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

# FARKLI MONTMORİLLONİT KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE NEMİN ETKİSİ

Selçuk ZENGİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
Konya- 2007

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

# FARKLI MONTMORİLLONİT KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE NEMİN ETKİSİ

Selçuk ZENGİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
Konya- 2007

Bu tez 14/02/ 2007 tarihinde oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

| | |
|---|---|
| Prof. Dr. Ülfet ATAV | Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ |
| Başkan | Üye (Danışman) |

Yrd. Doç. Dr. Mehmet TAŞER

Üye

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

## FARKLI MONTMORİLLONİT KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE NEMİN ETKİSİ

Selçuk ZENGİN

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

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

**2007, 98 sayfa**

**Jüri : Prof. Dr. Ülfet ATAV ,**
**Yrd.Doç.Dr. Mehmet TAŞER**
**Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ**

Doğada bulunan maddelerdeki elektrik yüklerinin uygulan dış elektrik alana tepkileri, maddelerin "iletken", "yarıiletken" veya "dielektrik" olarak sınıflandırılmasını belirler. Bu tür bir sınıflandırmaya bağlı kalarak, elektriksel karakteristiklerinin doğru olarak ölçülmesi, genel anlamda malzemenin ticari kullanım alanlarının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, daha önce XRD ve Kimyasal analizleri yapılan Ordu yöresine ait beş farklı kil numunesi kullanılmıştır. Bu numunelerde nemin dielektrik özellikler üzerine etkisini incelemek amacı ile önce ağırlıkça nem tutma kapasiteleri ölçülmüştür. Daha sonra numunelerin her nem durumunda dielektrik ölçümleri, paralel plakalı kondansatör metodu ile 5Hz - 13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kil numunelerinin dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişimler ve frekansa bağlı olarak, etkin kutuplanma mekanizmaları incelenmiştir.

Ölçümler sonucunda, kil numunelerinin tuttukları nem oranlarına bağlı olarak değişen dielektrik parametreler, Kompleks Elektrik Modülü formalizmi kullanılarak teorik ifadelerin deneysel değerlere fit edilmesi ile hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Montrorillonit, Nem tutma kapasitesi, dielektrik geçirgenlik, dielektrik kayıp, kutuplanma mekanizmaları.

## ABSTRACT

**M. S. Thesis**

**THE EFFECT OF HUMIDITY ON THE DIELECTRIC PROPERTIES OF DIFFERENT MONTMORILLONITE CLAY SAMPLES**

Selçuk ZENGİN

**Selcuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Physics**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ**

**2007, 98 Pages**

**Jury : Prof.Dr. Ülfet ATAV**
**Assist. Prof. Dr. Mehmet TAŞER**
**Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ**

The responce of electrical charges in the materials available in nature against any external electrical field determine their classification scheme such as “conductor” , “semiconductor” or “dielectric”. By considering this classification, it is very impotant to measure correctly of electrical properties of the materials in their practical usage.

In this study, firstly humidity holding capacities of five different clay saples picked from the region of Ordu province. Later, dielectrical measurements on samples heve been performed using parallel plate capacitor method by means of HP 4192A LF Impedance Analyser having a frequency range of 5 Hz- 13 MHz, in every humidity condition. In next stage, the changes occuring in the electrical properties and effective polarization mechanisms of samples are investigated depending on the frequency.

Finally, dielectrical parameter changes of samples depending on the humidity amounts they hold heve been calculated bye fitting the experimental data to the theoretical expressions based on the camplex electric modulus formalism.


**Key Words:** Montmorillonit, Humidity holding capacity, dielectrical permittivity, dielectric loss, polarization mechanisms.

## ÖNSÖZ

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

Çalışmada, Ordu yöresinden alınan beş farklı kil numunesi için nemin dielektrik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

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, Sayın Hocam, **Yrd. Doç. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ 'ye** teşekkür ederim.

Numunelerin temini konusunda yardımcı olan Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın **Prof. Dr. Muazzez Çelik Karakaya 'ya** teşekkür ederim.

Tez hazırlama aşamasında karşılaştığım teorik problemlerin çözümünde yardımına başvurduğum değerli hocam **Doç. Dr. Haluk ŞAFAK** ve **Prof. Dr. Ülfet ATAV'a** ve Selçuk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümünün tüm diğer elemanlarına da teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca bana maddi ve manevi açıdan sonuna kadar destek olan **aileme** ve **arkadaşlarıma** sonsuz şükranlarımı sunarım.

Selçuk ZENGİN

KONYA–2007

## KULLANILAN SİMGELER

| | |
|---|---|
| OGB | Ordu Göbü Beyaz |
| OÜB | Ordu Ünye Beyaz |
| OÜP | Ordu Ünye Pembe |
| OUM | Ordu Ulubey Mavi |
| OUS | Ordu Ulubey Sarı |
| $\alpha$ | Kutuplanabilirlik |
| C | Kapasitans |
| $\delta$ | Kompleks dielektrik geçirgenlikle reel bileşeni arasındaki açı |
| $\vec{E}$ | Elektrik alanı |
| $\varepsilon_0$ | Uzayın elektriksel geçirgenliği |
| $\varepsilon$ | Dielektrik geçirgenlik |
| $\varepsilon'$ | Dielektrik geçirgenliğin reel kısmı |
| $\varepsilon''$ | Dielektrik geçirgenliğin sanal kısmı |
| $\varepsilon_\infty$ | Dielektrik geçirgenliğin $\omega \to \infty$ 'daki değeri |
| $\varepsilon_0$ | Dielektrik geçirgenliğin $\omega \to 0$ 'daki değeri |
| $f$ | Frekans |
| $\varphi$ | Kompleks dielektrik geçirgenlikle sanal bileşeni arasındaki açı |
| $\vec{p}$ | Elektrik dipol momenti |
| $\vec{P}$ | Kutuplanma vektörü |
| $\sigma$ | Elektriksel iletkenlik |
| $t$ | Zaman |
| $\tau$ | Durulma zamanı |
| $\omega$ | Açısal frekans |

## İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... iii

**ABSTRACT** ..... iv

**ÖNSÖZ** ..... v

**KULLANILAN SİMGELER** ..... vi

**1. GİRİŞ** ..... 1

**2. MATERYAL** ..... 4

**2.1** Kilin Yapısı ..... 4
**2.2** Kilde Bulunan Su Molekülleri ..... 5
**2.3** Kilin Kullanım Alanları ..... 8
**2.4** Çalışmada Kullanılan Numunelerin Eldesi ..... 10

**3. METOD** ..... 11

**3.1** Dielektrik Teori ..... 11
**3.1.1** Temel kavramlar ..... 11
**3.2** Kutuplanma Mekanizmaları ..... 17
**3.2.1** Kutuplanabilirlik ..... 17
**3.2.2** Kutuplanma Mekanizmaları ..... 19
**3.2.2.1** Elektronik Kutuplanma ..... 20
**3.2.2.2** Atomik Kutuplanma ..... 21
**3.2.2.3** Yönelimli Kutuplanma ..... 22
**3.2.2.4** Ara Yüzeysel Kutuplanma ..... 23
**3.3** Kutuplanma Mekanizmaları İçin Tanımlanan Eşitlikler ..... 25
**3.3.1** Yönelimli Kutuplanma ..... 25
**3.3.1.1** Debye Denklemi ..... 26
**3.3.1.2** Cole-Cole Denklemi ..... 26
**3.3.1.3** Cole-Davidson Denklemi ..... 29
**3.3.1.4** Havriliak-Negami Denklemi ..... 30
**3.4** Elektrik Modülü Formalizmi ..... 32
**3.4.1** Debye Denklemi ..... 33
**3.4.2** Cole-Cole Denklemi ..... 34
**3.4.3** Cole-Davidson Denklemi ..... 34
**3.4.4** Havriliak-Negami Denklemi ..... 35
**3.4.5** MWS Eşitlikleri ..... 35

**4. DENEY** ..... 38

**4.1** Nem Ölçümleri ..... 38
**4.1.1** Numunelerin Hazırlanması ..... 38
**4.1.2** Numunelerin Ağırlıkça Yüzde Nem Ölçümleri ..... 38
**4.2** Dielektrik Ölçümler ..... 39

**5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI**……..... 42

**5.1** Numunelerin XRD ve Kimyasal Analiz Sonuçları..... 42
**5.2** Numunelerin Nem Ölçüm sonuçları ……..... 46
**5.3** Numunelerin Dielektrik Ölçüm sonuçları..... 49
**5.4** Numunelerin Dielektrik Parametre Sonuçları..... 65
**5.4.1** OGB Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları……..... 65
**5.4.2** OÜB Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları……..... 66
**5.4.3** OÜP Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları……..... 68
**5.4.4** OUM Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları……..... 69
**5.4.5** OUS Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları……..... 70
**5.6** Bütün Numuneler için Dielektrik Parametrelerin Ortak Değerlendirilmesi..... 82

**6. SONUÇ VE ÖNERİLER**..... 83

**KAYNAKLAR**……..... 85

**EKLER**..... 89

**ÖZGEÇMİŞ**……..... 98

# 1. GİRİŞ

Dielektrik malzemeleri oluşturan atomların en dış yörünge kabuğunda, iletken malzemelerinkilerde olduğu gibi serbestçe dolaşarak akım taşıyabilen 'değerlik' ('valens') elektronları yoktur. Dielektrik malzemeler bu yüzden elektriği iletmezler. Fakat elektrik alanının varlığında, atom veya molekülleri kutuplaşır. Çünkü; atomların artı yüklü çekirdekleri alan yönünde itilirken, eksi yüklü elektron bulutları alanın tersi yönde çekilmektedir ve sonuç olarak, atom veya moleküller, birbirine yakın konumlandırılmış artı ve eksi yük çiftlerine dönüşürler. Elektrik alanı yönünde dizilen bu çiftlerin, birbirini izleyen artı ve eksileri, malzeme içerisinde birbirlerini nötrlerken, malzemenin dış yüzeyinde kalanlar, 'uyarılmış' (indüklenmiş) birer yük tabakası oluştururlar.

Dielektrik malzemeler veya elektriksel olarak yalıtkan malzemeler, elektrostatik alanlara uzun süre karşı koyabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, üzerine doğru akım (DC-gerilim) uygulandığı zaman, elektrik akımının geçmesine karşı çok büyük direnç gösterirler, fakat uygulamalarda genellikle çok zayıf bir akım (sızıntı akımı) taşıdıkları saptanmıştır. Yani yalıtkan malzemelerin özdirenci çok büyük olsa da yine de sonlu bir değerdir. Yalıtkan malzemenin kalitesi, malzemenin özdirencinin büyük değerlerde olmasına bağlıdır.

Bu malzemeler için, malzemedeki sabit yüklerin düzenlenmesinin pertürbasyonundan kaynaklanan bir kutuplanma durumunun oluşması, bu malzemelerin bir dış elektrik alana maruz kalmaları halindeki en önemli sonuçtur, ki buradaki sabit yükler genellikle madde içinde ciddi bir yük akışı olmaksızın meydana gelir. Bugünkü kavramlara göre kutuplanma olayı, bir dielektriğin elektriksel olarak yüklü parçacıklarının uzay içindeki düzenlenimlerinin değişmesini özetler. Yani, dielektrik bu özelliğiyle bir elektrik momenti kazanır[Taraev 1975].

Dielektriklerin kutuplanması fikri ilk defa 1930'lu yıllarda Faraday tarafından ileri sürülmüştür.

Dielektriğin bu özelliği önemlidir, çünkü oldukça yavaş değişen kutuplanma veya çok düşük seviyeli iletim yüzünden, bir dış elektrik alana karşı tepkileri hakkında kesin bir şey söylemek mümkün olmayan malzemeler vardır [Jonscher 1983]. Malzemelerin büyük bir kısmı için bu iki "elektrik iletimi" ve "dielektrik kutuplanma" olaylarını ayırt etmek mümkün değildir.

Her malzemenin dielektrik özelliklerine bağlı olan özgün elektriksel karakteristikleri vardır. 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 geçirgenlik($\varepsilon$), dielektrik alınganlık($\kappa_e$), kırılma indisi(n), molekül kütlesi(M) gibi büyüklükler dielektriklerin makroskobik, molekülün kutuplanabilirliği($\alpha$), birim hacmindeki molekül sayısı (N) gibi büyüklükler ise mikroskobik büyüklüklerdir. Dielektriklerin çalışılmasındaki temel amaç, bu iki büyüklük grubu arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Bu alandaki ilk ve en önemli çalışmalar Alman fizikçi R.Clausius, İtalyan fizikçi O.Mosotti, Hollandalı fizikçi H.Lorentz ve Danimarkalı fizikçi L.Lorenz tarafından yapılmıştır[Tareev 1975].

Bütün madde sınıflarının dielektrik davranışını ele alan tam bir teori elde etmek çok zor bir iş olup, asla mümkün gözükmemektedir. Bununla birlikte, dielektrikler için basit kabuller ve teorik modeller oluşturulmuştur. Bu modeller kullanılarak, teori, deneysel olarak test edilebilen parametrelerin belli özelliklerini veya değişmelerini tahmin eder. Deneysel sonuçların, tahminlere olan yakınlık derecesi, modelin başarısının bir ölçüsüdür. Malzemenin moleküler ve atomik yapısına dayalı teorik model bir kere başarılı olduktan sonra, yeni malzemeler için hangi araştırmanın yapılabileceği ve aynı zamanda dielektriğin farklı elektriksel

koşullar altındaki olası davranışını belirlemekte hangi araştırmanın kullanılabileceği bilgisi elde edilmiş olur.

Diğer taraftan insan oğlunun doğaya egemen olma çabalarının, yeni malzemelerin üretimindeki gelişmelerin paralelinde yeryüzünde en yaygın malzemelerden biri olan kilin doğrudan ve dolaylı kullanımı her geçen gün artarak devam etmektedir..Buna bağlı olarak kil tanımı içerisinde yer alan minerallerin özelliklerinin belirlenmesi önem kazanmaktadır. Kil terimi, bir kristal yapıya sahip, kimyasal bileşimi sulu alüminyum veya magnezyum silikat olan, tane boyu $2\,\mu m$ den küçük ve plastik özelliklere sahip doğal malzemeler için kullanılabilir.[Çelik Karakaya, 2006]. Killer gözenekli yapıları nedeniyle, katmanları arasında ve yüzeylerinde su moleküllerini bulundurabilirler.

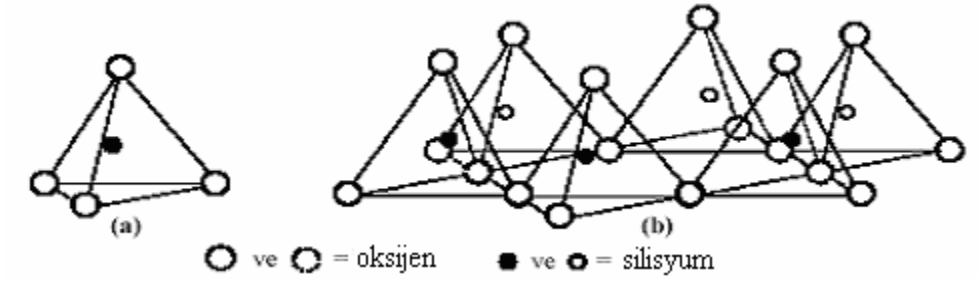
Bu çalışmada Ordu İli Göbü, Uubey ve Ünye yöresinden temin edilen 5 farklı Montrorillonit kil numunelerinin dielektrik özellikleri üzerine nemin etkisi incelenmiştir. Su moleküllerinin miktarı ile maddenin dielektriksel davranışı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla, belirlenmiş zaman aralıklarında dielektrik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

# 2. MATERYAL

## 2.1 Kilin Yapısı

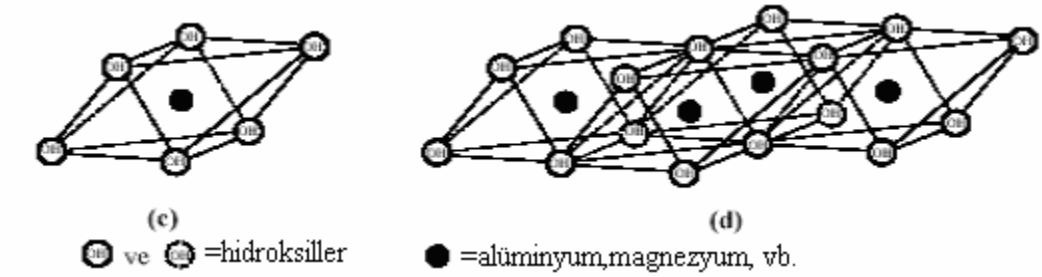
Kil mineralleri, alterasyon ürünü olduklarından aynı yatak içerisinde dahi değişken kimyasal ve mineralojik kompozisyonlara sahip olabilir ve genellikle kalsit, kuvars, kristobalit, feldspat, dolomit, hematit, manyetit, rutil ve opal-CT gibi safsızlıklar içerirler [Miles,1994].

Killer, ince taneli (0.2-2μm) 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.



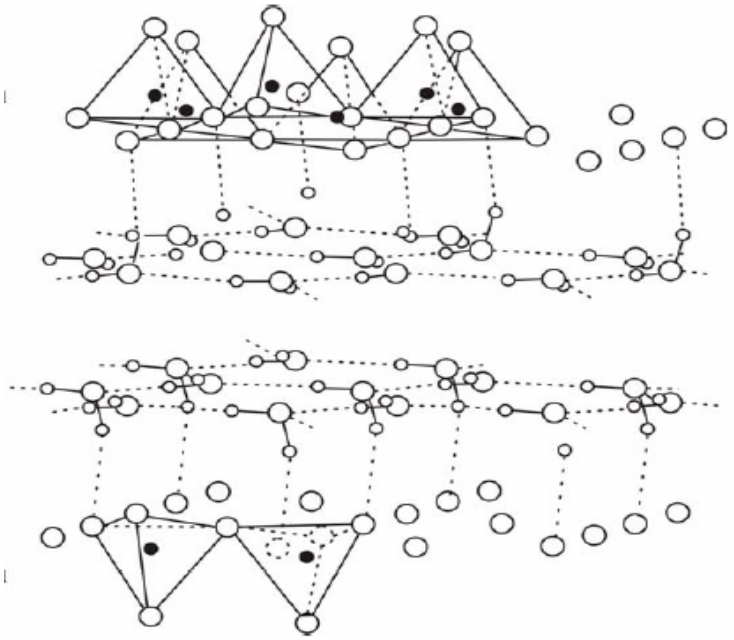

Şekil 2.2. Killerin (c) tek bir oktahedral birimi, (d) oktahedral birimlerinin oluşturduğu oktahedral tabaka [ Grim, 1968]

Kil mineralleri filosilikat ailesine aittir. Filosilikat 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.

## 2.2 Kilde Bulunan Su Molekülleri

Suyun varlığında killerin davranışı oldukça karmaşık ve önemlidir. Öyle ki ortamdaki suyun bolluğu dahi bu davranışları büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle kil-su etkileşimlerini ortamdaki suyun bolluğuna bağlı olarak incelemek anlamlı olur.

• **Nispeten düşük su içeriğine sahip killerde;** yani kuruya yakın durumda kil taneleri veya değişebilen katyonlar tarafından suyun adsorplandığı durumdur. Kilin su ile teması halinde, tetrahedral tabakanın siloksan yüzeylerinin hidratasyonu, suyun protonu ile yüzey oksijeni arasında kurulan hidrojen bağı ile açıklanırken (Şekil 3,14); oktahedral tabakanın gibsit yüzeylerinin hidratasyonu ise yüzeyin hidroksil protonu ve suyun oksijen atomu arasında kurulan hidrojen bağı ile açıklanır




Şekil 3.14. Suyun tetrahedral tabakaya hidrojenler aracılığıyla bağlanmasının şematik gösterimi

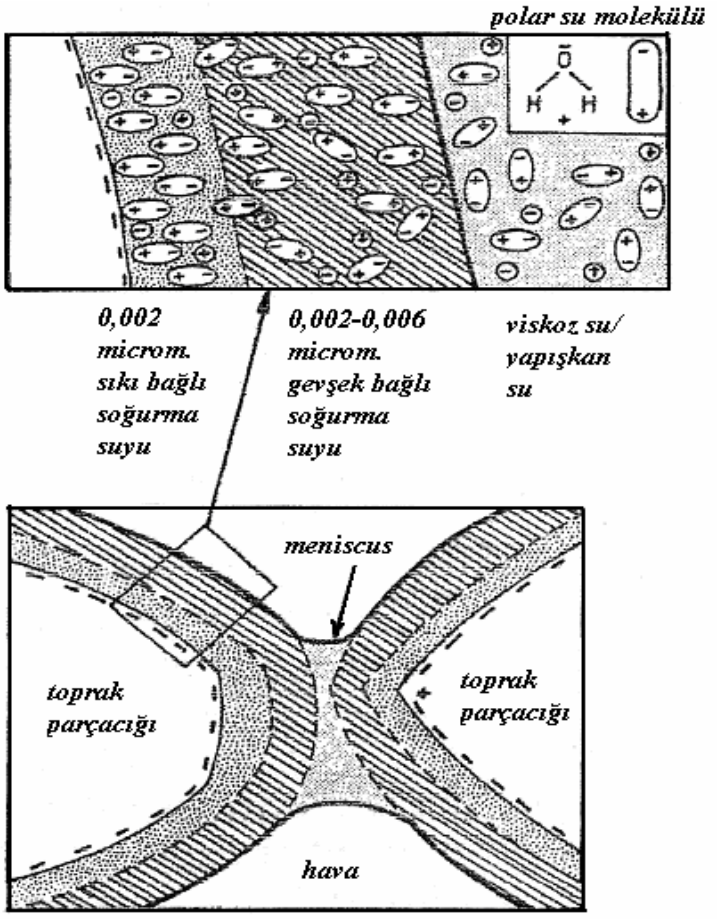
Değişebilen katyonların hidratasyonu, özellikle bir koordinasyon kompleksinin oluşmasına neden olur. Kuru kilin hidrate olması ekzotermik bir olaydır ki; bu durum ıslatılan kile dokunulduğunda sıcak oluşundan da anlaşılabilir.

Kaolende su, sadece dış yüzeylere ve tane kenarlarına adsorbe olur. Suyun kaolene adsorpsiyonunun entalpisi oldukça düşüktür ve ortam sıcaklığının çok az artırılması ile büyük oranda yapıdan uzaklaşır.

Montmorillonitlerde ise su, yapısal birimlerin ara yüzeylerine de tutunabilir ve tabakasal açılmaya yol açar. Bu nedenle suyun uzaklaştırılması daha fazla enerji ister ve yapıdan tamamen uzaklaştırmak için 100 °C' ye kadar ısıtmak gerekir.

• **Yüksek su içeren kil kolloidlerinde;** değişebilen katyonları Na+ ve Li+ olan montmorillonitler oldukça büyük düzlemler arası uzaklıklara kadar ozmotik şişme davranışı gösterirler. Elektriksel çift tabaka ile açıklanabilen bu durumda, sulu ortamda negatif yüzey yüküne sahip olan kil tabakaları, katyonları çekerken anyonları iter ve böylece kil tanelerinin etrafında pozitif bir yük tabakası oluşur. Kil tanesinin yüzeyi ve bu yüzeyin hemen çevresinde oluşan bu yük tabakasının her ikisine birden elektriksel çift tabaka denir ve oluşan bu çift tabaka kalınlığı iyonik konsantrasyonun kare kökü ile değişir.

Killi yapılarda bulunan su;
i -soğurma suyu veya higroskopik su,
ii-viskoz su veya kılcal su,
iii-serbest su,
olmak üzere 3 ana başlıkta incelenir.




Şekil 2.3. Killi toprakta bulunan suyun yapısı

• *Higroskopik Su:* Yüzey kuvvetleri sayesinde bir killi toprak parçacığının havadan soğurduğu su molekülleri "higroskopik su"yu veya "soğurma su"yunu oluştururlar. Bu su katmanı sıcaklıktan, havanın bağıl nem miktarından ve hava basıncından etkilenir.

Bir higroskopik su katmanı, eksi yüklü mineral yüzeyleri etrafındaki sıkı ve gevşek bağlı katmanlardan oluşan oldukça iyi sıralanmış tek moleküllü bir katmandır[Mitchell,1992]. İyonlar ve diğer etkin yüzey katkılayıcıları, hidrate olsalar da olmasalar da suyun yapısını bozarlar[Clifford,1975;Mitchell,1992]. Hidrate olmayan bu iyonlar yüzeyi işgal edecekler ve sonuç olarak suyun yapısını ve zıt elektriksel yüklerle su moleküllerinden çekilen hidratlanmış iyonları engelleyecektir [Mitchell,1992].

• *Yapışkan Su veya Kılcal Su*: Higroskopik su gibi, killi topraktaki mineral tanecikleri etrafında yer almayan, aynı zamanda yerçekiminden de etkilenmeyen neme "yapışkan" veya "kılcal su" adı verilir.

Toprak biliminde kılcal su , iç ve dış kısımlar olmak üzere 2'ye ayrılır[Lyon ve Buckman,1937]. Biraz difüz olan iç tabaka, higroskopik su katmanı ile bitişiktir ve bu katmanla dış kılcal su katmanı arasında bir geçiş bölgesi olarak davranır. Dış katman ise, yüzey gerilimi ve kolloidal kuvvetler tarafından kontrol edilen gevşek bağlı su katmanıdır; bunun yanı sıra, iç kılcal su sadece kolloidal kuvvetler tarafından kontrol edilir. Mevcut olan kılcal suyun miktarı; toprak dolgusu, toprak yapısı, organik madde ve yerçekimi tarafından kontrol edilir[Lyon ve Buckman,1937].

Su yüzey gerilimini artırdığı için, kısmen doyurulmuş toprak kütlesinde hava ve parçacıklar arasında kılcal meniscus meydana gelir. Büzülebilir dokunun özel bir durumu olarak ele alınan bu hava-su ara yüzeyi, gerilme pistonu olarak kullanılma özelliğinden dolayı toprak mekaniğinde önemlidir [Fredlund ve Rahardjo,1993]. Büzülebilir doku serbest su yüzeylerinde görülür, fakat doyurulmamış topraklardaki hava-su ara yüzeylerinde de oluşabilir.

• *Serbest Su:* Yerçekimsel su olarak ta adlandırılan serbest su, toprak parçacıklarına yerçekiminden etkilenebilecek ve toprakta aşağıya doğru hareket edebilecek kadar gevşek bağlıdır[Lyon ve Buckman,1937]. Serbest suyun yapısı henüz tam olarak bilinmemektedir. Urry(1995), bu yapıyı amorf değişken bağlara sahip bir yapı olarak tanımlamaktadır.

## 2.3 Kilin Kullanım Alanları

Kil mineralleri sahip oldukları değişik özelliklere göre endüstrinin pek çok alanında kullanım yeri bulmaktadır. Bazı kil mineralleri çok spesifik amaçlarla (örneğin atapuljit ilaç sektöründe) ve az miktarlarda kullanılmalarına karşın, kaolen ve montmorillonit grubu kil mineralleri çok farklı alanda ve kütlesel olarak ta oldukça

büyük miktarlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle çoğu zaman mineralojik ismi yerine kullanıldığı sektördeki ismi ile anılmaktadırlar.

• *İyi kalite kaolenler* (China Clays)**,** seramik sektörünün ana girdisini oluştururlar. Ayrıca dolgu amaçlı olarak kağıt, plastik, tekstil, boya ve cam sektöründe de kullanılmaktadır. Çok az safsızlık içerirler.

• *Bağlama kili* (Ball Clay), seramik sektöründe kullanılan kaolenlere göre daha fazla safsızlık içeren ve bu safsızlıkların kazandırdığı özellikler nedeniyle kaba seramik sektöründe, yapay aşındırıcı üretiminde kullanılan düşük kaliteli kaolenlerdir.

• *Şamot killeri* (Fire Clay), genellikle kömür yataklarının üzerinde bulunan ve refraktör özellikleri nedeniyle ateş tuğlası yapımında, çimento, tuğla ve çanak- çömlek yapımında kullanılan oldukça temiz killerdir. Yüksek alümina içerirler.

• *Yıkama killeri* (Fuller's Earth), montmorillonit grubu killerin adsorbant özellikleri nedeniyle yağ rafinasyonu için kullanılan türleridir.
• *Hallosit grubu killer*, kaolen grubu killerin daha fazla su içeren türüdür. Seramik, porselen ve döküm sektöründe ve petrol endüstrisinde katalizör olarak kullanılmaktadırlar [Malayoğlu,1995].

• *Bentonitler*, büyük oranda montmorillonit içeren killere ticari olarak verilen isimdir. Bünyesindeki montmorillonitin sahip olduğu özellikler nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle montmorillonitlerin kullanım alanlarını ayrıca ele almakta yarar vardır.

• *Montmorillonitler*

İçerisinde yüksek oranda montmorillonit bulunduran kil oluşumları bentonit yatağı olarak adlandırılır. Endüstriyel anlamda bentonitler, baskın olarak değişebilen katyonlarına göre, Na'lu ve Ca'lu olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Çünkü baskın olan bu

katyonlar, montmorillonite önemli kimyasal ve fiziksel özellikler kazandırırlar[Miles, 1994] ve kullanım yerlerini belirlerler.

## 2.4 Çalışmada Kullanılan Numunelerin Eldesi

Bu çalışmada Ordu Göbü, Ordu Ünye ve Ordu Ulubey yörelerinden olmak üzere beş kil numunesi incelenmiştir. İncelenen numuneler Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Muazzez ÇELİK KARAKAYA dan temin edilmiştir.

# 3. METOD

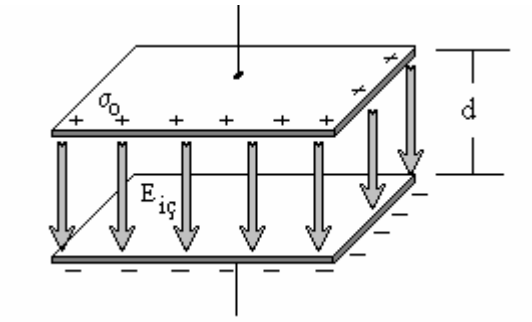
## 3.1 Dielektrik Teori

### 3.1.1 Temel Kavramlar

Tabiatta üzerinden elektrik yükü geçişine engel olabilecek gerçek bir yalıtkan madde yoktur. Ancak çok düşük iletkenlikleri açısından "dielektrikler" olarak adlandırılan geniş bir malzeme grubu vardır. Dielektrik malzemeler, kablo yalıtımından kondansatörlere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

Bir dielektrik madde, bir dış elektrik alana maruz kaldığı takdirde yük veya enerji depolama yeteneğine sahiptir. Bir dış elektrik alanın etkisi altında kutuplanabilme, dielektriklerin en önemli özelliğidir. Bu kutuplanma durumu, malzeme içindeki sabit yüklerin elektrik alanı sebebiyle düzenlenmesinin pertürbasyonundan kaynaklanır. Dielektrik, bu olay sonucu bir elektriksel moment kazanmış olur[Tareev,1975].

Bu noktadan hareketle bir dielektriğin kutuplanması incelenebilir. Öncelikle $A$ alanlı ve $d$ aralıklı iki paralel iletken plakadan oluşmuş boş bir düzlem kapasitörün kutuplanması ele alınsın.




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

Plakalar sabit $V$ potansiyel farkı altında tutulursa, aralarındaki mesafenin küçük olmasından dolayı plakalar arasında,

$$E = \frac{V}{d} \tag{3.1}$$

ile tanımlanan bir elektrik alan oluşur, burada $d$ : plakalar arasındaki mesafedir (plakaların kenarlarındaki saçaklanma etkileri ihmal edilmiştir). Plakalardan birisi üzerindeki yükün $V$ potansiyel farkına oranı;

$$C_0 = \frac{A\sigma}{V} \tag{3.2}$$

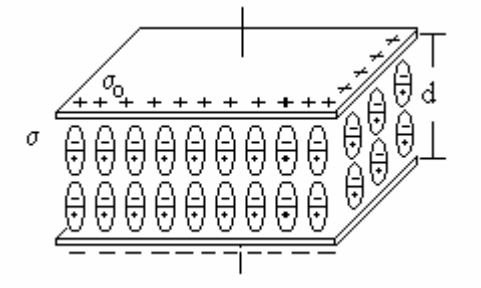
şeklindedir ve "kapasitans" olarak adlandırılır. Temel elektrostatikte bir düzlem iletken plakanın elektrik alanı

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{3.3}$$

olarak verilir. Gerekli işlemler yapılarak vakumlu bir kapasitörün kapasitansı;

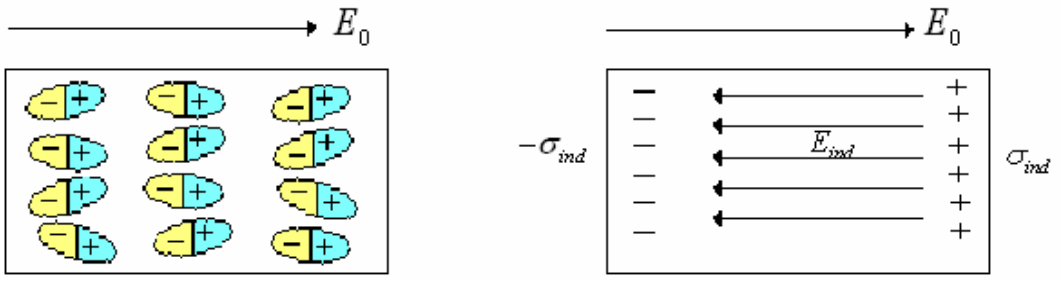
$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{3.4}$$

şeklinde bulunur, burada $\varepsilon_0 = 8{,}854188 \times 10^{-12}\ F/m$ değerinde olup, "boşluğun dielektrik geçirgenliği" olarak adlandırılır.




Şekil 3.2. Dielektrik maddeli bir kapasitör. Plakalar üzerindeki yüklerin bir kısmı, dielektrik içindeki yüklerin yer değiştirmesiyle dengelenir ve plakalar arasındaki uzayda bir E elektrik alanı oluşturmaz.

Kapasitörün plakaları arasına bir dielektrik madde konulduğu zaman, dielektriğin varlığından dolayı plakalar üzerinde daha fazla yük birikir. Bu olay şöyle açıklanabilir:




(a) (b)

Şekil 3.3. (a) Dielektrik polarize olduğunda, dielektrikteki moleküler dipoller dış elektrik alan doğrultusunda sıraya dizilirler. (b) Bu polarizasyon, dielektriğin bir yüzünde negatif yüzey yükü, öteki yüzünde de eşit miktarda pozitif yüzey yükü indüklenmesine sebep olur. Yüklerin bu dağılımı dielektrik içinde elektrik alanın azalmasına yol açar.

Moleküllerin pozitif kısmı elektrik alan yönünde, negatif kısmı da alana zıt yönde olacak şekilde yönelir. Böylece uygulanan elektrik alan dielektriği polarize eder. Burada, dielektrik üzerindeki net etki, şekilde görüldüğü gibi, sağ yüzey üzerinde indüklenmiş $+\sigma_{ind}$ pozitif yüzeysel yük yoğunluğuna eşit miktarda sol yüzey üzerinde indüklenmiş $-\sigma_{ind}$ negatif yüzeysel yük yoğunluğunun oluşmasıdır. Böylece plakalar üzerinde daha fazla yük birikmiş olur. Dielektrik üzerinde indüklenen bu yüzey yükleri, $E_0$ dış alanına karşı koyan indüklenmiş $E_{ind}$ elektrik alanının oluşmasına sebep olurlar.

Bu durumda kapasitörün kapasitansı $C_0$'dan

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \tag{3.5}$$

ile tanımlanan $C$ değerine kadar artar.

$C/C_0$ oranı, plakalar arasındaki dielektriğin ayırt edici özelliğidir ve "dielektrik sabit" olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \tag{3.6}$$

Dielektrik teorinin ilk zamanlarında $\varepsilon$ için dielektrik sabit terimi kullanılmıştır. Fakat son zamanlarda bu ifadeden büyük ölçüde vazgeçilmiştir. Çünkü dielektrik sabiti kutuplanmanın bir fonksiyonudur. Kutuplanma ise; frekans, sıcaklık, yerel alanlar, uygulanan alanın şiddeti, dielektrikler içinde yük taşıyıcılarının bulunması ve bunların serbestliği ve de yerel alan bozulmaları gibi nedenlere bağlıdır[Kaya ve Fang,1997]. Bu yüzden $\varepsilon$ için "dielektrik geçirgenlik" ifadesini kullanmak daha doğrudur.

Dielektrik geçirgenliğin yanı sıra bir de bağıl dielektriksel geçirgenlik ifadesi tanımlanabilir. Bir malzemenin dielektriksel geçirgenliğinin boşluğun dielektrik sabitine oranı "dielektriksel bağıl geçirgenlik" olarak adlandırılır ve en genel halde

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{3.7}$$

olarak tanımlanır.

Bir dielektriğin varlığı akımın fazını ve büyüklüğünü değiştirir. Bu ise kapasitörün kapasitansının frekansa bağlı olarak

$$C(\omega) = \varepsilon^*(\omega).C_0 \tag{3.8}$$

şeklinde tekrar yazılmasını gerektirir.

Kompleks geçirgenlik $\varepsilon^*(\omega)$ reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \tag{3.9}$$

elde edilir.

$\varepsilon'(\omega)$, kompleks geçirgenliğin reel kısmı olup, bir dış elektrik alanın etkisiyle malzeme içerisinde ne kadar enerji depolandığının bir ölçüsüdür ve bütün katı ve sıvılar için $\varepsilon'(\omega)$>1'dir. $\varepsilon''(\omega)$ ise, kompleks geçirgenliğin sanal kısmıdır ve

"kayıp faktörü" olarak adlandırılır. Yani malzemede meydana gelen enerji kayıplarını temsil eder. $\varepsilon''(\omega)$ daima sıfırdan büyüktür ve genellikle $\varepsilon'(\omega)$'dan çok daha küçüktür.

$\varepsilon^*(\omega)$ kompleks geçirgenliğinin $\varepsilon'(\omega)$ reel kısmı elektriksel iletkenlik ve $\varepsilon''(\omega)$ sanal kısmı ise dielektriksel iletkenlik ile ilgili faktörlerdir. Bunu şöyle gösterebiliriz.

Plakalar arasındaki elektrik alan şiddeti $E = V / d$ (Volt/metre) ve akım yoğunluğu $J = I / A$ (amper/m. $t^2$) olduğundan,

$$J = i\omega\varepsilon_0\varepsilon' E + \omega\varepsilon_0\varepsilon'' E \tag{3.10}$$

elde edilir. Böylece iletkenlik, $J / E$ oranından;

$$J / E = i\omega\varepsilon_0\varepsilon' + \omega\varepsilon_0\varepsilon'' \tag{3.11}$$

bulunur. Burada ilk terim elektriksel iletkenliğin ve ikinci terim ise dielektriksel iletkenliğin değerleridir

$$\sigma_e = \omega\varepsilon_0\varepsilon' \tag{3.12}$$

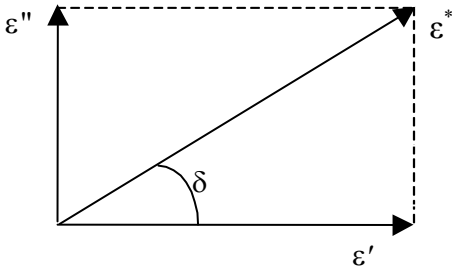
ve

$$\sigma_d = \omega\varepsilon_0\varepsilon'' \tag{3.13}$$

olarak verilir.

Yine burada $\sigma_e$ elektriksel iletkenlik terimi, malzeme üzerine gönderilen sinyalin ne kadarının geçtiğinin ve $\sigma_d$ dielektriksel iletkenlik ise bu sinyalin ne kadarının kayıp olarak açığa çıktığının bir ölçüsüdür. Dielektriksel iletkenlik malzeme içindeki bütün kayıp mekanizmalarının toplamını içerir.

Bir malzemedeki kayıp olarak açığa çıkan enerjinin depolanan enerjiye oranı "bağıl kayıplılık" olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi grafikleştirilebilir.




Şekil 3.4. Kayıp Tanjant Vektör Diyagramı

Bu grafiğe "kayıp tanjant vektör diyagramı" denir. $\tan\delta$ ifadesi grafiğe göre yazılırsa;

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{3.14}$$

elde edilir. Malzemeler için $\tan\delta$ değerinin küçük olması istenilen bir özelliktir.

## 3.2 Kutuplanma Mekanizmaları

### 3.2.1 Kutuplanabilirlik

Moleküller genellikle elektriksel olarak nötrdürler. Bunun yanısıra, bu moleküllerin sahip olduğu "elektriksel dipol momenti $\vec{p}$" ve "elektriksel kutuplanabilirlikleri" genellikle anizotropiktir. Burada, moleküllerin elektriksel özellikleri -özellikle bir elektrik alanın varlığında- malzemenin makroskobik özelliklerinden faydalanılarak elde edilebilir. Öncelikle elektromanyetik teoriden hatırlanacak iki kavrama göz atalım:

♦ Elektrik alan, $\vec{E}$ ; elektrik alan içinde bulunan bir deneme yüküne etki eden elektriksel kuvvetten elde edilir.

♦ Elektriksel yer değiştirme, $\vec{D}$ ; bir alan içindeki bir örneğin oluşturduğu yük yoğunluğunun yüzey etkisi olarak tanımlanır.

$\varepsilon$ dielektrik geçirgenlikli bir ortamdaki $\vec{D}_m$ yer değiştirmesi;

$$\vec{D}_m = \varepsilon.\varepsilon_0.\vec{E} \tag{3.15}$$

ile verilir. Buna ilave olarak , "elektriksel kutuplanma" $\vec{P}$ ise ;

$$\vec{P} = \vec{D}_m - \vec{D} \qquad \text{veya} \qquad \vec{D}_m = \varepsilon_0.(\vec{E} + \vec{P}) \tag{3.16}$$

şeklindedir. Burada;

$\vec{D}_m$ : malzeme içindeki yer değiştirme

$\vec{D}$ : vakumdaki yer değiştirmedir.

Bu iki denklemden

$$\vec{P} = (\varepsilon - 1).\varepsilon_0.\vec{E} = \chi.\varepsilon_0.\vec{E} \qquad coulomb.metre^{-1} \tag{3.17}$$

elde edilir. $(\varepsilon - 1)$ niceliği "dielektriksel alınganlık" olarak adlandırılır ve $\chi$ ile gösterilir.

Diğer taraftan, bir dipolün elektriksel dipol momentini, dielektriğin içinde meydana gelen $\vec{E}_{ind}$'e bağlı olarak;

$$\vec{p} = \alpha . \vec{E}_{ind} \tag{3.18}$$

şeklinde verebiliriz, burada $\alpha$ : dipolün kutuplanabilirliğidir (yani birim alan başına düşen ortalama dipol momentidir). Dielektrik malzemede *N* tane dipol olduğunu varsayarsak toplam kutuplanma;

$$\vec{P} = N . \alpha . \vec{E}_{ind} \tag{3.19}$$

olarak yazılabilir. Buradan sonuç olarak;

$$\vec{P} = (\varepsilon - 1) . \varepsilon_0 . \vec{E} = N . \alpha . \vec{E}_{ind} \tag{3.20}$$

elde edilir.

$\alpha$, dipol momenti terimleri ile tanımlandığı için büyüklüğü de, atomlar ve moleküller tarafından oluşturulan elektriksel dipollerin büyüklüğüne bağlıdır. Bütün bunlar ise, $\alpha$'nın büyüklüğüne tamamının ya da bazılarının katkısının olduğu çeşitli mekanizmaların ortaya çıkmasına neden olur. Sonuç olarak toplam kutuplanabilirliği, tek parçacık modelinden elde edilen kutuplanabilirliklerin toplamı şeklinde ifade edebiliriz

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_i \tag{3.21}$$

Burada;

$\alpha_e$ : elektronik kutuplanabilirlik

$\alpha_a$ : atomik kutuplanabilirlik

$\alpha_d$ : yönelimli kutuplanabilirlik

$\alpha_i$ : ara yüzeysel kutuplanabilirliktir.

### 3.2.2 Kutuplanma Mekanizmaları

Aralarında küçük bir mesafe bulunan zıt işaretli bir yük çifti bir "elektrik dipolü" oluşturur. Bu elektrik dipolü bir alan sayesinde kendi etrafında dönebilir. Eğer bir alternatif alan uygulanırsa, alan ile etkileşimi boyunca dipol dönmesini korur, uygulanan alanın frekansı dipolün doğal dönme frekansına eşit olunca da "rezonans" gerçekleşir. Eğer dipol fazla sürtünmeli bir ortamda bulunursa dönmesinde sönüm olur, yani dipolün dönme frekansı gitgide uygulanan alanın frekansının gerisinde kalır; bu bir "durulma" şeklidir.

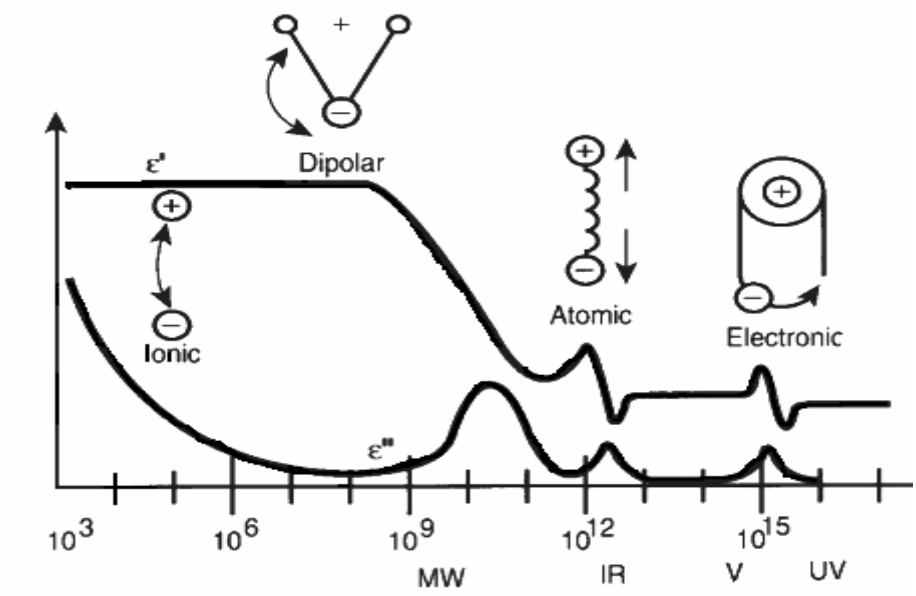
Dielektrikli sistemlerde "durulma" olayı ile ilgili bir "durulma zamanı" tanımlanır. Durulma zamanı $\tau$ ile gösterilir ve bu, bir madde içinde bulunan moleküllerin hareketliliğinin ölçüsüdür. Bu zaman, bir elektrik alanı içerisinde yönelerek yer değiştiren bir sistemin rastgele değerinin, başlangıçtaki değerinin $1/e$'sine eşit olması için geçen süredir. Sistemdeki parçacıkların elektrik alan etkisiyle yönelmeleri esnasında meydana gelen iç çarpışmalar, $\tau$ durulma zamanının üstel olarak azalmasına neden olur. Alan kapatıldığında ise süreç ters döner ve sistem aynı $\tau$ zaman sabitiyle başlangıçtaki durumuna geri döner.

Durulma frekansı ise durulma zamanı ile ters orantılı bir sabittir ve $f$ ile gösterilir. Durulma zamanı ile durulma frekansı arasında

$$\tau . f = 1/2\pi \tag{3.22}$$

şeklinde bir ilişki vardır. Durulmanın altındaki frekanslarda alternatif bir elektrik alanı, dipollerin alan değişimine adım uydurmasını sağlayacak yeterlikçe yavaştır. Kutuplamanın tam olarak gerçekleşmesi durumunda $\varepsilon''$ ile tanımlanan kayıplar frekansla doğru orantılıdır. Frekans artarken $\varepsilon''$ artmaya devam eder, fakat $\varepsilon'$ ile belirtilen yük veya enerji depolanması, dipol yönelimi ile elektrik alan arasında bir faz gecikmesi oluştuğundan azalmaya başlar. Durulma frekansının üzerindeki bölgede ise elektrik alanı dipol dönmesini etkilemede fazla hızlı olduğundan hem $\varepsilon'$ hem de $\varepsilon''$ azalır ve yönelimli kutuplanma ortadan kaybolur.

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



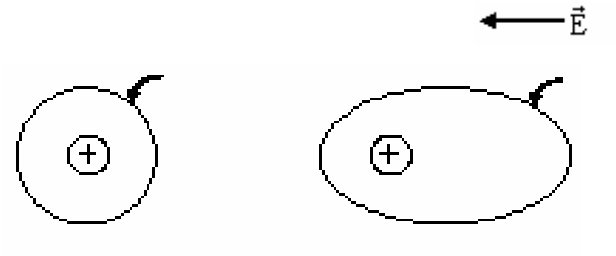

Şekil 3.5. Dielektrik mekanizmaların frekans karşılıkları

### *3.2.2.1 Elektronik Kutuplanma*

Bir atom pozitif yüklü bir çekirdek ve bunu çevreleyen bir elektron bulutundan oluşur. Böyle bir atoma dışarıdan bir elektrik alan uygulandığı zaman, atomda bir dipol momenti oluşacak şekilde elektronlar yörüngelerini değiştirirler, bunun sonucunda ise atomun simetrisi bozulmuş olur. Böylece dielektrik madde içinde bir kutuplanma meydana gelmiş olur. Bu kutuplanma türü yüksek frekanslarda ( morötesi ve görünür bölge frekanslarında) yani çok küçük bir zaman aralığında ( $\cong 10^{-15}$ sn mertebesinde) meydana gelir[HP 1217-1]. Çünkü atom içindeki elektronu uyarmak ancak yüksek frekanslı sinyalle sağlanabilir. Bu etki küçük ve geçicidir. Elektronik kutuplanma bütün atom veya iyonlarda oluşur ve

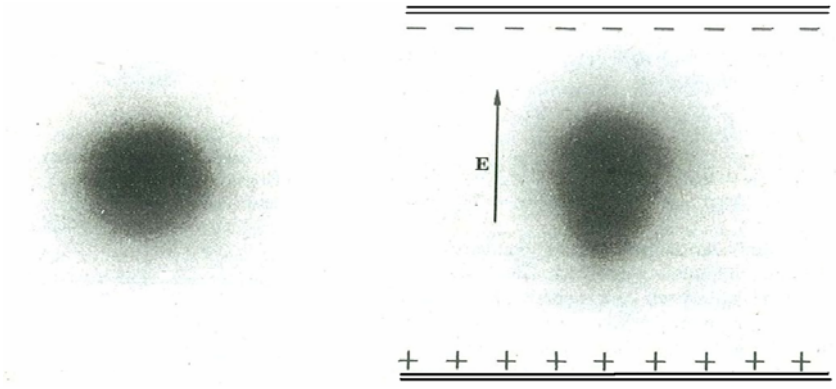
dielektrik içinde diğer kutuplanma türlerinin bulunup bulunmamasına bağlı olmaksızın bütün dielektriklerde gözlenebilir.

Kısacası elektronik kutuplanma, atomu çevreleyen elektron bulutunun simetrisinin bozulması halinde gerçekleşir. Aşağıdaki şekilde elektronik kutuplanmanın oluşması şematik olarak gösterilmiştir.




Şekil 3.6. Elektronik kutuplanma

Gerçekte ise elektronik kutuplanmayı hidrojen atomunu ele alarak modelleyebiliriz.




Şekil 3.7. a) Hidrojen atomunda yük dağılımının zaman içindeki ortalaması. Elektronun eksi yük yoğunluğu gölgeli olarak gösterilmektedir. b) Elektrik alanında eksi yükler bir yöne, artı yüklü çekirdek ise aksi yönde harekete zorlanır. Dengeye varınca, atom hafif bir değişime uğrar.

### *3.2.2.2 Atomik Kutuplanma*

Elektrik alana yerleştirilen iyonik bağlı bir malzemenin iyonları arasındaki bağların deforme olması ile oluşur. Elektrik alan altında bulunan ve birbirine yakın olan pozitif ve negatif iyonlar zıt yönlerde hareket edeceklerinden aralarındaki

bağlar gerilir. Alanın yönüne bağlı olarak katyonlar ve anyonlar birlikte yakınlaşır veya uzaklaşır. Geçici olarak kutuplanma sağlayan bir kutup çifti oluşur, bundan kaynaklanan etki malzeme boyutunu değiştirebilir.

Bu kutuplanma türü atomik boyutta meydana geldiği için "atomik kutuplanma" olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi temsil edilebilir.




Şekil 3.8. Atomik kutuplanma

Bu kutuplanma türü kırmızı ötesi veya buna yakın frekans bölgelerinde gerçekleşir.

### *3.2.2.3 Yönelimli Kutuplanma*

Bir molekül, atomların elektronlarından birinin veya daha fazlasının ortak kullanımı ile oluşur. Elektronlardaki bu düzen sürekli bir dipol momenti oluşmasına neden olur. Bu moment yük dengesinin yeniden düzenlenmesini sağlar. Bu momentler elektrik alan olmadığı durumda rastgele yönelmişlerdir. Bu nedenle bir kutuplanma meydana gelmez. Kutuplanma kalıcı olabilir. Dipollerin yönelmesi genellikle mikrodalga bölgesine düşen bir "durulma" frekansına neden olur[HP 1217-1].

Dielektriksel enerji alındıktan veya verildikten sonraki dipol kutuplanmasının oluşması süreci, deformasyonlu kutuplanmanın oluşması sürecine göre daha uzun bir zaman gerektirir. Örneğin moleküllerin boyutları büyük ve maddenin mutlak(dinamik) viskozitesi(iç sürtünme katsayısı) yüksek ise kutuplanma süreci için daha fazla zaman gerekir. Bu yüzden yönelimli kutuplanma yavaştır ve durulma tipindeki bir kutuplanmadır[Tsangaris ve Psarras 1999, Zaharescu 2001, Smyth 1955].

Polar yani kendiliğinden kutuplu dielektrik maddelerde yönelimli kutuplanma baskındır. Mekanizma, sabit bir dipol momente sahip moleküllerin

elektrik alan doğrultusunda yönelmeleri ile gerçekleşir. Bu tür kutuplanma "dipolar kutuplanma" olarak ta bilinmektedir ve ilk defa Debye tarafından incelenmiştir.




Şekil 3.9. Yönelimli kutuplanma

### *3.2.2.4 Ara Yüzeysel Kutuplanma*

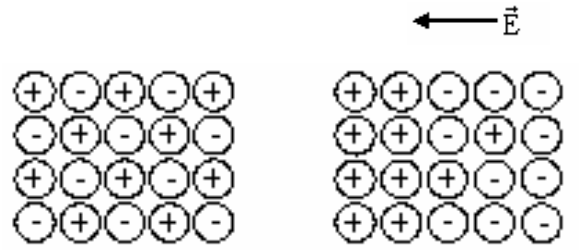
Şimdiye kadar değinilen elektronik, atomik ve yönelimli kutuplanma türleri homojen maddelerde gözlenir. Bu kutuplanma türleri atoma veya moleküle yerel olarak bağlı olan yüklerin hareketi ile gerçekleşir. Heterojen maddelerde ise bu üçüne ilave olarak dördüncü bir kutuplanma mekanizmasından söz edilebilir.

Heterojen maddelerde farklı sayıda yapı bulunur. Bu maddelerde bağıl olarak serbest bir şekilde hareket edebilen yük taşıyıcıları vardır. Düşük frekanslı bir elektrik alan uygulandığında, bu yük taşıyıcıları malzeme içerisinde belli bir uzaklığa kadar yer değiştirebilir. Bu yer değiştiren yüklerin hareketi engellendiği zaman ara yüzeysel kutuplanma meydana gelir. Yani yükler, elektrotlarda serbest deşarj olamadığında veya yer değiştiremediğinde hareket engellenir. Sonuç olarak malzemenin ara yüzeyleri içerisinde yükler tuzaklanabilir. Bu olaya "ara yüzeysel" veya "uzaysal yük" kutuplanması denir.

Yüklerin birikmesi, bağıl yük taşıyıcılarının yer değiştirmesi veya yönelim alması ile oluşan diğer kutuplanma türlerinin (elektronik, atomik, yönelimli) aksine elektrik alanı değiştirir. Malzemenin ara yüzeylerinde biriken bu yükler madde içindeki elektrik alanın artmasına, dolayısıyla da malzemenin kapasitansının artmasına sebep olur. Sonuç olarak enerji depolanmasını temsil eden $\varepsilon'$ nün değerinde de bir artış gözlenir[Pandita et al 2001].

Ara yüzeysel kutuplanma iyonik boyutta gerçekleştiği için diğer kutuplanma türlerinden daha uzun bir zamanda gerçekleşir. Bu nedenle bu kutuplanma türü düşük frekans bölgesinde etkilidir ve genelde radyo frekans üstü bölgede görülür.

Bu dört farklı kutuplanma mekanizmasının bir sonucu olarak, dielektrik geçirgenlik genelde, düşük frekanslarda yüksek frekanslarda olduğundan daha büyük olur. Elektronik ve atomik kutuplanmalarda rezonanslar genelde keskindir, yani eğrilerde pik ve çukurlar bulunabilir. Keskin çalkantılara yönelimli ve ara yüzeysel kutuplanmalarda daha az rastlanır. İdeal olarak kutuplanma, asimptotik olarak merkezlenmiş, durulma frekansı olarak bilinen bir frekansta etkilidir.




Şekil 3.10. Ara yüzeysel kutuplanma

## 3.3 Kutuplanma Mekanizmaları İçin Tanımlanan Eşitlikler

### 3.3.1 Yönelimli Kutuplanma

Elektronlardan birini yada birkaçını ortak kullanarak bir araya gelen atomlar molekülleri oluştururlar. Elektronların bu paylaşımından dolayı bir antisimetriklik durumu ortaya çıkar. Bu ise sürekli bir dipol momenti oluşumuna neden olur. Elektrik alanın olmadığı durumda bu momentler rastgele yönelmişlerdir, dolayısıyla bir kutuplanmadan bahsedilemez. Bir elektrik alan uygulandığında ise, kutup çiftleri alan doğrultusunda yönelim gösterirler. Alan kaldırıldığında kutup çiftleri yönelimlerini koruyarak kalıcı kutuplanmaya neden olabilirler. Örneğin su gibi asimetrik moleküllerde kalıcı kutuplanma görülebilir.

Bir kapasitörün paralel plakaları arasında bir dielektrik madde bulunduğu durumda, kapasitörün kapasitansı maddenin dielektrik geçirgenliğine bağlı olarak artar. Dielektrik geçirgenlik, elektriksel yük dağılımı uzaklığının bir ölçüsüdür ve aşağıdaki gibi kompleks formda tanımlanır.

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \tag{3.23}$$

Burada dielektrik geçirgenliğin reel kısmı malzemenin kutuplanabilirliğini veya enerji depolanmasını ifade eder; sanal kısmı ise iyonik iletim veya kutuplanmadan kaynaklanan enerji kayıplarını temsil eder.

Yönelimli kutuplanmada durulma süreçleri etkili olduğu için durulma tipindeki denklemler kullanılır. Bunlar “Debye”, “Cole-Cole”, “Cole-Davidson” ve “Havriliak-Negami” eşitlikleridir.

### *3.3.1.1 Debye Denklemi*

Tek durulma zamanlı homojen sistemlerin kompleks dielektrik geçirgenlikleri Debye eşitliği ile tanımlanır. Bu tür maddeler aşırı bastırılmış harmonik ösilatörler olarak ele alınır ve maksimum hareket frekansı sistemin zaman sabitini belirler [Debye, 1929].

Bu şekilde ifade edilen dielektrik madde sistemleri için Debye eşitliği,

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \tag{3.24}$$

şeklindedir. Bu eşitlik reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{3.25}$$

$$\varepsilon''(\omega) = \left(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty\right) + \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \tag{3.26}$$

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

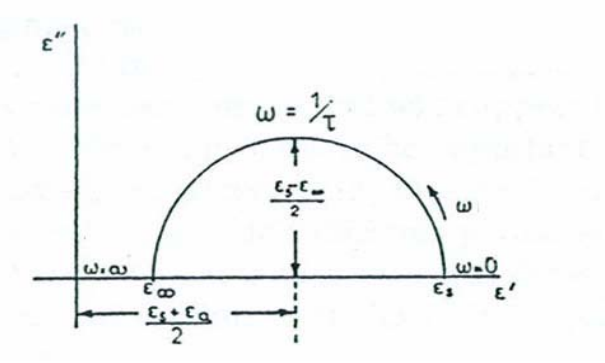
### *3.3.1.2 Cole-Cole Denklemi*

Bir dielektrik maddenin özelliklerini belirlemek için bazı ölçümler yapılır. Frekans ve sıcaklık gibi bazı değişkenlere karşı gerçekleştirilen bu dielektrik ölçümlerde maddenin belirleyici özelliklerinden olan geçirgenlik, dielektrik kayıplar gibi bazı nicelikler hakkında bilgi edilebilir. Bu niceliklerin frekansın logaritmik değerine karşılık çizilen grafikleri oldukça yararlı bilgiler sağlayabilir.

Ölçümlerde elde edilen sonuçlar kullanılarak pek çok grafik oluşturulabilir. Fakat aynı kartezyen koordinat sistemi üzerinde çizilen $\varepsilon'(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ grafiği en kullanışlı yöntemlerden birisidir. Çünkü bu tür bir grafikten dielektiriğin enerjiyi

depolama ve kaybetme oranları net olarak görülebilir. Bu çizime "argand diyagramı" denir ve ilk defa Cole-Cole tarafından gerçekleştirildiği için "Cole-Cole çizimi" olarak ta adlandırılır. Cole-Cole çizimi, bir sistemin tek bir durulma zamanına sahip olup olmadığının bulunması için özel bir metot sağlar. Bu metot, dağılım fonksiyonunun farklı tiplerini karakterize etmek için de kullanışlıdır [Daniel ,1967].

Tek durulma zamanlı bir dielektrik için, Cole-Cole çizimi tam bir yarım dairedir ve argand diyagramı üzerinde aşağıdaki gibi gösterilebilir.




Şekil 3.11. Tek durulma zamanlı bir dielektrik için Cole-Cole diyagramı

Debye ilişkisini gösteren tek bir durulma frekansına sahip bir malzeme için, merkezi yatay $\varepsilon''=0$ ekseni üzerinde olan ve kayıp faktörü pikinin ise $1/\tau$'da oluştuğu bir yarı-daire meydana gelir. Tek durulma zamanlı bir dielektrik için bu şekillenim $\varepsilon'=(\varepsilon_s+\varepsilon_\infty)/2$ 'de $\varepsilon'$ ekseni 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. 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.

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].

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

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}, \qquad 0 \le \alpha < 1 \tag{3.27}$$

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

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\cos\phi / A = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\cos\phi A^{-1} \tag{3.28a}$$

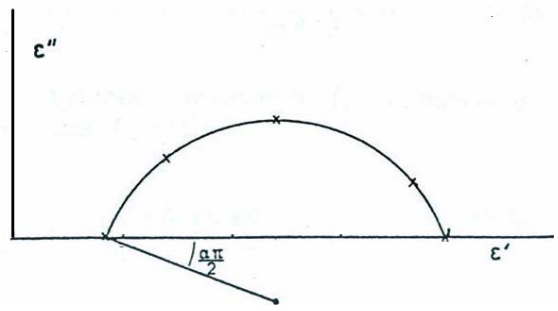
$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_\infty - \varepsilon_s)\sin\phi / A = (\varepsilon_\infty - \varepsilon_s)A^{-1}\sin\phi \tag{3.28b}$$

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

$$A = \left[1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha}\sin\frac{\alpha\pi}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)}\right]^{1/2} \tag{3.29a}$$

$$\varphi = \arctan\left[(\omega\tau)^{1-\alpha}\cos\frac{\alpha\pi}{2} \Big/ 1 + (\omega\tau)^{1-\alpha}\sin\frac{\alpha\pi}{2}\right] \tag{3.29b}$$

Bu durumda yarım dairenin merkezi yatay ε' ekseninden aşağı doğru uzanır.

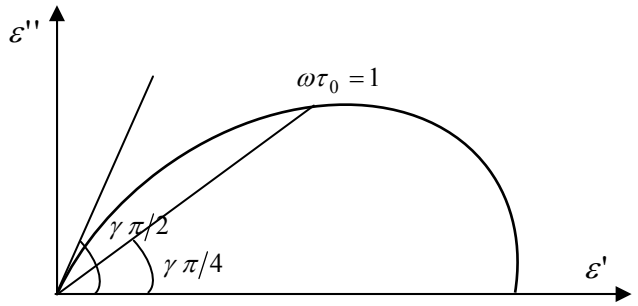



Şekil 3.12. $\alpha$ parametreli Cole-Cole dağılımlı bir dielektrik için arc çizimi

$[2\pi\tau(1+2\mathrm{Sin}\pi\alpha)]^{-1}$ 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 bu eşitlik Debye eşitliğine indirgenir [HP 1217–1].

### *3.3.1.3 Cole-Davidson Denklemi*

Durulma zamanlı dağılım fonksiyonunun asimetrik genişlemesi durumunda bu eşitlik kullanılır (Şekil 3.13). Yayın, düşük frekanslarda dairesel fakat yüksek frekanslarda, düz bir çizgi boyunca yatay eksene ($\varepsilon'$) yaklaştığını ifade eder. Bu çizgi ile $\varepsilon'$ ekseni arasındaki açı $\gamma\pi/2$ dir.




Şekil 3.13 Cole-Davidson modelinin şematik çizimi

Bu durumda kompleks geçirgenlik;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1+(i\omega\tau))^\gamma}, \qquad 0 < \gamma \le 1 \tag{3.30}$$

şeklinde verilir. Şekil 3.13' teki gibi çarpık bir yay meydana getiren bu eşitlik, Cole-Davidson tarafından ortaya atılmıştır. Eşitlik, reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\mathrm{Cos}\phi)^\gamma \mathrm{Cos}(\gamma\phi) \tag{3.31a}$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\mathrm{Cos}\phi)^\gamma \mathrm{Sin}(\gamma\phi) \tag{3.31b}$$

elde edilir. Burada;

$$\tan\phi = \omega\tau \tag{3.31c}$$

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

$$\omega_{max}\tau = \tan\left(\frac{1}{\gamma+1}\frac{\pi}{2}\right) \tag{3.31d}$$

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

### *3.3.1.4 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;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left(1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^\gamma} \tag{3.32}$$

şeklinde verilir. Denklemde, $\alpha \neq 0, \gamma = 1$ 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;

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(\mathrm{Cos}\gamma\phi)A^{-\gamma} \tag{3.33a}$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\mathrm{Sin}(\gamma\phi)A^{-\gamma} \tag{3.33b}$$

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

$$A = \left[1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha}\mathrm{Sin}\frac{\alpha\pi}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)^{-\frac{1}{2}}}\right] \tag{3.34c}$$

$$\phi = \arctan\left[\left.(\omega\tau)^{1-\alpha}\mathrm{Cos}\frac{\alpha\pi}{2}\right/ 1+(\omega\tau)^{1-\alpha}\mathrm{Sin}\frac{\alpha\pi}{2}\right] \tag{3.34d}$$

Burada, $\alpha = 0$ ve $\gamma = 1$ için bu eşitlikler, tam bir Debye sürecine 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].

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\left(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^\gamma} - \frac{\sigma(i\omega)^{n-1}}{\varepsilon_0} \tag{3.35}$$

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

### 3.4 Elektrik Modülü Formalizmi

Dielektrik spektrumu yorumlamak için kompleks geçirgenlik $\varepsilon^*(\omega)$, 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 gelinebilmektedir [McCrum et al., 1967]. Elektrik modülü kullanımının diğer bir avantajı da düşük frekanslardaki iletkenlik ve geçirgenliğin büyük değerlerindeki değişiklikleri en aza indirmesidir.

$\varepsilon''(\omega)$'nın $\sigma$ (iletkenlik) ile orantılı olduğu basit dc-iletkenliğinin etkilerinin $M''(\omega)$'daki Debye tipi pike çevrildiği $M^* = 1/\varepsilon^*$ dielektrik modülünü türetmek pratik hale gelmektedir. $\varepsilon''(\omega)$'dan $M''(\omega)$'ya geçerken ortaya çıkan beklenmedik olası değişimler basitçe $M^* \cdot \varepsilon^* = 1$ 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:

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{1}{\varepsilon' - i\varepsilon''} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + i\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} = M' + iM'' \qquad (3.36)$$

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

$$M_s = \frac{1}{\varepsilon_s} \quad , \quad M_\infty = \frac{1}{\varepsilon_\infty} \tag{3.37}$$

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

### 3.4.1 Debye Denklemi

Geçirgenlik moduna göre tanımlanmış denklem (3.24)'ün tersi alınarak $\left(M^* = 1/\varepsilon^*\right)$, Debye eşitliğinin elektrik modülü

$$M^* = M_\infty M_s \frac{1 + i\omega\tau}{M_\infty + M_s(i\omega\tau)} \tag{3.38a}$$

şeklinde yazılabilir. Bu kompleks ifade reel ve sanal kısımlarına

$$M' = M_\infty M_s \frac{M_\infty + M_s\omega^2\tau^2}{M_\infty{}^2 + M_s{}^2\omega^2\tau^2} \tag{3.38b}$$

$$M'' = M_\infty M_s \frac{(M_\infty - M_s)\omega\tau}{M_\infty{}^2 + M_s{}^2\omega^2\tau^2} \tag{3.38c}$$

biçiminde ayrılabilir.

### 3.4.2 Cole-Cole Denklemi

Debye denklemine benzer olarak, geçirgenlik modunda yazılmış olan Cole-Cole denkleminin (denklem 3.27) tersi alınarak kompleks modül türetilebilir:

$$M^* = M_\infty M_s \frac{1+(i\omega\tau)^{(1-\alpha)}}{M_\infty + M_s(i\omega\tau)^{(1-\alpha)}} \tag{3.39a}$$

$$M' = M_\infty M_s \frac{[M_s A + (M_\infty - M_s)\mathrm{Cos}\phi]A}{{M_s}^2 A^2 + 2A(M_\infty - M_s)M_s\mathrm{Cos}\phi + (M_\infty - M_s)^2} \tag{3.39b}$$

$$M'' = M_\infty M_s \frac{[(M_\infty - M_s)\mathrm{Sin}\phi]A}{{M_s}^2 A^2 + 2A(M_\infty - M_s)M_s\mathrm{Cos}\phi + (M_\infty - M_s)^2} \tag{3.39c}$$

Buradaki $A$ ve $\phi$ terimleri daha önceden tanımlanmıştır.

### 3.4.3 Cole-Davidson Denklemi

Cole-Davidson denkleminin (denklem 3.30) tersi alınarak, kompleks modül

$$M^* = M_\infty M_s \frac{1+(i\omega\tau)^{\gamma}}{(M_\infty - M_s) + M_s(1+i\omega\tau)^{\gamma}} \tag{3.40a}$$

$$M' = \frac{M_\infty M_s[M_s + (M_\infty - M_s)(\mathrm{Cos}\phi)^{\gamma}(\mathrm{Cos}(\gamma\phi))]}{{M_s}^2 + (M_\infty - M_s)(\mathrm{Cos}\phi)^{\gamma}[2M_s\mathrm{Cos}(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s)(\mathrm{Cos}\phi)^{\gamma}]} \tag{3.40b}$$

$$M'' = \frac{M_\infty M_s(M_\infty - M_s)(\mathrm{Cos}\phi)^{\gamma}\mathrm{Sin}(\gamma\phi)}{{M_s}^2 + (M_\infty - M_s)(\mathrm{Cos}\phi)^{\gamma}[2M_s\mathrm{Cos}(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s)(\mathrm{Cos}\phi)^{\gamma}]} \tag{3.40c}$$

biçiminde yazılır. Buradaki $\phi$ terimi, denklem (3.29b)'de tanımlanmıştır.

### 3.4.4 Havriliak-Negami Denklemi

Denklem (3.32)'de tanımlanan ifadenin tersi alınarak, kompleks elektrik modülü

$$M^* = M_\infty M_s \frac{\left[1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}\right]^\gamma}{(M_\infty - M_s) + M_s\left[1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}\right]^\gamma} \tag{3.41a}$$

$$M' = \frac{M_\infty M_s\left[M_s A^\gamma + (M_\infty - M_s)\mathrm{Cos}(\phi\gamma)\right]A^\gamma}{{M_s}^2 A^{2\gamma} + 2A^\gamma (M_\infty - M_s)M_s\mathrm{Cos}(\phi\gamma) + (M_\infty - M_s)^2} \tag{3.41b}$$

$$M'' = \frac{M_\infty M_s\left[(M_\infty - M_s)\mathrm{Sin}(\phi\gamma)\right]A^\gamma}{{M_s}^2 A^{2\gamma} + 2A^\gamma (M_\infty - M_s)M_s\mathrm{Cos}(\phi\gamma) + (M_\infty - M_s)^2} \tag{3.41c}$$

olarak gösterilebilir. Yine buradaki $A$ ve $\phi$ terimleri, denklem (3.29a) ve denklem (3.29b)'de tanımlanmıştır.

### 3.4.5 MWS Eşitlikleri

Geçirgenlik modunda tanımlanmış olan denklem (3.35)'in tersi alınarak, kompleks elektrik modülü ve bunun reel ve sanal kısımları bulunabilir. Basitlik açısından burada bu ifadenin sadeleştirilmişi alınmıştır. Denklemin tam gösterimi ve sadeleştirme işlemi EKLER'de ayrıntılarıyla sunulmuştur.

$$M^* = \frac{M_\infty M_s\left(1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^\gamma \varepsilon_0\omega}{M_s\left(1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^\gamma \varepsilon_0\omega + \varepsilon_0 M_\infty\omega - \varepsilon_0 M_s\omega + i\sigma(i\omega)^n M_s M_\infty\left(1+(i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^\gamma} \tag{3.42a}$$

$$M^* = \frac{M_\infty M_s}{M_s + (M_\infty - M_s)\left(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^{-\gamma} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0}(i\omega)^{n-1} M_s M_\infty} \tag{3.42b}$$

$$M' = M_s M_\infty \frac{(M_\infty - M_s)\cos(\gamma\phi) + M_s A^\gamma - M_s M_\infty \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right) A^\gamma \omega^{n-1} \cos\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right)}{\text{Payda}} \tag{3.42c}$$

$$M'' = M_s M_\infty \frac{(M_\infty - M_s)\sin(\gamma\phi) + M_s M_\infty \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right) A^\gamma \omega^{n-1} \sin\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right)}{\text{Payda}} \tag{3.42d}$$

$$\begin{aligned} \text{Payda} = {} & 2M_s(M_\infty - M_s)\cos(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s)^2 A^{-\gamma} + M_s^2 A^\gamma \\ & + M_s^2 M_\infty^2 \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2 A^\gamma \omega^{2(n-1)} - 2M_s M_\infty (M_\infty - M_s)\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)\omega^{n-1} \cos\left(\gamma\phi + \frac{\pi}{2}(n-1)\right) \\ & - 2M_s^2 M_\infty \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)\omega^{n-1} A^\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right) \end{aligned} \tag{3.42e}$$

şeklinde yazılabilir. Elektrik Modülü Formalizmine göre tanımlanan kompleks MWS denklemi, reel $M'(\omega)$ ve sanal $M''(\omega)$ kısımlarına ayrılıp Denk.(3.42c) ve (3.42d) sadeleştirilmiş şekli Maplev 7 ile elde edilmiştir. Bu denklemlerde geçen A ve $\phi$ terimleri ise şu şekilde tanımlanmıştır [Tsangaris et al., 1998]:

$$A = \left[ 1 + 2(\omega\tau)^{1-\alpha} \sin\frac{\pi\alpha}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\alpha)} \right]^{1/2} \tag{3.42f}$$

$$\phi = \arctan\left[ (\omega\tau)^{1-\alpha} \cos\frac{\alpha\pi}{2} \Big/ 1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin\frac{\alpha\pi}{2} \right] \tag{3.42g}$$

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 Nem Ölçümleri

### 4.1.1 Numunelerin Hazırlanması

Dielektrik özelliklerini incelemek amacıyla beş katı kil numunesi seçilmiştir. Ordu Göbü yöresinden bir, Ordu Ünye yöresinden beyaz ve pembe olmak üzere iki ve Ordu Ulubey yöresinden mavi ve sarı olmak üzere iki adet numune kayaçları alınmıştır. Kayaçlar önce kaba kırma işleminden geçirilmiş sonra ise ince toz haline (pudra) getirilmiştir. Daha sonra S.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde bulunan pres kullanılarak 25 ton basınç altında yaklaşık 3-4 mm kalınlığında ve 13,4 mm çapında paletler oluşturulmuştur.

Numuneler önce kalın bir zımpara ile, daha sonra da su zımparası ile uygun kalınlıklar elde edilene kadar inceltilmiştir. Son olarak yüzeydeki pürüzler sünger zımpara ile düzeltilerek, oldukça pürüzsüz ve kaliteli bir yüzey elde edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak 13,4 mm çaplı ve farklı kalınlıkta diskler halinde beş farklı kil numunesi elde edilmiştir.

### 4.1.2 Numunelerin Ağırlıkça Yüzde Nem Ölçümleri

Farklı beş montmorillonit kil numunesinin nem tutma kapasiteleri, ağırlıkça yüzde oranlar yöntemine göre hesaplanmıştır. Önce beş numunenin kütleleri hassas terazi ile ölçülmüş ve numunelerin yapısında bulunan nemin uzaklaştırılması amacı ile $105^0$ C' lik etüvde bir saat boyunca bekletilmiştir. Sonra etüvden çıkarılır çıkarılmaz kil numunelerinin kütleleri teker teker hassas terazi ile ölçülmüş, bu ölçülen değerler, numunelerdeki nemin tamamen uzaklaştırıldığı varsayılarak başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir. Daha sonra bağıl nemi % 38-46 olan laboratuar ortamına bırakılan beş numunenin de her yarım saatte bir, ayrı ayrı kütle ölçümleri yapılmıştır. 4.5 saat sonunda kil numunelerinin nem tutma kapasitelerinin büyük oranda doyuma ulaştığı görülmüştür. Son olarak, aşağıdaki bağıntı yardımı ile

her bir numune için ağırlıkça yüzde oranlarının zamana göre değişimleri elde edilmiştir.

Ağırlıkça yüzde nem oranı;

$$\text{Ağırlıkça \%nem} = \frac{(\text{Ölçülen değer}) - (\text{İlk değer})}{(\text{İlk değer})} \tag{4.1}$$

## 4.2 Dielektrik Ölçümler

Bu beş farklı katı kil numunesinin dielektrik ölçümlerinde, paralel plakalı düzlem kapasitör yöntemi kullanılmıştır. Düzgün diskler haline getirilmiş olan kil numunelerinin her iki yüzü, elektrot kutuplanmasının etkisini minimuma indirmek amacıyla gümüş boya ile boyanarak iletken düzlem plakalar oluşturulmuş ve boyanın kuruması için numuneler bir gün etüvde bekletilmiştir. Boya kuruduktan sonra bu gümüş yüzeylerden kontaklar alınarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Dielektrik geçirgenlik en genel halde;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \tag{4.2}$$

şeklinde kompleks olarak tanımlanır. Deneysel bir uygulamada $\varepsilon'(\omega)$ reel ve $\varepsilon''(\omega)$ sanal geçirgenlikleri çoğunlukla aşağıdaki şekilde tanımlanan $Y^*(\omega)$ niceliğinden ölçülür.

$$Y^*(\omega) = G(\omega) + iB(\omega) = \omega\varepsilon''(\omega)C_0 + i\omega\varepsilon'(\omega)C_0 \tag{4.3}$$

Burada $Y^*(\omega)$: admitans, $G(\omega)$: kondüktans ve $B(\omega)$: suseptanstır. Bu niceliklerin boyutu Siemens $(S)$ olup,

$$1S = 1(ohm)^{-1} = 1mho$$

ile verilir.

Empedans analizörü sayesinde $G(\omega)$ ve $B(\omega)$ niceliklerinden faydalanılarak, aşağıdaki eşitlikler yardımıyla, dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımları elde edilir.

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{B(\omega)}{\omega C_0} \; ; \; \varepsilon''(\omega) = \frac{G(\omega)}{\omega C_0} \tag{4.4}$$

Daha önceden de tanımlandığı gibi $C_0$ sistemin geometrik kapasitansıdır ve

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

ile verilir. Burada

$\varepsilon_0$ : boşluğun dielektrik sabiti

$A$ : diskin yüzey alanı

$d$ : diskin kalınlığı

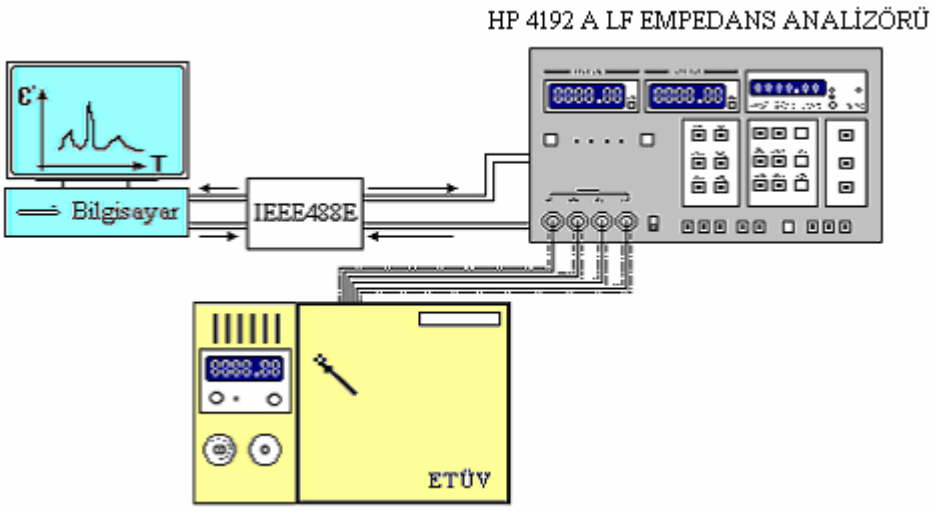
$\omega$ : uygulanan elektrik alanın açısal frekansıdır.

Ölçümlere Ordu Göbü den alınan montmorillonit numunesiyle başlanmıştır. İlk olarak; numune $105^0$C'ye ayarlanan etüvde 1 saat bekletilerek, numune içindeki nem uzaklaştırılmıştır.

Etüvden alındıktan sonra, nem kapmadan oda sıcaklığına kadar soğuması için, numune havası alınan desikatör içinde yaklaşık 3 saat bekletilmiştir. 3.saat sonunda numune desikatörden laboratuar ortamına çıkarılmış ve hemen ölçüm alınmıştır. Daha sonra 2.5 ve 6.5 saat sonra ve son olarak bir hafta sonunda ölçümler alınmıştır. Her bir ölçümde 85 frekans değerine karşılık gelen değerler kaydedilmiştir. Dielektrik ölçümler, numunelerin yüzeylerinden alınan kontakların empedans analizörüne bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Aynı işlemler diğer numuneler içinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Beş numunenin dielektrik ölçümleri için 5Hz-13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.2 deki gibidir.




Şekil 4.1 Dielektrik ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği

Dielektrik ölçümlerin her adımında; frekans, kondüktans ve suseptans değerleri bilgisayara aktarılmıştır. Bu deneysel verilerden numunelere ait dielektrik sabitler Sigma Plot 9.0 grafik programı kullanılarak elde edilmiştir.

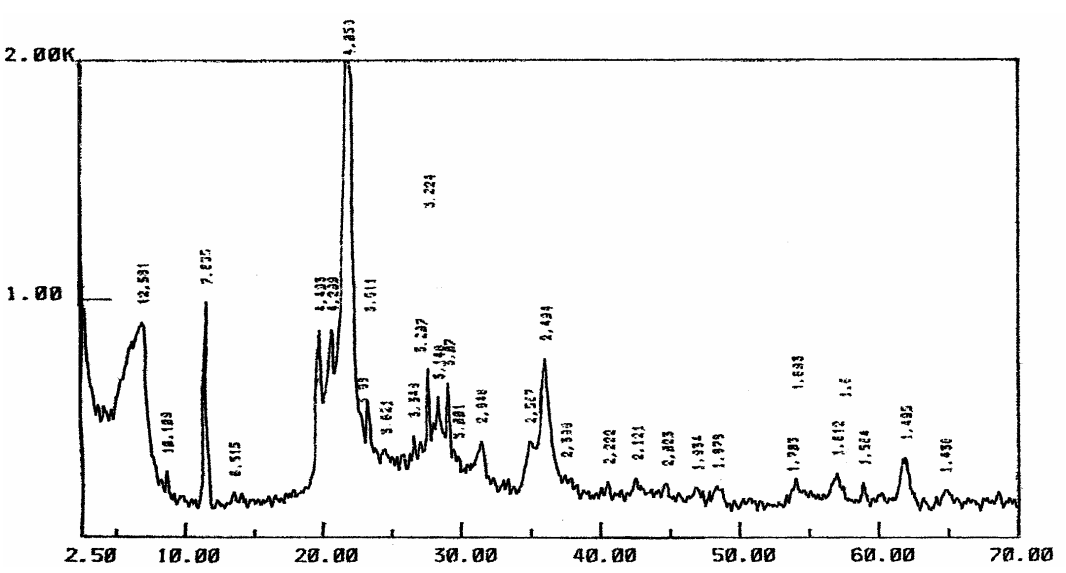
# 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

## 5.1 Numunelerin XRD ve Kimyasal Analiz Sonuçları

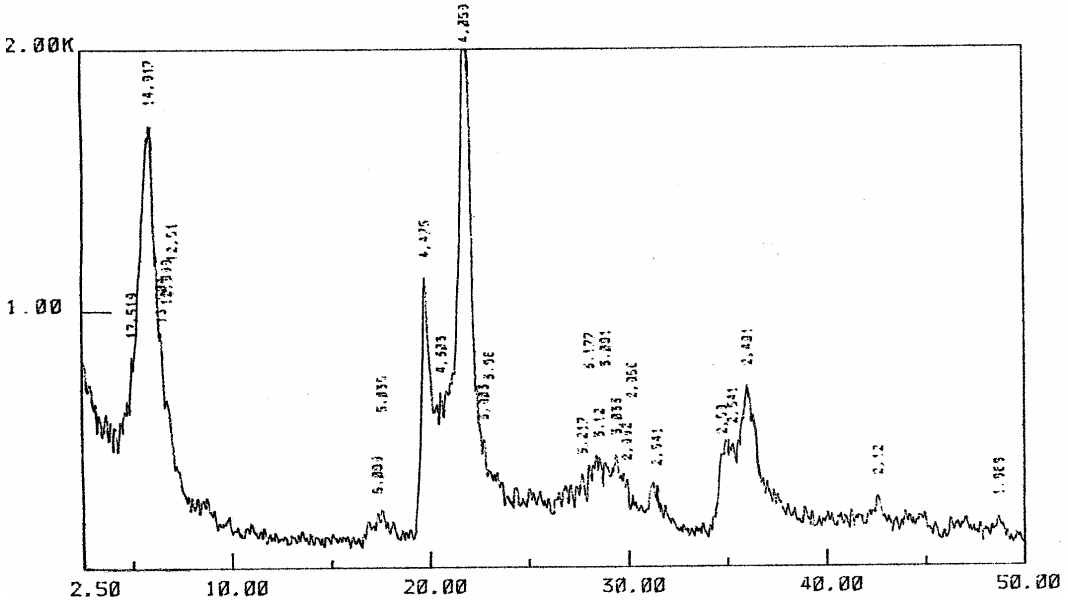
Bu çalışmada Ordu Göbü, Ordu Ünye ve Ordu Ulubey yörelerinden olmak üzere beş kil numunesi incelenmiştir. İncelenen numuneler Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Muazzez ÇELİK KARAKAYA dan temin edilmiştir.

Çalışmada incelenen beş numunenin minorolojik analizi ve x-ışını difraksiyon spektrumları Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünde bulunan Philips PW 1140 ve Siemens D-5000 cihazları yardımı ile alınmıştır [Çelik, M. Ve ark,1999].

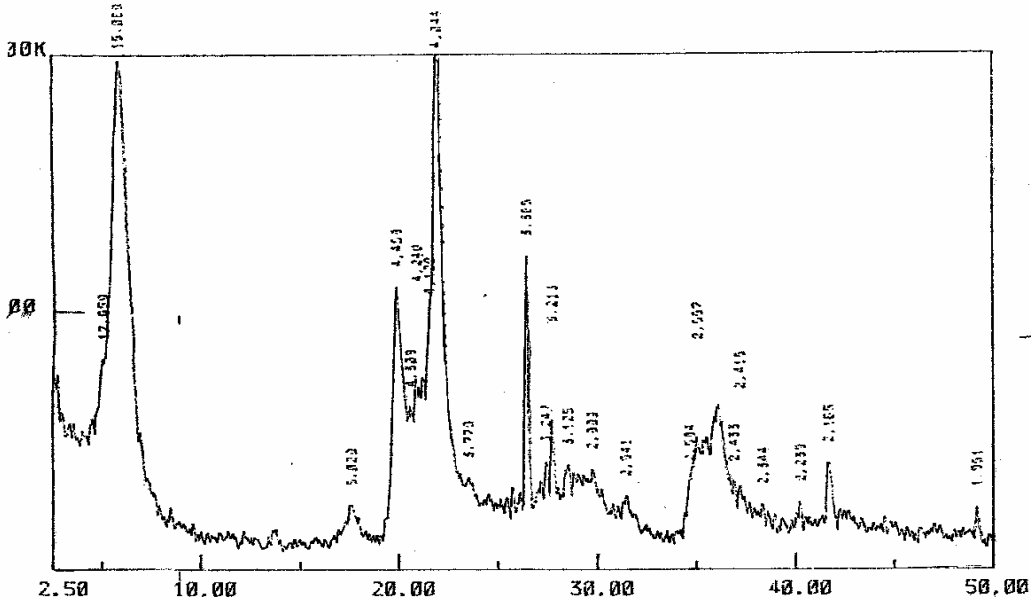
Numunelerin XRD spektrumları sırası ile aşağıda verilmiştir.



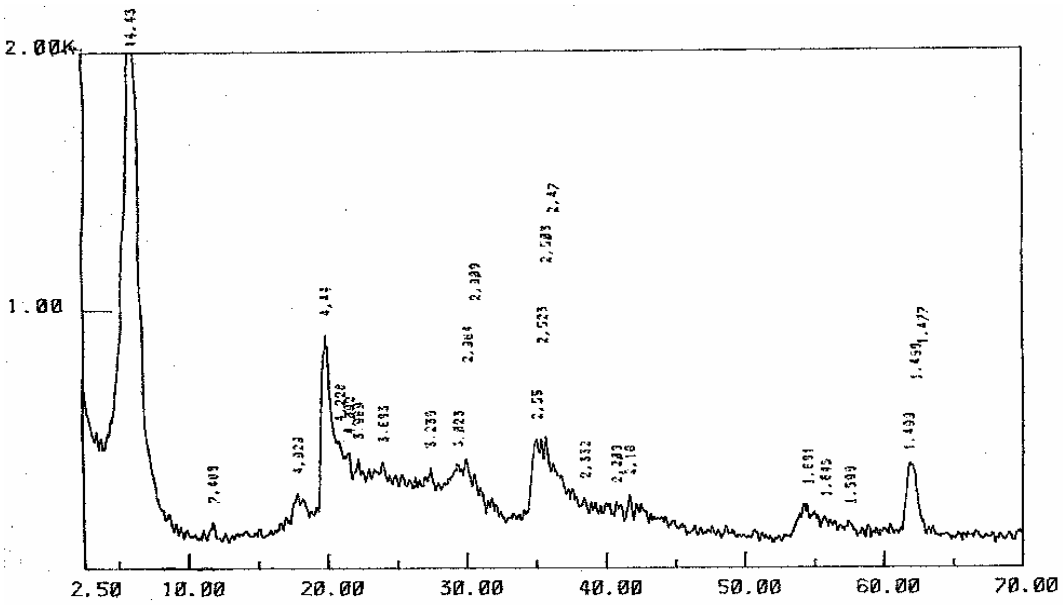

(a)


2.00K
1.00
2.50
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00

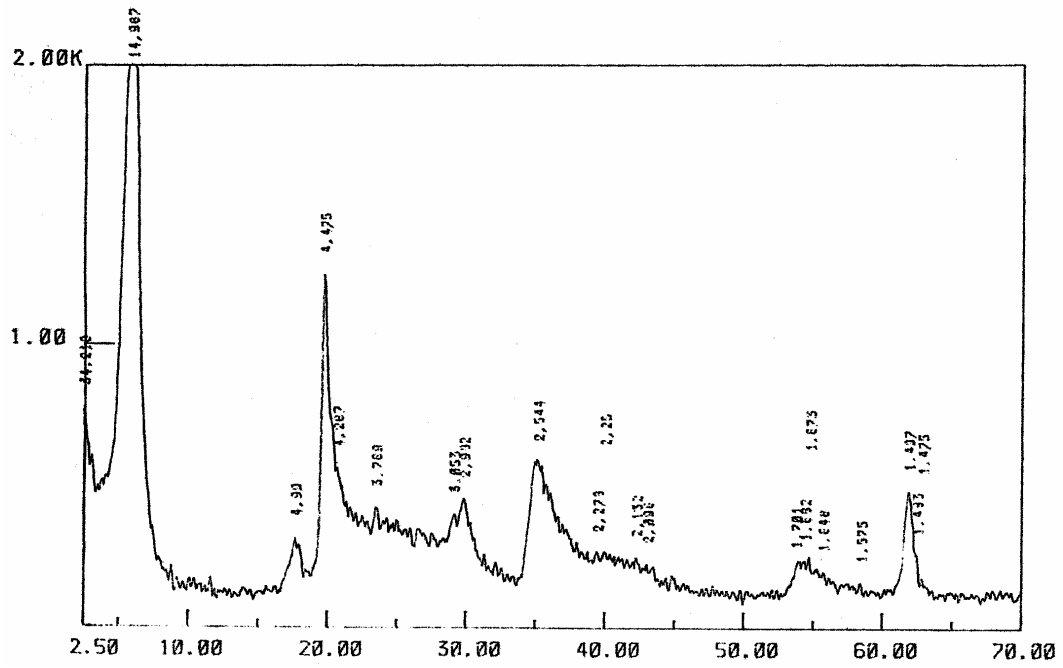
(b)


30K
2.50
10.00
20.00
30.00
40.00
50.00

(c)




(d)




(e)

Şekil 5.1 Numunelerin $CuK\alpha$ ışını ile $2-70^{\circ}$ arasında çekilen $2\theta$-Şiddet spektrumları. a) Ordu Göbü, b) Ordu Ünye beyaz, c) Ordu Ünye pembe, d) Ordu Ulubey Mavi ve e) Ordu Ulubey sarı

İncelenen numunelerin minerolojik analiz sonuçları aşağıda çizelge 5.1 verilmiştir.

Çizelge 5.1 Numunelerin minerolojik analizleri

| Örnek | Mineral Bileşenleri (% Ağırlıkça) |
|---|---|
| OGB | Montmorillonit (63 )+ Opal-CT (37 ) |
| OÜB | Montmorillonit (50)+ Kaolinit (22)+ Albit (18) + Kristobalit (10) |
| OÜP | Montmorillonit (70)+ Kuartz (22)+ İllit (8) |
| OUM | Montmorillonit (87)+ Kristobalit (13) |
| OUS | Montmorillonit (100) |

İncelenen numunelerin Kimyasal analiz sonuçları aşağıda çizelge 5.2 verilmiştir.

Çizelge 5.2 Numunelerin Kimyasal analizleri

| | [1]OGB | [1]OÜB | [1]OÜP | [1]OUM | [1]OUS |
|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 60.32 | 74.14 | 63.25 | 51.25 | 51.34 |
| $Al_2O_3$ | 17.15 | 8.9 | 14.38 | 16.39 | 16.29 |
| $Fe_2O_3^1$ | 0.23 | 0.73 | 0.96 | 2.85 | 2.84 |
| MgO | 2.21 | 1.83 | 2.12 | 4.93 | 4.51 |
| CaO | 1.02 | 0.51 | 1.28 | 2.36 | 2.59 |
| $Na_2O$ | 0.04 | 1.23 | 0.88 | 0.37 | 0.15 |
| $K_2O$ | 0.66 | 0.51 | 0.52 | 0.21 | 0.17 |
| $TiO_2$ | 0.09 | 0.07 | 0.14 | 0.24 | 0.25 |
| $P_2O_5$ | 0.01 | <0.01 | 0.01 | 0.14 | 0.03 |
| MnO | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | <0.01 |
| [2]KK | 18.02 | 10.9 | 16.4 | 21.0 | 21.3 |
| Toplam | 99.76 | 99.86 | 99.98 | 99.86 | 99.55 |

1 : % Ağırlık

[2]KK : Kızdırma kaybı

## 5.2 Numunelerin Nem Ölçüm sonuçları

Beş farklı montmorillonit kil numunesinin ağırlıkça nem tutma-zaman değişimleri şekil 5.2'de gösterilmiştir. Her beş numunenin nem alma kapasitesinin zamanla üstel bir şekilde artarak maksimum nem tutma değerine asimptotik bir şekilde yaklaştığı görülmüştür. Numunelerin zamanla ağırlıkça nem tutma değişimi

$$\%\,\text{Nem} = A\,(1 - e^{-bt})$$

ampirik ifadesi ile verilebileceği belirlenmiştir.

A ve b katsayıları, yukarıdaki ifadenin deneysel değerlere Sigma Plot 9.0 programı kullanılarak fit edilmesi ile her beş numune için de hesaplanmıştır. Elde edilen bu katsayılar çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Beş farklı montmorillonit kil numunesinin nem tutma parametreleri

| Numune | A (Ağ. % Nem) | b (1/dakika) | 1/b (dakika) | Ab(%Nem/dakika) |
|---|---|---|---|---|
| OGB | 0.08548 | 0.009158 | 109.194147 | 0.000783 |
| OÜB | 0.05409 | 0.008466 | 118.119536 | 0.000458 |
| OÜP | 0.10223 | 0.008632 | 115.848007 | 0.000882 |
| OUM | 0.16393 | 0.007322 | 136.574706 | 0.001200 |
| OUS | 0.16564 | 0.008392 | 119.161058 | 0.001390 |

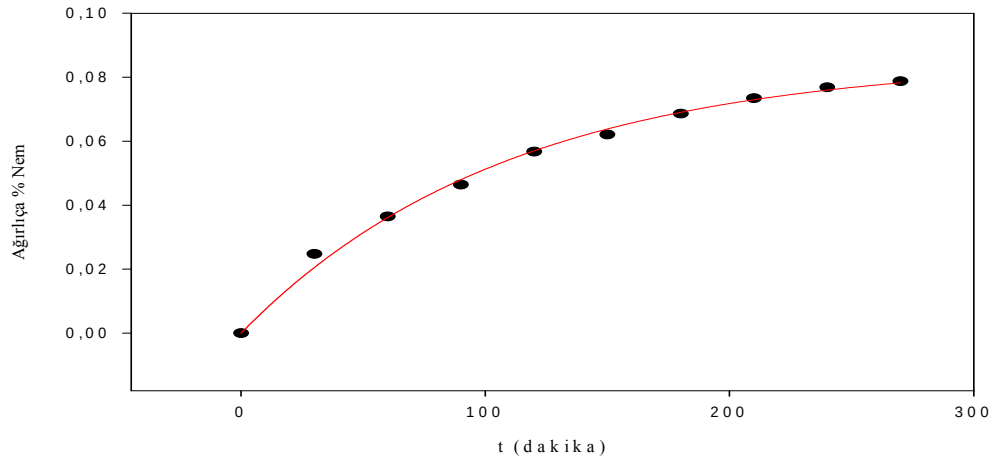
Çizelge 5.3 den de görüleceği gibi, beş numuneden nem tutma kapasitesi en büyük olanı OUS ve en küçük olan ise OÜB numunesidir ve yaklaşık 3 katı kadar büyük değerdedir. Diğer taraftan en hızlı nem çeken numune OGB ve en yavaş nem çeken numune ise OUM numunesidir ve nem çekme hız oranları 2 mertebesindedir.

Nem çekme kapasitelerine büyük olanlara bakıldığın montrolillonitce yüksek olduğu görülebilir. Diğer taraftan yine bu numuneler Fe, Mg ve Ca ca yüksek oranlara sahip oldukları çizelge 5.2 den görülebilir. Aynı şekilde en düşük nem kapasitesine sahip OÜB numesinin en düşük oranlı montmorillonite sahip ve Fe, Mg, Ca e en düşük değerlere sahip olduğu görülebilir.

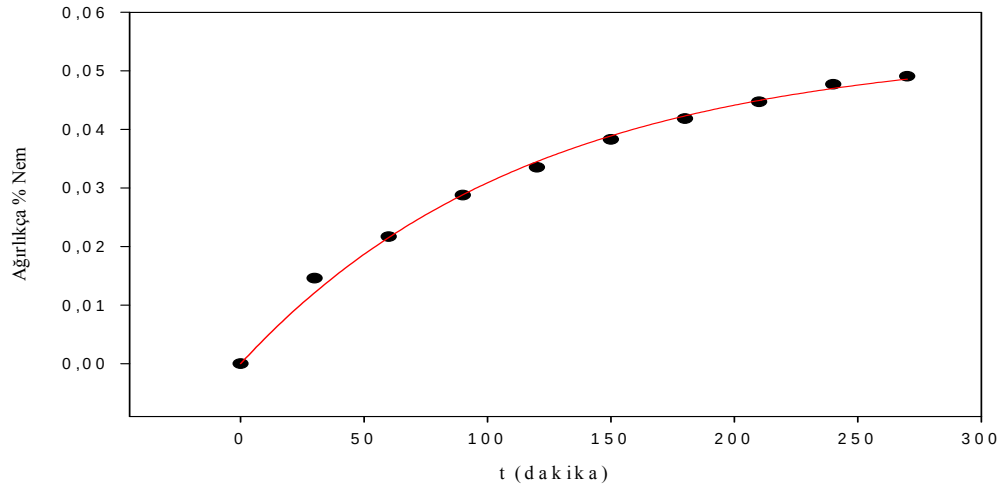
OUS ve OÜB numunelerinin nem çekme kapasiteleri arasındaki oranın ağırlıkça % Mg oranları arasında da olduğu görülebilir. Bu , diğer numuneler

içinde aynıdır. Buradan numunelerin nem çekme kapasitelerine Mg un yüksek oranda etkili olduğu söylenebilir. Diğer taraftan çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3 e bakıldığında numunelerin nem çekme kapasitelerinin sahip oldukları montmorillonit oranlarına bağlı olduğu görülebilir fakat ilişkinin lineer olduğu söylenemez.

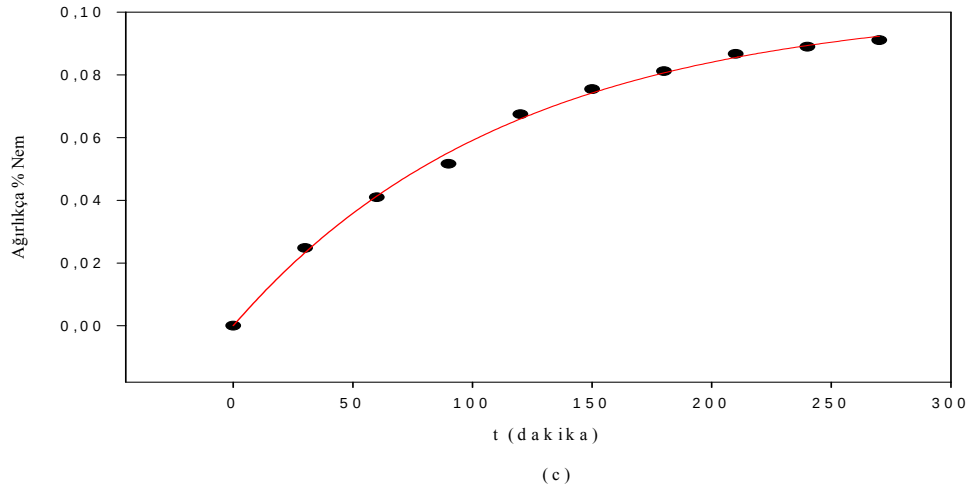
Çizelge 5.3 den numunelerin nem çekme hızlarına bakıldığında, en hızlı nem çeken numunenin montmorillonitce en yüksek oranda olan OUS ve en yavaş nem çeken numune ise montmorillonitce en düşük oranda olan OÜB olduğu görülür. Buradan nem çekme hızlarının, aynı süre için A.b (%nem/dakika), doğrudan montmorillonit oranı ile ilişki olduğu söylenebilir.



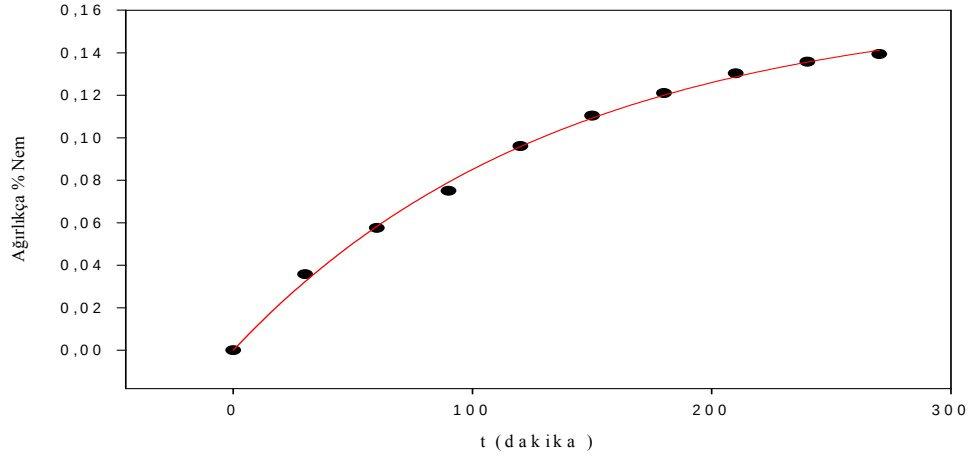

(a)



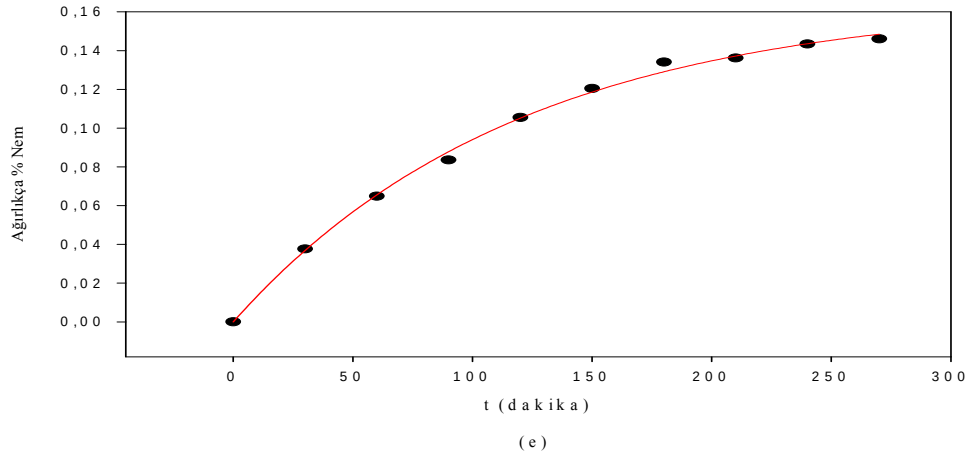

(b)




(c)




(d)




(e)

Şekil 5.2 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin ağırlıkça yüzde nem- zaman grafikleri

### 5.3 Numunelerin Dielektrik Ölçüm sonuçları

İncelenen beş numuneye ait kompleks dielektrik geçirgenliğin reel ve sanal kısımları, $\varepsilon'(\omega)$ ve $\varepsilon''(\omega)$, denk.(4.4) den hesaplanarak dört ayrı nem ortamı için $\log(\omega) - \varepsilon'(\omega)$ ve $\log(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ grafikleri şekil 5.3 ve şekil 5.4 de verilmiştir. Şekil 5.3 ve 5.4 den genel olarak ortam neminin artması ile geçirgenliğin reel kısmı $\varepsilon'(\omega)$, ve sanal kısmı $\varepsilon''(\omega)$nın değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Geçirgenliğin reel kısmı $\varepsilon'(\omega)$, OGB, OÜB ve OÜP numunelerinde, 5 Hz-$10^4$ Hz frekans bölgesinde $10^{+4}$ değerlerinden başlayarak $10^2$ değerine kadar düzgün azalmıştır. Aynı numunelerin 10KHz-13 MHz frekans bölgesinde ise küçük değişimler gösterdiği görülmektedir. OUM ve OUS numunelerinin geçirgenliğinin reel kısımları $\varepsilon'(\omega)$, 5 Hz-$5.10^5$Hz frekans bölgesinde özellikle nemli durumlar için belirgin karakteristik bir değişim göstererek azalmış, 13 MHz e kadar olan frekans bölgesinde ise düzgün küçük değişimler göstermiştir.

Geçirgenliğin sanal kısmı $\varepsilon''(\omega)$, OGB, OÜB ve OÜP numunelerinde, 5 Hz-$5.10^4$ Hz frekans bölgesinde yaklaşık $10^{+4}$ değerlerinden başlayarak $10^2$ değerine kadar düzgün azalmıştır. Aynı numunelerin 5.0KHz-13 MHz frekans bölgesinde ise küçük değişimler gösterdiği görülmektedir. Diğer taraftan OUM ve OUS numunelerinin geçirgenliğinin sanal kısımları $\varepsilon''(\omega)$, 5Hz -1Mhz frekans bölgesinde özellikle nemli durumlar için belirgin karakteristik bir pik verdiği görülebilir. $\varepsilon''(\omega)$ değerleri yaklaşıkça 5KHz frekans değerinde 15000 şiddetinde bir pike sahiptirler. Aynı numuneler için daha düşük nemli ortamlarda belirgin bir pik elde edilememiştir.

Her numune için farklı nem durumlarında $\varepsilon'(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ Cole-Cole değişimleri şekil 5.5 de verilmiştir. Tüm numuneler için düşük frekanslarda $\varepsilon'(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ değerlerinin (5Hz-100Hz arası), kablo etkisi nedeni ile aşırı büyüme gösterdiği görülebilir. Yine bütün numuneler için vakum ortamında Cole-Cole eğrileri yarım daireyi tamamlamamıştır.

OGB, OÜB ve OÜP numunelerinde düşük frekans bölgesinde Cole-Cole eğrilerinin yarım daireyi tamamlamadığı, OUM ve OUS numunelerinde özellikle nemli durumlarda yarım dairenin tamamlandığı görülebilir.

İncelenen numunelere ait kayıp $\tan(\delta(\omega))$ nicelikleri denklem (3.14) den hesaplanarak farklı nem durumları için $\tan(\delta(\omega)) - \log(\omega)$ değişimleri şekil (5.9) da verilmiştir. Tüm numunelerin kayıp $\tan(\delta(\omega))$ ları nemli durumlara gidildikçe sağa doğru kayan ve şiddetleri artan pik değişimleri vermiştir. Diğer taraftan tüm numunelerin vakum ortamındaki $\tan(\delta(\omega)) - \log(\omega)$ değişimleri belirgin bir pik değeri oluşturamamıştır. Yine şekil (5.9) dan numunelerin 1 hafta sonundaki $\tan(\delta(\omega)) - \log(\omega)$ değişimleri yaklaşıkça 3 şiddetinde piklere sahip olduğu görülebilir. OGB ve OÜB numunelerinin $\tan(\delta(\omega)) - \log(\omega)$ değişimlerinde oluşturdukları piklerin nemli ortamlara gidildikçe kayma $\Delta(\log(\omega)$ farklarının belirgin olmasına rağmen, OÜP, OUM ve OUS numunelerinde ise bu farkın gözlenmediği, 390 dakika ve 1 hafta nem durumlarında yaklaşıkça aynı pikleri verdiği görülebilir. Bunun nedeni ise üç numunenin ağırlıca montmorillonit bileşen oralarının büyük olmasıdır.

Elektrik modülü formalizmi kompleks geçirgenlik formalizminin tersi olduğundan tüm yukarıdaki sonuçlar tersine dönecektir.

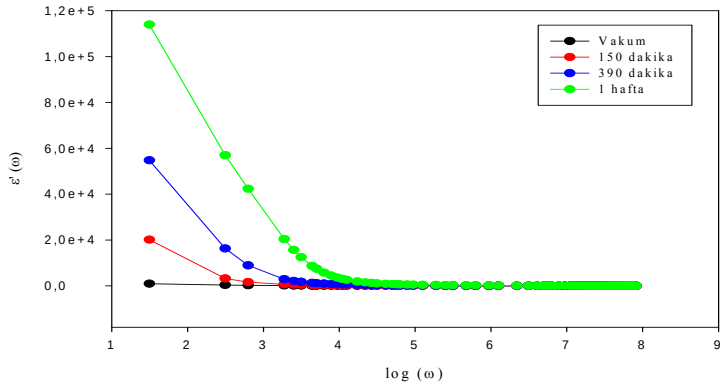
Her beş numuneye ait elektrik modülü formalizminde çizilen reel $M'(\omega)$, sanal $M''(\omega)$ ve kayıp tanjant $\tan(\delta(\omega))$ ' nın $\log(\omega)$ ya göre değişimi şekil 5.6, 5.7 ve 5.9 de, Şekil 5.8 de ise bu formalizm deki Cole-Cole eğrisi verilmiştir.

Şekil 5.6 dan tüm frekans bölgesinde her numuneler için artan nemle birlikte reel $M'(\omega)$ kısmının azaldığı görülebilir. Diğer taraftan bu azalmanın ilk üç numune için orantılı şekilde, 4. ve 5. numuneler için ise yüksek nem çeken montmorillonit bileşenlerinin büyük olmasından dolayı hızlı bir biçimde maksimum nem durumuna azaldığı görülebilir.

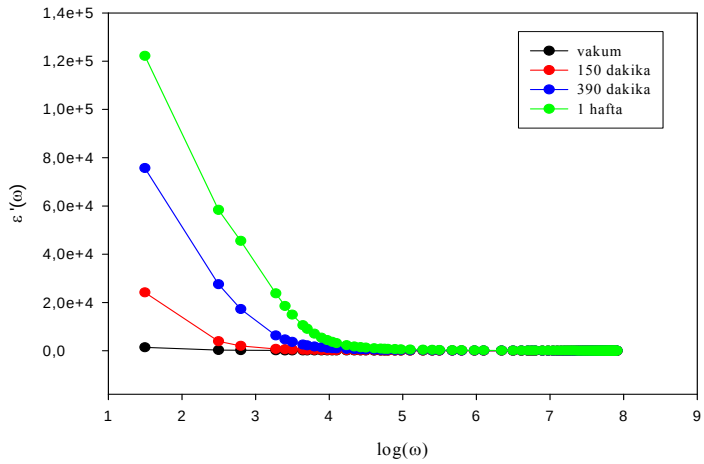
Şekil 5.7 dan tüm frekans bölgesinde her numuneler için artan nemle birlikte sanal $M''(\omega)$ kısmının da azaldığı görülebilir. İlk iki numune vakum ortamında pik

verme eğilimi göstermesine rağmen diğer numunelerde bu eğilim görülmemiştir. Diğer taraftan bu azalmanın ilk üç numune için orantılı şekilde, 4. ve 5. numuneler için ise yüksek nem çeken montmorillonit bileşenlerinin büyük olmasından dolayı hızlı bir biçimde maksimum nem durumuna azaldığı görülmüştür.

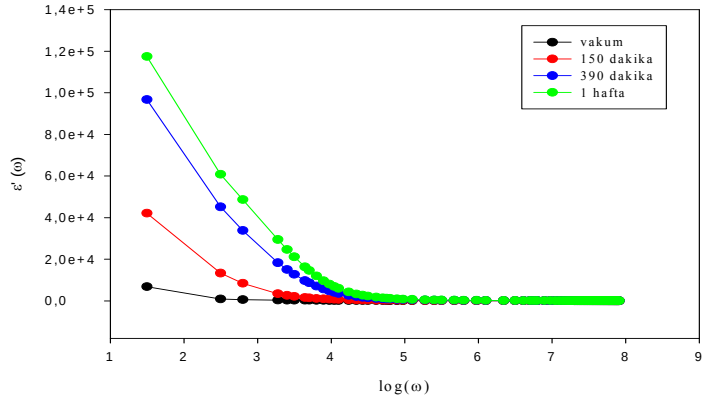
Şekil 5.8 de ki Cole-Cole eğrilerinden her beş numune içinde, düşük frekans bölgesinde MWS süreci ile yüksek frekans bölgesinde HN süreci olmak üzere iki sürecin etkili olduğu görülmektedir.



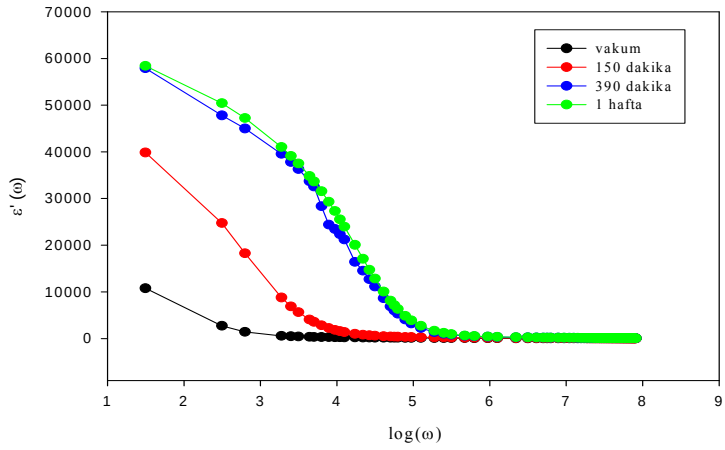

(a)



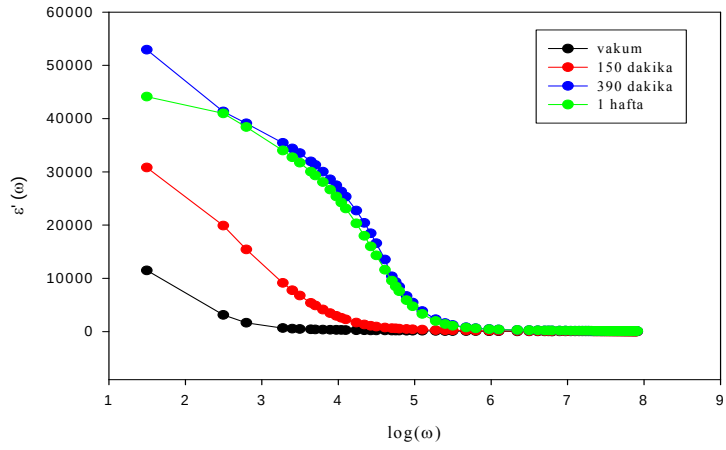

(b)




(c)

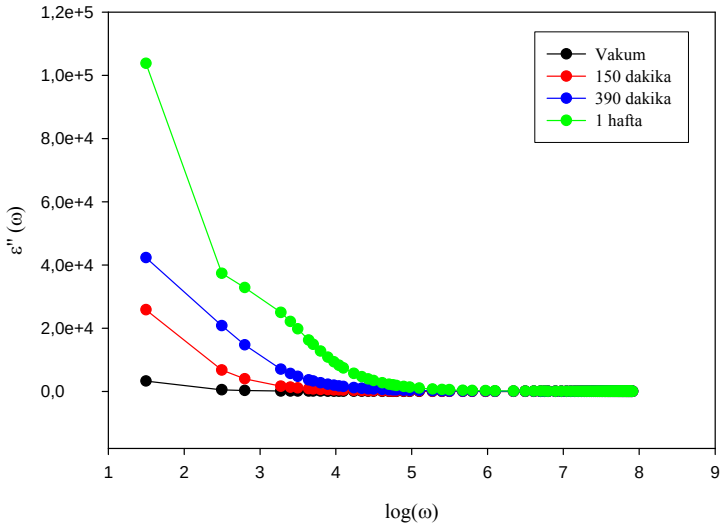



(d)

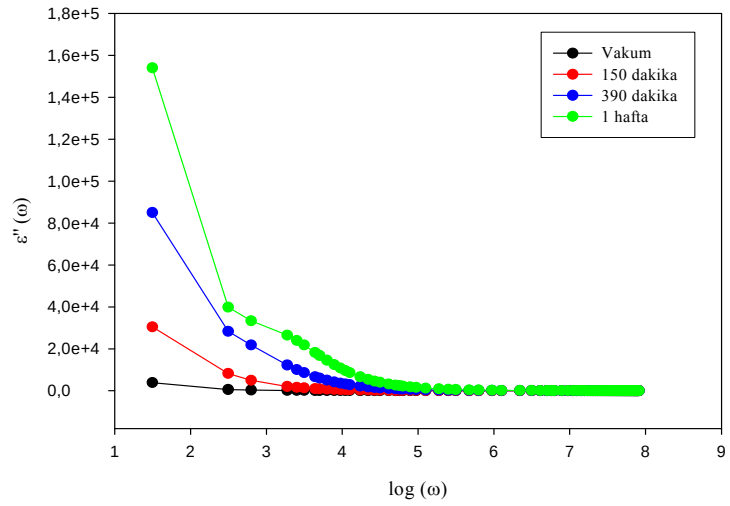



(e)

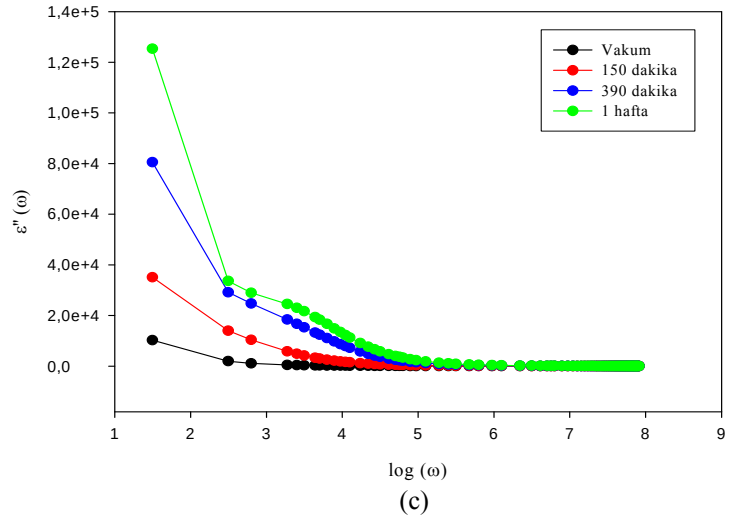
Şekil 5.3. a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $\log(\omega) - \varepsilon'(\omega)$ grafikleri.


1,2e+5
1,0e+5
8,0e+4
6,0e+4
4,0e+4
2,0e+4
0,0
ε'' (ω)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log(ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta

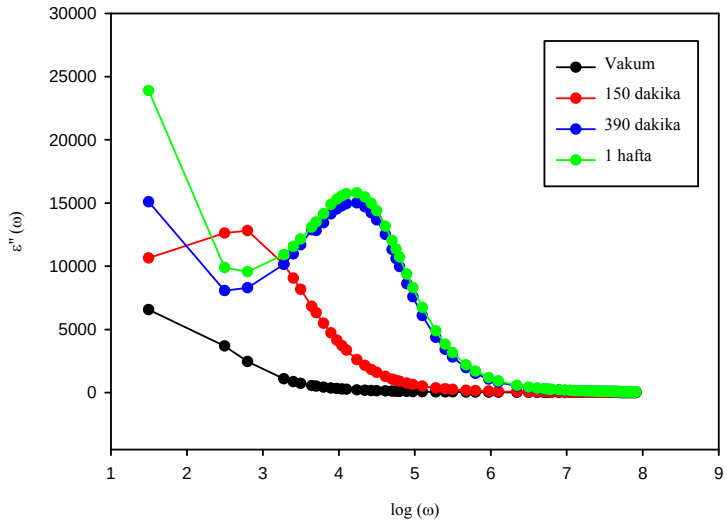
(a)


1,8e+5
1,6e+5
1,4e+5
1,2e+5
1,0e+5
8,0e+4
6,0e+4
4,0e+4
2,0e+4
0,0
ε'' (ω)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta

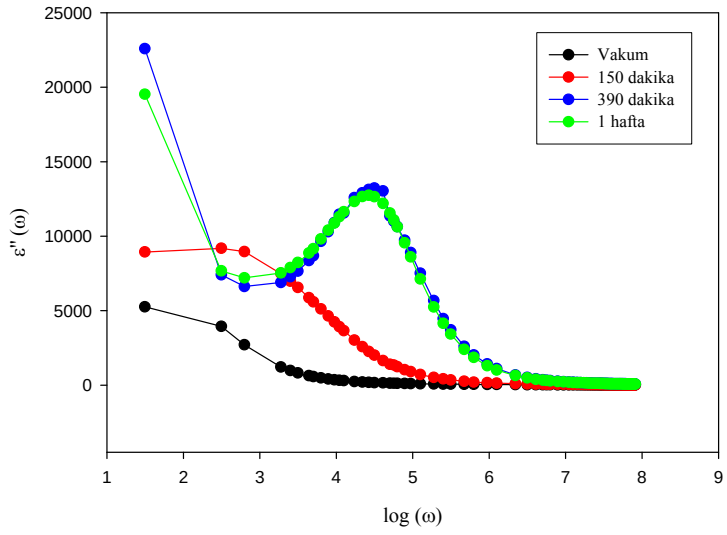
(b)


1,4e+5
1,2e+5
1,0e+5
8,0e+4
6,0e+4
4,0e+4
2,0e+4
0,0
ε'' (ω)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta

(c)

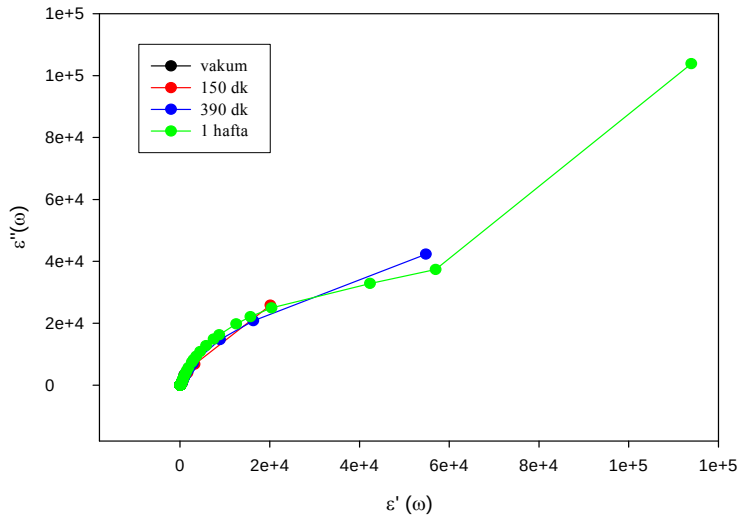



(d)

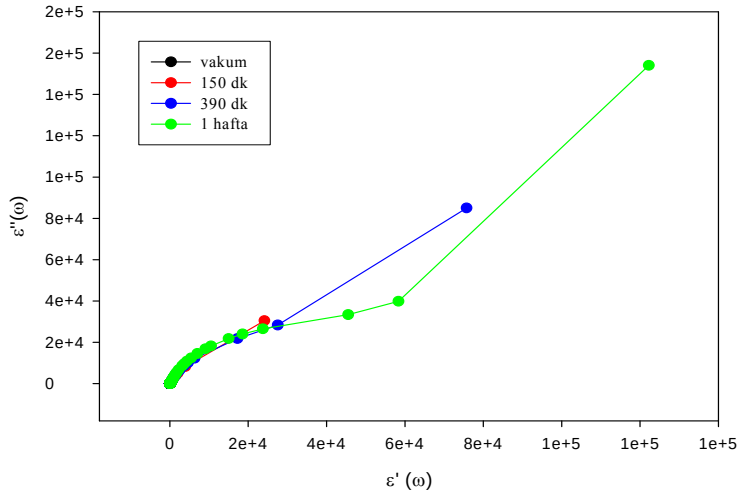



(e)

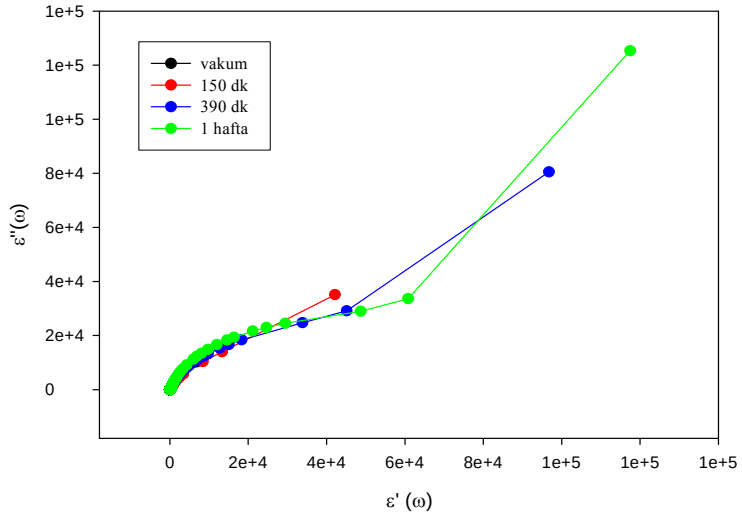
Şekil 5.4 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $\log(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ grafikleri.


vakum
150 dk
390 dk
1 hafta
ε'' (ω)
ε' (ω)
0
2e+4
4e+4
6e+4
8e+4
1e+5

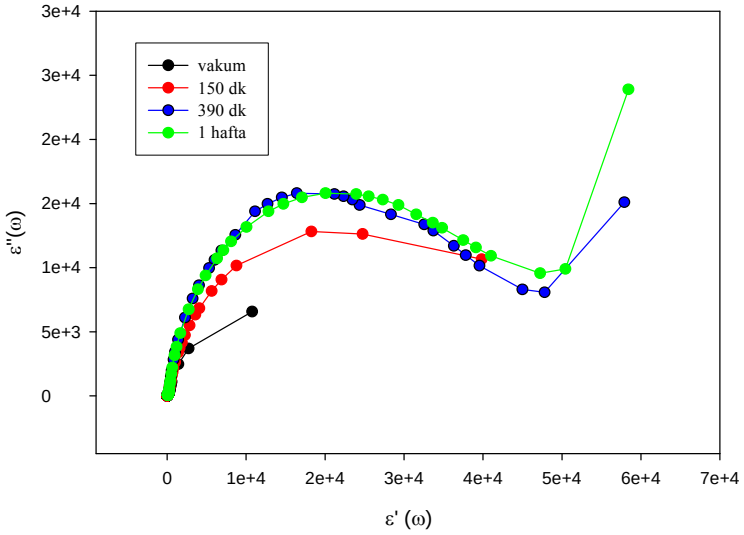
(a)


vakum
150 dk
390 dk
1 hafta
ε'' (ω)
ε' (ω)
0
2e+4
4e+4
6e+4
8e+4
1e+5

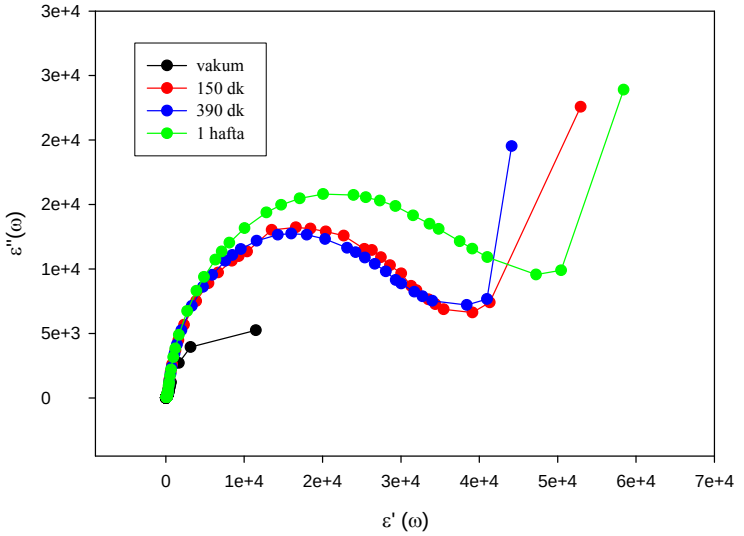
(b)


vakum
150 dk
390 dk
1 hafta
ε'' (ω)
ε' (ω)
0
2e+4
4e+4
6e+4
8e+4
1e+5

(c)

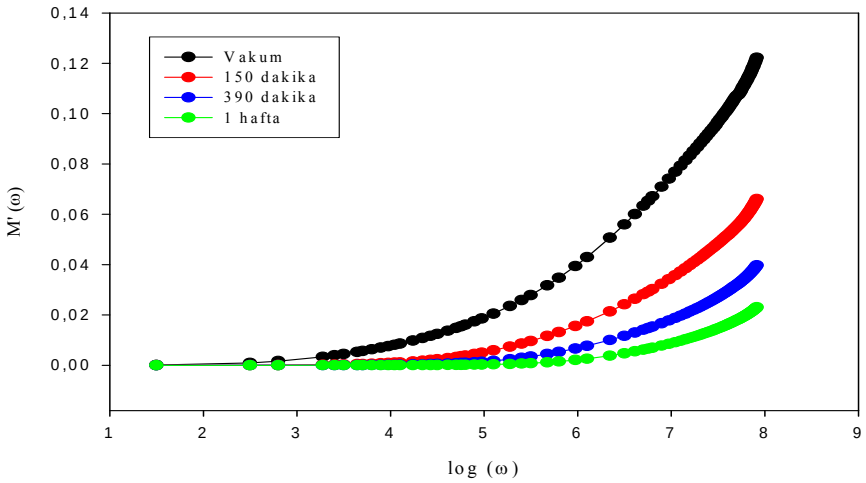



(d)

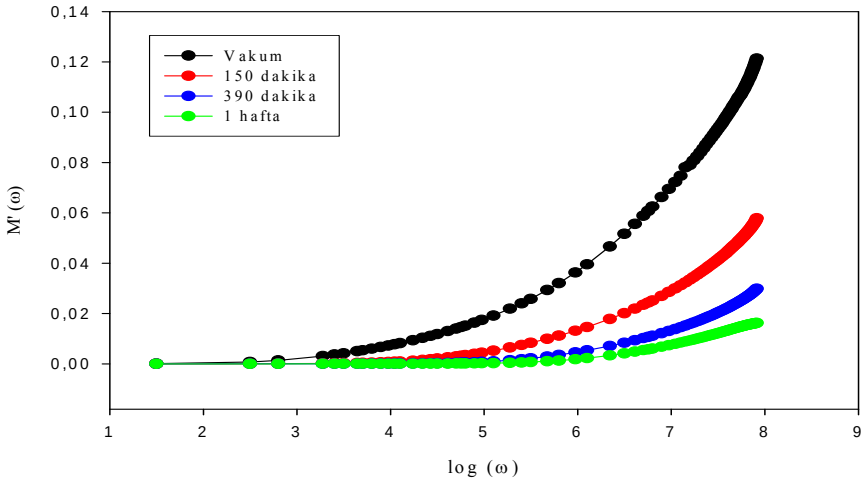



(e)

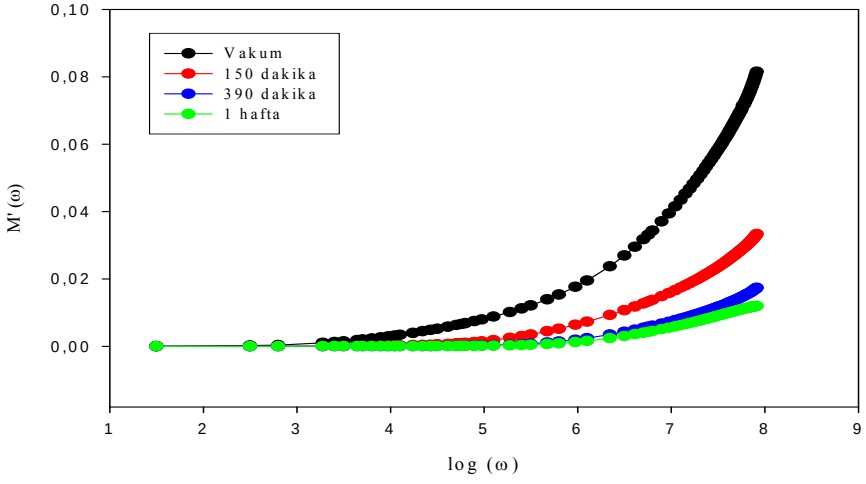
Şekil 5.5 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $\varepsilon'(\omega)-\varepsilon''(\omega)$ grafikleri.


0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
M' (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)

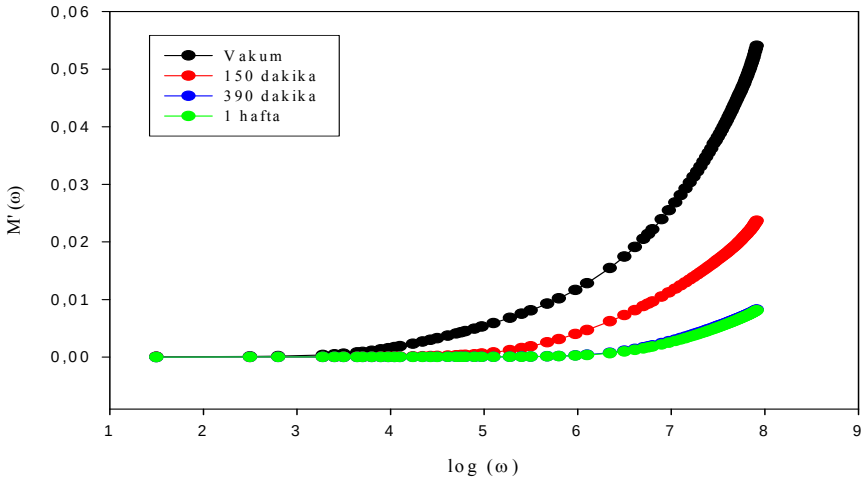
(a)


0,14
0,12
0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
M' (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)

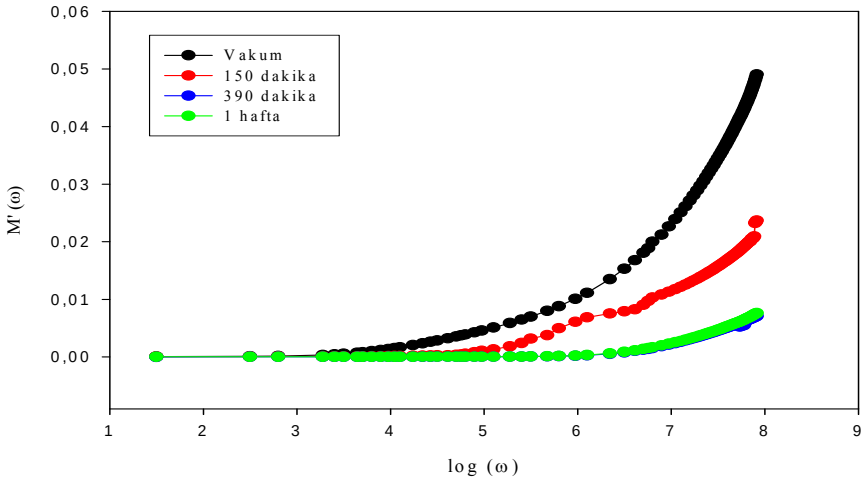
(b)


0,10
0,08
0,06
0,04
0,02
0,00
M' (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)

(c)

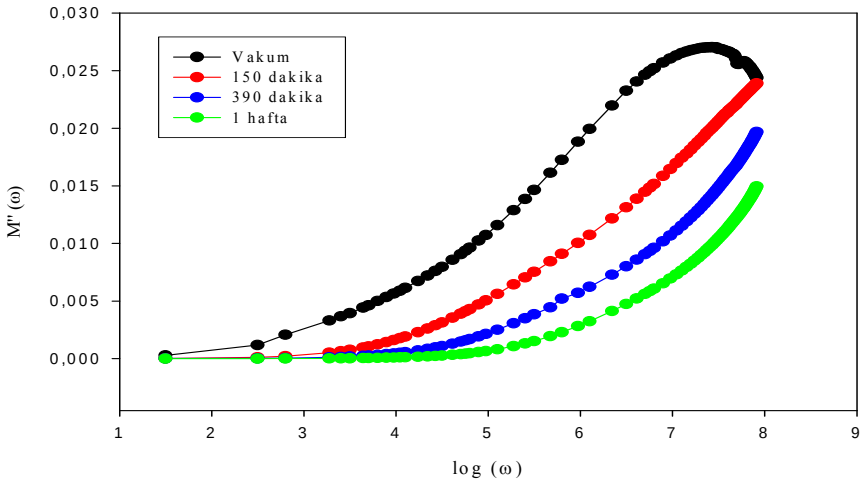



(d)

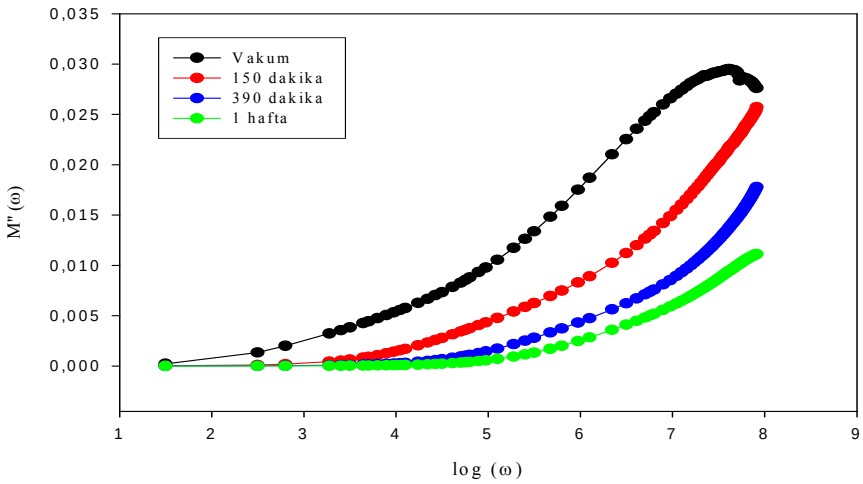



(e)

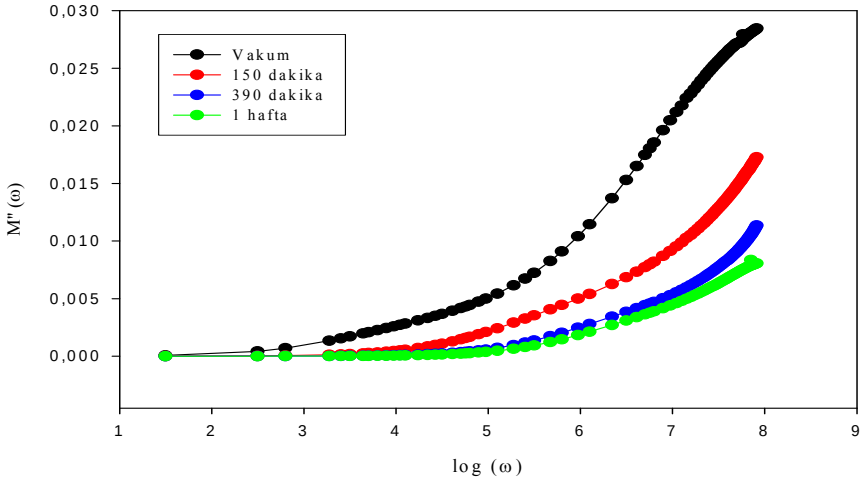
Şekil 5.6 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $\log(\omega) - M'(\omega)$ grafikleri.


0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
M'' (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)

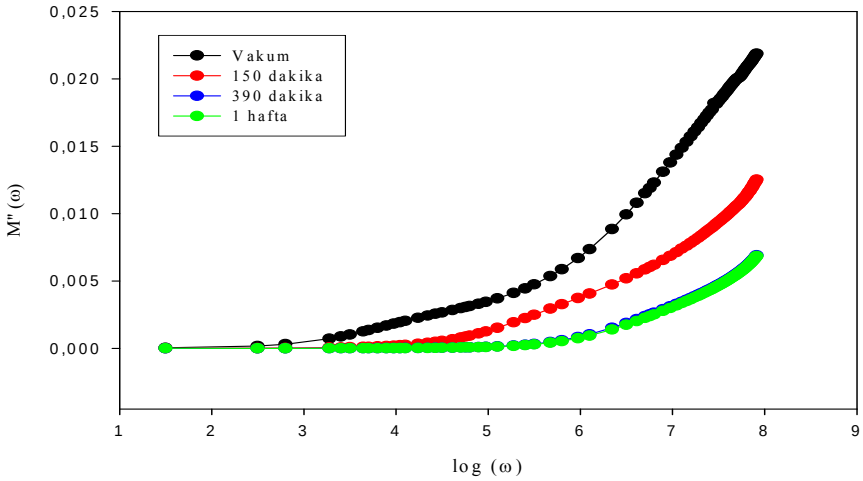
(a)


0,035
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
M'' (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)

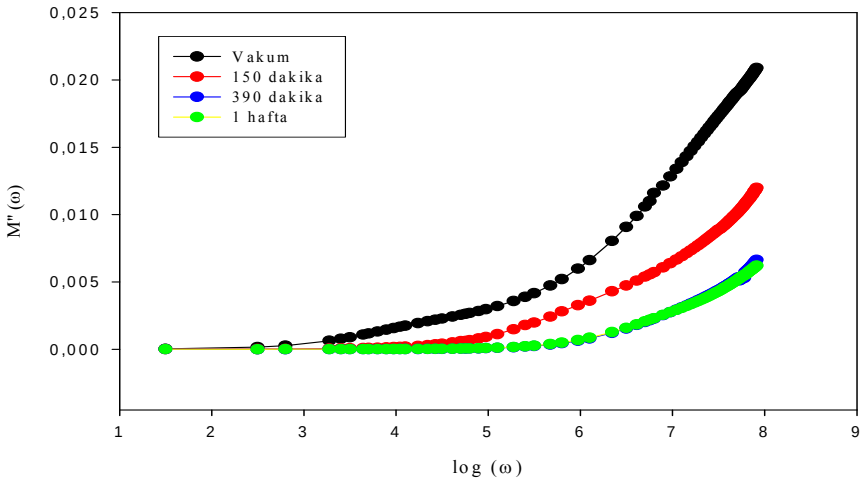
(b)


0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
M'' (ω)
Vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)

(c)

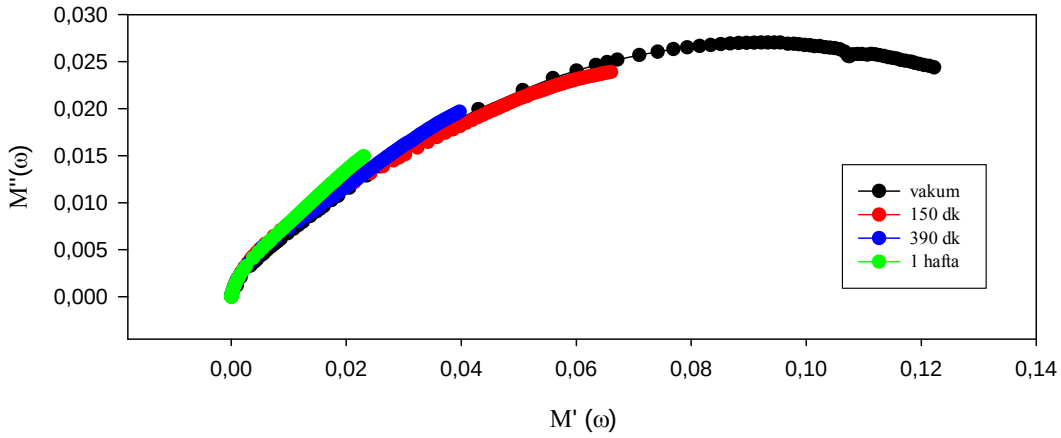



(d)

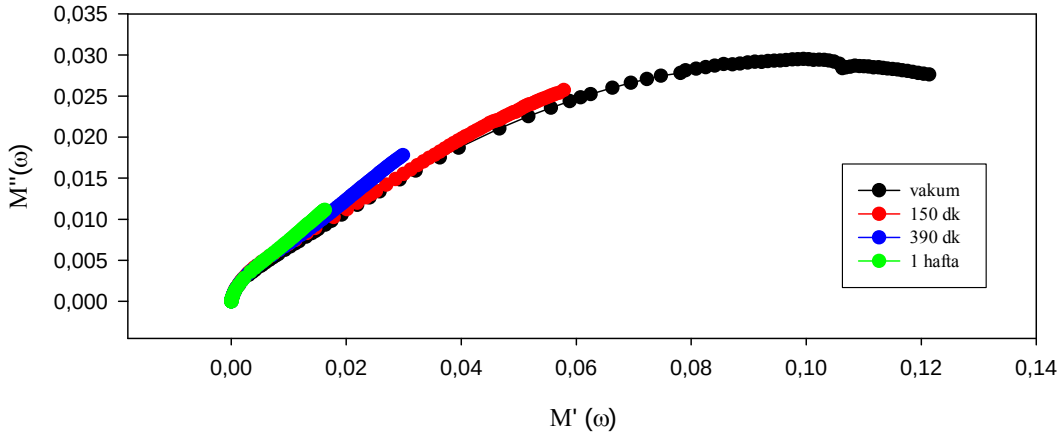



(e)

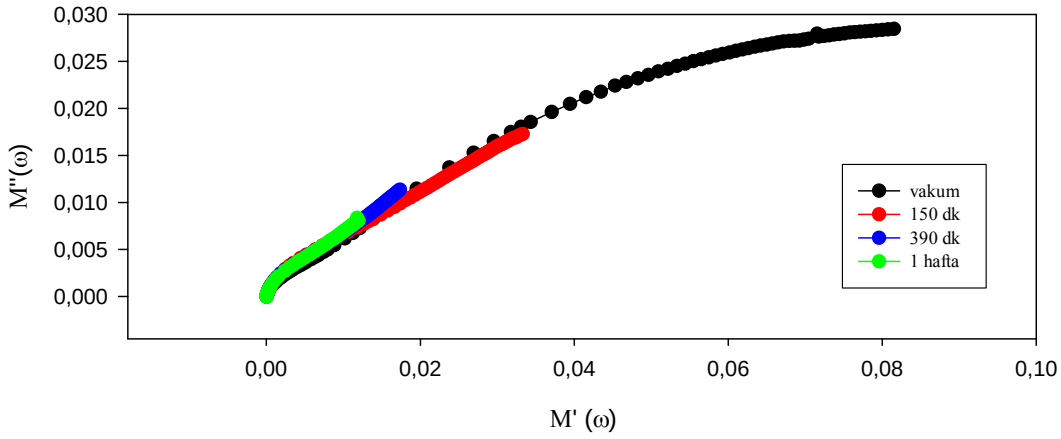
Şekil 5.7 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $\log(\omega) - M''(\omega)$ grafikleri.


0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
M''(ω)
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
M' (ω)
vakum
150 dk
390 dk
1 hafta

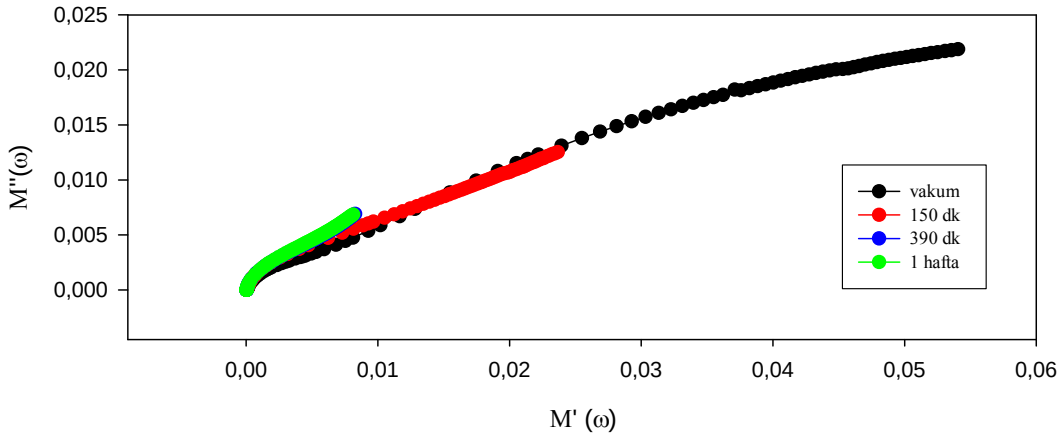
(a)


0,035
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
M''(ω)
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
M' (ω)
vakum
150 dk
390 dk
1 hafta

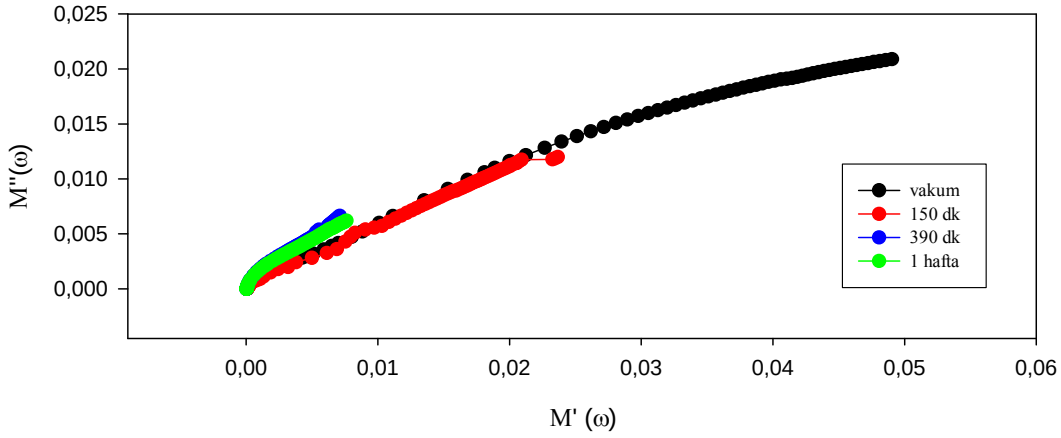
(b)


0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
M''(ω)
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
M' (ω)
vakum
150 dk
390 dk
1 hafta

(c)

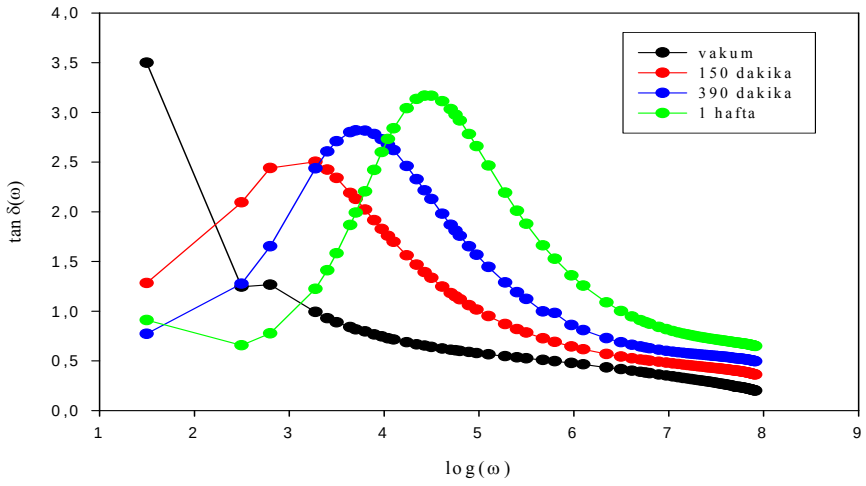



(d)

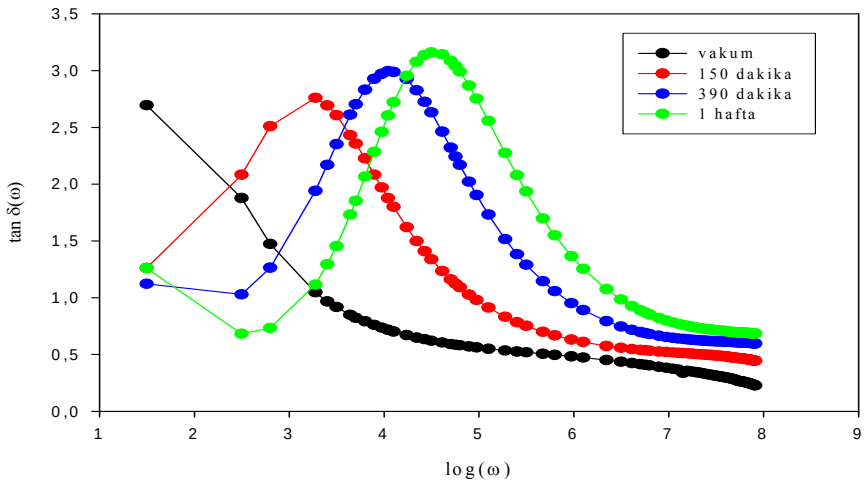



(e)

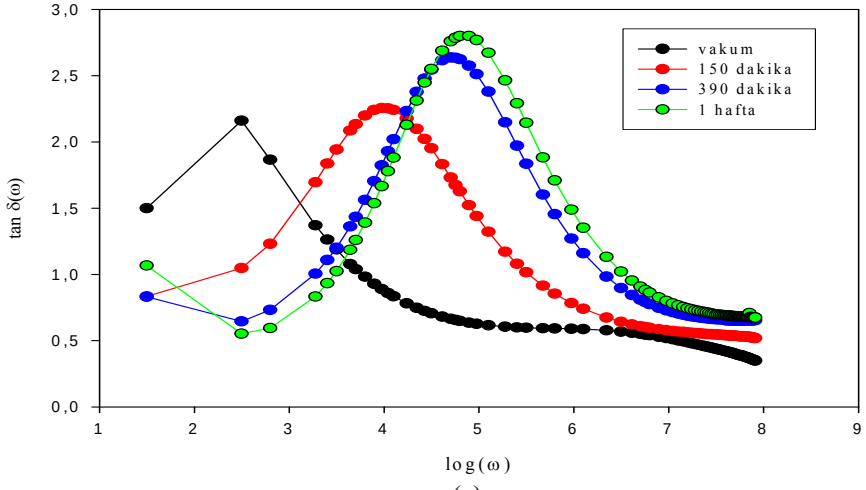
Şekil 5.8 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $M'(\omega) - M''(\omega)$ grafikleri.


4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
tan δ(ω)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log(ω)
vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta

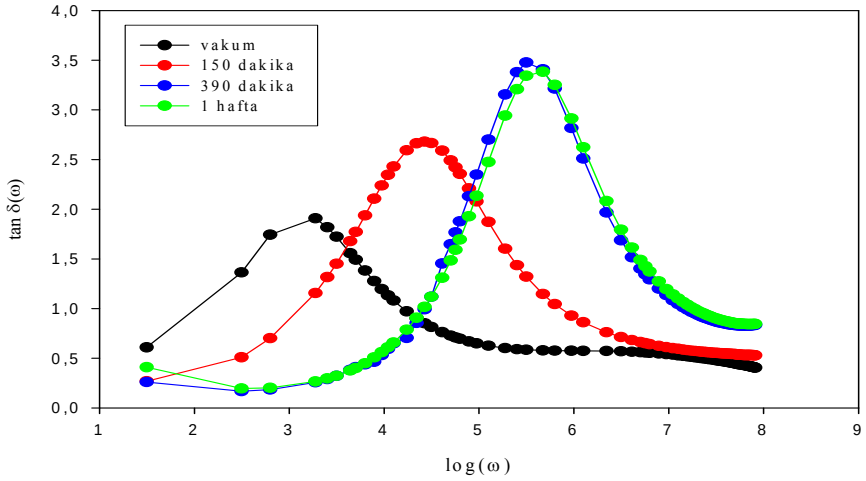
(a)


3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
tan δ(ω)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log(ω)
vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta

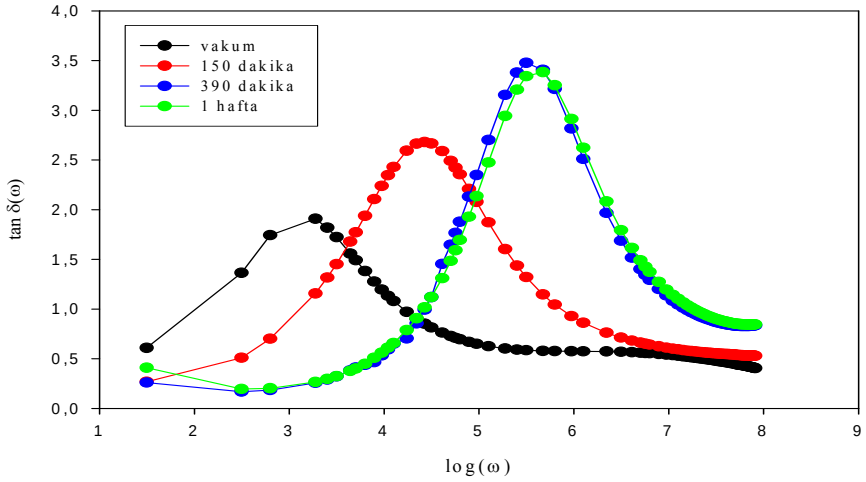
(b)


3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
tan δ(ω)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log(ω)
vakum
150 dakika
390 dakika
1 hafta

(c)




(d)




(e)

Şekil 5.9 a) OGB, b) OÜB, c) OÜP, d) OUM, e) OUS numunelerinin $\log(\omega) - \tan\delta(\omega)$ grafikleri.

## 5.4 Numunelerin Dielektrik Parametre Sonuçları

Her beş numuneye ait fit parametrelerinin bulunması amacı ile, elektrot kutuplanmasını minumuma indirerek Cole-Cole eğrilerinde yarım dairenin görünmesini mümkün hale getiren elektrik modülü formalizmi tercih edilmiştir. Beş numuneye ait deneysel değerler ve MWS modeline göre elde edilen parametreler kullanılarak çizilen Cole-Cole ve $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri şekil 5.10, 5.11, 5.12,5.13 ve 5.14 de verilmiştir.

### 5.4.1 OGB Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları

OGB numunesine ait Cole-Cole ve $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri şekil 5.10 da ve bu değişimlerden elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.4 verilmiştir.

OGB numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri incelendiğinde genel olarak düşük frekans (5-Hz-100Hz) arası noktalarında fit işleminin uyum sağlamadığı fakat bu frekans noktasından sonra uyumum başarılı olduğu görülmektedir. Yüksek frekans bölgesindeki etkin kutuplanma mekanizması yönelimli kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise arayüzeysel kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte, $\sigma$ iletkenliğide artacağından, düşük frekanslarda arayüzeysel kutuplanma daha baskın hale gelecektir. Bu, çizelge 5.4 den de görüleceği gibi, $\sigma$ değerlerinin vakumlu durum hariç artan nemle artması ile de görülebilir. $\tau$ durulma süreleri, artan nemle birlikte küçülmüştür. Bu azalma, $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerinde pik şiddetlerinin artan nemle birlikte sola doğru kayması ile de beklenen bir durumdur.

Çizelge 5.4 incelendiğinde, n parametresinin vakum ortamında 0.003 değerinde iken artan nemle büyüyerek 0.68 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu ise, artan nemle $\sigma$ iletkenliğinin frekansa bağımlılığının arttığı anlamına gelir.

Cole-Davidson parametresi $\gamma$ ise vakumlu durumda 0.372 değerlerinde iken artan nemle 0.9 değerine kadar büyümüştür. Dolayısı ile artan nem, Cole-Cole yarım dairesini simetrik şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın azalmasına neden olmuştur.

Cole-Cole parametresi olan α'nın ise, bütün nem durumları için çok küçük değerler aldığı görülebilir. Bu ise, α nın durulma sürecinde etkisiz olduğu ve Cole-Cole yarım dairesinin simetrik bir yapı gösterdiği anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan $M_s$ değeri artan nemle birlikte küçülürken, $M_\infty$ değeri ise büyümüştür.

Çizelge 5.4 OGB numunesinin, Şekil 5.9'daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

| Parametreler | VAKUM | 2,5 .SAAT | 6,5 .SAAT | 1.HAFTA |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,00081 | 0,00091 | 0,000071 | 0,0006 |
| $\tau$ (s) | 1,01 e-2 | 7,8 e-3 | 2,6 e-3 | 5,71 e-4 |
| $M_s$ | 0,0021 | 0,000068 | 0,000035 | 2,45 e-5 |
| $M_{son}$ | 0,183 | 0,215 | 0,32 | 0,6415 |
| $\gamma$ | 0, 372 | 0,892 | 0,895 | 0,898 |
| $n$ | 0,003 | 0,679 | 0,68 | 0,667 |
| $\sigma$ ($S.s^n/m$) | -7,0 e-7 | -3,0 e-8 | -5,8 e-8 | -1,28 e-7 |

### 5.4.2 OÜB Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları

OÜB numunesine ait Cole-Cole ve $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri şekil 5.11 da ve bu değişimlerden elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.5 verilmiştir.

OÜB numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri incelendiğinde genel olarak düşük frekans noktalarında fit işleminin uyum sağlamadığı fakat bu frekans noktasından sonra uyumum başarılı olduğu görülmektedir. Yüksek frekans bölgesindeki etkin kutuplanma mekanizması yönelimli kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise arayüzeysel kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte, σ iletkenliğinin de artacağından, düşük frekanslarda arayüzeysel kutuplanma daha baskın hale gelecektir. Bu, çizelge 5.5 den de görüleceği gibi σ değerlerinin vakumlu durum hariç artan nemle artması ile de görülebilir. $\tau$ durulma süreleri,

artan nemle birlikte küçülmüştür. Bu azalma, $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerinde pik şiddetlerinin artan nemle birlikte sola doğru kayması ile de beklenen bir durumdur.

Çizelge 5.5 incelendiğinde, n parametresinin vakum ortamında 0.001 değerinde iken artan nemle büyüyerek 0.65 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu ise, artan nemle σ iletkenliğinin frekansa bağımlılığının arttığı anlamına gelir.

Cole-Davidson parametresi $\gamma$ ise vakumlu durumda 0.364 değerinde iken artan nemle 0.95 değerine kadar büyümüştür. Dolayısı ile artan nem, Cole-Cole yarım dairesini simetrik şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın azalmasına neden olmuştur.

Cole-Cole parametresi olan $\alpha$'nın ise, bütün nem durumları için sıfıra yakın çok küçük değerler aldığı görülebilir. Bu ise, $\alpha$'nın durulma sürecinde etkisiz olduğu ve Cole-Cole yarım dairesinin simetrik bir yapı gösterdiği anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan $M_s$ değeri artan nemle birlikte küçülürken, $M_\infty$ değeri ise büyümüştür.

Çizelge 5.5 OÜB numunesinin, Şekil 5.9'daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

| Parametreler | VAKUM | 2,5 .SAAT | 6,5 SAAT | 1.HAFTA |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,00253 | 0,00001 | 0,63 e-3 | 5,2 e-2 |
| $\tau$ (s) | 3,0 e-2 | 4,90 e-3 | 0,78 e-3 | 0,51 e-3 |
| $M_s$ | 0,00144 | 7,5 e-5 | 0,425 e-4 | 0,16 e-4 |
| $M_{son}$ | 0,198 | 0,453 | 0,4 | 0,41 |
| $\gamma$ | 0,364 | 0,94 | 0,955 | 0,955 |
| $n$ | 0,001 | 0,688 | 0,6378 | 0,655 |
| $\sigma$ (S.s$^n$/m) | -9.5 e-7 | -3,54 e-8 | -1,724 e-7 | -2,2 e-7 |

### 5.4.3 OÜP Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları

OÜP numunesine ait Cole-Cole ve $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri şekil 5.12 da ve bu değişimlerden elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.6 verilmiştir.

OÜP numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri incelendiğinde genel olarak düşük frekans noktalarında fit işleminin uyum sağlamadığı fakat bu frekans noktasından sonra uyumum başarılı olduğu görülmektedir. Yüksek frekans bölgesindeki etkin kutuplanma mekanizması yönelimli kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise arayüzeysel kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte, $\sigma$ letkenliğinin de artacağından, düşük frekanslarda arayüzeysel kutuplanma daha baskın hale gelecektir. Bu, çizelge 5.6 den de görüleceği gibi $\sigma$ değerlerinin vakumlu durum hariç artan nemle artması ile de görülebilir. $\tau$ durulma süreleri, artan nemle birlikte küçülmüştür. Bu azalma, $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerinde pik şiddetlerinin artan nemle birlikte sola doğru kayması ile de beklenen bir durumdur.

Çizelge 5.6 incelendiğinde, n parametresinin vakum ortamında 0.003 değerinde iken artan nemle büyüyerek ortalama 0.67 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu ise, artan nemle $\sigma$ iletkenliğinin frekansa bağımlılığının arttığı anlamına gelir.

Cole-Davidson parametresi $\gamma$ se vakumlu durumda 0.38 değerinde iken artan nemle 0.9 değerine kadar büyümüştür. Dolayısı ile artan nem, Cole-Cole yarım dairesini simetrik şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın azalmasına neden olmuştur.

Cole-Cole parametresi olan $\alpha$'nın ise, bütün nem durumları için çok küçük değerler aldığı görülebilir. Bu ise, $\alpha$' nın durulma sürecinde etkisiz olduğu ve Cole-Cole yarım dairesinin simetrik bir yapı gösterdiği anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan $M_s$ değeri tüm nem durumları için çok küçük değerler alırken $M_\infty$ ise artan nemle birlikte büyümüştür.

5.6 OÜP numunesinin, Şekil 5.9'daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

| Parametreler | VAKUM | 2,5 .SAAT | 6,5 SAAT | 1.HAFTA |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,0253 | 0,01 | 0,1 e-1 | 0,002 |
| $\tau$ (s) | 0,030 | 0.001 | 0.000265 | 0,0002 |
| $M_s$ | 6,4e-4 | 7,5 e-5 | 0,4028 e-4 | 0,25 e-4 |
| $M_{son}$ | 0,195 | 0,35 | 0,53 | 0,55 |
| $\gamma$ | 0,38 | 0,90 | 0,91 | 0,90 |
| $n$ | 0,003 | 0,6768 | 0,67 | 0,675 |
| $\sigma$ (S.s$^n$/m) | -2,4 e-6 | -7,6 e-8 | -1,6 e-7 | -2,13 e-7 |

### 5.4.4 OUM Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları

OUM numunesine ait Cole-Cole ve $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri şekil 5.13 da ve bu değişimlerden elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.7 verilmiştir.

OUM numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri incelendiğinde genel olarak düşük frekans (5-Hz-100Hz) arası noktalarında fit işleminin uyum sağlamadığı fakat bu frekans noktasından sonra uyumum başarılı olduğu görülmektedir. Yüksek frekans bölgesindeki etkin kutuplanma mekanizması yönelimli kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise arayüzeysel kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte, $\sigma$ iletkenliğinin de artacağından, düşük frekanslarda arayüzeysel kutuplanma daha baskın hale gelecektir. Bu, çizelge 5.7 den de görüleceği gibi $\sigma$ değerlerinin vakumlu durum hariç artan nemle artması ile de görülebilir. $\tau$ durulma süreleri, artan nemle birlikte küçülmüştür. Bu azalma, $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerinde pik şiddetlerinin artan nemle birlikte sola doğru kayması ile de beklenen bir durumdur.

Çizelge 5.7 incelendiğinde, n parametresinin bütün nem durumlarında yaklaşıkça sabit 0.67 değerini almaktadır.

Cole-Davidson parametresi $\gamma$ ise her nem durumunda 1' e yakındır. Dolayısı ile, Cole-Cole yarım dairesini simetrik şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın azalmasına neden olmuştur.

Cole-Cole parametresi olan $\alpha$'nın ise, bütün nem durumları için çok küçük değerler aldığı görülebilir. Bu ise, $\alpha$ nın durulma sürecinde etkisiz olduğu ve Cole-Cole yarım dairesinin simetrik bir yapı gösterdiği anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan $M_s$ değeri artan nemle birlikte küçülürken, $M_\infty$ değeri ise büyümüştür.

Çizelge 5.7 OUM numunesinin, Şekil 5.9'daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

| Parametreler | VAKUM | 2,5 .SAAT | 6,5 SAAT | 1.HAFTA |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,00013 | 0,00001 | 1,0 e-5 | 1,2 e-5 |
| $\tau$ (s) | 5,7 e-3 | 3,35 e-4 | 2,713 e-5 | 2,5 e-5 |
| $M_s$ | 11,34 e-5 | 7,901 e-5 | 4,2 e-5 | 4,26 e-5 |
| $M_{son}$ | 0,20 | 0,38 | 0,42 | 0,45 |
| $\gamma$ | 0,891 | 0,96 | 0,995 | 0,995 |
| $n$ | 0,667 | 0,686 | 0,624 | 0,625 |
| $\sigma$ (S.s$^n$/m) | -4,7 e-8 | -9,36 e-8 | -6,984 e-7 | -7,182 e-7 |

### 5.4.5 OUS Numunesinin Dielektrik Parametre Sonuçları

OUS numunesine ait Cole-Cole ve $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri şekil 5.14 da ve bu değişimlerden elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.8 verilmiştir.

OUS numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri incelendiğinde genel olarak düşük frekans (5-Hz-100Hz) arası noktalarında fit işleminin uyum sağlamadığı fakat bu frekans noktasından sonra uyumum başarılı olduğu görülmektedir. Yüksek frekans bölgesindeki etkin kutuplanma mekanizması yönelimli kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise arayüzeysel kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte, $\sigma$ iletkenliğinin de artacağından, düşük frekanslarda arayüzeysel kutuplanma daha baskın hale gelecektir. Bu, çizelge 5.8 den de görüleceği gibi $\sigma$ değerlerinin vakumlu durum hariç artan nemle artması ile de görülebilir. $\tau$ durulma süreleri, artan nemle birlikte küçülmüştür. Bu azalma, $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerinde pik şiddetlerinin artan nemle birlikte sola doğru kayması ile de beklenen bir durumdur.

Çizelge 5.8 incelendiğinde, n parametresinin bütün nem durumlarında yaklaşıkça sabit 0.67 değerini almaktadır.

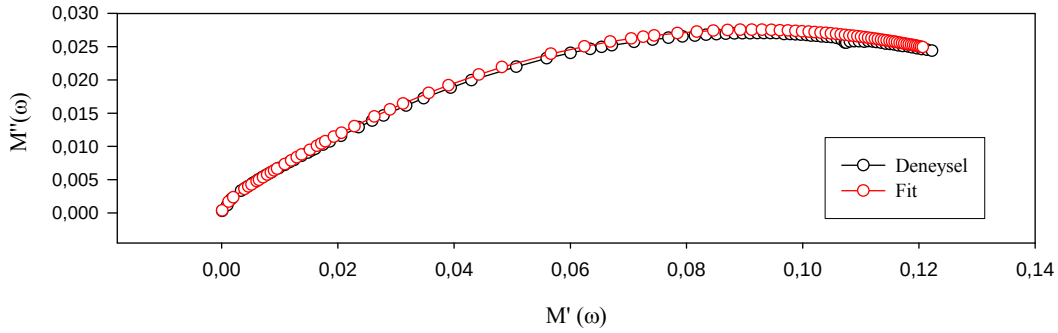
Cole-Davidson parametresi $\gamma$ ise her nem durumunda bir önceki numunede olduğu gibi 1' e yakındır. Dolayısı ile, Cole-Cole yarım dairesini simetrik şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın azalmasına neden olmuştur.

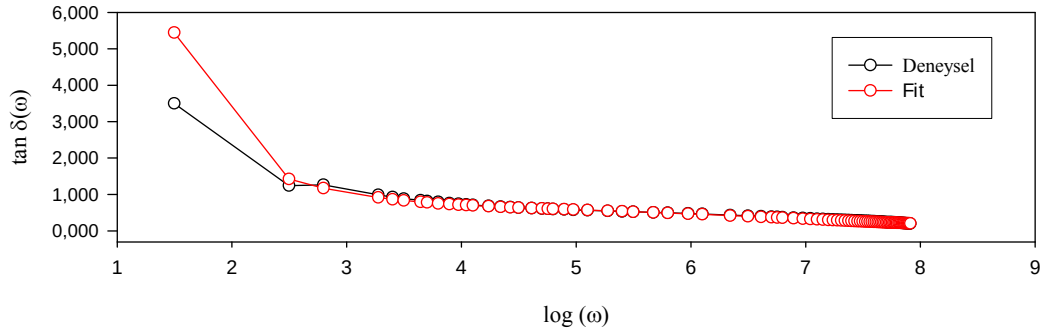
Cole-Cole parametresi olan $\alpha$'nın ise, bütün nem durumları için çok küçük değerler aldığı görülebilir. Bu ise, $\alpha$ nın durulma sürecinde etkisiz olduğu ve Cole-Cole yarım dairesinin simetrik bir yapı gösterdiği anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan $M_s$ değeri artan nemle birlikte küçülürken, $M_\infty$ değeri ise büyümüştür.

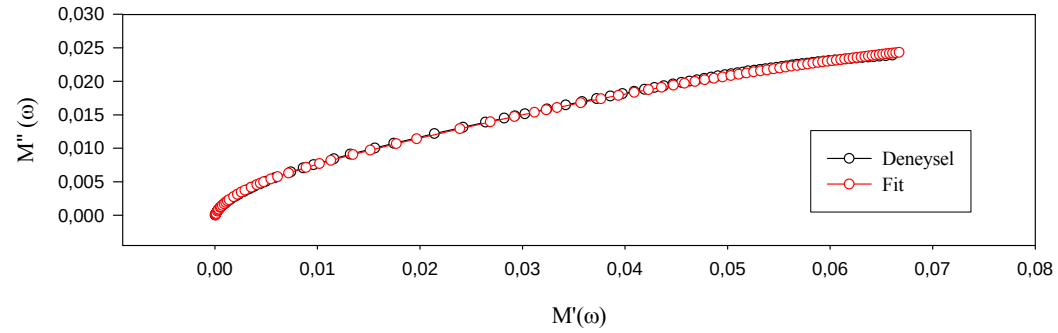
Çizelge 5.8 OUS numunesinin, Şekil 5.9'daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

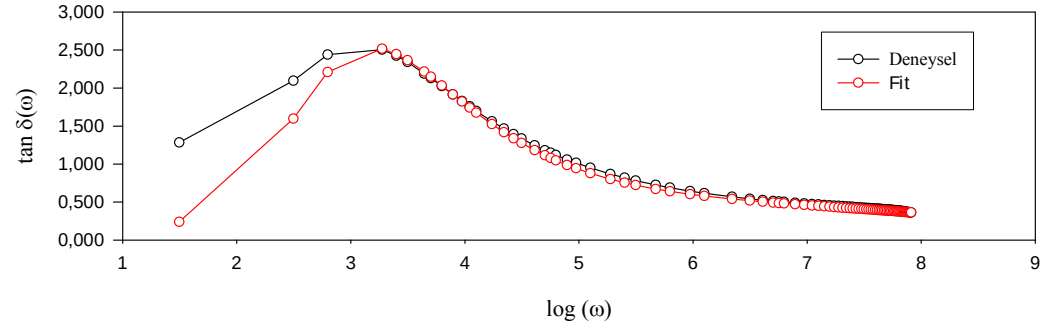
| Parametreler | VAKUM | 2.SAAT | 4.SAAT | 1.HAFTA |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ | 0,00013 | 0,00002 | 0,0004 | 1,2 e-5 |
| $\tau$ (s) | 5,7 e-3 | 1,35 e-4 | 1,892 e-5 | 2,25 e-5 |
| $M_s$ | 0,000124 | 11,901 e-5 | 4,32 e-5 | 4,36 e-5 |
| $M_{son}$ | 0,23 | 0,68 | 0,62 | 0,45 |
| $\gamma$ | 0,95 | 0,94 | 0,9868 | 0,995 |
| $n$ | 0,657 | 0,686 | 0,620 | 0,630 |
| $\sigma$ ($S.s^n/m$) | -6,85 e-8 | -10,6 e-8 | -8,394 e-7 | -7,0 e-7 |


M''(ω)
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
M' (ω)
Deneysel
Fit

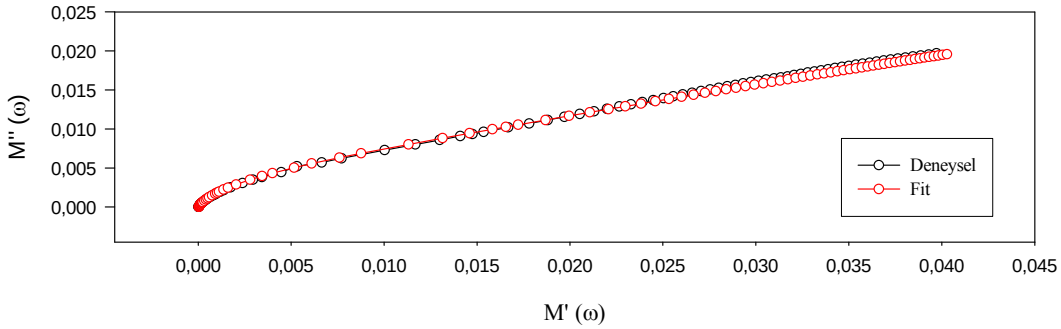

tan δ(ω)
6,000
5,000
4,000
3,000
2,000
1,000
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

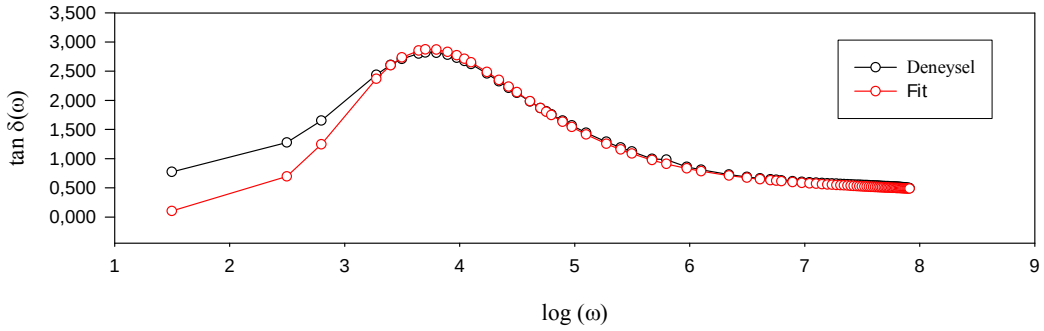
(a)


M'' (ω)
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
0,08
M'(ω)
Deneysel
Fit

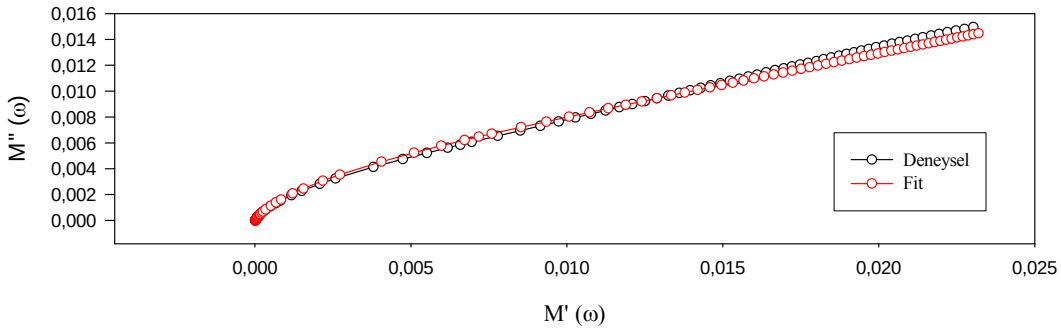

tan δ(ω)
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

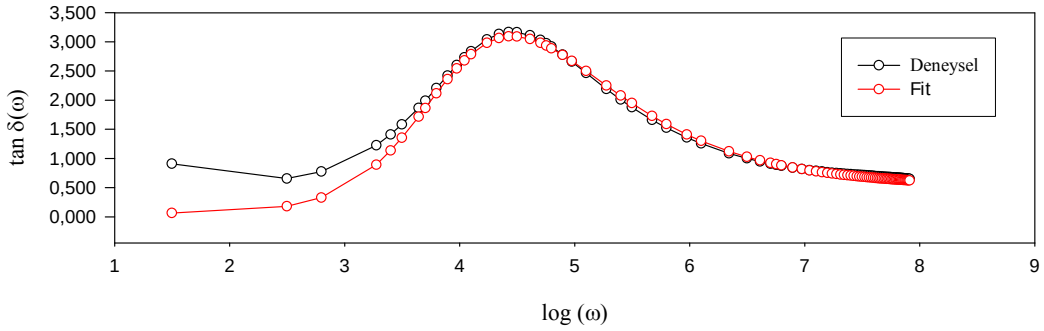
(b)



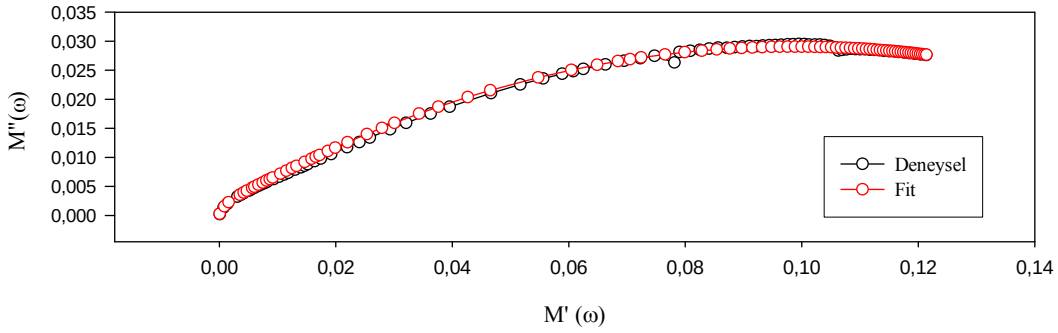

(c)

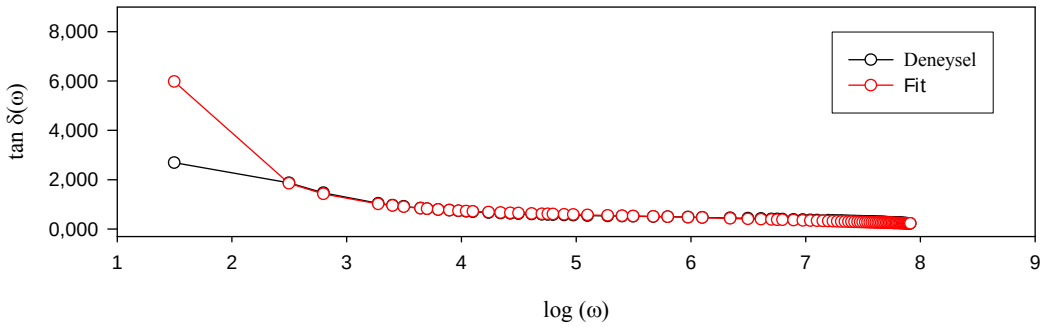


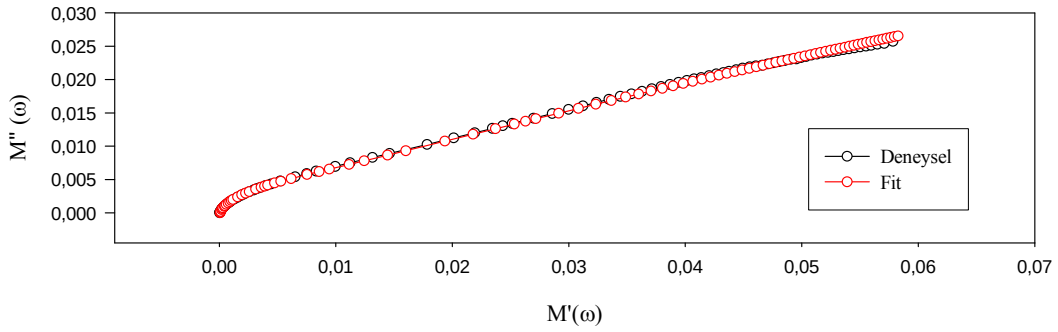

(d)

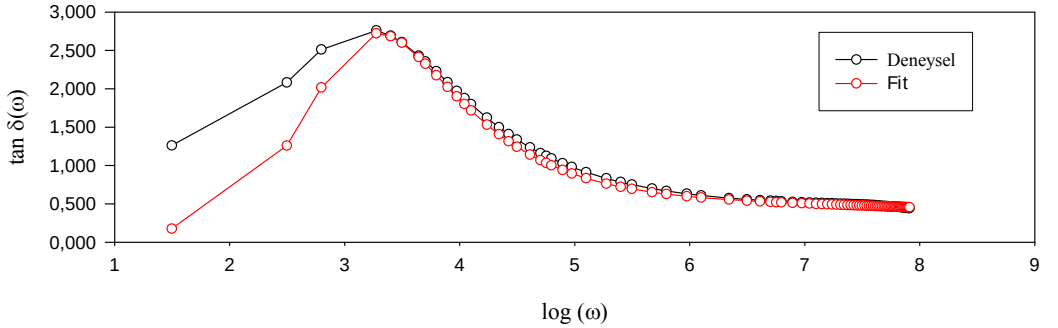
Şekil 5.10. OGB kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 150 dakika, (c) 390 dakika ve (d) 1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole ile log(ω)-tanδ(ω) eğrileri.


M''(ω)
0,035
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
M' (ω)
Deneysel
Fit

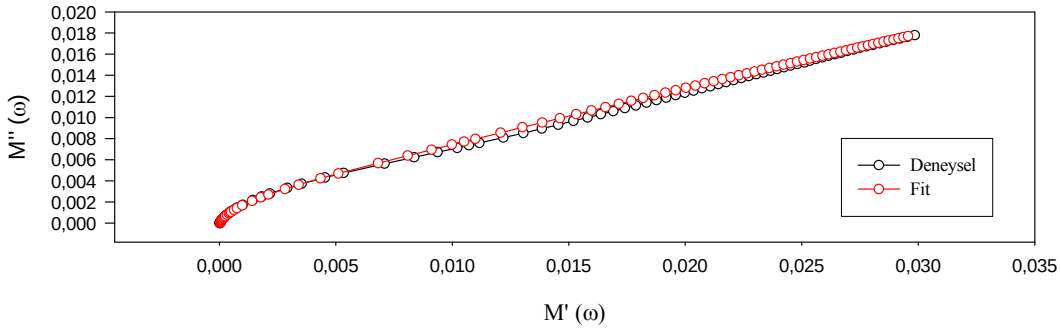

tan δ(ω)
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

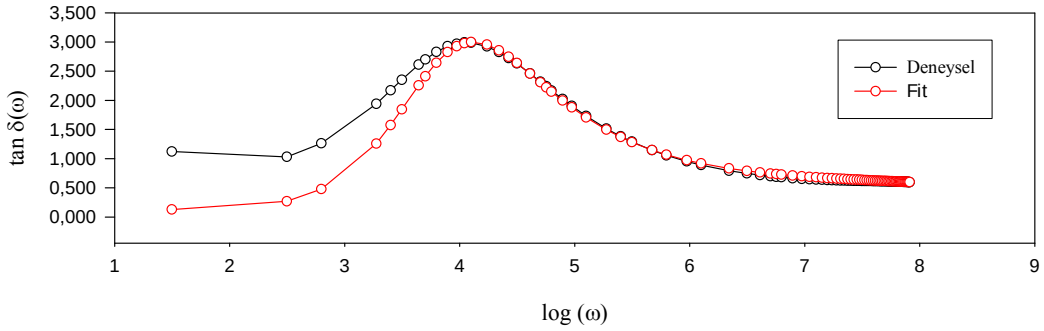
(a)


M'' (ω)
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
M'(ω)
Deneysel
Fit

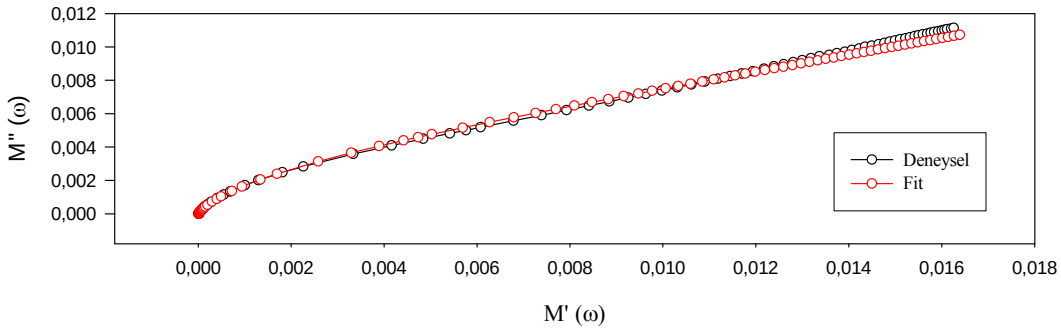

tan δ(ω)
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

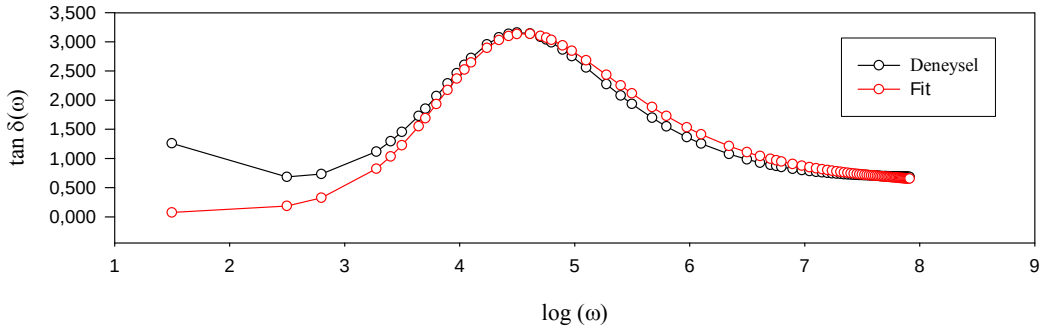
(b)



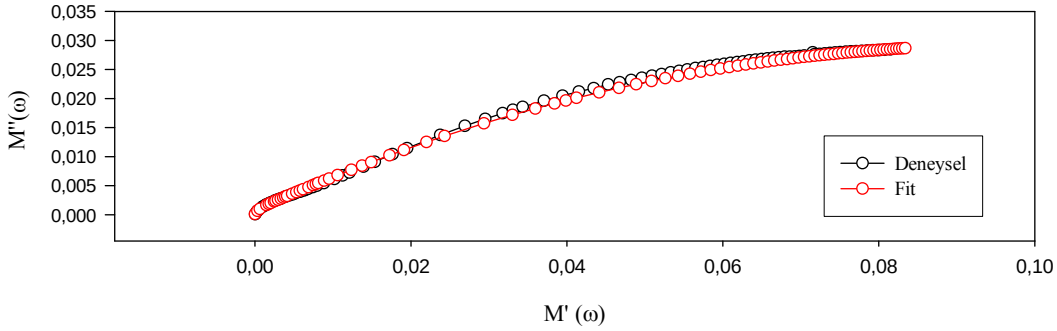

(c)

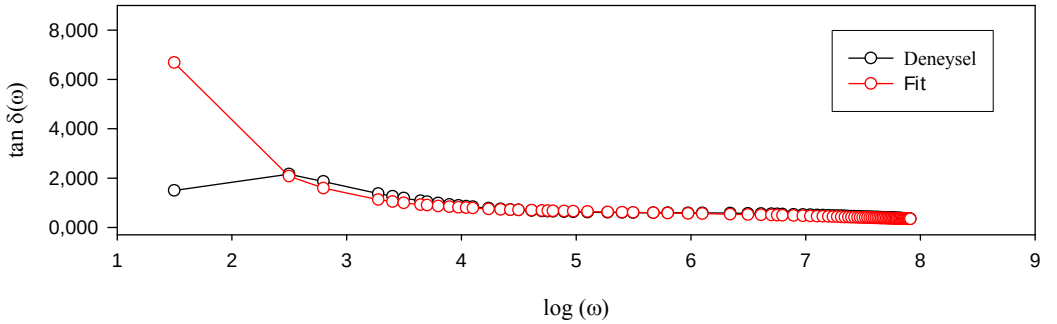


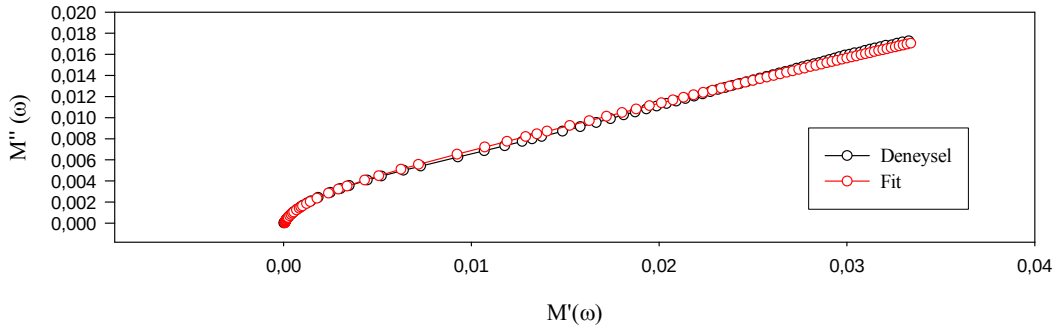

(d)

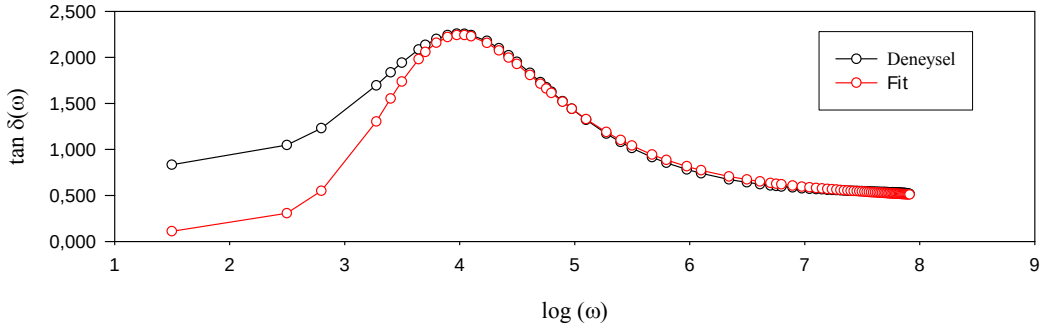
Şekil 5.11 OÜB kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 150 dakika, (c) 390 dakika ve (d) 1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole ile log(ω)-tanδ(ω) eğrileri.


M''(ω)
0,035
0,030
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
M' (ω)
Deneysel
Fit

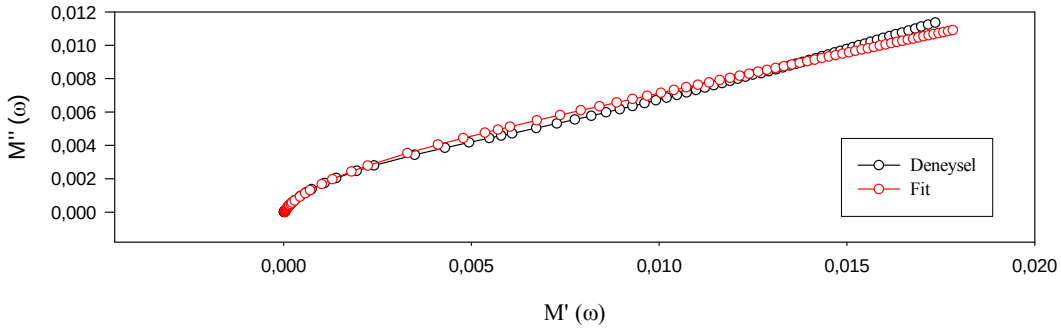

tan δ(ω)
8,000
6,000
4,000
2,000
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

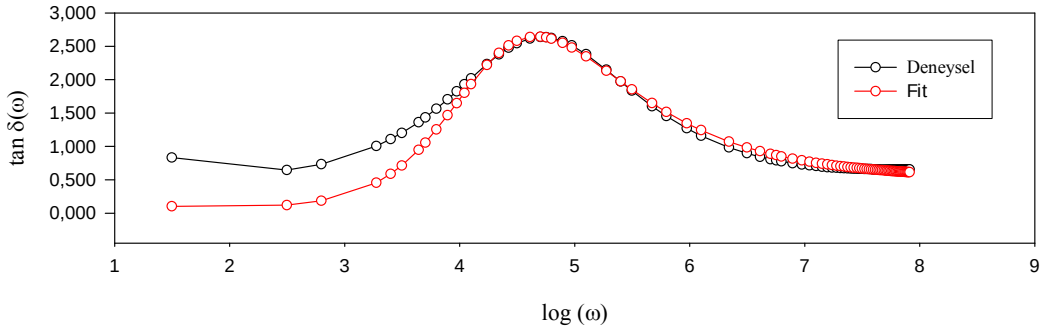
(a)


M'' (ω)
0,020
0,018
0,016
0,014
0,012
0,010
0,008
0,006
0,004
0,002
0,000
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
M'(ω)
Deneysel
Fit

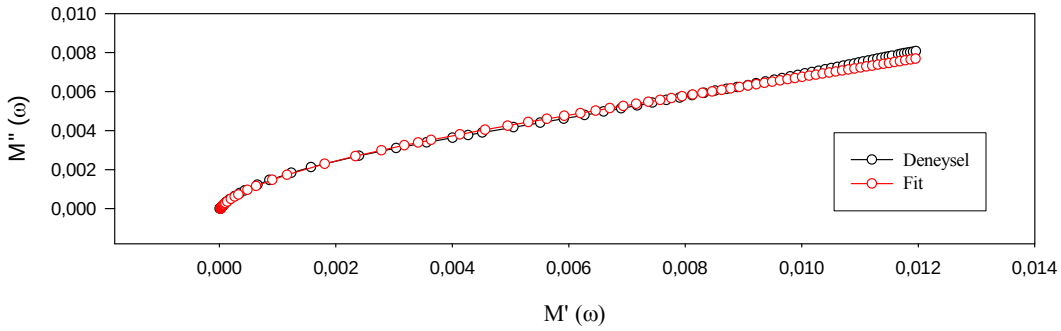

tan δ(ω)
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

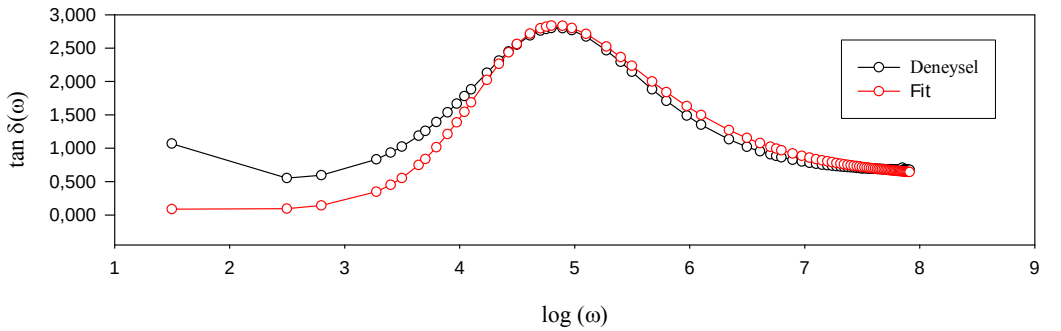
(b)



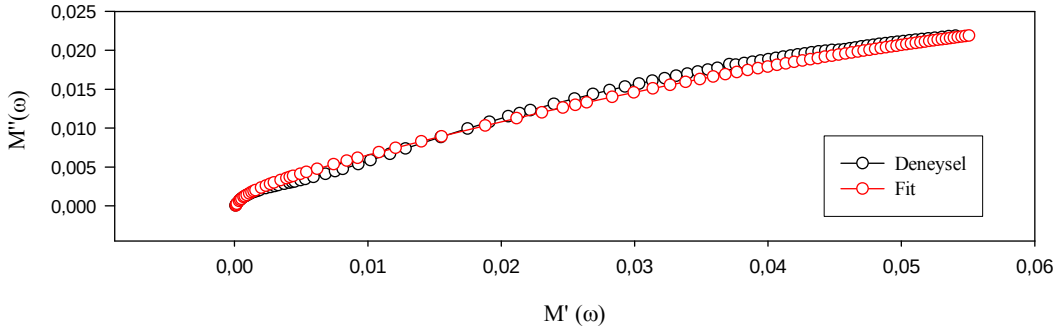

(c)

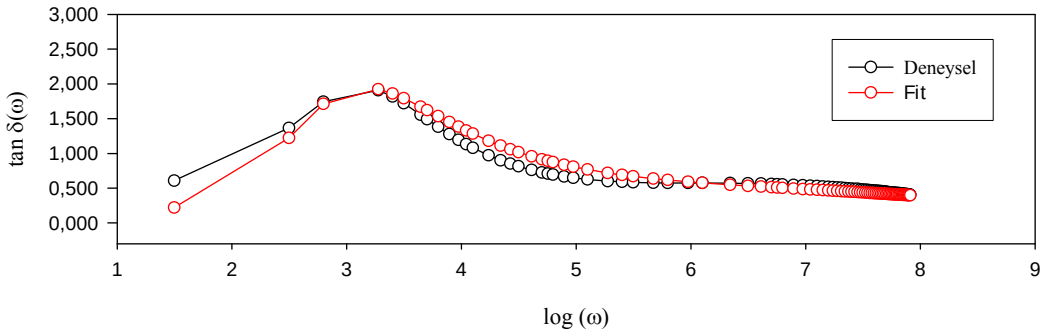


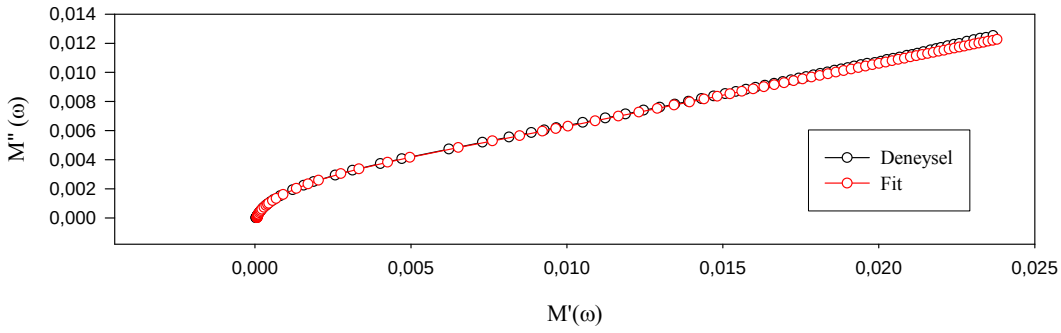

(d)

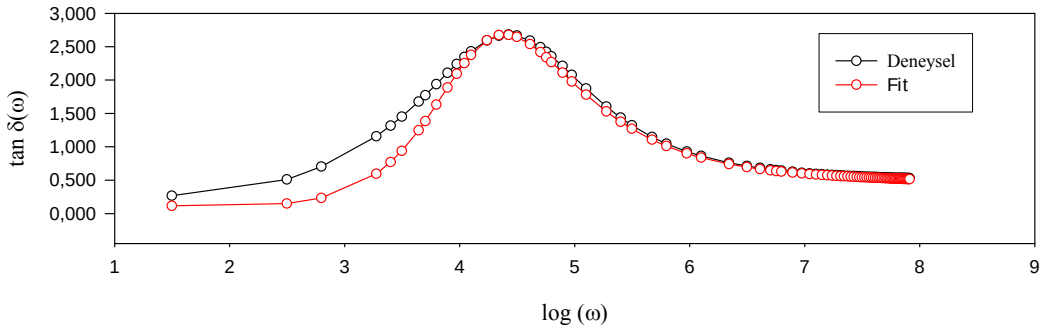
Şekil 5.12 OÜP kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 150 dakika, (c) 390 dakika ve (d) 1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole ile log(ω)-tanδ(ω) eğrileri.


M''(ω)
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
M' (ω)
Deneysel
Fit

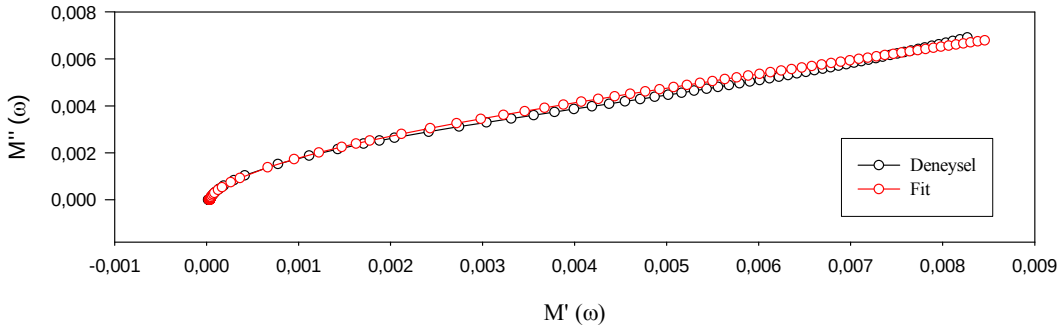

tan δ(ω)
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

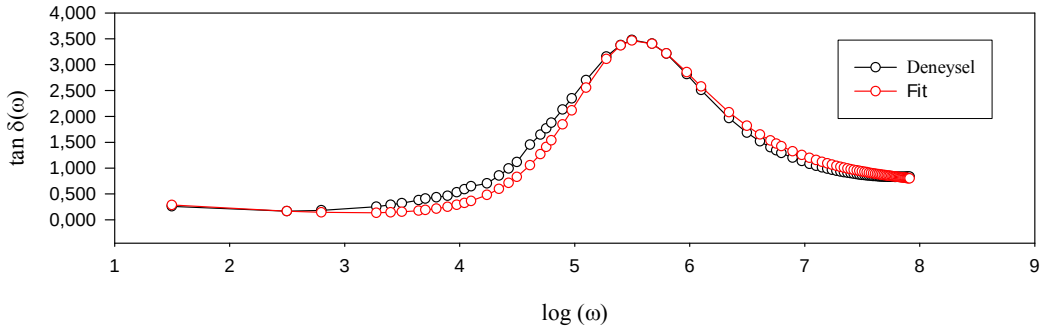
(a)


M'' (ω)
0,014
0,012
0,010
0,008
0,006
0,004
0,002
0,000
0,000
0,005
0,010
0,015
0,020
0,025
M'(ω)
Deneysel
Fit

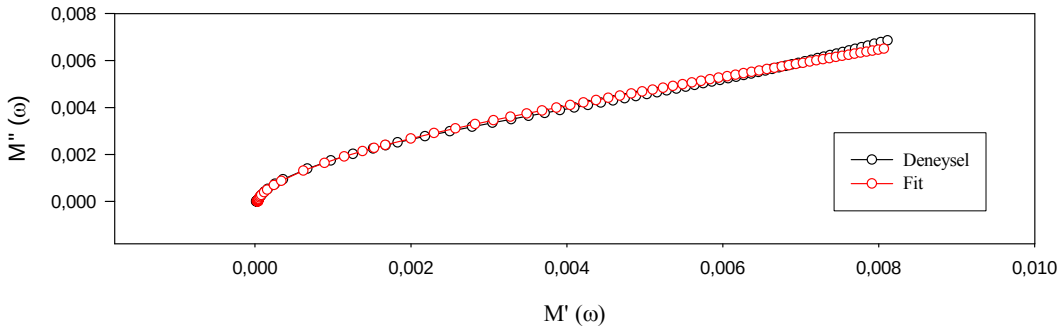

tan δ(ω)
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

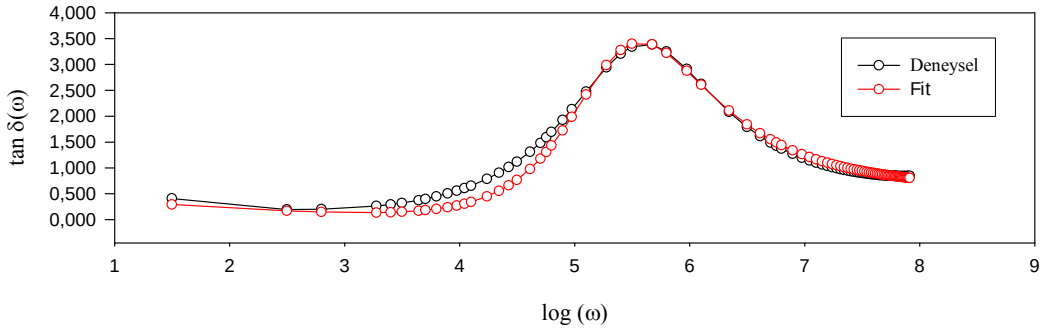
(b)



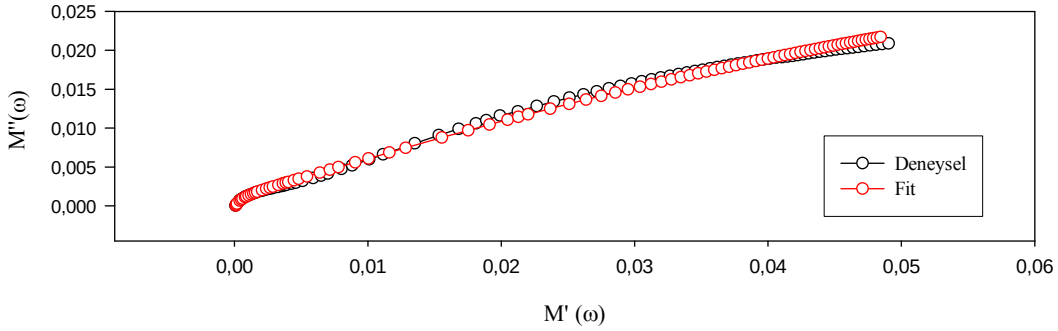

(c)

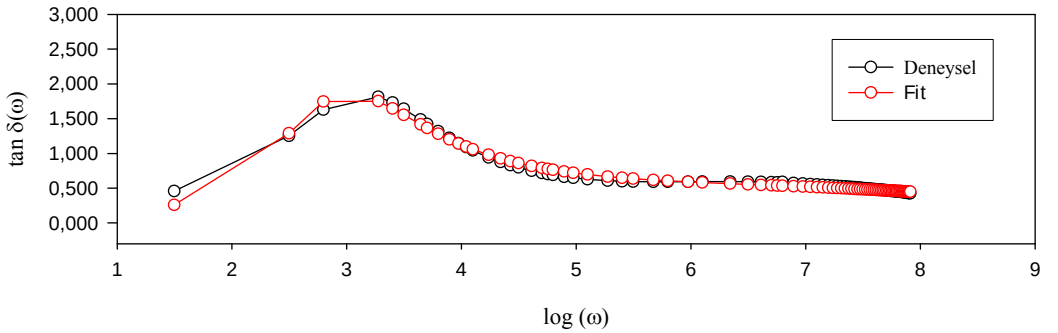


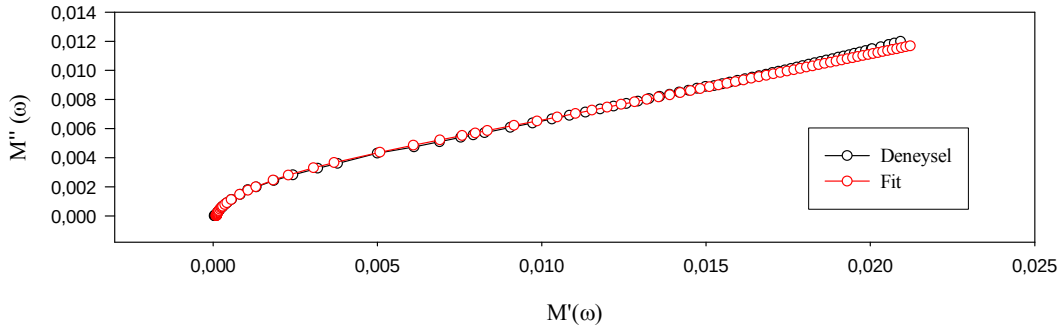

(d)

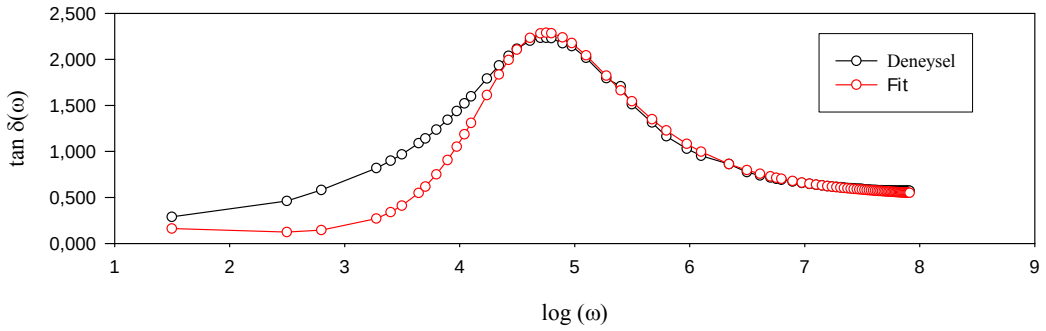
Şekil 5.13 OUM kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 150 dakika, (c) 390 dakika ve (d) 1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole ile log(ω)-tanδ(ω) eğrileri.


M''(ω)
0,025
0,020
0,015
0,010
0,005
0,000
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
M' (ω)
Deneysel
Fit

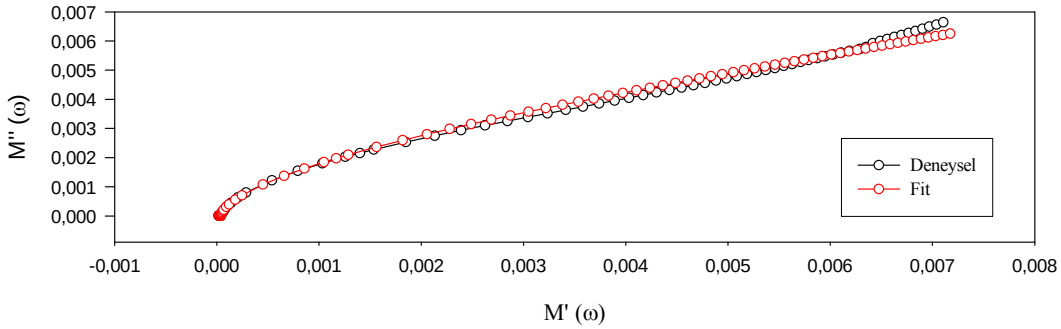

tan δ(ω)
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

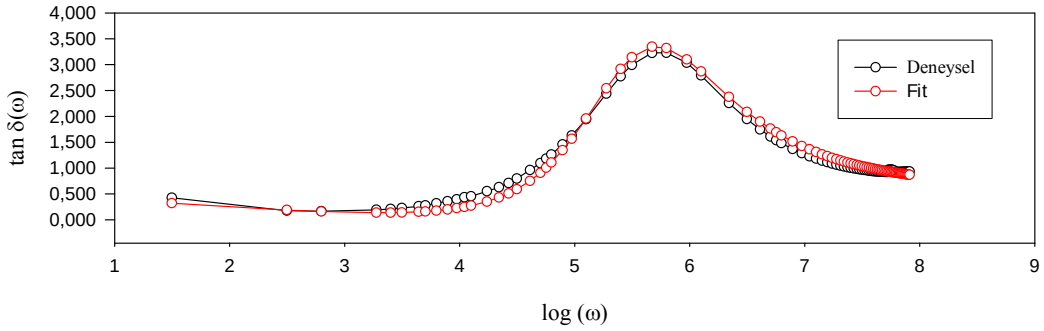
(a)


M'' (ω)
0,014
0,012
0,010
0,008
0,006
0,004
0,002
0,000
0,000
0,005
0,010
0,015
0,020
0,025
M'(ω)
Deneysel
Fit

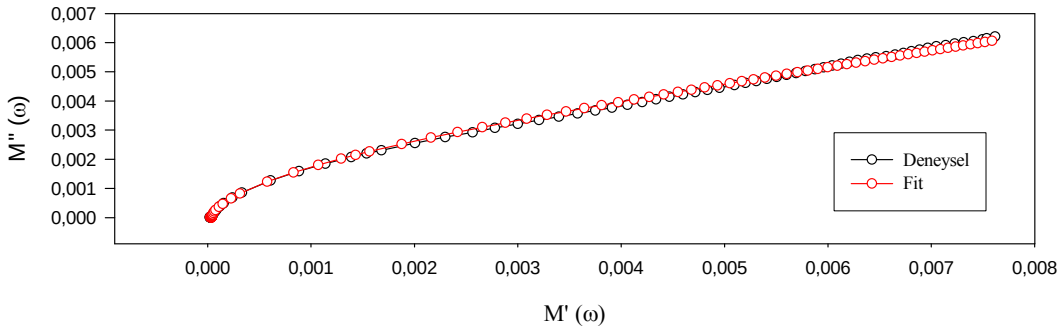

tan δ(ω)
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
log (ω)
Deneysel
Fit

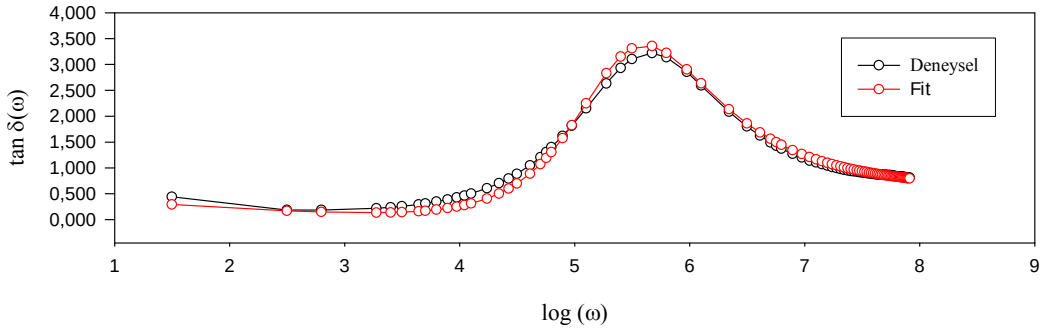
(b)




(c)




(d)

Şekil 5.14 OUS kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 150 dakika, (c) 390 dakika ve (d) 1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole ile log(ω)-tanδ(ω) eğrileri.

## 5.6. Bütün Numuneler için Dielektrik Parametrelerin Ortak Değerlendirilmesi

Beş numunenin de $\alpha$ ve $\gamma$ değerlerine bakıldığında, bütün nem durumlarında $\alpha$ nın sıfıra yakın değerler aldığı, $\gamma$ nın ise düşük nemlerde 0.3 değerlerini alırken yüksek nemli ortamlarda 1' e doğru yaklaştığı görülmektedir. Bu ise, düşük nemli ortamlarda etkili kutuplanma mekanizmasının Cole-Davidson türü kutuplanma olduğunu, yüksek nemli ortamlarda ise Debye türü kutuplanmanın etkili olduğunu göstermektedir.

Numunelerimizin $\alpha$ ve $\gamma$ değerleri Ishida ve arkadaşlarının saf montmorillonit için oda sıcaklığında buldukları 0.19 ve 0.73 değerleri ile oldukça benzerdir. Yine bu araştırmacıların $\tau$ durulma zamanı için elde ettikleri değer $10^{-7}$ mertebesinde iken elde ettiğimiz durulma zamanları yaklaşık $10^{3}$ kat daha büyüktür ($10^{-4}$ s) [Ishida, 2000]. Dudley ve arkadaşları montmorillonit süspansiyonu için $10^{-9}$ s, Calvet ise Ca-montmorillonit için $10^{-5}$ s mertebesinde durulma zaman değerleri bulmuşlardır [Dudley, 2003; Calvet, 1975].

Bona ve arkadaşlarının n için buldukları 0.1022 değeri elde ettiğimiz n değerleri bölgesi içinde kalmaktadır. Aynı araştırmacılar iletkenlik katsayısı olan $\sigma$ İçin $10^{-5}$ $(S/m)\cdot s^{n}$ değerini bulurken elde ettiğimiz $\sigma$ değeri ise $10^{-7}$ $(S/m)\cdot s^{n}$ mertebesindedir[Bona, 2002]..

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Ordu İli Göbü (1 tane), Ulubey (2 tane) ve Ünye (2 tane) bölgelerinden alınan beş katı kil numunesi incelenmiştir. Numuneler aynı yerden farklı kil katmanlarından alınmıştır. Numuneler arasındaki renk farklılığı bünyelerinde eser miktarda barındırdıkları bileşen farklılığından kaynaklanmıştır. Bu durum, aynı bölgenin kil numunelerinin XRD spektrumları ve kimyasal analizlerinden açıkça görülmektedir.

Numunelerin kil tane boyutuna (2 $\mu$m ve altı) indirildikten ve saflaştırma işlemleri yapıldıktın sonra dielektrik ölçümlerin yapılması elde edilen sonuçların yalnızca kil minerallerine mal edilmesini sağlayacaktır. Ancak bu işlemler için gerekli sürenin bu çalışmanın amacını aşmasından dolayı yapılmamıştır.

Dielektrik ölçüm sonuçlarının fit işlemleri göz önüne alındığında, doğru parametre seti bulunması açısından başarı sağlanmasına rağmen özellikle $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerinin düşük frekans noktalarında uyumunun olmadığı görülebilir. Bu durumun düşük frekanslarda elektrot kutuplanmasının tam olarak elimine edilmesinden ve arayüzeysel kutuplanmanın çok büyük değerlere ulaşmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

Farklı nem durumlarında yapılan ölçümler vakum, 30dk, 150 dk, 390 dk ve 1 hafta için beş zamanda yapılmıştır. Fakat değerlendirmeler çalışmanın hacmi düşünüldüğünde 30 dk için yapılmamıştır. Bu dilektrik ölçümlerde fit parametre-lerinin ( n, $\gamma$, $\sigma$ ve $\tau$) vakumdan sonra büyük artış göstermesini açıklamaktadır.

Dielektrik ölçümlerde parametrelerin bulunmasında elektrot etkisini minumuma indirmesi nedeni ile elektrik modülü formalizmi tercih edilmiştir. Fit işleminin başarılı olduğunu göstermesi acısından elektrik modülü formalizmindeki Cole-Cole değişimlerinin hemen altında aynı durum için $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimleri de verilmiştir.

İncelen numuneler için kil-su etkileşmeleri kesim 2.2 verilmiştir. Dielektriksel ölçümlerde $\tan\delta(\omega) - \log(\omega)$ değişimlerindeki şiddet piklerinin artan nemle sağa doğru kayması sıcaklık ölçümlerinde, artan sıcaklık numunedeki nemin azalmasına neden olacağından, piklerin sola doğru kayması ile benzerdir. Sıcaklık-aktivasyon enerjisi ilişkisi basit olarak Arhenius bağıntısı ile verilebileceğinden, aktivasyon enerji tayini, kompleks sıcaklık ölçümleri yerine daha kolay olan nem ölçümlerinden hesaplama yoluna gidilebilir. Böyle bir inceleme farklı bir Lisans üstü çalışma konusu olarak ele alınabilir.

**KAYNAKLAR**

Anderson, J.C., 1964, **Dielectrics**, Chapman and Hall Ltd. , London

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., 2002, **Advances In Understanding The Relationship Between Rock Wettability And High-Frequency Dielectric Response**, Journal of Petroleum Science And Engineering, Vol:33, p. 87-99.

Calvet, R., 1975, **Dielectric Properties of Montmorillonites Saturated by Bivalent Cations**, Clays and Clay Miner., V:23, p.257-265.

Campbell, J.E., 1990, **Dielectric Properties and Influence of Conductivity In Soils at One to Fifty Megahertz** , Geophysics, Vol:54, p. 332-341

Cllifford, J.,1975 **Properties of Water in Capillaries and Thin Films**, In:Franks, F.(Ed), Water: A Comprehensive Traetise, Vol.5 Plenum, New York, p.75-132.

Çelik, M., Karakaya, N., Temel, A., 1999, **Clay Minerals İn Hydrothermally Altered Volcanic Rocks, Eastern Pontides, Turkey**, The Clay Mineals Society, V:47, p.708-717.

Çelik, M., Karakaya, N., Temel, A., 1999, **Giresun Yöresi Alinut ve Diğer Metal Dışı Mineralleşmelerin Özelliklerinin İncelenmesi ve Ekonomik Öneminin Araştırılması**., TÜBİTAK YDABÇAG-139, 172 sayfa.

Çelik, M., Karakaya, N., 1999, **Ordu ve Giresun Civarında Gözlenen Hidrotermal Kil Oluşumlarının İncelenmesi**, 8. Ulusal Kil Sempozyumu, 24-27 eylül 1997, p.99-106.

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.

Dudley, L.M., Bialkowski, S., or D. And Junkermeier, C.,2003, **Low Frequency Impedance Behaviour of Montmorillonite Suspesions: Polarization Mechanicsms In The Low Frequancy Domain**. Soil Sci.Soc. Am. J. V:67, p.518-526.

Fredlund, D.G.,Rahardjon, H.,1993, **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**, Wiley, New York, p. 517.

Grim Ralph E., 1968, **Clay Mineralogy**, (Second Ed.) New Yok: McGraw-Hill Book Company.

Hariliak, 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 Compunds**, The American Mineralogist, Vol:85, p.173-180.

Karakaya, N., 1998, **Şebinkarahisar (Giresun) Yöresi Magmatik Kayaçların Mineralleşmelerinin Minerolaojik-Petrografik ve Jeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi**, S.Ü. Fen Bilimleri Ens. Doktora Tezi, 168 sayfa.

Kaya, A., Fang H.Y., 1997, **Identification of Contaminated Soils by Dielectric Constant and Electrical Conductivty**, Journal of Environmental Engineering, p.169-177.

Keller, C. V.,Frischknecht, F. C., 1966, **Electrical Methods in Geophysical Prospecting**, Pergaman, Oxford, p.519.

Lyon, T. L., Buckman, H.O., 1937, **The Nature and Properties of Solids**, McMillan, New York, p.391.

Malayoğlu, U. , Akar, A., 1995, **Killerin Sınıflandırılmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi**, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.

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

Milles, W. J., 1994, **Crystalline Silica Analysis of Wyoming Bentonite by X-Ray Diffraction after Phosphoric Acid Digestion**, Analytica Acta, V:286, p.97-105.

Mitchell, J. K., 1992, **Funtamentals of Solid Behaviour**, (2 nd Ed.) Wiley, New York, p.437.

Pandita, S., Tickoo, R., Bamzai, K. K. And Kotru, P.N.,2001, **Dielectric Characteristics of Gel Grown Mixed Rare Earth (Didymium) Heptamolibdate Crystals**, Materials Science & Engineering B. V:87, p.122-128.

Ranko, R., and hermann, W., 1998, **The Dielectric Modulus: Relaxation Versus Retardation, Solid States Ionics**, V:105, p.167-173.

Ruffet, C., Gueguen, Y. and Darot, M. (1991), **Complex Conductivity** M**easurements and Fractal Nature of Perosity**, Geophysics, vol:56, p:758-768

Saarenketo, T., (1998), **Electrical Properties of Water in Clay and Silty Soils,** Geophysics, vol:40, p:73-88

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

Urry, D. W., 1995, **Elastic Biomolecular Machine**, Sci. Am., January .p.64-69.

Venuthar, Y. C., and Mohan, K. S., 2002, **Dielectric Behaviour of Lithium-Cobalt Mixed Ferrites**, Materials Letters, V:54, p.135-139.

## EKLER

Geçirgenlik modunda, Havriliak-Negami bağıntısına ilave edilen kuvvet yasalı iletkenlik ile tanımlanan denklem (3.32)'nin elektrik modülü gösterimi türetilmiş ve gerekli olan sadeleştirmeler adım adım gösterilmiştir. Bu türetme ve sadeleştirme işlemleri Maple-9 matematik programı ile gerçekleştirilmiştir. Programın çalışmasında şu notasyon dönüşümleri yapılmış ve diğer notasyonlara sadık kalınmıştır:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\varepsilon^* \rightarrow e$ | $\tau \rightarrow T$ | $i \rightarrow I$ | $M_\infty \rightarrow \mathrm{Mso}$ |
| $\varepsilon_s \rightarrow es$ | $\sigma \rightarrow S$ | $\omega \rightarrow w$ | $M' \rightarrow \mathrm{M1}$ |
| $\varepsilon_\infty \rightarrow eso$ | $\alpha \rightarrow a$ | $M^* \rightarrow \mathrm{M}$ | $M'' \rightarrow \mathrm{M2}$ |
| $\varepsilon_0 \rightarrow eo$ | $\gamma \rightarrow g$ | $M_s \rightarrow \mathrm{Ms}$ | $\phi \rightarrow F$ |

Denklem (3.32), bu notasyona göre şöyle yazılabilir,

$$e := eso + \frac{es - eso}{\left(1 + (I\,w\,T)^{(1-a)}\right)^{g}} - \frac{S\,(I\,w)^{(n-1)}}{eo} \qquad \text{(Ek1.1)}$$

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

$$eso := \frac{1}{Mso}$$

$$es := \frac{1}{Ms}$$

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

$$M = \frac{1}{\frac{1}{Mso} + \frac{\frac{1}{Ms} - \frac{1}{Mso}}{\left(1 + (I\,w\,T)^{(1-a)}\right)^{g}} - \frac{S\,(I\,w)^{(n-1)}}{eo}}$$

(Ek-1.2)

Bu ifade sadeleştirilirse, aşağıdaki bağıntıya ulaşılır;

$$M := Mso\,Ms\left(1 + I\,w\,T\,(I\,w\,T)^{(-a)}\right)^{g} eo\,w \Big/ \left(Ms\left(1 + I\,w\,T\,(I\,w\,T)^{(-a)}\right)^{g} eo\,w + eo\,Mso\,w - eo\,Ms\,w + I\,S\,(I\,w)^{n}\,Mso\,Ms\left(1 + I\,w\,T\,(I\,w\,T)^{(-a)}\right)^{g}\right)$$

(Ek-1.3)

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

$$M1 := \left(\frac{1}{Mso} + \left(\frac{1}{Ms} - \frac{1}{Mso}\right)\right.$$
$$\left.\mathbf{e}^{\left(1/2\,g\,\ln\left(\left(1+\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\sin(1/2\,\pi\,a)\right)^2 + \left(\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\right)^2\cos(1/2\,\pi\,a)^2\right)\right)}$$
$$\cos\left(g\arctan\left(\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right), 1+\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)$$
$$\Big/ \left(\left(\mathbf{e}^{\left(1/2\,g\,\ln\left(\left(1+\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\sin(1/2\,\pi\,a)\right)^2 + \left(\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\right)^2\cos(1/2\,\pi\,a)^2\right)\right)}\right.\right.$$
$$\left.\cos\left(g\arctan\left(\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right), 1+\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)\right)^2$$
$$+\left(\mathbf{e}^{\left(1/2\,g\,\ln\left(\left(1+\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\sin(1/2\,\pi\,a)\right)^2 + \left(\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\right)^2\cos(1/2\,\pi\,a)^2\right)\right)}\right)^2$$
$$\left.\sin\left(g\arctan\left(\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right), 1+\mathbf{e}^{((1/2-1/2\,a)\ln(w\sim^2 T\sim^2))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)\right)^2$$

$$\left.\left.\left.

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

$$^{2}\left)-\frac{S\,e^{((n-1)\ln(w\sim))}\sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\,\pi\right)}{eo}\right)^{2}\right)$$

(Ek1.4)

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

$$M11:=-\left(1+2\,e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)+e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\right)^{(1/2\,g)}\left(-Ms\left(1+2\,e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)+e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\right)^{(1/2\,g)}eo-\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)eo\,Mso+\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)eo\,Ms+S\,w\sim^{(n-1)}\cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\,\pi\right)Mso\,Ms\left(1+2\,e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)+e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\right)^{(1/2\,g)}Mso\,eo\,Ms\Big/\left(-2\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)Ms^{2}\left(1+2\,e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)+e^{(-2(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\right)^{(1/2\,g)}eo^{2}+2\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)\right)$$

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

$$+2\cos\left(g\arctan\left(\mathbf{e}^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\,\pi\,a\right),1+\mathbf{e}^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\,\pi\,a\right)\right)\right)eo$$

$$Ms^2\,S\,w\sim^{(n-1)}\cos\left(\frac{1}{2}\,(n-1)\,\pi\right)Mso$$

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

$$Mso^2\,S\,w\sim^{(n-1)}\cos\left(\frac{1}{2}\,(n-1)\,\pi\right)Ms$$

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

$$\left(w\sim^{(n-1)}\right)^2\,Mso^2\,Ms^2$$

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

$$-2\,eo^2\,Mso\,Ms+eo^2\,Mso^2-2\sin\left(g\arctan\left(\mathbf{e}^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\,\pi\,a\right),1+\mathbf{e}^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\,\pi\,a\right)\right)\right)eo$$

$$Ms^2\,S\,w\sim^{(n-1)}\sin\left(\frac{1}{2}\,(n-1)\,\pi\right)Mso$$

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

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

$$w\sim^{(n-1)}\cos\left(\frac{1}{2}\,(n-1)\,\pi\right)Mso+2\sin\left(g\arctan\left(\mathbf{e}^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\,\pi\,a\right),1+\mathbf{e}^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\,\pi\,a\right)\right)\right)eo$$

$$Mso^2\,S\,w\sim^{(n-1)}\sin\left(\frac{1}{2}\,(n-1)\,\pi\right)Ms$$

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

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

$$\Bigg)$$

(Ek-1.5)

Denklem (3.42f)'de tanımlanan *A* terimi burada da kullanılarak (Ek-1.5), aşağıdaki gibi daha basit bir forma getirilmiştir;

$$M111 := -A^g\left(-Ms\,A^g\,eo-\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)eo\right.$$

$$Mso+\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)eo$$

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

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

$$Ms\,A^g\,eo^2\,Mso+2\cos\left(g\arctan\left(e^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right),1+e^{(-(a-1)\,(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi\,a\right)\right)\right)eo$$

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

$$Mso^2\,S\,w\sim^{(n-1)}\cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\,\pi\right)Ms\,A^g+S^2\left(w\sim^{(n-1)}\right)^2Mso^2\,Ms^2\left(A^g\right)^2+eo^2\,Ms^2$$

$$-2\,eo^2\,Mso\,Ms+eo^2\,Mso^2-2\sin\left(\right.$$

$$g \arctan\left(e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi a\right), 1+e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi a\right)\right) eo$$
$$Ms^2 S\, w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso\, A^g$$
$$-2\, Ms^2 (A^g)^2\, eo\, S\, w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso + 2\sin($$
$$g \arctan\left(e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\cos\left(\frac{1}{2}\pi a\right), 1+e^{(-(a-1)(\ln(w\sim)+\ln(T\sim)))}\sin\left(\frac{1}{2}\pi a\right)\right) eo$$
$$Mso^2 S\, w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms\, A^g + Ms^2 (A^g)^2\, eo^2\Big) \qquad \text{(Ek1.6)}$$

Denklem (3.42g)'deki $\phi$ terimini kullanırsak, *M1* için daha sade bir ifade elde ederiz:

$$M1111 := -A^g\Big(-Ms\, A^g\, eo - \cos(g\,F)\, eo\, Mso + \cos(g\,F)\, eo\, Ms$$
$$+ S\, w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso\, Ms\, A^g\Big) Mso\, eo\, Ms \Big/ \Big(-2\cos(g\,F)\, Ms^2 A^g\, eo^2$$
$$+ 2\cos(g\,F)\, Ms\, A^g\, eo^2\, Mso + 2\cos(g\,F)\, eo\, Ms^2\, S\, w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso\, A^g$$
$$- 2\cos(g\,F)\, eo\, Mso^2\, S\, w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms\, A^g$$
$$+ S^2 (w\sim^{(n-1)})^2\, Mso^2\, Ms^2 (A^g)^2 + eo^2\, Ms^2 - 2\, eo^2\, Mso\, Ms + eo^2\, Mso^2$$
$$- 2\sin(g\,F)\, eo\, Ms^2\, S\, w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso\, A^g$$
$$- 2\, Ms^2 (A^g)^2\, eo\, S\, w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso$$
$$+ 2\sin(g\,F)\, eo\, Mso^2\, S\, w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms\, A^g + Ms^2 (A^g)^2\, eo^2\Big)$$

(Ek-1.7)

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

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

(Ek-1.8)

Bu ifade daha da sadeleştirilirse, bağıntının payı için;

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

(Ek1.9)

ifadesi bulunur. Paydası içinse şu ifadeye ulaşılır:

$$terikpayda := \left( -2.\cos\left( g \arctan\left( \frac{(w\,T)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327\,a)}{1. + (w\,T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327\,a)} \right) \right) Ms^2 \right.$$
$$\left. \left( \sqrt{1. + 2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327\,a) + (w\,T)^{(2.-2.a)}} \right)^g eo^2 + 2. \right.$$
$$\cos\left( g \arctan\left( \frac{(w\,T)^{(1.-1.a)} \cos(1.570796327\,a)}{1. + (w\,T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327\,a)} \right) \right) Ms$$
$$\left( \sqrt{1. + 2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)} \sin(1.570796327\,a) + (w\,T)^{(2.-2.a)}} \right)^g eo^2\, Mso + 2.$$

$$\cos\left(g\arctan\left(\frac{(w\,T)^{(1.-1.a)}\cos(1.570796327\,a)}{1.+(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)}\right)\right)eo\,Ms^2\,S\,w^{(n-1.)}$$
$$\cos(1.570796327\,n-1.570796327)\,Mso$$
$$\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}-2.$$
$$\cos\left(g\arctan\left(\frac{(w\,T)^{(1.-1.a)}\cos(1.570796327\,a)}{1.+(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)}\right)\right)eo\,Mso^2\,S\,w^{(n-1.)}$$
$$\cos(1.570796327\,n-1.570796327)\,Ms$$
$$\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}+S^2\left(w^{(n-1.)}\right)^2Mso^2$$
$$Ms^2\left(\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}\right)^2+eo^2\,Ms^2$$
$$-2.\,eo^2\,Mso\,Ms+eo^2\,Mso^2-2.$$
$$\sin\left(g\arctan\left(\frac{(w\,T)^{(1.-1.a)}\cos(1.570796327\,a)}{1.+(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)}\right)\right)eo\,Ms^2\,S\,w^{(n-1.)}$$
$$\sin(1.570796327\,n-1.570796327)\,Mso$$
$$\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}-2.\,Ms^2$$
$$\left(\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}\right)^2eo\,S\,w^{(n-1.)}$$
$$\cos(1.570796327\,n-1.570796327)\,Mso+2.$$
$$\sin\left(g\arctan\left(\frac{(w\,T)^{(1.-1.a)}\cos(1.570796327\,a)}{1.+(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)}\right)\right)eo\,Mso^2\,S\,w^{(n-1.)}$$
$$\sin(1.570796327\,n-1.570796327)\,Ms$$
$$\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}$$
$$+Ms^2\left(\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}\right)^2eo^2\Bigg)\Bigg/\Bigg($$
$$\left(\sqrt{1.+2.\,(w\,T)^{(1.-1.a)}\sin(1.570796327\,a)+(w\,T)^{(2.-2.a)}}\right)^{g}eo^2\Bigg)$$

(Ek-1.10)

## ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında Sarıkamış/Kars' ta doğdum.İlkokulu sekiz ayrı yerde okuyup orta öğrenimimi Mevlana Orta Okulunda tamamladım.Lise öğrenimimi Konya Gazi Lisesinde bitirdim.

1980 ' de Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümüne kaydoldum.1986 yılında aynı bölümden mezun olduktan sonra 2001 yılında Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ana Bilim Dalı Yönetim ve Organizasyon Bölümünde Yüksek Lisansa başlayıp 2003 yılında bitirdim.

2004-2005 bahar yarı yılında Selçuk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde Yüksek Lisansa başladım.Halen bu bölümde öğrenimime devam etmekteyim.

Selçuk ZENGİN
Konya-2007