

57356

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZI ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN MİKRODALGA DİELEKTRİK  
SABİTİNİN ÖLÇÜLMESİ

Kayhan GÖVER

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BAZI ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN MİKRODALGA DİELEKTRİK  
SABİTİNİN ÖLÇÜLMESİ

Kayhan GÖVER

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 16/1/1996 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Ash Luy 26.5.1996

Prof. Dr. Ali OKTAY Prof. Dr. H. Ergun BAYBAKCI İrd. Doc. Dr. Murat TÜRE  
(Danışman) üye

## ÖZET

Bu tezde, dielektrik malzemelerin yüksek frekanslı elektromagnetik alan altındaki davranışları ve buna bağlı olarak bazı endüstriyel malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon'_r$ ) ve kayıp faktörü ( $\tan \delta$ ) frekansa bağlı olarak ölçülmüştür.

Deneyisel olarak, tekstil, kağıt ve deterjan endüstrisinde beyazlatıcı ve yumuşatıcı olarak kullanılan, "optik beyazlatıcı" olarak da isimlendirilen -Fluorescent Brightening Agent- (FBA) 'ın dielektrik özellikleri 500MHz-3GHz frekans aralığında koaksiyel prob kullanılarak elde edilmiştir. Özellikle kablo sanayinde sıcaklığa dayanıklı yalıtkan malzeme olarak kullanılan çeşitli silikon malzemelerin de dielektrik özellikleri X bandında (8.2-12.4GHz) kısa devre tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, silikon malzemelerin dielektrik sabitlerinin bire yakın olduğu ve kayıp faktörlerinin küçük olmasından dolayı mikrodalga ısımadan etkilenmediği görülmüştür. FBA 'nın ise, polar bir malzeme olan tuz çözeltisinin tipik davranışlarına benzediği ve içinde çözücü sıvılar olduğunda mikrodalga ısımadan büyük ölçüde etkilendiği görülmüştür.

Sonuç olarak, silikonu transparan bir malzeme olarak kabul edebiliriz. Bu nedenle de radarlarda ve uzay teknolojisinde kullanılabilir. FBA 'nın kayıp faktörünün büyük olmasından dolayı kayıp faktörüyle orantılı olarak mikrodalga enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşür. Bundan dolayı, mikrodalga ısıtmadan kimyasal ve biyokimyasal analiz aracı olarak yararlanmak, onunla kimyasal bileşiklerin dielektrik davranışlarını doğru biçimde ortaya koymak mümkündür.

## Measurement of Microwave Dielectric Constants of Some Industrial Materials

### ABSTRACT

In this thesis, the dielectric constants ( $\epsilon_r'$ ) and loss tangents ( $\tan \delta$ ) of some industrial materials have been measured using several microwave measurement techniques. Practically, the dielectric properties of the Fluorescent Brightening Agent (FBA) - so called "optical brightener" - that is extensively used as a brightener and softener agent in textile, paper and detergent industry have been measured over the frequency range from 500MHz to 3GHz by using coaxial probe. The FBA is a chemical substance that absorbs in the ultra-violet region of the visible spectrum and emits blue-violet light (a strongly fluorescent agent). The dielectric properties of the different silicon materials that is especially used as a strong heat isolator in cable industry has been measured over the frequency range from 8.2GHz to 12.4GHz by using Robert's and Von Hippel technique -short circuit method-. Finally, The dielectric constants of silicon materials are approximately 1 and its loss factors are below 1. The variation of FBA complex permittivity over the frequency range (0.5-3 GHz) is similar a typical behaviour of a polar material as like a saline solution. The complex permittivities of various unknown materials can be determined over a wide range of frequencies by an open-ended coaxial line probe. The experimental technique uses a system consisting of a coaxial probe connected a network analyser. For the accuracy of the experimental data, it is important that to take the certain requirement on the calibration standards.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. DİELEKTRİKLERİN ELEKTROMAGNETİK ALAN ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI	5
3.1. Giriş	5
3.2. Elektriksel Kutuplama (Polarizasyon)	6
3.2.1 Elektronik ve Atomik Polarizasyon	9
3.2.2 Yönlenme Polarizasyonu	10
3.2.3 İyonik İletkenlik	12
3.2.4 Serbest Yük Polarizasyonu	12
3.3. Sanal Dielektrik Sabiti	13
3.4. Elektriksel Polarizasyonun Sıcaklıkla Değişimi	14
3.5. Elektriksel Polarizasyonun Frekansla Değişimi	16
3.6. Kayıplı Ortamda Elektromagnetik Dalga Yayılımı	19
4. DİELEKTRİK SABİTİ ÖLÇME TEKNİKLERİ	22
4.1. Giriş	22
4.2. Ölçme Yönteminin Seçimi	23
4.3. İletime Dayalı Ölçme Teknikleri	24
4.4. Yansımaya Dayalı Ölçme Teknikleri	25
4.4.1. Kısa Devre Metodu	26
4.4.2. Koaksiyel Prob Tekniği	28
4.5. Rezonans Teknikleri	30
4.5.1. Rezonatör Tekniği	31

<b>5. ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN DİELEKTRİK SABİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>33</b>
5.1. FBA 'nın Özellikleri	33
5.2. Koaksiyel Prob Kullanılarak FBA 'nın Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi	35
5.3. Kısa Devre Yöntemi Kullanılarak Silikonun Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi	41
<b>6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b>	<b>46</b>
<b>KAYNAKLAR.</b>	<b>50</b>
<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>54</b>



## SİMGELER DİZİNİ

$c$	Işık hızı	m/s
$\vec{D}$	Elektrik yük yoğunluğu vektörü	C/m <sup>2</sup>
$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti	V/m
$\vec{E}'$	Polarizasyon yüklerinin oluşturduğu yerel alan	V/m
$F$	Kuvvet	N
$f$	Frekans	Hz
$f_{relax}$	Rölaksasyon frekansı	Hz
$G$	İletkenlik	S
$\vec{H}$	Magnetik alan şiddeti	A/m
$j$	Sanal sayı ( $j^2 = -1$ )	-
$k$	Boltzmann sabiti	J/C°
$k$	Dalga sayısı	1/m
$l$	Boy	m
$n$	Ortamın kırılma indisi	-
$N$	Toplam dipol momenti sayısı	-
$\vec{P}$	Polarizasyon vektörü	-
$Q$	Yük	C
$q$	Yük	C
$r$	Yarıçap	m
$s$	Yüzey alanı	m <sup>2</sup>
$S$	Duran dalga oranı	-
$S_{ii}$	S-parametreleri	-
$T$	Sıcaklık	°K
$t$	Zaman	s
$V$	Gerilim	Volt
VSWR	Gerilim duran dalga oranı	-
$v$	Hacim	m <sup>3</sup>
$x$	Kartezyen koordinat	-
$Y$	Admittans	S
$y$	Kartezyen koordinat	-
$Z$	Empedans	$\Omega$
$Z_0$	Serbest uzayın dalga empedansı	$\Omega$
$z$	Kartezyen koordinat	-
$\alpha$	Polarizasyon faktörü	-
$\alpha_t$	Toplam polarizasyon faktörü	-

$\alpha$	Zayıflama sabiti	1/m
$\beta$	Faz sabiti	1/m
$\gamma$	Yayılm sabiti	-
$\Gamma$	Yansıma katsayısı	-
$\delta$	Kayıp açısı	Derece
$\delta V$	Birim hacim	$m^3$
$\tan \delta$	Kayıp tanjant	-
$\epsilon$	Elektrik geçirgenliği (permittivite)	F/m
$\epsilon_0$	Serbest uzayın permittivitesi	F/m
$\epsilon_r$	Bağıl permittivite	-
$\epsilon'_r$	Dielektrik sabiti	-
$\epsilon''_r$	Kayıp faktörü	-
$\lambda$	Dalga boyu	m
$\vec{\mu}$	Dipol Momenti	N.m
$\mu$	Magnetik geçirgenlik (permeabilite)	H/m
$\mu_0$	Serbest uzayın permeabilitesi	H/m
$\mu_r$	Bağıl permeabilite	-
$\rho$	Yansıma katsayısı	-
$\rho$	Hacim yük yoğunluğu	$C/m^3$
$\sigma$	İletkenlik	S/m
$\tau$	Rölaksasyon zamanı	s
$\omega_0$	Rezonans frekansı	rad/s
$\omega$	Açısal frekans ( $= 2\pi f$ )	rad/s

### Kısaltmalar

ANA	Otomatik Network Analizör (Automatic Network Analyser)
D.D.	Duran Dalga
EM	Elektromagnetik
FBA	Optik Beyazlatıcı (Fluorescent Brightening Agent)
M.I.T.	Masschusettes Institute of Technology
MUT	Test Altındaki Materyal (Material Under Test)
MW	Mikrodalga
RF	Radyo Frekans
TEM	Enine Elektrik Magnetik (Transverse Electric Magnetic)
WR 90	X- Bandı Dalgakılavuzu



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Elektriksel Polarizasyon

Şekil 3.2. Elektrik Dipol Momenti

Şekil 3.3. Elektronik Polarizasyon

Şekil 3.4. Yönlenme Polarizasyonu

Şekil 3.5. (a) Su molekülü (b) Karbondioksit molekülü

Şekil 3.6. Yönlenme polarizasyonunun etkisiyle dönen dipoller

Şekil 3.7. Serbest yük polarizasyonu

Şekil 3.8. Sanal dielektrik sabitinin vektör diyagramı

Şekil 3.9. Elektrik alan etkisi altındaki dipole etkiyen kuvvetler.

Şekil 3.10. Langevin fonksiyonu  $L(a)$ ;  $a \ll 1$  ve  $L(a) \cong a/3$ .

Şekil 3.11. Tek bir elektron için elektronik polarizasyon faktörünün gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişimi.

Şekil 3.12. Debye eşitliğine göre dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişimi.

Şekil 3.13. Tipik polar bir dielektriğin dielektrik rölaksasyonu.

Şekil 3.14. Kayıplı ortamda elektromagnetik dalganın yayılımı.

Şekil 4.1. Dielektrik madde yerleştirilmiş dalgakılavuzu

Şekil 4.2. Katı veya sıvı dielektriklerin ölçme geometrileri

Şekil 4.3. Kısa devre yöntemi

Şekil 4.4. Koaksiyel prob geometrisi ve devre eşdeğeri

Şekil 4.5. Dielektrik özelliklerin ölçülmesinde kullanılan rezonatör

Şekil 5.1. diaminostilbenedisulphonic asidin kimyasal yapısı

Şekil 5.2. Koaksiyel prob kullanılarak yapılan ölçme düzeneği

Şekil 5.3 FBA 'nın ölçülen yansıma katsayısının polar diyagramı (a) ve bulunan koaksiyel açıklığın admittansın smith abağı (b)

Şekil 5.4. FBA 'a ait dielektrik sabiti (a) ve kayıp tanjantın (b) frekansla değişimi

Şekil 5.5 Gliserine ait dielektrik sabiti (a) ve kayıp tanjantın (b) frekansla değişimi

Şekil 5.6. Silikon malzemenin ölçme düzeneği.

Şekil 5.7 Boru içerisindeki duran dalgalar

Şekil 5.8 280.1U Silikon numünesi dielektrik sabiti (a) ve kayıp faktörünün (b) ölçülen değerleri ve enterpolasyon eğrileri.

Şekil 5.9 MF160.1U Silikon numünesinin dielektrik sabiti (a) ve kayıp faktörünün (b) ölçülen değerleri ve enterpolasyon eğrileri.

Şekil 5.10 60TAT Silikon numünesi dielektrik sabiti eğrileri (a) ve kayıp faktörünün (b) ölçülen değerleri ve enterpolasyon eğrileri.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda, gıda maddeleri, tarım ürünleri, endüstriyel ürünlerin (tekstil, kağıt, lastik, ilaç, seramik ..) radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) gibi yeni tekniklerle işlenmesi (kurutma, pişirme, haşlama, nemini azaltma, dezenfekte etme, polimerize etme, volkanize etme,...) veya malzemelerin nemlilik, kalite kontrol gibi faktörlerin tayin edilebilmesi için dielektrik özelliklerinin ( $\epsilon'_r$  ve  $\tan \delta$ ) ve bunların çevre şartlarıyla (sıcaklık, nem, basınç,...) değişiminin bilinmesi gerekmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı yüksek frekanslarda dielektrik özelliklerin ölçülmesi konusunda oldukça önemli gelişmeler sağlanmaktadır. Bir taraftan eski metodlarda ilerlemeler sağlanırken bir taraftan da yeni metodlar geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Günümüzde, ileri endüstrilerin bir çok uygulamalarında ve tıpta bazı hastalıkların (kanser ve diaterapi gibi) tedavisinde yüksek ve çok yüksek frekanslı elektromagnetik dalgalar geniş ölçüde kullanılmakta ve bir çok düzenek ve cihaz endüstrileştirilmiş bulunmaktadır. Elektromagnetik enerji kullanılmasının çeşitli üstünlükleri yanında, optimum şartlarda klasik enerji sistemlerine (sıcak hava, infraruj, sıcak buhar ...) nazaran enerji ve zaman tasarrufu elde edilmesi bu konudaki çalışmaların önemini daha da arttırmıştır.

Pratikte kullanılan malzemeler genellikle tam olarak homogen değildir. Bu nedenle malzemeye elektriksel alan uygulandığında alanda önemli değişiklikler olur. İçinde homogen olmayan dielektrikler bulunan bir hacimdeki elektromagnetik dalga yayılımı dielektrik sabitine bağlı olarak değişir. Çeşitli dielektriklerin karışımları veya farklı dielektrik malzemelerin yanyana gelmesiyle oluşturulan homogen olmayan ortamların dielektrik sabitinin bilinmesi ve bunun elektromagnetik alan değerlerine göre değişiminin tayin edilmesi sayesinde, bu ortamlardaki elektromagnetik dalgaların yayılma özelliklerinden yararlanarak mikrodalga tekniğinde kullanılan yeni eleman ve düzenlerin gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır.

Bu çalışmada, bir endüstriyel malzeme olarak, tekstil, kağıt ve deterjan sanayinde beyazlatıcı ve yumuşatıcı olarak kullanılan FBA numunesi ile kablo sanayinde yalıtıcı olarak kullanılan değişik tipte silikon numunelerinin dielektrik sabiti ve kayıp faktörleri farklı frekans aralıklarında ölçülmektedir. FBA, görülebilir spektrumun ultra-viyole bölgesinde soğuran ve mavi-viyole ışık yayan (kuvvetli FBA) kimyasal bir maddedir. Ölçmelerde kullanılan FBA maddesi, %40 nemlilikte ve yapışkan bir formdadır. Silikon ise, yüksek dielektrik mukavemeti, dielektrik yorulmaya dayanımı, düşük güç tüketim

katsayısı, düşük dielektrik sabiti ve çok yüksek ark direncine sahip olması nedeniyle en zor koşullarda dahi, uzun vadeli güvenilirlik sağlayan bir yalıtıcı malzemedir. Ölçmelerde, yumuşak formdaki 280.1U, MF160.1U ve 60TAT silikon numuneleri kullanılır.

Yapılan deneylerde, literatürde de pek çok araştırmacının çoğunlukla kullandığı yansıma dayalı ölçme teknikleri kullanılır. FBA numunesinin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü, 500MHz-3GHz frekans aralığında koaksiyel prob ve bir network analizör kullanılarak yapılır. Ölçme işlemi, dielektrik özellikleri bilinmeyen materyale bağlanan koaksiyel probun, giriş yansıma katsayısını deneysel olarak ölçmeye dayanır. Probun açıklık admittansını en iyi şekilde modellemek için, sabit ve frekansa bağlı kapasitif etkiler meydana getiren prob açıklığında, statik-gibi yaklaşım kullanan Staebell ve Misra 'nın da kullandığı koaksiyel prob tekniği ele alınır (Staebell ve Misra 1990). Silikon numunelerinin dielektrik özellikleri ise, 8.2-12.4GHz frekans aralığında kısadevre yöntemi (Von Hippel yöntemi) kullanılarak yapılır (Von Hippel 1954). Transmisyon hat veya dalgakılavuzu metodları içerisinde incelenen kısa devre yöntemi veya Von Hippel metodunda malzeme, dalgakılavuzunun sonunda yer almaktadır ve sonu kısa devre edilmiştir. Bu yüzden tek kapılı bir sistem olarak inceleneceğinden ölçülecek büyüklükler yansıma katsayısını bulmaya yönelik olacaktır .

Bir dielektrik malzemenin yüksek frekanslı bir elektromagnetik alanda bulunması halinde kayıp faktörüyle ( $\epsilon_r''$ ) orantılı olarak bir enerji ısıya dönüşür. Yani, dielektrik malzeme olan FBA 'nın çok yüksek frekanslı elektromagnetik alan (MW frekansları) içinde dielektriksel kayıplarla kurutulması mümkündür. Bununla birlikte, mikrodalga ısıtma, bilhassa kimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkan sıcaklıkla etkilenen, kimyasal olaylarda önemli yer teşkil eder. Mikrodalga ısıtmadan, kimyasal ve biyokimyasal analiz aracı olarak yararlanmak, onunla kimyasal bileşiklerin dielektrik davranışlarını doğru biçimde ortaya koymak ve mikrodalga saçılma etkilerini karakterize etmek mümkündür.

Değişik firmalardan sağlanan FBA ve silikon numuneleriyle yapılan deneylerde, bu numunelerin dielektrik sabitleri ve kayıp faktörlerinin frekansa bağlı değişimi bulunarak, sonuçta FBA maddesi içinde çözücü sıvılar olduğunda mikrodalga ışımadan büyük ölçüde etkilendiği, aksi halde tepki göstermediği görüldü. Silikon malzemelerin ise, dielektrik sabitlerinin bire yakın olması ve kayıp faktörlerinin küçük olmasından dolayı mikrodalga ışımadan etkilenmediği ortaya konmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yüksek frekans tekniğinin gelişmesiyle, dielektrik materyallerin elektromanyetik alan altındaki davranışlarını ortaya koyan uygulamalar hız kazanmıştır. M.I.T.-Yalıtkanlar Laboratuvarında yapılan çalışmalar sonucunda, 1954 yılında A.R.Von Hippel tarafından 100Hz-10GHz frekans aralığında organik ve inorganik pek çok dielektrik malzemenin dielektriksel büyüklüklerini yayınlamasıyla bu çalışmalar hızlanmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalarda, dielektriksel özelliklerin nemlilik oranı, sıcaklık ve frekansla değişimi incelenmiştir. Dielektrik kayıplardan yararlanılarak çeşirli tarımsal ürünlerin işlenmesi (kurutma, nemini azaltma, dezenfekte etme, haşlama, pişirme...) için bu ürünlerin dielektrik özelliklerini inceleyen yoğun çalışmalar yapılmıştır.

Dielektrik ölçmeleri, önceleri sadece bilimsel amaçlarla yapılmaktaydı. Ancak günümüzde dielektrik ölçmelerinin önemi, MW haberleşme elemanlarının tasarımı ve geliştirilmesinde, mikrodalga fırının yapısı gibi bazı uygulamalarda, tedavi ve endüstriyel dielektrik uygulamalarda yüksek frekanslı elektromagnetik alan altındaki dielektrik özellikleri hassas olarak ölçülmesi gerekliliğine bağlı olarak artmıştır.

Pek çok dielektriğin, 1MHz ile 1500GHz frekans aralığında yapılan ölçmeleri genel olarak; ilettime, yansımaya ve rezonansa bağlı tekniklerine göre yapılmıştır. 1MHz-100MHz frekans aralığında düşük kayıplı dielektrikler için köprü ve Q-metre yöntemleri kullanılmış ve bu ölçmeler, rezonans tekniğinin başlangıcı sayılmıştır (Hartshorn ve Ward, 1936).

1960 'lardan sonra hızlı örnekleme yapabilen osiloskoplarla birlikte tunel diyodlu güç kaynaklarının geliştirilmesiyle zaman-domeni spektrokopisi kullanılmaya başlanmıştır (Nicolson ve Ross, 1970). Bu metod, 10GHz 'e kadar sınırlar üzerinde başarıyla uygulandıktan sonra katılar üzerinde de uygulanmıştır (Cook, 1973).

Bilgisayar ve network analizörün geliştirilmesiyle ve ölçmelerden elde edilen bilgilerin numerik çözümlerinin geliştirilen yazılım ve donanım sayesinde kısa zamanda ve doğru olarak sonuçlanması mümkün olmuştur. Weir, bilgisayar kontrollu bir network analizör kullanarak geniş bir frekans aralığında, transmisyon hattının bir bölümüne yerleştirilen dielektriğe bağlı yansıma ve iletim parametrelerini kullanarak dielektrik sabitini formülize etmiştir (Weir 1974).

Yansımaya dayalı ölçme, diğer yöntemlere göre en yaygın olarak kullanılmıştır. Bu tekniğin en kullanışlı olanı Kısa devre (Hippel 1954) yöntemi ve koaksiyel prob yöntemidir. Koaksiyel prob açıklığındaki admittans eşitliğini ilk kez Marcuvitz, "Waveguide Handbook" adlı kitapta yayınlamıştır (Marcuvitz 1950). Cook, farklı insan derilerinin MW frekanslarındaki davranışını ortaya koyan bir çalışma yapmıştır (Cook 1951). Daha sonra 1980 yılında Stuchly, biyolojik maddelerin dielektrik özelliklerini inceleyebilmek için kapasitif etkiler gösteren koaksiyel probun devre eşdeğerini ve buna bağlı olarak TEM modunda, ölçülen yansıma katsayısına bağlı bulunan dielektrik sabiti eşitliklerini geliştirmişlerdir. Ayrıca, 1984 yılında hastalıkların yüksek frekanslar altında tedavi edilebilmesi için çok değişik hayvan türleri üzerinde çalışmalar yapmış ve RF ve MW frekanslarında çeşitli organ ve dokularının dielektrik davranışlarını ortaya koymuştur (Stuchly 1980, 1984).

1986 yılında, dielektrik materyallerin ölçme yöntemleri karşılaştırmalı olarak ele alınmış ve sonuç olarak, yansıma metodlarının daha çok kullanılmasına rağmen dalgakılavuzu kullanılarak yapılan iletme dayalı ölçme tekniklerinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür (Afsar, 1986). Koaksiyel prob tekniğine yeni bir yaklaşım getiren Misra, yayınladığı makalelerde prob açıklığındaki admittansı statik-gibi analiz kullanarak hava boşluklarından doğan hataları en aza indirmeyi başarmıştır (Misra, 1987). Daha sonraki çalışmada, bu yaklaşım sistemin önkabirasyonu sayesinde daha doğru sonuçlar verdiği, pek çok sıvı dielektrik üzerinde yapılan deneyler sonucunda görülmüştür (Staebell ve Misra, 1990).

Dielektrik özelliklerden yararlanılarak tarımsal ürünlerin işlenmesi konusunda da önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar daha çok taneli olan, buğday, fındık, yer fıstığı ve mısır gibi tarımsal ürünler üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu ürünlerin kurutulabilmesi, depolanması esnasında sürekli kontrol edilebilmesi ve kalitesinin artırılması için yapılan çalışmalarda dielektrik özellikleri yansımaya dayalı dalgakılavuzu içine yerleştirilen özel imal edilmiş örnek tutucular sayesinde çok hassas olarak ölçülmüştür (Nelson ve Lawrence 1992).

Endüstriyel olarak pek çok sanayide kullanılan lastik ve kauçuk malzemelerin dielektrik özellikleri ise, dalgakılavuzu içine rahatça konabildiğinden ve dalgakılavuzu ile örnek arasındaki hava boşluğunun olmamasından dolayı doğru olarak ölçülebilmektedir (Ganchev, 1994).



### 3.DİELEKTRİKLERİN ELEKTROMAGNETİK ALAN ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

#### 3.1. Giriş

Elektronik uygulamaları öncelikle dielektrik malzemeler, iletkenlerin çeşitli kombinasyonları ve yarıiletkenlerle ilgilenir. MW bölgesinde kullanılan malzemelerin kalitesinin ve özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ortamları belirleyen özellikler manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ), elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve iletkenlik ( $\sigma$ ) şeklinde sıralanabilir. Yüksek frekanslarda malzemelerin magnetik özellikleri serbest uzayınkinden çok az farklılık gösterir. Fakat diğer yandan elektriksel özelliklerinin çalışılan frekans aralığına göre çok geniş bir değişim alanı vardır.

Elektriksel olarak  $\sigma, \omega$  ve  $\epsilon$  'nun bağıl değerleri malzemelerin doğasını belirler. Bunlar, frekans, sıcaklık, nem, basınç, konum ve malzemenin moleküler yapısı ile değişebilir. İletkenlerde  $\sigma$  baskın olduğu haddie dielektrik malzemelerde  $\omega$  ve  $\epsilon$  'nun baskınlığı öne çıkmaktadır. Yarıiletkenlerde ise bu iki parametre aynı oranda baskındır. Serbest uzayın elektriksel özellikleri ( $\epsilon_0$  ve  $\mu_0$ ) malzemenin özellikleri üzerinde etkilidir. Genelde malzemelerin  $\epsilon$  (permittivitesi) 'u boşluktan büyüktür. Kırılma indisininde elektriksel özellikler üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir.

Bir malzemeyi tanımak, nitelendirmek ve onun hakkında gerekli bilgiler edinmek için kimyasal özelliklerinin yanında fiziksel özelliklerinin de bilinmesi gereklidir. Fiziksel özellikler yardımıyla özellikle moleküler yapı hakkında bilgi sağlanır.

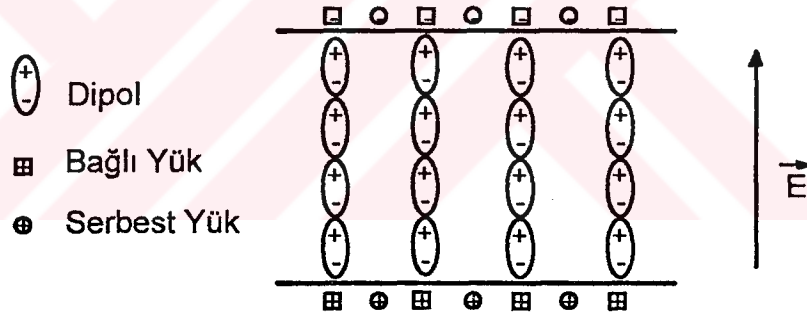
Malzemenin fiziksel özellikleri sayısal (colligative), toplamsal (additiv) ve yapısal (constitutive) olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Tam sayısal özellik, molekölün cinsine değil sadece sayısına bağlıdır. Molekölün özelliği, moleköldeki atomların sayısına bağlı ise bu özellik toplamsalıktır. Fiziksel özellik moleköldeki atomların düzenine bağlı ise bu yapısal bir özelliktir. Bu özelliklerin tayini molekölün yapısı hakkında çok değerli bilgiler sağlar. Dielektrik sabiti, dipol momentler toplamsal ve yapısal fiziksel özelliklerdendir. Malzemedeki tüm atom veya moleküller dipol momenti oluşturur ve bu momentlerin toplamına maddeye polarizasyonun etkisi denir. Malzemelerin dipol momentlerinin tayini ile inorganik ve organik moleküllerin yapılarını incelemek mümkündür. Dielektrik sabiti, materyalin harici alanla polarize edilme derecesinin ölçüsüdür.

### 3.2. Elektriksel Kutuplama (Polarizasyon)

Dielektrikler genel olarak katı, sıvı ve gaz halinde bulunurlar. Her materyalin kendine has bir atomik yapısı vardır. Materyalin dielektrik davranışını anlamak için, maddenin elektriksel yapısında bulunan en temel yapı taşlarına uzanmak gerekir. İdeal bir dielektrikte bütün elektronlar her atoma sıkı sıkıya bağlıdır ve materyal boyunca elektronların hareket edebileceği serbest bölge yoktur. Bundan dolayı elektrik alandan etkilenmezler. Pratikte ise, Bütün dielektrikler az veya çok sayıda serbest yükler (elektron, iyon,...) ihtiva ederler.

Dielektriklere bir elektrik alan uygulandığında, atomik yapılarında bulunan yüklü parçacıkların hareketi alanın etkisiyle değişikliğe uğrar. Bu değişiklikten dolayı Dielektrikte "Elektriksel Kutuplama (Polarizasyon)" olayı meydana gelir (Faraday, 1837).

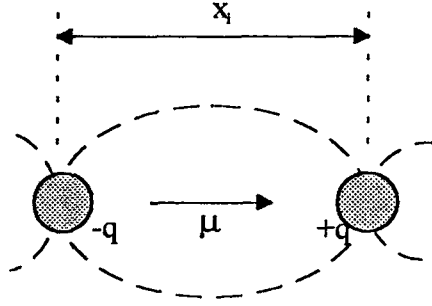
Dielektrikte bulunan atomların polarize olmasıyla yüklü yüzeyler bir elektrik alan yoğunluğuna sahip olur. Elektrik alan yoğunluğu, atomlardaki yük dağılımı eşit olmayacak şekilde pozitif çekirdeğe bir kuvvet ve negatif yüklü elektronlara da bu kuvvete eşit fakat zıt yönde bir kuvvet uygular.



Şekil 3.1. Elektriksel Polarizasyon

Elektriksel polarizasyonu açıklamak için, levhaları arasında dielektrik bulunan bir kondansatör ele alınır. Levhalara bir elektrik alan uygulanmasıyla, atomik yapıda bulunan serbest yükler alanın etkisiyle yer değiştirerek elektriksel dipoller oluştururlar (Şekil 3.1). Bunlar alan doğrultusunda yönlenerken, levhalar üzerinde bağlı ve serbest yüklerin toplanmasına yol açarlar. Polarizasyonun tam etkisini bu yük dağılımıyla açıklamak mümkündür. Bu yüke polarizasyon yüzey yükü denir. Bu yük dağılımı, maddede oluşan yüklerin bağlı yer değişimine bağlı ve sınırlıdır. Burada toplam alan, uygulanan alan ( $\vec{E}$ ) ve polarizasyon yüklerinin oluşturduğu alanın ( $\vec{E}'$ ) vektörel toplamıdır. Maddenin içinde

ise ortalama bir alan mevcuttur. Maddenin içindeki bu ortalama alan her zaman polarizasyonun etkisiyle azalma gösterir.



Şekil 3.2. Elektrik Dipol Momenti

Şekil 3.2 de elektrik alan etkisiyle serbest yüklerin oluşturduğu elektrik dipol momenti görülmektedir. Yer değiştiren bir dipolun ortalama dipol momenti :

$$\vec{\mu} = q \cdot x_i \quad (3.1)$$

olarak verilir. Burada, q yük ve  $x_i$  'de yükler arasındaki mesafedir.

Elektrik alanın etkisiyle levhalarda toplanan bağlı yüklerin yoğunluğu, polarizasyon vektörü  $\vec{P}$  ile gösterilir. Polarizasyon vektörü,  $\delta V$  hacimdeki N tane dipol içeren tüm dipol momentlerinin toplamına eşittir :

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N q \cdot x_i}{\delta V} \quad (3.2)$$

Elektriksel yük yoğunluğu vektörü  $\vec{D}$ , sistemin toplam yükünü verir. Bu iki vektör arasındaki fark ise uygulanan elektrik alan ( $\vec{E}$ ), nedeniyle sistemin kalan serbest yüklerini verir.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (3.3)$$

Burada,  $\epsilon_0$  serbest uzayın dielektrik sabitidir. Elektrik yük yoğunluğu vektörü  $\vec{D}$  ise :



$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon' \vec{E} + \vec{P} \quad (3.4)$$

şeklindedir. Bunu (3.3) eşitliğinde yerine yazarsak :

$$\vec{P} = (\epsilon' - \epsilon_0) \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \left( \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - 1 \right) \cdot \vec{E}$$
$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \cdot \vec{E} \quad (3.5)$$

elde edilir. Bu bağıntıda görüldüğü gibi, polarizasyon olayında referans ortam olarak boşluk alınmaktadır ve  $\epsilon_r$  (bağıl dielektrik sabiti) boşluğa göre dielektrik sabiti olarak adlandırılır.

Bir elementer dipolun momenti  $\vec{\mu}$  ve birim hacimdeki dipol sayısı N ise, polarizasyon vektörü :

$$\vec{P} = \vec{\mu} \cdot N \quad (3.6)$$

olur. Dielektriğin elektriksel polarizasyonu dışardan uygulanan elektriksel alana bağlı olduğundan, moleküllerin alan doğrultusuna yönelmeleriyle meydana gelen dipol momentleri, moleküllere etki eden  $\vec{E}'$  "yerel" elektrik alanla orantılıdır olur.

$$\vec{\mu} = \alpha \cdot \vec{E}' \quad (3.7)$$

Burada,  $\alpha$  polarizasyon faktörüdür. Eğer tek bir dipole etki eden yerel alan  $\vec{E}'$  ise, normalde lineer olduğu varsayılan dipol momenti  $\vec{\mu}$ , alanın fonksiyonu olarak şu şekilde yazılır :

$$\vec{\mu} = \alpha_t \cdot \vec{E}' \quad (3.8)$$

Burada,  $\alpha_t$  ortamın farklı polarizasyon bileşenlerinden meydana gelen toplam polarizasyon faktörüdür.

$$\alpha_t = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \alpha_{MW} \quad (3.9)$$

Alt indisler sırasıyla, elektronik, atomik, dipolar ve Maxwell-Wagner polarizasyonlarını göstermektedir. Buna göre, polarizasyon vektörü :

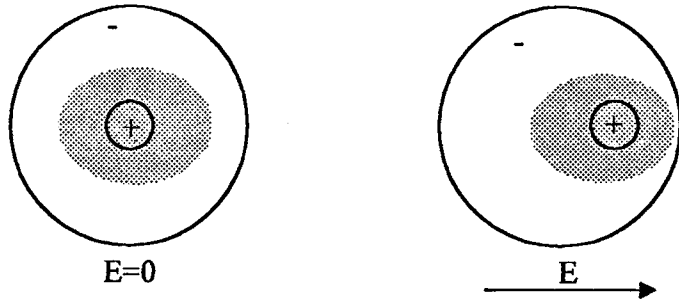
$$\vec{P} = \epsilon_0(\epsilon_r' - 1)\vec{E} = \alpha_r N \vec{E}' \quad (3.10)$$

olur. Bu bağıntıdan, dielektrik sabitinin dipollerin yoğunluğuna yani birim hacimdeki polarize olmuş moleküllerin sayısına (N), polarizasyon faktörüne ( $\alpha_r$ ) ve yerel elektriksel alana ( $\vec{E}'$ ) bağlı olduğu görülür. Başka bir ifadeyle, dışardan uygulanan elektriksel alanın etkisiyle moleküllerdeki serbest elektronların yerdeğıştirmeleriyle, meydana gelen elektriksel polarizasyonun dolayısıyla dielektrik sabitinin moleküler özellikten kaynaklandığı anlaşılır.

### 3.2.1. Elektronik ve Atomik Polarizasyon

Moleküler özelliklere bağlı olarak elektriksel polarizasyonu açıklayabilmek için, dielektriğin düzenli moleküllerden ve bunların düzgün dağılımlı elektronlardan oluştuğunu kabul edelim. Burada, elektriksel bakımdan dielektrik maddenin pozitif yüklü bir çekirdek ve bunu çevreleyen negatif yüklü bir elektron bulutundan oluşan bir atomik yapıdan meydana geldiğini gözönüne alabiliriz.

Bu atomik yapıya bir elektrik alanının uygulanması halinde, çekirdeğin etrafındaki bulut içinde düzgün dağılmış elektronlar alanın etkisiyle çekirdeğe göre yerdeğıştirerek iki uçta toplanır ve bu durumda elektriksel dipol oluştururlar. Buna elektronik polarizasyon denir (Şekil 3.3).



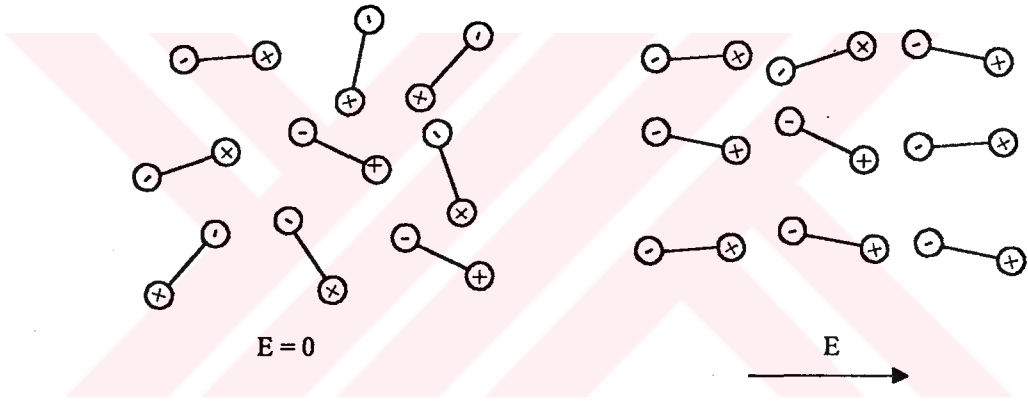
Şekil 3.3. Elektronik Polarizasyon

Dielektrik yapının farklı atomlardan oluşması halinde, moleküller arasında elektronlar düzgün dağılmaz ve elektron bulutları daha yakın ve ağır çekirdekler

tarafından etkilenecek, elektronların belirli noktalarda toplanmasına yani dipoller meydana gelmesine yol açarlar. Buna da atomik polarizasyon denir.

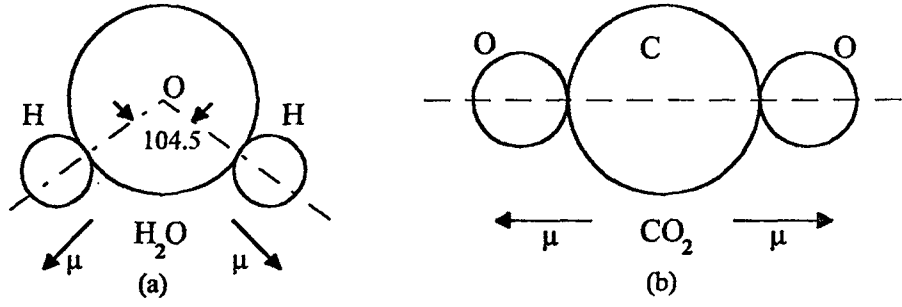
### 3.2.2. Yönlenme Polarizasyonu

Molekül, atom elektronlarının pek çoğunu veya yalnızca birininin ortak kullanılmasıyla oluşur. Elektronların düzenli dipol moment oluşturan yük dağılımıyla denksizlik meydana getirir. Bu dipol momentler elektrik alan varken rastgele şekilde konumlanır. yani polarizasyon mevcut değildir. Dışardan bir elektrik alan uygulanmasıyla, bu dipoller alan doğrultusuna yönelerek belirginleşirler. Aynı molekül atomları arasında yüklü parçacıkların simetrik olmayan dağılımlarından da sürekli dipoller meydana gelebilir. Buna sürekli polarizasyon denir. Bir elektrik alan etkisiyle, bu sürekli dipollere bir kuvvet çifti etki eder ve alan doğrultusuna yönelirler. Buna yönlenme (oryantasyon) polarizasyonu denir (Şekil 3.4).



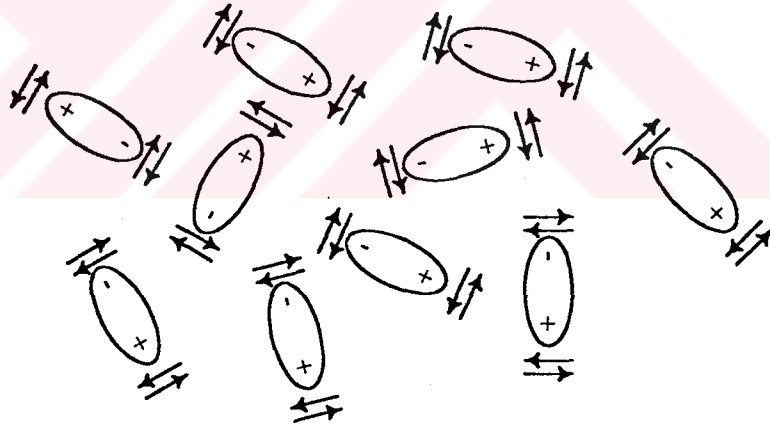
Şekil 3.4. Yönlenme Polarizasyonu

Dielektriklerin dipol momentlerinin tayini ile inorganik ve organik moleküllerin yapılarını incelemek mümkündür. Dipol momentin sıfır olmasının çeşitli sebepleri vardır. Hidrojen, klor ve azot gibi moleküllerin dipol momentlerinin sıfır olması bu moleküllerde ortak elektron çiftinin iki atomun tam orta yerinde olmasındandır; molekül, elektrik bakımından simetriktir ve molekül polar değildir. Hidrojen halogenür ve karbon monoksidin bir dipol moment göstermeleri, bunların moleküllerinde ortak elektron çiftinin, atomlardan aynı uzaklıkta olmadığını gösterir. Bunlarda ortak elektron çifti hidrojen ve oksijene göre klor ve karbona daha yakındır ve molekül elektrik bakımından simetrik değildir. HCl de durum böyledir. Bazı moleküllerde ortak elektron çifti atomlardan aynı uzaklıkta değildir., fakat molekülün bir tarafındaki elektrik moment öteki tarafındakine eşittir ve denkleştirir.



Şekil 3.5. (a) Su molekülü (b) Karbon dioksit molekülü

Karbondioksit ve karbondisülfürde durum böyledir (Şekil 3.5-b). Dört klorlu karbonda durum aynıdır. Her bir C-H bağının bir dipol momentı vardır, fakat dört bağ simetrik olduğundan bileşke sıfırdır. SnCl<sub>4</sub> 'de de durum böyledir. Karbondioksitin dipol momentinin sıfır olması molekölün simetrik ve lineer olduğunu gösterir. Her bir C-O bağına ait momentler birbirine eşit olup birbirini yok ederler. Buna karşılık su ve kükürt dioksitin sıfır olmaması, bu moleküllerin üçgen yapıda olduğunu, su molekölünde O-H ve kükürt dioksitte S-O momentlerinin, moleküllerin lineer olmamasından, birbirini yoketmedikleri sonucu çıkar (Şekil 3.5-a).



Şekil 3.6. Yönlenme polarizasyonunun etkisiyle dönen dipoller

Elektrik alan etkisi altında dipoller elektrik alanla meydana gelen yönlenme polarizasyonunun etkisiyle dönerler (Şekil 3.6). Mikrodalga ısıtmanın temelini oluşturan dipollerin alan etkisiyle dönüşü sonucunda dielektrik ısınır. Bunun yanında d.c. iletkenliğinde dielektriğin ısınmasında etkili olduğu söylenebilir. Dipol dönüşü genelde mikrodalga bölgesinde ortaya çıkan röleksasyon frekansında  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  'de değişiklik meydana getirir. Su, kuvvetli yönlenme polarizasyonu gösteren maddeye bir örnektir.

### 3.2.3. İyonik İletkenlik

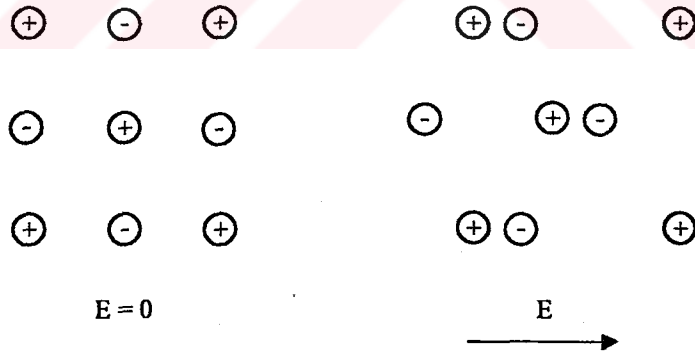
Dielektriğin ölçülen kaybı, gerçekte iletkenlik ( $s$ ) ve dielektrik kaybının ( $\epsilon''_m$ ) fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$\epsilon''_r = \epsilon''_m + s / \omega \epsilon_0 \quad (3.11)$$

Düşük frekanslarda, tam iletkenlik pek çok iletim mekanizmasıyla yapılabilir. Ama iyonik iletkenlik nemli materyallerde geçerlidir.  $\epsilon''_r$ , çözücü (genelde su) içeren serbest iyonla meydana gelen elektrolitik iletimden dolayı baskındır. İyonik iletkenlik dielektrikte yalnızca kayıplar doğurur. Düşük frekanslarda iyonik iletkenliğin etkisi, frekansla ters orantılıdır.

### 3.2.4. Serbest Yük Polarizasyonu

Elektronik, atomik ve yönlendirme polarizasyonu atomdaki, moleküldeki veya katı ve sıvı yapılarıdaki yükler (elektron veya iyon) yerel olarak sınırdayken meydana gelir. Düşük frekanslı elektrik alanlar uygulandığında dielektrik boyunca hareket edebilen yük taşıyıcıları oluşur. Serbest yük (iyonik) polarizasyonu bu yer değiştiren yüklerin hareketi engellenirken meydana gelir (Şekil 3.7). Yükler elektrotlarda serbestçe yer değiştiremez. Bu yüklerin birleşmesiyle meydana gelen alan bozulması dielektrik sabitini ( $\epsilon'_r$ ) artırarak dielektriğin tüm kapasitesini artırır.



Şekil 3.7. Serbest yük polarizasyonu

İletken olmayan bölgeler hariç, iletim bölgesinde elektriksel olarak birbirine değmiyen dielektriklerin karışımı düşük frekanslarda maxwell-wagner etkisi gösterir. Yük katmanları ince ve tanecik boyutundan çok küçük ise yük tanecik civarında bağımsızdır. Düşük frekanslarda yükler iletim bölgesinde birleşerek  $\epsilon'_r$  'nü artırır. Yüksek frekanslardaki yükler birleşemez ve iletim bölgesinin boyutları yüklerin yer değiştirmesine

göre küçük olduğundan polarizasyon meydana gelmez .Frekans arttığında kayıp faktörü ( $\epsilon_r''$ ) azalır.

### 3.3. Sanal Dielektrik Sabiti

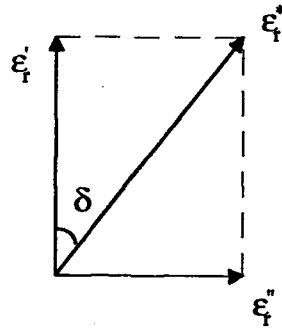
Materyal, dışardan bir elektrik alan uygulandığı zaman enerji depolama yeteneğine sahipse "dielektrik" olarak sınıflandırılır. Materyalin dielektrik sabiti iki elektrik yük arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan miktardır.

Yüksek frekanslı alanın etkisi altındaki bir dielektriğin davranışını tanımlayan özellik, dielektriğin bağıl geçirgenliği (permittivitesi)  $\epsilon_r^*$  ( $\epsilon^* / \epsilon_0$ ) 'dır ve gerçek bir dielektrikte kayıpların hesaplanabilmesi için bu sabit sanal olarak verilmektedir.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (3.12)$$

Burada sanal dielektrik sabitinin reel kısmı (dielektrik sabiti) gelen enerjinin dielektrikle etkileşimini (dielektrikte depolanan enerjiyi) karakterize eder. Bu pek çok katı ve sıvı için birden büyüktür. Sanal kısmı (kayıp faktörü) ise, malzeme içinde ısıya dönüşerek harcanan enerjiyi gösterir. Kayıp faktörü, dielektrik kaybı ve iletkenliğin her ikisinde etkisini içerir. Bu her zaman sifra eşit veya sıfırdan büyük olabilir. Benzen ve diğer hidrokarbonların ve dört klorlu karbonun dielektrik sabitleri küçük, polar sıvı olan su, nitrobenzen ve etanolünki büyüktür.

Gerçel ve sanal kısımlar  $90^\circ$  'lik bileşenlerinin vektörel toplamından oluşan sanal dielektrik sabitinin basit vektör diyagramı şekildeki gibidir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Sanal dielektrik sabitinin vektör diyagramı

Şekildeki vektörlerin toplamı gerçel eksenle ( $\epsilon_r'$ )  $\delta$  gibi bir açı yapar. Buna kayıp açısı denir ve bu açının tanjantı, dielektrikte ısı olarak açığa çıkan enerji miktarının

büyükliğini değerlendirmekte kullanılır. Kayıp tanjant, dielektriğin bağıl kayıp faktörünün ( $\epsilon_r''$ ), dielektrik sabitine ( $\epsilon_r'$ ) oranıdır :

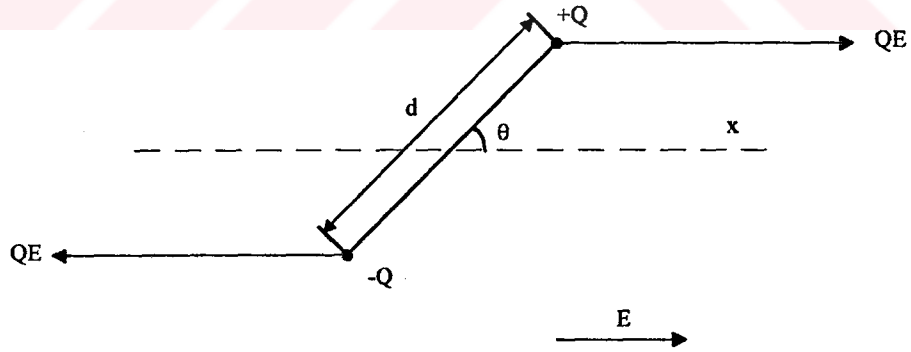
$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (3.13)$$

### 3.4. Elektriksel Polarizasyonun Sıcaklıkla Değişimi

Dışardan bir elektrik alanın etkisiyle dielektrikte meydana gelen elektronik ve iyonik polarizasyon sıcaklıktan etkilenmez. Ancak atomik yapıda yüklü parçacıkların düzensiz dağılımlarıyla meydana gelen yönelme polarizasyonda, yüklü parçacıklar sıcaklıktan etkilenirler. Sıcaklığın yüklü parçacıklar üzerinde etkisi, ideal gazlar için Langevin tarafından incelenmiş ve daha sonra Debye bunu geliştirerek dielektrik teorisine uygulamıştır (debye teorisi).

Bir elektrik alan içinde bulunan ve sürekli bir momente sahip olan moleküle bir kuvvet çifti tesir eder ve dipolün alan doğrultusuna yönelmesini sağlar (Şekil 3.9). Bu yönelmeyle birlikte ısısal etkenlerle hareketli parçacıkların yaptıkları titreşimlerde dengeli bir durum alırlar. Meydana gelen moment aşağıdaki gibidir :

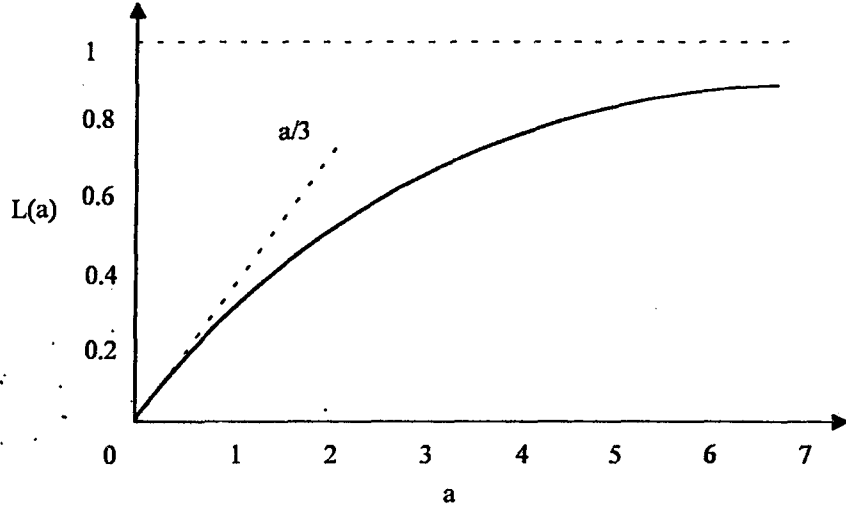
$$Q \vec{E} d \sin \theta = \vec{\mu}_p \vec{E} \sin \theta \quad (3.14)$$



Şekil 3.9. Elektrik alan etkisi altındaki dipole etkiyen kuvvetler.

Sıcaklığın dipol momentleri üzerindeki etkisini anlamak için, moleküllerin sürekli dipol momentinin elektrik alandan dolayı değişikliğe uğramadığını, moleküller arasında etkileşim olayların enerjisel eşdeğerinin ( $kT$ ) ısısal enerjiden çok küçük olduğunu kabul edelim. Isısal etkenlerle dipol momentlerin titreşimlerinin aldıkları dengeli durum için,

dipollerin ortalama momentleri ortaya çıkar. Bu ortalama momentin doğrultusu, elektrik alanından farklıdır ve dipollerin belirli bir doğrultuda dizilmelerini sağlar.



Şekil 3.10. Langevin fonksiyonu  $L(a)$ ;  $a \ll 1$  ve  $L(a) \cong a/3$ .

Boltzmann statik kavramıyla, ortalama momentin tanımından polarizasyon vektörü :

$$\vec{P}_0 = \left( NkT/E \right) \frac{\int_{-a}^a ye^y dy}{\int_{-a}^a e^y dy} = N \vec{\mu}_p \left[ \coth a - \frac{1}{a} \right] \cong N \vec{\mu}_p L(a) \quad (3.15)$$

Burada,  $k$  Boltzmann sabiti ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/C}^\circ$ ) ve  $L(a)$ , şekil 10. 'da gösterildiği gibi Langevin fonksiyonudur (Langevin 1905).  $L(a)$  fonksiyonu  $a$  'nın büyük değerleri için bire eşit olur. Pratikte,  $a = \mu_p E/kT \ll 1$  olacağından,  $L(a)$  yerine başlangıçtaki eğimin tanjantı olan  $a/3$  değeri alınabilir. Buna göre, polarizasyonun sıcaklıkla aldığı ortalama değer :

$$\vec{P}_0 = \frac{N \mu_p^2 \vec{E}}{3kT} \quad (3.16)$$

olur. Böylece, bir elektrik alan altındaki dielektrikte meydana gelen yönlendirme polarizasyonunun doğrudan sıcaklıkla ve sürekli (permanent) dipol momentlerinin karesiyle orantılı olduğu görülür.



### 3.5. Elektriksel Polarizasyonun Frekansla Değişimi

Şekil 1 'deki kondansatörün levhalarına bir elektrik alan uygulandığını ve belirli dairesel yörünge üzerinde dönen bir elektronun hareketini gözönüne alalım. Polarizasyonun tanımından, bu elektron için :

$$\vec{P}_e = \alpha_e \vec{E}' \quad (3.17)$$

yazılır. Elektronun hareketi :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -ax - 2b \frac{dx}{dt} - e \vec{E}' e^{j\omega t} \quad (3.18)$$

denklemleri ifade edilir. Dairesel yörüngenin yarıçapı R, elektronun yükü q ve kütlesi m olduğuna göre a ve b şu şekildedir :

$$a = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R^3} \quad b = \frac{e^2 \omega_0^2}{12\pi m \epsilon_0 c^3} \quad (3.19)$$

Burada,  $\omega_0 = (a/m)^{1/2}$  rezonans frekansıdır. Sürekli sinüsoidal halde, elektronun yörüngesi  $x(t) = \text{Re}[A e^{j\omega t}]$  şeklindedir. Bunu diferansiyel denklemde (3.18) yerine yazarsak :

$$A = \frac{(e/m)}{\omega^2 - \omega_0^2 - j(2b/m)} \quad (3.20)$$

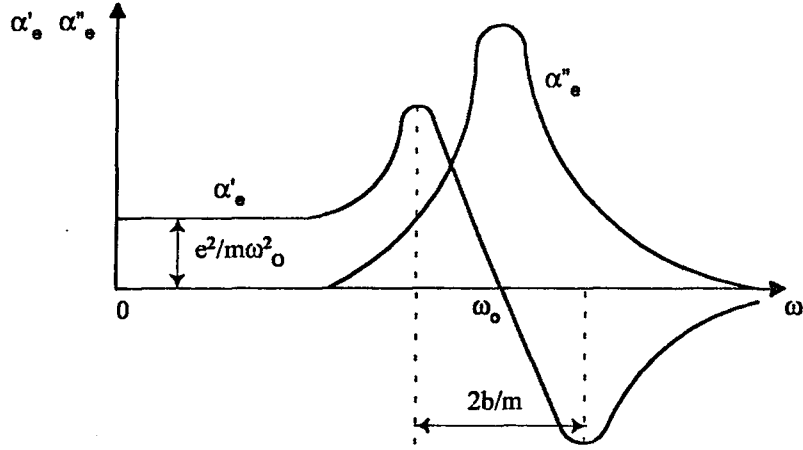
elde ederiz. Dipol momenti için :

$$\left| \vec{P} \right| = \alpha_e \vec{E}' e^{j\omega t} \quad (3.21)$$

yazılır. Buradan elektronun polarizasyon faktörü :

$$\alpha_e = \alpha_e' - j\alpha_e'' = \frac{e^2/m}{\omega_0^2 \left[ 1 - (\omega/\omega_0)^2 + j(2b\omega_0/\omega) \frac{\omega}{\omega_0} \right]} \quad (3.22)$$

olarak bulunur. eşitliğinin gerçel ve sanal kısımlarının (ortamın dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarıyla orantılı) frekansla değişimi şekil gösterilmiştir (Şekil 3.11).



**Şekil 3.11.** Tek bir elektron için elektronik polarizasyon faktörünün gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişimi.

Dışardan uygulanan alanın zamanla sinüsoidal değişmesi halinde, dielektriklerin elektronik polarizasyonu rezonans karakteristiği göstermekte yani belirli bir frekansta dipollerin salınımları en büyük olmaktadır. Şekildeki kutuplama karakteristiğinde,  $\alpha''_e$  büyüklüğü elektrik kayıplarıyla orantılıdır. Bu kayıplar ısı olarak ortaya çıkar ve dielektriğin ısınmasına sebep olur. Yüksek frekanslı Elektrik alandaki dielektriklerin bu özelliğinden yararlanarak endüstriyel uygulamalar yapılmaktadır.

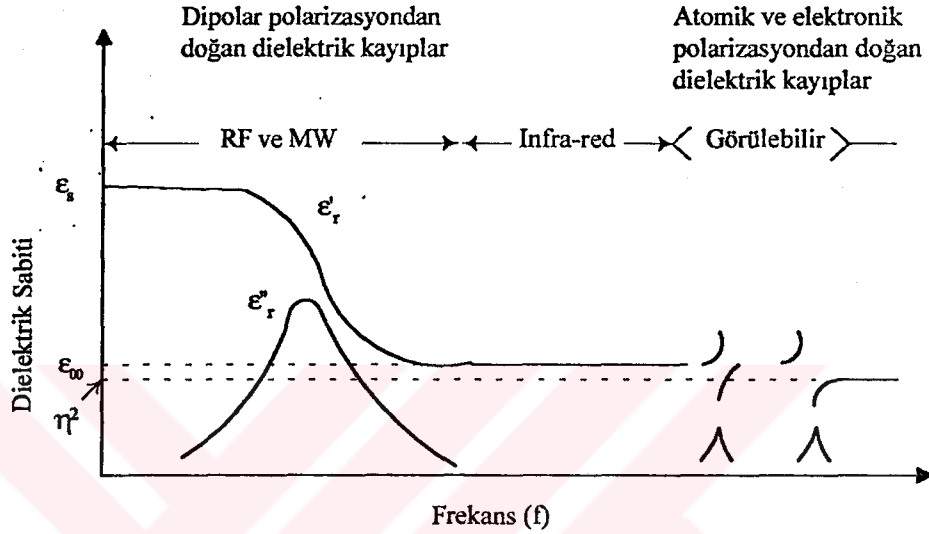
Dipolar veya yönlenme polarizasyonu düşük frekans bandlarının da olduğu kadar 1GHz 'in üstündeki endüstriyel mikrodalga uygulamalarında da çok önemlidir. Bu frekanslardaki davranış, yüksek frekanslı işaretin osilasyon periyoduyla bazı polar malzemelerin zaman sabitleri arasındaki ilişkinin ortaya konmasıyla açıklanabilir. Klasik yaklaşım, alternatif alan altındaki sıvılarda, polar moleküllü çözeltilerde ve polar olmayan bileşiklerdeki sürekli dipol davranışını ele alır. Debye, elektrolitler üzerinde yaptığı çalışmalarda aşağıdaki eşitliği çıkarmıştır :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (3.23)$$

Burada,  $\epsilon_s$  ve  $\epsilon_\infty$  sırasıyla D.C. ve yüksek frekanslardaki dielektrik sabitidir.  $\tau$  ise polarizasyonun azalmasını veya artmasıyla orantılı olan rölaksasyon zamanıdır. Sanal dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarını ayırırsak :

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty}}{1 + \omega^2\tau^2} \quad \epsilon'' = \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{r\infty})\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.24)$$

elde ederiz. Şekil 3.12 'de frekansın fonksiyonu olarak sanal dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımları görülmektedir.

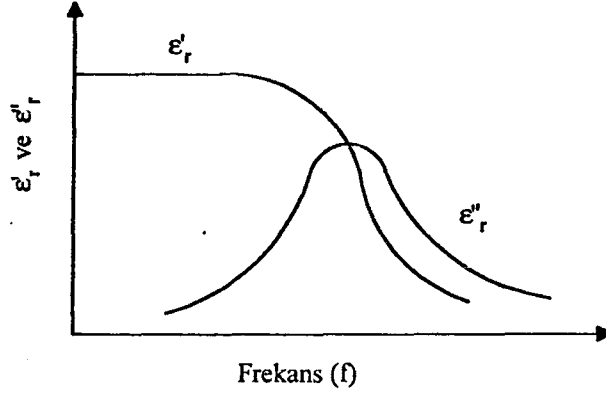


Şekil 3.12. Debye eşitliğine göre, sanal dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarının frekansla değişimi.

Her polarizasyon etkisi rezonans frekansı veya rölaksasyon frekansı karakteristiğine sahiptir. Frekans arttıkça yavaş mekanizmalar saf dışı kalır. Ayrılan hızlı mekanizmalar,  $\epsilon'_r$  ve  $\epsilon''_r$  'ne katkıda bulunur. Bu durumda  $\epsilon''_r$  'de kritik frekansta uygun tepe olur. Rezonans etkisi genelde elektronik veya atomik polarizasyonda olur. Rölaksasyon etkiside yönlenme polarizasyonu ile ilişkilidir.

Rölaksasyon zamanı, dielektrikte mevcut olan moleküllerin hareketinin ölçüsüdür. Bu rastgele denklik değerinin 1/e sine geri dönmek için bir elektrik alanla sraya giren yer değiştiren sistem için gereken zamandır. Sıvı ve katı dielektrikler, bir elektrik alan uygulandığında dar bir alanda sınırlı hareket edebilen moleküllere sahiptirler. Sabit çarpışmalar iç sürtünmeye yol açar. Öyle ki, moleküller yavaş döner ve eksponansiyel olarak rölaksasyon zaman sabiti ( $\tau$ ) sonunda yönlenme polarizasyonunun son durumuna yaklaşır. Alan kaldırılırsa, sıra ters döner ve aynı zaman sabitiyle rastgele dağılım eski durumuna gelir.

Rölaksasyon frekansı, rölaksasyon zamanının tersiyle orantılıdır ( $f_{relax}=1/2\pi\tau$ ). Bu frekansların altındaki rölaksasyon hızlı değişen elektrik alan değişimlerine ayak uyduran dipoller kadar yavaştır. Polarizasyonun tam olarak geliştirilmesiyle,  $\epsilon_r''$  doğrudan frekansa bağlıdır. Frekans arttıkça bu sürekli artmakta ancak  $\epsilon_r'$  dipol sıraları ile elektrik alan arasındaki faz farkından dolayı azalma gösterir. Rölaksasyon frekansının üstünde her ikisinde hızlıdır ve ayrılıp düşer ve yönlenme polarizasyonu ortadan kalkar.



Şekil 3.13. Tipik polar bir dielektriğin dielektrik rölaksasyonu.

Tek rölaksasyon zaman sabitiyle gösterilen polar dielektrikler, debye bağıntısıyla modellenebilir. Bu modelde permittivite frekansın fonksiyonu olacak şekilde bir karakteristiğe sahiptir.  $\epsilon_r'$  rölaksasyon frekansının civarında meydana gelen geçişten dolayı altında ve üstünde sabittir.  $\epsilon_r''$  altında ve üstünde azalır ve geçiş bölgesinde tepe oluşturur (Şekil 3.13).

### 3.6. Kayıplı Ortamda Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Zamana göre değişen durumda (sinüsoid) elektrik alanlar ve magnetik alanlar birlikte ortaya çıkarlar. Bu Elektromagnetik (EM) dalga serbest uzay boyunca yayılabilir (ışık hızında  $c = 3.10e8$  m/s) veya materyaller boyunca değişik dalga boylarında EM dalgalar mevcuttur. İşaretin dalgaboyu, işaretin frekansıyla doğrudan orantılıdır. ( $\lambda=c/f$ ) Bu durumda frekans arttıkça dalga boyu azalır.

Dalga yayılımı pek çok bakımdan maddenin elektrik ve magnetik geçirgenliğine (permittivitesine ve permeabilitesine) bağlıdır. Maddenin içine serbest uzaydan yayılan dalganın bir kısmı sınırda meydana gelen empedans uyumsuzluğundan dolayı yansır. Enerjinin diğer kısmı, madde boyunca iletilir. Maddenin içinde dalganın hızı ve

dalgaboyu azalır. Madde kayıplı ise, zayıflama olacak veya madde boyunca ek kayıplar oluşacaktır.

Aşağıdaki Maxwell eşitliklerini kullanarak z yönündeki elektromagnetik dalga yayılımı elde edilebilir.

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \epsilon_0 \epsilon^* \mu_0 \mu^* \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \epsilon_0 \epsilon^* \mu_0 \mu^* \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

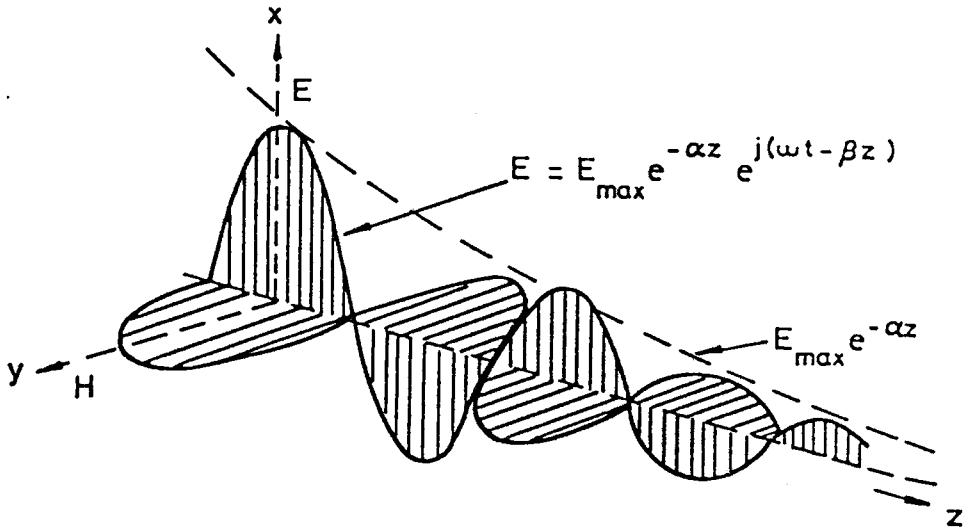
Elektrik alan için yüzey dalgalarının çözümü :

$$E = E_{\max} e^{j\omega t - \gamma z} \quad (3.26)$$

şeklindedir.  $\gamma$ , sanal yayılım faktörüdür.

$$\gamma = j\omega(\epsilon_0 \epsilon^* \mu_0 \mu^*)^{1/2} = \alpha + j\beta \quad (3.27)$$

Burada,  $\alpha$  zayıflama faktörü ve  $\beta$  faz sabitidir.



Şekil 3.14. Kayıplı ortamda elektromagnetik dalganın yayılımı.

Şekil 3.14 'de kayıplı bir ortamdaki yüzey dalgasının yayılımı görülmektedir. Burada dalga ortamdan geçerken zayıflamakta ve  $E^2$  ile orantılı olarak güç kaybetmektedir. (3.27) eşitliği (3.26) eşitliğinde yerine yazılırsa, elektrik alan :

$$E = E_{\max} e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (3.28)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikten görüldüğü gibi, elektrik alan zayıflama faktörü  $\alpha$  'yla orantılı olarak eksponansiyel olarak azalma gösterir.



## 4. DİELEKTRİK SABİTİ ÖLÇME TEKNİKLERİ

### 4.1. Giriş

Sanal dielektrik sabitinin ölçülmesi için, denenmiş ve doğru sonuçlar veren teknikler kullanmak gerekir. Genel olarak ölçmeler üç grupta ele alınır; iletme, yansımaya ve rezonansa dayalı teknikler. 100MHz 'in altındaki frekanslarda, köprü ve Q-metre metodları kullanılır. Bu frekansın üstündeki ölçmeler, içine örnek madde yerleştirilmiş olan koaksiyel hat veya dalgakılavuzundaki propagasyon sabitinin elde edilmesiyle yapılır. 10GHz 'in üstünde rezonatör ve serbest uzay metodları kullanılır (Scaife, 1971, Chamberlain ve Chantry, 1973).

Endüstriyel uygulamalarda genellikle 400MHz-3GHz frekans aralığı kullanılmaktadır. Bu frekans aralığında yapılan dielektrik sabitinin ölçümü dalgakılavuzu içerisinde örnek madde varken dalga kılavuzu içindeki elektromagnetik dalganın yayılım sabitinin bulunmasına dayanır. yayılım sabiti :

$$\gamma^2 = (2\pi/\lambda_c)^2 - \omega^2\mu_0\epsilon_a = (\alpha + j\beta)^2 \quad (4.1)$$

Burada  $\lambda_c$  dalga kılavuzunun kesim dalga boyudur. Malzeme içindeki yayılım sabiti  $\gamma_2$ , malzeme yokken transmisyon hattının yayılım sabiti  $\gamma_1$  dir. Eşitlik (4.1) 'de koaksiyel hattın kesim dalgaboyu,  $\lambda_c = \infty$  alınırsa dielektrik sabiti doğrudan bulunabilir :

$$\epsilon_a = \epsilon_0\epsilon^* = \epsilon_0(\gamma_2/\gamma_1)^2 \quad (4.2)$$

$\epsilon^*$  ölçmeleri, elektromagnetik işaretin zayıflama sabiti  $\alpha$  ve faz sabiti  $\beta$  'nın hesaplanmasını içerir. Deneysel olarak, ilk defa katılar için yayılım sabiti  $\gamma_2$  'nin ölçülmesinde kullanılan Robers ve Von Hippel (1946) 'in kendi adlarını alan çalışması basit bir metoddur. Daha sonra (williams ve Price 1973) kayıplı sıvıların dielektrik sabitinin ölçülmesi için bu metod uygunlaştırılmıştır. Katı dielektriklerin dalgakılavuzuna yerleştirilmeleri ve boylarının değiştirilebilmesi, sıvılar için de örnek tutucular geliştirilmesi bu metodu kullanışlı hale getirmiştir. Bu metodun en büyük dezavantajı, ölçülen değerlerin karmaşık bir formülasyondan sonra istenen dielektrik sabiti değerine ulaşılmasıdır. Bu zorluk, günümüzde bilgisayar tekniklerinin kullanılmasıyla ortadan kaldırılmıştır (Nelson 1973, Metaxas ve Driscoll 1974).

## 4.2. Ölçme Tekniğinin Seçimi

Ölçmeler sırasında elektriksel koşulların yanında mekanik koşullarda etkili olmaktadır. Ayrıca ölçülecek olan örneğin fiziksel yapısı, büyüklüğü ve ölçme sisteminde kullanılan teçhizatlardan oluşabilecek kayıplar gibi etkenlerde yöntem seçilmesinde göz önüne alınır.

Çalışılacak frekans aralığı da ölçmelerde kullanılacak tekniğin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. 100MHz 'e kadar olan düşük frekanslarda aktif devreler kullanılmaktadır. 100MHz 'den 10GHz 'e kadar olan frekans aralığında ise, dikdörtgen ve koaksiyel dalga kılavuzları ve koaksiyel prob teknikleri, örnek maddenin üretimi ve ölçme düzenine yerleştirilmesi bakımından kolaylıklar sağlamasından dolayı tercih edilmektedir. 30GHz frekanslarına kadar rezonatör ve köprü tekniklerinin kullanılması daha uygundur. 30-300GHz arasında kapalı ve açık rezonatör tekniklerinin kullanımı yaygındır. 300GHz in üzerinde ise serbest uzay optik ölçme teknikleri kullanılır. Serbest uzay metodları daha çok ince film şeklindeki dielektriklerin ölçülmesinde kullanılır. Bununla birlikte, bu ölçmeler istenmeyen yansımalar, sınırlı bir boşlukta yüzey dalgalarının girişimi ve örnek maddenin kenarlarından kırınım gibi bazı özel problemleri de beraberinde getirir.

Ölçmeler yapılırken çevre şartları (sıcaklık, nemlilik, basınç,...) yüzünden bazı sorunlarla karşılaşılmaktadır. Özellikle mikrodalgalarda bu sorunlar iyice artmakta ve yapılan ölçmelerde yanlışlıklara sebep olmaktadır. Ölçme işlemine başlamadan önce sistemin kalibrasyonu tam yapılırsa bile çevre şartlarından doğan hatalar giderilemez. İyi ölçme yapmak istememize rağmen ne yaparsak yapalım bazı hataların önüne geçemeyiz. Yapacağımız şey hataları en aza indirecek ve istediğimiz sonucu doğru bir şekilde elde etmemizi sağlayacak metodu seçip kullanmaktır.

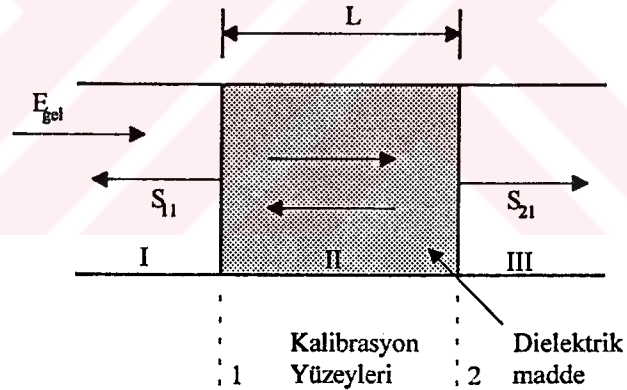
Günümüzde teknolojiye gelişmelerle birlikte pek çok şirket, materyallerin dielektrik özelliklerini ölçmek için gerekli olan çok çeşitli yazılım ve donanımı sağlamaktadır. Bunlar, DC yüksek rezistans metreler, empedans analizörler ve network analizörler gibi (DC den 110 GHz e kadar frekans aralığında çalışan) cihazlardır. MUT, (test altındaki materyal) örnek maddeyi ölçme sistemi içinde tutmakta kullanılan yapılar, koaksiyel dalga kılavuzları, hat, koaksiyel prob, paralel yüzey ve rezistif hücre tekniklerine uygun olarak imal edilmektedir. Ayrıca, ölçülmek istenen dielektrikler film şeklindeki bilinen dielektrikler arasına yerleştirilerek ölçmeler yapılmaktadır. Bu bilinen dielektrikler kullanılarak ölçme sisteminin ön kalibrasyonu yapılabilmektedir.



### 4.3. İletime Dayalı Ölçme Teknikleri

İletime dayalı teknikler katı ve sıvı dielektriklerin ölçülebilmesi için sıkça kullanılan tekniklerden biridir. Ancak ölçülecek dielektriklerin ölçmelerde kullanılan dikdörtgen veya koaksiyel dalgakılavuzlarına göre üretilmesi ve yerleştirilmesi zordur. Bununla beraber, dalgakılavuzuna yerleştirilen örnek madde ile dalgakılavuzu duvarları arasında kalan hava boşlukları ölçme sonuçlarında hatalar meydana gelmesine neden olmaktadır.

Bu yaklaşım, geniş bantlı çözümler için otomatik network analizör kullanıldığı zaman kullanışlı hale gelir. Bu yaklaşım için iki ortak sistem; koaksiyel veya dikdörtgen enine kesit kullanılır. Örnekle sistem arasındaki boşluk en aza incek şekilde, örneğin sistemin enine kesitinde en iyi şekilde yerleştirilmesi bu sistemlerde çok etkilidir. Örneklerin kötü yerleştirilmesi, beklenen sonuçlarla ölçülen sonuçların uyuşmamasına yol açar. Yüksek sıcaklıkta yapılan ölçümlerde örneğin genişlemesi göz önüne alınarak bir miktar boşluk bırakılabilir. Çevre sıcaklığına uygun ve artan sıcaklıklarda fazla etkilenmeyen madde ile istenen sonuçlar elde edilir.



Şekil 4.1 Dielektrik madde yerleştirilmiş dalgakılavuzu

Şekil 4.1 'de uzunluğu L olan dielektrik madde içeren bir dalgakılavuzu görülmektedir. Burada, elektrik alanın dielektrik ortamdaki davranışı I, II ve III bölgelerinde ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu şekle göre yansımaya katsayısı :

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (4.3)$$

şeklindedir. Burada K :

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (4.4)$$

dır. İletim katsayısı :

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21}) \cdot \Gamma} \quad (4.5)$$

ifadesinden bulunur.  $S_{11}$ , ve  $S_{21}$  sırasıyla yansıma ve iletme bağlı S- parametreleridir.  $\lambda_c$  serbest uzay dalgaboyu,  $\lambda_c$  de dalgakılavuzunun kesim dalgaboyu ve  $\mu_r = 1$  olarak alınırsa örnek maddenin bağlı geçirgenliği (permittivitesi) aşağıdaki şekilde elde edilir (Nicolson ve Ross, 1970, Weir, 1974).

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[ \left( \frac{1}{2\pi L} \right) \cdot \ln (1/T) \right]^2$$
$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \left( \frac{1}{\Lambda^2} + \frac{1}{\lambda_c^2} \right) \cdot \lambda_b^2 \quad (4.6)$$

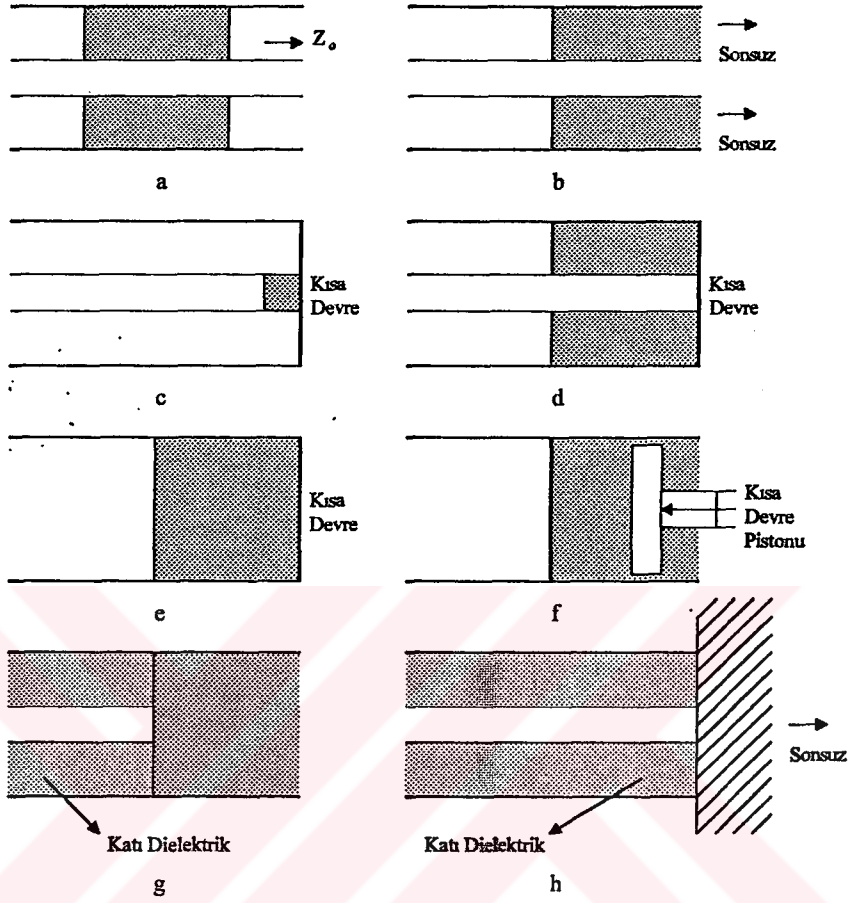
#### 4.4. Yansımaya Dayalı Ölçme Teknikleri

Yansımaya dayalı ölçmeler, diğer ölçme yöntemlerine göre daha kullanışlıdır. Bunlardan mikrodalga frekanslarında en çok kullanılanı, ölçme geometrisi şekil 4.2 d ve e 'de gösterilen kısa devre yöntemidir (Roberts ve Von Hippel metodu). Bu ölçmeler otomatik network analizörün (ANA) geliştirilmesinden sonra daha kullanışlı hale gelmiştir. Yansımaya dayalı teknikler zaman ve frekans domeninde düşük kayıplı dielektriklerin ölçülmesinde, geniş bir sıcaklık ve frekans aralığında ölçme imkanı sağlarlar.

Sıvı ve toz halindeki dielektriklerin ölçülmesinde, şekil 4.2 a ve f geometrileri örnek maddenin kolay yerleştirilmesi ve örnek boyuna bağlı olarak ölçüm yapma açısından kullanışlıdır. Bu yapılarda örneğin sıcaklığını boyunu kontrol etmek kolaydır. Prob ölçmeleri için de şekil 4.2 g ve h geometrileri uygundur. Burada örnek, hattın ucuna konmakta ve örnek madde ile koaksiyel açıklığındaki yansıma katsayısına bağlı dielektrik sabiti elde edilmektedir. Bu geometrilerin avantajları herhangi bir örnek tutucu ve sabit boyutlu örnek istememeleridir.

Ölçme sistemlerinde örnek tutucularla dalgakılavuzu duvarları arasında kalan hava boşlukları önemli hatalara neden olmaktadır. Bunu gidermek için sıcaklık artışlarında gözöntüne alarak örnek bir miktar küçük alınabilir. Bununla birlikte ölçmelere

başlamadan önce sistemin dielektrik özellikleri bilinen materyallerle kalibrasyonu mutlaka yapılmalıdır.



Şekil 4.2 Katı veya sıvı dielektriklerin ölçme geometrileri

#### 4.4.1.Kısa Devre Yöntemi

Bu metod, transmisyon hattı veya dalgakılavuzu enine olarak dielektrik yerleştirilen kısma bağlı iken duran dalgaların ölçülmesine dayanır. Ölçme düzeneği ve kılavuz içindeki duran dalgaların biçimi şekil 4.3 'de gösterilmiştir. Mikrodalga işaret kaynağı, yarıklı hat boyunca sonu kısa devre edilmiş ve enine yerleştirilen dielektrik maddeyi içeren kısma elektromagnetik dalga gönderir. Hattın giriş empedansı  $Z_{in}$ , dielektrikle doldurulan kısmın karakteristik empedansıda  $Z_{02}$  olacak şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir :

$$Z_{in} = Z_{02} \tanh(\gamma_2 d) \quad (4.6)$$

Burada  $d$ , dielektrik malzemenin boyudur. Dielektrikle dolu olan kısmın karakteristik empedansının  $Z_{02}$  hattın boş kısmındaki karakteristik empedansı  $Z_{01}$  a oranı :

$$\frac{Z_{02}}{Z_{01}} = (\gamma_1 / \gamma_2) = (j\beta_1 / \gamma_2) \quad (4.7)$$

dır. Burada hattın boş kısmının kayıpsız olduğu farzedilmiştir. Eşitlik (4.6), eşitlik (4.7) de yeniden yazılırsa :

$$Z_{in} = j\beta_1 Z_{01} [\tanh(\gamma_2 d)] / \gamma_2 \quad (4.8)$$

elde edilir. Giden ve geri dönen dalgaların birleşmesinden gerilim duran dalga oranıyla (VSWR)  $S$ , karakterize edilen duran dalga şekilleri oluşur. Transmisyon hattının her noktasındaki akım ve gerilim denklemlerinden örnek madde arayüzünden  $x_0$  kadar uzaktaki bir noktadaki akım ve gerilim denklemleri ise şu şekildedir :

$$Z = Z_{01} (Z_{in} + jZ_{01} \tan(\beta_1 x_0)) / (Z_{01} + jZ_{in} \tan(\beta_1 x_0)) \quad (4.9)$$

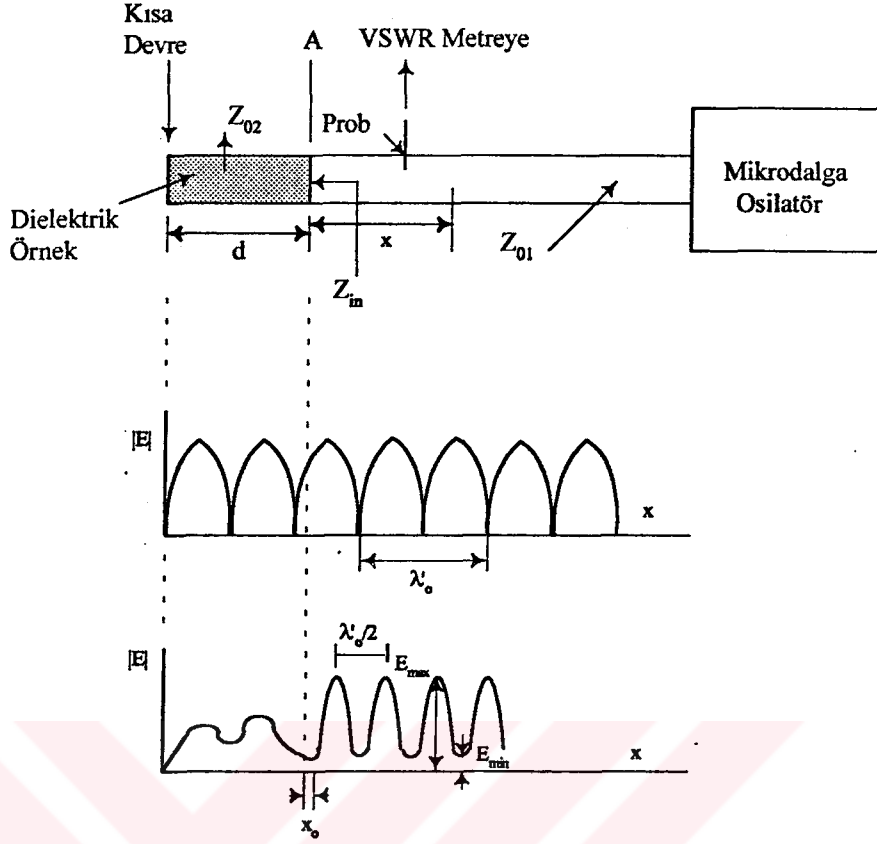
Bu noktadaki gerilim minimumsa, empedans rezistif ve  $SZ_{01}$  'e eşittir. Bu eşitlik (4.9) 'da yerine yazılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$Z_{in} = Z_{01} (S - j \tan(\beta_1 x_0)) / (1 - jS \tan(\beta_1 x_0)) \quad (4.10)$$

(4.8) ve (4.10) eşitliklerinin sağ tarafları birbirine eşitlenirse :

$$(\tanh(\gamma_2 d)) / \gamma_2 d = (S - j \tan(\beta_1 x_0)) / (1 - jS \tan(\beta_1 x_0)) j\beta_1 d \quad (4.11)$$

elde edilir.  $(\tanh(\gamma_2 d)) / \gamma_2 d$  'nin hesaplanması dört parametrenin ölçülmesini gerektirir. Bunlar,  $x_0$ ,  $S$ ,  $d$  ve  $\lambda'_0$  dır. Burada  $\lambda'_0$  dalga kılavuzu boşken dalga boyudur. Eşitlik (4.11) bilgisayar yardımıyla çözülür ve bulunan sonuçlar eşitlik (4.2) 'de yerine yazılırsa permittivitenin mümkün olan çözümleri elde edilir. Elde edilen bazı çözümlerin belirsizliği farklı örnek boyuyla yapılan ölçmelerle giderilir. Doğru sonuç, yapılan iki ölçmenin sonucunda elde edilen çözümlerin karşılaştırılmasıyla bulunur. Bu teori, kusurlu kısa devre elemanından, hat kayıplarından (bu kayıplar,  $\tan \delta < 10^{-4}$  olan düşük kayıplı malzeme ölçmelerinde önemlidir) ve dielektrik malzeme örneğinin kusurlarını ihmal etmek suretiyle basitleştirilir.



Şekil 4.3. Kısa devre yöntemi

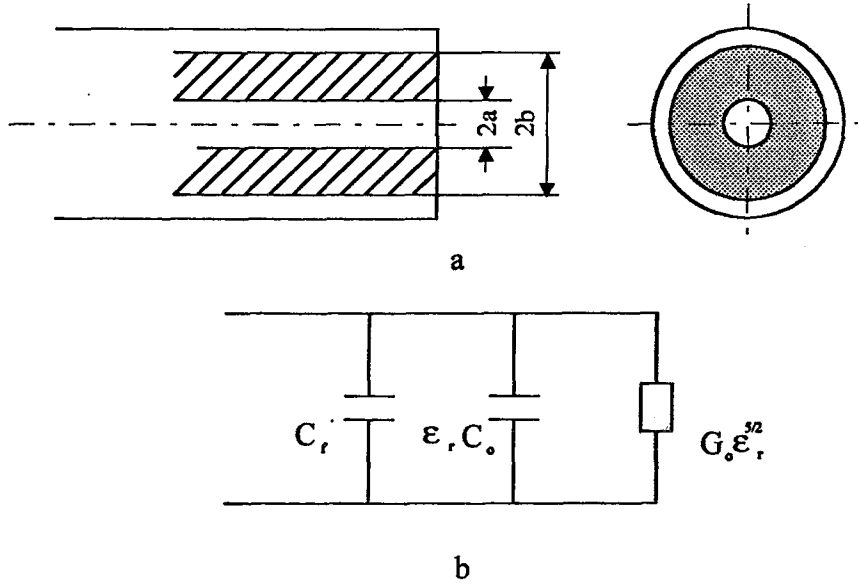
Bu hatalara ek olarak, dalga kılavuzunun iç ve dış iletkenlerin arasındaki boşluktan dolayı örnekte meydana gelen küçülme (bu olay daha çok dielektrik sabitinin nemliliğe göre değişiminin ölçülmesinde karşımıza çıkar) hataya neden olur. Bu hatalara ilişkin özel düzeltme faktörleri (Metaxas ve Parker, 1973) tarafından geliştirilmiştir.

#### 4.4.2. Koaksiyel Prob Tekniği

Bu teknik, pek çok araştırmacı tarafından sıvı ve yarı-katı dielektriklerle biyolojik maddeler ve gıdasal maddeler üzerinde uygulanmıştır. Mikrodalgalarda dielektrik sabitini ölçmek için, koaksiyel probun sonu kısa devre edilerek kalibrasyon yapılır. Daha sonra probun açıklığı, katı dielektrikler için yüzeye deydirilir ve sıvı dielektrikler için de geniş bir kaba konan sıvının içine daldırılarak sistemin giriş yansımaya katsayısı ölçülür. İstenen sıcaklık ve frekansta ölçülen bu değer dielektriğin sanal dielektrik sabitiyle orantılıdır.

Koaksiyel prob tekniği, prob açıklığındaki admittansının doğru olarak hesaplanmasına dayanmaktadır. Bunun için örneğe bağlanan probun giriş yansımaya katsayısı ölçülür. Bu ölçülen değer, proba bağlanan örnek maddenin dielektrik

özelliğiyle sıkı bir ilişkisi vardır. Ölçmelerin doğruluğu, uygun kalibrasyon işlemleriyle sağlanır.



Şekil 4.4 Koaksiyel prob geometrisi ve devre eşdeğeri

Örnek maddeye bağlanan koaksiyel prob ve devre eşdeğeri şekil 4.4 'de verilmiştir (Burdette 1980). Bu devrede, saçılmayı karakterize eden kapasiteler iki farklı metod kullanılarak elde edilmiştir (Gajda ve Stuchly 1983). Bunlar, sonlu elemanlar metodu (FEM) ve moment metodudur (MoM).

Koaksiyel prob açıklığındaki admittansı elde edebilmek için, koaksiyel açıklığında sonsuz yüzeyli bir düzlem olduğu gözönüne alınır. Bu düzleme bağlanan ortamın lineer, isotropik, homogen olduğu ve magnetik olmadığı varsayılır. Koaksiyel açıklığında yalnız temel mod alanları olduğu farzedilerek açıklığın normalize admittansı aşağıdaki gibi verilir (Misra, 1987) :

$$\overline{Y}_L \approx j \frac{k^2}{\pi k_c \ln(b/a)} \int_0^b \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{\cos \phi'}{r} - jk \cos \phi' - \frac{k^2 r}{2} \cos \phi' + j \frac{k^3 r^2}{6} \cos \phi' \right\} d\rho d\rho' d\phi' \quad (4.12)$$

Burada, açıklığın karakteristik empedansı :

$$Y_o = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o \epsilon_c} \cdot \ln(b/a)}} \quad (4.13)$$

şeklinde. Bunu (4.12) eşitliğinde yerine yazarsak açıklığın admittansı :

$$Y \approx \frac{j2\omega\epsilon^*}{[\ln(b/a)]^2} \left[ I_1 - \frac{k^2}{2} \cdot I_2 \right] \quad (4.14)$$

elde edilir. Buradaki  $I_1$  ve  $I_2$  ortamın karakteristiğinden bağımsız olarak yalnızca açıklığın fiziksel boyutlarına bağlı olarak değişir :

$$I_1 = \int_a^b \int_a^b \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi'}{[\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \phi']^{1/2}} d\phi' d\rho' d\rho$$

ve

$$I_2 = \int_a^b \int_a^b \int_0^{2\pi} \cos \phi' [\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \phi']^{1/2} d\phi' d\rho' d\rho \quad (4.15)$$

Ölçme işleminde, koaksiyel proba bağlı olan bir vektör network analizör yardımıyla ölçülen yansıma katsayıları harici bir bilgisayar ve yazılım yardımıyla açıklıktaki admittans bulunarak dielektrik sabiti elde edilir. Ölçülen yansıma katsayısı ( $S_{11}^*$ ) ile admittans arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$S_{11}^* = S_{11} e^{j\theta} = \frac{1 - Y_L^*}{1 + Y_L^*} \quad (4.16)$$

Burada, yansıma katsayısının genlik ve fazı ölçülmek istenen frekans aralığında kaydedilir. Bu bilgiler bu problemi çözmeye uygun yazılım kullanılarak ölçülmek istenen maddenin dielektrik sabitinin frekansa göre değişimi elde edilir.

#### 4.5. Rezonansa Dayalı Ölçme Teknikleri

Düşük frekanslarda bağıl geçirgenlik rezonans devresiyle ölçülebilir. Bu durumda C, içine örneği yerleştirilecek hava boşluklu bir kapasitedir. Geçirgenlik, örnek kapasiteye girdiği zaman rezonans frekansında oluşan değişmeye bakılarak hesaplanabilir. Kayıp açısı da, Q 'da meydana gelen değişim yardımıyla bulunabilir.

10GHz 'in üstündeki dielektrik ölçmelerinde rezonatörler kullanılır. Dielektrik maddenin bağıl geçirgenlik ve kayıp açısı, rezonatörün dalgaboyunda, rezonans



frekansında ve iyilik faktöründe oluşan değişim yardımıyla bulunabilir. Rezonatör tamamen dielektrik ile doldurulmuşsa :

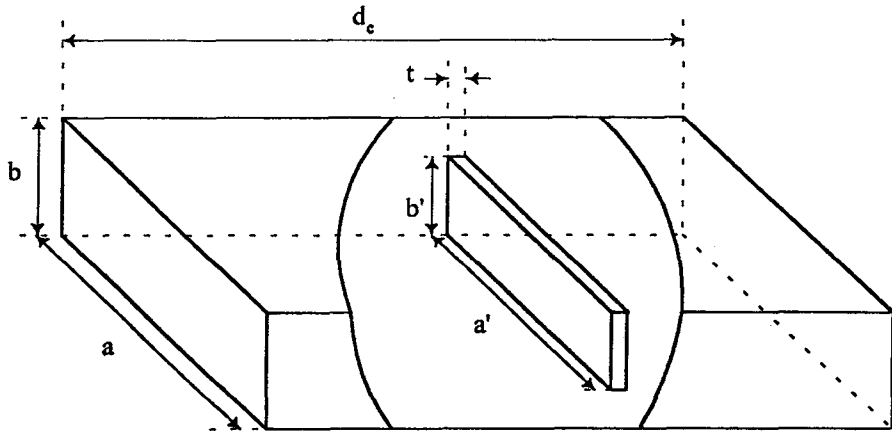
$$\tan \delta = \frac{1}{Q_d} - \frac{1}{Q} \quad (4.17)$$

yazılabilir. Burada  $Q$  ve  $Q_d$  sırasıyla rezonatör içinde hava ve dielektrik olduğunda iyilik faktörleridir.

Rezonatör, ölçülecek örnek maddenin şekline ve büyüklüğüne göre seçilir. Örnek rezonatöre kolayca girip çıkabilmeli ve iyilik faktörünü fazla değiştirmemelidir. Rezonatör iyi sıkıştırılırsa eklerden dışarıya ışıma olmaz ve  $Q$  değeri değişmez. Rezonatör değişik şekillerde olabilir. Fakat silindirik rezonatörler hem üretimi kolay olduğundan hem de yüksek  $Q$  değerlerine sahip olduklarından çoğunlukla kullanılırlar.

#### 4.5.1. Rezonatör Tekniği

Bu metod, düşük kayıplı ve küçük boyutlu malzemelerin dielektrik özelliklerinin ölçülmesi için kullanılır (Horner, 1946, Harvey, 1963, Gos Kov, 1965). Ölçmenin temel prensibi, rezonatör içindeki elektromagnetik alanın bozulmasına dayanır. Burada, rezonatör frekansının ilk değeriyle ( $\omega_0$ ) bozulmuş değerlerinin ( $\omega_0$ ) karşılaştırılması yapılarak kayma miktarı ve rezonatör içinde örnek varken ve yokken ki iyilik faktörü ( $Q$ ) ölçülür. Örneğin boyutları, rezonatörün boyutlarına göre küçük seçilmeli buna bağlı olarak küçük frekans kayması oluşturmaldır ve rezonatör içinde simetrikliği bozmayacak şekilde yerleştirilmelidir.



Şekil 4.5 Dielektrik özelliklerin ölçülmesinde kullanılan rezonatör



Ölçme formülasyonu, magnetik alanın ihmal edilebileceği bölgeye yerleştirilen küçük dielektrik malzemenin meydana getirdiği rezonatörün sanal açısal frekansına bağlı olarak aşağıdaki gibi üretilir :

$$\frac{\omega_0 - \omega_0'}{\omega_0} = -\epsilon_0(\epsilon' - 1) \frac{\iiint E^* E_0 dV}{4U} \quad (4.18)$$

Burada, E ve E<sub>0</sub> sırasıyla dielektrik bölgesindeki bozulan ve bozulmayan elektrik alanın maksimum değerleridir. U rezonatörde depolanan toplam enerji ve V ise, rezonatörün hacmidir. Rezonatörün değişen sanal açısal frekansı :

$$\omega_0 = \omega_0' + j(\omega_0 / 2Q) \quad (4.19)$$

şeklindedir. Burada, ω<sub>0</sub> rezonans frekansıdır. (4.19) eşitliği (4.18) eşitliğinde yerine yazılırsa :

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} + j\left(\frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q'}\right) = -\epsilon_0(\epsilon' - 1) \frac{\iiint E^* E_0 dV}{4U} \quad (4.20)$$

bulunur. Q<sub>0</sub> ve Q<sub>0</sub>' rezonatörün bozulmuş ve bozulmamış Q değerleridir. Paydadaki ω≡ω<sub>0</sub> ve |ω| >> |ω/2Q<sub>0</sub>| kabul edersek, bu durumda rezonans frekansındaki kayma miktarı ve iyilik faktöründeki değişme miktarıyla sanal dielektrik sabiti elde edilebilir. Şekil 4.5 'deki gibi TE<sub>10n</sub> bir dikdörtgen rezonatöre yerleştirilen dielektriğe bu teori uygulanmıştır (Mehmet ve McPhun, 1973). Konu ile ilgili olan dağılımları ve dielektrik sabiti (ε') ve kayıp fakfaktörü (ε'') integrasyonla ayrı ayrı aşağıdaki gibi bulunur :

$$\epsilon' = 1 - A \left( \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right) \quad (4.21)$$

ve

$$\epsilon'' = A \left( \frac{1}{2Q} - \frac{1}{2Q'} \right) \quad (4.22)$$

Burada A sabiti :

$$A = \frac{abd_{\epsilon}}{a'b't} \left[ 1 - \frac{a}{2\pi a'} \sin \frac{2\pi a'}{a} \right]^{-1} \quad (4.23)$$

ile verilir. Burada, Δω negatiftir ve rezonatöre ilişkin boyutlar şekil 4.5 'de verilmiştir.

## 5. ENDÜSTRİYEL MALZEMELERİN DİELEKTRİK SABİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. FBA 'nın Özellikleri

Tekstil, kağıt ve deterjan endüstrisinde beyazlatıcı ve yumuşatıcı olarak kullanılan, "optik beyazlatıcı" olarak da isimlendirilen -Fluorescent Brightening Agent- (FBA) görülebilir spektrumun ultra -violet bölgesinde soğuran ve mavi-violet ışık yayan (kuvvetli FBA) kimyasal bir maddedir.

Ticari olarak, bunların üretim mekanizmaları diaminostilbenedisulphonic acid (DAS) 'den başlayan bir dizi reaksiyondan meydana gelir. Reaksiyon şartlarının uygun seçilmesi ile, siyanürük klorit klor atomları amin veya alkolle yer değiştirebilir. Uygun kimyasal reaksiyonlar, yaklaşık olarak %40 oranında su içeren ve pH < 2 olan sulu çözeltilerde meydana gelir.

Şekil 5.1 'de DAS 'ın kimyasal yapısı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi bu asit pek çok molekülün ard arda tekrarından oluşan bir zincir yapıya sahiptir. Bu yapı bir ayna simetrisine sahiptir. Bu yapının tekrar etmesi halinde yapı bir polimer şeklini alır.

Polimer kelimesi Yunanca "polimeros" yani "çok yapı, çok parçalı" anlamına gelmektedir. Polimerler, tekrarlanan birimlerden oluşan büyük moleküller içerirler. Büyük moleküller, bu sistemlere diğerlerinden farklı birçok üstün özellik kazandırmaktadır. Bilinen diğer malzemelerde, sistemleri oluşturan molekül veya atomlar çok daha küçük boyutta bulunurlar. Polimerlerde ise, bu bireylerin birbirlerine sağlam bağlarla bağlanarak uzun ve büyük moleküller oluşturmaları söz konusudur. Bu polimer molekülleri, normal molekül boyutlarından büyük olmalarına karşın yine de ışığın dalga boyundan çok küçük olduklarından gözlenemezler. Polimer moleküllerine has uzun zincir yapısı nedeniyle, polimer malzemelerin yoğunlukları bilinen diğer malzemelere kıyasla küçüktür. FBA 'da polimer tabanlı bir kimyasal madde olduğu için, FBA 'nın ne kadar yumuşak veya sert olacağını, dayanıklılığını, yalıtkanlığını ve birçok elektriksel özelliğini şüphesizki malzemeyi oluşturan polimerler sınırlar.

Deneysel olarak %40 su içeren ve yapışkan bir formda olan FBA kullanılmıştır. Bu maddeyi yarı-katı dielektrik olarak nitelendirebiliriz. FBA 'nın bu yüksek nemlilik oranını üretimi sürecinde yaklaşık %0 'a düşürmek gerekmektedir.



## 5.2. Koaksiyel Prob Kullanılarak FBA 'nın Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi

Bir dielektrik malzemenin yüksek frekanslı bir elektromagnetik alanda bulunması halinde kayıp faktörüyle ( $\epsilon''$ ) orantılı olarak bir enerji ısıya dönüşür. Yani, dielektrik malzeme olan FBA 'nın çok yüksek frekanslı elektromagnetik alan (MW frekansları) içinde dielektriksel kayıplarla kurutulması mümkündür. FBA 'ı kurutma işleminde, mikrodalga enerjisinin etkisini anlamak için, kurutma işlemi süresince değerlendirmeye alınan bu heterojen karışımın sanal dielektrik sabitini (permittivitesini) bilmek zorundayız. Ayrıca, FBA 'nın kurutma işlemi süresince dielektrik sabitinin sıcaklığa ve nemlilik oranına göre değişiminde ele alınması gerekir. Bu çalışmada yalnızca FBA 'nın frekansa göre değişen dielektrik sabiti göz önüne alınmıştır.

Koaksiyel prob kullanılarak FBA 'ın 500MHz-3GHz aralığında dielektrik sabitinin elde edilmesi için koaksiyel probun giriş yansıma katsayısı bir vektör network analizörle ölçüldükten sonra, probun açıklık admittansını en iyi şekilde modellemek için, sabit ve frekansa bağlı kapasitif etkiler meydana getiren prop açıklığında statik-gibi yaklaşım kullanılarak dielektrik sabiti hesaplanır (Misra, 1987).

Sistemde bulunan prob ile network analizör bağlantısını sağlayan konnektörler ve diğer sebeplerden doğabilecek hataları gidermek için yapılan kalibrasyonda, saf su, açık devre, kısa devre ve metanol gibi standart materyaller kullanılır. Kalibrasyon için kullanılan saf su ve metanol için literatürde bilinen 500MHz-3GHz frekans aralığındaki dielektrik sabiti değerleri ele alınır. Açık devre için de havanın dielektrik sabiti ( $\epsilon = 1$ ) alınır. Örnek maddeye bağlı durumda ölçülen yansıma katsayılarıyla elde edilen açıklığın gerçek admittansı sistemin standart materyaller kullanılarak yapılan kalibrasyonundan sonra doğru şekilde elde edilir.

Koaksiyel hattın açıklık admittansı statik-gibi yaklaşım kullanarak aşağıdaki ifade ile gösterilebilir :

$$Y_L = A\epsilon^* + B\epsilon'^2 + C\epsilon'^{2.5} \quad (5.1)$$

Burada, A,B ve C koaksiyel açıklığın geometrisine bağlı sabitlerdir.  $\epsilon^*$ , lineer, izotropik, manyetik olmayan ve homojen olduğu farzedilen yarı-sonsuz ortamın sanal dielektrik sabitidir.

Ölçme sistemi, koaksiyel prob açıklığına örnek madde bağlı durumda, açıklığın admittansının belirlenmesinden ibarettir. Ortaya çıkabilecek mutlak hataları ortadan kaldırmak için; admittans, aşağıdaki gibi sistemin üç standart materyal kullanılarak kalibre edilmesinden sonra, ölçülen yansıma katsayısından elde edilir :

$$\frac{Y_s - Y_1}{Y_s - Y_2} \cdot \frac{Y_3 - Y_2}{Y_1 - Y_3} = \frac{\delta_{s1} \delta_{32}}{\delta_{s2} \delta_{13}} \quad (5.2)$$

Burada  $Y_s$  , örnek madde bağlı durumda açıklık admittansıdır.  $Y_{1,2,3}$  , sırasıyla saf su, açık devre ve kısa devre gibi standart materyallerin bağlı olduğu durumdaki açıklık admittanslarıdır ve  $\delta_{ij} = \Gamma_i - \Gamma_j$  şeklindedir. Burada  $\Gamma_n$  n' inci materyalin ölçülen yansıma katsayısını temsil eder.

Pratikte, koaksiyel açıklıktan yansımayı temsil eden C sabiti, düşük mikrodalga frekanslarında ihmal edilebilir. (5.1) ifadesini bu yaklaşımı kullanarak aşağıdaki gibi yazabiliriz :

$$y_L = \epsilon_r^* + \xi \epsilon_r^{*2} \quad (5.3)$$

(5.3) 'deki bilinmeyen  $\xi$  sabiti aşağıdaki gibi, sanal permittivite bilinen 1,2 ve 4 (metanol) standart materyallerin ölçülen yansıma katsayıları ile hesaplanır :

$$\xi = \frac{(1 + \Delta)\epsilon_4^* - \epsilon_1^* - \Delta\epsilon_2^*}{\epsilon_1^{*2} + \Delta\epsilon_2^{*2} - (1 + \Delta)\epsilon_4^{*2}} \quad (5.4)$$

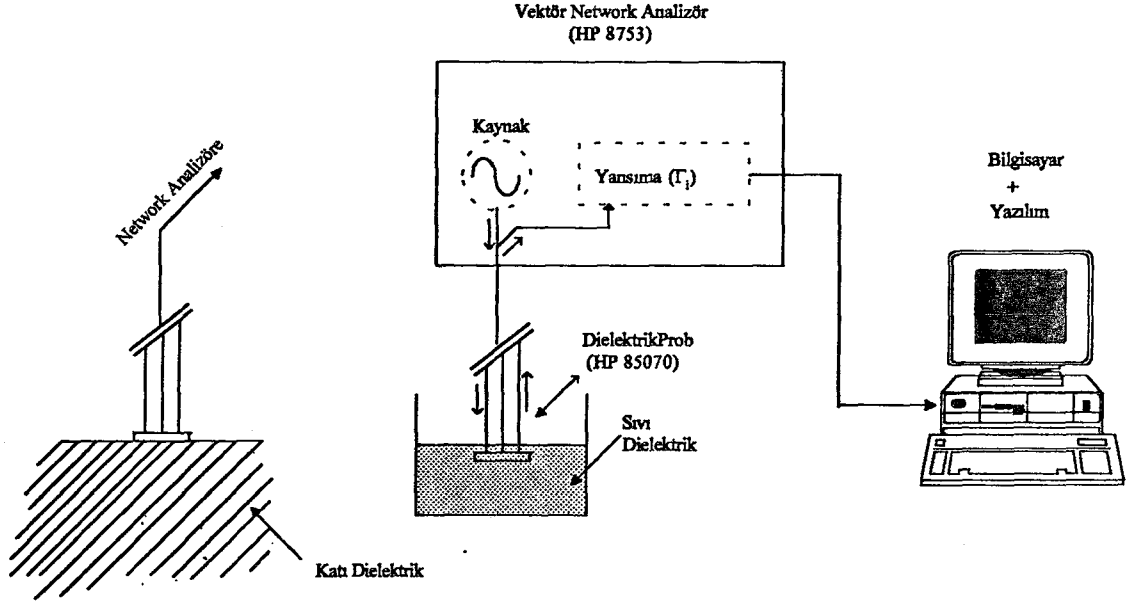
Burada  $\Delta = \delta_{41} \delta_{32} / \delta_{42} \delta_{13}$  şeklindedir.

Üçüncü standart olarak kısa devre kullanılırsa, (5.2) ve (5.3) eşitlikleriyle, aşağıdaki ifadeden açıklığın admittansı  $y_s$  elde edilir :

$$y_s = (y_1 + \Delta' y_2) / (1 + \Delta') \quad (5.5)$$

Burada  $\Delta' = \delta_{s1} \delta_{32} / \delta_{s2} \delta_{13}$  şeklindedir.

Eşitlik (5.5) 'deki  $y_{1,2}$  ölçüm frekansında, sırasıyla 1 ve 2 standartlarının bilinen sanal dielektrik sabitlerini kullanılarak, (5.3) eşitliğinden hesaplanır.

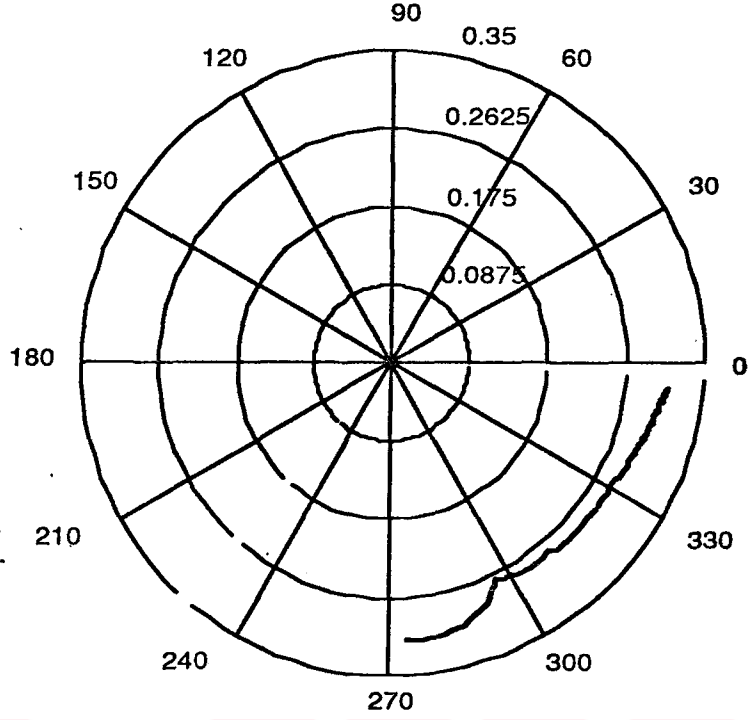


Şekil 5.2 Koaksiyel prob kullanılarak yapılan ölçme düzeneği

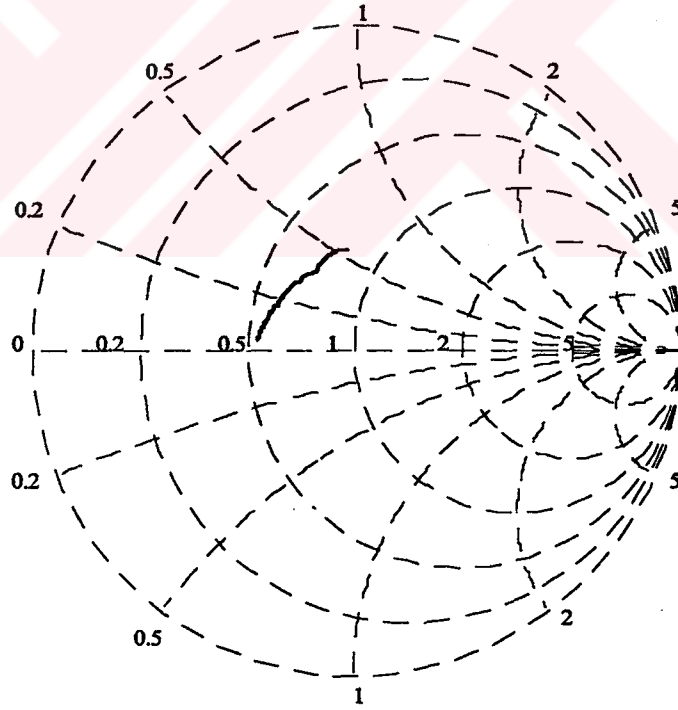
Farklı dielektriklerin yansımaya katsayılarının ( $\Gamma_1$ ) ölçülebilmesi için gerçekleştirilen deney düzeneği, başlıca HP8753 vektör network analizör, HP85070 dielektrik prob ve harici bir bilgisayardan oluşur. Gerekli olan mikrodalga işareti, network analizördeki süpürme osilatöründe (0.01-3GHz) üretilir ve koaksiyel proba dielektrik yüzeyine gönderilir. Yansımaya katsayısının genlik ve fazı network analizörde dedekte edilir (Şekil 5.2).

Standart materyaller olarak sırasıyla, saf su, açık devre, kısa devre ve metanol kullanıldıktan sonra, 0.1N tuz çözeltisi ve gliserin gibi birkaç maddenin yansımaya katsayısını ölçerek, sanal dielektrik sabitleri hesaplanarak literatürde bilinen değerleriyle karşılaştırılır. Bu karşılaştırmalar sonucunda bulunan değerlerin literatürdeki değerlerle çok uyumlu olduğu görülmüştür.

FBA 'nın 500MHz-3GHz frekans aralığında ölçülen yansımaya katsayısı değerleri polar diyagramda şekil 5.3-a 'da verilmiştir. Bu diyagramdan görüldüğü gibi, yansımaya katsayısının genliği yaklaşık olarak 0.3 civarında sabit kalmasına rağmen fazı  $0^\circ$  ile  $-90^\circ$  arasında değişmektedir. Bu değerler, literatürde Mosig tarafından elde edilen 1.normal tuz çözeltisi (NaCl) ile yaklaşık olarak aynıdır. Polar bir materyal olan tuz çözeltisinde olduğu gibi yansımaya katsayısının genliği frekans yükseldikçe hızla sıfıra yaklaşmakta ve fazı da aynı oranda azalmaktadır (Mosig, 1981). Diyagramda görülen yansımaya katsayısı eğrisinde yaklaşık olarak 2GHz 'in üstünde meydana gelen genliğin artması ölçmelerden doğan hatalardan oluşmaktadır.



(a)

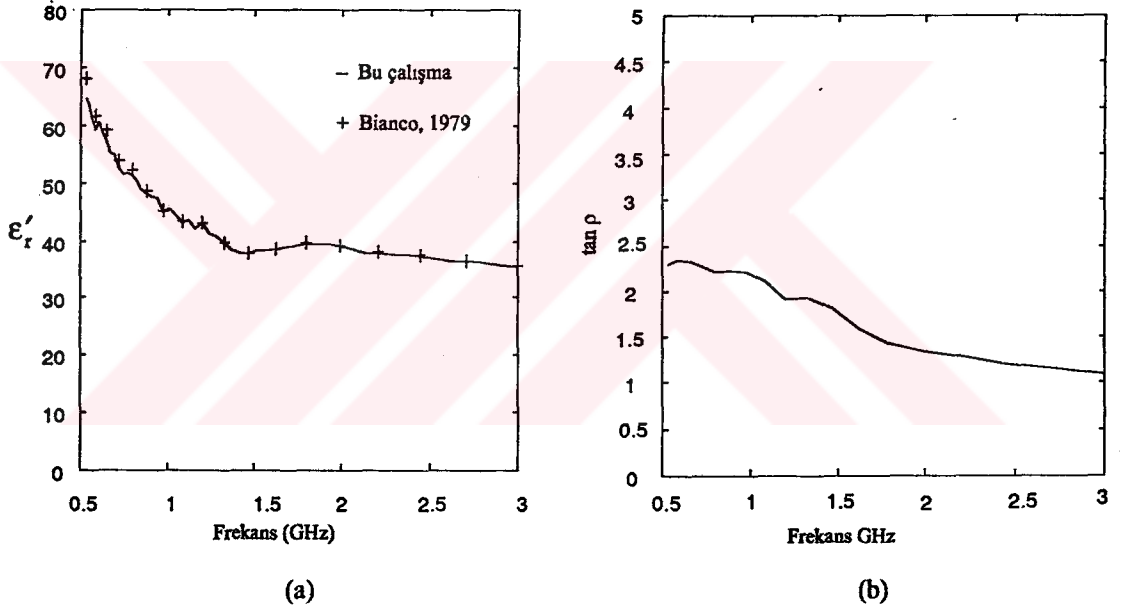


(b)

**Şekil 5.3** FBA 'nın ölçülen yansımaya katsayısının polar diyagramı (a) ve bulunan koaksiyel açıklığın admittansın smith abağı (b)

Şekil 5.3-b 'de ise FBA 'nın 500MHz-3GHz frekans aralığında ölçülen yansımaya katsayılarından elde edilen koaksiyel açıklığın admittansı smith abağında gösterilmiştir. Açıklığın admittansının ( $Y = G + jB$ ) gerçel kısmı olan iletkenlik smith abağından da görüldüğü gibi, pozitif ve sanal kısmı olan suseptansı da pozitiftir. Bu değerlerden görüldüğü gibi, FBA maddesi doğal olarak kapasitif etki göstermektedir. Admittansın gerçel kısmı yaklaşık olarak 0.6 civarında sabit kalmasına rağmen frekans arttıkça bu değer bire yaklaşmaktadır. Sanal kısmı ise 0.1 ile 0.5 arasında değişmektedir. FBA 'nın kayıp faktörü iletkenlikle orantılı olarak değişmekte ve dielektrik sabiti ise suseptansla orantılı olarak değişmektedir.

FBA maddesi kullanılarak elde edilen dielektrik sabiti ( $\epsilon_r'$ ) ve kayıp tanjantın ( $\tan \delta$ ) frekansa göre değişimi şekil 5.4 'de gösterilmiştir. Bu şekillerde sırasıyla FBA 'nın dielektrik sabiti ve kayıp tanjantın frekansla değişimi verilmektedir.



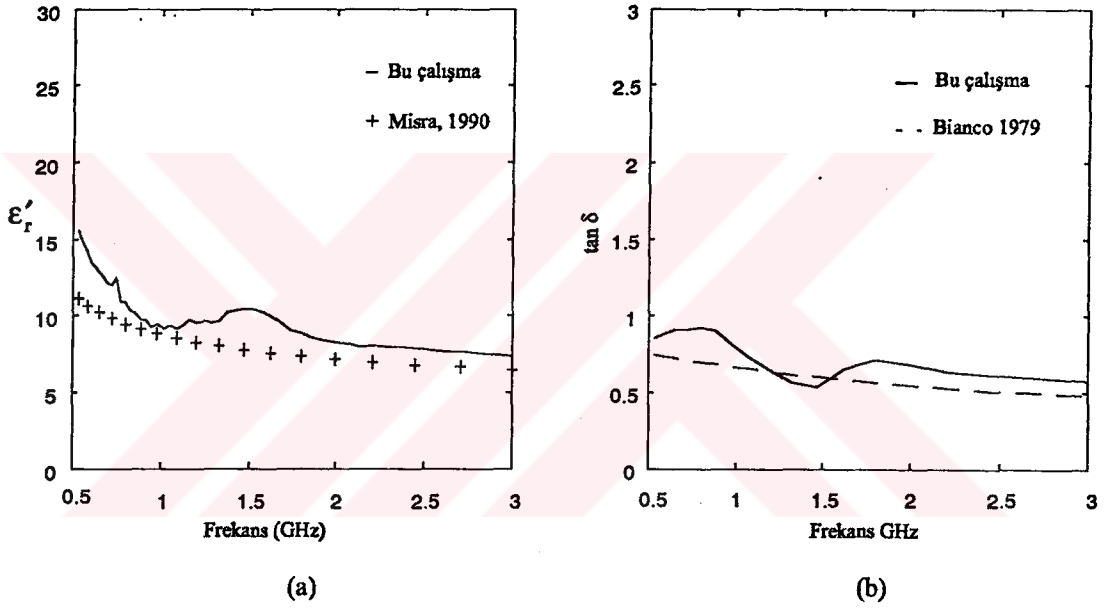
Şekil 5.4 FBA 'a ait dielektrik sabiti (a) ve kayıp tanjantın (b) frekansla değişimi

Şekil 5.4 'de görüldüğü gibi, FBA 'nın dielektrik sabiti frekans arttıkça yaklaşık olarak 40 civarında sabit kalmaktadır. Aynı şekilde kayıp tanjantı da 1 ile 1.5 civarında sabit kalmaktadır. Bu sonuçlardan FBA 'nın çok kayıplı bir materyal olduğu görülmektedir. Ayrıca, 500MHz-3GHz frekans aralığında FBA 'ın sanal dielektrik sabiti değişiminin, polar bir materyal olan tuz çözeltisinin tipik davranışlarına benzediği sonucu çıkarılabilir.



Deneysel olarak %40 su içeren ve yapışkan bir formda olan FBA kullanılmıştır. Mikrodalga ışınım altındaki bu materyal, elektrik alan sayesinde titreşen simetrik olmayan moleküllerden dolayı polar dönme özelliği gösterirler. Yüksek frekanslarda, iyonik rölaksasyon baskın olur, ama iletkenliğin etkisi rölaksasyon olayının önemli bir kısmını teşkil eder. Böylece sonuçta, kimyasal karışım bileşenlerinin polaritesiyle mikrodalga ışınım absorpsiyonunun etkilendiği görülmüştür. FBA maddesi içinde çözücü sıvılar olduğunda mikrodalga ışınımından büyük ölçüde etkilendiği, aksi halde tepki göstermediği görülmüştür.

Ölçme yönteminin kullanılması sonucunda, şekil 5.5 'de sırasıyla gliserine ait dielektrik sabiti ve kayıp tanjantın frekansla değişimi verilmiştir.



Şekil 5.5 Gliserine ait dielektrik sabiti (a) ve kayıp tanjantın (b) frekansla değişimi

Şekil 5.5 'de gliserine ait ölçülen ve literatürde mevcut olan dielektrik sabiti ve kayıp tanjantının değişimi görülmektedir. Eğrilerde gliserinin yaklaşık olarak 1.5GHz civarındaki dielektrik sabiti literatürdeki bilinen değerinden uzaklaşmaktadır. Bunu sistemin kalibrasyonunun ve gliserinin saf olmamasından kaynaklanmaktadır.

Özellikleri bilinmeyen pek çok materyalin permittivitesi, geniş bir frekans aralığında koaksiyel prob tekniği kullanılarak elde edilebilir. Bu teknik, network analizöre bağlı olan koaksiyel probu içeren sistemi kullanır. Deney sonuçlarının doğruluğu açısından, sistemin ön kalibrasyonu büyük önem arzeder.

### 5.3. Kısa Devre Yöntemi Kullanılarak Silikonun Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi

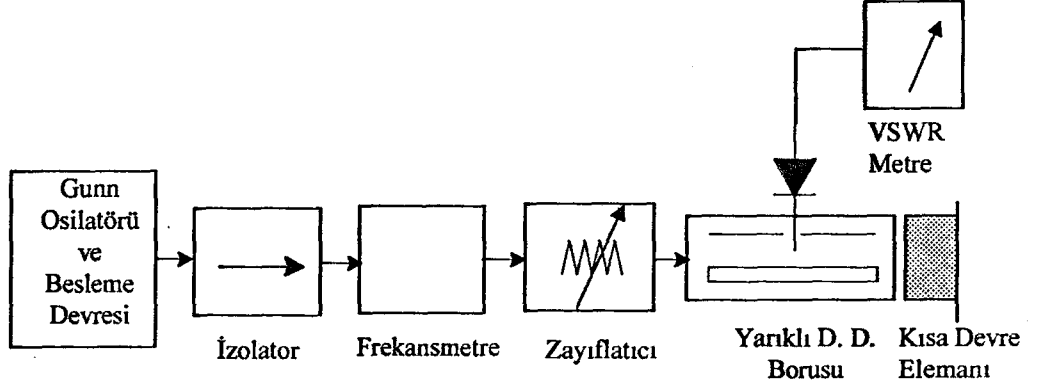
Silikon, sağlıktan sanayiye kadar kendisine çok geniş kullanım alanları bulabilen çağımızın en önemli endüstriyel malzemelerinden birisidir. Özellikle kablo sanayinde kullanılan silikon, yüksek dielektrik mukavemeti, dielektrik yorulmaya dayanımı, düşük güç tüketim katsayısı, düşük dielektrik sabiti ve çok yüksek ark direncine sahip olması nedeniyle en zor koşullarda dahi, uzun vadeli güvenilirlik sağlayan bir izolasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Çok sayıda çeşidi bulunan silikon, sentetik bir kauçuk olup, silisyum elementinden bir seri kompleks reaksiyonlar sonucu elde edilmektedir. Polimer teşkilinde, karbon, kükürt, nitrojen, klor veya başka bir halojen bulunmadığından sıcaktan etkilenmez ve yanma işlemi zorlaşır.

Transmisyon hat veya dalga klavuzu metodları içerisinde incelenen kısa devre yöntemi veya Von Hippel metodunda dielektrik malzeme, dalga klavuzunun sonunda yer almaktadır ve sonu kısa devre edilmiştir. Bu yüzden tek kapılı bir sistem olarak inceleneceğinden ölçülecek büyüklükler yansıma katsayısını bulmaya yönelik olacaktır ki bu metod, aynı zamanda yansıma metodu olarakta isimlendirilir (Ganchev, 1994).

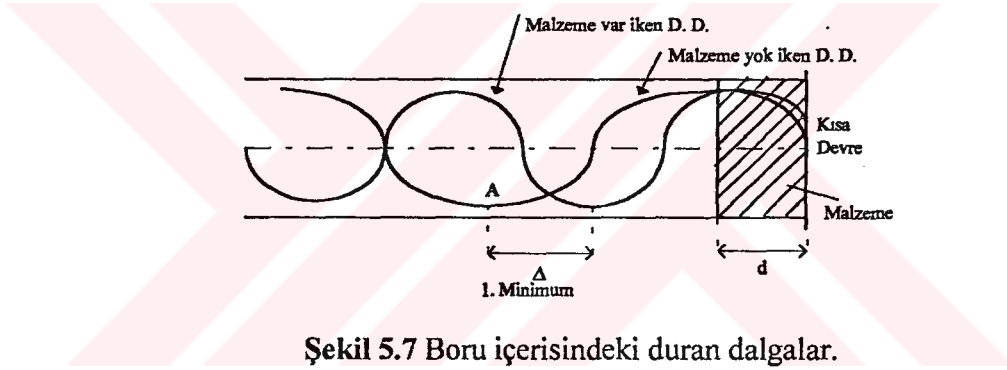
Şekil 5.6 'da silikonun dielektrik özelliklerinin ölçümünde kullanılan ölçme düzeneği görülmektedir. Ölçmeler, WR 90 transmisyon borusu kullanılarak 8.2-12.4 GHz frekans aralığında yapılmıştır. Gunn Osilatörü, bu frekans aralığında, 1KHz 'de darbe modülasyonuna tabi tutulmuş mikrodalga işareti üretir. İşaret, zayıflatıcı üzerinden izolatör yardımıyla yarıkli duran dalga (D.D.) borusuna iletilir. Yarıkli D.D. borusunun sonu kısadevre edilmiş ve boru içerisinde kısadevre düzleminin önüne de arada boşluk kalmayacak şekilde d kalınlıklı malzeme yerleştirilmiştir.

Ölçmelerin ilki, transmisyon borusu içerisinde malzeme varken, ikicisinde ise transmisyon borusu boş olması durumlarında yapılmaktadır. Hesaplamalar, temel olarak d kalınlıklı malzeme yarıkli D.D. borusunun sonuna yerleştirilmişken oluşan duran dalga karakteristiğine ve bu durumda oluşan ilk minimumun, boru içerisinde malzeme olmadığı durumda ki ilk minimuma göre kaymasına bağlıdır. Duran dalga oranı hassas gerilim duran dalga oranı (VSWR) metre ile ölçülmekte ve minimumlar arası faz farkıda yarıkli D. D. borusu üzerinden 0.01mm hassasiyetle okunmaktadır.



Şekil -5.6 Silikon malzemenin ölçme düzeneği.

Mikrodalga generatörü olarak, 1 KHz kare dalga modülasyonlu Gunn osilatörü (8.2GHz-12.4GHz) kullanılmıştır (Flann Microwave Inc.). Ölçme düzeneğindeki diğer elemanlar X bandı standard mikrodalga devre elemanlarıdır.



Şekil 5.7 Boru içerisindeki duran dalgalar.

Şekil 5.7 'de sonu kısa devre transmision borusu (WR 90) gösterilmiştir. Boruda malzeme yok iken kısa devreden itibaren ilk minimumun yeri (A noktası) tespit edilir. Dalga kılavuzuna yerleştirilen örnek maddenin boyu  $d \leq \lambda_g/4$  olmalıdır. Boru içerisine kısa devre düzleminden itibaren d kalınlığında örnek madde konduğunda boru içindeki duran daga şekilde gösterilmiştir. Birinci minimumun yüke doğru  $\Delta$  kayma miktarı ve VSWR ölçülür.

Ölçülen bu büyüklüklerle dielektrik sabiti ve kayıp faktörü arasındaki bağıntılar :

$$\epsilon'_r = \left( \frac{\lambda_o}{\lambda_c} \right)^2 - \left( \frac{\lambda_o}{2\pi} \cdot \frac{X}{d} \right)^2 \quad (5.6)$$

ve

$$\tan\delta = \frac{1}{\pi \cdot S} \cdot \frac{\epsilon'_r - \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_c}\right)^2}{\epsilon'_r} \cdot \frac{4\pi}{\frac{\sin 4\pi U}{2X} - 1} \quad (5.7)$$

ifadeleri ile verilir. Burada  $U = (\Delta + d)/\lambda_g$  ,  $\lambda_o$  serbest uzay dalgaboyu,  $\lambda_c$  dalga klavuzunun kesim dalgaboyu, S, malzeme yarıklı D.D. borusu sonuna yerleştirilmiş durumdaki duran dalga oranı, d malzemenin kalınlığı,  $\lambda_g$  boru dalgaboyu, ve  $\Delta$  minimumun kayma miktarıdır. X büyüklüğü ise :

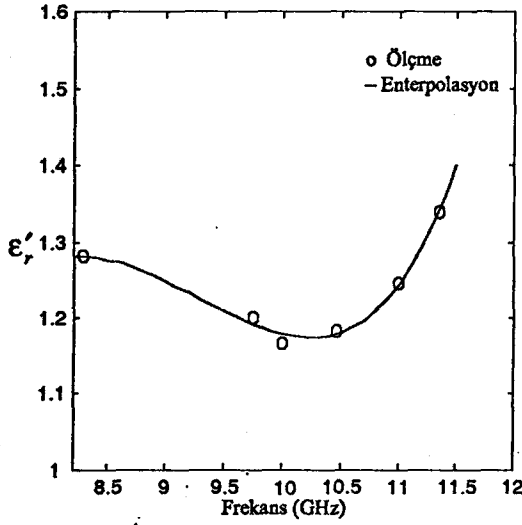
$$\frac{\tan(X)}{X} = \frac{1}{2\pi \cdot \frac{d}{\lambda_g}} \cdot \tan 2\pi U \quad (5.8)$$

ile verilen denklemin çözümdür. Bu denklemin çözümü, nümerik yöntemlerden Newton metodu kullanılarak yapılmıştır.

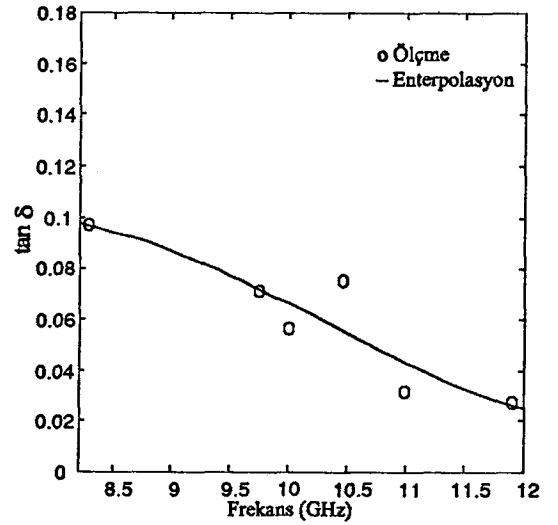
280.1U, MF160.1U ve 60TAT silikon örneklerin dielektrik sabiti ve kayıp faktörü sunulan ölçme yönteminin kullanılması sonucu frekansla değişimleri elde edilmiştir. Gerekli ölçümler yapılmış ve malzeme kalınlığı olarak  $d = 18$  mm alınarak ilgili formülasyondan silikon çeşitlerinin dielektrik özellikleri tayin edilmiştir.

Şekil 5.8 'de 280.1U silikon numunesinin dielektrik sabitinin ve kayıp faktörünün frekansla değişimleri görülmektedir. Şekil 5.9 'da MF160.1U silikon numunesinin ve Şekil 5.10 'da ise 60TAT silikon numunesinin dielektrik özellikleri verilmektedir. Eğriler, ölçülen değerleri ve bu değerler ile Levenberg-Marguardt enterpolasyonu kullanılarak elde edilen değişimleri içermektedirler.

X bandında ölçülen silikonlardan 280.1U 'ya ait dielektrik sabiti 1.2 ile 1.5 arasında ve kayıp tanjantı da 0.1 ile 0.02 arasında değişmektedir. Kayıp tanjantın bu değeri çok düşük kayıplı veya kayıpsız dielektrikler için belirlenmiş değerler arasındadır. Yine aynı şekilde MF160.1U ve 60TAT silikon malzemelerinde dielektrik sabiti 1 ile 1.1 arasında ve kayıp tanjantları da 0.08 ile 0.02 arasında değişmektedir.

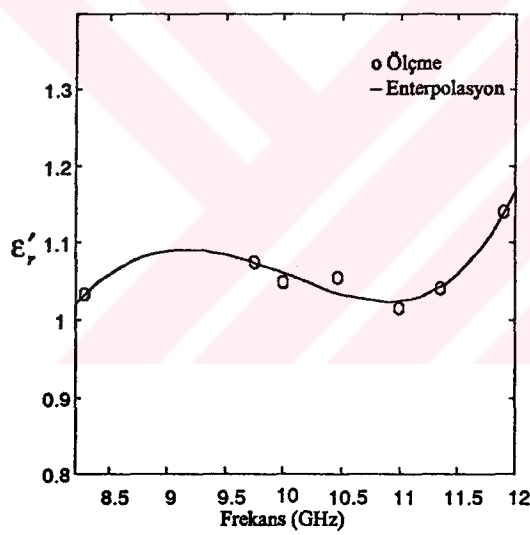


(a)

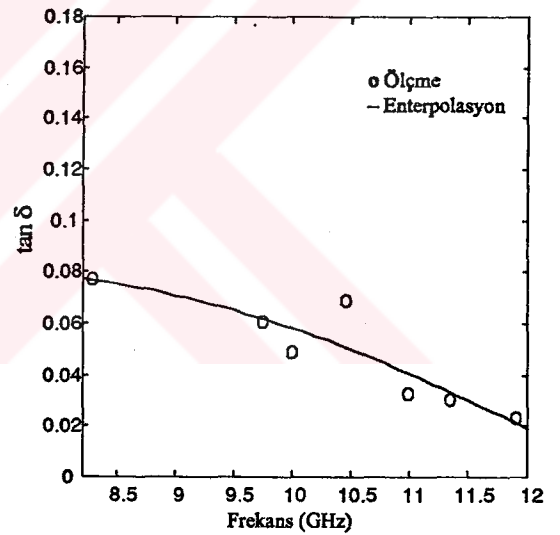


(b)

Şekil 5.8 280.1U silikon numünesi (a) dielektrik sabiti ve (b) kayıp faktörünün ölçülen değerleri ve enterpolasyon eğrileri.



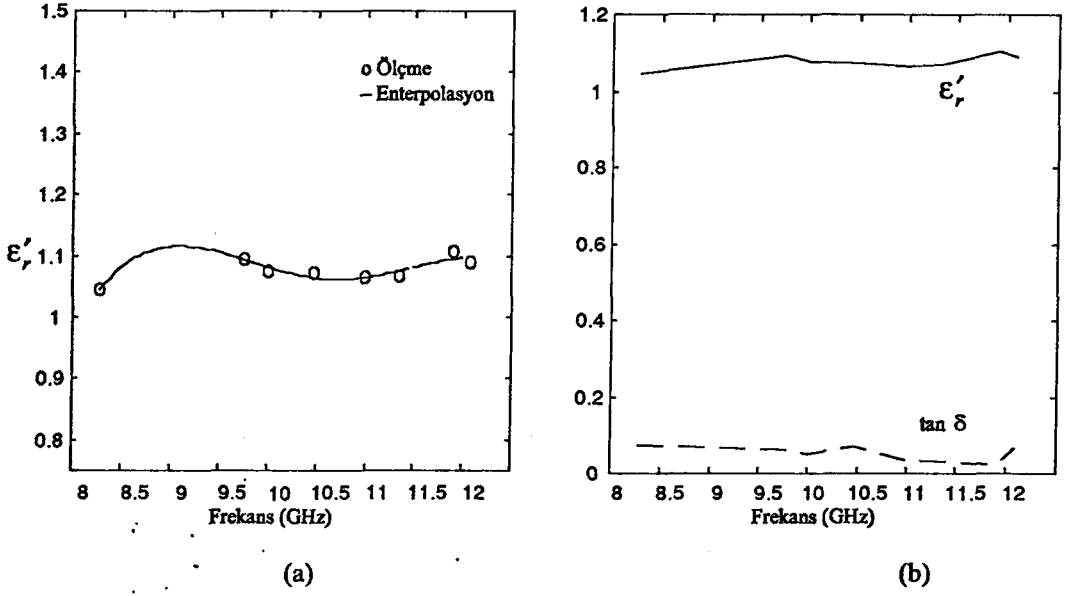
(a)



(b)

Şekil 5.9 MF160.1U Silikon numünesinin dielektrik sabiti (a) ve kayıp faktörünün (b) ölçülen değerleri ve enterpolasyon eğrileri.

Bu üç silikonun hesaplanan dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekansla değişen eğrilerinden görülüyor ki değişim olarak hepsi yaklaşıklikle birbirine benzemektedir. Aralarında var olan küçük farklılıklarda ise silikonun içerisine katılan katkı maddelerinin etkisi vardır. Ayrıca dielektrik sabitinin bir civarında değişmesi ve kayıp faktörünün de düşük olmasından dolayı silikonu transparan bir malzeme olarak kabul edebiliriz.



**Şekil 5.10** 60TAT Silikon numünesi Dielektrik sabiti eğrileri (a) ve Kayıp faktörünün (b) ölçülen değerleri ve enterpolasyon eğrileri.

Sonuçta, silikon malzemeler, dielektrik sabitlerinin bir'e yakın olması ve kayıp faktörünün küçük olmasından dolayı mikrodalga ışımasında etkilenmediği görülmektedir. Silikonun içerisine katılan katkı maddeleri dielektrik özellikler üzerinde mikrodalga frekanslarında önemli rol oynamaktadır.

## 6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Gıda maddeleri, tarım ürünleri ve endüstriyel materyallerin (tekstil, kağıt, lastik, ilaç, seramik ..) radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) gibi yeni tekniklerle işlenmesi (kurutma, pişirme, haşlama, nemini azaltma, dezenfekte etme, polimerize etme volkanize etme,...) veya materyallerin nemlilik, kalite kontrol gibi faktörlerin tayin edilebilmesi için dielektrik özelliklerinin ( $\epsilon_r'$  ve  $\tan \delta$ ) ve bunların çevre şartlarıyla (sıcaklık, nem, basınç,...) değişiminin bilinmesi gerekmektedir.

Günümüzde, ileri endüstrilerin bir çok uygulamalarında ve tıpta bazı hastalıkların (kanser ve diaterapi gibi) tedavisinde yüksek ve çok yüksek frekanslı elektromagnetik dalgalar geniş ölçüde kullanılmakta ve bir çok düzenek ve cihaz endüstrileştirilmiş bulunmaktadır. Elektromagnetik enerji kullanılmasının çeşitli üstünlükleri yanında, optimum şartlarda klasik enerji sistemlerine (sıcak hava, infraruj, sıcak buhar ...) nazaran enerji ve zaman tasarrufu elde edilmesi bu konudaki çalışmaların önemini daha da arttırmıştır.

Pratikte kullanılan malzemeler genellikle tam olarak homogen değildir. Bu nedenle malzemeye elektriksel alan uygulandığında alanda önemli değişiklikler olur. İçinde homogen olmayan dielektrikler bulunan bir hacimdeki elektromagnetik dalga yayılımı dielektrik sabitine bağlı olarak değişir. Çeşitli dielektriklerin karışımları veya farklı dielektrik malzemelerin yanyana gelmesiyle oluşturulan homogen olmayan ortamların dielektrik sabitinin bilinmesi ve bunun elektromagnetik alan değerlerine göre değişiminin tayin edilmesi sayesinde, bu ortamlardaki elektromagnetik dalgaların yayılma özelliklerinden yararlanarak mikrodalga tekniğinde kullanılan yeni eleman ve düzenlerin gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır.

Tüm bu sebeplerden dolayı yüksek frekanslarda dielektrik özelliklerin ölçülmesi konusunda yapılan bu çalışmada, dielektrik malzemelerin yüksek frekanslı elektromagnetik alan altındaki davranışları ve buna bağlı olarak bazı endüstriyel malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon_r'$ ) ve kayıp faktörü ( $\tan \delta$ ) frekansa bağlı olarak ölçülmüştür.

Dielektrik sabitinin ölçülmesi için kullanılan teknikler; iletme, yansımaya ve rezonansa bağlı olarak üç ana grupta ele alınmıştır. İletime dayalı teknikler katı ve sıvı dielektriklerin ölçülebilmesi için sıkça kullanılan tekniklerden biridir. Ancak ölçülecek dielektriklerin ölçmelerde kullanılan dikdörtgen veya koaksiyel dalgakılavuzlarına göre



üretilmesi ve yerleştirilmesi zordur. Bununla beraber, dalgakılavuzuna yerleştirilen örnek madde ile dalgakılavuzu duvarları arasında kalan hava boşlukları ölçme sonuçlarında hatalar meydana gelmesine neden olmaktadır. Bütün bu etkilere rağmen iletme dayalı teknikler dielektrik sabitini, diğer tekniklere göre daha doğru ve hassas şekilde ölçtükleri görülmüştür.

Yansımaya dayalı tekniklerden kısa devre ve koaksiyel prob tekniği en yaygın olarak kullanılmaktadır. Koaksiyel prob tekniği geniş bir frekans aralığında ölçme imkanı sağlamaktadır. Bu teknik düşük kayıplı sıvı ve yarı katı dielektriklerin ölçülmesinde doğru sonuçlar verdiği yapılan deneyler sonucunda görülmüştür. Rezonansa dayalı teknikler ise düşük kayıplı ve küçük boyutlu dielektrik ölçmelerinde hassas ölçme imkanı sağlamaktadır. Buna rağmen elde edilen sonuç tek bir frekansta olmakta ve rezonatörün imalatı ve kullanımı zor olduğundan yalnızca çok hassas ölçme istenen sıvı ve katı dielektrikler için kullanılmaktadır.

Ölçmeler yapılırken çevre şartları (sıcaklık, nemlilik, basınç,...) yüzünden bazı sorunlarla karşılaşmaktadır. Özellikle mikrodalgalarda bu sorunlar iyice artmakta ve yapılan ölçmelerde yanlışlıklara sebep olmaktadır. Ölçme işlemine başlamadan önce sistemin kalibrasyonu tam yapılırsa bile çevre şartlarından doğan hatalar giderilemez. İyi ölçme yapmak istememize rağmen ne yaparsak yapalım bazı hataların önüne geçemeyiz. Yapacağımız şey hataları en aza indirecek ve istediğimiz sonucu doğru bir şekilde elde etmemizi sağlayacak metodu seçip kullanmaktır.

Bu çalışmada, bir endüstriyel malzeme olan, tekstil, kağıt ve deterjan sanayinde beyazlatıcı ve yumuşatıcı olarak kullanılan FBA numunesi ile kablo sanayinde yalıtıcı olarak kullanılan değişik tipte silikon numunelerinin dielektrik sabiti ve kayıp faktörleri farklı frekans aralıklarında ölçülmüştür. FBA, görülebilir spektrumun ultra-viyole bölgesinde soğuran ve mavi-viyole ışık yayan (kuvvetli FBA) kimyasal bir maddedir. Ölçmelerde, %40 nemlilikte ve yapışkan formda olan FBA maddesi kullanılmıştır. Silikon ise, yüksek dielektrik mukavemeti, dielektrik yorulmaya dayanımı, düşük güç tüketim katsayısı, düşük dielektrik sabiti ve çok yüksek ark direncine sahip olması nedeniyle en zor koşullarda dahi, uzun vadeli güvenilirlik sağlayan bir yalıtıcı malzemedir. Ölçmelerde, yumuşak formdaki 280.1U, MF160.1U ve 60TAT silikon numüneleri kullanılmıştır.

Yapılan deneylerde, literatürde de pek çok araştırmacının çoğunlukla kullandığı yansımaya dayalı ölçme tekniği olan ve literatürde Staebell ve Misra 'nın da kullandığı koaksiyel prob tekniği ele alınmıştır (Staebell ve Misra 1990). FBA numunesinin



dielektrik sabiti ve kayıp faktörü, 500MHz-3GHz frekans aralığında koaksiyel prop ve bir network analizör kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen yansıma katsayılarından, statik-gibi yaklaşım kullanılarak 500MHz-3GHz frekans aralığında FBA 'nın dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı frekansa bağlı olarak elde edilmiştir.

FBA numunesiyle yapılan deneyler sonucunda, kimyasal karışım bileşenlerinin polaritesiyle mikrodalga ışına absorbe edilmesinin etkilendiği ve FBA maddesi içinde çözücü sıvılar olduğunda mikrodalga ışımadan büyük ölçüde etkilendiği, aksi halde tepki göstermediği görülmüştür. FBA 'nın kayıp faktörünün büyük olmasından dolayı kayıp faktörüyle orantılı olarak mikrodalga enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşür. Bundan dolayı, mikrodalga ısıtmadan kimyasal ve biyokimyasal analiz aracı olarak yararlanmak, onunla kimyasal bileşiklerin dielektrik davranışlarını doğru biçimde ortaya koymak mümkündür.

Bir dielektrik malzemenin yüksek frekanslı bir elektromagnetik alanda bulunması halinde kayıp faktörüyle ( $\epsilon_r''$ ) orantılı olarak bir enerji ısıya dönüşür. Yani, dielektrik malzeme olan FBA 'nın çok yüksek frekanslı elektromagnetik alan (MW frekansları) içinde dielektriksel kayıplarla kurutulması mümkündür. Bununla birlikte, mikrodalga ısıtma, bilhassa kimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkan sıcaklıkla etkilenen, kimyasal olaylarda önemli yer teşkil eder. Mikrodalga ısıtmadan, kimyasal ve biyokimyasal analiz aracı olarak yararlanmak, onunla kimyasal bileşiklerin dielektrik davranışlarını doğru biçimde ortaya koymak ve mikrodalga saçılma etkilerini karakterize etmek mümkündür. Kimyasal maddelerin elektromanyetik özelliklerini incelemek için, mikrodalga ısıtmaya bağlı ölçülen sanal dielektrik sabitinin kullanışlı bir şekle dönüştürülmesi gerekir.

Silikon numunelerinin dielektrik özellikleri ise, 8.2-12.4GHz frekans aralığında kısadevre yöntemi (Roberts ve Von Hippel yöntemi) kullanılarak yapılır (Von Hippel 1954). Transmisyon hat veya dalgakılavuzu metodları içerisinde incelenen kısa devre yöntemi veya Von Hippel metodunda malzeme, dalgakılavuzunun sonunda yer almaktadır ve sonu kısa devre edilmiştir. Bu yüzden tek kapılı bir sistem olarak ele alınarak yansıma katsayısı ölçülmüştür.

Yapılan deneyler sonucunda, silikon malzemelerin dielektrik sabitlerinin bire yakın olduğu ve kayıp faktörlerinin küçük olmasından dolayı mikrodalga ışımadan etkilenmediği görülmüştür. Sonuç olarak, silikonu transparan bir malzeme olarak kabul edebiliriz. Bu nedenle de radarlarda ve uzay teknolojisinde kullanılabilir.

Özellikleri bilinmeyen pek çok materyalin permittivitesi, geniş bir frekans aralığında koaksiyel prob tekniği kullanılarak elde edilebilir. Bu teknik, network analizöre bağlı olan koaksiyel probu içeren sistemi kullanır. Deney sonuçlarının doğruluğu açısından, sistemin ön kalibrasyonu büyük önem arzeder.

FBA 'ı kurutma işleminde, mikrodalga enerjisinin etkisini anlamak için, kurutma işlemini süresince değerlendirmeye alınan bu heterojen karışımın sanal dielektrik sabitini (permittivitesini) bilmek zorundayız.

Silikon kayıp faktörünün düşük olması, dielektrik sabitinin bire yakın olması nedeniyle radarlarda ve uzay teknolojisinde; ek bazı kimyasal özelliklerinin etkisiyle uçak, v.b araçlarda sürtünmeden etkilenen kısımların korunmasında önemli görevler gerçekleştirebilir. İlerde gözönünde bulundurulması gereken özelliklerden birisi de yüksek frekanslarda kullanılacak malzemelerin homojenliklerinin iyi olmasıdır. Ortalama hacimleri frekans spektrumunun üst sınırındaki dalga boyları ile karşılaştırılabilen malzemeler çeşitli yapı bozuklukları içerir.

## KAYNAKLAR

1. Afsar, M. N., J. R. Birch ve R. N. Clarke. 1986. The Measurements of the Properties of Materials. IEEE Proc. vol.74. Jan. 183-199 s.
2. Akman, A., A. Oktay ve K. Göver. 1995. X Bandında Kısa Devre Yöntemiyle Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi. Elektrik Müh. 6. Ulusal Kongresi. C.2 Bursa. 668-671 s.
3. Akyel, C. ve R.G. Bosisio. 1989. New Developments on Automated-Active Circuits for Permittivity Measurements at Microwave Frequencies. IEEE IM.38-2. 496-504 s.
4. Altschuler, H.M. 1963 Dielectric Constant. in Handbook of Microwave Measurements, vol. II. Brookline, NY. Polytechnic Press.
5. Bianco, B., G.P. Dragon, M. Marchesi, C. Martino ve S. Ridella, 1979. Measurements of Complex Dielectric Constant of Human Sera and Erythrocytes. Microwave Power Symposium, 33 - 35 s.
6. Burdetto, E.C., F.L. Cain ve J. Seals. 1980. In Vivo Measurement Technique for Determining Dielectric Properties at VHF Through Microwave Frequencies. IEEE MTT. Vol.28. No.4. 414-427 s.
7. Bussey, H.E. 1980. Dielectric Measurements in a Shielded Open Circuit Coaxial Line. IEEE IM. Vol.29. No.2. 120-124 s.
8. Caralp, F. ve M. Merabet. 1993. Dielectric Relaxation Process Mechanisms in Aqueous Solutions of 1-Propanol. Proceedings, International Conference on Microwave and High Frequency , 28 - 30 September, Goteborg, Sweden.
9. Chamberlain, J. ve G.W.Chantry.1972. High Frequency Dielectric Measurement. National Physical Laboratory, UK. 146 s.
10. Colclaser, R.A. 1985. Materials and Devices. Mc-Graw Hill. Singapore.
11. Cook, R.J. 1973. Microwave Cavity Methods in High Frequency Dielectric Measurements. IPC Science and Technology Press Ltd. New York. 12-27 s.
12. Dekker, A.J. 1967. Electrical Engineering Materials.Prentice-Hall, Inc.,USA.24-73 s.
13. Engelder, D.S. ve C.R. Buffler, 1991. Measuring Dielectric Properties of Food Product at Microwave Frequencies. Microwave World, Vol.12, No.2. 6-15 s.
14. Fan, S., K. Staebell ve D. Misra. 1990. Static Analysis of an Open-Ended Coaxial Line Terminated by Layered Media. IEEE IM. Vol.39. No.2. 435-437 s.
15. Gajda, G.B. ve S.S. Stochly. 1983. Numerical Analysis of Open-Ended Coaxial Lines. IEEE MTT. Vol.31. No.5.380-384 s.
16. Jordan, E.C. 1974. Electromagnetic Waves and Radiating Systems. Prentice-Hall. 277-306 s. USA

17. Ganchev, S.I., S. Bakhtiari ve R. Zoughi. 1992. A Novel Numerical Technique for Dielectric Measurement of Generally Lossy Dielectrics. IEEE Trans. Instrum. Meas. vol.41. Jun. 361-364 s.
18. Ganchev, S.I., J.S. Bhattacharyya, N. Bakhtiari, D. Qaddoumi, R. Brandenburg ve Zoughi. 1994. Microwave Diagnosis of Rubber Compounds. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. vol.42, Jan. 18-23 s.
19. Grant, J.P., R.N. Clarke, G.T. Symm ve N.M. Spyrou. 1989. A Critical Study of The Open-Ended Coaxial Line Sensor Technique for RF and Microwave Complex Permittivity Measurements. J. Phys. E: Sci. Instr. 22. UK. 757-770 s.
20. Hasted, J. B. 1973. Studies in Chemical Physics. Chapman and Hall. London.
21. Henry, F. ve A. J. Berteaud. 1980. New Measurement Technique for The Dielectric Study of Solutions and Suspensions. Journal of Microwave Power, 15(4), 233 - 242 s.
22. Kete, R. Mesure des Caracteristiques des Materiaux a L'aide de Guide D'ondes.
23. Kip, A.F. 1969. Fundamentals of Electricity and Magnetism. McGraw-Hill. 124-155s.
24. Marsland, T.P. ve S. Evans. 1987. Dielectric Measurements with an Open-Ended Coaxial Probe. IEE Proc. Vol.134. No.4. 341-349 s.
25. Metaxas, A.C. ve R.J. Meredith. 1983. Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd. London. 5-66 s.
26. Misra, D. K. 1987. A Quasi-Static Analysis of Open-Ended Coaxial Lines. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques. Vol. MTT -35, NO.10, October, 925 - 928 s.
27. Montgomery, C. G. 1974. Technique of Microwave Measurements. McGraw Hill. s.560-650
28. Mosig, J.R., J.E. Besson, M. Gex-Fabry ve F.E. Gardiol. 1981. Reflection of an Open-Ended Coaxial Line and Application to Nondestructive Measurement of Materials. IEEE IM Vol.30. No.1. 46-51 s.
29. Nicolson, A.M. ve G.F. Ross. 1970. Measurement of Intrinsic Properties Materials by Time Domain Techniques. IEEE Trans. Instr. Meas. Vol.19. 377-382 s.
30. Oktay, A. 1980. Çayın Kurutulmasında Mikrodalga Enerjisinin Kullanılması ve Bir Mikrodalga Fırının Geliştirilmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi. Doçentlik Tezi.
31. Oktay, A. 1987. Elektrik Alanı Yardımıyla Dielektrik Sabiti Profilinin Tayini için Bir Metod. Elektrik Mühendisliği II. Ulusal Kongresi. 280- 283 s.
32. Oktay, A. 1993. Microwave Dielectric Properties of the Fresh Cocoon of the Silkworms. 28th Microwave Symposium Proc. July 11-14. 206-211 s. Montreal, Canada.
33. Oktay, A. ve K. Göver. 1995. Dielectric Properties of Fluorescent Brightening Agents. MW & HF International Conference. s. N.6.1-N.6.4. Cambridge. UK.

34. Oktay, A., K. Göver ve A. Akman. 1995. Polimerlerin Mikrodalga Mikrodalga Frekanslarında Dielektrik Özelliklerinin Tayini. Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi. cilt 2. 664-667 s. Bursa.
35. Park, A. ve A. Dominek. 1992. Parameter De-Embedding Accuracy Dependency Upon Material Sample Dimensions. IEEE MTT Vol.40. No.8. 1674-1680 s.
36. Roussy. 1991. Propriétés Dielectrique des Matériaux. Congres International des Micro-Ondes et Houtes Frequences, 8-10 October, Nice.
37. Seaman, R.L., E.C. Burdette ve R.L. Dehaan. 1989. Open-Ended Coaxial Exposure Device for Applying RF/Microwave Fields to Very Small Biological Preparations. IEEE Trans. MTT Vol.37. No.1. 102-111 s.
38. Staebell, K. F. ve D. K. Misra. 1990. An Experimental Technique for in vivo Permittivity Measurement of Materials at Microwave Mrecuencies. IEEE Transaction on Microwave Theory Technique, Vol. MTT-38, NO. 3, March, 337 - 340 s.
39. Stuchly, S.S., M.A. Stuchly ve B. Carraro. 1978. Permittivity Measurements in a Resonator Terminated by an Infinite Sample. IEEE IM Vol.27. No.4. 436-439 s.
40. Stuchly, S.S. ve M.A. Stuchly. 1980. Coaxial Line Reflection Methods for Measuring Dielektric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies-A Review. IEEE IM. Vol.29. No. 3. 176-183 s.
41. Stuchly, S.S., M.A. Stuchly, M.M. Bradly ve G. Gajda. 1982. Equivalent Circuit of an Open-Ended Coaxial Line in a Lossy Dielectric. IEEE IM. Vol.31. No.2. 116-119 s.
42. Stuchly, M.A., T.W. Athey, G.M. Samaras ve G.E. Taylor. 1982. Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part II-Experimental Results. IEEE MTT. Vol.30. No.1. 87-92 s.
43. Stuchly, S.S. ve M.A. Stuchly. 1984. Permittivity of Mammalian Tissues in vivo and in vitro Advances in Experimental Techniques and Recent Results. Int. J. Electronics. vol. 56. No. 4. 443-456 s.
44. Tanabe, E. ve W.T. Joines. 1976. A Nondestructive Method for Measuring the Complex Permittivity of Dielectric Materials at Microwave Frequencies Using an Open Transmission line Resonator. IEEE IM. Vol.25. No. 3. 222-226 s.
45. Von Hippel, A.R. 1954. Dielectric Materials and Applications. MIT press. Cambridge, MA.
46. Weir, W.B. 1974. Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies. Proc. IEEE 62(1). 33-36 s.
47. Xu, Y., R.G. Bosisio ve T.K. Bose. 1991. Some Calculation Methods and Universal Diagrams for Measurement of Dielectric Constants Using Open-Ended Probes. IEE Proc. Vol. 138. No.4. 356-360 s.

## TEŐEKKÖR

Yüksek Lisans Eđitimim süresince bana yardımcı olan hocam sayın Prof. Dr. Ali Oktay 'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, maddi ve manevi olarak beni her konuda destekleyen Annem 'e, Babam 'a, Kardeşim 'e ve arkadaşım Ali Akman 'a da teşekkürü bir borç bilirim.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Kayhan Göver, 1972 yılında Konya 'nın Çumra ilçesinde doğdu. İlkokulu burada, Ortaokulu ve liseyi Konya 'da tamamladı. 1989 yılında, Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1993 yılında, aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans Eğitimine başladı ve aynı yıl içinde Mühendislik Mimarlık Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı göreve devam etmektedir.