

**T.C.**  
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DC ELEKTRİK ALAN ALTINDA KATI  
KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK  
ÖZELLİKLERİNİN EMPEDANS  
ANALİZÖRÜ İLE ÖLÇÜMÜ**

Şeyma YÜCEYURT ÇELİK  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
Konya- 2006

**T.C.**  
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DC ELEKTRİK ALAN ALTINDA KATI KİL NUMUNELERİNİN**  
**DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN EMPEDANS ANALİZÖRÜ İLE**  
**ÖLÇÜMÜ**

Şeyma YÜCEYURT ÇELİK  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
Konya- 2006

Bu tez 04 / 01 / 2006 tarihinde oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. H. Şükür KILIÇ  
Başkan

Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ  
Üye (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ  
Üye

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **DC ELEKTRİK ALAN ALTINDA KATI KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN EMPEDANS ANALİZÖRÜ İLE ÖLÇÜMÜ**

Şeyma YÜCEYURT ÇELİK

**Selçuk Üniversitesi  
Fen-Edebiyat Fakültesi  
Fizik Bölümü**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ**

**2006, 55 sayfa**

**Jüri: Doç. Dr. H. Şükür KILIÇ  
Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ  
Yrd. Doç. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ**

Her malzeme dielektrik özelliklerine bağlı olan özgül bir elektriksel karakteristik takımına sahiptir. Bu özelliklerin doğru olarak ölçülmesi, kritik tasarım bilgisi sağlaması açısından son derece önemlidir.

Bu çalışmada, iki kil numunesinin dielektrik özelliklerinin ölçülmesindeki kutuplanma mekanizmaları incelenmiştir. Numunelerin dielektrik parametreleri paralel plakalı kondansatör metodu ile 5Hz - 13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak, iki farklı ortam için ayrı ayrı ölçümler alınmıştır. İlk olarak bir dış elektrik alan yok iken ölçümler alınmış, ikinci olarak ise  $E \neq 0$  olduğu durum için dielektrik parametreler ölçülmüştür.

Son olarak da, bu değerlere göre kil numunesinin geçirgenlik ve iletkenlik değerleri ve buna bağlı olarak Kompleks Elektrik Formalizmi ile Elektrik Modülü hesaplanmıştır.

Bulunan bu deneysel modüle, teorik işlemler sonucu elde edilen modül fit edilmiş ve bu fit işleminden elde edilen parametrelerle birlikte durulma zamanı ve durulma frekansı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Dielektrik ölçümler, Dielektrik geçirgenlik, Dielektrik kayıp, Kutuplanma mekanizmaları

**ABSTRACT****M. S. Thesis****DIELECTRIC MEASUREMENTS OF SOLID CLAY SAMPLES BY  
IMPEDANCE ANALYZER UNDER DC ELECTRICAL FIELD**

Şeyma YÜCEYURT ÇELİK

**Selçuk University****Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Physics****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ****2006, 55 Pages****Jury: Assoc. Prof. Dr. H. Şükür KILIÇ  
Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ  
Assist. Prof. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ**

Each material has some special set of electrical characteristics depending on the dielectric properties of special material. Correct measurement of these properties is very important to obtain information on critical use of materials.

In this work, polarization mechanisms in measurement of dielectric properties of two clay samples have been investigated. Dielectric parameters of clays have been measured using parallel plate capacitor method by means of HP 4192A LF Impedance Analyser, which has a frequency range between 5 Hz- 13 MHz. First the measurement was carried out when external electric field wasn't applied, and then dielectric parameters was measured for  $E \neq 0$ .

Finally, corresponding to these values, permittivity and conductivity values of clay sample and Complex Electric Formalism and Electric Modulus were calculated.

The modulus obtained from theoretical works was fitted to the experimental modulus mentioned above, and the relaxation times and relaxation frequencies were determined using the parameters obtained from these fit operations.

**Key Words:** Dielectric measurement, dielectric permittivity, dielectric loss, polarization mechanisms

## ÖNSÖZ

Orijinal karışım ve ön konsantre numunelerinin dielektrik özellikleri, 5Hz-13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak,  $E=0$  ve  $E \neq 0$  olduğu iki farklı durum için incelenmiştir.

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü öğretim üyesi Yrd. Dç. Dr. Haziret DURMUŞ yönetiminde tamamlanarak, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Tez konusunun seçimi ve tezin hazırlanması konusunda her zaman bana yol gösteren, hiçbir yardımı benden esirgemeyen, Danışman Hocam, **Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ 'a**; çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan, Değerli Hocam, **Yrd. Doç. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ 'ye** teşekkür ederim.

Numunelerin temini konusunda yardımcı olan Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Ana Bilim Dalı öğretim üyelerinden **Yrd. Doç. Dr. Hatice YILMAZ 'a** teşekkür ederim.

Öğrenimim boyunca benden maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Değerli Hocam **Prof. Dr. Salih YILDIZ 'a** sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca numunelerin hazırlanması aşamasında bana verdiği destekten dolayı Selçuk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü öğretim üyelerinden **Arş. Gör. Ziya Erdem KOÇ 'a** teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana hep destek olan **eşime**, varlığını yanımda hissettiğim **aileme** teşekkür ederim.

Şeyma YÜCEYURT ÇELİK

KONYA-2006

**KULLANILAN SİMGELER**

$\alpha$	Kutuplanabilirlik
C	Kapasitans
$\delta$	Kompleks dielektrik geçirgenlikle reel bileşeni arasındaki açı
$\vec{E}$	Elektrik alanı
$\epsilon_0$	Uzayın elektriksel geçirgenliği
$\epsilon$	Bağıl dielektrik sabit
$\epsilon'$	Dielektrik sabitinin reel kısmı
$\epsilon''$	Dielektrik sabitinin sanal kısmı
$\epsilon_\infty$	Dielektrik sabitinin $\omega \rightarrow \infty$ daki değeri
$\epsilon_s$	Dielektrik sabitinin $\omega \rightarrow 0$ daki değeri
f	Frekans
$\varphi$	Kompleks dielektrik geçirgenlikle sanal bileşeni arasındaki açı
$\vec{p}$	Elektrik dipol momentini
$\vec{P}$	Kutuplanma vektörü
$\sigma$	Elektriksel iletkenlik
t	Zaman
$\tau$	Durulma zamanı
$\omega$	Açısal frekans
V	Elektriksel gerilim

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>ÖNSÖZ</b> .....	v
<b>KULLANILAN SİMGELER</b> .....	vi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. MATERYAL</b> .....	3
<b>2.1 KİL MİNERALLERİ</b> .....	3
1) Orijinal Karışım.....	5
2) Ön Konsantre.....	5
<b>3. METOD</b> .....	6
<b>3.1 DİELEKTRİK TEORİ</b> .....	6
<b>3.2 KUTUPLANMA ÇEŞİTLERİ</b> .....	9
<b>3.2.1 Debye Denklemi</b> .....	12
<b>3.2.2 Cole-Cole Denklemi</b> .....	13
<b>3.2.3 Cole-Davidson Denklemi</b> .....	15
<b>3.2.4 Havriliak-Negami Denklemi</b> .....	16
<b>3.3 ELEKTRİK MODÜLÜ FORMALİZMİ</b> .....	18
<b>3.3.1 Debye denklemi</b> .....	19
<b>3.3.2 Cole-Cole denklemi</b> .....	20
<b>3.3.3 Cole-Davidson denklemi</b> .....	20
<b>3.3.4 Havriliak-Negami denklemi</b> .....	21
<b>3.3.5 MWS eşitlikleri</b> .....	21
<b>4. DENEY</b> .....	24
<b>4.1 NUMUNELERİN HAZIRLANMASI</b> .....	24
<b>4.2 DİELEKTRİK ÖLÇÜMLER</b> .....	25
<b>4.2.1 Bir Dış Elektrik Alan Yok İken Dielektrik Ölçümler</b> .....	25
<b>4.2.2 Bir Dış Elektrik Alan Varlığında Dielektrik Ölçümler</b> .....	26

<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....</b>	<b>27</b>
<b>5.1 Orijinal Karışım Kil Numunesinin Bir Dış Elektrik Alan Yok İken Dielektrik Ölçümleri .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2 Ön Konsantre Kil Numunesinin Bir Dış Elektrik Alan Yok İken Dielektrik Ölçümleri.....</b>	<b>31</b>
<b>5.3 Orijinal Karışım Kil Numunesinin Bir Dış DC Elektrik Alanın Varlığında Dielektrik Ölçümleri.....</b>	<b>35</b>
<b>5.4 Ön Konsantre Kil Numunesinin Bir Dış DC Elektrik Alanın Varlığında Dielektrik Ölçümleri.....</b>	<b>38</b>
<b>5.5 Dielektrik Parametrelerin Bulunması.....</b>	<b>39</b>
<b>5.5.1 Orijinal Karışım Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri.....</b>	<b>39</b>
<b>5.5.2 Ön Konsantre Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri.....</b>	<b>41</b>
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>43</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>44</b>
<b>EK-1 .....</b>	<b>46</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>55</b>



## 1.GİRİŞ

Bir madde üzerine bir dış elektrik alan uygulandığında, enerji depolama yeteneği gösteriyorsa “dielektrik” olarak adlandırılır. Dielektriklerin en önemli özelliği, bir dış elektrik alanın etkisi altında kutuplanma yetenekleridir.

Maddelerin dielektrik özelliklerinin doğru olarak ölçülmesi malzeme tasarımında ve üretim sürecinin kalite kontrolünde önemli bilgiler sağlar. Örneğin bir kablo yalıtıcısının kaybı, bir ince film numunesinin oluşturulduğu alt taban, malzemesinin empedansı veya bir dielektrik rezonatörün frekansı malzemenin dielektrik özellikleri ile ilişkilidir. Ayrıca dielektrik özelliklerin bilinmesi ile maddenin atomik yapısı hakkında bilgi elde edilebilir. Maddelerin ferrit düzeni, örgü düzeni gibi moleküler yapıları, yoğunlukları ve bunlara bağlı elektriksel özellikleri dielektrik özelliklerinden belirlenebilir. Yiyecek, lastik, plastik ve seramiklerin endüstriyel olarak mikro dalgalarla işlenmesi alanlarındaki yeni uygulamalarda dielektrik özelliklerin bilinmesinden yararlanılmaktadır [HP 1217-1, HP 380-1].

Dielektrik malzemeler veya elektriksel olarak yalıtkan malzemeler, elektrostatik alanlara uzun süre karşı koyabilen malzemelerdir. Bu malzemeler uygulanan doğru akım (DC-gerilim) etkisi altında elektrik akımının geçmesine karşı çok büyük direnç gösterirler, yani teorik olarak DC gerilim altında dielektriklerin hiç akım taşımadığı kabul edilebilir. Fakat uygulamalarda genellikle çok zayıf bir akım (sızıntı akımı) taşıdıkları saptanmıştır. Yani yalıtkan malzemelerin öz direnci çok büyük olsa da yine de sonlu bir değerdir. Yalıtkan malzemenin kalitesi, malzemenin öz direncinin büyük değerlerde olmasına bağlıdır.

Bütün maddelerin dielektrik davranışını inceleyen tam bir teori elde etmek çok zor olup, tüm süreçleri aynı anda açıklayan bir teori mevcut değildir. Bununla birlikte, dielektrikler için basit kabuller ve teorik modeller oluşturulabilmiştir. Deneysel verilere teorik modellerin uydurulması yöntemiyle modellere ait parametrelerin değerleri ve değişimleri tahmin edilebilir. Doğal olarak deneysel sonuçların, tahminlere olan yakınlık derecesi, modelin başarısının bir ölçüsüdür. Dielektrik davranış hakkındaki 19.yy teorileri, “kendiliğinden kutuplanma” ya da “ferroelektrik” durumlarının mümkün olabileceğini önceden tahmin etmiştir. Ancak, ferroelektrik malzemeler 1935 yılına kadar bulunamamıştır.

Dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon$ ), dielektrik alınganlık ( $\kappa_\epsilon$ ), kırılma indisi ( $n$ ), moleköl kütlesi ( $M$ ) gibi nicelikler dielektriklerin makroskopik, molekölün kutuplanabilirliği ( $\alpha$ ), birim hacimdeki moleköl sayısı ( $N$ ) gibi nicelikler ise mikroskopik niceliklerdir. Dielektrik malzemelerin araştırılmasındaki temel amaç, makroskopik ve mikroskopik nicelik grupları arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Bu alandaki ilk ve en önemli alışmalar Alman fizikçi R.CLAUSIS, İtalyan fizikçi O.MOSOTTI, Hollandalı fizikçi H.LORENTZ ve Danimarkalı fizikçi L. LORENTZ tarafından yapılmıştır [Tareev 1975].

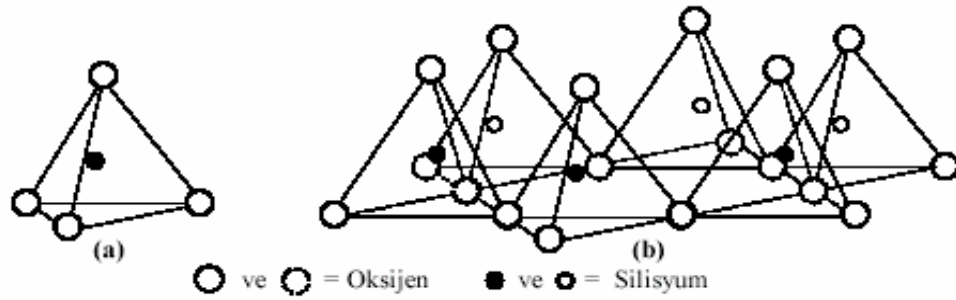
Özet olarak, dielektrik davranışın anlaşılması için; pratik uygulamaların tartışılmasına, yeni gelişmelerin değerlendirilmesine ve bir malzeme içindeki anormal özelliklerin açıklanmasına öncü olacak yeterli bir teorik temel gereklidir.

Bu çalışmada orijinal ve ön konsantre olmak üzere iki kil numunesinin dielektrik özellikleri incelenmiştir. İlk olarak bir dış elektrik alan yok iken ölçümler alınmıştır. İkinci olarak bir dış elektrik alanın varlığında numunelerin dielektrik ölçümleri alınmıştır.

## 2.MATERYAL

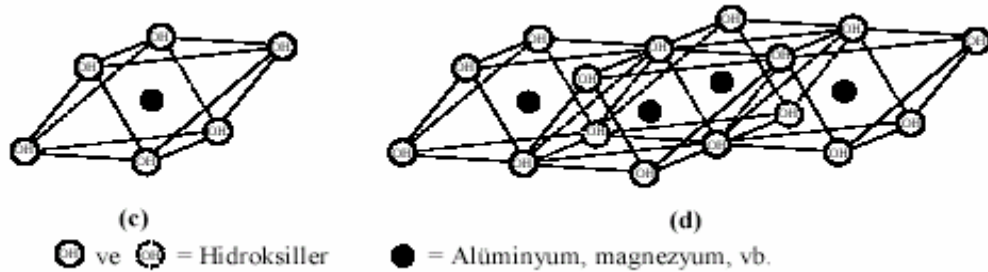
### 2.1.KİL MİNERALLERİ

Killer, ince taneli (0.2-2 $\mu$ m) katılar olup, üst üste sıralanmış katmanlardan meydana gelir. İki farklı yapısal birimden oluşurlar. Bunlardan ilk olanı; merkezde silisyum atomu, köşelerde ise merkez atomundan eşit uzaklıkta oksijen veya hidroksil iyonlarının yer aldığı düzgün dörtyüzlüdür. Oluşan bu yapıya tetrahedral tabaka adı verilir.



Şekil 2.1. Killerin (a) tek bir silika tetrahedronunun, (b) tetrahedronların hekzagonal yapıda düzenlenmesi ile oluşturulan tetrahedral tabakanın şematik gösterimi [Grim, 1968]

İkinci yapısal birim; merkezde alüminyum, demir veya magnezyum atomlarından biri, köşelerde ise merkez atomundan eşit uzaklıkta oksijen veya hidroksil iyonlarının yer aldığı düzgün sekizyüzlüdür. Oluşan bu yapıya oktahedral tabaka adı verilir.



Şekil 2.2. Killerin (c) tek bir oktahedral birimi, (d) oktahedral birimlerinin oluşturduğu oktahedral tabaka [Grim, 1968]

Kil mineralleri filossilikat ailesine aittir. Filossilikat yapıların temel özelliği tetrahedronların taban oksijenlerinin hegzagonal bir örgü oluşturmasıdır. Tetrahedronun dördüncü köşesindeki tepe oksijeni, tetrahedral tabakaya dik doğrultuda yönelmiş olup, oktahedronların kenarlarının paylaşılması ile oluşan oktahedral tabakanın bir elemanını meydana getirir.

Kil minerallerinde tabakalar, ikili veya üçlü birimler halinde (T-O veya T-O-T) düzenlenirler. Bu birimler, birbirlerinin üzerine aralarına su tabakaları, ara yüzey veya yüzey katyonları olarak yerleşir. Bu katyonlar değişebilir veya kuru kilin ara tabakaları tarafından soğurulan su şişmeye neden olabilir [Stumm and Morgan, 1981].

Kil mineralleri yapılarına, sahip oldukları katman yüküne ve kullanım yerlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılırlar. Tablo 2.1 de böyle bir sınıflandırma görülmektedir.

Çizelge 2.1 Kil mineralleri ve ilgili filossilikatların sınıflandırılması

Yapı Tipi	Yük	Grup
İki Tabakalı Killer	0	Serpentin-Kaolinit
Üç Tabakalı Killer	0	Talk-pyrophyllit
	0,2 – 0,6	Smektit
	0,6 – 0,9	Vermikülit
	1,0	Mika
	2,0	Ufalanan mika
	Değişken	Klorit
Üç Tabakalı Dönmüş Şeritler	Değişken	Sepiolit-paligorskit

Toprağın çok önemli bir kısmını oluşturan kil mineralleri gözenekli yapıları nedeniyle su ve suda çözünen bir takım tuzları bünyelerinde depolayarak bitkilerin beslenmesini sağlarlar. Bitkilerin topraktan aldıkları Ca, Na, Mg, K vb. besin elementleri genellikle kil minerallerinin katmanları arasında bulunurlar. Killerin adsorpladığı su, katmanlar arasına genellikle tabakalı yapıda yerleştiğinden suyun kilden ayrılması güçleşir ve toprağın nemliliği uzun süre korunabilir. Bu ve buna benzer özellikleri killerin doğal kullanılışlarına örnek olarak verilebilir.

Killerin adsorplama özelliklerinden dolayı çok değişik kullanım alanları bulunmaktadır. Kâğıt ve kozmetik sanayinde kullanılmasının yanı sıra, gıda maddelerinde renk ve koku giderme, kimyasal reaksiyonlarda katalizör etkisi, seramik endüstrisinde kullanılan süspansiyonların akıcılık özelliğinin ayarlanması, ilaç sanayisinde taşıyıcı madde olarak kullanılmaları bunlardan bazılarıdır.

Bu çalışmada orijinal karışım ve ön konsantre olmak üzere iki kil numunenin dielektrik özellikleri incelenmiştir. İncelenen numuneler Sn. Hatice YILMAZ tarafından Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Doktora Tezi olarak sunulmuştur.

### **1) Orijinal Karışım**

Uşak-Eşme-Gedikler köyü civarından alınan 4 adet kil örneklerinin harmanlanmasıyla bir karışım elde edilmiştir. Bu numuneye, ön zenginleştirme işlemleri uygulamak için numune yaş elenerek, tane boyutlarına ayrılmıştır.

Bu şekilde hazırlanan karışım orijinal karışım olarak adlandırılmıştır. Bu numunenin minerolojik bileşimi, montmorillonit, kaolen, feldspat, kuvars, opal-CT ve jarositten oluşmaktadır.

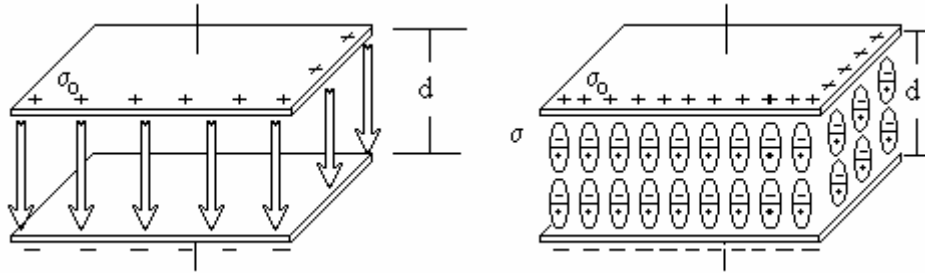
### **2) Ön Konsantre**

Yukarıdaki şekilde hazırlanan orijinal karışım, tane boyutlarına ayrıldıktan sonra bu numuneye bazı deneyler uygulanmıştır. Bu deneylerin sonucunda elde edilen tüm ürünlerin kimyasal analizleri yapılarak %  $Al_2O_3$  oranı en yüksek ve % $Fe_2O_3$  oranı en düşük olan ürünler alınarak bir karışım elde edilmiştir. Bu karışıma ön konsantre adı verilmiş olup, bu numune % 39 montmorillonit ve %26 kaolen içermektedir.

### 3.METOD

#### 3.1. DİELEKTRİK TEORİ

Dielektrik teorisinin matematiksel formülasyonuna ulaşmak için alanlar ve yük yoğunluklarına bağlı olarak çalışılması uygundur. Bu çalışma için paralel plakalı bir düzlem kapasitör göz önüne alalım:



Şekil 3.1 : (a) Vakumlu bir kapasitör. Plakalar üzerindeki yükler, plakalar arasındaki uzayda bir E elektrik alanına neden olur.

(b) Dielektrik maddeli bir kapasitör. Plakalar üzerindeki yüklerin bir kısmı, dielektrik içindeki yüklerin yer değiştirmesiyle dengelenir ve plakalar arasındaki uzayda bir E elektrik alanı oluşurmaz.

Paralel plakalı bir düzlem kapasitör (kenar etkileri ihmal edilmiş) için, E elektrik alanı

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $d$ , plakalar arası uzaklık,  $V$  plakalar arasındaki potansiyel farktır. Temel elektrostatikte alan ve yük yoğunluğu arasında

$$E = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (3.2)$$

şeklinde bir ilişki vardır. Burada  $\sigma_0$ , plakaları arasında boşluk bulunan kapasitörün plakaları üzerindeki yük yoğunluğudur.  $\epsilon_0$  ise boşluğun dielektrik sabitidir.

Sabit bir dış gerilim altında bir dielektrik madde kapasitör içine konulduğunda, dielektriğin varlığıyla kapasitör içinden daha fazla yük akar. Dielektriğin konulması ve fazladan yük oluşumu için yeteri kadar uzun bir zaman sonra yük yoğunluğu

$$\sigma = \epsilon_s \sigma_0 \quad (3.3)$$

şeklinde olur. Burada  $\epsilon_s$ , dielektrik malzemenin yeteri kadar uzun bir zaman sonra statik dielektrik sabitidir.

Dielektrik teoride genellikle

$$D = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

veya

$$D = \epsilon' \epsilon_0 E \quad (3.4)$$

şeklinde Elektrik Deplasman Vektörü (yer değiştirme vektörü) D alan tanımı kullanılır. Burada  $\sigma$ , dış alan ve kutuplanmanın birleşik etkisi ile plakalar üzerinde toplanan toplam yük yoğunluğudur.  $\epsilon'$  ise malzemenin bağıl dielektrik sabitidir.

Artan kapasitans, dielektriğin içerisinde pozitif ve negatif yüklerin normal konumlarında bir miktar yer değiştirmesi anlamına gelen kutuplanmadan kaynaklanır. Bu tür yer değiştirmeler her madde içerisinde az veya çok oluşur. Çünkü madde yüklü birimlerden oluşmuştur.

P kutuplanması, yüklerin iç yer değiştirmesiyle plakalar üzerinde toplanan yük yoğunluğu şeklinde

$$\sigma = \epsilon_0 (\sigma_0 + P) \quad (3.5)$$

ile tanımlanır.

(3.5) denkleminin (3.4) denklemi ile birleştirilmesiyle

$$D = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon_0 (\sigma_0 + P)}{\epsilon_0} = \sigma_0 + P$$

$$D = \varepsilon' \varepsilon_0 E = \sigma_0 + P \quad \Rightarrow \quad \varepsilon' E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} + \frac{P}{\varepsilon_0} \quad s$$

$$\varepsilon' E = E + \frac{P}{\varepsilon_0} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon' E - E = \frac{P}{\varepsilon_0}$$

dielektrik malzeme içindeki kutuplanma

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon' - 1) E \quad (3.6)$$

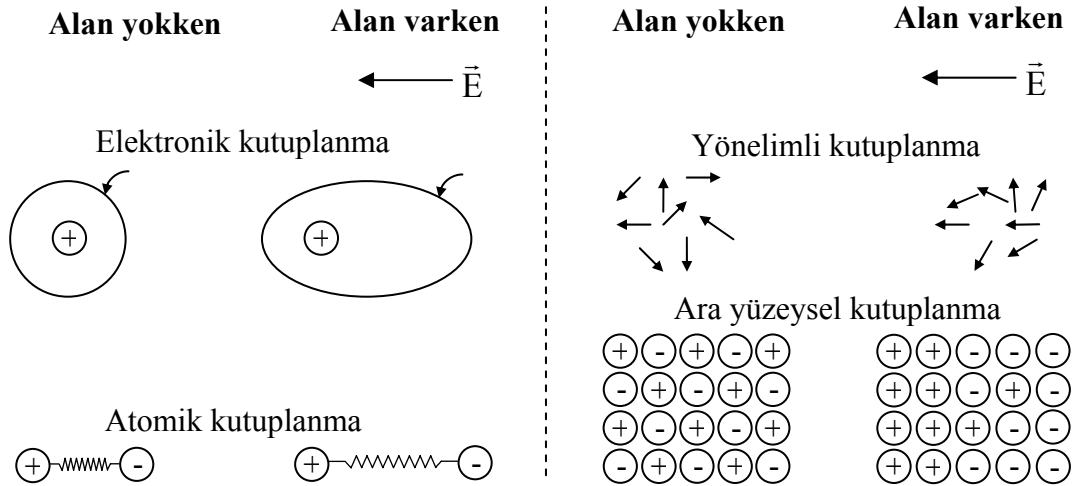
biçiminde elde edilir.



### 3.2. KUTUPLANMA ÇEŞİTLERİ

P genel kutuplanması, genel olarak dört farklı dielektrik kutuplanma mekanizmasından kaynaklanır. Bunlar: elektronik, atomik, yönelimli veya dipolar ve ara yüzeysel kutuplanmadır.

Her bir dielektrik mekanizma, karakteristik bir rezonans ve durulma frekansına sahiptir. Frekans artarken, depolamaya katkısı olan daha yavaş mekanizmalar ortadan kalkarken, daha hızlı mekanizmalar katılır. Her kritik frekansta kayıp faktörüne ( $\epsilon''$ ) karşılık gelen bir pik oluşur. Rezonans etkisi genellikle elektronik veya atomik kutuplanma ile ilgili iken, durulma etkisi yönelimli kutuplanma ile ilgilidir [Bartolomeo et al., 2001].



Şekil 3.2 Kutuplanma mekanizmaları

**a) Elektronik kutuplanma :** Madde, negatif elektron bulutlarıyla çevrilen pozitif atomik çekirdeklerden oluşur. Elektriksel olarak nötr bir maddeye dış bir elektrik alan uygulandığında, elektronlar çekirdeğe göre yer değiştirir. Dolayısıyla elektronların yörüngesi değişir ve kutuplanma meydana gelir.

Elektronik kutuplanma, bütün atom veya iyonlarda oluşur ve dielektrik içinde diğer kutuplanma tiplerinin bulunup bulunmamasına bağlı olmaksızın bütün dielektriklerde gözlemlenir. Elektronik kutuplanmanın spesifik bir özelliği, dış bir

elektrik alan uygulandığında, çok küçük bir zaman aralığı ( $10^{-15}$  s mertebesinde) süresinde, yani morötesi ışınların titreşim periyotları mertebesinde oluşmasıdır [HP 1217-1].

**b) Atomik Kutuplanma :** Uygulanan bir elektrik alanının altında birbirine yakın olan pozitif ve negatif iyonların yayılması ile meydana gelir. Elektrik alan altında bulunan ve birbirine yakın olan pozitif ve negatif iyonlar zıt yönlerde hareket edeceklerinden aradaki bağlar gerilir. Farklı tipteki molekülleri oluşturan atomlar olduğu zaman, elektron bulutları güçlü bağları olan atomlara doğru dış merkezli olarak yer değiştireceği için, bunların elektronları normal olarak küresel olmayacaktır. Böylece atomlar zıt kutuplu yükler edinirler ve bu net yüklerde etkili olan bir dış alan, atomların denge konumlarını değiştirmek için onları yönlendirir. Alanın yönüne bağlı olarak katyon ve anyonlar birlikte yaklaşır veya uzaklaşır. Bu kutuplanma, dielektriğin atomik kutuplanmasını temsil eder.

Bir elektrik alanda pozitif ve negatif yüklü atomlar kendi normal konumlarından çok küçük miktarlarda yer değiştirirler. Bu yer değiştirmeler, malzemenin boyutunu değiştirebilir. Rezonans tipik olarak kırmızı ötesi veya ona yakın frekans bölgesinde meydana gelir.

**c) Yönelimli Kutuplanma :** Bir molekül, atomların bir yada daha fazla elektronun ortak kullanımı ile oluşur. Elektronlardaki bu düzen sürekli bir dipol momentin oluşmasına neden olur. Dış elektrik alanın yokluğunda bu momentler rasgele bir dizi şeklinde yönelirler. Hatta net kutuplanma mevcut değildir. Dış elektrik alan varken elektrik alanın etrafında bir sıra şeklinde dönen dipoller, yönelimli kutuplanma meydana getirirler.

Bir molekülün benzer olmayan partnerleri arasındaki asimetrik yük dağılımı, bir dış alanın yokluğunda da var olan sürekli dipol momentlere sebep olur. Böyle momentler, uygulanan bir alanda onları alan doğrultusunda yönelmeye zorlayan bir tork oluştururlar. Sonuç olarak bir yönelim (veya dipol) kutuplanması ortaya çıkar. Bir elektrik alan uygulandığında bu moleküller, alan doğrultusunda olmaya zorlanan dipol momentleriyle kendilerini sıralamak için yönelirler. Buna dipol kutuplanması

denir. Dipollerin yönelmesi genellikle mikrodalga bölgesine düşen bir durulma frekansına neden olur [HP 1217-1].

**d)Ara Yüzeysel Kutuplanma :** Göz önüne alınan ilk üç kutuplanma türü, homojen maddelerde gözlenmektedir. Heterojen maddelerde ise ilave olarak dördüncü kutuplanma türü de meydana gelebilir. Çoğu maddelerde yüklerin bir kısmı maddenin içinde hareket etmekte bağlı olarak serbesttir. Bu serbestliğin derecesi maddeye bağlıdır.

Bakır ve alüminyumda yüksek iletkenlik sağlayan bazı elektronlar, bu maddeler için serbesttir. Elektrolitlerde ise, hem pozitif hem de negatif iyonlar hareket etmekte serbesttir. İyi bir yalıtıcıda bile sınırlı mesafeleri alabilen yükler vardır. Yükleri hareket etmekte serbest olan iki bitişik madde farklıysa, bir elektrik alanının varlığında ara yüzeylerde yük birikmesi olacaktır. Bu olaya ara yüzeysel kutuplanma denir.

Yükler, elektrotlarda serbest deşarj olamadığında veya yer değiştiremediğinde hareket engellenir ve malzemenin ara yüzeyleri içerisinde tuzaklanabilir. Bu yüklerin birikmesine neden olan elektriksel alan bozulması, bir malzemenin toplam kapasitansını artırır. Kapasitansın artması ise  $\epsilon'$  'nde bir artmaya karşılık gelir.

Ara yüzeysel kutuplanma genelde diğer kutuplanma tiplerinden daha uzun zaman alır. Bu nedenle, çoğunlukla radyo frekans üstü bölgede yer alır. Ara yüzeysel kutuplanmanın etkilerinden dolayı, bir madde karışımının dielektrik sabitinin her bir maddenin tek başına olduğu durumdaki dielektrik sabitinden fazla olduğu açıktır.

Bu dört farklı kutuplanma mekanizmasının bir sonucu olarak, dielektrik sabiti genelde, düşük frekanslarda yüksek frekanslarda olduğundan daha büyük olacaktır. Elektronik ve atomik kutuplanma durumunda, rezonanslar genelde keskindir. Keskin çalkantılara dipol ve ara yüzeysel kutuplanmalarda daha az rastlanır. İdeal olarak kutuplanma, asimptotik olarak merkezlenmiş, durulma frekansı olarak bilinen bir frekansta etki eder.

Dielektrik sabiti veya bağlı geçirgenlik, elektriksel yük dağılımının bir ölçüsüdür ve “  $\epsilon^*$  ” sembolü ile gösterilir. Geçirgenlik, parametrelere bağlı bir frekansta genel olarak;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (3.7)$$

denklemleri ile verilir. Geçirgenliğin reel kısmı “  $\varepsilon'_r$  ”, maddenin kutuplanabilirliğini ya da yük depolanmasını; sanal kısmı ise “  $\varepsilon''_r$  ”, iyonik iletim ya da kutuplanmadan kaynaklanan enerji kayıplarını ifade eder.

### 3.2.1. Debye Denklemi

Sistemin zaman sabiti maksimum salınım frekansı ile tanımlanır. Bu tür sistemler aşırı sıkıştırılmış harmonik osilatörlerdir. Ayrıca difüzyon limitli durulma süreçleri olarak da bilinirler.

Debye denklemi, bu tür homojen sistemlerin frekans ile değişimini tanımlayan modelin genel biçimidir [Debye, 1929].

Tek durulma zamanlı dielektrik için kompleks geçirgenlik, Debye eşitliği ile,

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlik reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.9a)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.9b)$$

elde edilir. Burada  $\omega \rightarrow 0$  iken  $\varepsilon_s$  ve  $\omega \rightarrow \infty$  iken  $\varepsilon_\infty$  değerleri reel geçirgenliğin limit değerleridir.

### 3.2.2. Cole-Cole Denklemi

Dielektrik ölçümler ile geçirgenlik ve dielektrik kayıplar üzerine veriler elde edilir. Bu veriler geçirgenliğin gerçek ve sanal kısımları için grafikler biçiminde gösterilir.

En kullanışlı metotlardan biri, aynı frekansta kartezyen koordinatlarda veya kompleks düzlemde  $\varepsilon'(\omega)$ 'e karşı  $\varepsilon''(\omega)$  çiziminden oluşur. Bu çizime kompleks yer diyagramı veya Argand diyagramı denir. Bu çizim, Cole-Cole tarafından dielektriklere uygulandığı için Cole-Cole çizimi veya arc çizimi diye de anılır.

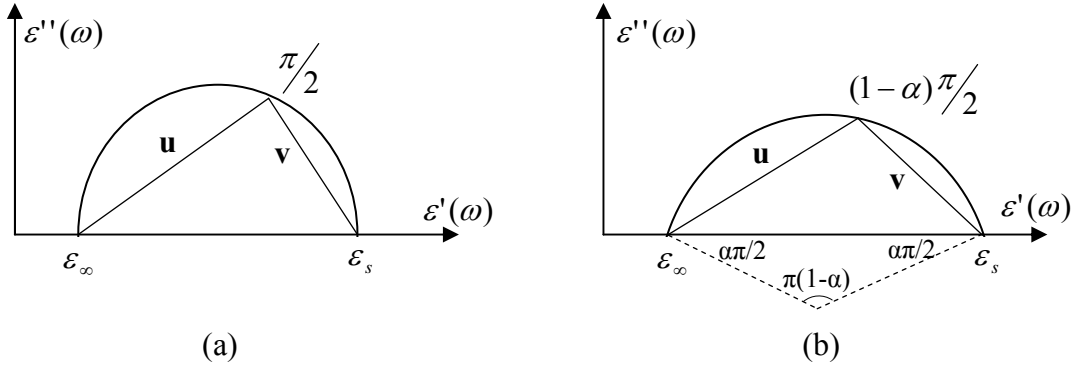
Debye ilişkisini gösteren tek bir durulma frekansına sahip bir malzeme için, merkezi yatay  $\varepsilon''=0$  eksenini üzerinde olan ve kayıp faktörü pikinin ise  $1/\tau$ 'da olduğu bir yarı-daire meydana gelir. Çoklu durulma frekanslarına sahip bir malzeme için ise, merkezi  $\varepsilon''=0$  ekseninin altında kalan bir yarı-daire (simetrik dağılım) veya bir yay oluşur [HP 1217-1; Ruffet et al., 1991; Tsangaris et al., 1998].

Tek durulma zamanlı bir dielektrik için, Cole-Cole çizimi tam bir yarım dairedir. Debye denklemlerinin basit bir türetimi dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısımları arasında bağıntının bir çember denklemi olduğunu göstermektedir.

$$\left( \varepsilon'(\omega) - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right)^2 + (\varepsilon''(\omega))^2 = \frac{1}{4} (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)^2 \quad (3.10)$$

Cole-Cole çizimi, bir sistemin tek bir durulma zamanına sahip olup olmadığını bulması için özel bir metot sağlar. Bu metot, dağılım fonksiyonunun farklı tiplerini karakterize etmek için de kullanışlıdır [Daniel, 1967].

Tek durulma zamanlı bir dielektrik için arc çizimi aşağıda gösterilmiştir. Yarım daire üzerinde verilen bir nokta, tepe noktası  $\omega\tau = 1$  iken verilen bir frekansa uygun olur. Çizimde  $\omega$ 'nın görünmeyişi çizim için bir dezavantajdır.  $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_\infty$  ile karakterize edilen tek durulma zamanlı herhangi bir madde aynı arc çizimini verir.



**Şekil 3.3:** (a) Bir Debye dielektriği için arc çizimi;  
 (b)  $\alpha$  parametrelili Cole-Cole dağılımlı bir dielektrik için arc çizimi

Yarım daire üzerindeki bir nokta yukarıda gösterildiği gibi  $\mathbf{u}$  ve  $\mathbf{v}$  vektörleri ile tanımlanır. Tanıma göre:

$$\mathbf{u} = \varepsilon'(\omega) - \varepsilon_s + i\varepsilon''(\omega) \quad (3.11a)$$

iken

$$\mathbf{u} - \mathbf{v} = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \quad (3.11b)$$

yazılabilir.

Tek durulma zamanlı bir dielektrik için bu şekillenim  $\varepsilon' = (\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)/2$  'de  $\varepsilon'$  eksenini üzerinde merkezi olan ve yarıçapı  $\varepsilon' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/2$  olan bir yarım daire şeklindedir.  $\omega\tau = 1$  iken  $\varepsilon' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/2$  değerinde  $\varepsilon''$  en yüksek değerini alır.

Cole-Cole, Debye dielektrik ifadesini kompleks düzlemdeki yay şekli ile genelleştirmiş ve bunu durulma zamanı dağılımlarının belirli bir tipine uygulamıştır. Bu durumda kompleks geçirgenlik;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (3.12)$$

şeklinde olur. Bu eşitlik durulma zamanı dağılım fonksiyonunun simetrik genişlemesini niteler. Bu eşitliği reel ve sanal kısımlarına ayırırsak;

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cos \phi / A = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cos \phi A^{-1} \quad (3.13a)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_\infty - \varepsilon_s) \sin \phi / A = (\varepsilon_\infty - \varepsilon_s) A^{-1} \sin \phi \quad (3.13b)$$

elde edilir. Buradaki  $A$  ve  $\phi$  sayıları aşağıdaki gibi belirlenmiştir [Tsangaris, 1998]:

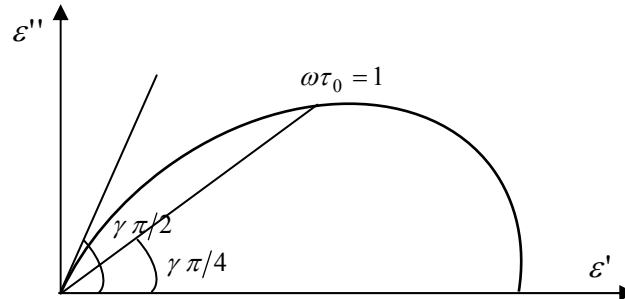
$$A = \left[ 1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)} \right]^{1/2} \quad (3.13c)$$

$$\phi = \arctan \left[ (\omega\tau)^{1-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} / 1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right] \quad (3.13d)$$

Bu durumda yarım dairenin merkezi yatay  $\varepsilon'$  ekseninden aşağı doğru uzanır.  $[2\pi\tau(1+2\sin\alpha)]^{-1}$  frekansında  $\varepsilon''$  maksimum iken,  $\varepsilon' = (\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)/2$  olduğundan düşey eksen etrafında simetriktir. Dairesel yay, her iki taraftan da  $(1-\alpha)\pi/2$  'lik bir dar açı ile  $\varepsilon'$  eksenini keser.  $\alpha = 0$  için (3.8) eşitliğine (Debye Denklemine) indirgenir [HP 1217-1].

### 3.2.3. Cole-Davidson denklemi:

Durulma zamanlı dağılım fonksiyonunun asimetric genişlemesi durumunda bu eşitlik kullanılır (Şekil 3.4). Yayın, düşük frekanslarda daireysel fakat yüksek frekanslarda, düz bir çizgi boyunca yatay eksene ( $\varepsilon'$ ) yaklaştığını ifade eder. Bu çizgi ile  $\varepsilon'$  eksenini arasındaki açı  $\gamma\pi/2$  dir.



Şekil 3.4 : Cole-Davidson modelinin şematik çizimi

Bu durumda kompleks geçirgenlik;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + (i\omega\tau))^\gamma}, \quad 0 < \gamma \leq 1 \quad (3.14)$$

şeklinde verilir. Şekil 3.4' deki gibi çarpık bir yay meydana getiren bu eşitlik, Cole-Davidson tarafından ortaya atılmıştır. Eşitlik, reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\cos\phi)^\gamma \cos(\gamma\phi) \quad (3.15a)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\cos\phi)^\gamma \sin(\gamma\phi) \quad (3.15b)$$

elde edilir. Burada;

$$\tan\phi = \omega\tau \quad (3.15c)$$

ifadesi ile verilir. Maksimum kayıpta ( $\varepsilon''$ ) ise,  $\omega\tau \neq 1$  dir. Fakat

$$\omega_{\max}\tau = \tan\left(\frac{1}{\gamma+1} \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.15d)$$

ile kullanılır. Burada  $\omega_{\max}$ , maksimum kaybın açılmal frekansıdır [Davidson and Cole, 1950].

### 3.2.4. Havriliak-Negami denklemi:

Havriliak-Negami denklemi, dielektrik durulma süreçlerinde Cole-Cole, Cole-Davidson ya da her ikisinin de birden etkili olup olmadığını belirler. Bu durumda kompleks geçirgenlik;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^\gamma} \quad (3.16)$$

şeklinde verilir. Denklemden,  $\alpha \neq 0, \gamma = 1$  için Cole-Cole tipi süreci,  $\alpha = 0, \gamma \neq 1$  için Cole-Davidson tipi süreci,  $\alpha \neq 0, \gamma \neq 1$  ise her iki tip sürecin de etkili olduğu görülür. (3.16) eşitliği reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;



$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})(\text{Cos}\gamma\phi)A^{-\gamma} \quad (3.17a)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\text{Sin}(\gamma\phi)A^{-\gamma} \quad (3.17b)$$

bulunur. Buradaki A ve  $\phi$  değerleri ise şu şekildedir:

$$A = \left[ 1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \text{Sin} \frac{\alpha\pi}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)\frac{1}{2}} \right] \quad (3.17c)$$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{(\omega\tau)^{1-\alpha} \text{Cos} \frac{\alpha\pi}{2}}{1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \text{Sin} \frac{\alpha\pi}{2}} \right] \quad (3.17d)$$

Burada,  $\alpha = 0$  ve  $\gamma = 1$  için bu eşitlikler, tam bir Debye surucine varır [Havriliak and Negami, 1966].

Bona ve arkadaşları Havriliak-Negami denklemine, iletkenliği açısal frekansa bağlayan kuvvet yasasının etkisini ekleyerek aşağıdaki geçirgenlik ifadesini elde etmiştir [Bona et al., 2001].

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^{\gamma}} - \frac{\sigma(i\omega)^{n-1}}{\varepsilon_0} \quad (3.18)$$

Bu çalışmada ele alınan kil numunelerinin dielektrik özellikleri hesaplanırken elde edilen bu denklem kullanılmıştır.

### 3.3. ELEKTRİK MODÜLÜ FORMALİZMİ

Dielektrik spektrumu yorumlamak için kompleks geçirgenlik  $\epsilon^*(\omega)$ , kompleks elektrik modülü  $M^*(\omega)$ , kompleks empedans  $Z^*$  gibi farklı formalizmler türetilmiştir. Bu formalizmlerden  $M^*(\omega)$  formalizminin en önemli avantajı, elektrot etkisinin ortadan kaldırılabilmesidir.

Killer, polimerler ve komposit polimerik malzemelerde, bu sistemleri heterojen hale getiren katkıların, dolguların ve hatta safsızlıkların bulunması nedeniyle arayüzeysel kutuplanma daima vardır.

Genel olarak iletken katkılı sistemlerde, ara yüzeysel kutuplanma, iletkenlikten dolayı belirsizleşir. Yüksek olabilen dielektrik geçirgenlik ve iletkenlik yüzünden ara yüzeysel durulma görülmeyebilir. Mc Crum ve arkadaşları tarafından ortaya atılan “elektrik modülü” formalizmi ile bu zorluğun üstesinden gelinmektedir [McCrum et al., 1967]. Elektrik modülü kullanımının diğer bir avantajı da düşük frekanslardaki iletkenlik ve geçirgenliğin büyük değerlerindeki değişiklikleri en aza indirmesidir.

$\epsilon''(\omega)$ ’nın  $\sigma$  (iletkenlik) ile orantılı olduğu basit dc-iletkenliğinin etkilerinin  $M''(\omega)$ ’daki Debye tipi pike çevrildiği  $M^* = 1/\epsilon^*$  dielektrik modülünü türetmek pratik hale gelmektedir.  $\epsilon''(\omega)$ ’dan  $M''(\omega)$ ’ya geçerken ortaya çıkan beklenmedik olası değişimler basitçe  $M^* \cdot \epsilon^* = 1$  bağıntısına giren hem gerçek hem de sanal kısımdan oluşan bir durumdur [Ranko and Hermann, 1998].

Kompleks modüler elektrik modülü veya ters kompleks geçirgenlik ( $M^*$ ), aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = \frac{1}{\epsilon' - i\epsilon''} = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + i \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} = M' + iM'' \quad (3.19)$$

Burada  $M'$  reel ve  $M''$  sanal elektrik modülleridir. Bu ifadede  $\omega \rightarrow 0$  iken  $M'$ ’nin değeri  $M_s$ ,  $\omega \rightarrow \infty$  iken  $M_\infty$  olarak alınırsa bu ifade

$$M_s = \frac{1}{\epsilon_s} \quad , \quad M_\infty = \frac{1}{\epsilon_\infty} \quad (3.20)$$

şeklinde yazılabilir. Elektrik modülü formalizmine göre durulma süreçlerini (Debye, Cole-Cole, Cole-Davidson, Havriliak-Negami ve MWS (ara yüzeysel)) tek tek yazabiliriz.

### 3.3.1. Debye denklemi:

Geçirgenlik moduna göre tanımlanmış denklem (3.8)'in tersi alınarak ( $M^* = 1/\epsilon^*$ ), Debye eşitliğinin elektrik modülü

$$M^* = M_\infty M_s \frac{1 + i\omega\tau}{M_\infty + M_s(i\omega\tau)} \quad (3.21a)$$

şeklinde yazılabilir. Bu kompleks ifade reel ve sanal kısımlarına

$$M' = M_\infty M_s \frac{M_\infty + M_s \omega^2 \tau^2}{M_\infty^2 + M_s^2 \omega^2 \tau^2} \quad (3.21b)$$

$$M'' = M_\infty M_s \frac{(M_\infty - M_s) \omega \tau}{M_\infty^2 + M_s^2 \omega^2 \tau^2} \quad (3.21c)$$

biçiminde ayrılabilir.

### 3.3.2. Cole-Cole denklemi:

Debye denklemine benzer olarak, geçirgenlik modunda yazılmış olan Cole-Cole denkleminin (denklem 3.12) tersi alınarak kompleks modül türetilabilir:

$$M^* = M_\infty M_s \frac{1 + (i\omega\tau)^{(1-\alpha)}}{M_\infty + M_s (i\omega\tau)^{(1-\alpha)}} \quad (3.22a)$$

$$M' = M_\infty M_s \frac{[M_s A + (M_\infty - M_s) \text{Cos}\phi] A}{M_s^2 A^2 + 2A(M_\infty - M_s) M_s \text{Cos}\phi + (M_\infty - M_s)^2} \quad (3.22b)$$

$$M'' = M_\infty M_s \frac{[(M_\infty - M_s) \text{Sin}\phi] A}{M_s^2 A^2 + 2A(M_\infty - M_s) M_s \text{Cos}\phi + (M_\infty - M_s)^2} \quad (3.22c)$$

Buradaki  $A$  ve  $\phi$  terimleri, denklem (3.13c) ve denklem (3.13d)'de tanımlanmıştır.

### 3.3.3. Cole-Davidson denklemi:

Cole-Davidson denkleminin (denklem 3.14) tersi alınarak, kompleks modül

$$M^* = M_\infty M_s \frac{1 + (i\omega\tau)^\gamma}{(M_\infty - M_s) + M_s (1 + i\omega\tau)^\gamma} \quad (3.23a)$$

$$M' = \frac{M_\infty M_s [M_s + (M_\infty - M_s) (\text{Cos}\phi)^\gamma (\text{Cos}(\gamma\phi))]}{M_s^2 + (M_\infty - M_s) (\text{Cos}\phi)^\gamma [2M_s \text{Cos}(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s) (\text{Cos}\phi)^\gamma]} \quad (3.23b)$$

$$M'' = \frac{M_\infty M_s (M_\infty - M_s) (\text{Cos}\phi)^\gamma \text{Sin}(\gamma\phi)}{M_s^2 + (M_\infty - M_s) (\text{Cos}\phi)^\gamma [2M_s \text{Cos}(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s) (\text{Cos}\phi)^\gamma]} \quad (3.23c)$$

biçiminde yazılır. Buradaki  $\phi$  terimi, denklem (3.13d)'de tanımlanmıştır.

### 3.3.4. Havriliak-Negami denklemi:

Denklem (3.16)'da tanımlanan ifadenin tersi alınarak, kompleks elektrik modülü

$$M^* = M_\infty M_s \frac{[1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}]^\gamma}{(M_\infty - M_s) + M_s [1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}]^\gamma} \quad (3.24a)$$

$$M' = \frac{M_\infty M_s [M_s A^\gamma + (M_\infty - M_s) \text{Cos}(\phi\gamma)] A^\gamma}{M_s^2 A^{2\gamma} + 2A^\gamma (M_\infty - M_s) M_s \text{Cos}(\phi\gamma) + (M_\infty - M_s)^2} \quad (3.24b)$$

$$M'' = \frac{M_\infty M_s [(M_\infty - M_s) \text{Sin}(\phi\gamma)] A^\gamma}{M_s^2 A^{2\gamma} + 2A^\gamma (M_\infty - M_s) M_s \text{Cos}(\phi\gamma) + (M_\infty - M_s)^2} \quad (3.24c)$$

olarak gösterilebilir. Yine buradaki  $A$  ve  $\phi$  terimleri, denklem (3.13c) ve denklem (3.13d)'de tanımlanmıştır.

### 3.3.5. MWS eşitlikleri:

Geçirgenlik modunda tanımlanmış olan denklem (3.18)'in tersi alınarak, kompleks elektrik modülü ve onun reel ve sanal kısımları bulunabilir. Basitlik açısından burada bu ifadenin sadeleştirilmiş alınmıştır. Denklemin tam gösterimi ve sadeleştirme işlemi EK-1'de ayrıntılarıyla sunulmuştur.

$$M^* = \frac{M_\infty M_s (1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^\gamma \varepsilon_0 \omega}{M_s (1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^\gamma \varepsilon_0 \omega + \varepsilon_0 M_\infty \omega - \varepsilon_0 M_s \omega + i\sigma (i\omega)^n M_s M_\infty (1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^\gamma} \quad (3.25a)$$

$$M^* = \frac{M_\infty M_s}{M_s + (M_\infty - M_s) (1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^{-\gamma} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0} (i\omega)^{n-1} M_s M_\infty} \quad (3.25b)$$

$$M' = M_s M_\infty \frac{(M_\infty - M_s) \cos(\gamma\phi) + M_s A^\gamma - M_s M_\infty \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right) A^\gamma \omega^{n-1} \cos\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right)}{\text{Payda}} \quad (3.25c)$$

$$M'' = M_s M_\infty \frac{(M_\infty - M_s) \sin(\gamma\phi) + M_s M_\infty \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right) A^\gamma \omega^{n-1} \sin\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right)}{\text{Payda}} \quad (3.25d)$$

$$\begin{aligned} \text{Payda} &= 2M_s (M_\infty - M_s) \cos(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s)^2 A^{-\gamma} + M_s^2 A^\gamma \\ &+ M_s^2 M_\infty^2 \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2 A^\gamma \omega^{2(n-1)} - 2M_s M_\infty (M_\infty - M_s) \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right) \omega^{n-1} \cos\left(\gamma\phi + \frac{\pi}{2}(n-1)\right) \\ &- 2M_s^2 M_\infty \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right) \omega^{n-1} A^\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right) \end{aligned} \quad (3.25e)$$

şeklinde yazılabilir. Elektrik Modülü Formalizmine göre tanımlanan kompleks MWS denklemi, reel  $M'(\omega)$  ve sanal  $M''(\omega)$  kısımlarına ayrılıp Denk.(3.25c) ve (3.25d) sadeleştirilmiş şekli Maplev 7 ile elde edilmiştir. Bu denklemlerde geçen A ve  $\phi$  terimleri ise şu şekilde tanımlanmıştır [Tsangaris et al., 1998]:

$$A = \left[ 1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \frac{\pi\alpha}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.25f)$$

$$\phi = \arctan \left[ (\omega\tau)^{1-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} / 1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right] \quad (3.25g)$$

Bu denklem kullanılarak, deneysel çalışmalarımızda geçirgenlik modunda elde ettiğimiz değerler fit edilmiştir. Tsangaris ve arkadaşları, deneysel verilerine Cole-Cole denkleminin elektrik modülü formalizmine yapılan dönüşümünü kullanmışlardır. Bir başka deyişle, simetrik ve asimetrik kayma durumlarını ve iletkenliğin frekansla değiştiği gerçeğini göz önüne almamışlardır [Tsangaris et al., 1998].

## 4. DENEY

### 4.1. Numunelerin Hazırlanması

Dielektrik özelliklerini incelemek için iki katı kil numunesi seçilmiştir. Bu numunelerin dielektrik ölçümlerinde, paralel plakalı düzlem kondansatör yöntemi kullanılmıştır.

Toz şeklindeki kil numunesi S.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü'nde bulunan pres kullanılarak 15 ton basınç altında yaklaşık 3-4 mm kalınlığında ve 16 mm çapında paletler haline getirilmiştir.

Numuneler önce kalın bir zımpara ile yaklaşık 5 mm kalınlığına kadar inceltilmiştir. Daha sonra su zımparası ile 1mm kalınlık elde edilene kadar tekrar inceltilmiştir. Son olarak yüzeyindeki pürüzler sünger zımpara ile düzeltilerek oldukça pürüzsüz ve kaliteli bir yüzey elde edilmeye çalışılmıştır.

16 mm çaplı ve 1 mm kalınlıktaki diskler haline getirilen kil numunelerin her iki yüzü, elektrot kutuplanmasının etkisini minimuma indirmek amacıyla, gümüş boya (silver paint) ile boyanarak elektrotlar oluşturulmuş ve gümüş boya kuruyuncaya kadar yaklaşık yarım saat etüvde bekletilmiştir. Numunelere elektrik alan uygulayabilmek ve numunede oluşacak tepkiyi alabilmek için numune yüzeylerinden alınan bağlantılar yine gümüş pasta ile sağlanmıştır.

Dielektrik sabiti en genel şekilde

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$$

şeklinde kompleks olarak ifade edilir. Empedans analizörü ile ölçülen  $G(\omega)$  kondüktans ve  $B(\omega)$  suseptansı,  $Y^*(\omega)$  admintansına

$$Y^*(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) = \omega\varepsilon''(\omega)C_0 + j\omega\varepsilon'(\omega)C_0$$

ile bağlıdır. Burada

$$\varepsilon'(\omega) = B(\omega)/(\omega C_0), \quad \varepsilon''(\omega) = G(\omega)/(\omega C_0)$$

şeklinde olup boyutu Siemens (S), (1 Siemens=1/(ohm)=1mho) dir.



Çalışmalara orijinal karışım numunesiyle başlanmıştır. İlk olarak; numune 80<sup>0</sup>C ye ayarlanan fırında 2 saat bekletilerek, numune içindeki nem uzaklaştırılmıştır.

Desikatör içine bir miktar nem tutucu konulduktan sonra kurutulan orijinal karışım kablo uçlarına takılıp, desikatör içindeki hava alındı. 80<sup>0</sup>C de 2 saat bekleyen numune, oda sıcaklığına gelmesi için desikatöre konulduktan 1 gün sonra ölçümler alındı.

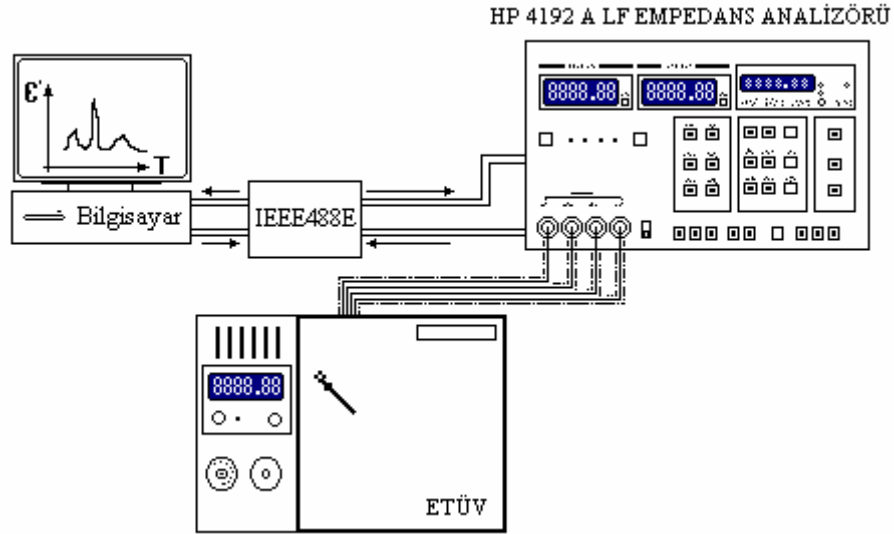
Bu işlemlerden sonra orijinal numune için dielektrik ölçümler alınmıştır. İkinci olarak ön konsantre numunesi ele alınmış, aynı işlemler bu numune için tekrarlanmıştır.

## **4.2. Dielektrik Ölçümler**

Bu çalışmada kullanılan iki kil numunesi için iki farklı ölçüm yapılmıştır. Kurutma işleminden sonra ilk olarak bir dış elektrik alan yok iken ölçümler alınmıştır. İkinci olarak ise;  $E \neq 0$  olduğu durum göz önüne alınmıştır. Bu durumda yapılan deney düzeneği, paralel plakalı bir kondansatör arasına konularak plakalar arasına sabit bir gerilim uygulanmış ve dielektrik ölçümler alınmıştır.

### **4.2.1. Bir Dış Elektrik Alan Yok İken Dielektrik Ölçümler**

Orijinal karışım ve ön konsantre numunelerinin dielektrik ölçümleri için paralel plakalı sığa yöntemi ile 5Hz-13MHz frekansı aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılmış ve 50 değer alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.1 deki gibidir.



Şekil 4.1 Dielektrik ölçümlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği

Dielektrik ölçümlerin her adımında; frekans, sığa ve kayıp tanjant değerleri bilgisayara aktarılmıştır. Bu deneysel verilerden numunelere ait dielektrik sabitler Sigma Plot 2000 grafik programı kullanılarak elde edilmiştir.

#### 4.2.2. Bir Dış Elektrik Alan Altında Dielektrik Ölçümler

Bu çalışma için aynı deney düzeneğine ilave olarak bir ikinci dış paralel plakalı kondansatör kullanılmıştır. Dış kondansatörün plakaları arasında daha önce hazırlanan numune yerleştirilmiş ve bir dc gerilim uygulanmıştır. Plakaları arasında oluşan elektrik alanın büyüklüğü

$$E = \frac{V}{d} \quad (4.1)$$

denklemleri ile bulunur. Burada  $d$ , plakalar arası uzaklık,  $V$  ise plakaları arasında uygulanan farklı dc gerilimidir. ( $d=1,5$  cm ve  $V=500$  volt,  $2500$  volt)

## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

### 5.1. Orijinal Karışım Kil Numunesinin Bir Dış Elektrik Alan Yok İken Dielektrik Ölçümleri

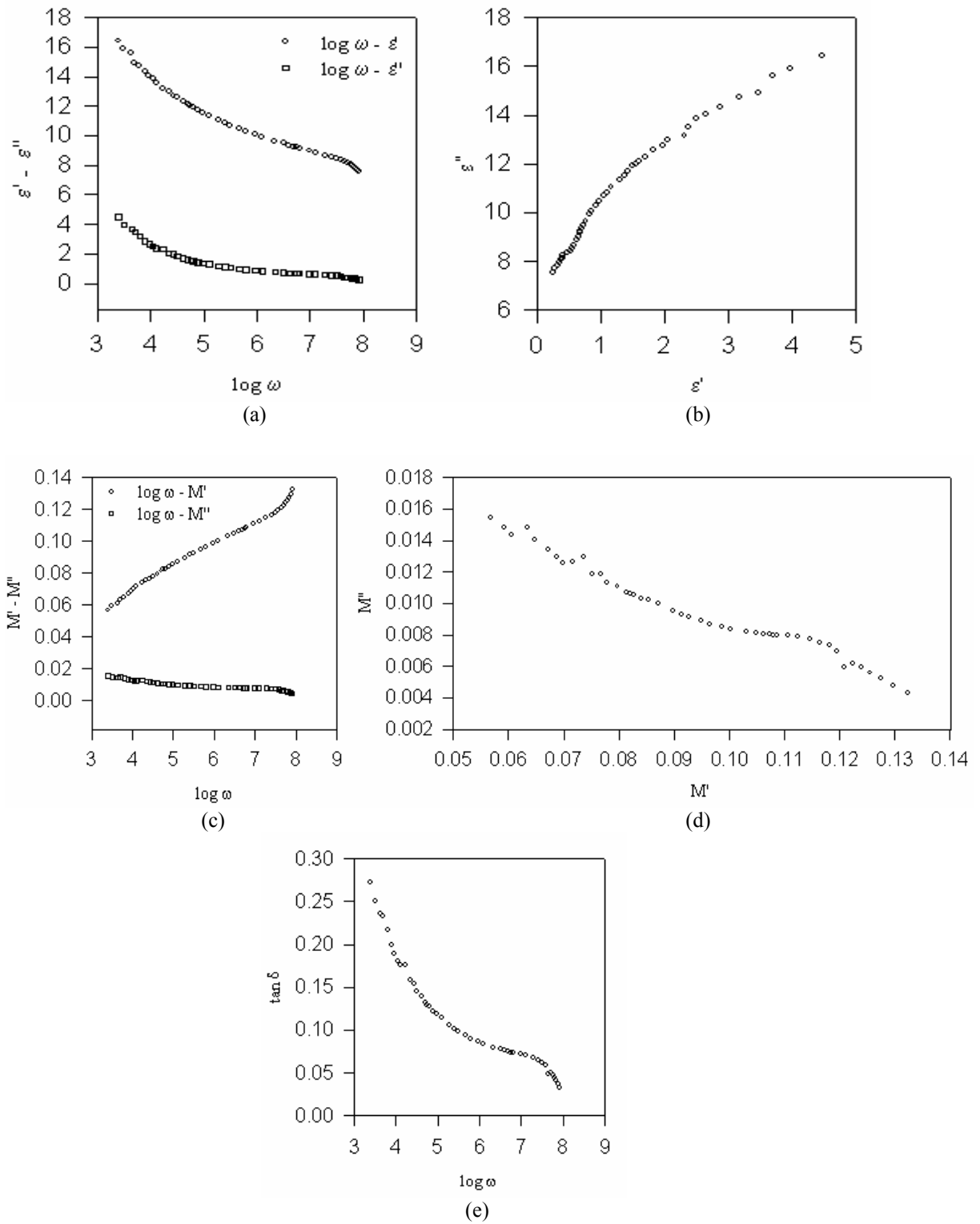
Bu çalışmada, iki farklı kil numunesi ele alınmıştır. İlk olarak incelenen orijinal karışım kil numunesi, bir önceki bölümde anlatıldığı gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

Orijinal karışım kil numunesinin, bir dış dc elektrik alan yok iken, vakum ortamında (Şek.5.1), laboratuvar ortamında 4,5 saat bekletildikten (Şek.5.2) ve 18 saat bekletildikten sonraki (Şek.5.3) dielektrik ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.

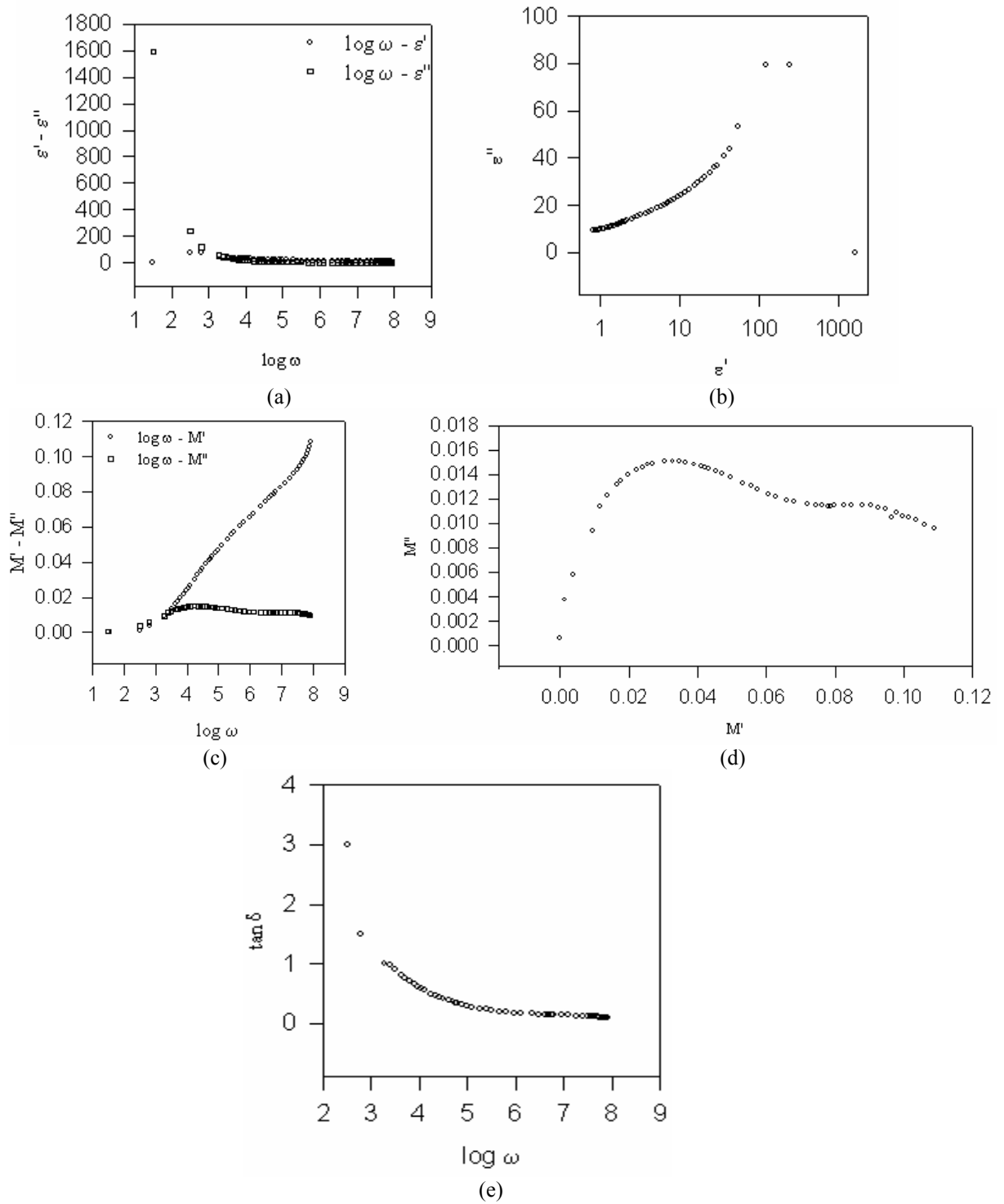
Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrilerinde (Şek.5.1b, 5.2b ve 5.3b) Cole-cole yarım dairesi tam olarak elde edilemezken, elektrik modülü formalizminde çizilen eğrilerde (Şek.5.1d, 5.2d ve 5.3d) , bu yarım daireler oldukça belirgin biçimde görünür hale gelmiştir. Bu nedenle fit işlemleri elektrik modülü formalizminde çizilen eğrilerde gerçekleştirilmiştir.

Kil mineralleri, buldukları ortamdaki nem koşullarından önemli ölçüde etkilenir. Yüzeylerinin ve katmanlar arası bölgelerinin nem kapma özellikleri nedeni ile, özellikle nötr olmayan katman yapıları killere, katmanlar arası bölgeye su alarak şişerler. Killere tutunan veya katmanlar arasına giren bu su, dielektrik geçirgenliklerinin de artmasına neden olur. Şek.5.1a, 5.2a ve 5.3a incelendiğinde, dielektrik geçirgenliğin hem reel ( $\epsilon'$ ), hem de sanal ( $\epsilon''$ ) kısımları vakumlu ortamdan nemli ortamlara doğru gidildiğinde arttığı görülmektedir. Reel kısım ( $\epsilon'$ ), vakumda iken yaklaşık 17 değerinden 1200 değerine artarken, sanal kısım ( $\epsilon''$ ), yaklaşık 5 den 6800 değerine artmıştır. Ayrıca vakumlu durumda ( $\epsilon''$ ) değeri ( $\epsilon'$ ) değerinden küçük iken, nemli durumlara gidildiğinde ( $\epsilon''$ ), ( $\epsilon'$ ) den çok daha büyük olmaktadır. Bu ise, nem arttıkça numunedeki enerji kayıplarının arttığını yani artan nemle ara yüzeysel kutuplanmanın (MWS) baskın hale geldiğini göstermektedir.

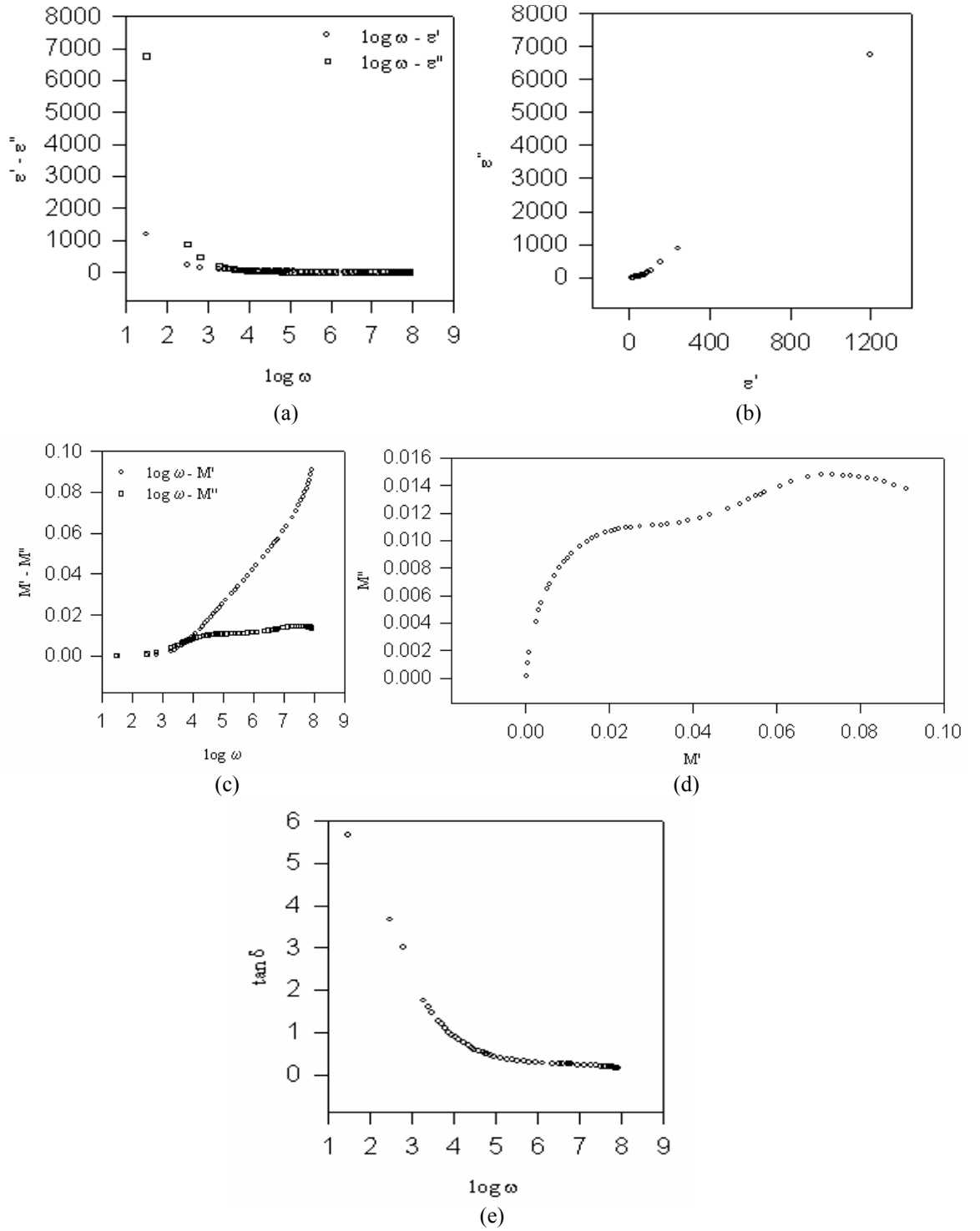
Elektrik modülü formalizminde ise,  $M'$  ve  $M''$ ,  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  nün tersleri olduğundan, bir önceki paragrafta bahsedilen sonuçlar tam tersine döner.



Şekil. 5.1. Orijinal karışım kil numunesinin dc dış elektrik alan uygulanmadığı durumdaki vakum ortamında alınan dielektrik ölçüm sonuçları: (a) Dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (b) Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrisi. (c) Geçirgenliğin elektrik modülündeki reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (d) Elektrik modülünde çizilen Cole-cole eğrisi. (e) Kayıp tanjantın  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.



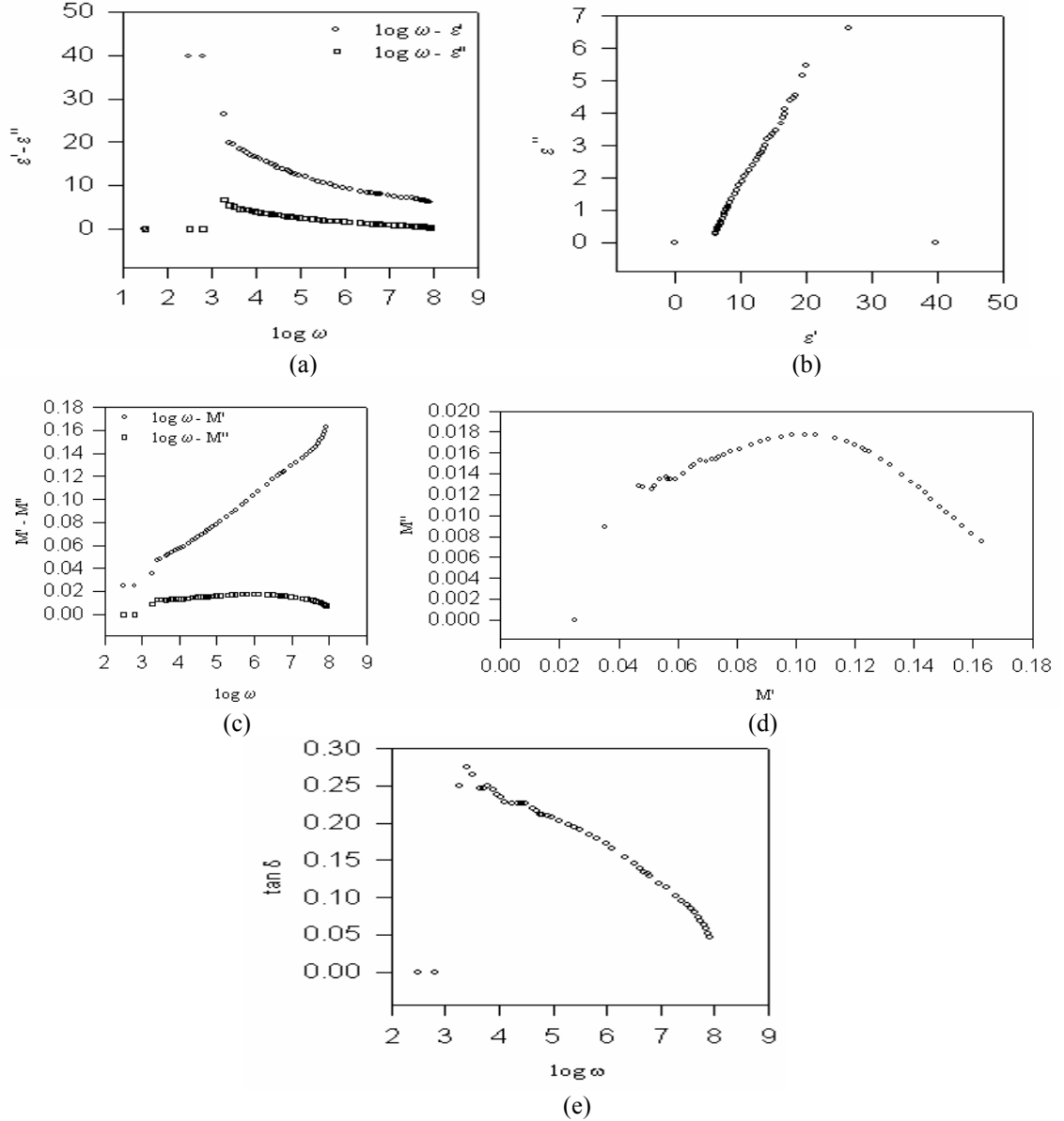
Şekil 5.2. Orijinal karışım kil numunesinin dc dış elektrik alanı uygulanmadığı durumda 4.5 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra alınan dielektrik ölçüm sonuçları : (a) Dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (b) Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrisi. (c) Geçirgenliğin elektrik modülü formalizmindeki reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (d) Elektrik modülü formalizminde çizilen Cole-cole eğrisi. (e) Kayıp tanjantın  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.



Şekil 5.3. Orijinal karışım kil numunesinin dc dış elektrik alanı uygulanmadığı durumda 18 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra alınan dielektrik ölçüm sonuçları:(a) Dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (b) Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrisi. (c) Geçirgenliğin elektrik modülü formalizmindeki reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.(d) Elektrik modülü formalizminde çizilen Cole-cole eğrisi. (e) Kayıp tanjantın  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.

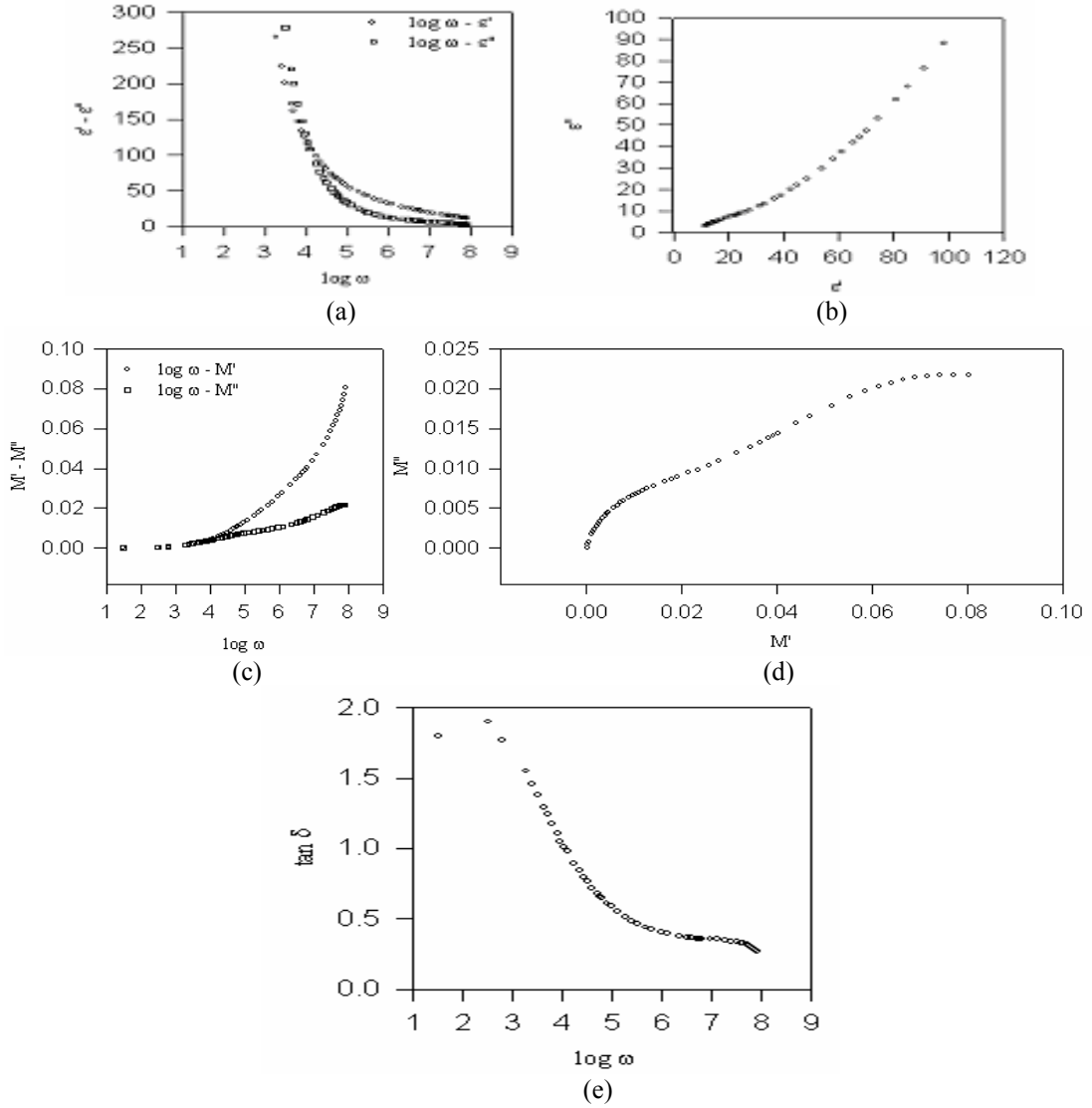
## 5.2. Ön Konsantre Kil Numunesi

Ön konsantre kil numunesinin bir dış dc elektrik alan yok iken vakum ortamında (Şekil 5.4), laboratuvar ortamında 4.5 saat bekletildikten sonra (Şekil 5.5) ve 18 saat bekletildikten sonraki (Şekil 5.6) dielektrik ölçümü sonuçları aşağıda verilmiştir.



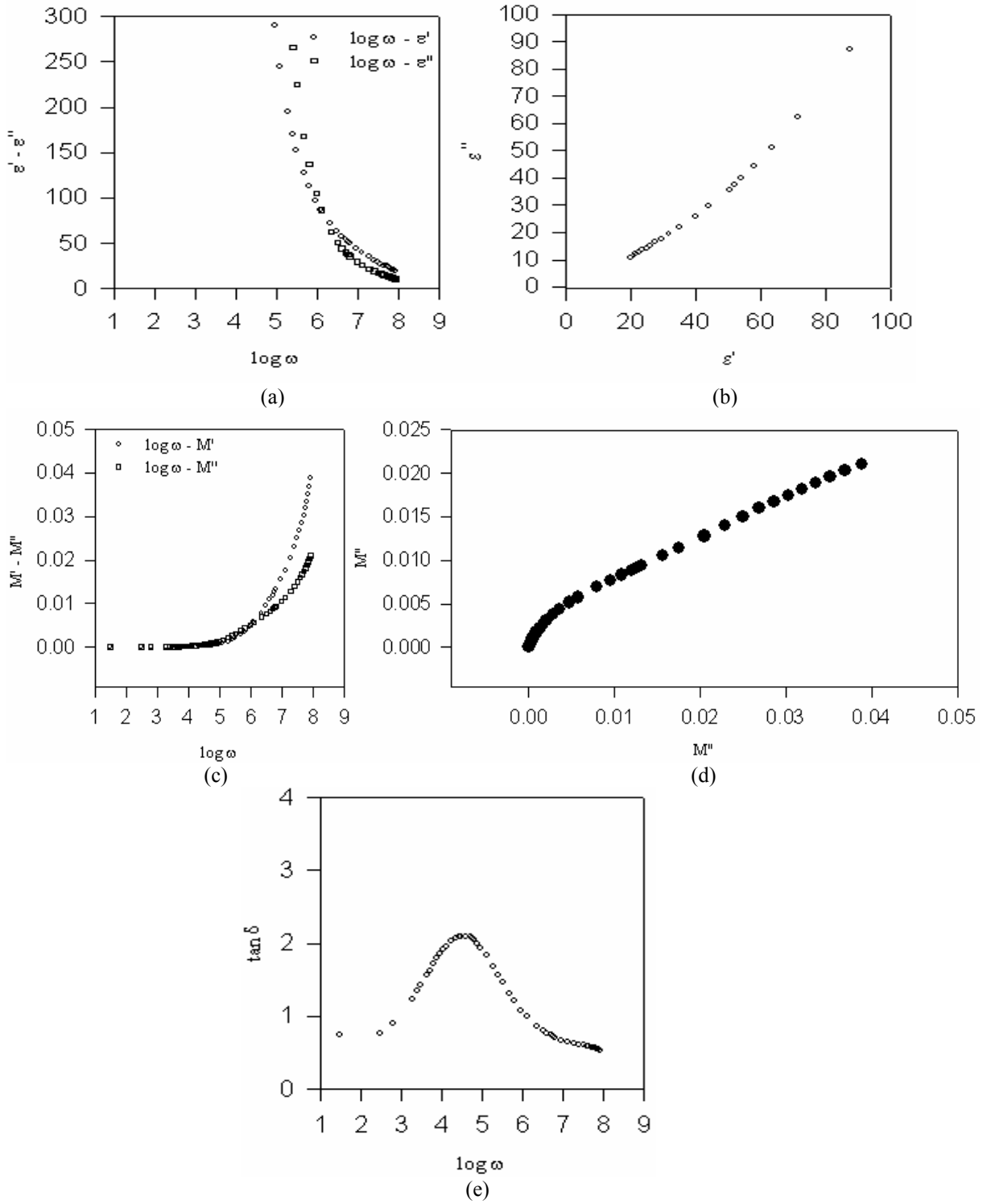
Şekil 5.4. Ön konsantre kil numunesinin dc dış elektrik alanı uygulanmadığı durumda vakum ortamında bekletildikten sonra alınan dielektrik ölçüm sonuçları : (a) Dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (b)Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrisi. (c) Geçirgenliğin elektrik modülü formalizmindeki reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (d) Elektrik modülü formalizminde çizilen Cole-cole eğrisi. (e) Kayıp tanjantın  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.

Şekil 5.4a, 5a ve 6a incelendiğinde dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının büyüklükleri, artan nemle artmıştır. Ancak ön konsantre numunesinde Fe demir bileşikleri yapıdan uzaklaştırıldığından, bu artış daha küçük değerlerde kalmıştır. Reel kısım ( $\epsilon'$ ), vakumda iken yaklaşık 40 değerinden, 290 değerine artarken, sanal kısım ( $\epsilon''$ ) yaklaşık 7 den 265 değerine çıkmıştır.



Şekil 5.5. Ön konsantre kil numunesinin dc dış elektrik alanı uygulanmadığı durumda 4.5 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra alınan dielektrik ölçüm sonuçları : (a) Dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (b) Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrisi. (c) Geçirgenliğin elektrik modülü formalizmindeki reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (d) Elektrik modülü formalizminde çizilen Cole-cole eğrisi. (e) Kayıp tanjantın  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.



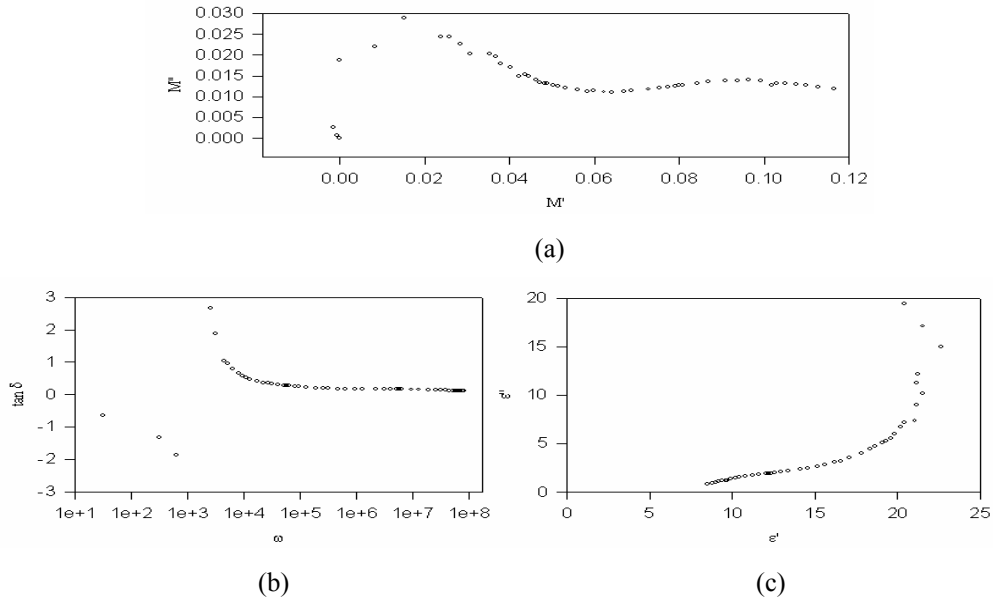


Şekil 5.6. Ön konsantre kil numunesinin dc dış elektrik alanı uygulanmadığı durumda 18 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra alınan dielektrik ölçüm sonuçları:(a) Dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi. (b) Geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrisi. (c) Geçirgenliğin elektrik modülü formalizmindeki reel ve sanal kısımlarının  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.(d) Elektrik modülü formalizminde çizilen Cole-cole eğrisi. (e) Kayıp tanjantın  $\log(\omega)$  ya göre değişimi.

### 5.3. Orijinal Karışım Kil Numunesinin Bir Dış DC Elektrik Alanın Varlığında Dielektrik Ölçümler

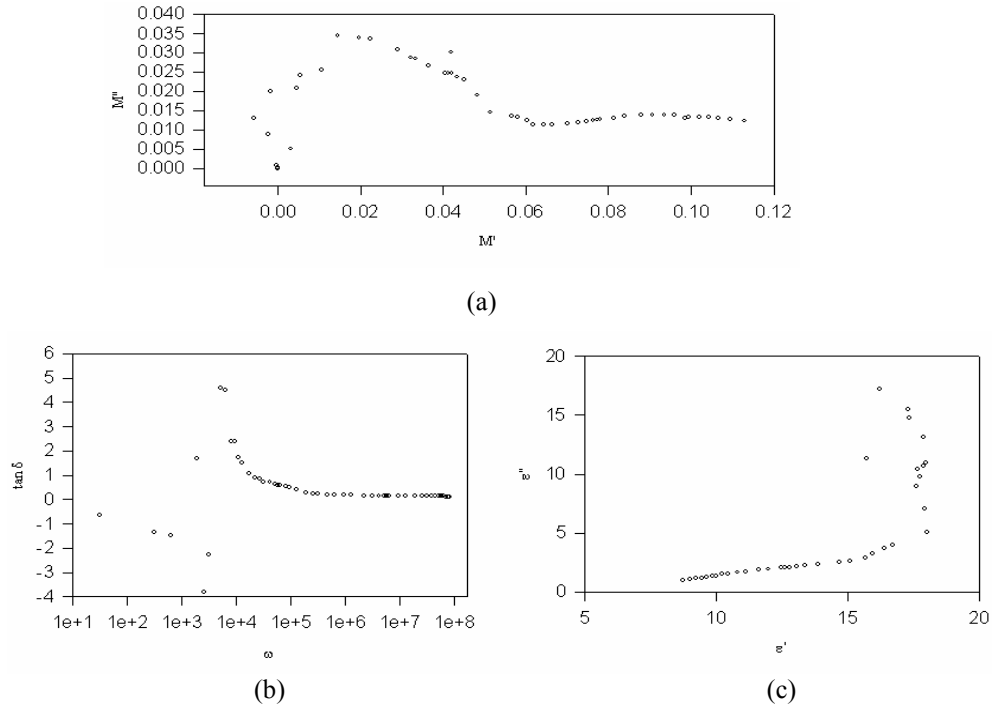
Bu aşamada ölçümler iki farklı dc elektrik alan değeri altında alınmıştır.

Bir dc dış elektrik alan uygulandığı zaman, elektrik modülü formalizmindeki cole-cole eğrilerinde [şek.5.7(a), 5.8(a), 5.9(a) ve 5.10(a)], deneysel noktaların düşük frekans bölgesine doğru çekilip, çeyrek daireyi tamamlayarak yarım daireyi daha belirgin hale getirdiği görülmektedir. Bu ise, dışarıdan uygulanan dc elektrik alanının, normal durumda düşük frekanslar bölgesinde çok etkili olan ara yüzeysel kutuplanmanın (MWS) etkisini azalttığını gösterir.

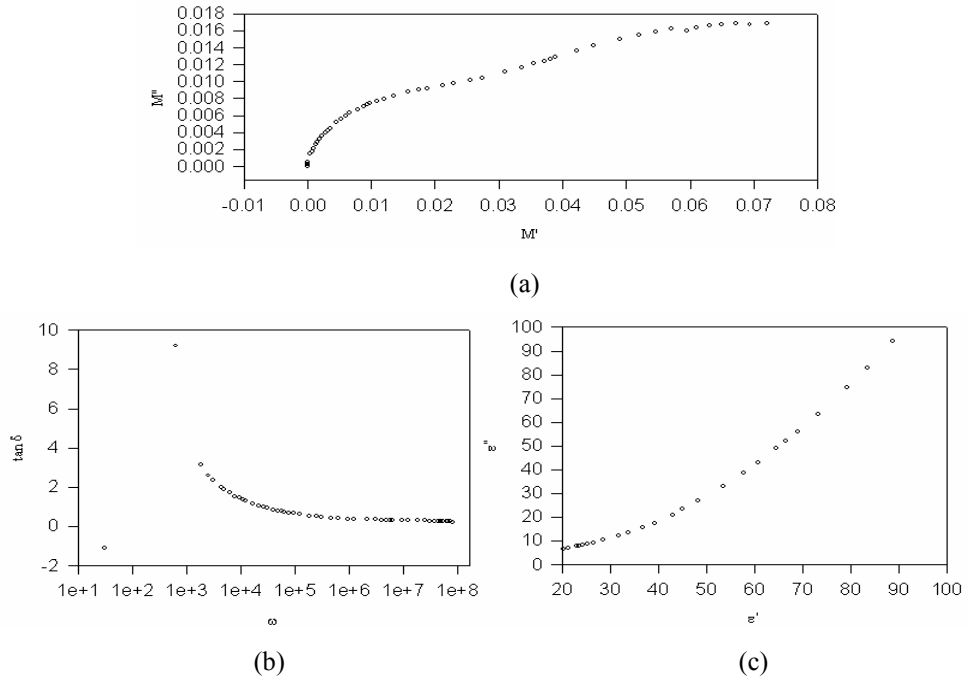


Şekil 5.7. Orijinal karışım kil numunesinin vakumlu ortamda 500V ( $E=33$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.

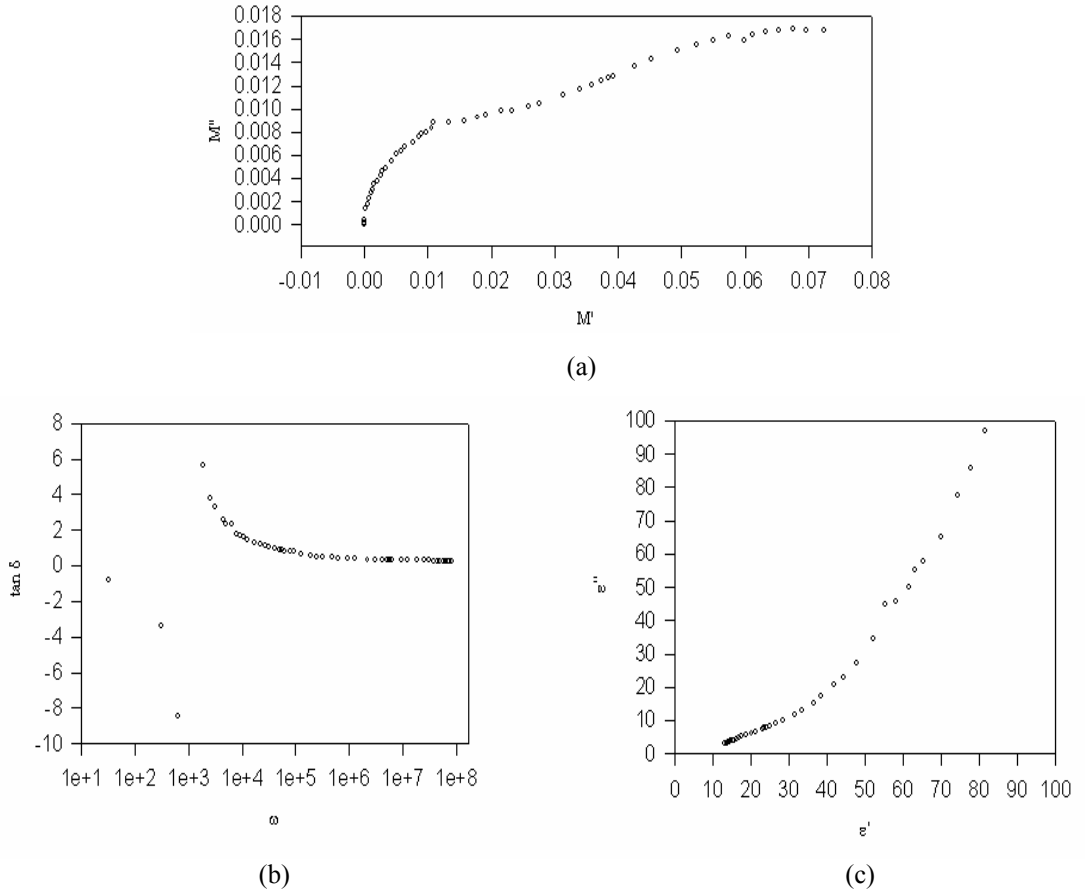
Orijinal kil karışım numunesinin geçirgenlik modunda çizilen Cole-Cole eğrileri incelendiğinde [Şek.5.7(c) ve Şek.5.8(c)], uygulanan 500 voltluk dc elektrik alanının dielektrik geçirgenliğin reel kısmını ( $\epsilon'$ ) yaklaşık 4 katına çıkardığı, sanal kısmını ( $\epsilon''$ ) ise yaklaşık değiştirmeden bıraktığı gözlenmiştir. Gerilim 2500 volta çıkarıldığı zaman ( $\epsilon'$ ) biraz azalırken ( $\epsilon''$ ) yine sabit kalmıştır. Ön konsantre numunesinde ise uygulanan dc elektrik alanı, geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarını hemen hemen hiç değiştirmemiştir. Bu durum, ön konsantre numunesinde Fe bileşiklerinin atılmasından kaynaklanabilir.



Şekil 5.8. Orijinal karışım kil numunesinin vakumlu ortamda 2500V ( $E=165$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.



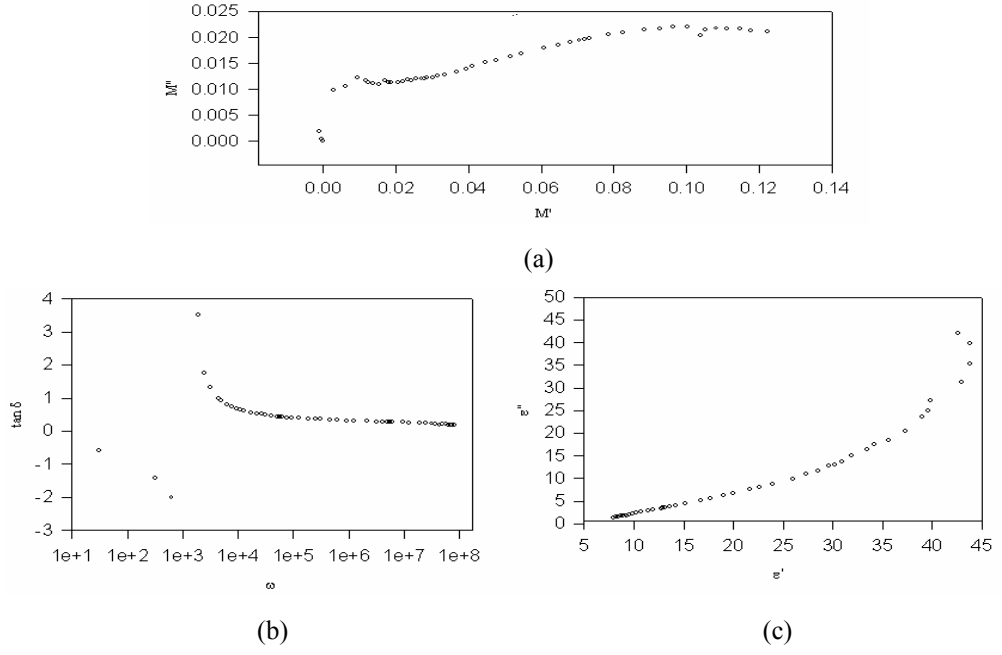
Şekil 5.9. Orijinal karışım kil numunesinin laboratuvar ortamda 24 saat bırakıldıktan sonra 500V ( $E=33$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.



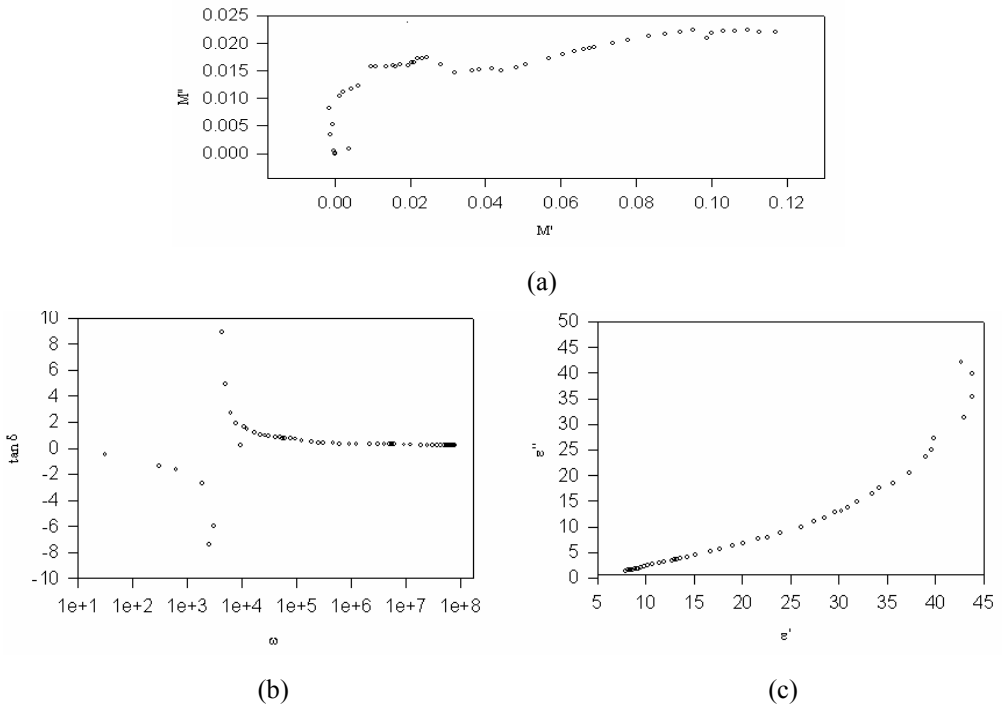
Şekil 5.10. Orijinal karışım kil numunesinin laboratuvar ortamda 24 saat bırakıldıktan sonra 2500V ( $E=165$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.

#### 5.4. Ön Konsantre Kil Numunesinin Bir Dış Elektrik Alanın Varlığında Dielektrik Ölçümleri

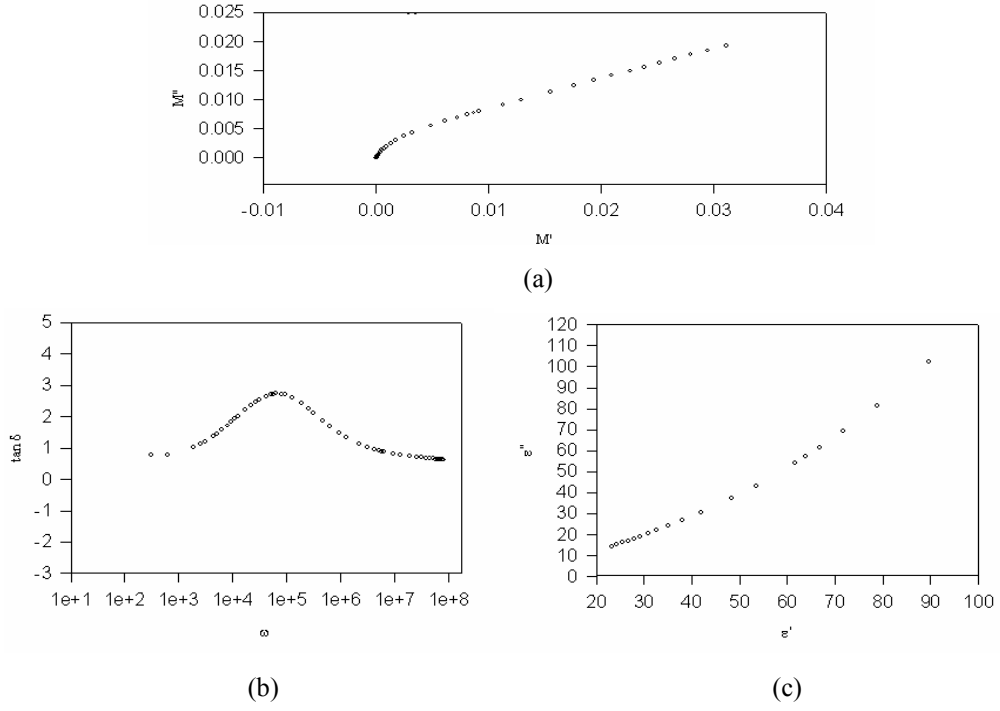
Ön konsantre kil numunesi için ölçümler, önceki numune için yapılan deneylerin aynısı olup, yine iki farklı elektrik alan uygulanarak değişim gözlenmiştir. Deney sonuçları aşağıdaki gibidir.



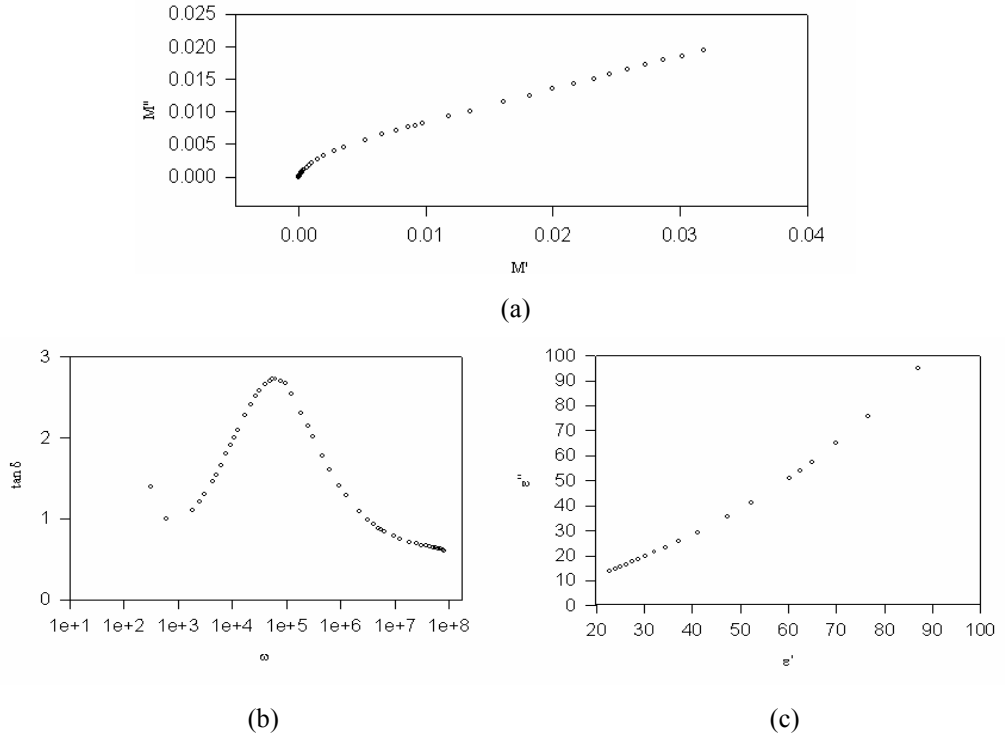
Şekil 5.11 Ön konsantre karışım kil numunesinin vakumlu ortamda 500V ( $E=33$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.



Şekil 5.12. Ön konsantre karışım kil numunesinin vakumlu ortamda 2500V ( $E=165$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.



Şekil 5.13. Ön konsantre karışım kil numunesinin laboratuvar ortamına 24 saat bırakıldıktan sonra 500V ( $E=33$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.

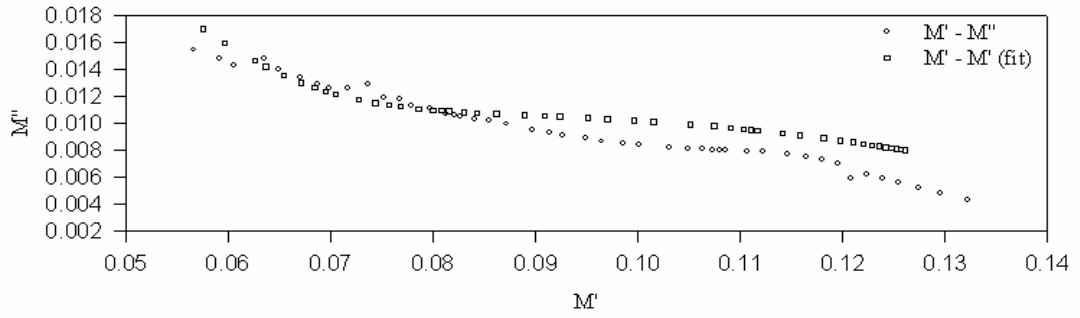


Şekil 5.14. Ön konsantre karışım kil numunesinin laboratuvar ortamına 24 saat bırakıldıktan sonra 2500V ( $E=165$  kV/m) gerilim altındaki (a) elektrik modülü Cole-Cole eğrisi, (b) Kayıp tanjant eğrisi ve (c) geçirgenlik modu Cole-Cole eğrisi değişimi.

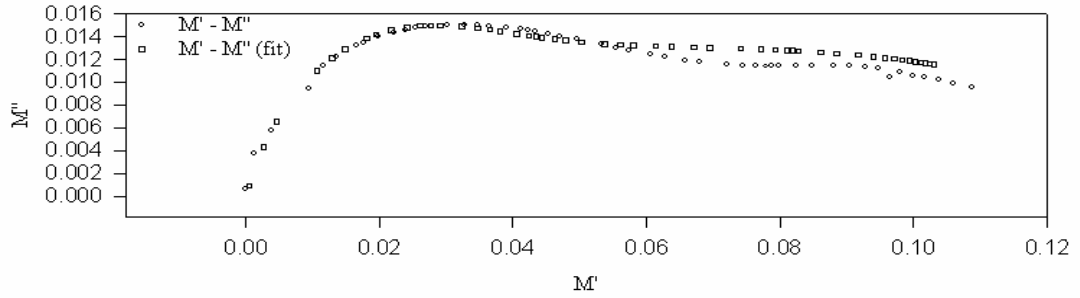
## 5.5. Dielektrik Parametrelerin Bulunması

### 5.5.1. Orijinal Karışım Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri

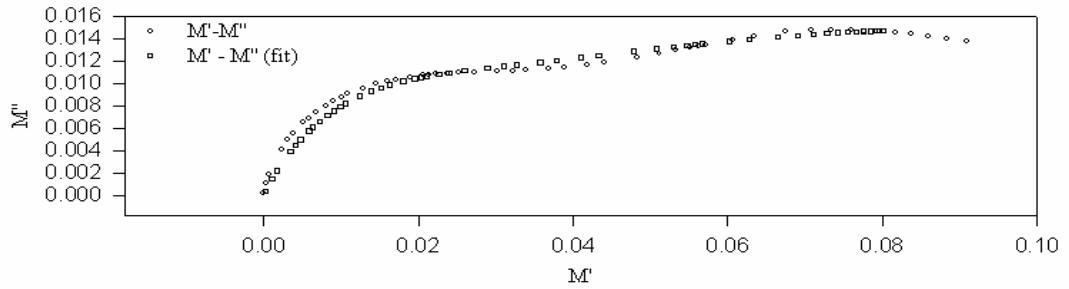
Orijinal karışım kil numunesinin, vakumda ve laboratuvar ortamında 4,5 ve 18 saat bırakıldıktan sonra elde edilen deneysel Cole-Cole eğrilerinin, sanal  $M''$  modülü ifadesi (Denk.3.25d) ile reel  $M'$  modülü ifadelerinin (Denk.3.25c) fitinden bulunan parametrelerin (Çizelge 5.1) kullanılması ile çizilen grafikler Şekil 5.15 de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.15. Orijinal karışım kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 4,5 saat ve (c) 18 saat laboratuvar ortamına bırakıldıktan sonra deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri.

Çizelge 5.1 Orijinal karışım kil numunesinin, Şekil 5.15 deki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

	VAKUM	4.5 SAAT SONRA	18 SAAT SONRA
$M_{\infty}$	0.1677	0.1624	0.1967
$M_s$	0.0456	0.0392	0.0306
$\alpha$	0.5452	0.4509	0.4452
$\gamma$	0.3552	0.3501	0.3378
$n$	0.07630	0.2799	0.3706
$\sigma(\Omega m)^{-1}$	3.476e-8	1.0216e-7	1.7586e-7
$\tau$ (s)	4.706e-3	7.8799e-5	1.5798e-5

Orijinal karışım kil numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri (Şek.5.15) incelendiğinde, nem arttıkça en güzel uyuma gidildiği görülmektedir. Ayrıca artan nemle, yüksek frekanstaki değerler çok az artarken, düşük frekans bölgesindeki değerler belirgin şekilde azalmaktadır. Bu durum, geçirgenlik moduna döndüğünde tersine döner. Yani, artan nemle yüksek frekans bölgesindeki değerler azalırken, düşük frekans bölgesindeki değerler artar. Yüksek frekans bölgesindeki kutuplanma mekanizması Yönelimli Kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise Ara Yüzeysel Kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte,  $\sigma$  iletkenliği de artacağından, Ara yüzeysel Kutuplanma baskın hale gelecektir. Bir başka deyişle, nemin artması ile dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımları, düşük frekanslarda daha büyük olmalıdır. Bu açıklamalar, çizelgedeki  $\sigma$  değerlerinin artan nemle artması ile de desteklenmektedir.

$\tau$  durulma zamanı, artan nemle yaklaşık 100 kat azalmaktadır. Bu nem etkisinin, genel olarak malzemeler üzerinde sıcaklık etkisi ile  $\tau$  nun azalması durumuna benzerdir.

Çizelge 5.1 incelendiğinde,  $n$  parametresinin artan nemle büyüdüğü görülmektedir. Bu ise, artan nemle  $\sigma$  iletkenliğinin frekans bağıllığının arttığı anlamına gelir.

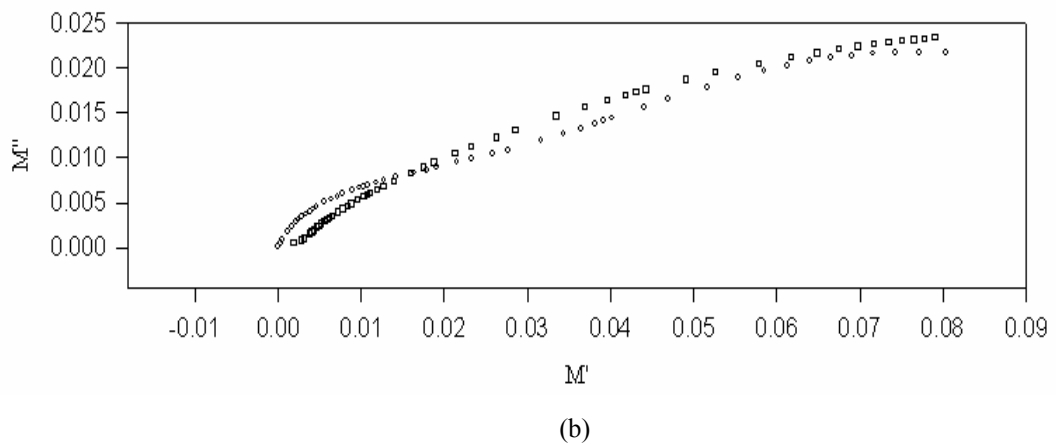
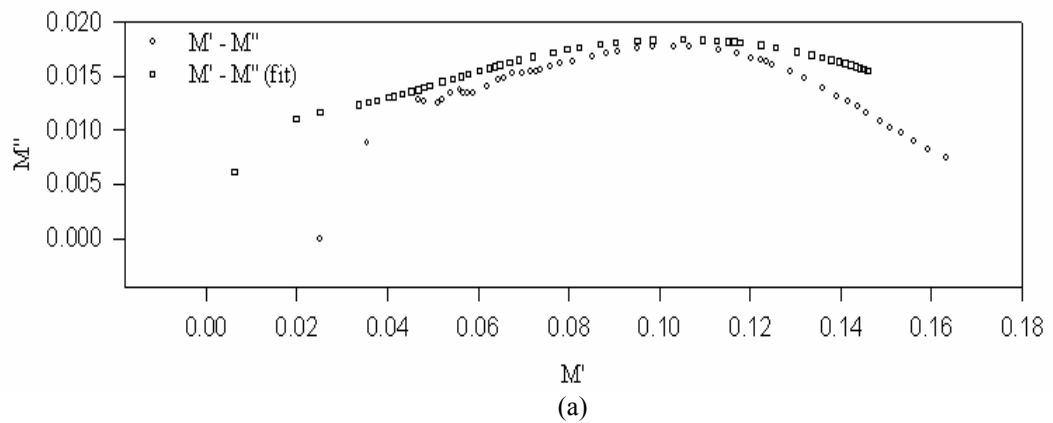
Cole-Davidson parametresi  $\gamma$  ise artan nemle hemen hemen hiç değişmemiştir. Dolayısı ile artan nem, Cole-Cole yarım dairesindeki asimetric bozulmayı etkilememektedir. Cole-Cole parametresi olan  $\alpha$  ise, artan nemle

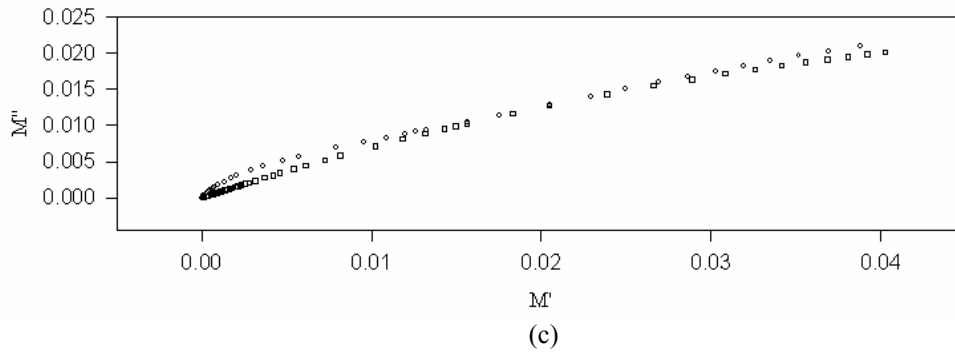


azalmaktadır. Bu ise, artan nemle Cole-Cole yarım dairesindeki simetrik bozulmanın azaldığını gösterir.

### 5.5.2. Ön Konsantre Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri

Ön konsantre kil numunesinin, vakumda ve laboratuvar ortamında 4,5 ve 18 saat bırakıldıktan sonra elde edilen deneysel Cole-Cole eğrilerinin, sanal  $M''$  modülü ifadesi (Denk.3.25d) ile reel  $M'$  modülü ifadelerinin (Denk.3.25c) fitinden bulunan parametrelerin (Çizelge 5.2) kullanılması ile çizilen grafikler Şekil 5.16 da verilmiştir.





Şekil 5.16. Ön konsantre kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 4,5 saat ve (c) 18 saat laboratuvar ortamına bırakıldıktan sonra deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri.

Ön konsantre kil numunesinin deneysel elektrik modülü Cole-Cole eğrileri (Şekil 5.16) incelendiğinde özellikle nemli durumlarda yarım dairelerinin tamamlanmadığı görülmektedir. Bu yüzden fit işlemlerinden elde edilen parametrelerde belli bir düzen yoktur. Dolayısı ile bir fiziksel yorumdan kaçınılmıştır.

Çizelge 5.2 Ön konsantre kil numunesinin, Şekil 5.16 deki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

	VAKUM	5 SAAT SONRA	18 SAAT SONRA
$M_{\infty}$	0.2086	0.2136	0.1391
$M_s$	0.03076	0.006415	0.039145
$\alpha$	0.5570	0.1948	0.4365
$\gamma$	0.5006	0.6029	0.6429
$n$	0.3650	0.7297	0.5734
$\sigma(\Omega m)^{-1}$	-7.4767e-9	-8.4575e-9	-3.20047e-7
$\tau$ (s)	1.3496e-3	5.1853e-4	5.5530e-5

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada iki önemli sonuç elde edilmiştir. Birincisi, dielektrik ölçümlerden parametrelerin bulunmasında elektrik modülü formalizminin kullanılmasının çok yararlı olduğu, ikincisi ise, numunelere empedans analizörünün kendisinin uyguladığı elektrik alana ilaveten dış bir dc elektrik alanın uygulanmasının Cole-Cole yarım dairelerinin genel olarak tamamlanmasını sağladığıdır. Bunun nedeninin araştırılması ise başka bir çalışma konusudur.

Ayrıca kil türü numunelerin dielektrik özelliklere nemin etkisinin incelenmesinin yanında, sıcaklık etkisinin de ölçümleri yapılarak da araştırılabilir ve numunenin aktivasyon enerjileri de bulunabilir.

**KAYNAKLAR**

Bartolomeo, P., Chailan, J.F. and Vernet, J.L. 2001, On the use WLF equation to study resin curing by dielectric spectroscopy, *Polymer*, vol:42, p:4385-4392

Bona, N., Ortenzi, A. and Capaccioli, S., 2001, Advances in Understanding The Relationship Between Rock Wettability And High-Frequency Dielectric Response, *Journal of Petroleum Science And Engineering*, Vol:960

Daniel, V., 1967, *Dielectric Relaxation*, Academic Press Inc., London, p.95-105

Davidson, D.W. and Cole, R.H., 1950, *Journal of Chemical Physics*, 18, p.1417

Debye, P., 1929, *Polar Molecules*, Dover Publications, Inc., Reinhold Publishing Corporation, Germany

Havriliak, S. and Negami, S., 1966, *Journal of Polymer Science*, C 14, p.99

Hewlett Packard, Dielectric Constant Measurement of Solid Materials, Application Note 380-1

Hewlett Packard, Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials, Application Note 1217-1

Hou, X., Kirkpatrick, R.J., Yu, P., Moore, D. and Kim, Y., 2000, NMR Study of Nitrate Ion Structure and Dynamics in Hydrotalcite-like Compounds, *The American Mineralogist*, Vol:85, p.173-180

McCrum, N.G., Read, B.E. and Williams, G., 1967, Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Ranko, R. And Hermann, W, 1998, The Dielectric Modulus: Relaxation Versus Retardation, *Solid States Ionics*, Vol:105, 167-173

Ruffet, C., Gueguen, Y. and Darot, M. (1991), "Complex conductivity measurements and fractal nature of porosity", *Geophysics*, vol:56, p:758-768

Solids, John Wiley, London, p.102-121

Stumm, W. & Morgan, J.J.(1981), Aquatic Chemistry, An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. A Wiley- Intescience Publication John Wiley & Sons., New York

Tareev, B., 1975, Physics of Dielectric Materials, Mir Publishers, Moscow

Tsangaris, G. M., Psarras, G. C. and Kouloumbi, N. 1998, Electric Modulus and Interfacial Polarization in Composite Polymeric Systems, Journal of Materials Science, vol.33, p.2027-2037

Yılmaz, H., 2004, Killerin Zenginleştirilmesinde Zenginleşme Oranlarının X-Işını Difraksiyon Yöntemiyle Belirlenmesi Ve Farklı Sektörlerde Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Doktora Tezi, İzmir

**EK-1**

Geçirgenlik modunda, Havriliak-Negami bağıntısına ilave edilen kuvvet yasalı iletkenlik ile tanımlanan denklem (2.15)'in elektrik modülü gösterimi türetilmiş ve gerekli olan sadeleştirmeler adım adım gösterilmiştir. Bu türetme ve sadeleştirme işlemleri Maple-7 matematik programı ile gerçekleştirilmiştir. Programın çalışmasında şu notasyon dönüşümleri yapılmış diğer notasyonlara sadık kalınmıştır:

$$\begin{array}{llll}
 \varepsilon^* \rightarrow e & \tau \rightarrow T & i \rightarrow I & M_\infty \rightarrow M_{so} \\
 \varepsilon_s \rightarrow es & \sigma \rightarrow S & \omega \rightarrow w & M' \rightarrow M1 \\
 \varepsilon_\infty \rightarrow eso & \alpha \rightarrow a & M^* \rightarrow M & M'' \rightarrow M2 \\
 \varepsilon_0 \rightarrow eo & \gamma \rightarrow g & M_s \rightarrow Ms & \phi \rightarrow F
 \end{array}$$

Denklem (2.15), bu notasyona göre şöyle yazılabilir,

$$e := eso + \frac{es - eso}{(1 + (IwT)^{(1-a)^g}} - \frac{S(Iw)^{(n-1)}}{eo} \quad (\text{Ek-1.1})$$

Burada  $eso$  ve  $es$  terimleri şu şekildedir:

$$\begin{aligned}
 eso &:= \frac{1}{Mso} \\
 es &:= \frac{1}{Ms}
 \end{aligned}$$

Elektrik modülü geçirgenliğin tersi olduğuna göre, (Ek-1.1)'in tersi alınırsa şu bağıntı elde edilir:

$$M := \frac{1}{\frac{1}{M_{so}} + \frac{\frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_{so}}}{(1 + (I w T)^{(1-a))^g} - \frac{S (I w)^{(n-1)}}{e o}}} \quad (\text{Ek-1.2})$$

Bu ifade sadeleştirilirse, aşağıdaki bağıntıya ulaşılır;

$$M := M_{so} M_s (1 + I w T (I w T)^{(-a)})^g e o w / (M_s (1 + I w T (I w T)^{(-a)})^g e o w + e o M_{so} w - e o M_s w + I S (I w)^n M_{so} M_s (1 + I w T (I w T)^{(-a)})^g) \quad (\text{Ek-1.3})$$

Denklem (Ek-1.3) ile gösterilen ifade kompleks elektrik modülüdür. Bu ifade, önce aşağıdaki gibi reel kısmına ayrılmıştır;

$$MI := \left( \frac{1}{M_{so}} + \left( \frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_{so}} \right) \frac{\left( \frac{1}{2} g \ln \left( \left( 1 + e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \right) \sin(1/2 \pi a) \right)^2 + \left( e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \right)^2 \cos(1/2 \pi a)^2 \right)}{\cos \left( g \arctan \left( e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \right) \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right)} \right) / \left( \frac{\left( \frac{1}{2} g \ln \left( \left( 1 + e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \right) \sin(1/2 \pi a) \right)^2 + \left( e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \right)^2 \cos(1/2 \pi a)^2 \right)}{\cos \left( g \arctan \left( e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \right) \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w^{-2} T^{-2}))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right)} \right)^2 \right)$$





$$\begin{aligned}
& + \left( \left( e^{\frac{1}{2} g \ln \left( 1 + e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \sin(1/2 \pi a) \right)} + \left( e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \cos(1/2 \pi a) \right)^2 \right) \right)^2 \\
& \sin \left( g \arctan \left( e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) \\
& \left. \right)^2 - \frac{S e^{((n-1) \ln(w \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right)}{e o} \right) \quad (\text{Ek-1.4})
\end{aligned}$$

Bu ifade çok uzun olduğundan şu şekilde bir sadeleştirmeye gerek görülmüştür:

$$\begin{aligned}
MI &= - \left( 1 + 2 e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim)))} \right)^{(1/2 g)} \left( \right. \\
& - Ms \left( 1 + 2 e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \right)^{(1/2 g)} e o - \cos \left( \right. \\
& \left. \left. g \arctan \left( e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) \right) e o \\
& Ms o + \cos \left( \right. \\
& \left. \left. g \arctan \left( e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) \right) e o \\
& Ms + S w \sim^{(n-1)} \cos \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Ms o Ms \\
& \left( 1 + 2 e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \right)^{(1/2 g)} \right) Ms o e o Ms \\
& / \left( -2 \cos \left( \right. \right. \\
& \left. \left. g \arctan \left( e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) \right) \\
& Ms^2 \left( 1 + 2 e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \right)^{(1/2 g)} e o^2 + 2 \\
& \cos \left( \right. \\
& \left. \left. g \arctan \left( e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w \sim) + \ln(T \sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& Ms \left( 1 + 2 e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \right)^{(1/2g)} eo^2 Mso \\
& + 2 \cos\left( g \arctan\left( e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\
& Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso \\
& \left( 1 + 2 e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \right)^{(1/2g)} - 2 \cos\left( g \arctan\left( e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\
& Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms \\
& \left( 1 + 2 e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \right)^{(1/2g)} + S^2 \\
& (w\sim^{(n-1)})^2 Mso^2 Ms^2 \\
& \left( \left( 1 + 2 e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \right)^{(1/2g)} \right)^2 + eo^2 Ms^2 \\
& - 2 eo^2 Mso Ms + eo^2 Mso^2 - 2 \sin\left( g \arctan\left( e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\
& Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso \\
& \left( 1 + 2 e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \right)^{(1/2g)} - 2 Ms^2 \\
& \left( \left( 1 + 2 e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \right)^{(1/2g)} \right)^2 eo S \\
& w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso + 2 \sin\left( g \arctan\left( e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\
& Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms
\end{aligned}$$

$$\left( 1 + 2 e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{-(2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim)))} \right)^{(1/2 g)} \\ + Ms^2 \left( \left( 1 + 2 e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + e^{-(2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim)))} \right)^{(1/2 g)} \right)^2 eo^2 \\ \left. \right)$$

(Ek-1.5)

Denklem (2.35f)'de tanımlanan  $A$  terimi burada da kullanılarak (Ek-1.5), aşağıdaki gibi daha basit bir forma getirilmiştir;

$$MI = -A^g \left( -Ms A^g eo - \cos\left( g \arctan\left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \right. \\ Ms o + \cos\left( g \arctan\left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\ Ms + S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms o Ms A^g \Big/ \left( -2 \cos\left( g \arctan\left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) \right. \\ Ms^2 A^g eo^2 + 2 \cos\left( g \arctan\left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) \\ Ms A^g eo^2 Ms o + 2 \cos\left( g \arctan\left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\ Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms o A^g - 2 \cos\left( g \arctan\left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos\left(\frac{1}{2} \pi a\right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) \right) \right) eo \\ Ms o^2 S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms A^g + S^2 (w\sim^{(n-1)})^2 Ms o^2 Ms^2 (A^g)^2 + eo^2 Ms^2 \\ \left. - 2 eo^2 Ms o Ms + eo^2 Ms o^2 - 2 \sin\left( \right) \right)$$

$$\begin{aligned}
& g \arctan \left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) eo \\
& Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \sin \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Mso A^g \\
& - 2 Ms^2 (A^g)^2 eo S w\sim^{(n-1)} \cos \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Mso + 2 \sin \left( \right. \\
& \left. g \arctan \left( e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \cos \left( \frac{1}{2} \pi a \right), 1 + e^{-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim))} \sin \left( \frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) eo \\
& \left. Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \sin \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Ms A^g + Ms^2 (A^g)^2 eo^2 \right) \quad (Ek-1.6)
\end{aligned}$$

Denklem (2.35g)'deki  $\phi$  terimini kullanırsak,  $MI$  için daha sade bir ifade elde ederiz:

$$\begin{aligned}
MI := & -A^g \left( -Ms A^g eo - \cos(g F) eo Mso + \cos(g F) eo Ms \right. \\
& \left. + S w\sim^{(n-1)} \cos \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Mso Ms A^g \right) Mso eo Ms \left/ \left( -2 \cos(g F) Ms^2 A^g eo^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + 2 \cos(g F) Ms A^g eo^2 Mso + 2 \cos(g F) eo Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \cos \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Mso A^g \right. \right. \\
& \left. \left. - 2 \cos(g F) eo Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \cos \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Ms A^g \right. \right. \\
& \left. \left. + S^2 (w\sim^{(n-1)})^2 Mso^2 Ms^2 (A^g)^2 + eo^2 Ms^2 - 2 eo^2 Mso Ms + eo^2 Mso^2 \right. \right. \\
& \left. \left. - 2 \sin(g F) eo Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \sin \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Mso A^g \right. \right. \\
& \left. \left. - 2 Ms^2 (A^g)^2 eo S w\sim^{(n-1)} \cos \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Mso \right. \right. \\
& \left. \left. + 2 \sin(g F) eo Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \sin \left( \frac{1}{2} (n-1) \pi \right) Ms A^g + Ms^2 (A^g)^2 eo^2 \right) \quad (Ek-1.7)
\end{aligned}$$

(Ek-1.3) ifadesi sanal kısmına ayrıldığında ise aşağıdaki bağıntıya ulaşılır:

$$\begin{aligned}
M2 := & -A^g \left( -Ms A^g eo - \cos(g F) eo Mso + \cos(g F) eo Ms \right. \\
& + S w^{\sim(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso Ms A^g \left. \right) Mso eo Ms \Big/ \left( -2 \cos(g F) Ms^2 A^g eo^2 \right. \\
& + 2 \cos(g F) Ms A^g eo^2 Mso + 2 \cos(g F) eo Ms^2 S w^{\sim(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso A^g \\
& - 2 \cos(g F) eo Mso^2 S w^{\sim(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms A^g \\
& + S^2 (w^{\sim(n-1)})^2 Mso^2 Ms^2 (A^g)^2 + eo^2 Ms^2 - 2 eo^2 Mso Ms + eo^2 Mso^2 \\
& - 2 \sin(g F) eo Ms^2 S w^{\sim(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso A^g \\
& - 2 Ms^2 (A^g)^2 eo S w^{\sim(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso \\
& \left. + 2 \sin(g F) eo Mso^2 S w^{\sim(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms A^g + Ms^2 (A^g)^2 eo^2 \right)
\end{aligned}$$

(Ek-1.8)

Bu ifade daha da sadeleştirilirse, bağıntının payı için;

$$\begin{aligned}
pay := & - \left( -Ms A^g eo - \cos(g F) eo Mso + \cos(g F) eo Ms \right. \\
& \left. + S w^{\sim(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso Ms A^g \right) Mso Ms / eo
\end{aligned}$$

(Ek-1.9)

ifadesi bulunur. Paydası içinse şu ifadeye ulaşılır:

$$\begin{aligned}
terikpayda := & \left( -2 \cdot \cos \left( g \arctan \left( \frac{(w T)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327 a)}{1. + (w T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a)} \right) \right) \right) Ms^2 \\
& \left( \sqrt{1. + 2. (w T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (w T)^{(2.-2.a)} } \right)^g eo^2 + 2. \\
& \cos \left( g \arctan \left( \frac{(w T)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327 a)}{1. + (w T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a)} \right) \right) Ms \\
& \left( \sqrt{1. + 2. (w T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (w T)^{(2.-2.a)} } \right)^g eo^2 Mso + 2. \\
& \cos \left( g \arctan \left( \frac{(w T)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327 a)}{1. + (w T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a)} \right) \right) eo Ms^2 S w^{\sim(n-1.)} \\
& \cos(1.570796327 n - 1.570796327) Mso
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g - 2. \\
& \cos \left( g \arctan \left( \frac{(wT)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327 a)}{1 + (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a)} \right) \right) eo Mso^2 S w^{(n-1.)} \\
& \cos(1.570796327 n - 1.570796327) Ms \\
& \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g + S^2 (w^{(n-1.)})^2 Mso^2 \\
& Ms^2 \left( \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g \right)^2 + eo^2 Ms^2 \\
& - 2 \cdot eo^2 Mso Ms + eo^2 Mso^2 - 2. \\
& \sin \left( g \arctan \left( \frac{(wT)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327 a)}{1 + (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a)} \right) \right) eo Ms^2 S w^{(n-1.)} \\
& \sin(1.570796327 n - 1.570796327) Mso \\
& \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g - 2. Ms^2 \\
& \left( \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g \right)^2 eo S w^{(n-1.)} \\
& \cos(1.570796327 n - 1.570796327) Mso + 2. \\
& \sin \left( g \arctan \left( \frac{(wT)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327 a)}{1 + (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a)} \right) \right) eo Mso^2 S w^{(n-1.)} \\
& \sin(1.570796327 n - 1.570796327) Ms \\
& \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g \\
& + Ms^2 \left( \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g \right)^2 eo^2 \Big/ \left( \right. \\
& \left. \left( \sqrt{1 + 2 \cdot (wT)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327 a) + (wT)^{(2.-2.a)} } \right)^g eo^2 \right)
\end{aligned}$$

(Ek-1.10)

## **ÖZGEÇMİŞ**

1981 yılında İstanbul'da doğdum. İlkokul ve ortaokulu İstanbul'da okudum. Lise öğrenimime Konya'da Erbil Kuru Lisesi'nde devam ettim. 1999 yılında Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünü kazandım ve 2003 yılında bu bölümden mezun oldum.

Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik bölümünde Tezli ve Tezsiz olmak üzere iki Yüksek Lisans öğrenimime başladım.

2004 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik bölümü Tezsiz Yüksek Lisans' tan mezun oldum.

Halen Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Tezli Yüksek Lisans öğrenimime devam etmekteyim.

Şeyma YÜCEYURT ÇELİK