

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATI KİL NUMUNELERİNİN
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE
NEMİN ETKİSİ

Filiz KELEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
Konya- 2006

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

**KATI KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE NEMİN ETKİSİ**

Filiz KELEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
Konya- 2006

Bu tez 06 / 07 / 2006 tarihinde oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Başkan

Doç. Dr. Haluk ŞAFAK
Üye

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

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****KATI KİL NUMUNELERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNE NEMİN ETKİSİ**

Filiz KELEŞ

**Selçuk Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü****Danışman: Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ****2006, 74 sayfa****Jüri: Doç. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Doç. Dr. Haluk ŞAFAK
Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ**

Doğada bulunan maddelerin elektrik yüklerinin uygulanan bir dış elektrik alana tepkileri, maddelerin “iletken”, “yarıiletken” veya “dielektrik” olarak sınıflandırılmasını belirler. Bu tür bir sınıflandırmaya bağlı olarak, elektriksel karakteristiklerinin doğru olarak ölçülmesi, malzemenin pratik kullanımı açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada üç farklı kil numunesinin dielektrik ölçümleri paralel plakalı kondansatör metodu ile 5Hz - 13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kil numunelerinin nem tutma kapasitelerine göre dielektrik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

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

Anahtar Kelimeler: dielektrik ölçümler, dielektrik geçirgenlik, dielektrik kayıp, kutuplanma mekanizmaları, nem

ABSTRACT**M. S. Thesis****THE EFFECT OF HUMIDITY ON THE DIELECTRIC
PROPERTIES OF SOLID CLAY SAMPLES**

Filiz KELEŞ

Selçuk University**Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Physics****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ****2006, 74 Pages****Jury: Assoc. Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ****Assoc. Prof. Dr. Haluk ŞAFAK****Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ**

The response of electric charges in materials existing in nature to an external electric field determines the classification of materials as “conductor”, “semiconductor” or “dielectric”. Depending on such a classification, the correct measurement of electrical properties is very important with respect to the practical use of material.

In this study, the dielectrical measurements of three different clay samples have been carried out using parallel plate capacitor method and HP 4192A LF Impedance Analyser having a frequency range between 5 Hz- 13 MHz. The changes which occur at dielectrical properties of clay samples according to their humidity holding capacities have been investigated.

As a result of measurements, the dielectrical parameters depending upon the holding humidity ratios of clay samples have been calculated by fitting theoretical expressions to experimental values using Complex Electrical Module formalism.

Key Words: dielectric measurement, dielectric permittivity, dielectric loss, polarization mechanisms, humidity

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, orjinal karışım, ön konsantre ve Fe'li siklon üst akım olmak üzere üç farklı kil numunesinin dielektrik özellikleri incelenmiştir.

Tez konusunun seçimi ve tezin hazırlanması konusunda bana yol gösteren ve benden yardımlarını 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 Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Ana Bilim Dalı öğretim üyelerinden **Yrd. Doç. Dr. Hatice YILMAZ 'a** teşekkür ederim.

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

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

Filiz KELEŞ
KONYA–2006

KULLANILAN SİMGELER

α	Kutuplanabilirlik
C	Kapasitans
δ	Kompleks dielektrik geçirgenlikle reel bileşeni arasındaki açı
$\vec{E}$	Elektrik alanı
ϵ_0	Uzayın elektriksel geçirgenliği
ϵ	Dielektrik geçirgenlik
ϵ'	Dielektrik geçirgenliğin reel kısmı
ϵ''	Dielektrik geçirgenliğin sanal kısmı
ϵ_∞	Dielektrik geçirgenliğin $\omega \rightarrow \infty$ 'daki değeri
ϵ_0	Dielektrik geçirgenliğin $\omega \rightarrow 0$ 'daki değeri
f	Frekans
$\vec{p}$	Elektrik dipol momenti
$\vec{P}$	Kutuplanma vektörü
σ	Elektriksel iletkenlik
t	Zaman
τ	Durulma zamanı
ω	Açısal frekans

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
KULLANILAN SİMGELER	vi
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL	3
2.1 KİLİN YAPISI	3
2.2 KİLDE BULUNAN SU MOLEKÜLLERİ	4
2.3 KİLİN KULLANIM ALANLARI	6
2.4 ÇALIŞMADA KULLANILAN NUMUNELERİN ELDESİ	7
3. METOD	10
3.1 DİELEKTRİK TEORİ	10
3.1.1 Temel Kavramlar	10
3.2 KUTUPLANMA MEKANİZMALARI	16
3.2.1 Kutuplanabilirlik	16
3.2.2 Kutuplanma Mekanizmaları	18
3.2.2.1 Elektronik Kutuplanma	19
3.2.2.2 Atomik Kutuplanma	20
3.2.2.3 Yönelimli Kutuplanma	21
3.2.2.4 Ara Yüzeysel Kutuplanma	22
3.3 KUTUPLANMA MEKANİZMALARI İÇİN TANIMLANAN EŞİTLİKLER	24
3.3.1 Yönelimli Kutuplanma	24
3.3.1.1 Debye Denklemi	25
3.3.1.2 Cole-Cole Denklemi	25
3.3.1.3 Cole-Davidson Denklemi	28
3.3.1.4 Havriliak-Negami Denklemi	29
3.4 ELEKTRİK MODÜLÜ FORMALİZMİ	31
3.4.1 Debye Denklemi	32

3.4.2	Cole-Cole Denklemi.....	33
3.4.3	Cole-Davidson Denklemi.....	33
3.4.4	Havriliak-Negami Denklemi.....	34
3.4.5	MWS Eşitlikleri.....	34
3.5	KİL-SU ETKİLEŞİMLERİ.....	37
4.	DENEY.....	39
4.1	NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	39
4.2	NUMUNELERİN AĞIRLIKÇA YÜZDE NEM ÖLÇÜMLERİ...	39
4.3	DİELEKTRİK ÖLÇÜMLER.....	40
5.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	43
5.1	NUMUNELERİN NEM ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	43
5.2	NUMUNELERİN DİELEKTRİK ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	45
5.3	DİELEKTRİK PARAMETRELER.....	54
5.2.1	Orjinal Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri.....	54
5.2.2	Ön konsantre Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri.....	55
5.2.3	Fe’li Siklon Üst Akım Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri.....	59
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
	KAYNAKLAR.....	62
	EKLER.....	65
	ÖZGEÇMİŞ.....	74

1. GİRİŞ

Bir madde, üzerinden elektrik yükü geçişine izin vermiyorsa “elektiriksel olarak yalıtkan” yada “dielektrik” olarak adlandırılır. Teorik olarak bu durum doğru olsa da gerçekte her madde az yada çok bir elektrik akımı geçirir.

Dielektrik (elektiriksel olarak yalıtkan) malzemeler, elektrostatik alanlara uzun süre karşı koyabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, üzerine bir elektrik alan 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 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. Buradaki sabit yükler genellikle madde içinde ciddi bir yük akışı olmaksızın meydana gelir. Bugünkü kavramlara göre kutuplanma olayı, bir dielektriğin elektiriksel olarak yüklü parçacıklarının uzay içindeki düzenlenimlerinin değişmesini özetler. Yani, dielektrik bu özelliğiyle bir elektrik momenti kazanır [Taraev 1975]. Keller ve Frischknecht’e göre (1966) kutuplanma; malzeme üzerine bir elektrik alan uygulandığı zaman malzeme içindeki yüklerin ayrışmasıdır.

Dielektriğin bu özelliği önemlidir, 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 elektiriksel 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(ϵ), dielektrik alınganlık(χ_e), kırılma indisi(n), molekül kütlesi(M) gibi büyüklükler dielektriklerin makroskobik, molekülün kutuplanabilirliği(α), 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.

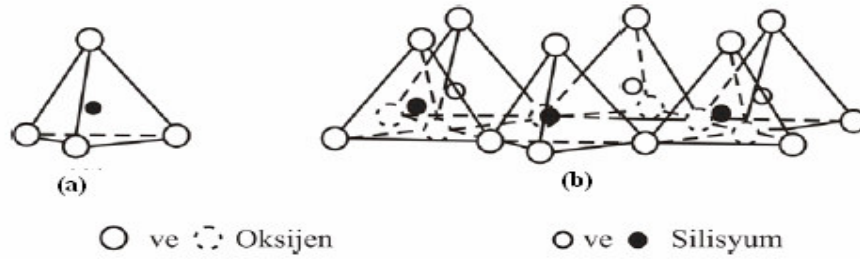
Bu çalışmada “orjinal” karışım, “ön konsantre” ve “Fe’li siklon üst akım” isimli kil numunelerinin dielektrik özelliklerine nemin etkisi incelenmiştir. Killer gözenekli yapıları nedeniyle, katmanları arasında ve yüzeylerinde su moleküllerini bulundurabilirler. Su moleküllerinin miktarı ile maddenin dielektriksel davranışı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla, belirlenmiş zaman aralıklarında dielektrik ölçümler gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL

2.1 Kilin Yapısı

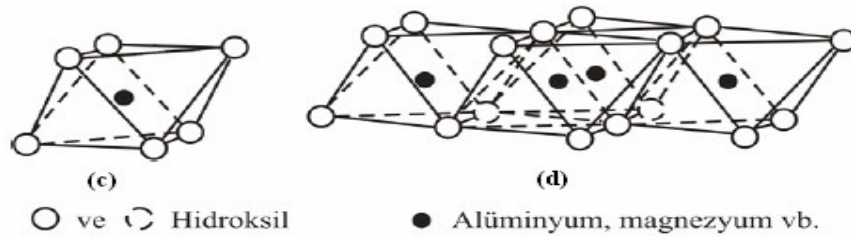
Kil mineralleri, alterasyon ürünü olduklarından aynı yatak içerisinde dahi değişken kimyasal ve mineralojik kompozisyonlara sahip olabilir ve genellikle kalsit, kuvars, kristobalit, feldspat, dolomit, hematit, manyetit, rutil ve opal-CT gibi safsızlıklar içerirler [Miles,1994].

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



Şekil 2.1. Killerin (a) tek bir silika tetrahedronunun, (b) tetrahedronların hegzagonal 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 oluşturmalarıdır. 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

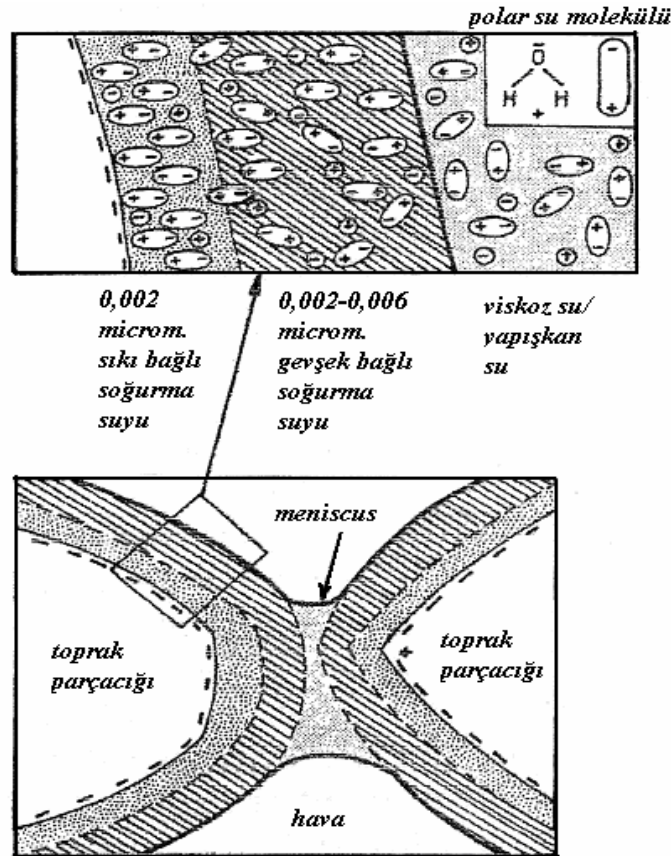
Killi yapılarda bulunan su;

i -soğurma suyu veya higroskopik su,

ii-viskoz su veya kılcal su,

iii-serbest su,

olmak üzere 3 ana başlıkta incelenir[Saarenketo, 1998].



Şekil 2.3. Killi toprakta bulunan suyun yapısı

- *Higroskopik Su*: Yüzey kuvvetleri sayesinde bir killi toprak parçacığının havadan soğurduğu su molekülleri “higroskopik su” veya “soğurma su”yu olarak bilinmektedir. Bu su katmanı sıcaklıktan, havanın bağıl nem miktarından ve hava basıncından etkilenir[Saarenketo, 1998].

Bir higroskopik su katmanı, eksi yüklü mineral yüzeyleri etrafındaki sıkı ve gevşek bağlı katmanlardan oluşan oldukça iyi sıralanmış tek molekülü bir katmandır[Mitchell,1992]. İyonlar ve diğer etkin yüzey katkılایıcıları, 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 suya benzer şekilde killi topraktaki mineral tanecikleri etrafında yer almayan, aynı zamanda yerçekiminden de etkilenmeyen su molekülleri “yapışkan” veya “kılcal su” yu oluştururlar[Saarenketo, 1998].

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 kütesinde 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 kütsel 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 killeri*, 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.

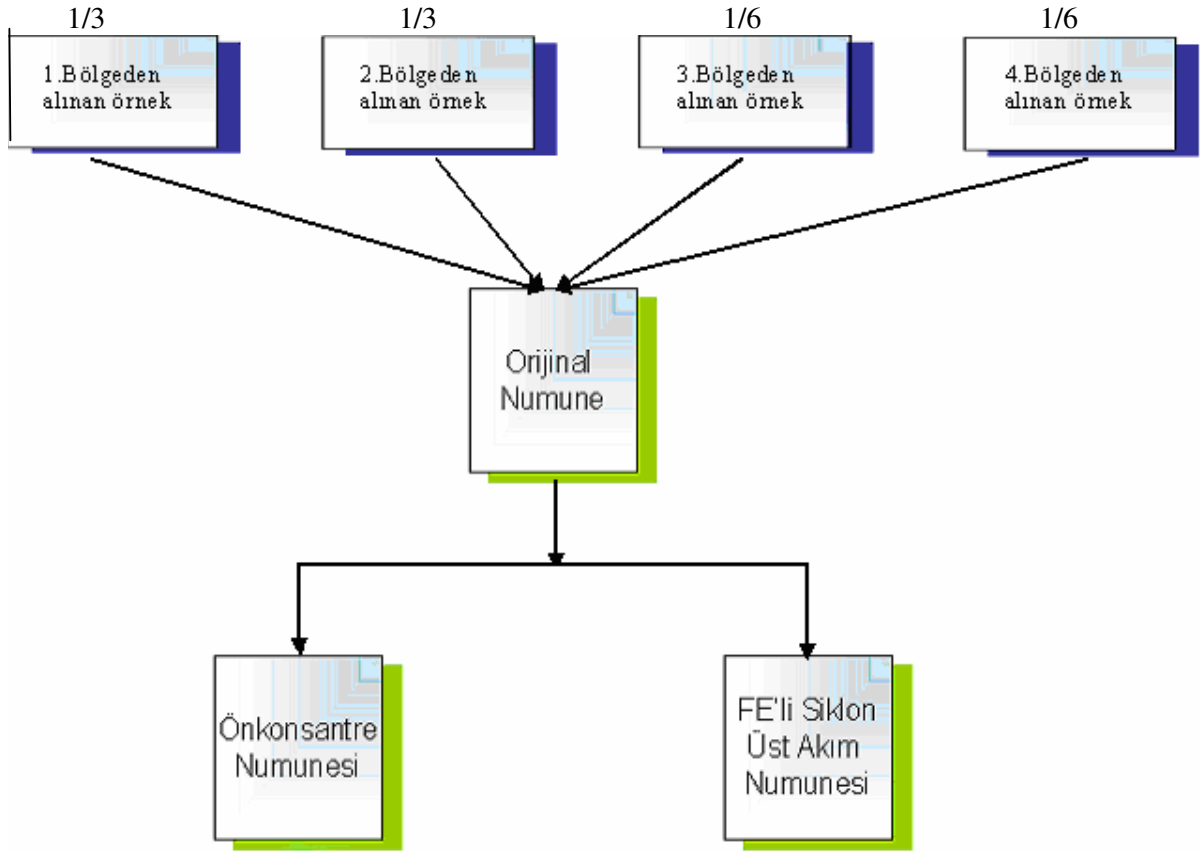
- *Montmorillonitlerin Kullanım Alanları*

İçerisinde yüksek oranda montmorillonit bulunduran kil oluşumları bentonit yatağı olarak adlandırılır. Endüstriyel anlamda bentonitler, baskın olarak değişebilen katyonlarına göre, Na'lı ve Ca'lı olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Çünkü baskın olan bu katyonlar, montmorillonite önemli kimyasal ve fiziksel özellikler kazandırır[Miles, 1994] ve kullanım yerlerini belirlerler.

2.4 Çalışmada Kullanılan Numunelerin Eldesi

Bu çalışmada orjinal karışım, ön konsantre ve Fe'li siklon üst akım konsantresi olmak üzere üç kil numunesi incelenmiştir. İncelenen numuneler Syn. Hatice Yılmaz tarafından Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne doktora tezi olarak sunulmuştur.

Doktora tezine konu olan dört adet örnek Uşak-Eşme-Ahmetler-Gedikler Köyü mevkiinden alınmıştır. Bu örnekler belirli oranlarda karıştırılarak “orjinal numune” elde edilmiştir. Bu orjinal numune çeşitli işlemlerden geçirilerek, çalışmamızda kullandığımız “ön konsantre “ ve “Fe'li siklon üst akım konsantresi” isimli numuneler elde edilmiştir.



Şekil 2.4. Numunelerin eldesinin şematik gösterimi

Orijinal Numune: Ocaktan alınan ve üzerinde hiçbir işlem yapılmamış olan örnektir. Bu numunenin mineralojik bileşimi; montmorillonit, kaolen, feldspat, kuvars, opal-CT ve jarositten oluşmaktadır.

Ön konsantre Numunesi: Orijinal numuneye manyetik ayırıcı ile manyetik zenginleştirme işlemi uygulanmış ve bu işlem sonucunda elde edilen ürünlerden % Al_2O_3 oranı en yüksek ve % Fe_2O_3 oranı en düşük olanlar alınarak, kil oranı yükseltilmiş bir örnek elde edilmiştir. Bu karışıma “ön konsantre numunesi” adı verilmiştir. Bu numune hazırlanırken manyetik minerallerin uzaklaştırılması esas alındığı için, ön konsantrede yok denecek kadar az jarosit bulunur. Bunun yanısıra diğer

üç numune ile % 26 oranında kaolen ve baskın mineral olan montmorillonitten % 39 oranında bulunur.

Fe'li Siklon Üst Akım Numunesi: Orjinal numunenin merkezci kuvvet yardımıyla büyük taneli parçacıkların ayrılması temeline dayanan siklon metodu sonucunda elde edilen numunedir. Yine bu yöntemde kil oranı yükseltilmiş ve manyetik zenginleştirme sağlanmıştır.

3. METOD

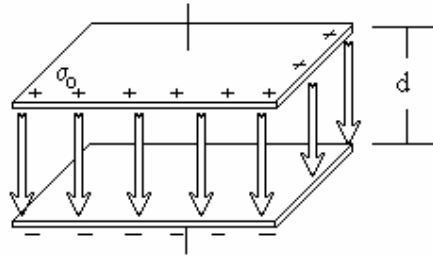
3.1 DİELEKTRİK TEORİ

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,

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

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;

$$C_0 = \frac{A\sigma}{V} \quad (3.2)$$

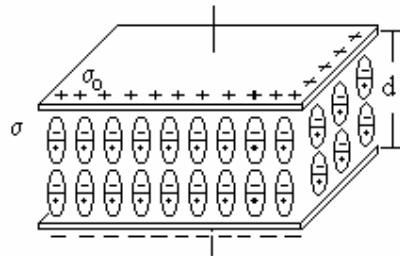
şeklindedir ve “kapasitans” olarak adlandırılır. Temel elektrostatikte bir düzlem iletken plakanın elektrik alanı

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.3)$$

olarak verilir. Gerekli işlemler yapılarak vakumlu bir kapasitörün kapasitansı;

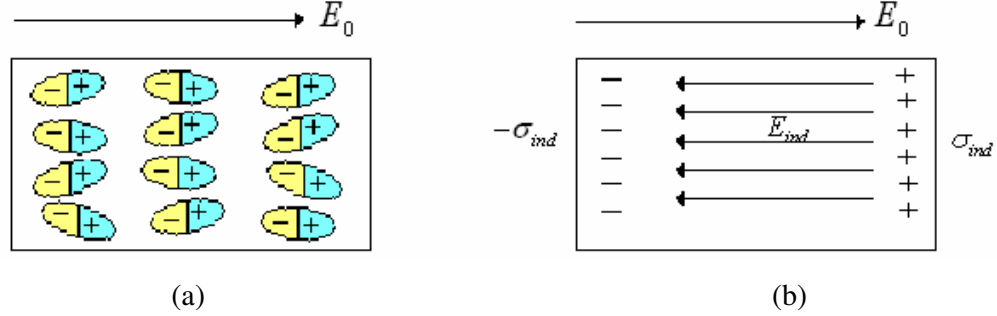
$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3.4)$$

şeklinde bulunur, burada $\epsilon_0 = 8,854188 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 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:



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

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3.5)$$

ile tanımlanan C değerine kadar artar.

C/C_0 oranı, plakalar arasındaki dielektriğin ayırt edici özelliğidir ve “dielektrik sabit” olarak adlandırılır ve şu şekilde ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0} \quad (3.6)$$

Dielektrik teorisinin ilk zamanlarında ε 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 faktörlere bağlıdır[Kaya ve Fang,1997]. Bu yüzden ε 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

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

olarak tanımlanır.

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

$$C(\omega) = \varepsilon^*(\omega).C_0 \quad (3.8)$$

şeklinde tekrar yazılmasını gerektirir.

Kompleks geçirgenlik $\varepsilon^*(\omega)$ aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (3.9)$$

$\varepsilon'(\omega)$, kompleks geçirgenliğin reel kısmı olup, bir dış elektrik alanının etkisiyle malzeme içerisinde ne kadar enerji depolandığının bir ölçüsüdür ve bütün

katı ve sıvılar için $\epsilon'(\omega) > 1$ 'dir. $\epsilon''(\omega)$ ise, kompleks geçirgenliğin sanal kısmıdır ve “kayıp faktörü” olarak adlandırılır. Yani malzemede meydana gelen enerji kayıplarını temsil eder. $\epsilon''(\omega)$ daima sıfırdan büyüktür ve genellikle $\epsilon'(\omega)$ 'dan çok daha küçüktür.

$\epsilon^*(\omega)$ kompleks geçirgenliğinin $\epsilon'(\omega)$ reel kısmı elektriksel iletkenlik ve $\epsilon''(\omega)$ 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. t²) olduğundan,

$$J = i\omega\epsilon_0\epsilon'E + \omega\epsilon_0\epsilon''E \quad (3.10)$$

elde edilir. Böylece iletkenlik, J/E oranından;

$$J/E = i\omega\epsilon_0\epsilon' + \omega\epsilon_0\epsilon'' \quad (3.11)$$

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

$$\sigma_e = \omega\epsilon_0\epsilon' \quad (3.12)$$

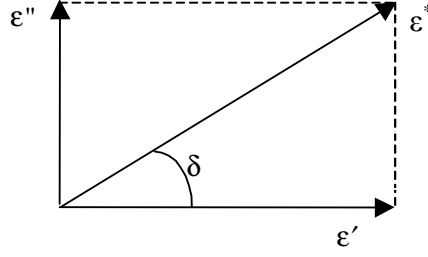
ve

$$\sigma_d = \omega\epsilon_0\epsilon'' \quad (3.13)$$

olarak verilir.

Yine burada σ_e elektriksel iletkenlik terimi, malzeme üzerine gönderilen sinyalin ne kadarının geçtiğinin ve σ_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;

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.14)$$

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

3.2 KUTUPLANMA MEKANİZMALARI

3.2.1 Kutuplanabilirlik

Moleküller genellikle elektriksel olarak nötrdürler. Bunun yanı sıra, bu moleküllerin sahip olduğu “elektriksel dipol momenti $\vec{p}$ ” ve “elektriksel kutuplanabilirlikleri” genellikle anizotropiktir. Burada, moleküllerin elektriksel özellikleri -özellikle bir elektrik alanının varlığında- malzemenin makroskopik 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.

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

$$\vec{D}_m = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (3.15)$$

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

$$\vec{P} = \vec{D}_m - \vec{D} \quad \text{veya} \quad \vec{D}_m = \epsilon_0 \cdot (\vec{E} + \vec{P}) \quad (3.16)$$

şeklindedir. Burada;

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

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

Bu iki denklemden

$$\vec{P} = (\epsilon - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = \chi \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad \text{coulomb.metre}^{-1} \quad (3.17)$$

elde edilir. $(\epsilon - 1)$ niceliği “dielektriksel alınganlık” olarak adlandırılır ve χ_e ile gösterilir.

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

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{E}_{ind} \quad (3.18)$$

şeklinde verebiliriz, burada α : dipolün kutuplanabilirliği (yani birim alan başına düşen ortalama dipol momentidir). Dielektrik malzemede N tane dipol olduğunu varsayarsak toplam kutuplanma;

$$\vec{P} = N \cdot \alpha \cdot \vec{E}_{ind} \quad (3.19)$$

olarak yazılabilir. Buradan sonuç olarak;

$$\vec{P} = (\epsilon - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = N \cdot \alpha \cdot \vec{E}_{ind} \quad (3.20)$$

elde edilir [Anderson, 1964].

α , dipol momenti terimleri ile tanımlandığı için büyüklüğü de, atomlar ve moleküller tarafından oluşturulan elektriksel dipollerin büyüklüğüne bağlıdır. Bütün bunlar ise, α '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

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_i \quad (3.21)$$

Burada;

α_e : elektronik kutuplanabilirlik

α_a : atomik kutuplanabilirlik

α_d : yönelimli kutuplanabilirlik

α_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 τ 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, τ durulma zamanının üstel olarak azalmasına neden olur. Alan kapatıldığında ise süreç ters döner ve sistem aynı τ zaman sabitiyle başlangıçtaki durumuna geri döner.

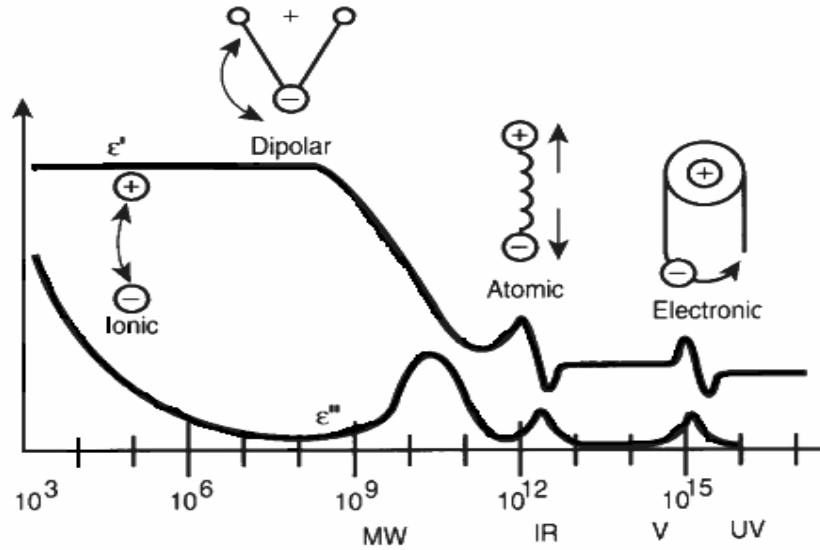
Durulma frekansı ise durulma zamanı ile ters orantılı bir sabittir ve f ile gösterilir. Durulma zamanı ile durulma frekansı arasında

$$\tau \cdot f = 1/2\pi \quad (3.22)$$

şeklinde bir ilişki vardır. Durulmanın altındaki frekanslarda alternatif bir elektrik alanı, dipollerin alan değişimine adım uydurmasını sağlayacak yeterlikçe yavaştır. Kutuplamanın tam olarak gerçekleşmesi durumunda ϵ'' ile tanımlanan kayıplar frekansla doğru orantılıdır. Frekans artarken ϵ'' artmaya devam eder, fakat ϵ' ile belirtilen yük veya enerji depolanması, dipol yönelimi ile elektrik alan arasında bir faz gecikmesi olduğundan azalmaya başlar. Durulma frekansının üzerindeki bölgede ise elektrik alanı dipol dönmesini etkilemede fazla hızlı olduğundan hem ϵ' hem de ϵ'' 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 (ϵ'') karşılık gelen bir pik oluşur. Rezonans etkisi genellikle elektronik veya atomik kutuplanma ile ilgili iken, durulma etkisi yönelimli kutuplanma ile ilgilidir[Bartolomeo et al, 2001].

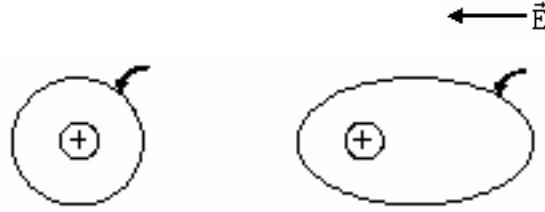


Şekil 3.5. Dielektrik mekanizmaların frekans karşılıkları

3.2.2.1 Elektronik Kutuplanma

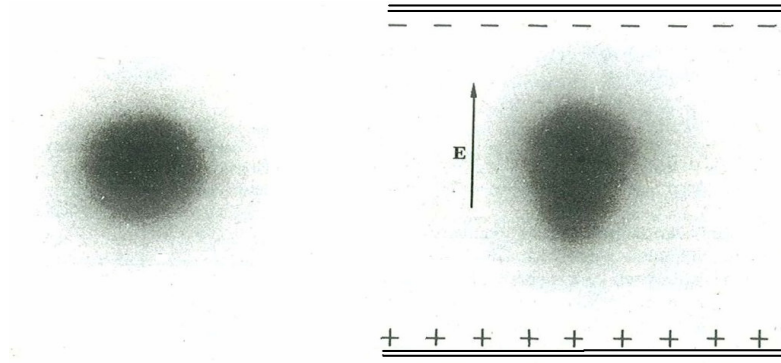
Bir atom pozitif yüklü bir çekirdek ve bunu çevreleyen bir elektron bulutundan oluşur. Böyle bir atoma dışarıdan bir elektrik alan uygulandığı zaman, atomda bir dipol momenti oluşacak şekilde elektronlar yörüngelerini değiştirirler, bunun sonucunda ise atomun simetrisi bozulmuş olur. Böylece dielektrik madde içinde bir kutuplanma meydana gelmiş olur. Bu kutuplanma türü yüksek frekanslarda (morötesi ve görünür bölge frekanslarında) yani çok küçük bir zaman aralığında ($\approx 10^{-15}$ 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 yaklaşır

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 et al., 1998, 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

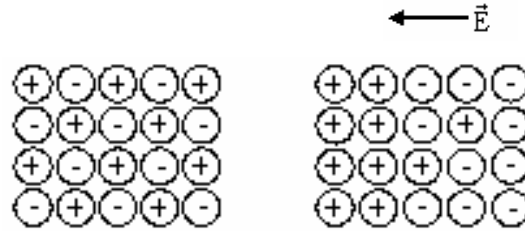
Şimdiye kadar değinilen elektronik, atomik ve yönelimli kutuplanma türleri homojen maddelerde gözlenir. Bu kutuplanma türleri atoma veya moleküle yerel olarak bağlı olan yüklerin hareketi ile gerçekleşir. Heterojen maddelerde ise bu üçüne ilave olarak dördüncü bir kutuplanma mekanizmasından söz edilebilir.

Heterojen maddelerde farklı sayıda yapı bulunur. Bu maddelerde bağlı 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, bağlı 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 ϵ' 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

Şekil 3.5' ten de görüldüğü gibi, elektronik kutuplanma (10^{15} Hz) bölgesine kadar gerçekleşebilir. Bu durumda atomların yeniden dizilmesine gerek yoktur. İyonik kutuplanma ise 10^3 Hz bölgesine kadar kolaylıkla gerçekleşir. Sadece iyonlar arasındaki bağlarda basit bir değişim gereklidir. Bu yüzden de bu tür dielektriklerde ϵ 'nin frekansa bağıllığı sözkonusu değildir. Apolar dielektriklerin geçirgenliği, çok geniş bir frekans bölgesi aralığında frekanstan bağımsızdır[HP 380-1, Venudhar and Mohan 2002, Kuo et al 2001].

3.3 KUTUPLANMA MEKANİZMALARI İÇİN TANIMLANAN EŞİTLİKLER

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.

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (3.23)$$

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 osilatörler olarak ele alınır ve maksimum hareket frekansı sistemin zaman sabitini belirler [Debye, 1929].

Bu şekilde ifade edilen dielektrik madde sistemleri için Debye eşitliği,

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

şeklindedir. Bu eşitlik reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

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

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

elde edilir. Burada $\omega \rightarrow 0$ iken ε_s ve $\omega \rightarrow \infty$ iken ε_∞ değerleri reel geçirgenliğin limit değerleridir.

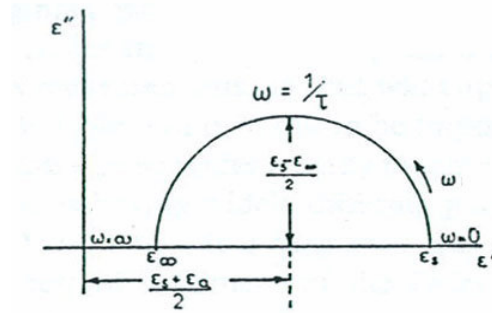
3.3.1.2 Cole-Cole Denklemi

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 elde 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 dielektrik enerjii

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 $\epsilon' = 0$ eksenini üzerinde olan ve kayıp faktörü pikinin ise $1/\tau$ 'da olduğu bir yarı-daire meydana gelir. Tek durulma zamanlı bir dielektrik için bu şekillenim $\epsilon' = (\epsilon_s + \epsilon_\infty)/2$ 'de ϵ' eksenini üzerinde merkezi olan ve yarıçapı $\epsilon' = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)/2$ olan bir yarım daire şeklindedir. $\omega\tau = 1$ iken $\epsilon' = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)/2$ değerinde ϵ'' en yüksek değerini alır. Yarım daire üzerinde verilen bir nokta, tepe noktası $\omega\tau = 1$ iken verilen bir frekansa uygun olur. Çizimde ω 'nın görünmeyişi çizim için bir dezavantajdır. ϵ_s ve ϵ_∞ ile karakterize edilen tek durulma zamanlı herhangi bir madde aynı arc çizimini verir.

Çoklu durulma frekanslarına sahip bir malzeme için ise, merkezi $\epsilon' = 0$ 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;

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (3.27)$$

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

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \cos \phi / A = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \cos \phi A^{-1} \quad (3.28a)$$

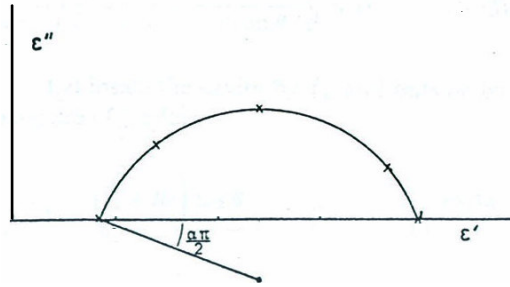
$$\epsilon''(\omega) = (\epsilon_\infty - \epsilon_s) \sin \phi / A = (\epsilon_\infty - \epsilon_s) A^{-1} \sin \phi \quad (3.28b)$$

elde edilir. Buradaki A ve ϕ sayıları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [Tsangaris, 1998].

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

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

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

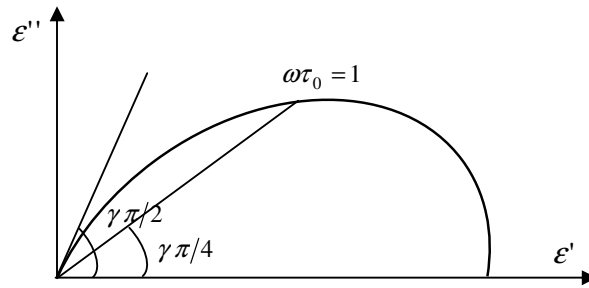


Şekil 3.12. α parametrelili Cole-Cole dağılımlı bir dielektrik için arc çizimi

$[2\pi\tau(1 + 2\sin\pi\alpha)]^{-1}$ frekansında ϵ'' maksimum iken, $\epsilon' = (\epsilon_s + \epsilon_\infty)/2$ olduğundan düşey eksen etrafında simetriktr. Dairesel yay, her iki taraftan da $(1 - \alpha)\pi/2$ 'lık bir dar açı ile ϵ' 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 daireysel fakat yüksek frekanslarda, düz bir çizgi boyunca yatay eksene (ϵ') yaklaştığını ifade eder. Bu çizgi ile ϵ' eksenini arasındaki açı $\gamma\pi/2$ dir.



Şekil 3.13. Cole-Davidson modelinin şematik çizimi

Bu durumda kompleks geçirgenlik;

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + (i\omega\tau))^\gamma}, \quad 0 < \gamma \leq 1 \quad (3.30)$$

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;

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty)(\cos\phi)^\gamma \cos(\gamma\phi) \quad (3.31a)$$

$$\epsilon''(\omega) = (\epsilon_s - \epsilon_\infty)(\cos\phi)^\gamma \sin(\gamma\phi) \quad (3.31b)$$

elde edilir. Burada;

$$\tan\phi = \omega\tau \quad (3.31c)$$

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

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

ile kullanılır. Burada $\omega_{\max}$, maksimum kaybın açısal frekansıdır [Davidson ve 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;

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^{\gamma}} \quad (3.32)$$

şeklinde verilir. Denklemden, $\alpha \neq 0, \gamma = 1$ için Cole-Cole tipi süreci, $\alpha = 0, \gamma \neq 1$ için Cole-Davidson tipi süreci, $\alpha \neq 0, \gamma \neq 1$ ise her iki tip sürecin de etkili olduğu görülür. (3.32) eşitliği reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa;

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty})(\cos\gamma\phi)A^{-\gamma} \quad (3.33a)$$

$$\epsilon''(\omega) = (\epsilon_s - \epsilon_{\infty})\sin(\gamma\phi)A^{-\gamma} \quad (3.33b)$$

bulunur. Buradaki A ve ϕ değerleri ise şu şekildedir:

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

$$\phi = \arctan \left[\frac{(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2}} \right] \quad (3.34d)$$

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

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

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha})^{\gamma}} - \frac{\sigma(i\omega)^{n-1}}{\epsilon_0} \quad (3.35)$$

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

3.4 ELEKTRİK MODÜLÜ FORMALİZMİ

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

Killer, polimerler ve kompozit polimerik malzemelerde, bu sistemleri heterojen hale getiren katkıların, dolguların ve hatta safsızlıkların bulunması nedeniyle ara yüzeysel 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.

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

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

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

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

$$M_s = \frac{1}{\epsilon_s} \quad , \quad M_\infty = \frac{1}{\epsilon_\infty} \quad (3.37)$$

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

3.4.1 Debye Denklemi

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

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

şeklinde yazılabilir. Bu kompleks ifade reel ve sanal kısımlarına

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

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

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 türetilir:

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

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

$$M'' = M_{\infty} M_s \frac{[(M_{\infty} - M_s) \sin\phi] A}{M_s^2 A^2 + 2A(M_{\infty} - M_s) M_s \cos\phi + (M_{\infty} - M_s)^2} \quad (3.39c)$$

Buradaki A ve ϕ terimleri daha önceden tanımlanmıştır.

3.4.3 Cole-Davidson Denklemi

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

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

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

$$M'' = \frac{M_{\infty} M_s (M_{\infty} - M_s) (\cos\phi)^{\gamma} \sin(\gamma\phi)}{M_s^2 + (M_{\infty} - M_s) (\cos\phi)^{\gamma} [2M_s \cos(\gamma\phi) + (M_{\infty} - M_s) (\cos\phi)^{\gamma}]} \quad (3.40c)$$

biçiminde yazılır. Buradaki ϕ terimi, denklem (3.29b)'de tanımlanmıştır.

3.4.4 Havriliak-Negami Denklemi

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

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

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

$$M'' = \frac{M_{\infty} M_s \left[(M_{\infty} - M_s) \sin(\phi\gamma) \right] A^{\gamma}}{M_s^2 A^{2\gamma} + 2A^{\gamma} (M_{\infty} - M_s) M_s \cos(\phi\gamma) + (M_{\infty} - M_s)^2} \quad (3.41c)$$

olarak gösterilebilir. Yine buradaki A ve ϕ terimleri, denklem (3.34c) ve denklem (3.34d)'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 sadeleştirilmiş alınmıştır. Denklemin tam gösterimi ve sadeleştirme işlemi EKLER'de ayrıntılarıyla sunulmuştur.

$$M^* = \frac{M_{\infty} M_s \left(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^{\gamma} \epsilon_0 \omega}{M_s \left(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^{\gamma} \epsilon_0 \omega + \epsilon_0 M_{\infty} \omega - \epsilon_0 M_s \omega + i\sigma(i\omega)^n M_s M_{\infty} \left(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^{\gamma}} \quad (3.42a)$$

$$M^* = \frac{M_\infty M_s}{M_s + (M_\infty - M_s) \left(1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}\right)^{-\gamma} - \frac{\sigma}{\epsilon_0} (i\omega)^{n-1} M_s M_\infty} \quad (3.42b)$$

$$M' = M_s M_\infty \frac{(M_\infty - M_s) \cos(\gamma\phi) + M_s A^\gamma - M_s M_\infty \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0}\right) A^\gamma \omega^{n-1} \cos\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right)}{\text{Payda}} \quad (3.42c)$$

$$M'' = M_s M_\infty \frac{(M_\infty - M_s) \sin(\gamma\phi) + M_s M_\infty \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0}\right) A^\gamma \omega^{n-1} \sin\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right)}{\text{Payda}} \quad (3.42d)$$

$$\begin{aligned} \text{Payda} = & 2M_s (M_\infty - M_s) \cos(\gamma\phi) + (M_\infty - M_s)^2 A^{-\gamma} + M_s^2 A^\gamma \\ & + M_s^2 M_\infty^2 \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0}\right)^2 A^\gamma \omega^{2(n-1)} - 2M_s M_\infty (M_\infty - M_s) \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0}\right) \omega^{n-1} \cos\left(\gamma\phi + \frac{\pi}{2}(n-1)\right) \\ & - 2M_s^2 M_\infty \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0}\right) \omega^{n-1} A^\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2}(n-1)\right) \end{aligned} \quad (3.42e)$$

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 ϕ terimleri ise şu şekilde tanımlanmıştır [Tsangaris et al., 1998]:

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

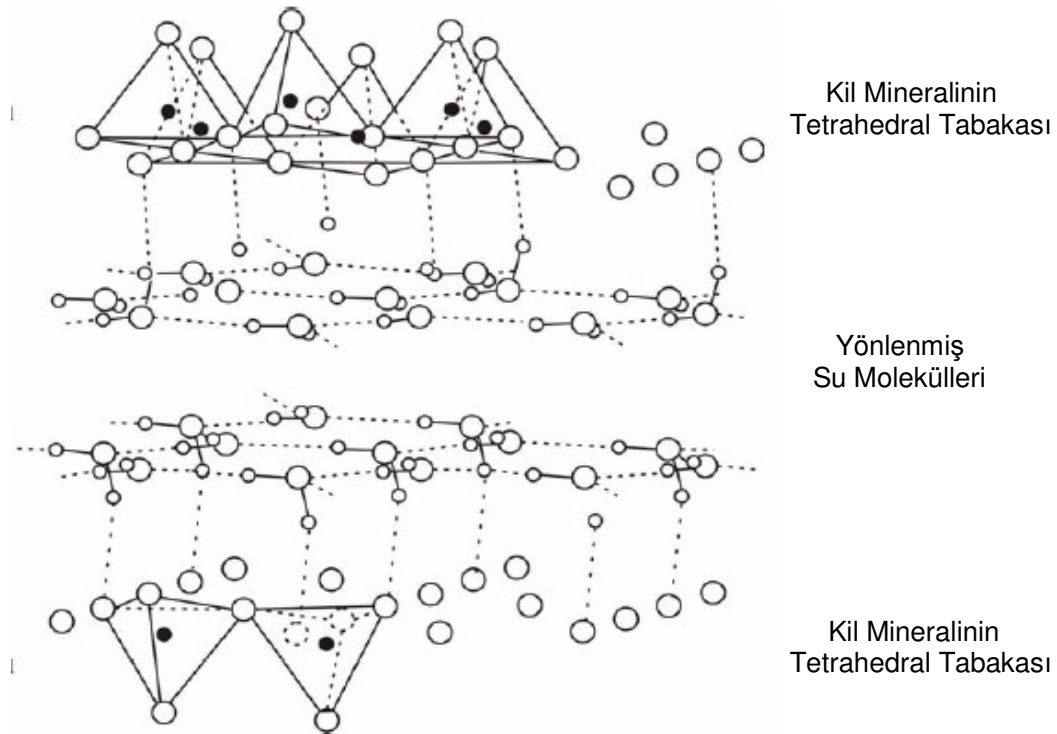
$$\phi = \arctan \left[(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos \frac{\alpha\pi}{2} / 1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin \frac{\alpha\pi}{2} \right] \quad (3.42g)$$

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].

3.5 KİL-SU ETKİLEŞİMLERİ

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 gipsit yüzeylerinin hidratasyonu ise yüzeyin hidroksil protonu ve suyun oksijen atomu arasında kurulan hidrojen bağı ile açıklanır. Değişebilen katyonların hidratasyonu, özellikle bir koordinasyon kompleksinin oluşmasına neden olur. Kuru kilin hidrate olması ekzotermik bir olaydır ki; bu durum ısıtılan kile dokunulduğunda sıcak oluşundan da anlaşılabilir[Yılmaz H., 2004].



ŞEKİL 3.14. Suyun tetrahedral tabakaya hidrojenler aracılığıyla bağlanması şematik gösterimi

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

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.

4. DENEY

4.1 Numunelerin Hazırlanması

Dielektrik özelliklerini incelemek amacıyla üç katı kil numunesi seçilmiştir. Toz halinde bulunan kil numuneleri S.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde bulunan pres kullanılarak 20 ton basınç altında yaklaşık 3-4 mm kalınlığında ve 13,4 mm çapında paletler haline getirilmiştir.

Numuneler önce kalın bir zımpara ile, daha sonra da su zımparası ile yaklaşık 2 mm kalınlık 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 2 mm civarındaki farklı kalınlıklara sahip diskler halinde üç farklı kil numunesi elde edilmiştir.

4.2 Numunelerin Ağırlıkça Yüzde Nem Ölçümleri

Farklı üç kil numunesinin nem tutma kapasiteleri, ağırlıkça yüzde oranlar yöntemine göre hesaplanmıştır. Önce üç numunenin kütleleri hassas terazi ile ölçülmüştür. Sonra numuneler, yapısında bulunan nemin uzaklaştırılması amacı ile 105⁰ C' lik etüvde bir saat boyunca bekletilmiştir. Etüvden çıkarılır çıkarılmaz kil numunelerinin kütleleri teker teker hassas terazi ile ölçülmüştür. Bu ölçülen değerler, numunelerdeki nemin tamamen uzaklaştırıldığı varsayılarak başlangıç değerleri olarak kabul edilmiştir. Daha sonra bağlı nemi % 38-40 olan laboratuvar ortamına bırakılan üç numunenin de her yarım saatte bir, ayrı ayrı kütle ölçümleri yapılmıştır. 4.saat sonunda kil numunelerinin nem tutma kapasitesinin doyuma ulaştığı görülmüştür. Son olarak, aşağıdaki bağıntı yardımı ile her bir numune için ağırlıkça yüzde oranlarının zamana göre değişimleri elde edilmiştir.

Ağırlıkça yüzde oran şu şekilde bulunmuştur:

$$ağırlıkça \% nem = \frac{(ölçülen\ değer) - (ilk\ değer)}{(ilk\ değer)} \quad (4.1)$$

4.3 Dielektrik Ölçümler

Bu üç 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 pastalardan kontaklar alınarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Dielektrik geçirgenlik en genel halde;

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) \quad (4.2)$$

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

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

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

$$1S = 1(\text{ohm})^{-1} = 1\text{mho} \quad (4.4)$$

ile verilir.

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

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{B(\omega)}{\omega C_0}; \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{G(\omega)}{\omega C_0} \quad (4.5)$$

Daha önceden de tanımlandığı gibi C_0 sistemin geometrik kapasitansıdır ve

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4.6)$$

ile verilir. Burada

ϵ_0 : boşluğun dielektrik sabiti

A : diskin yüzey alanı

d : diskin kalınlığı

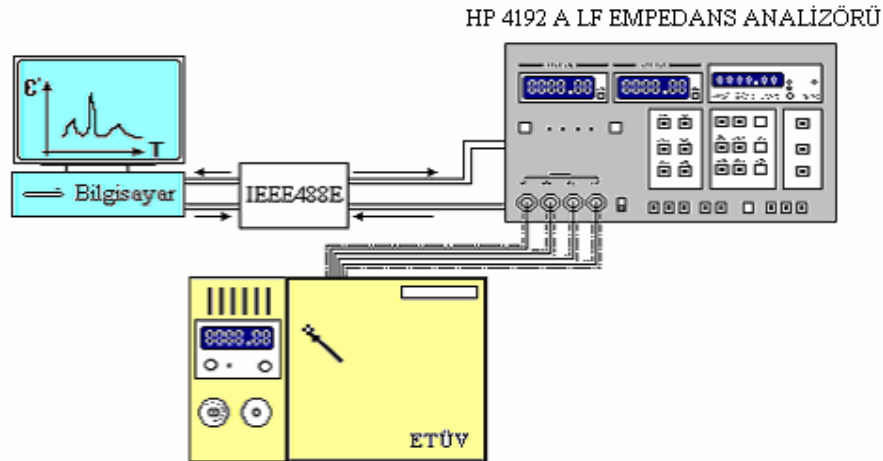
ω : uygulanan elektrik alanın açısal frekansıdır.

Ölçümlere orjinal karışım numunesiyle başlanmıştır. İlk olarak; numune 105°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 laboratuvar ortamına çıkarılmış ve hemen ölçüm alınmıştır. Daha sonra, 4 saat boyunca her yarım saatte bir, 24 saat ve bir hafta sonra olarak belirlenen zaman aralıklarında ölçümler alınmıştır. Her bir ölçümde 85 frekans değerine karşılık gelen 85 değer kaydedilmiştir. Dielektrik ölçümler, numunelerin yüzeylerinden alınan kontakların empedans analizörüne bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Aynı işlemler ön konsantre ve Fe'li siklon üst akım numuneleri için de gerçekleştirilmiştir.

Orjinal karışım, ön konsantre ve Fe'li siklon üst akım numunelerinin dielektrik ölçümleri için 5Hz-13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.1' 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 Nem Ölçüm Sonuçları

Farklı üç kil numunesinin ağırlıkça nem tutma-zaman değişimleri şekil 5.1’de gösterilmiştir. Her üç numunenin nem alma kapasitesinin zamanla üstel bir şekilde artarak maksimum nem tutma değerine asimptotik olarak yaklaştığı görülmüştür. Numunelerin zamanla ağırlıkça nem tutma değişiminin

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

amprik ifadesi ile verilebileceği belirlenmiştir.

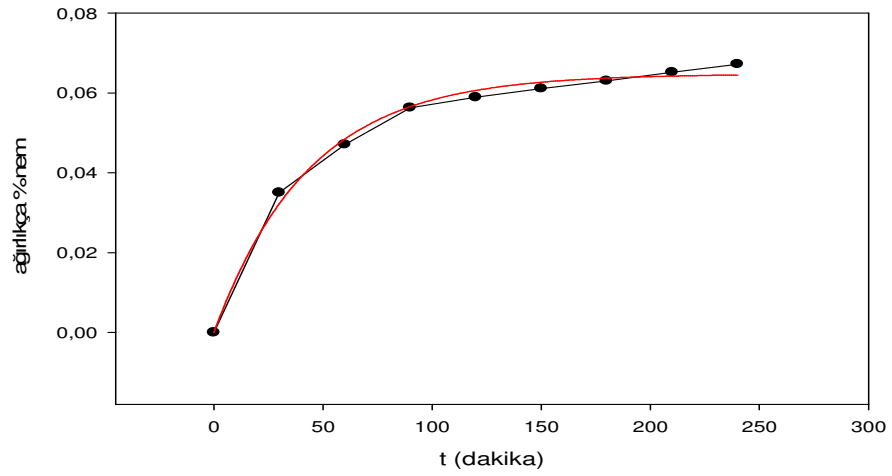
A ve b katsayıları, yukarıdaki ifadenin deneysel değerlere Sigma Plot 9.0 programı kullanılarak fit edilmesi ile her üç numune için de hesaplanmıştır. Elde edilen bu katsayılar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Farklı kil numunelerinin nem tutma parametreleri

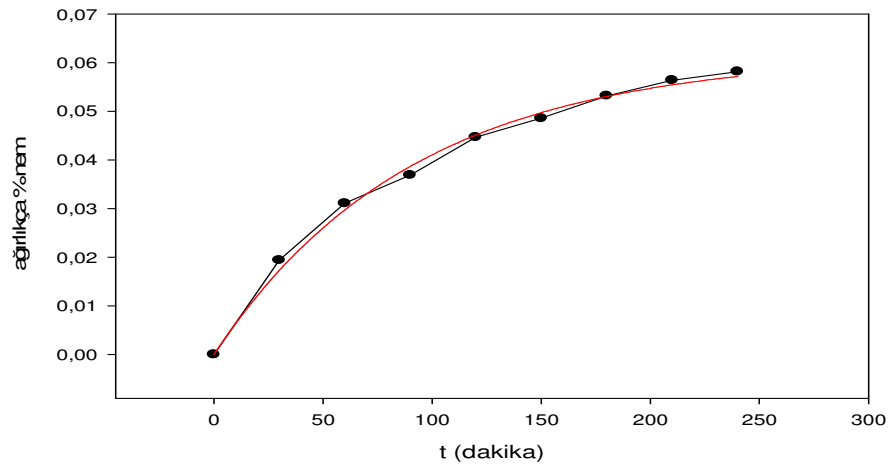
	A	b (1/dakika)
Orjinal	0,0626	0,0251
Ön konsantre	0,0616	0,0110
Fe’li siklon üst akım	0,0640	0,0098

Çizelge 5.1’den her üç numunenin de nem tutma kapasitesinin yaklaşık olarak aynı (A değerleri) olduğu görülmektedir. Diğer taraftan orjinal kil numunesi, ön konsantre ve Fe’li siklon üst akım numunesinden daha kısa bir sürede maksimum neme ulaşmıştır. Bu süre, diğer numunelerin maksimuma ulaşma sürelerinin yaklaşık 1/3’ü kadardır.

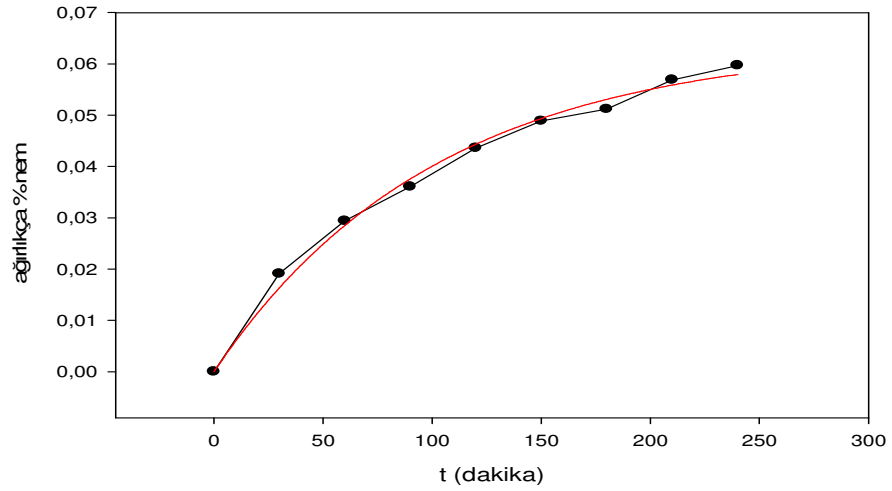
Üzerinde hiçbir işlem yapılmamış orjinal kil numunesinin maksimum neme ulaşma zamanının manyetik zenginleştirme sonucunda elde edilen diğer iki numuneye göre daha kısa olması, yapısındaki neme hassas kil dışı manyetik bileşen oranlarının daha yüksek olmasıdır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.1. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin zaman- ağırlıkça yüzde nem grafikleri

5.2 Numunelerin Dielektrik Ölçüm Sonuçları

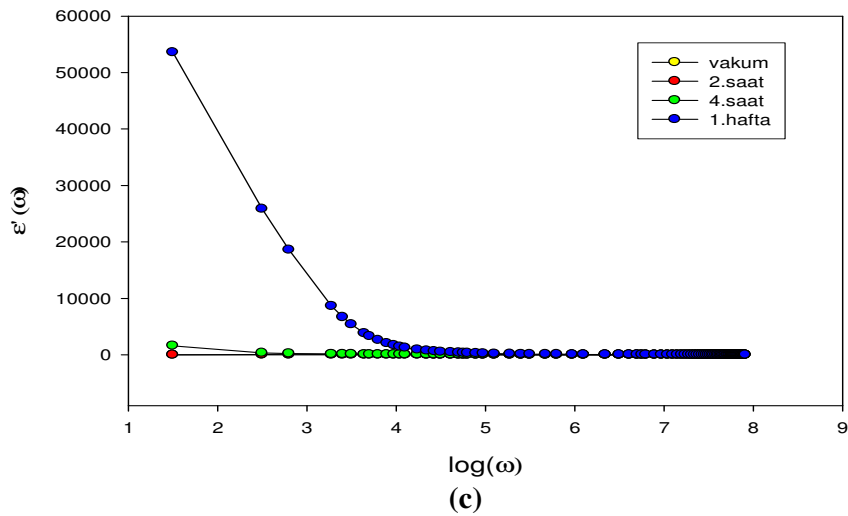
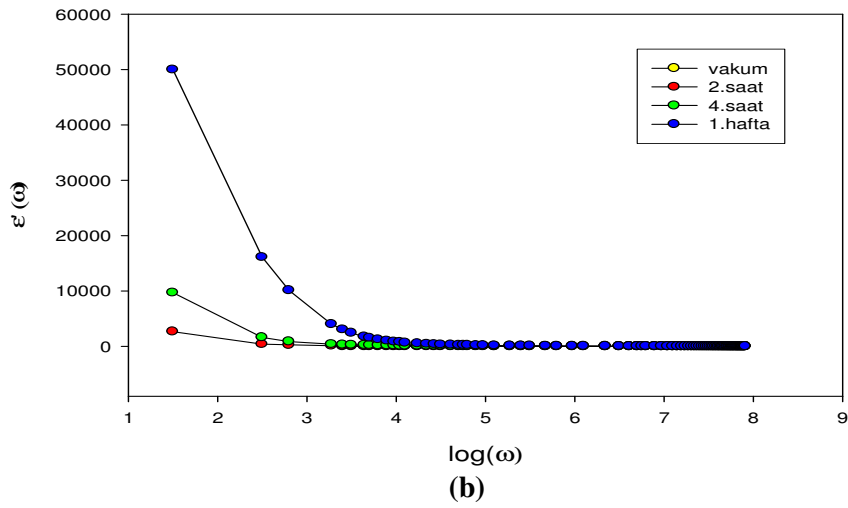
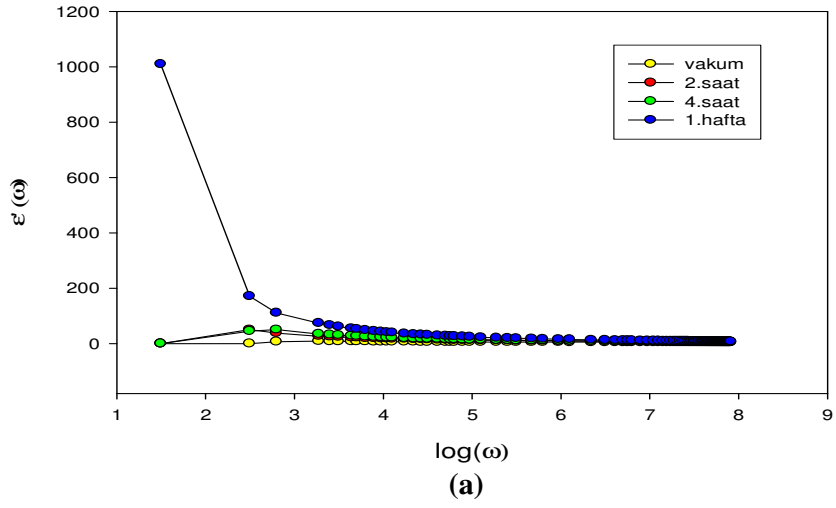
Bu çalışmada orjinal karışım, ön konsantre ve Fe'li siklon üst akım olmak üzere üç farklı kil numunesi incelenmiştir. Numunelerin, bir önceki bölümde bahsedilen deney düzeneği kullanılarak dielektrik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sonucunda her üç numune için de ayrı ayrı vakum, 2. saat, 4. saat ve 1. hafta olarak belirlenen zaman dilimleri için dielektrik ölçümler alınmıştır.

Ölçümler sonucunda her üç numuneye ait hesaplanan kompleks dielektrik sabitinin reel $\epsilon'(\omega)$ ve sanal $\epsilon''(\omega)$ kısımlarının $\log(\omega)$ 'ya göre değişimi şekil 5.2 ve 5.3'de, geçirgenlik modunda çizilen Cole-cole eğrileri ise şekil 5.4'de verilmiştir. Şekil 5.4'den de görüleceği gibi Cole-cole yarım daireleri elde edilemezken Elektrik modülü formalizminde çizilen eğrilerde bu yarım daireler oldukça belirgin şekilde görülebilmektedir. Bu nedenle fit işlemleri elektrik modülü formalizminde çizilen eğrilerde gerçekleştirilmiştir.

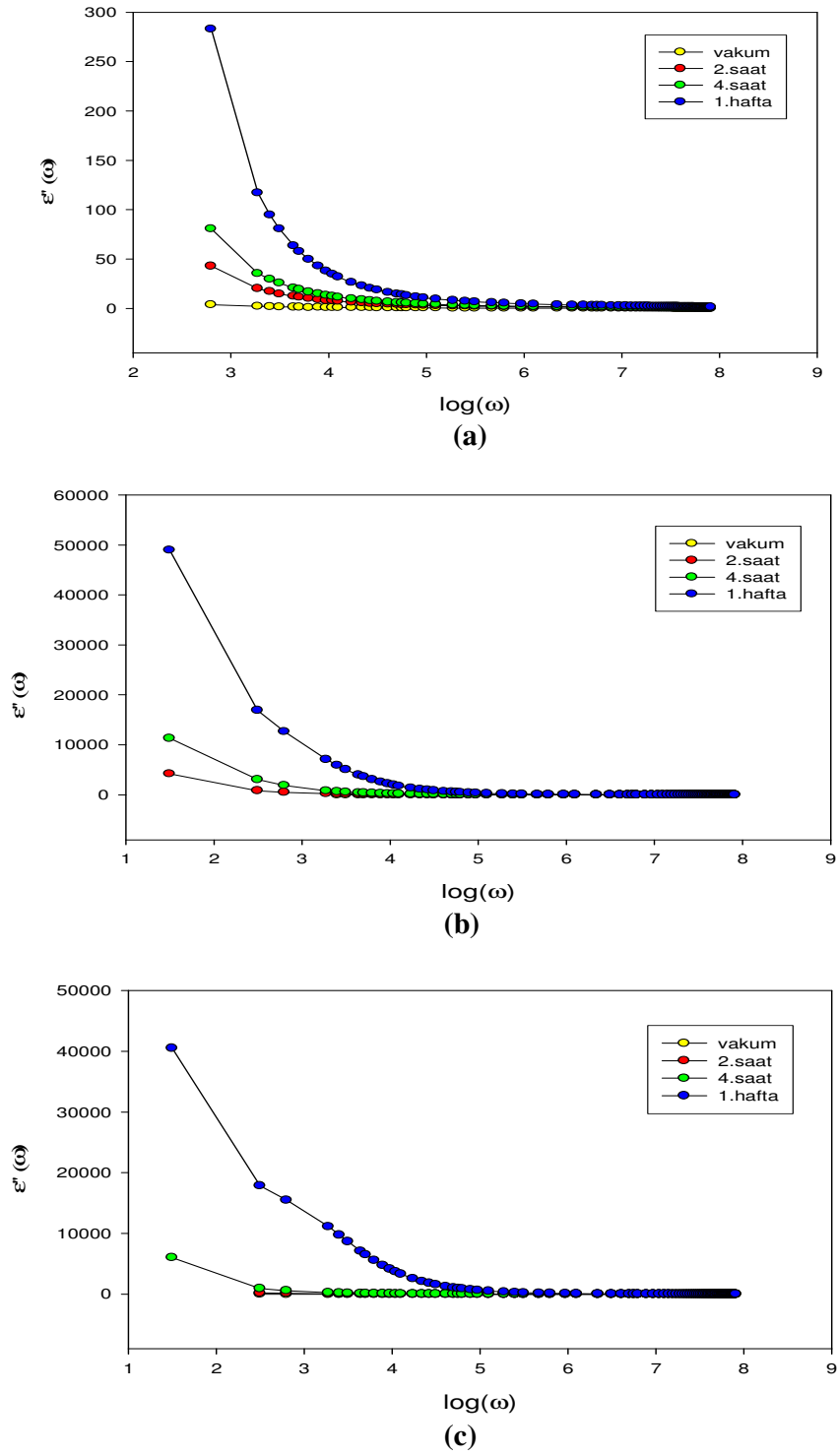
Kil mineralleri, bulundukları ortamdaki nem koşullarından önemli ölçüde etkilenir. Yüzeylerinin ve katmanlar arası bölgelerinin nem kapma özellikleri nedeni ile, özellikle nötr olmayan katman yapılı killeri, katmanlar arası bölgeye su alarak şişerler. Killere tutunan veya katmanlar arasına giren bu su, dielektrik geçirgenliğin artmasına neden olur.

Şekil 5.2 ve 5.3 incelendiğinde orjinal numunenin kompleks geçirgenliğinin reel ve sanal kısımlarının düşük frekans bölgelerinde diğer iki numuneye göre oldukça küçük kaldığı, buna karşın yüksek frekans bölgelerinde her üç numune için de eğrilerin üstel azalarak aynı değerlere yaklaştığı görülmektedir. Diğer taraftan da, her üç numune için de kompleks geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının artan nem miktarı ile arttığı görülür. Bir başka deyişle, düşük su miktarlarında, su miktarının azalmasına bağlı olarak kompleks geçirgenliğin reel ve sanal kısımlarının her ikisinde de belirgin bir azalış göze çarpar[Campbell, 1990]. Bu ise, nem arttıkça numunedeki hem enerji depolanması, hem de enerji kayıplarının arttığını yani artan nemle ara yüzeyel kutuplanmanın (MWS) baskın hale geldiğini göstermektedir.

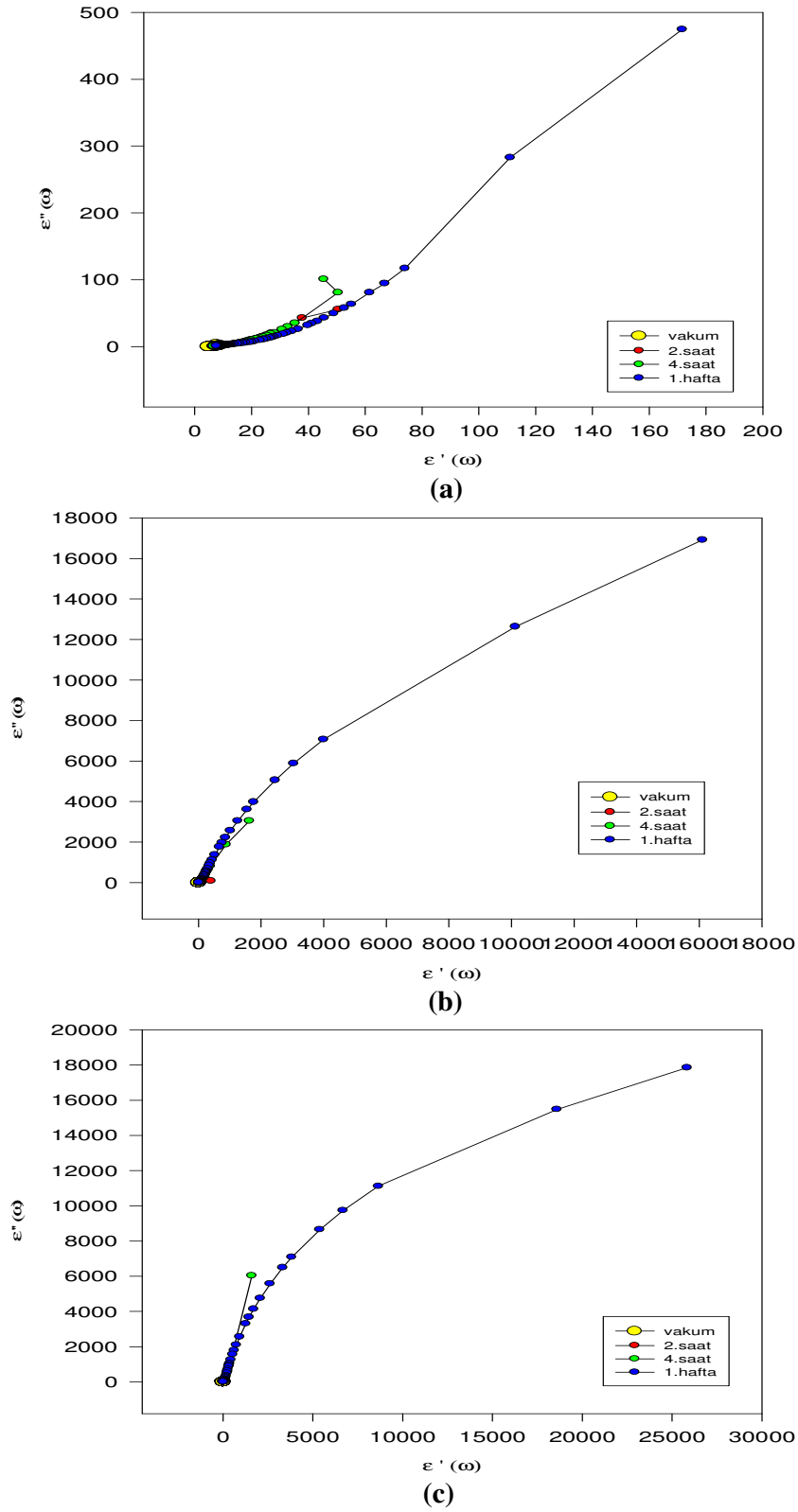
Şekil 5.4'de daha nemli durumlara gidildikçe, orjinal numune hariç diğer iki numune için Cole-cole yarım dairesinin tamamlanma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $\log(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ grafikleri



Şekil 5.3. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $\log(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ grafikleri



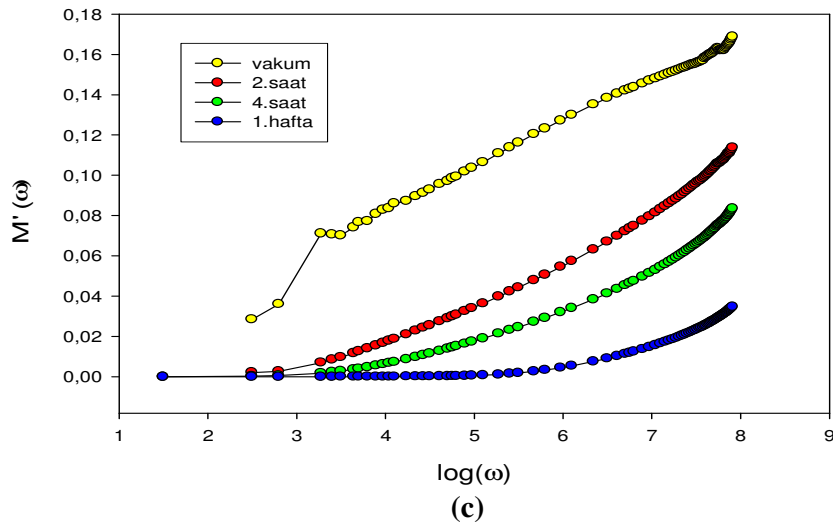
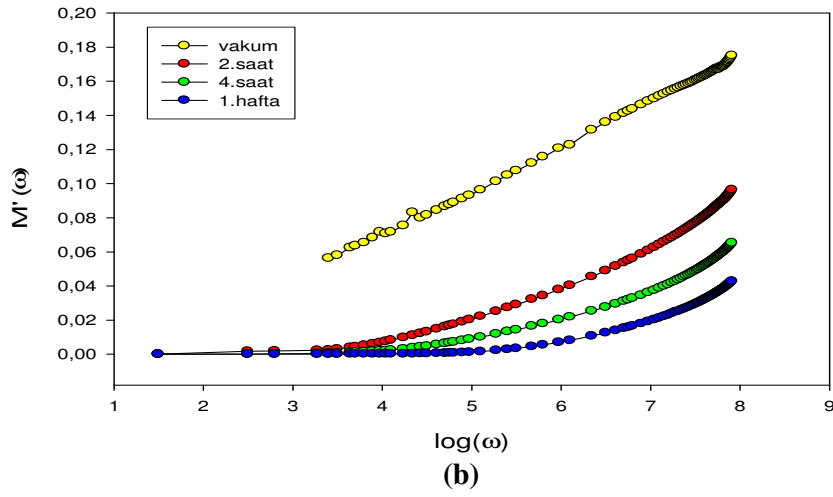
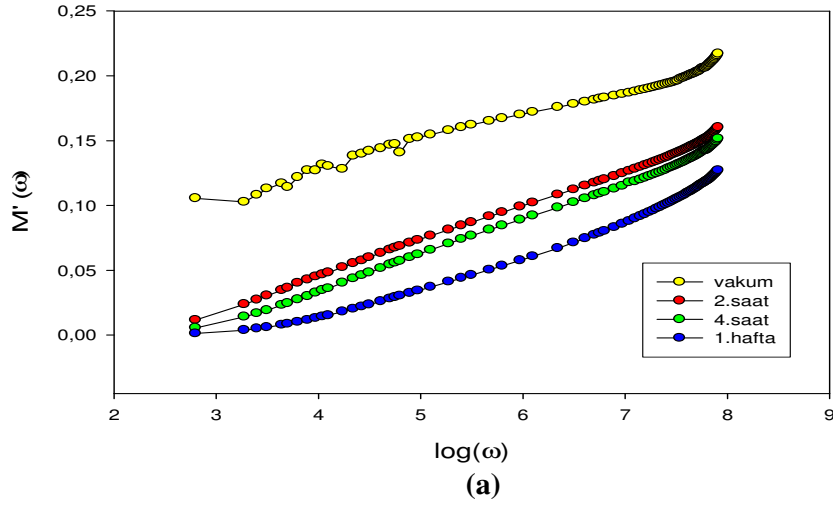
Şekil 5.4. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $\varepsilon'(\omega) - \varepsilon''(\omega)$ grafikleri

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

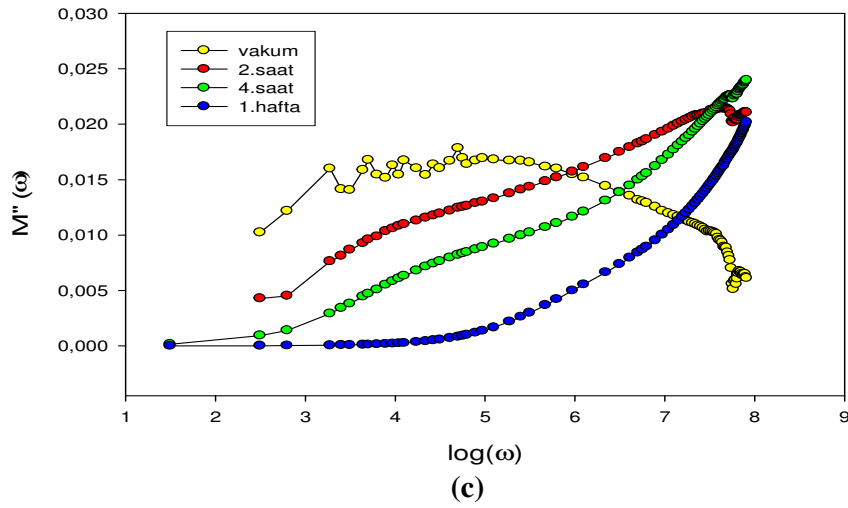
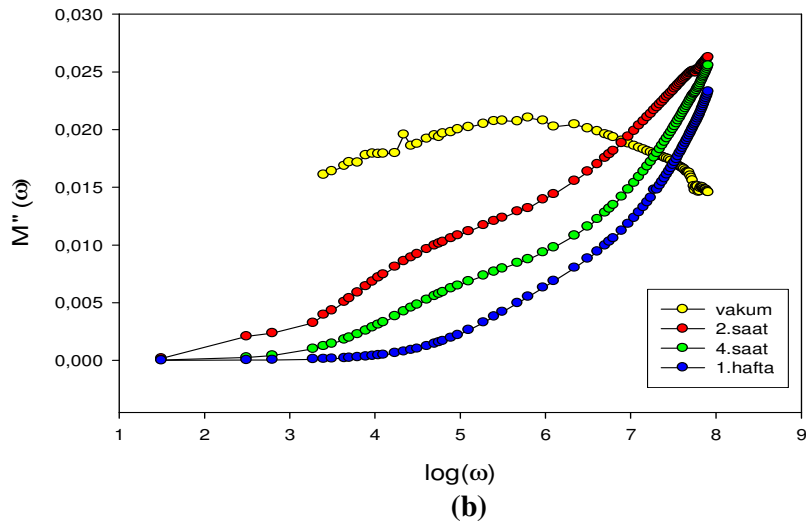
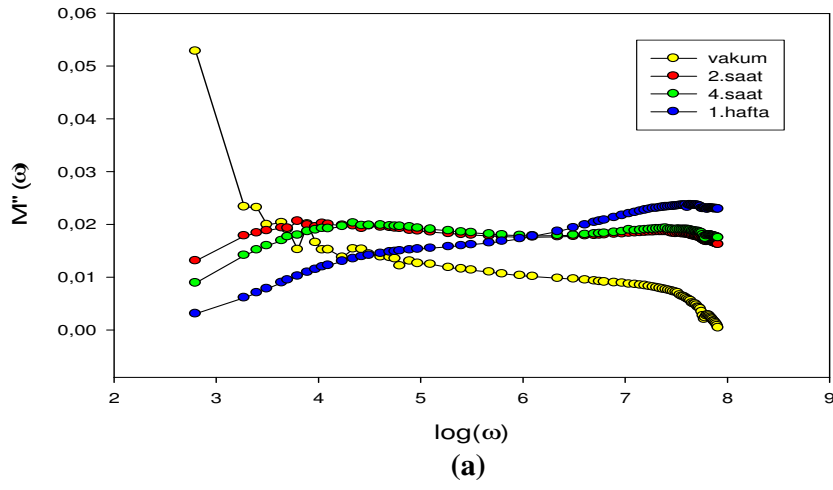
Her üç numuneye ait elektrik modülü formalizminde çizilen reel $M'(\omega)$, sanal $M''(\omega)$ ve kayıp tanjant $\tan(\delta(\omega))$ 'nın $\log(\omega)$ 'ya göre değişimi şekil 5.5, 5.6 ve 5.7'de, Şekil 5.8'de ise bu formalizmdeki Cole-cole eğrisi verilmiştir.

Şekil 5.5 ve 5.6'dan orjinal kil numunesinin artan nemle birlikte reel $M'(\omega)$ kısmının orantılı olarak azaldığı diğer iki numunede ise bu paralel azalmanın yüksek frekans bölgelerinde bozulduğu görülmektedir. Yine bu iki numuneye ait sanal $M''(\omega)$ kısmının nem artıkça bir kayıp pik verme eğilimi olmasına rağmen orjinal numunede bu görülmemektedir. Bu eğilim, şekil 5.7'de görülen kayıp tanjant eğrilerinde maksimum nem durumunda net bir biçimde piklerin ortaya çıkması ile belirginleşmiştir. Artan su miktarı ile birlikte kayıp tanjant faktörünün değeri de artmaktadır[Campbell, 1990].

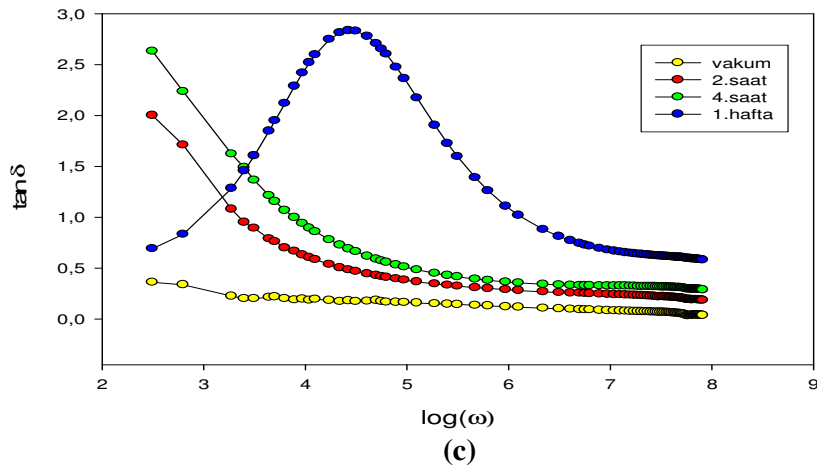
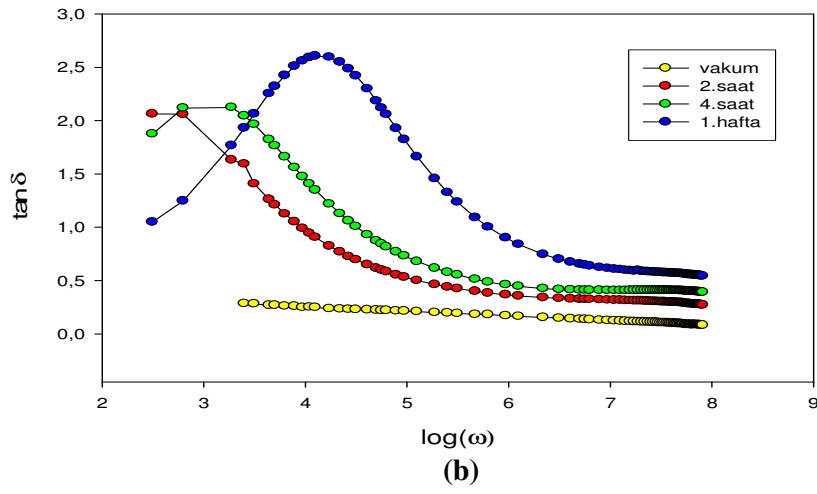
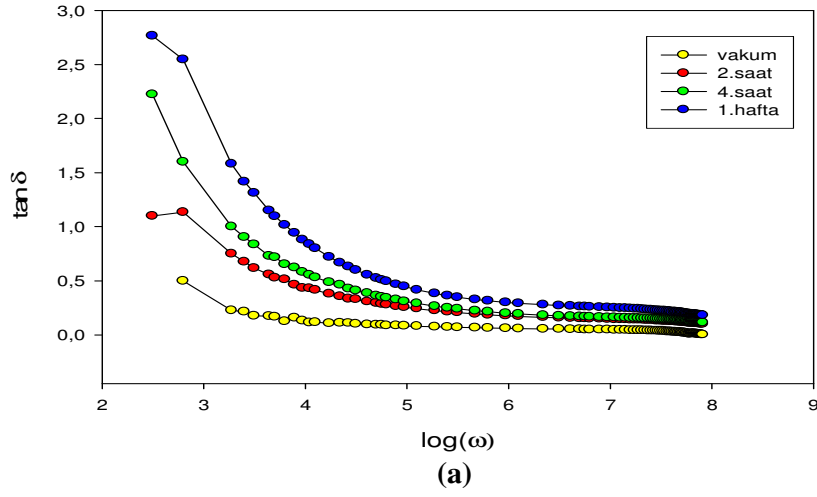
Şekil 5.8'deki Cole-cole eğrilerinden her üç numune içinde, düşük frekans bölgesinde MWS süreci ile yüksek frekans bölgesinde HN süreci olmak üzere iki sürecin etkili olduğu görülmektedir. Orjinal numune için vakum ortamında yüksek frekanslarda etkili olan yönelimli kutuplanma HN, düşük frekanslarda etkili olan ara yüzeysel kutuplanma MWS'den daha büyük değerde iken, nemli ortamlara gidildikçe bu durumun tersine döndüğü görülmektedir.



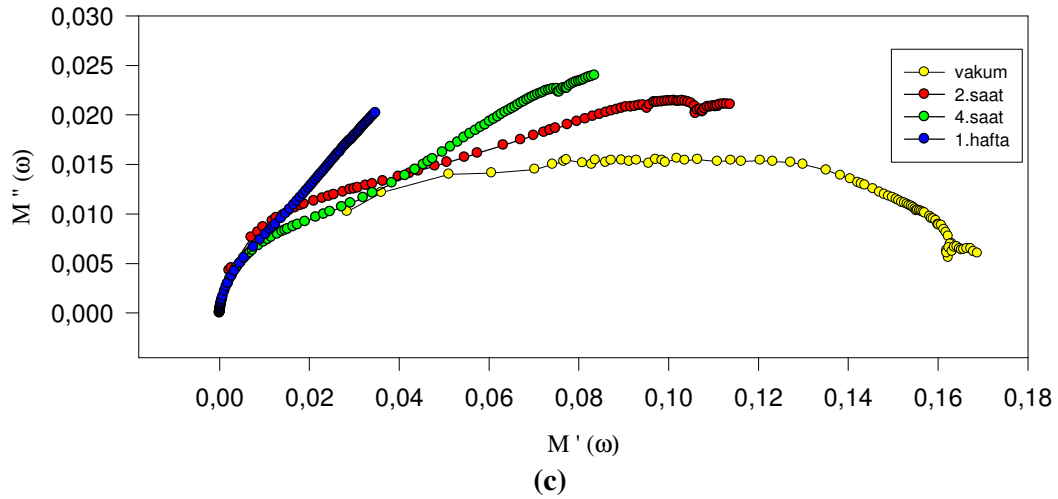
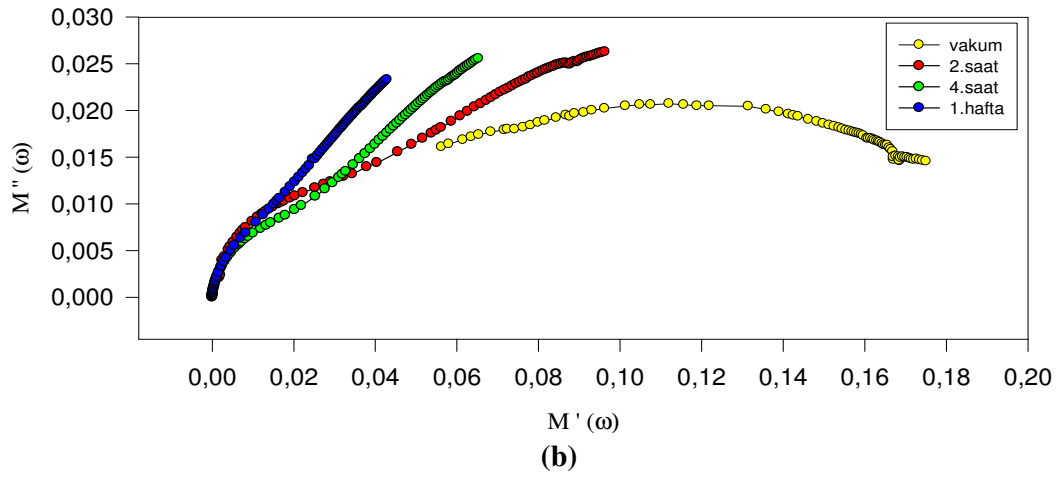
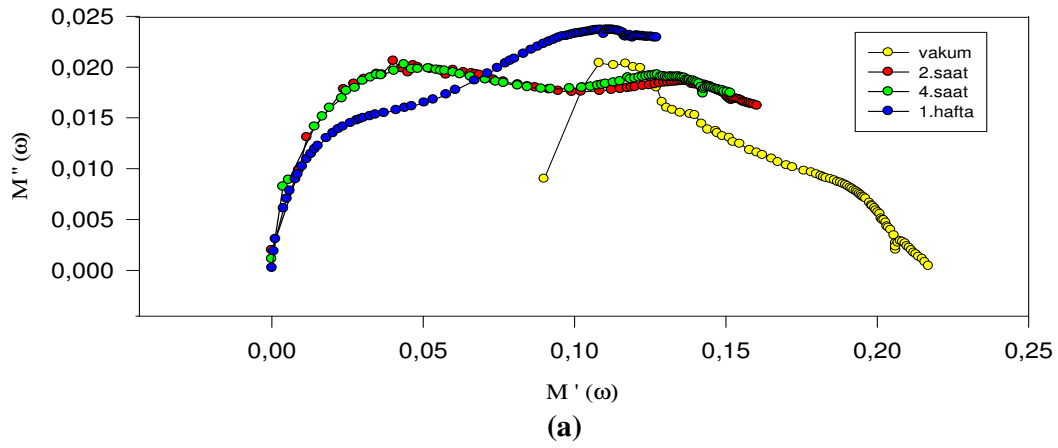
Şekil 5.5. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $\log(\omega) - M'(\omega)$ grafikleri



Şekil 5.6. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $\log(\omega) - M''(\omega)$ grafikleri



Şekil 5.7. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $\log(\omega) - \tan(\delta(\omega))$ grafikleri



Şekil 5.8. a) orjinal, b) ön konsantre, c) Fe'li siklon üst akım numunelerinin $M'(\omega) - M''(\omega)$ grafikleri

5.3 Dielektrik Parametreler

Her üç numuneye ait vakum, 2. saat, 4. saat ve 1. hafta durumlarına ait fit parametrelerinin bulunması amacı ile, elektrot kutuplanmasını minimuma indirerek Cole-cole eğrilerinde yarım dairenin görünmesini mümkün hale getiren elektrik modülü formalizmi tercih edilmiştir. Her üç numuneye ait deneysel değerler ve ara yüzeysel kutuplanma MWS modeline göre elde edilen parametreler kullanılarak çizilen Cole-cole eğrileri şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de ve elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.2, 5.3 ve 5.4’de verilmiştir.

5.3.1 Orjinal Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri

Orjinal kil numunesinin deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri (Şek.5.9) incelendiğinde, nem arttıkça en güzel uyuma gidildiği görülmektedir. Ayrıca artan nemle, yüksek frekanstaki değerler çok az artarken, düşük frekans bölgesindeki değerler belirgin şekilde azalmaktadır. Bu durumun, geçirgenlik moduna döndüğünde tersine döndüğüne dikkat edilmelidir. Yüksek frekans bölgesindeki kutuplanma mekanizması Yönelimli Kutuplanma ve düşük frekans bölgesindeki ise Ara yüzeysel Kutuplanma olduğundan, artan nemle birlikte, σ iletkenliği de artacağından, ara yüzeysel kutuplanma baskın hale gelecektir. Bu açıklamalar, çizelgedeki σ değerlerinin artan nemle artması ile de desteklenmektedir.

Çizelge 5.2 Orjinal karışım kil numunesinin, Şekil 5.9’daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

Parametreler	VAKUM	2.SAAT	4.SAAT	1.HAFTA
α	0,43	0,53064	0,55064	0,4106
τ	0,09147	0,021429	0,01429	1,11093 e-5
M_s	0,087	0,03207	0,030	0,04203
M_{son}	0,2267	0,29015	0,2815	0,2365
γ	0,2734	0,3416	0,370516	0,4160
n	0,17	0,256	0,261	0,3137
σ	-6,46 e-10	-2,5 e-8	-3,6 e-8	-1,5338 e-7

τ durulma zamanı, nemli ortamlara gidildikçe azalmaktadır. Durulma zamanındaki bu azalış başlangıçtaki vakumlu ortama göre bir hafta sonunda 10^{-4} kat küçülerek $1,11093 \cdot 10^{-5}$ değerine ulaşmıştır. Bu nem etkisi, genel olarak malzemeler üzerinde sıcaklık etkisi ile τ 'nun azalması durumuna benzerdir.

Çizelge 5.2 incelendiğinde, n parametresinin artan nemle büyüdüğü görülmektedir. Bu ise, artan nemle σ iletkenliğinin frekansa bağımlılığının arttığı anlamına gelir.

Cole-Davidson parametresi γ ise artan nemle artmıştır. Dolayısı ile artan nem, Cole-Cole yarım dairesini asimetric şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın büyümesine neden olmuştur.

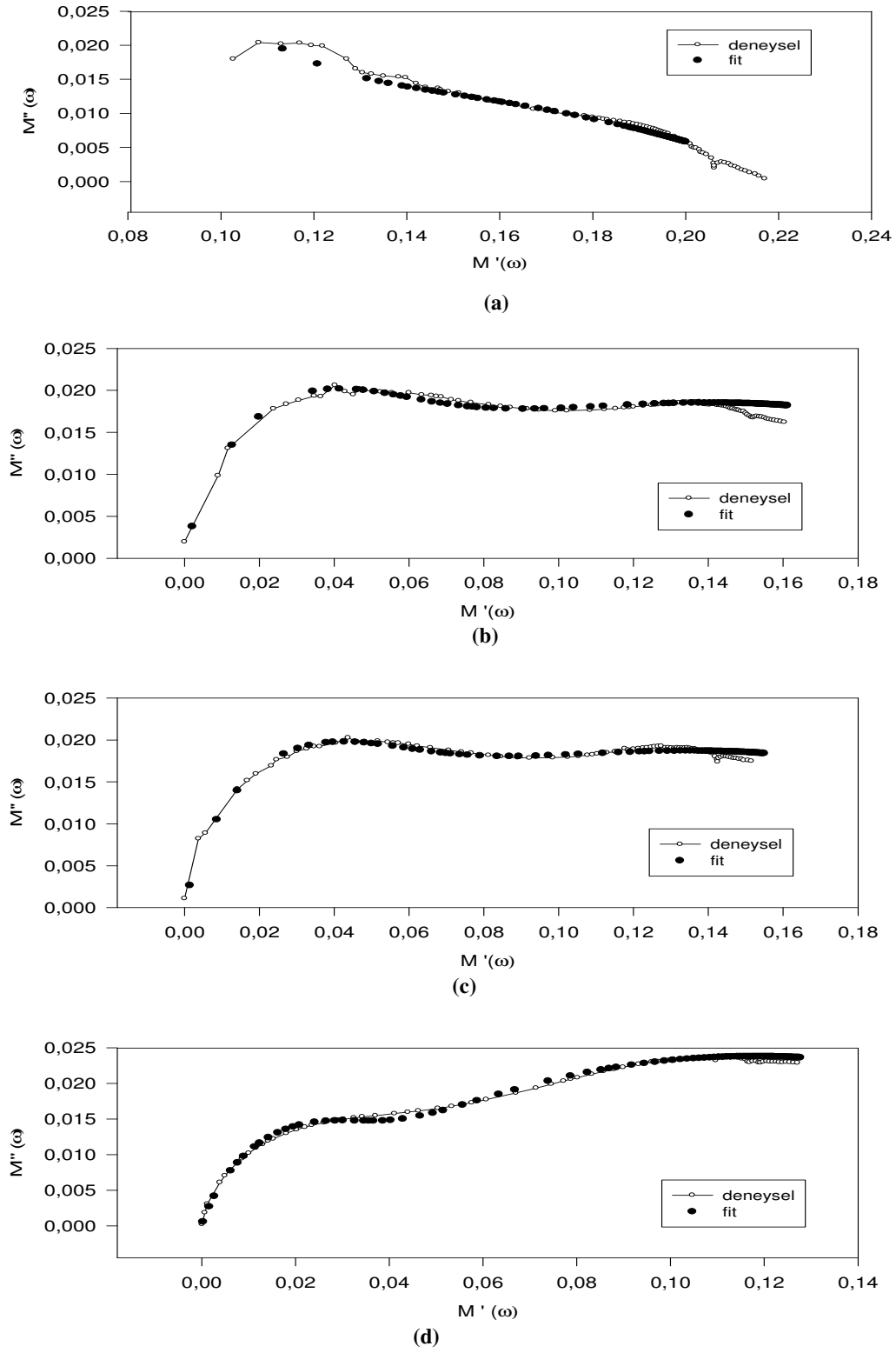
Cole-Cole parametresi olan α 'nın ise, vakumlu ortamdan başlayarak artan nemle arttığı fakat bir hafta sonunda tekrar azaldığı görülmektedir.. Bu ise, bir hafta sonundaki α değeri hariç artan nemle Cole-Cole yarım dairesindeki simetric bozulmanın arttığını gösterir.

5.3.2. Ön Konsantre Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri

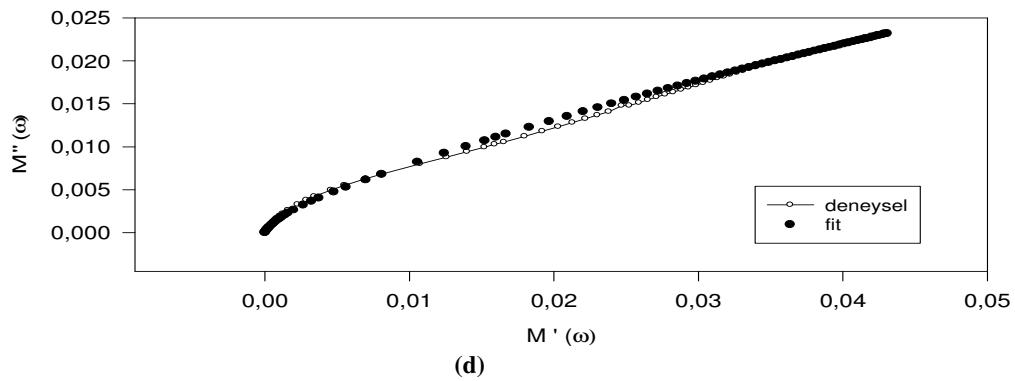
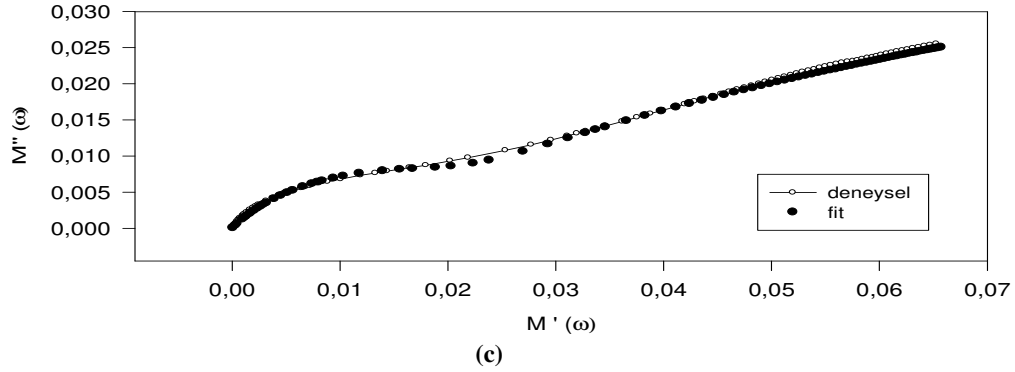
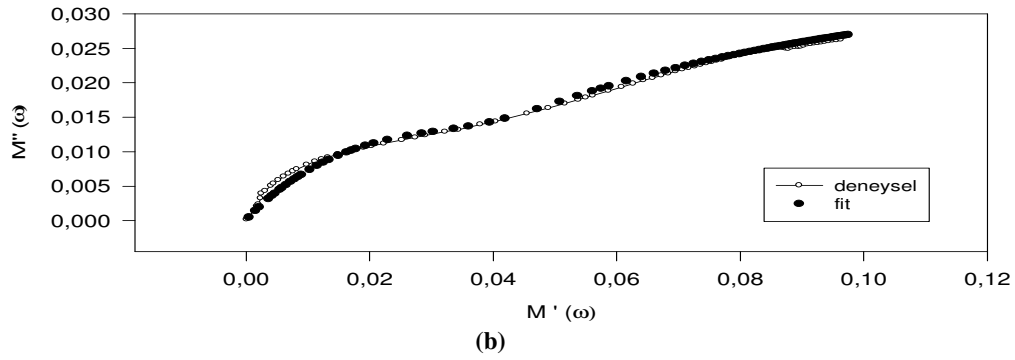
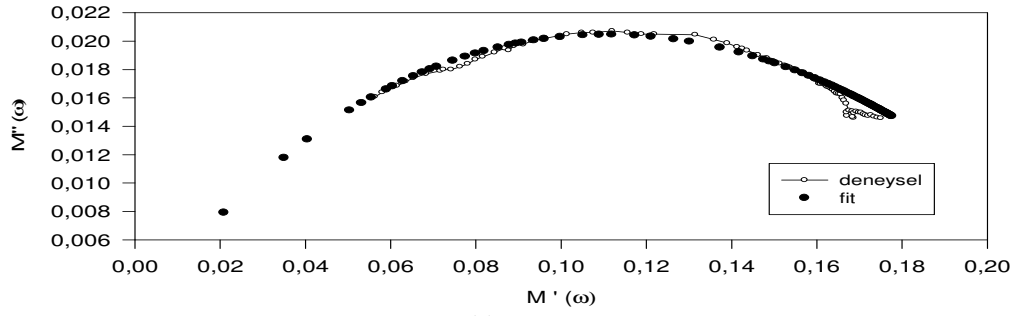
Ön konsantre kil numunesi için elde edilen, fit parametreleri Çizelge 5.3'de ve deneysel veriler ile bu parametrelerin kullanılması ile çizilen grafikler Şekil 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.3 Ön konsantre kil numunesinin, Şekil 5.10'daki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

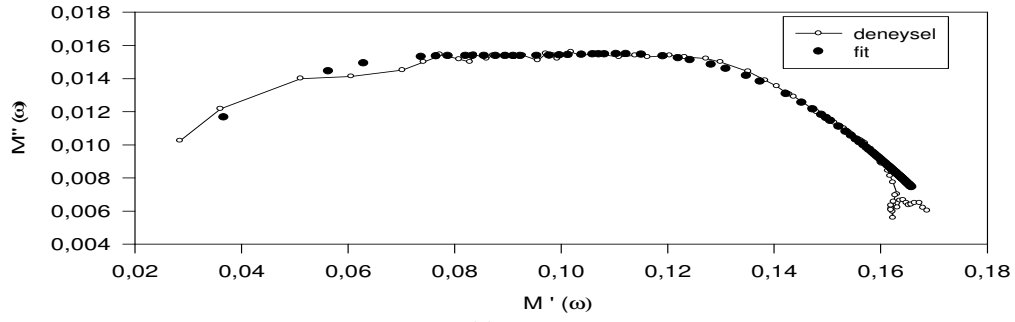
Parametreler	VAKUM	2.SAAT	4.SAAT	1.HAFTA
α	0,534	0,172	0,2	0,37
τ	0,123	$7,4 \cdot 10^{-7}$	$7,0853 \cdot 10^{-7}$	$3,98 \cdot 10^{-6}$
M_s	0,024859	0,059	0,028565	0,092
M_{son}	0,2371	0,4123	0,45	0,447
γ	0,4314	0,23	0,3221	0,5013
n	0,5907	0,51	0,38	0,25
σ	$-6,657 \cdot 10^{-10}$	$-6,92192 \cdot 10^{-8}$	$-5,7895 \cdot 10^{-7}$	$-1,438 \cdot 10^{-5}$



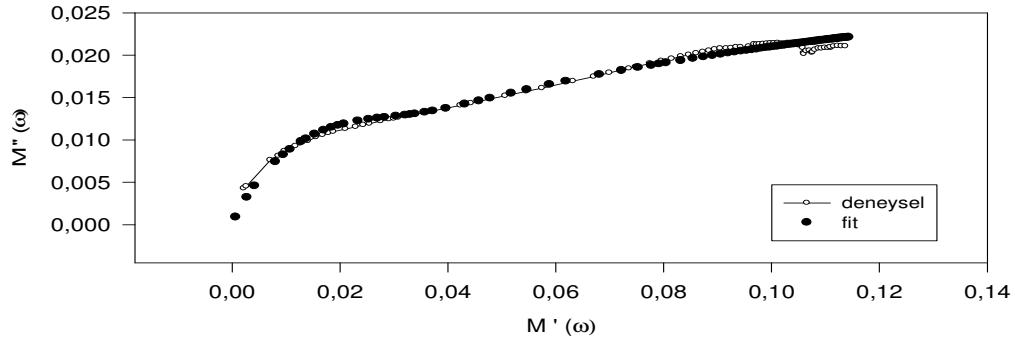
Şekil 5.9. Orjinal karışım kil numunesinin (a)Vakumdaki, (b)2 saat, (c)4 saat ve (d)1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri.



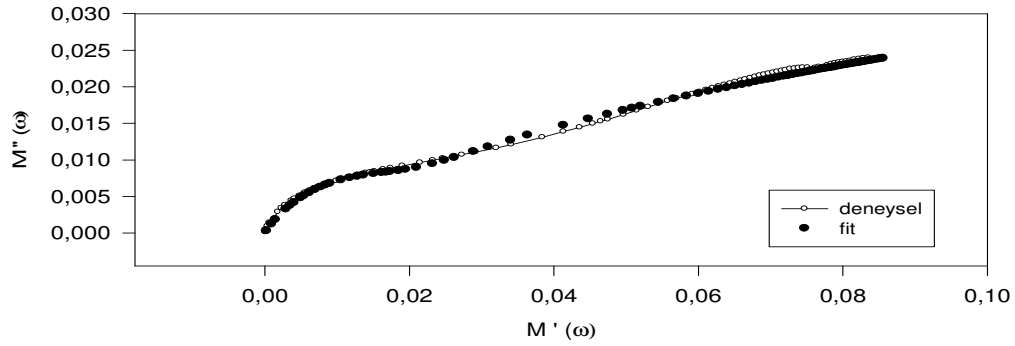
Şekil 5.10. Ön konsantre kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 2 saat, (c) 4 saat ve (d) 1 hafta sonraki deneysel ve teorik Cole-Cole eğrileri



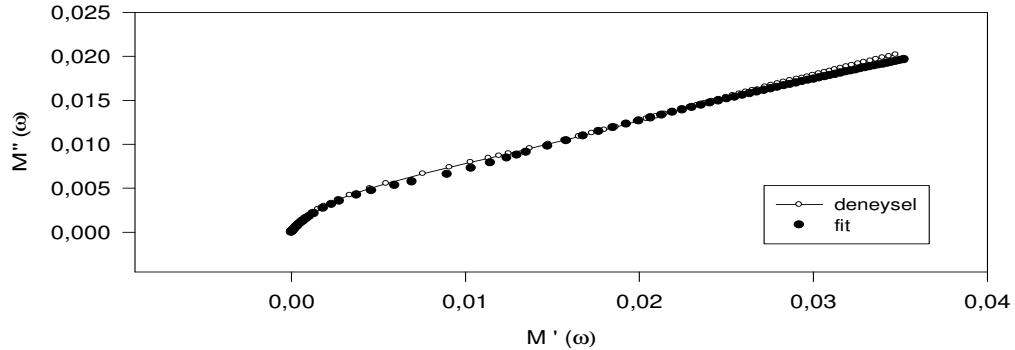
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.11. Fe'li siklon üst akım kil numunesinin (a) Vakumdaki, (b) 2 saat, (c) 4 saat ve (d) 1 hafta sonraki deneyssel ve teorik Cole-Cole eğrileri.

τ durulma zamanı, nemli ortamlara gidildikçe azalmaktadır. Fakat 1 hafta sonundaki durulma zamanında bir miktar artışın olduğu görülmektedir. Geneldeki bu azalış başlangıçtaki vakumlu ortama göre bir hafta sonunda 10^{-5} kat küçülerek $3,98 \cdot 10^{-6}$ değerine ulaşmıştır.

Diğer taraftan çizelge 5.3 incelendiğinde, n parametresinin artan nemle azaldığı görülmektedir. Bu ise bu numunede, artan nemle σ iletkenliğinin frekans bağımlılığının azaldığı anlamına gelmektedir.

γ parametresi ise vakumdaki durum hariç artan nemle artmıştır. Dolayısı ile artan nem, Cole-Cole yarım dairesini asimetric şekilde etkileyerek yüksek frekans bölgesinde bozulmanın büyümesine neden olmuştur.

Cole-Cole parametresi olan α 'nın ise, vakumlu ortamdan başlayarak artan nemle azaldığı fakat bir hafta sonunda tekrar arttığı görülmektedir. Bu durum orjinal numunede görülen α değişiminin tamamen tersidir.

5.3.3. Fe'li Siklon Üst Akım Kil Numunesinin Dielektrik Parametreleri

Fe'li Siklon Üst Akım Kil Numunesi için elde edilen fit parametreleri Çizelge 5.4'de ve deneysel veriler ile bu parametrelerin kullanılması ile çizilen grafikler Şekil 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 Fe'li siklon üst akım kil numunesinin, Şekil 5.11'deki grafikten elde edilen dielektrik fit parametreleri

Parametreler	VAKUM	2.SAAT	4.SAAT	1.HAFTA
α	0,41746	0,2562	0,19	0,044
τ	1,961 e-5	1,66235 e-5	7,253 e-6	4,2 e-7
M_s	0,1389	0,04413	0,028	0,016
M_{son}	0,18682	0,36	0,4011	0,44823
γ	0,38365	0,23	0,26	0,32
n	0,7322	0,4	0,38	0,26
σ	-4,287 e-10	-6,2 e-8	-1,95 e-7	-1,95 e-5

Burada ilk olarak göze çarpan durum, artan neme bağlı olarak σ iletkenliğinin belirgin bir şekilde artmasıdır ve bu, her üç numune için de geçerlidir. Orjinal numunede σ iletkenliğinin değerinde yaklaşık 10^3 mertebesinde bir artış görülürken, ön konsantre ve Fe'li siklon üst akım numunelerinde bu artış 10^5 mertebesine kadar ulaşmaktadır. Bu ise beklenen bir durumdur. Çünkü zamanla artan nem miktarına bağlı olarak numunelerin yüzeylerinde ve ara yüzeylerinde daha fazla su molekülü birikir. Bu da ara yüzeysel kutuplanmanın gittikçe daha baskın hale gelmesine yol açar. Meydana gelen bu iyonik iletim yüzünden dielektrik maddenin dielektrik özelliği bozulma eğiliminde olur, yani nemli ortamlara gidildikçe maddenin dielektrikliğin iletkenliğe doğru bir kayma eğiliminde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.4 incelendiği zaman τ durulma zamanının nemli ortamlara gidildikçe genel olarak azaldığı görülmektedir. 1. hafta sonunda elde edilen son τ değerinin başlangıçtaki vakum değerinden yaklaşık 100 kat daha küçük olduğu söylenebilir.

n parametresine baktığımızda ise; numunedeki nem oranı arttıkça n 'nin düzgün bir şekilde azaldığı görülebilir. Bu ise bir önceki ön konsantre numunesinde de olduğu gibi, artan nemle σ iletkenliğinin frekansa bağımlılığının azaldığı anlamına gelmektedir.

Cole-Davidson parametresi γ için ise, yine bir önceki ön konsantre numunesindeki değişime benzer değişim göstermiştir.

Çizelge 5.4' e bakıldığında, Cole-Cole parametresi olan α 'nın vakumlu ortamdan nemli ortamlara doğru gidildikçe düzgün bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu da Cole-Cole yarım dairesinin artan nemle daha düzgün bir şekilde oluşması anlamına gelmektedir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada iki önemli sonuç elde edilmiştir. Birincisi, dielektrik ölçümlerden parametrelerin bulunmasında elektrik modülü formalizminin kullanılmasının çok yararlı olduğu, ikincisi ise, nemin dielektrik özellikleri değiştirdiği ve nemin numuneler üzerindeki etkisinin, sıcaklıktan kaynaklanan durumun tersi bir etki oluşturduğunun gözlenmesidir.

Diğer taraftan aktivasyon enerjilerinin hesaplanmasının sıcaklık ölçümleri ile ilgili olduğu bilinmektedir. Eğer nem de aynı etkiyi oluşturuyorsa, daha kompleks olan sıcaklık ölçümleri yerine daha kolay olan nem ölçümleri alınarak aktivasyon enerjilerinin hesaplanması yoluna gidilebilir. Böyle bir çalışma 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., 2001, **Advances In Understanding The Relationship Between Rock Wettability And High-Frequency Dielectric Response**, Journal of Petroleum Science And Engineering, Vol:960

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

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

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

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

Grim Ralph E., 1968, **Clay Mineralogy** (2.Baskı) New York: McGraw-Hill Book Company

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

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

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

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

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

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

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

Kuo, D.H., Chang, C., Su, T., Wang W. and Lin, B., 2001, **Dielectric Behaviours of Multi-Doped BaTiO₃/Epoxy Composites**, Journal of the European Ceramic Society, vol: 21, p:1171-117

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

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

Miles, W. J., 1994, **Crystalline Silica Analysis of Wyoming Bentonite by X-ray Diffraction after Phosphoric Acid Digestion**. Analytica Acta, 286 , 97-105

Mitchell, J.K., 1992, **Fundamentals of Solid Behaviour**, 2nd edn. 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, vol:87, p:122-12

Ranko, R. And Hermann, W, 1998, **The Dielectric Modulus: Relaxation Versus Retardation**, Solid States Ionics, Vol:105, 167-173

Ruffet, C., Gueguen, Y. and Darot, M. (1991), **Complex Conductivity Measurements and Fractal Nature of 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 1995, p. 64-69

Venudhar, Y.C. and Mohan, K.S., 2002, Dielectric behaviour of lithium-cobalt mixed ferrites , Materials Letters, vol:54, p:135-139

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

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-7 matematik programı ile gerçekleştirilmiştir. Programın çalışmasında şu notasyon dönüşümleri yapılmış ve diğer notasyonlara sadık kalınmıştır:

$$\begin{array}{llll}
 \mathcal{E}^* \rightarrow e & \tau \rightarrow T & i \rightarrow I & M_{\infty} \rightarrow M_{so} \\
 \mathcal{E}_s \rightarrow es & \sigma \rightarrow S & \omega \rightarrow w & M' \rightarrow M1 \\
 \mathcal{E}_{\infty} \rightarrow eso & \alpha \rightarrow a & M^* \rightarrow M & M'' \rightarrow M2 \\
 \mathcal{E}_0 \rightarrow eo & \gamma \rightarrow g & M_s \rightarrow Ms & \phi \rightarrow F
 \end{array}$$

Denklem (3.32), bu notasyona göre şöyle yazılabilir,

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

Burada eso ve es terimleri şu şekildedir:

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

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

$$M = \frac{1}{\frac{1}{Mso} + \frac{\frac{1}{Ms} - \frac{1}{Mso}}{(1 + (I w T)^{(1-a)})^g} - \frac{S(I w)^{(n-1)}}{eo}} \quad (\text{Ek-1.2})$$

Bu ifade sadeleştirilirse, aşağıdaki bağıntıya ulaşılır;

$$M := Mso Ms (1 + I w T (I w T)^{(-a)})^g eo w \Big/ (Ms (1 + I w T (I w T)^{(-a)})^g eo w + eo Mso w - eo Ms w + I S (I w)^n Mso Ms (1 + I w T (I w T)^{(-a)})^g) \quad (\text{Ek-1.3})$$

Denklem (Ek-1.3) ile gösterilen ifade kompleks elektrik modülüdür. Bu ifade, önce

aşağıdaki gibi reel kısmına ayrılmıştır;

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

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

$$\begin{aligned}
& + \left(\mathbf{e}^{\left(\frac{1}{2} g \ln \left(1 + \mathbf{e}^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \sin(1/2 \pi a) \right) + \left(\mathbf{e}^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \cos(1/2 \pi a) \right)^2 \right) \right)^2 \\
& \sin \left(g \arctan \left(\mathbf{e}^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \cos \left(\frac{1}{2} \pi a \right), 1 + \mathbf{e}^{((1/2 - 1/2 a) \ln(w \sim^2 T \sim^2))} \sin \left(\frac{1}{2} \pi a \right) \right) \right) \\
& \left. - \frac{S \mathbf{e}^{((n-1) \ln(w \sim))} \sin \left(\frac{1}{2} (n-1) \pi \right)}{eo} \right)^2 \quad (\text{Ek1.4})
\end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
& 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(\right. \\
& \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(\right. \\
& \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 \\
& (w\sim^{(n-1)})^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(\right. \\
& \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)^2 eo S \\
& w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso + 2 \sin\left(\right. \\
& \left. g \arctan\left(\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
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(1 + 2 \mathbf{e}^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim)))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + \mathbf{e}^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim)))} \right)^{(1/2 g)} \\
& + M_s^2 \left(\left(1 + 2 \mathbf{e}^{(-(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim)))} \sin\left(\frac{1}{2} \pi a\right) + \mathbf{e}^{(-2(a-1)(\ln(w\sim) + \ln(T\sim)))} \right)^{(1/2 g)} \right)^2 eo^2 \\
& \left. \right)
\end{aligned}
\tag{Ek-1.5}$$

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

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

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

Denklem (3.42g)'deki ϕ terimini kullanırsak, MI için daha sade bir ifade elde ederiz:

$$\begin{aligned}
MI111111 &:= -A^g \left(-Ms A^g eo - \cos(g F) eo Mso + \cos(g F) eo Ms \right. \\
&\quad \left. + S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso Ms A^g \right) Mso eo Ms \Big/ \left(-2 \cos(g F) Ms^2 A^g eo^2 \right. \\
&\quad \left. + 2 \cos(g F) Ms A^g eo^2 Mso + 2 \cos(g F) eo Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso A^g \right. \\
&\quad \left. - 2 \cos(g F) eo Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms A^g \right. \\
&\quad \left. + S^2 (w\sim^{(n-1)})^2 Mso^2 Ms^2 (A^g)^2 + eo^2 Ms^2 - 2 eo^2 Mso Ms + eo^2 Mso^2 \right. \\
&\quad \left. - 2 \sin(g F) eo Ms^2 S w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso A^g \right. \\
&\quad \left. - 2 Ms^2 (A^g)^2 eo S w\sim^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Mso \right. \\
&\quad \left. + 2 \sin(g F) eo Mso^2 S w\sim^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2} (n-1) \pi\right) Ms A^g + Ms^2 (A^g)^2 eo^2 \right) \quad (\text{Ek-1.7})
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
M211111 := & -A^g \left(-Ms A^g eo - \cos(g F) eo Mso + \cos(g F) eo Ms \right. \\
& + S w^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso Ms A^g \Big) Mso eo Ms \Big/ \left(-2 \cos(g F) Ms^2 A^g eo^2 \right. \\
& + 2 \cos(g F) Ms A^g eo^2 Mso + 2 \cos(g F) eo Ms^2 S w^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso A^g \\
& - 2 \cos(g F) eo Mso^2 S w^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms A^g \\
& + S^2 (w^{(n-1)})^2 Mso^2 Ms^2 (A^g)^2 + eo^2 Ms^2 - 2 eo^2 Mso Ms + eo^2 Mso^2 \\
& - 2 \sin(g F) eo Ms^2 S w^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso A^g \\
& - 2 Ms^2 (A^g)^2 eo S w^{(n-1)} \cos\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Mso \\
& \left. + 2 \sin(g F) eo Mso^2 S w^{(n-1)} \sin\left(\frac{1}{2}(n-1)\pi\right) Ms A^g + Ms^2 (A^g)^2 eo^2 \right)
\end{aligned}$$

(Ek-1.8)

Bu ifade daha da sadeleştirilirse, bağıntının payı için;

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

(Ek1.9)

ifadesi bulunur. Paydası içinse şu ifadeye ulaşılır:

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

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

(Ek-1.10)

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılının aralık ayında Konya’da doğdum. İlkokulu Konya’da okudum. Orta ve lise öğrenimimi Selçuklu Anadolu İmam Hatip Lisesi’nde tamamlayarak 1999 yılında buradan mezun oldum. Aynı yıl Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nü kazandım ve 2003 yılında buradan mezun olarak lisans eğitimimi tamamladım.

Aynı yıl Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde tezsiz yüksek lisansı kazandım ve on aylık bir eğitimden sonra 2004 yılında buradan mezun oldum.

2004 yılının başında Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde tezli yüksek lisansa başladım.

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