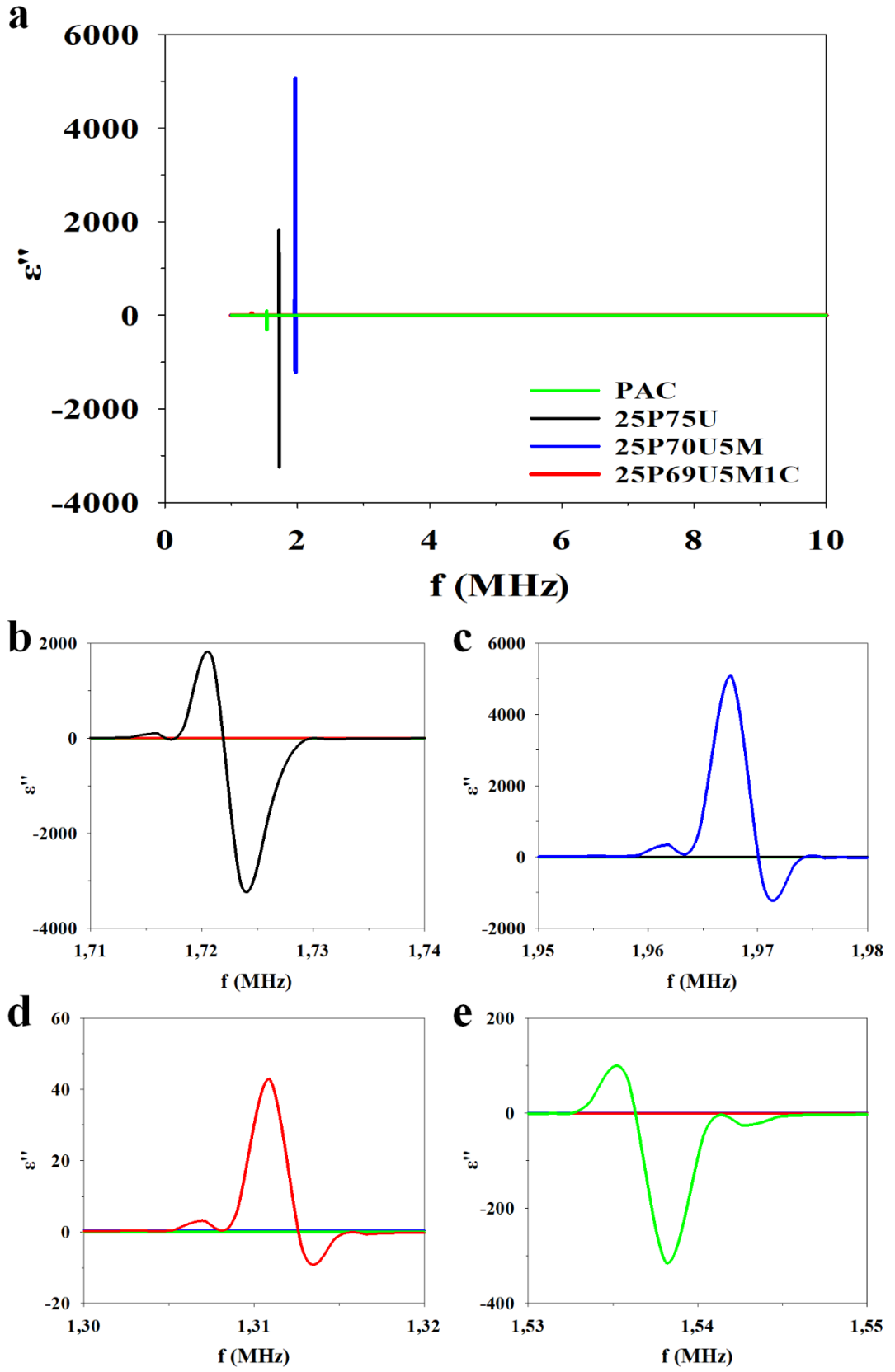
azaldığı ve indüktif özelliklerin baskın olduğu anlamına gelmektedir (Axelrod vd., 2006).



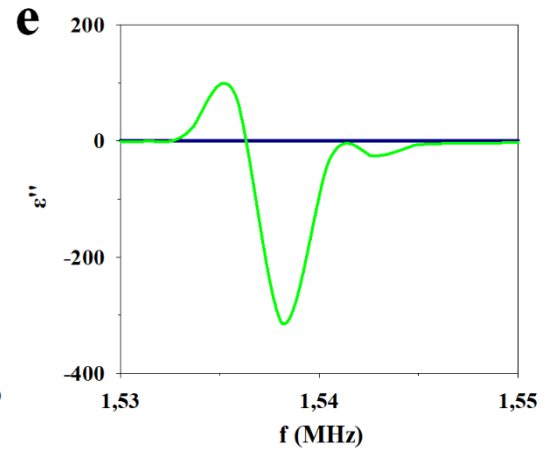
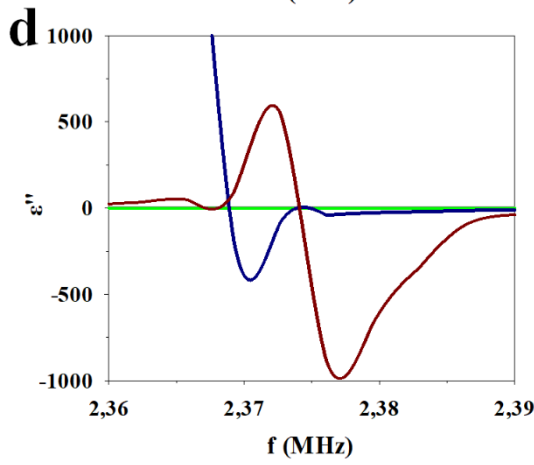
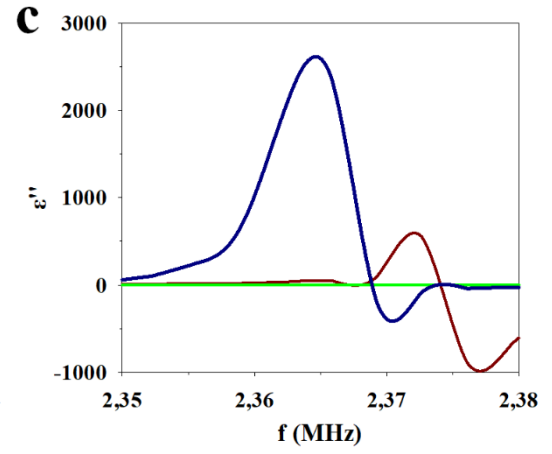
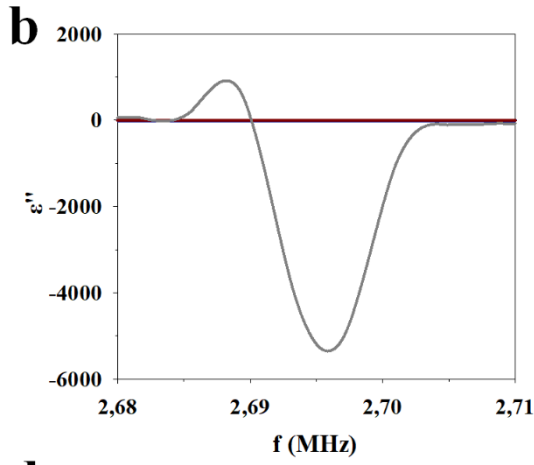
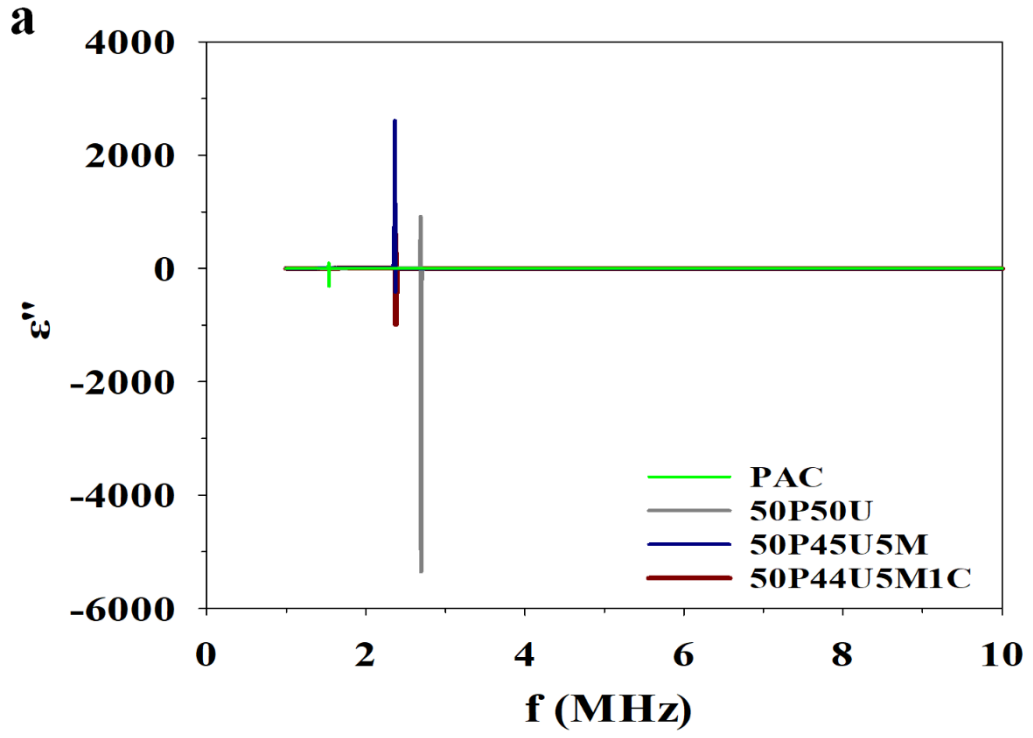
Şekil 5.9 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ'' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.10 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ'' - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.11 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin ϵ'' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.12 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin ϵ'' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

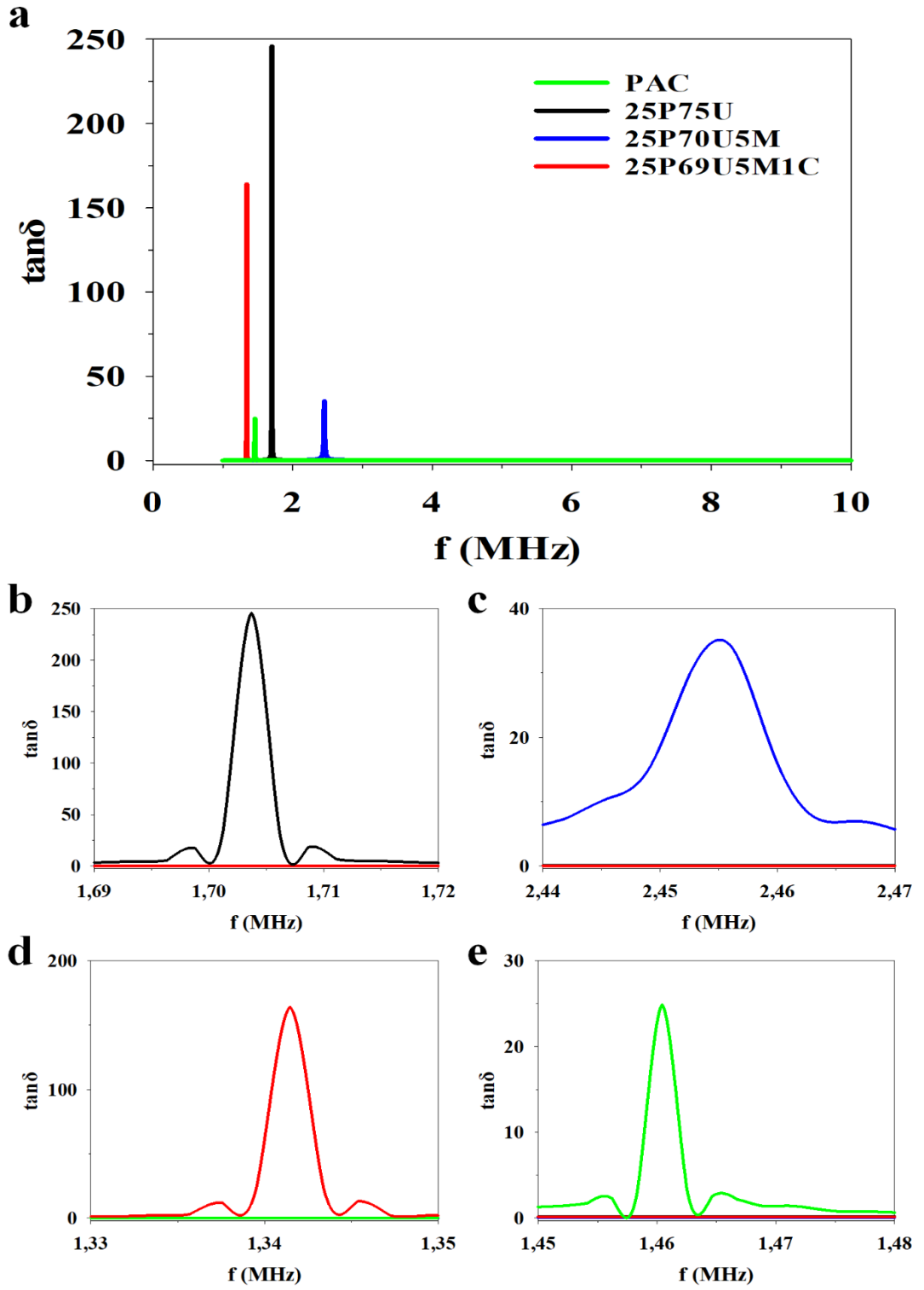
Tablo 5.4 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası dielektrik kayıpların tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

Numune Adı	Polarizasyon Öncesi		Polarizasyon Sonrası		Tepe Noktalarının	
	Tepe Noktaları		Tepe Noktaları		Değişimi	
	Pozitif	Negatif	Pozitif	Negatif	Pozitif	Negatif
PAC	19,844	-158,847	67,188	-314,715	47,344	-155,868
25P75U	0,075	-30,031	1654,159	-3021,851	1654,084	-2991,820
25P69U5M1C	0,027	-0,051	42,913	-4,271	42,886	-4,220
25P70U5M	1,403	-1,453	5073,095	-688,216	5071,692	-686,763
50P50U	2,075	-0,472	630,976	-5010,240	628,001	-5009,768
50P44U5M1C	4,195	-0,244	554,188	-883,557	549,993	-883,313
50P45U5M	0,460	-7,553	2368,080	-191,258	2367,620	-183,705

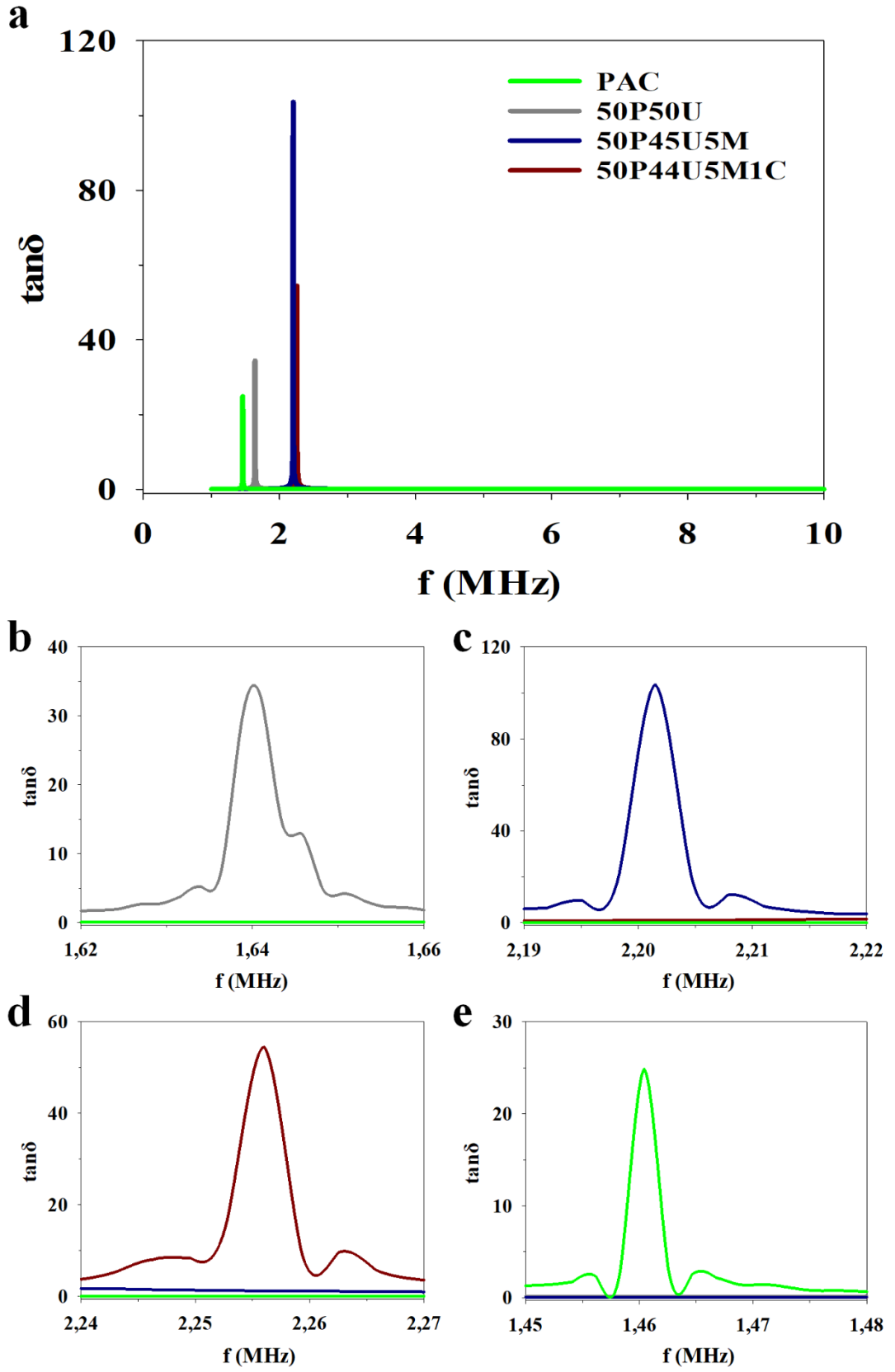
5.1.4 Tanjant Kaybı

Numunelerin Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te polarizasyon öncesi, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da ise polarizasyon sonrası frekansa bağlı tanjant kaybı grafikleri gösterilmektedir. Grafiklerde görülen tepelerin tanjant kaybı değerleri ise Tablo 5.5'te gösterilmektedir. Tanjant kaybının polarizasyon öncesi en yüksek tepe değeri 25P75U numunesinde 245,835 olarak, en düşük tepe değeri ise PAC numunesinde 24,871 olarak görülmüştür. Polarizasyon sonrasında ise en yüksek tepe değeri 50P50U numunesinde 266,668 olarak görülürken, en düşük tepe değeri PAC numunesinde 30,112 olarak görülmektedir. Polarizasyon işleminden sonra tanjant kaybı değerlerinin polarizasyon öncesine göre 25P69U5M1C ve 25P75U numunelerinde azaldığı, diğer numunelerde ise arttığı görülmektedir. Bu durum 25P69U5M1C ve 25P75U numunelerinde tanjant kaybının tepe noktasına ulaştığı frekansta polarizasyon sonrası dielektrik geçirgenliğin dielektrik kayıplardan daha fazla arttığı, diğer numunelerde ise dielektrik kayıpların daha fazla arttığı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla polarizasyonun göre 25P69U5M1C ve 25P75U numunelerinde rezonans frekansında sistemin verimliliğini artırdığı görülmektedir. Polarizasyonun tepe değerlerinde en verimli sonuç verdiği numune tanjant kaybı tepe değerinin %62,8 azaldığı 25P69U5M1C numunesi, en verimsiz sonuç ise tepe değerinin %831 artış gösterdiği 50P50U numunesidir. PAC numunesinin tanjant kayıpları tepe noktası da dahil olmak üzere tüm frekans değerlerinde en düşük değerlerdir. Yapılan katkılamların malzemelerin dielektrik geçirgenliğini artırmasına rağmen kayıpları daha çok artırdığı elde edilen verilerden anlaşılmaktadır. Rezonans frekansına yaklaştıkça polimer

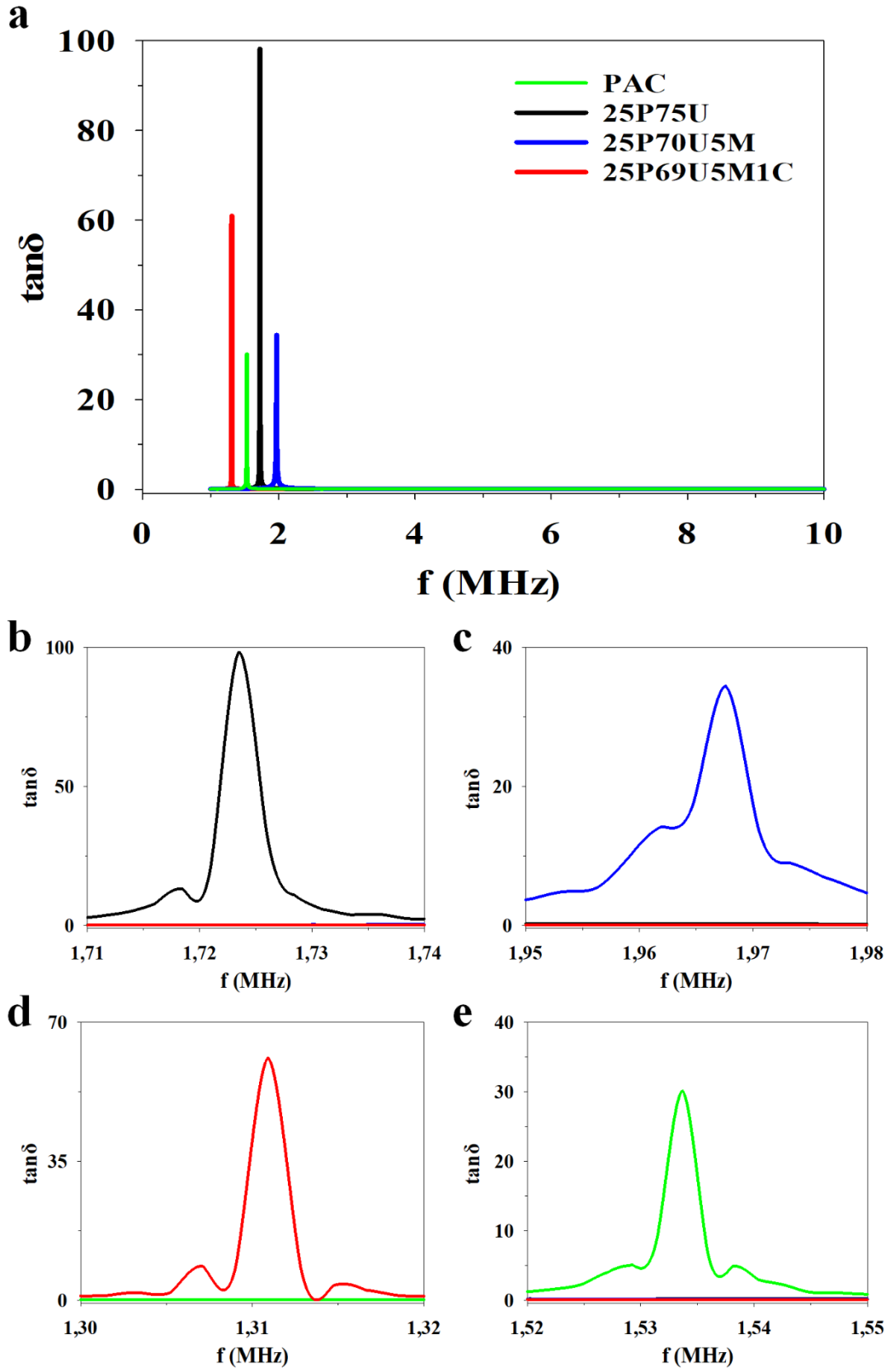
malzemenin yüksek enerji dağılımından dolayı tanjant kayıpları gittikçe artmakta ve rezonans frekansında en yüksek değere ulaşmaktadır (Zhang vd., 2015). Rezonans frekansındaki tepe değerleri incelendiğinde en düşük tepe değerinin PAC numunesinde olduğu, kayıp değerlerinin genel olarak literatürde incelenen seramik ve oksitlerin kayıplarından (20-30 arası) yüksek olduğu görülmektedir (Li vd., 2018; Wang vd., 2020). Ancak 1 MHz frekans değerindeki tanjant kayıpları incelendiğinde kayıpların Wang vd., (2020) sınır olarak belirttiği 0,05 değerinden düşük olduğu görülmektedir (Wang vd., 2020). Rezonans frekansından büyük frekans değerlerinde ise küçük frekans değerlerinde elde edilen değerlerden daha düşük kayıp değerleri görülmektedir. Ayrıca literatürde tanjant kaybı 0,01 değerinden düşük olduğunda ayarlanabilir mikrodalga uygulamaları için, 0,01 ile 0,1 arasında olmasının mikrodalga cihazları için ve 0,1'den büyük olmasının sızıntı eşiğine yakın dielektrik kompozitler gibi yüksek kayıpların kabul edilebileceği uygulamalar için uygun olacağı belirtilmektedir (Jiang vd., 2009; Lancaster vd., 1998; Zhang vd., 2018). Rezonans frekansına yakın frekanslar yüksek tanjant kayıplarının kabul edilebileceği sızıntı eşiğine yakın dielektrik kompozitlerin kullanıldığı uygulamalar için ideal bir aralık olabilir. Wang vd. (2020) rezonans frekansı bölgesinde negatif dielektrik geçirgenlik ve düşük kayıp değerlerinin aynı anda ortaya çıkabileceğini ve bu durumun metamalzemeler için uygun bir çalışma aralığı olabileceğini belirtmiştir (Wang vd., 2020). Metamalzemeler optik, malzeme bilimi, algılama teknolojileri gibi birçok uygulama alanında kullanılan yapay malzemelerdir (Cortes vd., 2012; Jiao ve Alavi, 2020; Li vd., 2019). Ancak elde edilen sonuçlar incelendiğinde tüm numunelerde dielektrik geçirgenliğin yüksek olduğu rezonans frekansında dielektrik kayıp değerlerinin %5'ten fazla olduğu görülmektedir. Bu yüzden elde edilen yüksek dielektrik kayıp değerleri bu numuneler için rezonans frekansı bölgesinde metamalzeme uygulamaları için uygun bir aralık oluşmadığını göstermektedir.



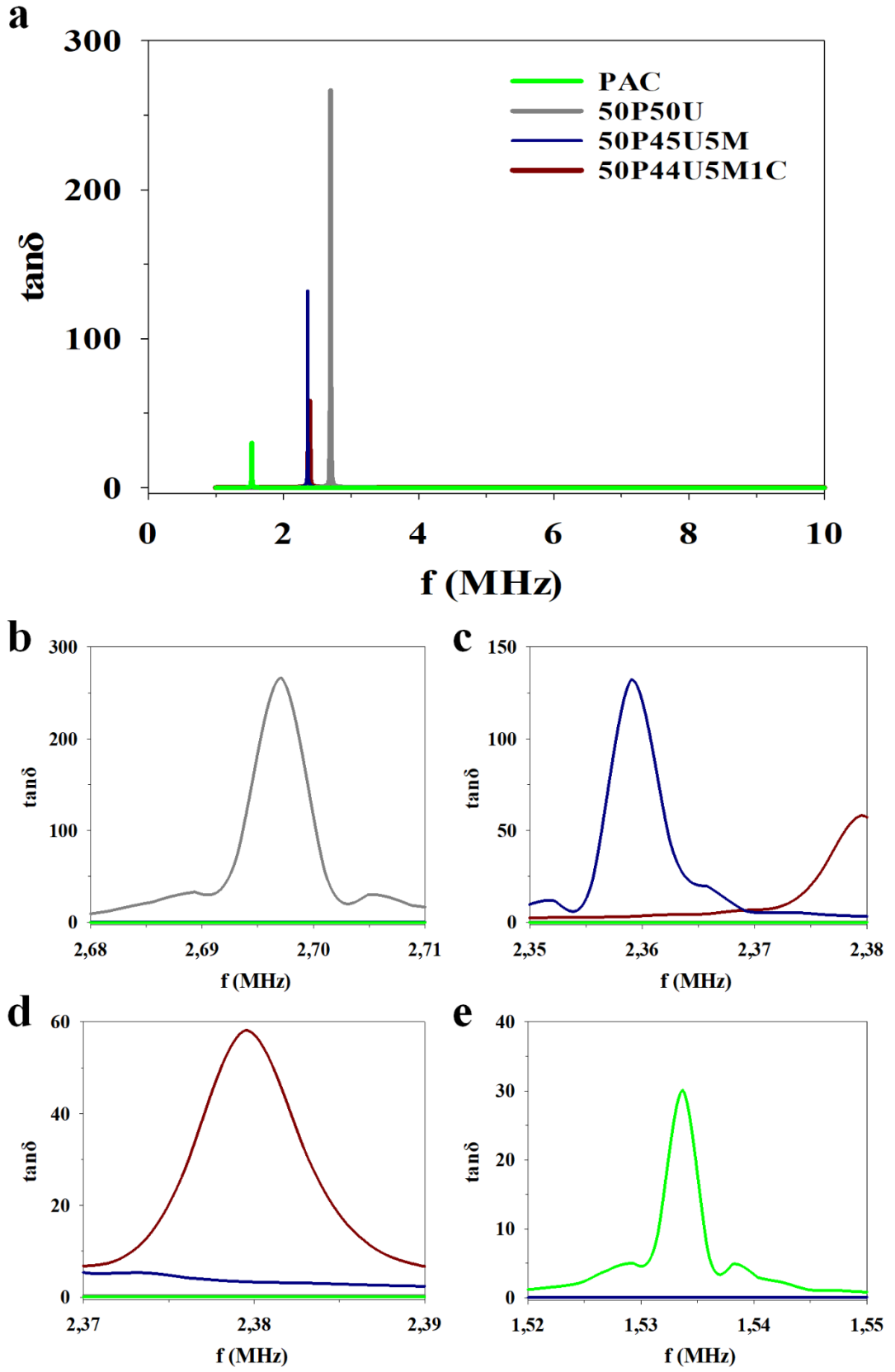
Şekil 5.13 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.14 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.15 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin tan δ -f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.16 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin $\tan\delta$ - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

Tablo 5.5 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası tanjant kaybı tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

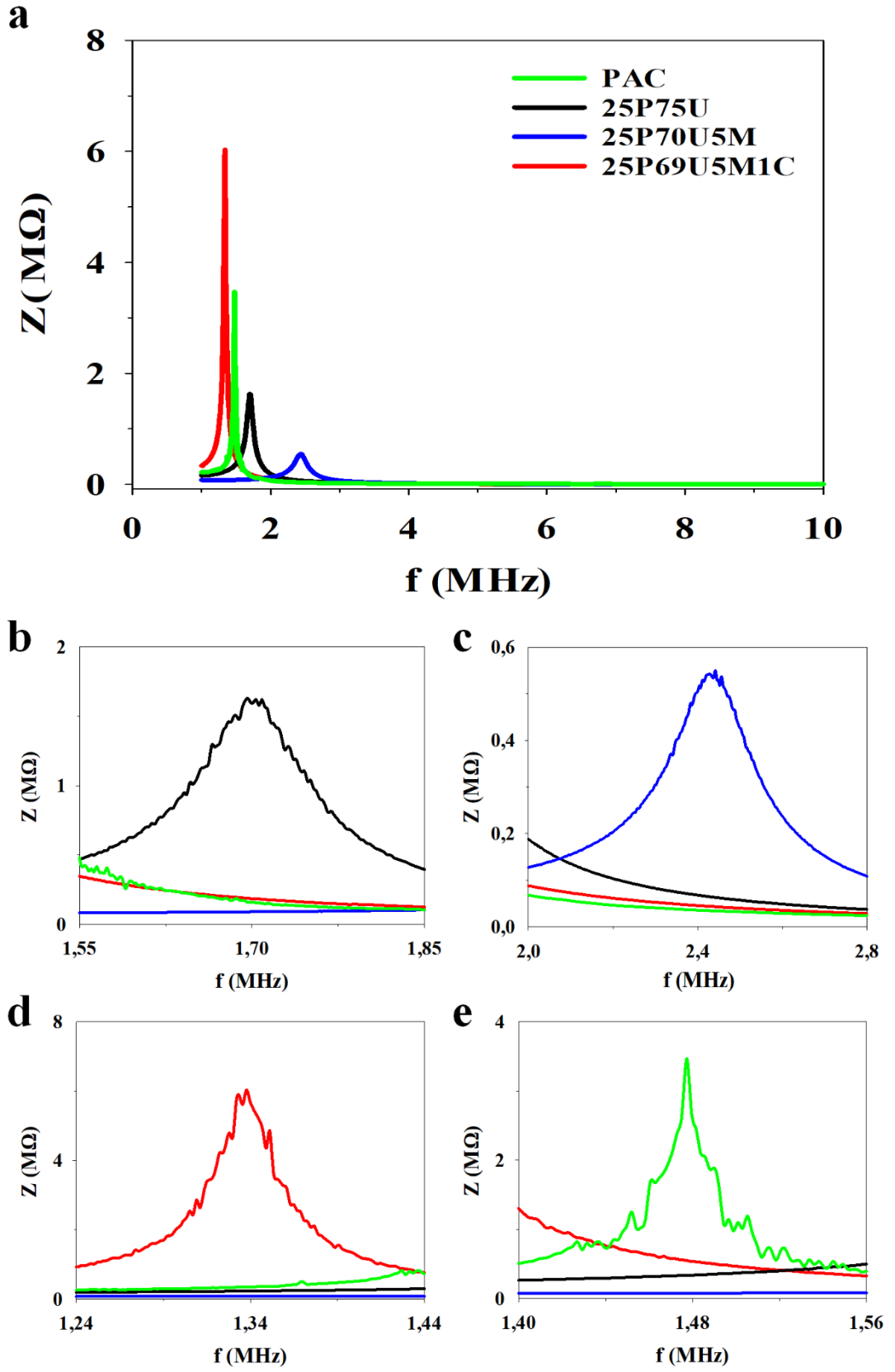
Numune Adı	Polarizasyon Öncesi Tepe Noktası	Polarizasyon Sonrası Tepe Noktası	Tepe Noktasının Değişimi
PAC	24,871	30,112	5,241
25P75U	245,835	98,203	-147,632
25P69U5M1C	163,993	61,004	-102,989
25P70U5M	34,072	34,410	0,338
50P50U	32,103	266,668	232,565
50P44U5M1C	54,473	58,191	3,718
50P45U5M	103,673	132,200	28,527

5.2 Empedans, Direnç ve Reaktans

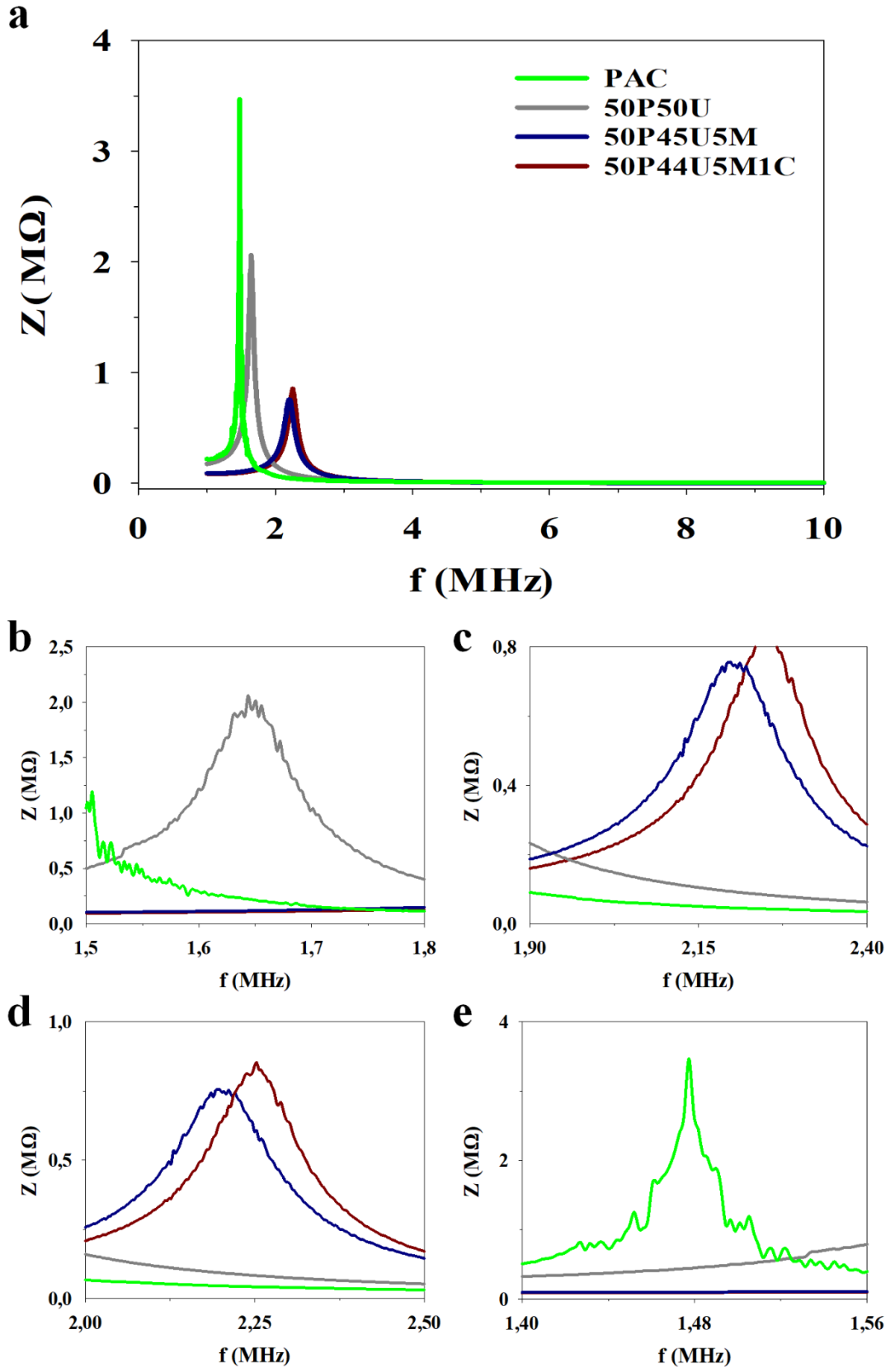
5.2.1 Empedans

Numunelerin empedans değerlerinin frekansa bağlı ölçümlerinin polarizasyon öncesi grafikleri Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de, polarizasyon sonrası grafikleri ise Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de gösterilmektedir. Grafiklerde görülen tepelerin empedans değerleri Tablo 5.6’da gösterilmektedir. Empedans değerleri rezonans frekansında maksimum değerine ulaşmaktadır. Empedansın polarizasyon öncesi ölçümlerde en yüksek tepe değeri 25P69U5M1C numunesinde 6,030 M Ω olarak, en düşük tepe değeri ise 25P70U5M numunesinde 0,542 M Ω olarak gözlenmiştir. Polarizasyon sonrası ölçümlerde ise en yüksek tepe değeri 25P69U5M1C numunesinde 7,170 M Ω olarak, en düşük tepe değeri 50P50U numunesinde 0,436 M Ω olarak elde edilmiştir. Polarizasyon sonrasında empedans tepe değerleri polarizasyon öncesine göre %25 PAC içeren numunelerde artmış, diğer numunelerde azalmıştır. Polarizasyon sonrasında tepe değerinde yüzdesel olarak en büyük artış %83,2 ile 25P70U5M numunesinde, en büyük düşüş ise %78,8 ile 50P50U numunesinde görülmüştür. İdeal durumda polarizasyon sonrası dipol momentlerin hizalanması ile malzemelerin iletkenliği arttığından empedans değerlerinin düşmesi beklenmektedir, ancak üretilen numunelerde bulunan farklı malzemelerin dağılımı ve arayüzleri arasındaki etkileşimler beklenmeyen tepkilere yol açabilmektedir (Cui vd., 2014). Literatürdeki çalışmalara göre PAC’ın 100 kHz frekansındaki empedans değeri 1 k Ω civarında

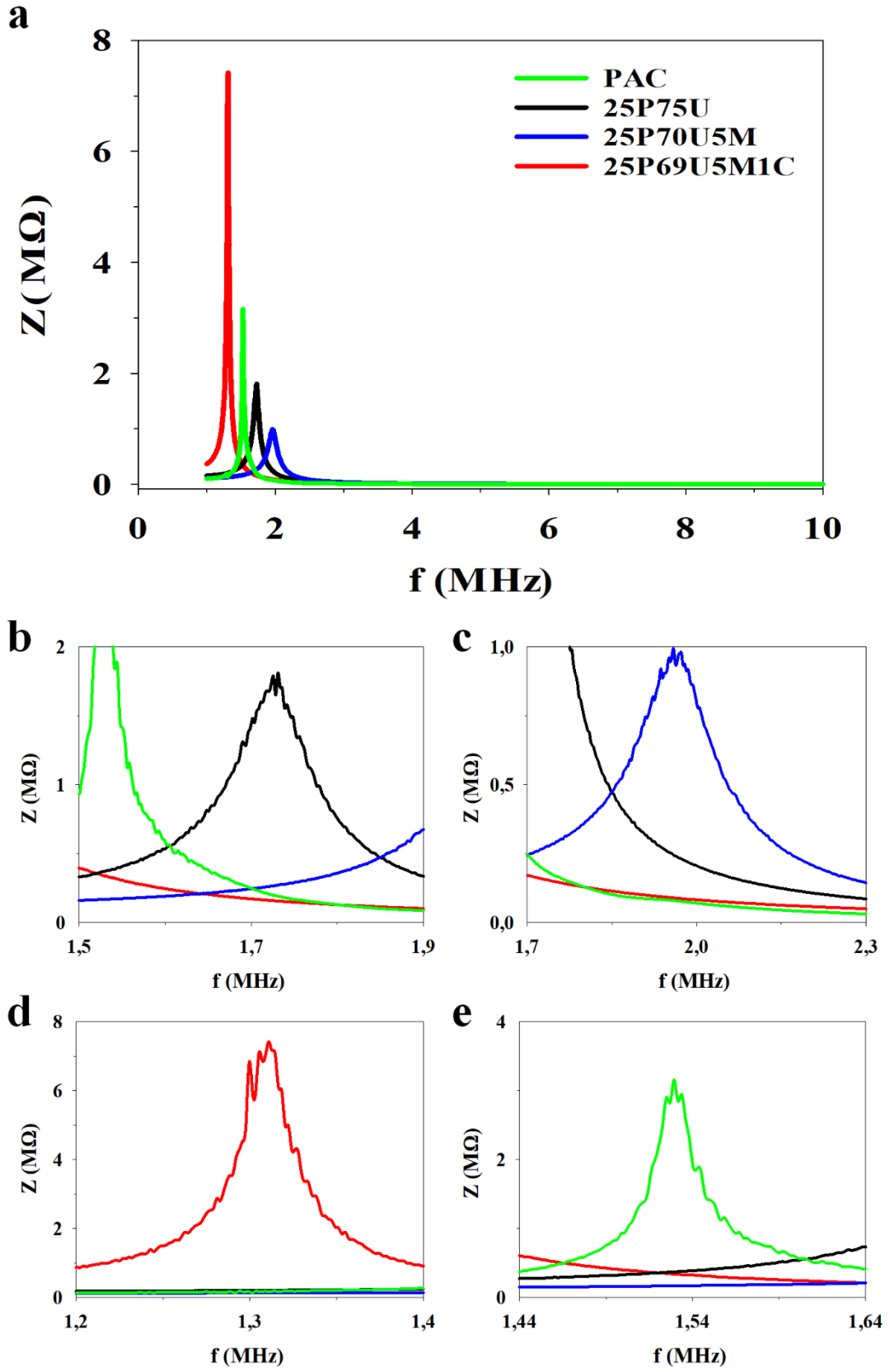
görülmektedir ve frekans arttıkça empedans değeri düşüş göstermektedir (Chun vd., 2013; Hsu vd., 2009). Ancak yapılan ölçümlerde rezonans frekansına yaklaşıldığında tepe değerine doğru yükselmeler olduğundan yapılan ölçümlerde empedans değeri 1MHz frekansında 10 k Ω ile 100 k Ω aralığında değerler almıştır ve rezonans frekansına kadar artış göstermiştir. Ayrıca yapılan katkılamların da kayıpları artırdığı düşünüldüğünde empedansın artışında etkisi olabileceği söylenebilir. Rezonans frekansından büyük frekanslarda 10 MHz değerine doğru uzaklaştıkça daha düşük empedans değerleri elde edilebilmektedir. 1-10 MHz frekans aralığında rezonans frekansına yaklaşıldıkça elde edilen yüksek empedans değerleri (1 MHz frekans değeri için 60 k Ω ile 200 k Ω aralığı) elektriksel empedans tomografisi (EIT) uygulamaları için geliştirilen entegre devreler için uygun değerlerdir (Hong vd., 2009).



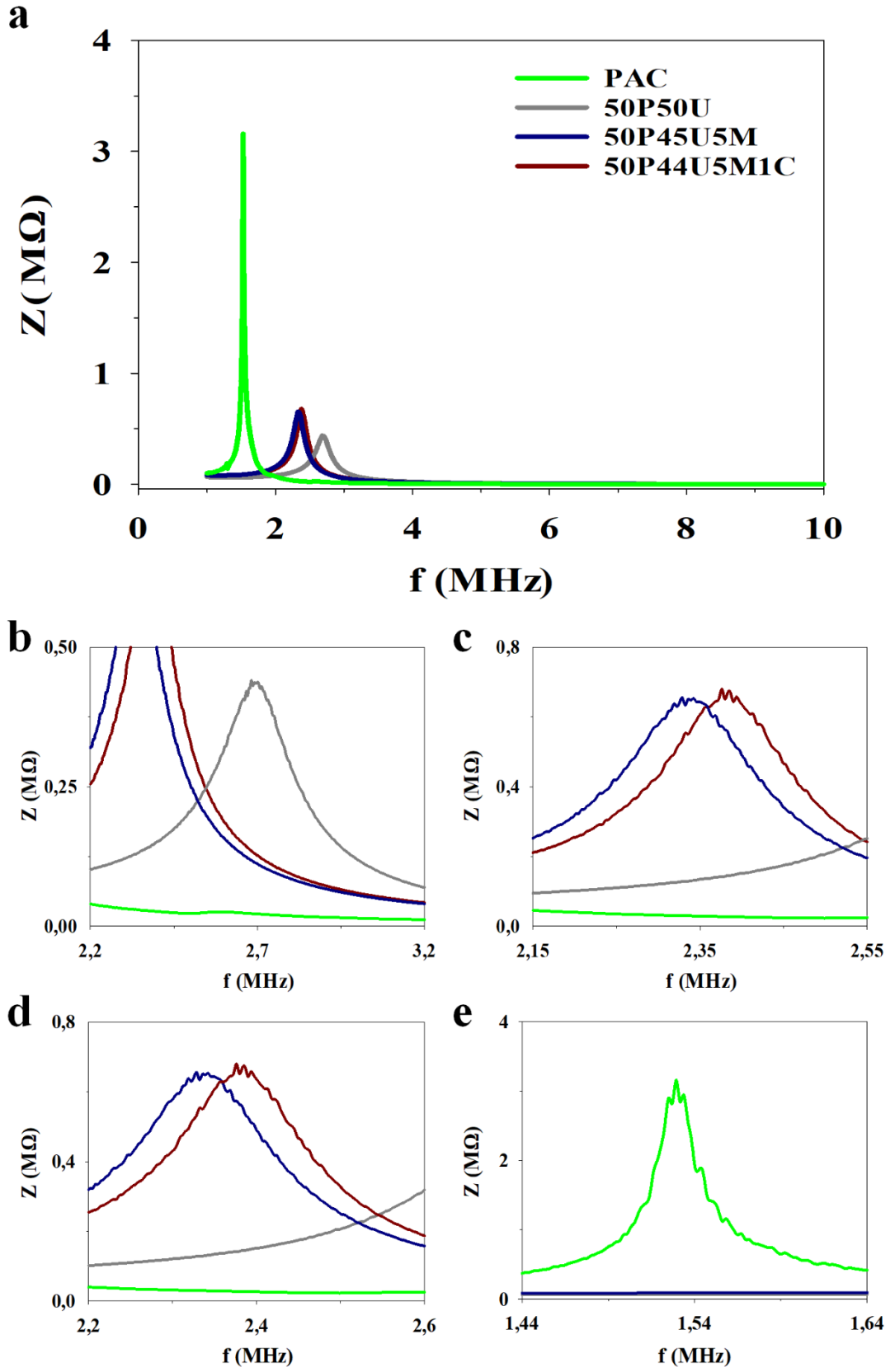
Şekil 5.17 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.18 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.19 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



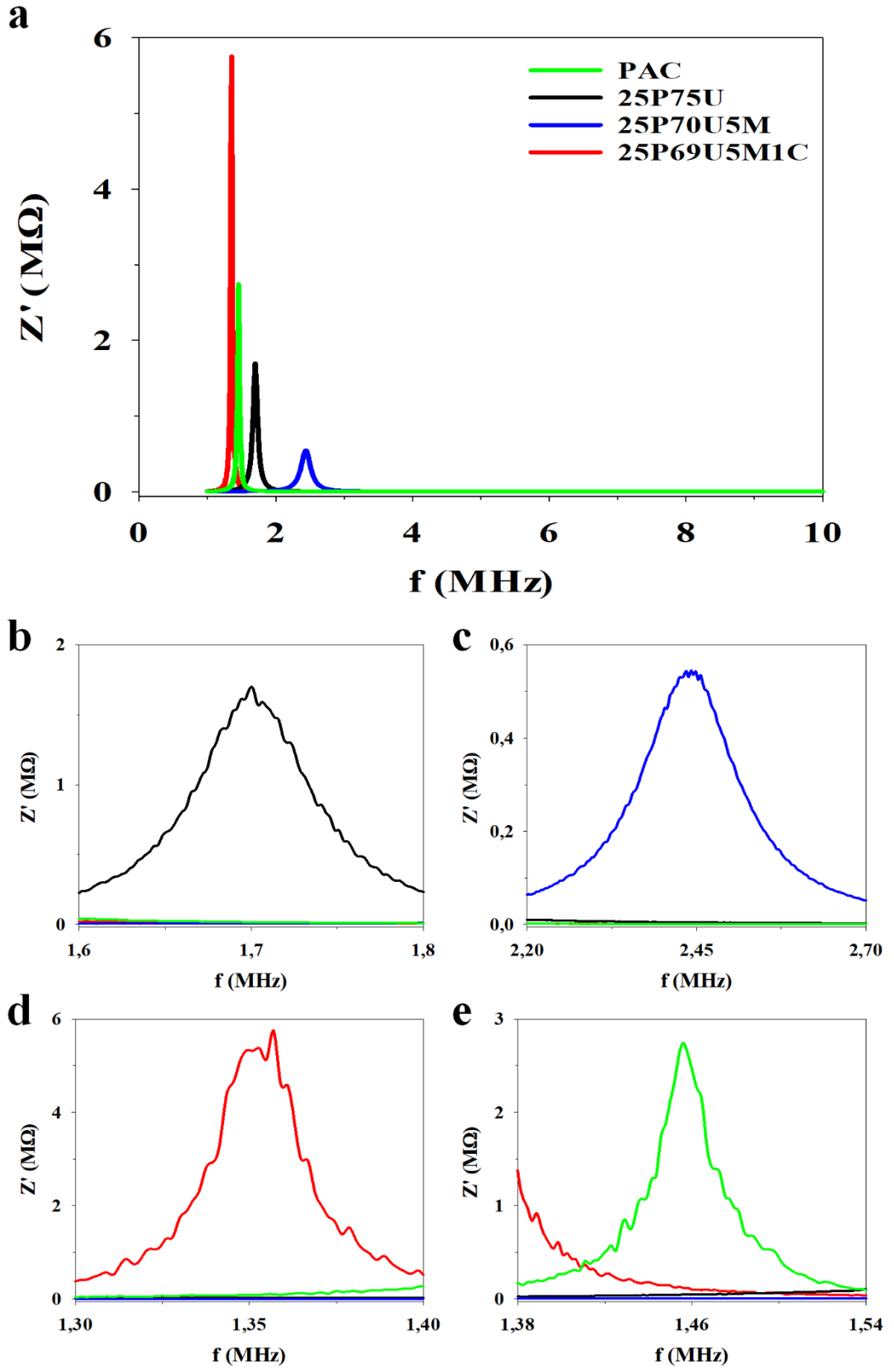
Şekil 5.20 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin Z-f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

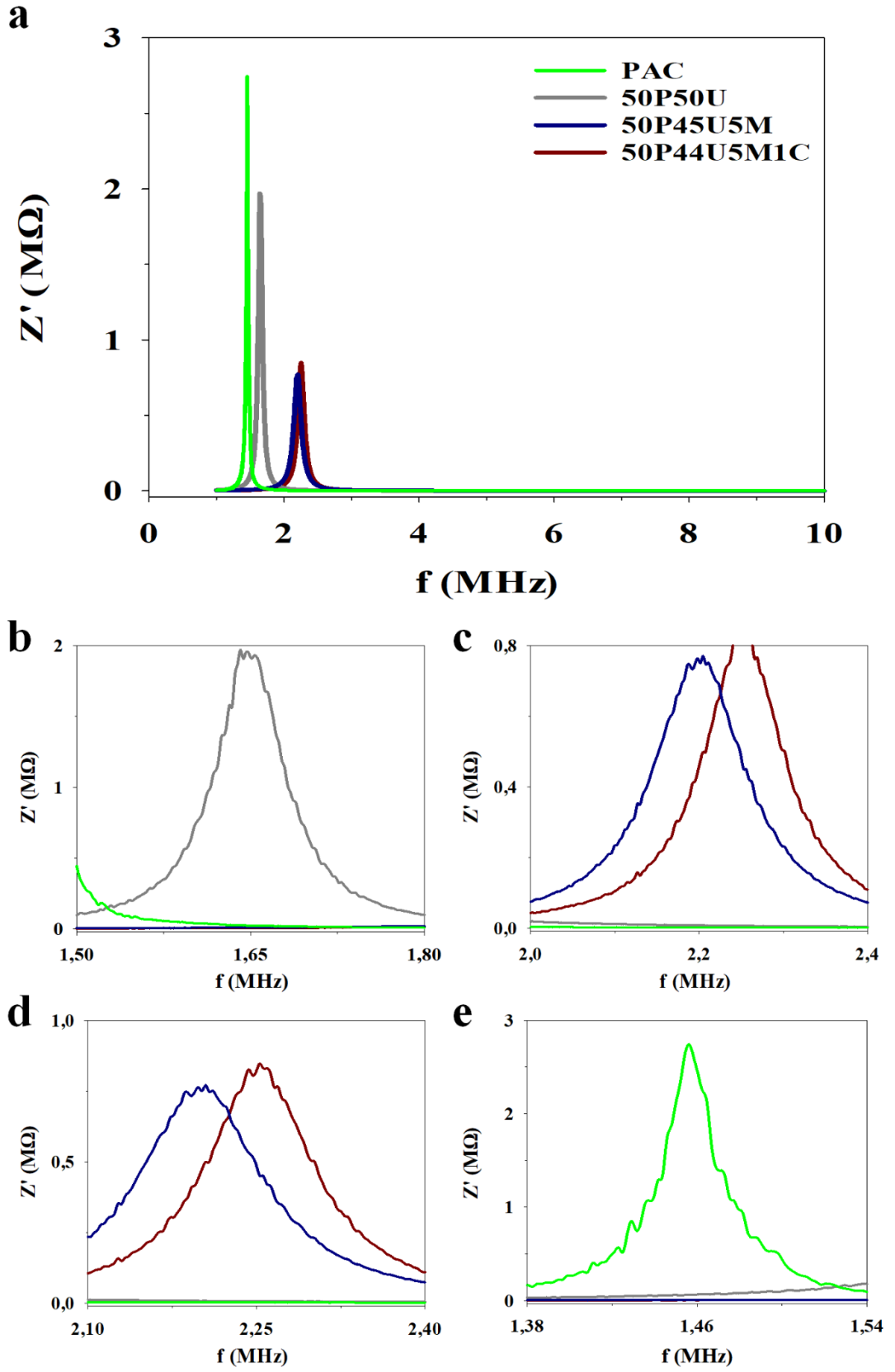
Tablo 5.6 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası empedans tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

Numune Adı	Polarizasyon Öncesi Tepe Noktası (MΩ)	Polarizasyon Sonrası Tepe Noktası (MΩ)	Tepe Noktalarının Değişimi (MΩ)
PAC	3,468	3,160	-0,308
25P75U	1,630	1,810	0,180
25P69U5M1C	6,030	7,170	1,140
25P70U5M	0,542	0,993	0,451
50P50U	2,060	0,436	-1,624
50P44U5M1C	0,853	0,680	-0,163
50P45U5M	0,756	0,650	-0,096

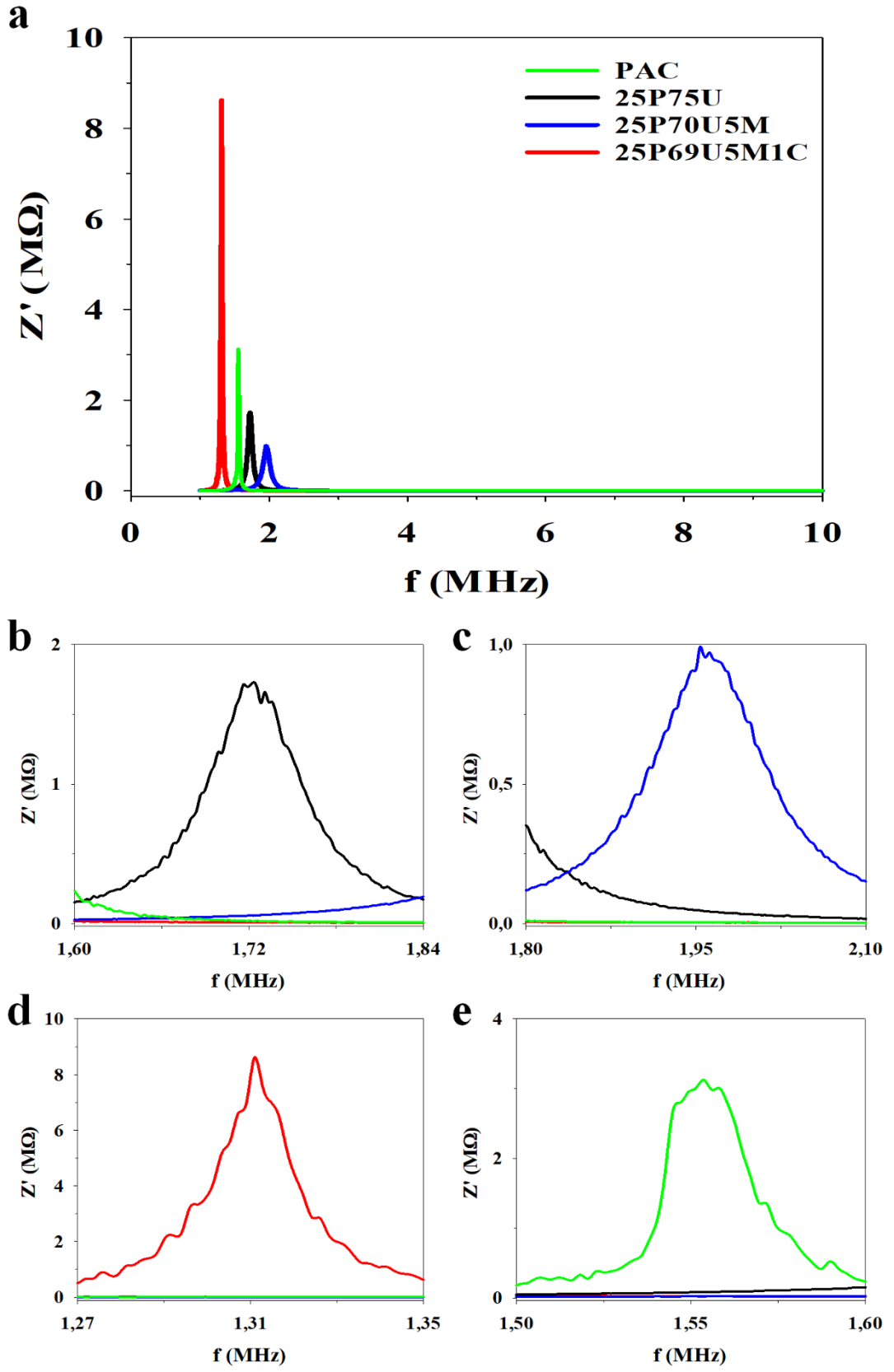
5.2.2 Direnç

Numunelerin direnç değerlerinin frekansa bağlı ölçümlerinin polarizasyon öncesi grafikleri Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de, polarizasyon sonrası grafikleri ise Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’te gösterilmektedir. Grafiklerde görülen tepelerin direnç değerleri Tablo 5.7’de gösterilmektedir. Direncin polarizasyon öncesi ölçümlerde en yüksek tepe değeri 25P69U5M1C numunesinde 5,750 MΩ olarak, en düşük tepe değeri ise 25P70U5M numunesinde 0,544 MΩ olarak görülmüştür. Polarizasyon sonrası ölçümlerde ise en yüksek tepe değeri 25P69U5M1C numunesinde 8,620 MΩ olarak, en düşük tepe değeri ise 50P50U numunesinde 0,440 MΩ olarak elde edilmiştir. Polarizasyon sonrasında direnç tepe değerleri polarizasyon öncesine göre PAC numunesinde ve %25 PAC içeren numunelerde artmış, diğer numunelerde azalmıştır. Polarizasyondan sonra yüzdesel olarak direnç tepe değerindeki en büyük artış %82,0 ile 25P70U5M numunesinde, en büyük düşüş ise %77,6 ile 50P50U numunesinde görülmüştür. İdeal durumda polarizasyon sonrasında iletkenliğin artması nedeniyle direnç değerlerinin düşmesi beklenir ancak arayüzey etkileşimleri empedans değerlerinde olduğu gibi direnç değerlerinde de beklenmeyen artışların ortaya çıkmasında etkili olmuştur (Cui vd., 2014).

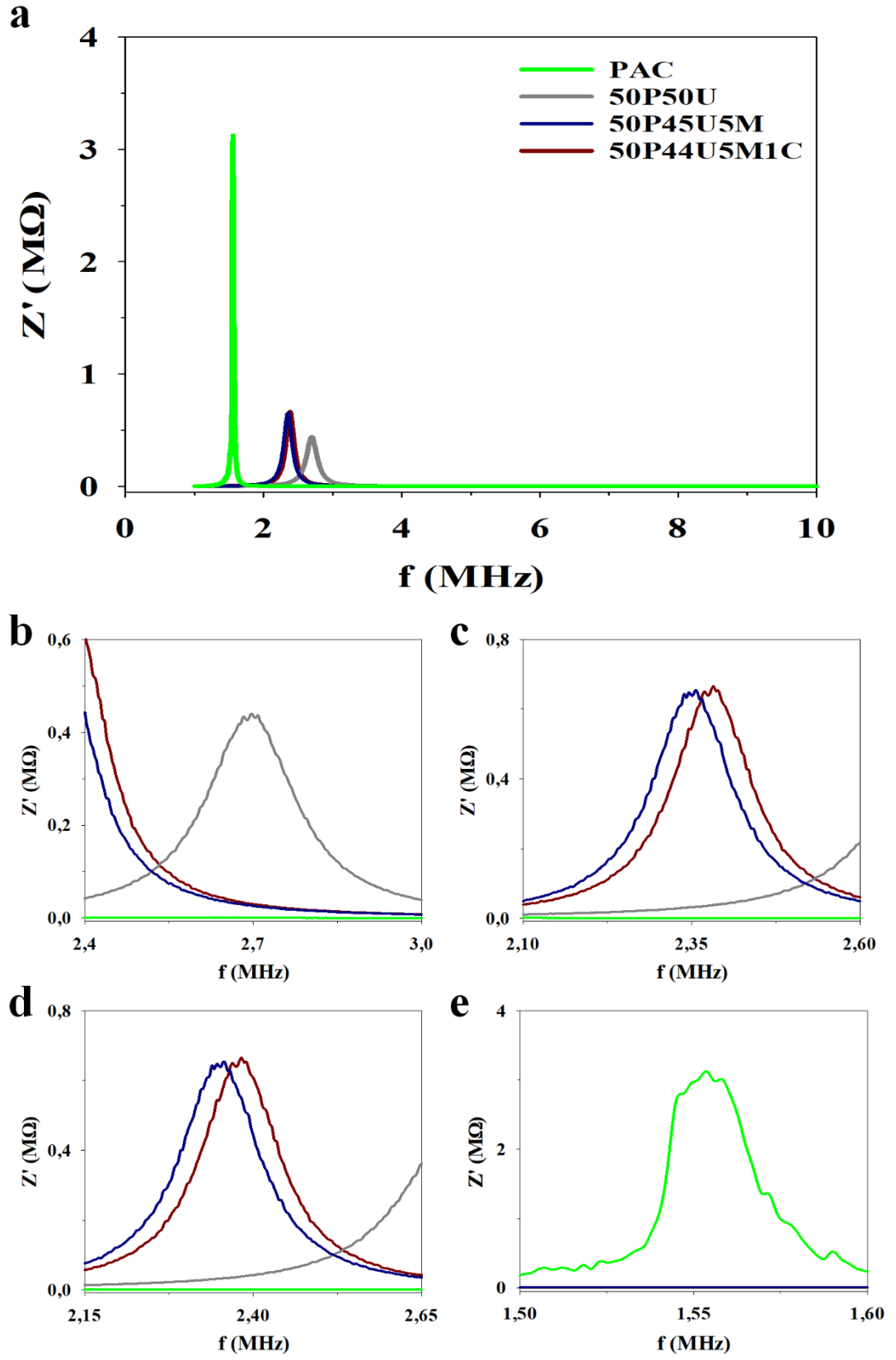




Şekil 5.22 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin Z' - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.23 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin Z' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.24 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin Z' -f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

Tablo 5.7 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası direnç tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

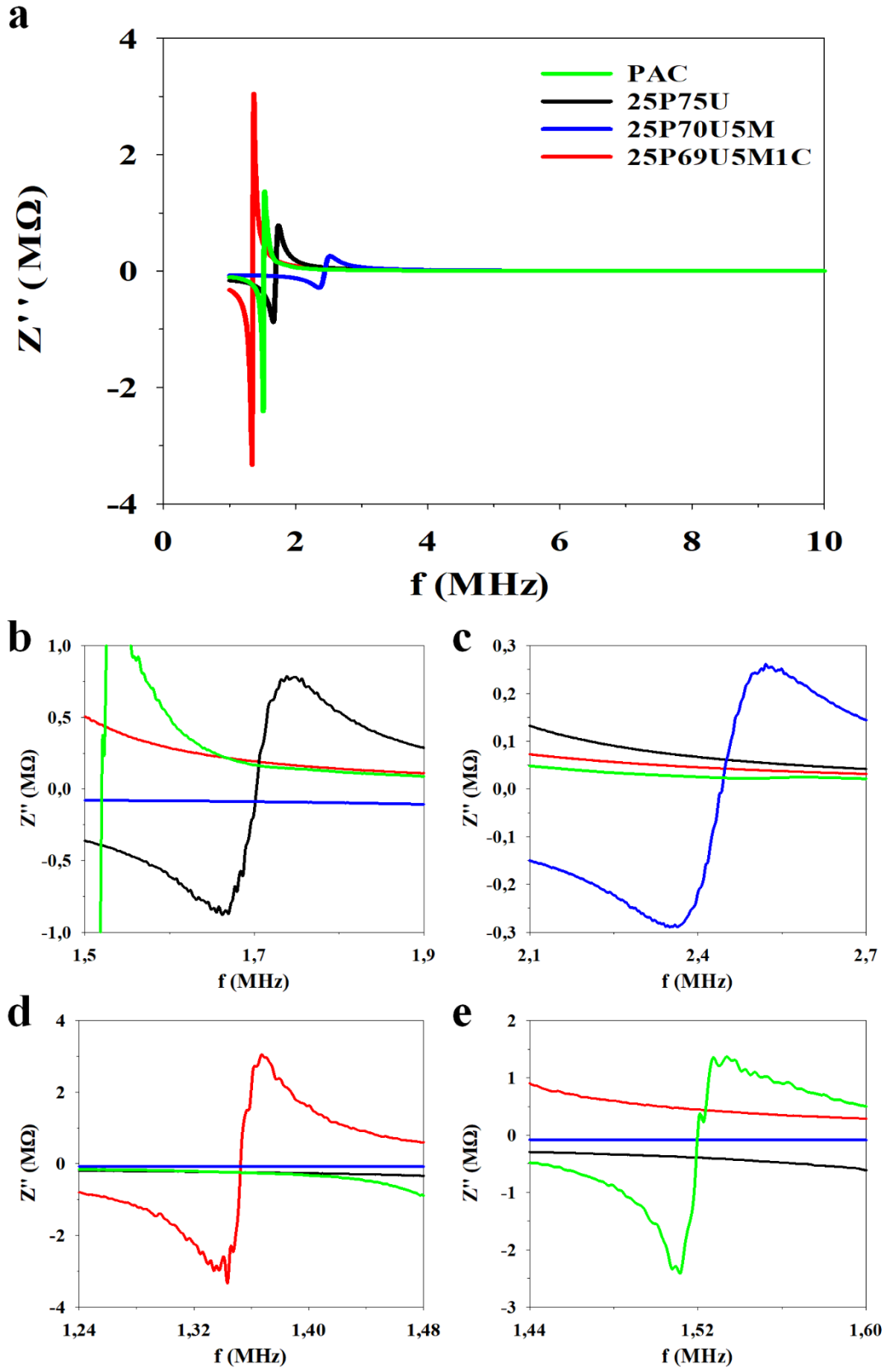
Numune Adı	Polarizasyon Öncesi Tepe Noktası (MΩ)	Polarizasyon Sonrası Tepe Noktası (MΩ)	Tepe Noktasının Değişimi (MΩ)
PAC	2,743	3,011	0,268
25P75U	1,680	1,730	0,050
25P69U5M1C	5,750	8,620	2,870
25P70U5M	0,544	0,990	0,446
50P50U	1,970	0,440	-1,530
50P44U5M1C	0,826	0,665	-0,161
50P45U5M	0,771	0,654	-0,117

5.2.3 Reaktans

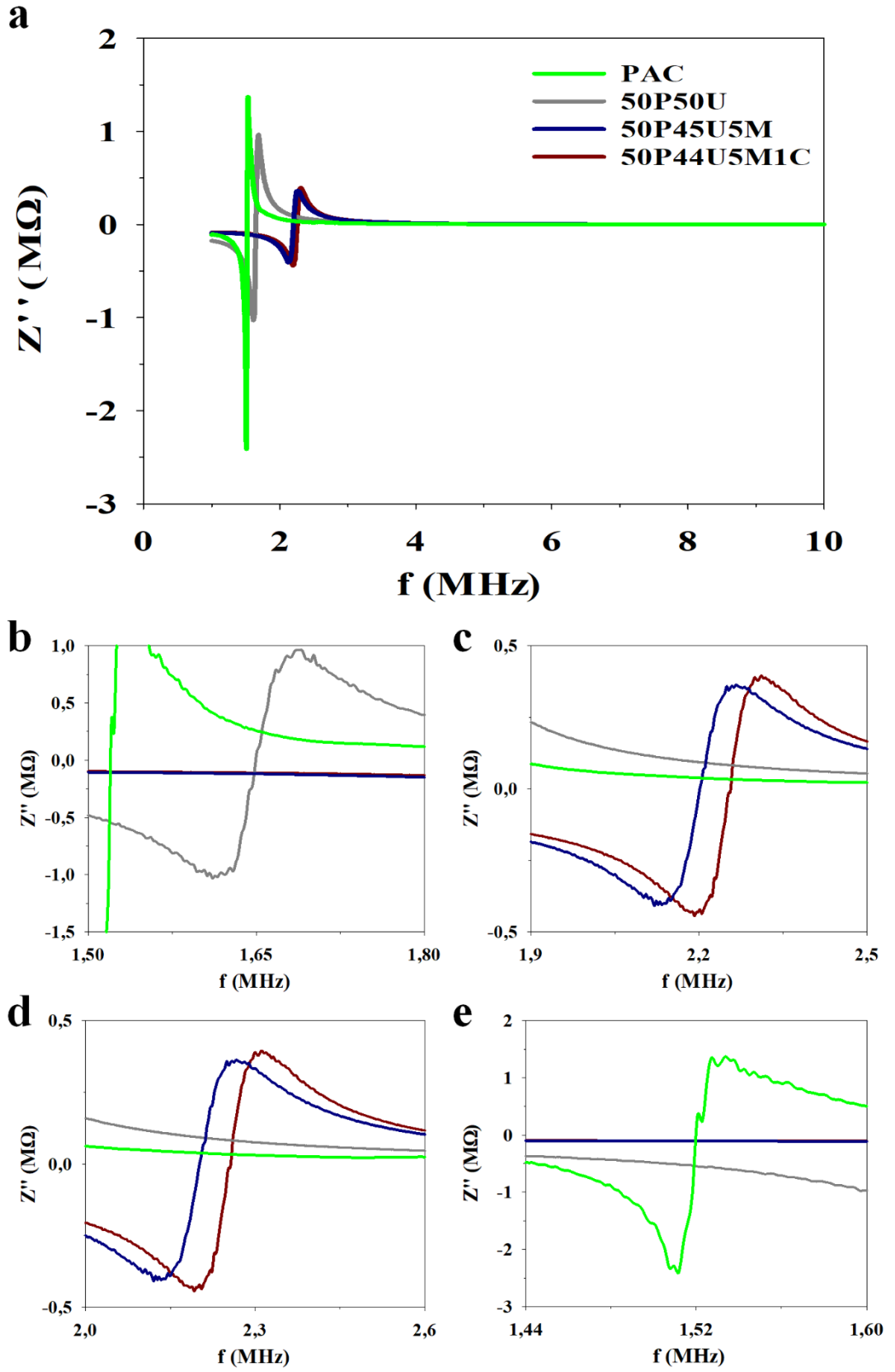
Numunelerin reaktans değerlerinin frekansa bağlı ölçümlerinin polarizasyon öncesi grafikleri Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da, polarizasyon sonrası grafikleri ise Şekil 5.27 ve Şekil 5.28’de gösterilmektedir. Grafiklerde görülen tepelerin reaktans değerleri Tablo 5.8’de gösterilmektedir. Reaktansın polarizasyon öncesi ölçümlerde en yüksek pozitif tepe değeri 25P69U5M1C numunesinde 3,040 MΩ olarak, en düşük tepe değeri ise 25P70U5M numunesinde 0,256 MΩ olarak gözlenmiştir. Polarizasyon sonrası ölçümlerde ise en yüksek pozitif tepe değeri 25P69U5M1C numunesinde 3,600 MΩ olarak, en düşük tepe değeri ise 50P50U numunesinde 0,206 MΩ olarak elde edilmiştir. Polarizasyon sonrasında reaktansın pozitif ve negatif tepe değerleri polarizasyon öncesine göre %25 PAC içeren numunelerde artmış, diğer numunelerde azalmıştır. Polarizasyon sonrası yüzdesel olarak pozitif tepe değerinde en büyük artış %80,5 ile 25P70U5M numunesinde, en büyük düşüş ise %78,6 ile 50P50U numunesinde görülmüştür. Normal şartlarda polarizasyon işleminden sonra dipol momentlerin elektrik alan yönünde hizalanması ve enerji depolama kapasitesinin artması nedeniyle kapasitif reaktansın azalması beklenir, ancak %25 PAC içeren numunelerdeki artışın nedeni de empedans ve direnç artışlarında olduğu gibi malzemenin dağılımındaki kusurlardan kaynaklı arayüzey etkileşimleridir (Cui vd., 2014). Reaktans değerlerinin rezonans frekansında kapasitif ve indüktif reaktans eşit olduğundan 0 olduğu ve rezonans frekansından daha büyük frekans değerlerinde negatif değerlerden pozitif değerlere geçiş yaptığı, yani kapasitif karakterden indüktif

karaktere geçiş olduğu görülmektedir. Rezonans frekansından daha düşük frekans aralığında reaktans negatif değer alır ve mutlak değeri azalarak 0'a yaklaşır. Bu durum malzemenin kapasitif davranışından kaynaklanmaktadır (Sun vd., 2019). Rezonans frekans değerlerinden daha büyük aralıkta pozitif reaktans yani indüktif davranış gözlenir. Oraya çıkan bu davranış $X = X_L + X_C$ ($X_L = \omega L$ (indüktif reaktans), $X_C = 1/\omega C$ (kapasitif reaktans) formülüyle ifade edilir (Wang vd., 2020).

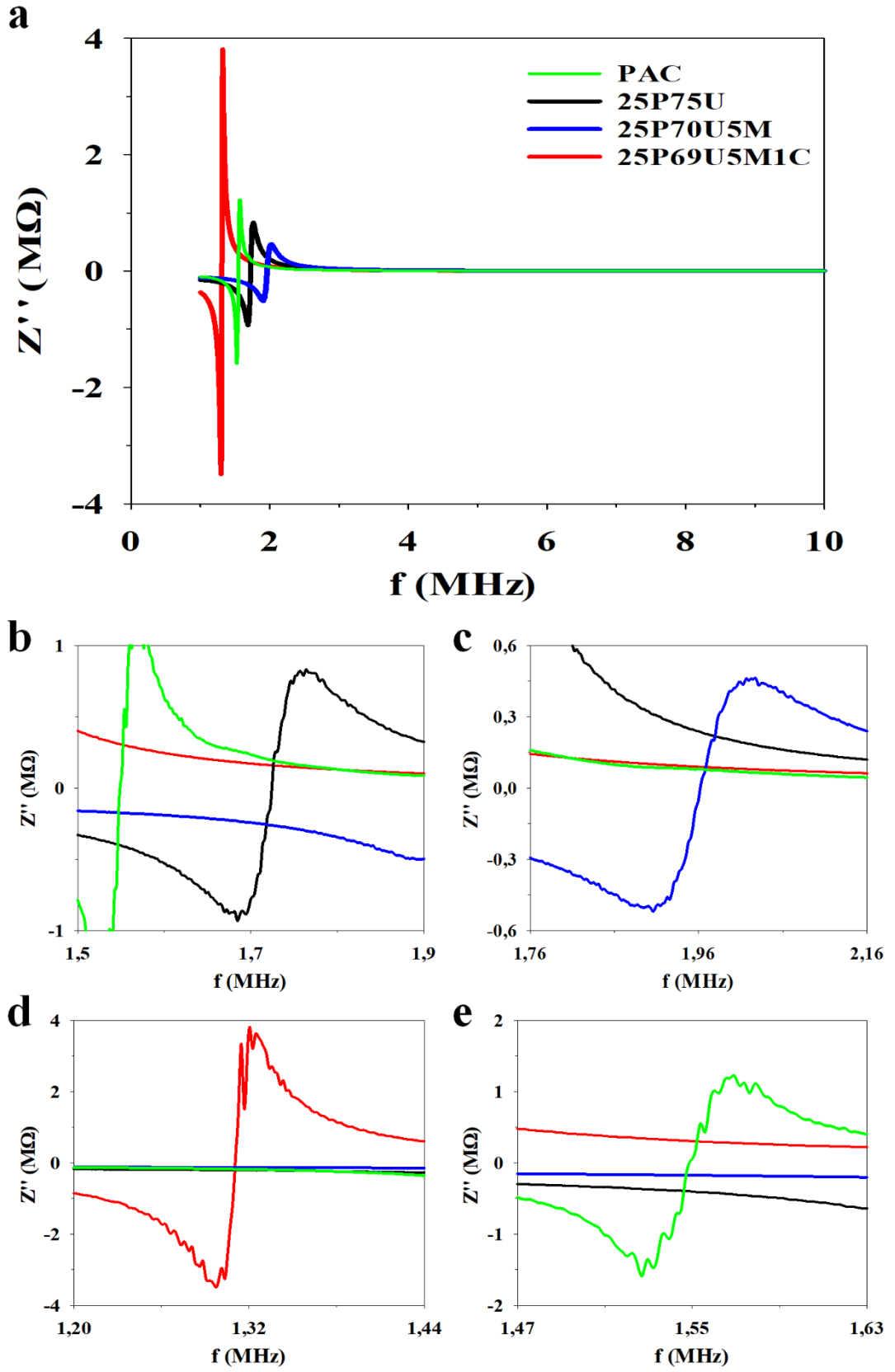




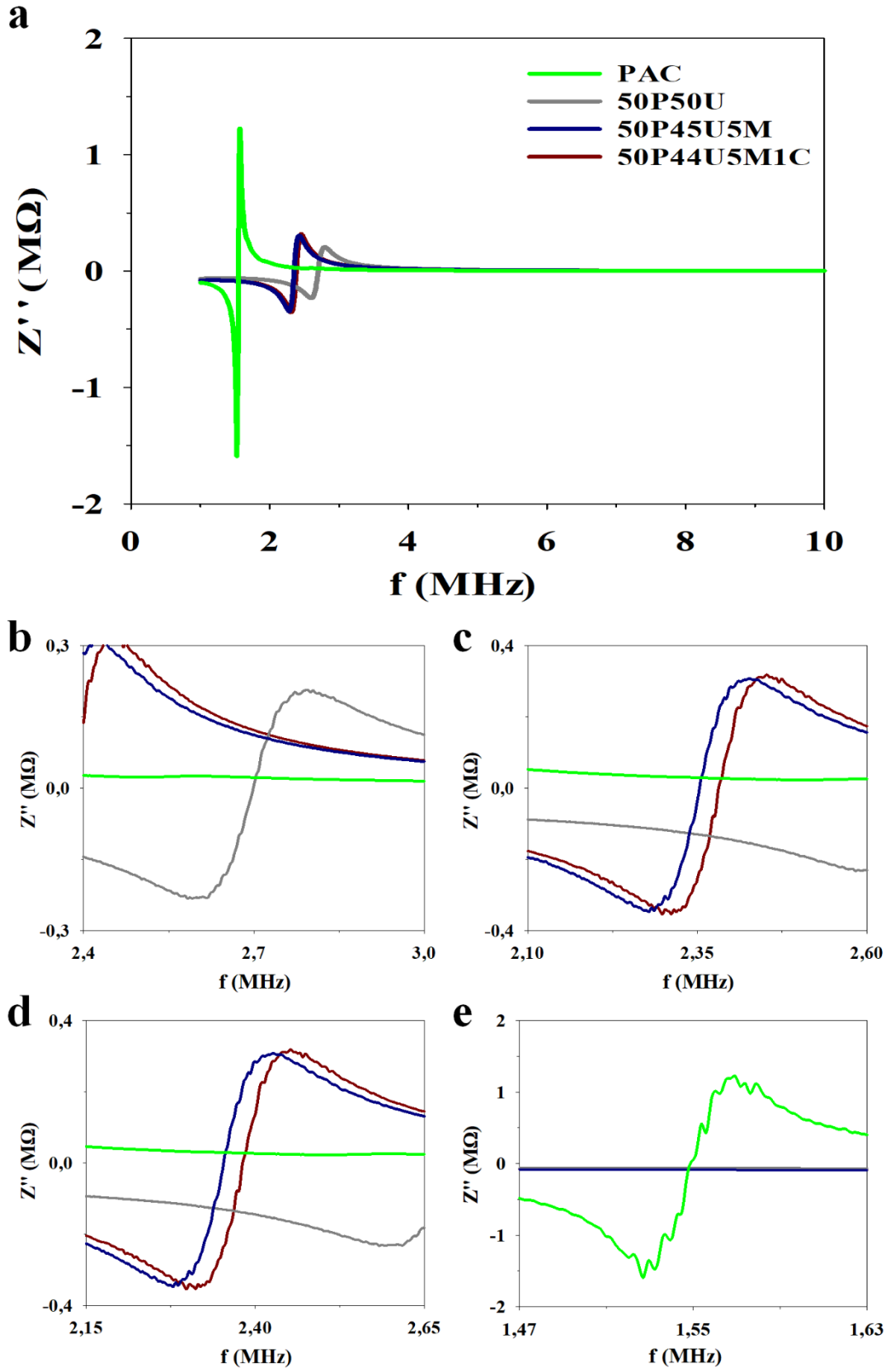
Şekil 5.25 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC içeren numunelerin Z'' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.26 Polarizasyon öncesi (a) %50 PAC içeren numunelerin Z'' - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.27 Polarizasyon sonrası (a) %25 PAC içeren numunelerin Z'' - f grafikleri ve (b) 25P75U, (c) 25P70U5M, (d) 25P69U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri



Şekil 5.28 Polarizasyon sonrası (a) %50 PAC içeren numunelerin Z'' - f grafikleri ve (b) 50P50U, (c) 50P45U5M, (d) 50P44U5M1C ve (e) PAC numunelerinin rezonans tepeleri

Tablo 5.8 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası reaktans tepe noktaları ile tepe noktalarının polarizasyona bağlı değişimi

Numune Adı	Polarizasyon Öncesi		Polarizasyon Sonrası		Tepe Noktalarının	
	Tepe Noktaları		Tepe Noktaları		Değişimi	
	Pozitif (MΩ)	Negatif (MΩ)	Pozitif (MΩ)	Negatif (MΩ)	Pozitif (MΩ)	Negatif (MΩ)
PAC	1,300	-2,330	1,220	-1,590	-0,080	0,740
25P75U	0,780	-0,878	0,832	-0,931	0,052	-0,053
25P69U5M1C	3,040	-3,330	3,600	-3,480	0,560	-0,150
25P70U5M	0,256	-0,289	0,462	-0,519	0,206	-0,230
50P50U	0,965	-1,030	0,206	-0,233	-0,759	0,797
50P44U5M1C	0,395	-0,444	0,318	-0,354	-0,077	0,900
50P45U5M	0,363	-0,408	0,307	-0,347	-0,056	0,061

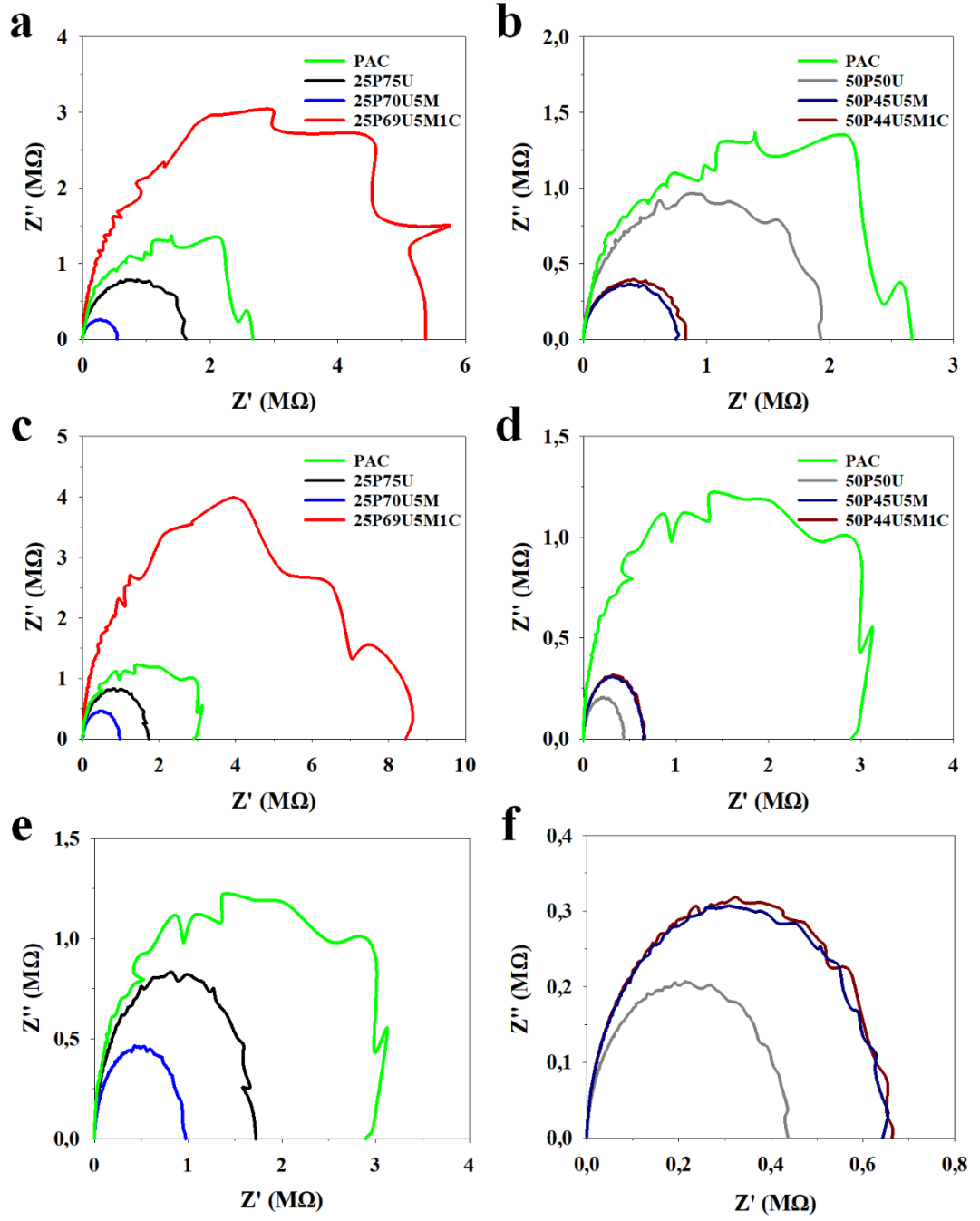
5.3 Cole-Cole Grafikleri

Numunelerin direnç ve reaktans değerleri kullanılarak elde edilen Cole-Cole grafikleri Şekil 5.29’da görülmektedir. Grafiklerde tüm numunelerde yarım daire oluştuğu görülmektedir. Yarım daireler malzemelerin davranışları, yapısı, fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında analizler yapılmasına, dielektrik gevşeme mekanizmalarının anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Tek bir Debye gevşemesine sahip saf polar malzemeler için Cole-Cole grafiği Şekil 2.9’da görülebileceği gibi yarım daire oluşturmaktadır. Ölçümlerden elde edilen yarım daireler de bu tanıma yakın davranışı gösteren daireler olduklarından ideal Debye tipi gevşemeye yakın bir gevşeme davranışının olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, gevşeme süresi dağılımına sahip malzemeler için grafikler, farklı özelliklere sahip dairesel bir yay şeklini almaktadır (Nelson ve Trabelsi, 2006). Ayrıca bu daireler malzemelerin homojen veya heterojenliği ve kimyasal bağlanma özellikleri hakkında bilgiler vermektedir. Şekil 5.29’da olduğu gibi tipik yarım daireler malzeme içinde faz homojenliğinin iyi olduğunu ve karıştırılan malzemelerin iyi uyumluluğunu, kusurlu yarım daireler ise yapının heterojenliğini ve orta derecede dolgu maddesi polimer bağlanmasını göstermektedir (Abraham vd., 2018; Luan vd., 2011). Şekil 5.29’da görülen dairelerdeki bazı kusurlu durumlar da malzeme içerisinde heterojen dağılımların da mevcut olduğunu ve katkılanan maddeler arasında yüzey etkileşimlerinin olduğunu göstermektedir.

Cole-Cole gevşeme modelinin formülü Tablo 2.1’de verilmiştir. Verilen formüle göre kompozitlerin dielektrik gevşeme süreleri katkılanan malzemelerin homojen dağılıp dağılmadığına yani α değerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. α değeri 0 olduğunda ideal Debye tipi gevşeme görülmektedir, dağılımın heterojenliği arttığında α değeri de artmaktadır. Denklem 2.25 ile hesaplanan α değerleri Tablo 5.9’da verilmektedir. Tablodaki veriler incelendiğinde 25P69U5M1C numunesinin α değerinin 0,537 ile en yüksek numune olduğu, dolayısıyla en heterojen dağılıma sahip numune olduğu görülmektedir. En az bozulmanın olduğu 50P50U numunesi ise en homojen numunedir ve α değeri en düşüktür.

Tablo 5.9 Numunelerin polarizasyon öncesi ve sonrası α değerleri ve polarizasyon sonrası değişimi

Numune Adı	Polarizasyon Öncesi α Değerleri	Polarizasyon Sonrası α Değerleri	α Değerlerinin Değişimi
PAC	0,509	0,492	-0,017
25P75U	0,503	0,496	-0,007
25P69U5M1C	0,537	0,517	-0,020
25P70U5M	0,500	0,503	0,003
50P50U	0,483	0,486	0,003
50P44U5M1C	0,510	0,490	-0,020
50P45U5M	0,494	0,490	-0,004



Şekil 5.29 Polarizasyon öncesi (a) %25 PAC (c) %50 PAC, polarizasyon sonrası (b) %25 PAC (d) %50 PAC içeren numunelerin Cole-Cole grafikleri ve (e) %25 PAC (f) %50 PAC içeren numunelerin polarizasyon sonrası yakınlaştırılmış Cole-Cole grafikleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dielektrik malzemeler, elektrik yüklerinin depolanması, elektrik enerjisinin güvenli iletimi, izolasyon gibi konularda önemli bir yer tutmakta ve elektrik devrelerinden elektronik cihazlara kadar birçok uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Malzemelerin dielektrik özelliklerinin anlaşılması bu malzemelerin çeşitli uygulama alanlarında kullanılıp kullanılmayacağı hakkında fikir sahibi olmamızı sağlamaktadır. Polimer malzemeler genellikle düşük dielektrik sabitine sahiptir. Ancak literatürde, metal, seramik gibi malzemelerin polimerlere katkılандığı ve dielektrik sabitini artırarak yüksek dielektrik sabiti gerektiren uygulamalarda kullanılabilir hale getirmeyi amaçlayan birçok çalışma bulunmaktadır (Wang ve Zhu, 2011). Bu çalışmalarda kullanılan polimer malzemelere Poliviniliden florür (PVDF), polietilen keton (PEKK), silseskioksan gibi malzemeler örnek verilebilir.

Piezoelektrik özellik gösteren bir polimer olan ve günümüzde iyi elektriksel yalıtım göstermesi, biyouyumluluğu, kimyasal dayanıklılığı ve esnek ve şeffaf bir malzeme olması nedeniyle birçok uygulama alanında kullanılan Parilen-C de dielektriklerin uygulama alanları için alternatif olabilecek malzemelerden biridir.

Bu tez çalışmasında Parilen-C'ye çeşitli oranlarda PU, PMMA ve aktif karbon eklenerek üretilen 7 adet numunenin ve saf Parilen-C'nin dielektrik özellikleri frekansa bağlı olarak incelenmiştir. Bu bağlamda kapasitans, tanjant kaybı, empedans, direnç ve reaktans parametrelerinin polarizasyon öncesi ve sonrasında empedans analizörü ile ölçümleri alınmış, elde edilen kapasitans değerleri ile elektrik geçirgenlik hesaplanmış, dielektrik geçirgenlik ve tanjant kaybı verileri kullanılarak dielektrik kayıplar hesaplanmıştır.

Ölçümlerden ve hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre 1-10 MHz frekans aralığında tüm numunelerde rezonans frekansı olduğu görülmüştür. Rezonans frekansı, bir sistemin doğal titreşim frekansına eşit olan ve sistemin maksimum enerji emdiği frekanstır. Seri kapasitör modeline göre yapılan ölçümlerde rezonans frekansından büyük frekans değerlerinde indüktif reaktans, kapasitif reaktansı geçtiği için toplam reaktans pozitif olur ve indüktif davranış baskın hale gelir, bu durum da

negatif kapasitans olarak ölçülür. Rezonans frekansı bölgesinde kapasitans değerinin pozitif ve negatif bölgede artış gösterdiği ve tepe noktalarının oluştuğu görülmüştür.

Tanjant kayıplarının ölçüm sonuçlarında da rezonans frekansında kayıpların çok yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu durum rezonans frekansı bölgesinde dielektrik kayıplardaki artışların dielektrik geçirgenlikten çok daha fazla arttığı bir bölge olduğunu göstermektedir. Wang vd. (2020) çalışmasında tanjant kayıplarının %5'ten düşük olduğunda uygun bir değer olabileceğini ifade etmişlerdir. Rezonans frekansına yaklaşıldıkça tanjant kaybı değerinde artışlar olduğundan 1 MHz ile rezonans frekansı arasında hiçbir numunede bu değerler elde edilememiş, ancak daha büyük frekanslarda rezonans frekansından uzaklaşıldıkça %5'ten küçük değerler elde edilebilmiştir. Ayrıca rezonans frekansına yakın frekans aralıklarının yüksek tanjant kaybının kabul edilebileceği sızıntı eşiğine yakın dielektrik kompozitler gibi uygulamalar için uygun olabileceği görülmüştür.

Ölçülen kapasitans verileri kullanılarak dielektrik geçirgenlik hesaplanmış, tanjant kaybı ve dielektrik geçirgenlik verileri kullanılarak ise dielektrik kayıp hesaplanmıştır. Polarizasyon işleminden sonra ise dielektrik geçirgenliğin genliği artış gösterse de dielektrik kayıpların tepe değerlerindeki artışın çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca dielektrik geçirgenlik değerlerinin rezonans frekansında tepe yapmasına rağmen bu yükselişin yüksek dielektrik sabiti gerektiren enerji depolama uygulamaları için gereken değere ulaşmadığı görülmüştür. Bununla birlikte bazı numunelerde yüksek dielektrik dayanım gerektiren transistör gibi elektronik cihaz uygulamaları için istenen dielektrik sabiti değerinin rezonans frekansında elde edildiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde tanjant kayıpları en düşük olan PAC numunesi en verimli numunedir, yapılan katkılamlar numunelerin tanjant kaybının tepe değerini artırarak rezonans frekansındaki verimini düşürmektedir. 25P75U ve 25P69U5M1C numuneleri tanjant kayıplarının tepe değeri polarizasyon sonrasında en çok düşen numuneler olduğu için polarizasyon işleminin en verimli sonuç verdiği numunelerdir.

Empedans, direnç ve reaktans ölçümlerinde de rezonans frekansında en yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir. 1 MHz frekansında elde edilen empedans değerleri

literatürdeki verilerle uyuşmasa da bunun nedeninin numunelerin gösterdiği rezonans tepkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca 1 MHz frekansında elde edilen empedans değerlerinin elektriksel empedans tomografisi uygulamaları için ideal değerler olduğu görülmektedir. Reaktans ölçüm sonuçları da malzemenin rezonans frekansından büyük frekanslarda indüktif davranış gösterdiğini kanıtlamaktadır. Rezonans frekansından küçük frekanslarda reaktans negatiftir, yani malzeme kapasitif davranış göstermektedir. Rezonans frekansından daha büyük frekanslarda ise reaktans pozitif olmuştur, yani malzeme indüktif davranış göstermektedir. 25P69U5M1C numunesi içindeki malzemeler homojen bir dağılım göstermediğinden ötürü beklenen durumun aksine tepe noktalarında geçirgenliği en düşük, empedans değerleri ise en yüksek numune olmuştur. Polarizasyon sonrasında empedans ve direnç tepe değerleri en büyük düşüşü gösteren 50P50U numunesi empedans bakımından polarizasyon işleminin en verimli sonuç verdiği numune olmuştur.

Direnç ve reaktans değerleri kullanılarak oluşturulan Cole-Cole grafiklerinde tek Debye gevşemesine sahip malzemelerde görülen ve malzemenin faz homojenliğini gösteren tipik yarım dairelerin ortaya çıktığı görülmüştür. Elde edilen dairelerin analizi yapılarak α değerleri hesaplanmış ve numunelerin homojen dağılıp dağılmadığının kıyaslamaları yapılmıştır. Numuneler arasında en heterojen dağılıma sahip numune 25P69U5M1C numunesi, en homojen dağılan numune ise 50P50U numunesidir.

Sonuç olarak, kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle üretimi yapılan Parilen-C polimerine çeşitli katkılar yapılarak bu katkılarının malzemelerin dielektrik özelliğine olan etkileri incelenmiştir. 1-10 MHz frekans aralığında meydana gelen rezonans frekansları ve numunelerin gösterdiği kapasitif ve indüktif davranışlar gözlemlenmiştir. Yapılan katkılarının ve uygulanan polarizasyonun numunelerin dielektrik davranışlarına olan etkileri incelenmiş ve elde edilen veriler enerji depolama, transistör uygulamaları, elektriksel empedans tomografisi gibi uygulama alanları için üretilen numunelerin uygun olup olmadığına dair bilgiler verilmiştir.

Rezonans frekansında numunelerin dielektrik geçirgenliği artış gösterse de bu artışlar sınırlıdır. Rezonans frekansında daha yüksek dielektrik geçirgenlik ve daha düşük kayıplar elde edebilmek için kullanılan malzemeler arasında iletkenliği en yüksek

malzeme olan aktif karbonun ağırlıkça katkı yüzdesi artırılabilir. Ancak bu tez çalışmasında görüldüğü üzere bu artışın malzemenin iletkenliğini artırabilmesi için daha homojen bir dağılım sağlanması gereklidir. Polimer malzemelere göre çok daha yüksek dielektrik geçirgenliğe sahip olan seramikler ve oksitler gibi malzemeler katkılanarak malzemelerin dielektrik özellikleri artırılabilir. Ayrıca polarizasyon işleminde uygulanan elektrik alan artırılarak malzemelerin dielektrik özelliklerine olan etkileri incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Abomostafa, H., Gad, S. A., & Khalaf, A. I. (2018). Improving the optical, mechanical and dielectric properties of PMMA: $Mg_{1-x}Cu_xO$ based polymer nanocomposites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 28, 2759-2769. doi: 10.1007/s10904-018-0916-6.
- Abraham, J., Thomas, J., Kalarikkal, N., George, S. C., & Thomas, S. (2018). Static and dynamic mechanical characteristics of ionic liquid modified mwcnt-sbr composites: theoretical perspectives for the nanoscale reinforcement mechanism. *The Journal of Physical Chemistry B*, 122(4), 1525-1536. doi:10.1021/acs.jpcc.7b10479.
- Adamec, V. (1972). Electrical properties of an epoxy resin during and after curing. *Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry*, 10(5), 1277-1295. doi: 10.1002/pol.1972.150100501
- Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., & Yuvaraj, A. R. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications – a review. *RSC Advances*, 6(115), 114453–114482. doi:10.1039/c6ra14525f.
- Amin, B., Elahi, M. A., Shahzad, A., Porter, E., & O'Halloran, M. (2019). A review of the dielectric properties of the bone for low frequency medical technologies. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 5(2), 022001. doi: 10.1088/2057-1976/aaf210
- Ardakani, F., Jahani, Y., & Morshedien, J. (2014). The impact of viscoelastic behavior and viscosity ratio on the phase behavior and morphology of polypropylene/polybutene-1 blends. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 21(2), 94-101. doi:10.1002/vnl.21370.
- Axelrod, E., Puzenko, A., Haruvy, Y., Reisfeld, R., & Yuri Feldman, Y. (2006). Negative dielectric loss phenomenon in porous sol–gel glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356, 4166-4173. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.07.008.
- Aydınalp, C., Joof, S., & Yılmaz, T. (2021). Towards accurate microwave characterization of tissues: Sensing depth analysis of open-ended coaxial probes with ex vivo rat breast and skin tissues. *Diagnostics*, 11(2), 338. doi: 10.3390/diagnostics11020338
- Aziz, S. B. & Abidin, Z. Z. (2014). Ion-transport study in nanocomposite solid polymer electrolytes based on chitosan: electrical and dielectric analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(15). doi:10.1002/app.41774.
- Badalı, Y. (2015). Grafen, bor ve nadir toprak elementleriyle katkılanmış poliviniliden florür nanokompozit piezo malzemelerin üretim ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- Behr, L., & Tarpley, R. E. (1932). Design of resistors for precise high-frequency measurements. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 20(7), 1101-1113. doi: 10.1109/JRPROC.1932.227757
- Benson, K., Cramer, S., & Galla, H. (2013). Impedance-based cell monitoring: barrier properties and beyond. *Fluids and Barriers of the CNS*, 10(1). doi:10.1186/2045-8118-10-5.
- Billah, S. M. R. (2019). Dielectric polymers. *Functional Polymers*, 241-288. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-319-95987-0_8.
- Bisquert, J., Mora-Seró, I., & Fabregat-Santiago, F. (2013). Diffusion–recombination impedance model for solar cells with disorder and nonlinear recombination. *ChemElectroChem*, 1(1), 289-296. doi:10.1002/celc.201300091.
- Bravard S.P. (2000). Dielectric Relaxations In Poly (Ethylene Terephthalate), Poly(Ethylene 2,6 - Naphthalate) And Their Copolymers, Department of Materials Science and Engineering, *Utah Üniversitesi*, USA.
- Catalan, G., Jiménez, D., & Gruverman, A. (2015). Negative capacitance detected. *Nature materials*, 14(2), 137-139. doi: 10.1038/nmat4195
- Chen, L., Han, X., Xiao, H., Li, P., Zhang, P., Zhao, H., Jin, Y., Zhang, J., & Wang, W. (2022). Optimized chemical mechanical polishing of parylene c for high-density wiring in flexible electronics. *Flexible and Printed Electronics*, 7(3), 035007. doi: 10.1088/2058-8585/ac82fb.
- Chen, L., Kim, C., Batra, R., Lightstone, J. P., Wu, C., Li, Z., Deshmukh, A., Wang, Y., Tran, H.D., Vashishta, P., Sotzing, G.A., Cao, Y. & Ramprasad, R. (2020). Frequency-dependent dielectric constant prediction of polymers using machine learning. *npj Computational Materials*, 6(1), 61. doi: 10.1038/s41524-020-0333-6.
- Chen, L., Xu, H., Li, T., Zhang, M., Han, X., Jin, Y., & Wang, W. (2022). Adhesion enhancement strategy for Parylene C substrate by nanoglass technique. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 32(4) 044005. doi: 10.1088/13616439/ac57ae.
- Chen, T., Qiu, J., Zhu, K., & Li, J. (2016). Electro-mechanical performance of polyurethane dielectric elastomer flexible micro-actuator composite modified with titanium dioxide-graphene hybrid fillers. *Materials & Design*, 90, 1069-1076. doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.068.
- Cheng, L., Wei, R., Huang, X., Feng, M., Jia, K., & Liu, X. (2016). Mechanical, dielectric, and rheological properties of poly(arylene ether nitrile)–reinforced poly(vinylidene fluoride). *High Performance Polymers*, 29(2), 178-186. doi:10.1177/0954008316632366.
- Cheng, X., Li, Z., & Wu, J. (2015). Colossal permittivity in ceramics of tio2co-doped with niobium and trivalent cation. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(11), 5805-5810. doi: 10.1039/c5ta00141b

- Chindam, C., Lakhtakia, A., & Awadelkarim, O. O. (2015). Surface energy of Parylene C. *Materials Letters*, 153, 18–19. doi: 10.1016/j.matlet.2015.04.009.
- Chou, N., Moon, H., Park, J., & Kim, S. (2021). Interfacial and surface analysis of parylene C-modified PDMS substrates for soft bioelectronics. *Progress in Organic Coatings*, 157, 106309. doi:10.1016/j.porgcoat.2021.106309.
- Chun, W., Chou, N., Cho, S., Yang, S., & Kim, S. (2014). Evaluation of sub-micrometer parylene C films as an insulation layer using electrochemical impedance spectroscopy. *Progress in Organic Coatings*, 77(2), 537-547. doi: 10.1016/j.porgcoat.2013.11.020.
- Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics. *The Journal of chemical physics*, 9(4), 341-351. doi: 10.1063/1.1750906.
- Cortes, C. L., Newman, W. D., Molesky, S., & Jacob, Z. (2012). Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials. *Journal of Optics*, 14(6), 063001. doi:10.1088/2040-8978/14/6/063001
- Cui, W., Cheng, N., Liu, Q., Ge, C., Asiri, A. M., & Sun, X. (2014). Mo₂C nanoparticles decorated graphitic carbon sheets: biopolymer-derived solid-state synthesis and application as an efficient electrocatalyst for hydrogen generation. *Acs Catalysis*, 4(8), 2658-2661. doi:10.1021/cs5005294
- Da Cruz, S. M. F. (2015). Inkjet Printing Technology for Flexible Pressure Sensors. Doktora Tezi, *Minho Üniversitesi*. Braga.
- Dang, Z. M., Yuan, J. K., Yao, S. H., & Liao, R. J. (2013). Flexible nanodielectric materials with high permittivity for power energy storage. *Advanced Materials*, 25(44), 6334-6365. doi: 10.1002/adma.201301752.
- Dang, Z. M., Yuan, J. K., Zha, J. W., Zhou, T., Li, S. T., & Hu, G. H. (2012). Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites. *Progress in materials science*, 57(4), 660-723. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.08.001.
- Davidson, D. W., & Cole, R. H. (1950). Dielectric relaxation in glycerine. *The Journal of Chemical Physics*, 18(10), 1417-1417. doi: 10.1063/1.1747496
- Davletbaeva, I., Sazonov, O., Nikitina, E., Kapralova, V., Nizamov, A., Akhmetov, I., Arkhipov, A. & Sudar, N. (2022). Dielectric properties of organophosphorus polyurethane ionomers. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(10), 51751. doi: 10.1002/app.51751.
- Debye, P. (1912). Zur theorie der spezifischen wärmen. *Annalen der Physik*, 344(14), 789-839. doi:10.1002/andp.19123441404.
- El Khaled, D., Novas, N., Gazquez, J. A., Garcia, R. M., & Manzano-Agugliaro, F. (2015). Fruit and vegetable quality assessment via dielectric sensing. *Sensors*, 15(7), 15363-15397. doi: 10.3390/s150715363

- El-Nahass, M.M., Attia, A.A., Salem, G.F., Ali, H.A.M., & Ismail, M.I. (2014). Dielectric and impedance spectral characteristics of bulk ZnIn₂Se₄. *Physica B: Condensed Matter*, 434, 89-94. doi:10.1016/j.physb.2013.10.049.
- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M., & Dixon, N. (2007). Assessment of in situ dielectric constant of pavement materials. *Transportation research record*, 2037(1), 128-135. doi: 10.3141/2037-12.
- Fuoss, R. M., & Kirkwood, J. G. (1941). Electrical properties of solids. VIII. Dipole moments in polyvinyl chloride-diphenyl systems. *Journal of the American Chemical Society*, 63(2), 385-394. doi: 10.1021/ja01847a013
- Gabriel, C., Gabriel, S., Grant, E. H., Halstead, B. S. J., & Mingos, D. M. P. (1998). Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating. *Chemical Society Reviews*, 27(3), 213. doi: 10.1039/a827213z.
- Gaur, M. S., Singh, P. K., Indolia, A. P., Yadav, P. K., Rogachev, A. A., & Rogachev, A. V. (2017). Improvement of dielectric properties of spin coated PMMA-ZnO nano hybrid thin film. *Ferroelectrics*, 510(1), 56-70. doi: 10.1080/00150193.2017.1327280.
- Gupta, A. K., Bafna, M., Agarwal, A., & Sain, N. (2021). Dielectric studies and alternating current conductivity studies of polymethylmethacrylate (PMMA) doped with ferric chloride (FeCl₃) in varying concentration. *Materials Today: Proceedings*, 38, 1263-1266. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.676.
- Haertling, G. H. (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4), 797-818. doi:10.1111/j.1151-2916.1999.tb01840.x.
- Hanemann, T., Geßwein, H., & Schumacher, B. (2011). Development of new polymer-batio₃-composites with improved permittivity for embedded capacitors. *Microsystem Technologies*, 17(2), 195-201. doi:10.1007/s00542-010-1197-3.
- Harty, J. (2002). The influence of depolarizers upon the photovoltaic effect in cells containing grignard reagents. *The Journal of Physical Chemistry*, 39(3), 355-370. doi: 10.1021/j150363a004
- Havriliak, S., & Negami, S. (1967). A complex plane representation of dielectric and mechanical relaxation processes in some polymers. *Polymer*, 8, 161-210. doi: 10.1016/0032-3861(67)90021-3
- He, J., Yang, H., Zheng, F., & Shen, Y. (2022). Dielectric properties of fluorinated aromatic polyimide films with rigid polymer backbones. *Polymers*, 14(3), 649. doi:10.3390/polym14030649.
- Hiremath, S., Mathias, K. A., Sondar, P. R., Shrishail, M. H., & Kulkarni, S. M. (2021). Study on low-frequency dielectric behavior of the carbon black/polymer nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(24), 28674-28686. doi:10.1007/s10854-021-07242-1.

- Hoang, N., Dao, T. D., & Jeong, H. M. (2015). Electrically, conductive graphene/PMMA composites with ultra-low percolation threshold by electrostatic self-assembly in aqueous medium. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 216(7), 770-782. doi: 10.1002/macp.201400560.
- Hoang, P., Phung, H., Nguyen, C., Dat Nguyen, T., & Choi, H., (2017). A highly flexible, stretchable and ultra-thin piezoresistive tactile sensor array using PAM/PEDOT:PSS hydrogel. *14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI) 2017*, 950–955. doi: 10.1109/URAI.2017.7992873
- Hoffmann, M., Fengler, F. G. P., Herzig, M., Mittmann, T. M. B., Schroeder, U., Negrea, R. L. P., Slesazeck, S., & Mikolajick, T. (2019). Unveiling the double-well energy landscape in a ferroelectric layer. *Nature*, 565(7740), 464–467. doi:10.1038/s41586-018-0854-z.
- Hong, H., Rahal, M., Demosthenous, A., & Bayford, R. H. (2009). Comparison of a new integrated current source with the modified Howland circuit for EIT applications. *Physiological measurement*, 30(10), 999. doi: 10.1088/0967-3334/30/10/001
- Horowitz, P., Hill, W., & Robinson, I. (1989). *The art of electronics*. 2(658), Cambridge: Cambridge university press.
- Hsu, J. M., Rieth, L., Normann, R. A., Tathireddy, P., & Solzbacher, F. (2008). Encapsulation of an integrated neural interface device with Parylene C. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 56(1), 23-29. doi: 10.1109/TBME.2008.2002155.
- Ibach, H., Lüth, H., Ibach, H., & Lüth, H. (2009). Dielectric properties of materials. *Solid-State Physics: An Introduction to Principles of Materials Science*, 371-418. doi:10.1007/978-3-642-97230-0_11.
- Íñiguez, J., Zubko, P., Luk'yanchuk, I. & Cano, A. (2019). Ferroelectric negative capacitance. *Nature Reviews Materials*, 4(4), 243–256. doi:10.1038/s41578-019-0089-0.
- Jiang, H., Zhai, J., & Yao, X. (2009). Microwave dielectric properties of BaTiO₃–SrZnP₂O₇ composite ceramics for tunable microwave applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(22), 225404. doi:10.1088/0022-3727/42/22/225404
- Jiang, W., Hardy, D. J., Phillips, J. C., MacKerell, A. D., Schulten, K., & Roux, B. (2010). High-performance scalable molecular dynamics simulations of a polarizable force field based on classical drude oscillators in namd. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2(2), 87-92. doi: 10.1021/jz101461d
- Jiao, P. & Alavi, A. H. (2020). Artificial intelligence-enabled smart mechanical metamaterials: advent and future trends. *International Materials Reviews*, 66(6), 365-393. doi:10.1080/09506608.2020.1815394

- Jilani, M. T., Zaka, M., Rehman, A. M., Khan, M. T., Khan, S., & Muzamil, A. (2012). A Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials. *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, 1(1), 1-5.
- Jones, B. K., Santana, J. & McPherson, M. (1998). Negative capacitance effects in semiconductor diodes. *Solid State Communications*, 107(2), 47-50. doi:10.1016/S0038-1098(98)00162-8.
- Joseph, S. & Francis, B. (2023). Non-covalent interactions between ionic liquid and graphene nanoplatelets as a tool to fine tune the properties of styrene butadiene rubber nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(43). doi:10.1002/app.54573.
- Jung, Y., Kline, R. J., Lin, E. K., Fischer, D. A., Toney, M. F., Heeney, M., McCulloch, I. & DeLongchamp, D. M. (2008). The impact of the dielectric/semiconductor interface on microstructure and charge carrier transport in high-performance polythiophene transistors. *ECS Transactions*, 13(2), 113-122. doi: 10.1149/1.2908623
- Kahouli, A. (2012). Effect of film thickness on structural, morphology, dielectric and electrical properties of parylene C films. *Journal of Applied Physics*, 112(6). doi: 10.1063/1.4752022.
- Kahouli, A., Sylvestre, A., Ortega, L., Jomni, F., Yangui, B., Maillard, M., Berge, B., Robert, J.C., & Legrand, J. (2009). Structural and dielectric study of parylene C thin films. *Applied Physics Letters*, 94(15). doi: 10.1063/1.3114404.
- Kalair, A. R., Abas, N., Saleem, M., & Khan, N. (2021). Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Storage*, 3(1). doi: 10.1002/est2.135
- Kaneki, T., & Kobayashi, S. (1984). External Q of loop coupled dielectric resonator. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 67(5), 83-90. doi: 10.1002/ecja.4400670510
- Kapustianyk, V., Shchur, Y., Kityk, I., Rudyk, V., Łach, G., Laskowski, Ł., Tkaczyk, S., Swiatek, J. & Davydov, V. A. (2008). Resonance dielectric dispersion of tea-cocl₂br₂nanocrystals incorporated into the pmma matrix. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(36), 365215. doi:10.1088/0953-8984/20/36/365215.
- Kaur, R., & Samra, K. S. (2018). Electrical and mechanical behavior of polymethyl methacrylate/cadmium sulphide composites. *Physica B: Condensed Matter*, 538, 29-34. doi: 10.1016/j.physb.2018.03.019.
- Ke, S., Huang, H., & Fan, H. (2006). Relaxor behavior in cacu₃ti₄o₁₂ ceramics. *Applied Physics Letters*, 89(18). doi:10.1063/1.2374682
- Khan, A.I., Chatterjee, K., Wang, B., Drapcho, S., You, L., Serrao, C., Bakaul, S.R., Ramesh, R., & Salahuddin, S. (2015). Negative capacitance in a ferroelectric capacitor. *Nature Materials*, 14(2), 182-186. doi:10.1038/nmat4148.

- Khan, S., Dang, W., Lorenzelli, L., & Dahiya, R. (2015). Flexible pressure sensors based on screen-printed P (VDF-TrFE) and P (VDF-TrFE)/MWCNTs. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 28(4), 486-493. doi: 10.1109/TSM.2015.2468053.
- Khawaji, I. H., Chindam, C., Awadelkarim, O. O., & Lakhtakia, A. (2017). Dielectric properties of and charge transport in columnar microfibrillar thin films of Parylene C. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 64(8), 3360-3367. doi:10.1109/TED.2017.2711481.
- Kienle, R. H., & Race, H. H. (1934). The electrical, chemical and physical properties of alkyd resins. *Transactions of the Electrochemical Society*, 65(1), 87. doi: 10.1149/1.3498061
- Knight, R. J., & Nur, A. (1987). The dielectric constant of sandstones, 60 kHz to 4 MHz. *Geophysics*, 52(5), 644-654. doi:10.1190/1.1442332.
- Kşupka, J. (2021). Microwave measurements of electromagnetic properties of materials. *Materials*, 14(17), 5097. doi:10.3390/ma14175097.
- Kumaragurubaran, S., Nagata, T., Takahashi, K., Ri, S., Tsunekawa, Y., Suzuki, S., & Chikyow, T. (2015). BaTiO₃ based relaxor ferroelectric epitaxial thin-films for high-temperature operational capacitors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(4S), 04DH02. doi: 10.7567/jjap.54.04dh02
- Kurnaz, S. (2023). Parilen C tabanlı esnek basınç sensörlerinin üretimi ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.
- Küçükgül, E. Y. (2004). Ticari Aktif Karbon Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 41-56.
- Lancaster, M., Powell, J. R., & Porch, A. (1998). Thin-film ferroelectric microwave devices. *Superconductor Science and Technology*, 11(11), 1323-1334. doi:10.1088/0953-2048/11/11/021
- Lee, Y. S., You, K. Y., Jack, S. P., Gan, H. S., Hoon, W. F., Jamlos, M. A., & Gooi, A. (2022). A Review of Agricultural Product Characterization Using Microwave Sensor. In *Proceedings of the 12th National Technical Seminar on Unmanned System Technology 2020: NUSYS'20*, 435-443, Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-16-2406-3_33
- Leng, Z., Wu, H., Tang, X., Li, Y., Xin, Y., Xie, P., Li, G., Yan, K., & Liu, C. (2020). Carbon nanotube/epoxy composites with low percolation threshold and negative dielectric constant. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(34), 26015-26024. doi: 10.1007/s10854-022-09291-6
- Li, H., Zhou, Y., Liu, Y., Li, L., Liu, Y., & Wang, Q. (2021). Dielectric polymers for high-temperature capacitive energy storage. *Chemical Society Reviews* 50(11), 6369–6400. doi:10.1039/d0cs00765j

- Li, K., Peng, J., Turng, L., & Huang, H. (2011). Dynamic rheological behavior and morphology of polylactide/poly(butylenes adipate-co-terephthalate) blends with various composition ratios. *Advances in Polymer Technology*, 30(2), 150-157. doi:10.1002/adv.20212.
- Li, M. M., An, C., Marszałek, T., Baumgarten, M., Müllen, K., & Pisula, W. (2016). Impact of interfacial microstructure on charge carrier transport in solution-processed conjugated polymer field-effect transistors. *Advanced Materials*, 28(11), 2245-2252. doi: 10.1002/adma.201503552
- Li, Q., Bao, S., Sun, Y., Li, J., Yu, Z., Li, Y., Zhang, S., Liu, Y., & Cheng, Z. (2018). Tunable dielectric resonance with negative permittivity behavior of BiFeO₃-Bi₂Fe₄O₉ composite at about 1 GHz. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2081-2086.
- Li, W., Lipton, R., & Maier, M. (2021). Lorentz resonance in the homogenization of plasmonic crystals. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 477(2256). <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0609>
- Li, Y., Lv, J., Gu, Q., Hu, S., Li, Z., Jiang, X., Ying, Y., & Si, G. (2019). Metadevices with potential practical applications. *Molecules*, 24(14), 2651. doi:10.3390/molecules24142651
- Li, Z., Wu, C., Rontey, A., Sotzing, M., & Cao, Y. (2019). High field prebreakdown aging in polymer dielectric thin films. *2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 580-583. IEEE. doi: 10.1109/CEIDP47102.2019.9009636.
- Liebscher, H., Suresh, J. N., Li, H., Mersch, J., Wießner, S., & Gerlach, G. (2023, September). Humidity Dependence of the Dielectric Constant of a Thermosetting Polyurethane. *International Workshop on Impedance Spectroscopy (IWIS)*, 63-66. IEEE. doi: 10.1109/IWIS61214.2023.10302801
- Liu, F., Li, Q., Cui, J., Li, Z., Yang, G., Liu, Y., Dong, L., Xiong, C., Wang, H., & Wang, Q. (2017). High-Energy-Density Dielectric Polymer Nanocomposites with Trilayered Architecture. *Advanced Functional Materials*, 27(20), 1606292. doi:10.1002/adfm.201606292.
- Lu, J. (2008). High dielectric constant polymer nanocomposites for embedded capacitor applications. Doktora tezi, *Georgia Institute of Technology School of Materials Science and Engineering*, Atlanta.
- Luan, L., Wu, W., & Wagner, M. H. (2011). Rheological behavior of lubricating systems in polypropylene/seaweed composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(4), 2143-2148. doi: 10.1002/app.33940
- Macdonald, J. (1987). Emphasizing solid materials and systems. *Impedance Spectroscopy*; John Wiley & Sons Inc. New York, NY, USA.
- Maji, P., Choudhary, R. B., & Majhi, M. (2017). Structural, electrical and optical properties of silane-modified ZnO reinforced PMMA matrix and its catalytic

- activities. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 456, 40-48. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.10.039.
- Makharia, R., Mathias, M. F., & Baker, D. R. (2005). Measurement of catalyst layer electrolyte resistance in pefcs using electrochemical impedance spectroscopy. *Journal of the Electrochemical Society*, 152(5), A970. doi: 10.1149/1.1888367.
- Marszalek, T., Gazicki-Lipman, M., & Ulanski, J. (2017). Parylene C as a versatile dielectric material for organic field-effect transistors. *Beilstein Journal of Nanotechnology* 8(1), 1532–1545. doi:10.3762/bjnano.8.155.
- Mitra, R. & Manju, U. (2023). Negative capacitance and intrinsic ferroelectric behavior in α -MoO₃ culminating as a robust piezoelectric energy harvester. *ACS Applied Electronic Materials*, 5(6), 3130-3143. doi:10.1021/acsaelm.3c00203.
- Mokni, M., Maggioni, G., Kahouli, A., Carturan, S. M., Raniero, W., & Sylvestre, A. (2019). Nanocomposite–parylene C thin films with high dielectric constant and low losses for future organic electronic devices. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 10(1), 428-441. doi: 10.3762/bjnano.10.42.
- Nasrallah, D. A., El-Metwally, E. G., & Ismail, A. M. (2021). Structural, thermal, and dielectric properties of porous PVDF/Li₄Ti₅O₁₂ nanocomposite membranes for high-power lithium-polymer batteries. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(3), 1214–1229. doi:10.1002/pat.5171.
- Nelson, S. O. & Trabelsi, S. (2006). Dielectric spectroscopy of wheat from 10 MHz to 1.8 GHz. *Measurement Science and Technology*, 17(8), 2294-2298. doi: 10.1088/0957-0233/17/8/034
- O’Connell, A. D., Ansmann, M., Bialczak, R. C., Hofheinz, M., Katz, N., Lucero, E., McKenney, C., Neeley, M., Wang, H., Eva, M., Weig, E.M., Cleland, A.N. & Martinis, J. M. (2008). Microwave dielectric loss at single photon energies and millikelvin temperatures. *Applied Physics Letters*, 92(11). doi: 10.1063/1.2898887.
- Ojha, S. K., Purkait, P., Chatterjee, B., & Chakravorti, S. (2019). Application of cole–cole model to transformer oil-paper insulation considering distributed dielectric relaxation. *High Voltage*, 4(1), 72-79. doi:10.1049/hve.2018.5079.
- Oliveira, L. S., Gouveia, D. X., Silva, M. A. S., & Sombra, A. S. B. (2015). Study of the performance of dielectric resonator antennas based on the matrix composite of Al₂O₃– CaTiO₃. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(4), 963-969. doi:10.1002/mop.28999.
- Oughstun, K. E. & Cartwright, N. A. (2003). On the lorentz-lorenz formula and the lorentz model of dielectric dispersion. *Optics Express*, 11(13), 1541. doi: 10.1364/oe.11.001541
- Pleşa, I., Notingher, P., Schlögl, S., Sumereder, C., & Muhr, M. (2016). Properties of polymer composites used in high-voltage applications. *Polymers*, 8(5), 173. doi: 10.3390/polym8050173.

- Prashantha, K., Soulestin, J., Lacrampe, M., Krawczak, P., Dupin, G., Claes, M., & Tewari, A. (2010). Electrical and dielectric properties of multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 18(9), 489-494. doi: 10.1177/096739111001800903
- Prateek, Thakur, V. K., & Gupta, R. K. (2016). Recent progress on ferroelectric polymer-based nanocomposites for high energy density capacitors: synthesis, dielectric properties, and future aspects. *Chemical reviews*, 116(7), 4260-4317. doi: 10.1021/acs.chemrev.5b00495.
- Psarras, G. C. (2018). Fundamentals of dielectric theories. Dang, Z.M., *In Dielectric Polymer Materials for High-Density Energy Storage* (pp. 11–57). Oxford: William Andrew, Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-813215-9.00002-6.
- Qiu, J., Gu, Q., Sha, Y., Huang, Y., Zhang, M., & Luo, Z. (2022). Preparation and application of dielectric polymers with high permittivity and low energy loss: A mini review. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(24), 52367. doi: 10.1002/app.52367
- Raja, V., Sharma, A.K., & Rao, V.V.R.N. (2004). Impedance spectroscopic and dielectric analysis of PMMA-CO-P4VPNO polymer films. *Materials Letters*, 58(26), 3242-3247. doi:10.1016/j.matlet.2004.05.061.
- Romano, S., Cabrini, S., Rendina, I., & Mocella, V. (2014). Guided resonance in negative index photonic crystals: a new approach. *Light: Science & Applications*, 3(1), e120-e120. doi:10.1038/lsa.2014.1
- Rutkove, S. B. (2009). Electrical impedance myography: background, current state, and future directions. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 40(6), 936-946. doi: 10.1002/mus.21362.
- Sagar, S., Saravanan, S., Kumar, S., Venkatachalam, S., & Anantharaman, M. R. (2006). Evidence for the existence of multiple equilibrium states in cobalt phthalocyanine tetramer: a study by dielectric spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(8), 1678-1683. doi:10.1088/0022-3727/39/8/030.
- Sankara, S., Kanagatharab, N., & Robinson Azariah, J.C. (2022). Electric Modulus, Dielectric Relaxation Mechanism and Impedance Properties of Melaminum Perchlorate Monohydrate - Broadband Dielectric Spectroscopic Study. *Acta Physica Polonica A*, 141(5) 500-506. doi:10.12693/APhysPolA.141.500.
- Scaife, B. K. P. (1963). A new method of analysing dielectric measurements. *Proceedings of the Physical Society*, 81(1), 124. doi: 10.1088/0370-1328/81/1/318.
- Schade, V. L., & Roukis, T. S. (2010). The role of polymethylmethacrylate antibiotic-loaded cement in addition to debridement for the treatment of soft tissue and osseous infections of the foot and ankle. *The Journal of foot and ankle surgery*, 49(1), 55-62. doi: 10.1053/j.jfas.2009.06.010.

- Schwerdt, H. N., Zhang, E., Kim, M. J., Yoshida, T., Stanwicks, L., Amemori, S., Dagdeviren, H. E., Langer, R., Cima, M. J., & Graybiel, A. M. (2018). Cellarscale probes enable stable chronic subsecond monitoring of dopamine neurochemicals in a rodent model. *Communications Biology*, 1(1), 144. doi:10.1038/s42003-018-0147-y.
- Senturia, S. D., & Sheppard Jr, N. F. (2005). Dielectric analysis of thermoset cure. In *Epoxy Resins and Composites IV*, 1-47. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/3-540-16423-5_11.
- Seymour, J. P., Elkasabi, Y., Chen, H. Y., Lahann, J., & Kipke, D. R. (2009). The insulation performance of reactive parylene films in implantable electronic devices. *Biomaterials*, 30(31), 6158-6167. doi: 10.1016/j.biomaterials.2009.07.061.
- Shah, Z. M. & Khanday, F. A. (2021). Analysis of disordered dynamics in polymer nanocomposite dielectrics for the realization of fractional-order capacitor. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 28(1), 266-273. doi:10.1109/tdei.2020.008943.
- Shen, Y., Lin, Y., Li, M., & Nan, C. W. (2007). High dielectric performance of polymer composite films induced by a percolating interparticle barrier layer. *Advanced Materials*, 19(10), 1418-1422. doi: 10.1002/adma.200602097.
- Sinclair, D. C., Adams, T. B., Morrison, F. D., & West, A. R. (2002). $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: One-step internal barrier layer capacitor. *Applied Physics Letters*, 80(12), 2153-2155. doi: 10.1063/1.1463211.
- Song, Z., Im, J.-H., Ko, H., Park, J.-H., Lee, G.-Y., Kang, M.-J., Kim M.-H. & Pyun, J.-C. (2021). Plasma deposition of parylene-C film. *Materials Today Communications*, 26, 101834. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.101834.
- Sonoda, K., Moriya, Y., & Jantunen, H. (2011). Dielectric property of Cu powder/polymer composites. *Materials Science-Poland*, 29, 63-69. doi:10.2478/s13536-011-0011-y.
- Sun, K., Dong, J., Wang, Z., Wang, Z., Fan, G., Hou, Q., An, L., Dong, M., Fan, R. & Guo, Z. (2019). Tunable negative permittivity in flexible graphene/PDMS metacomposites. *The Journal of Physical Chemistry*, 123(38), 23635–23642. doi:10.1021/acs.jpcc.9b06753.
- Sy, J.W. (1996). Polarization mechanisms during polymer crystallization by impedance spectroscopy. Yüksek Lisans Tezi, *Polytechnic Üniversitesi*, Hong Kong.
- Şakıyan, Ö., Şumnu, G., Şahin, S., & Meda, V. (2007). Investigation of dielectric properties of different cake formulations during microwave and infrared–microwave combination baking. *Journal of Food Science*, 72(4). doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00325.x.

- Şener, B. (2020). Baryum Magnezyum Tantalat Seramiklerinin Dielektrik Özelliklerine Nadir Toprak Elementlerinin Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Verman, L. C. (1931). Negative circuit constants. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 19(4), 676-681. doi: 10.1109/JRPROC.1931.222370.
- Volksen, W., Miller, R. D., & Dubois, G. (2009). Low dielectric constant materials. *Chemical Reviews*, 110(1), 56-110. doi:10.1021/cr9002819.
- Wan, W., Luo, J., Huang, C. E., Yang, J., Feng, Y., Yuan, W. X., Ouyang, Y., Chen, D., & Qiu, T. (2018). Calcium copper titanate/polyurethane composite films with high dielectric constant, low dielectric loss and super flexibility. *Ceramics International*, 44(5), 5086-5092. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.12.108.
- Wang, Q. & Zhu, L. (2011). Polymer nanocomposites for electrical energy storage. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 49(20), 1421-1429. doi: 10.1002/polb.22337
- Wang, Z., Li, H., Hu, H., Fan, Y., Fan, R., Li, B., Zhang, J., Liu, H., Fan, J., Hou, H., Dang, F., Kou, Z., & Guo Z. (2020). Direct observation of stable negative capacitance in SrTiO₃ @ BaTiO₃ heterostructure. *Advanced Electronic Materials*, 6(2), 1901005. doi:10.1002/aelm.201901005.
- Williams, G., & Watts, D. C. (1970). Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function. *Transactions of the Faraday society*, 66, 80-85. doi: 10.1039/TF9706600080.
- Wong, J. C. & Salahuddin S. (2018). Negative Capacitance Transistors. *Proceedings of the IEEE*, 107(1). doi:10.1109/JPROC.2018.2884518.
- Xie, L., Huang, X., Huang, Y., Yang, K., & Jiang, P. (2013). Core@ double-shell structured BaTiO₃-polymer nanocomposites with high dielectric constant and low dielectric loss for energy storage application. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(44), 22525-22537. doi: 10.1021/jp407340n.
- Xie, P., Shi, Z., Feng, M., Sun, K., Liu, Y., Yan, K., Liu, C., Moussa, T.A.A., Huang, M., Meng, S., Liang, G., Hou, H., Fan, R. & Guo, Z. (2022). Recent advantages in radio-frequency negative dielectric metamaterials by designing heterogeneous composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5, 679-695. doi: 10.1007/s42114-022-00479-2.
- Yadav, R. A., Yadav, T. K., Maurya, M. K., Yadav, D. P., & Singh, N. P. (2009). Normal modes and quality factors of shielded composite dielectric spherical resonators. *Indian Journal of Physics*, 83, 1421-1438. doi: 10.1007/s12648-009-0128-6.
- Yahya, M. A., Al-Qodah, Z., & Ngah, C. Z. (2015). Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 46, 218-235. doi: 10.1016/j.rser.2015.02.051.

- Yan, H., Zhao, C., Wang, K., Deng, L., Ma, M., & Xu, G. (2013). Negative dielectric constant manifested by static electricity. *Applied Physics Letters*, 102(6). doi: 10.1063/1.4792064.
- Yoon, E. J., Stelson, A. C., Orloff, N. D., Long, C. J., Booth, J. C., & Meng, E. F. (2021, June). The effect of annealing thin film Parylene C-platinum interfaces characterized by broadband dielectric spectroscopy. *21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers)*, 884-887. IEEE. doi: 10.1109/TRANSDUCERS50396.2021.9495440.
- Zhang, J., Li, H., Hu, D., Fang, D., Luo, Z., Tu, J., Huang, J., Jiang, M., & Xiong, C. (2018). A new strategy for the preparation of silver/epoxy/poly(vinylidene fluoride) dielectric composites with a multi-interface structure for suppressed dielectric loss. *Polymer Composites*, 39(S4). doi: 10.1002/pc.24867
- Zhang, J., Yue, Z., Zhou, Y., Zhang, X., & Li, L. (2015). Microwave dielectric properties and thermally stimulated depolarization currents of $(1 - x)\text{MgTiO}_3 - x\text{Ca}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(5), 1548-1554. doi:10.1111/jace.13485
- Zhang, L. (2013). Fundamental Study and Development of 0-3 Dielectric Composites with High Dielectric Constant. Doktora Tezi, *Auburn Üniversitesi*, Auburn.
- Zhang, L., Liu, Y., Li, Z., & Wang, W. (2018). SF_6 Optimized O_2 Plasma Etching of Parylene C. *Micromachines*, 9(4), 162. doi:10.3390/mi9040162.
- Zia, K. M., Bhatti H. N., & Bhatti I. A., (2007). “Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review”, *Reactive and Functional Polymers*, 67, 675-692. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004.