

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

**MALZEMELERİN KOMPLEKS DİELEKTRİK
KATSAYILARININ DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aysun SAYINTI

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr.Yılmaz GÜNEY

Nisan 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

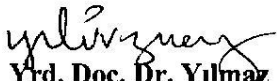
**MALZEMELERİN KOMPLEKS DİELEKTRİK
KATSAYILARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Aysun SAYINTI

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 29/04/2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Yrd. Doç. Dr. Yılmaz
GÜNEY
Jüri Başkanı


Prof. Dr. İbrahim
OKUR
Üye


Doç. Dr. Bahattin
TÜRETKEN
Üye

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitiminin tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Yılmaz Güney'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasındaki yardımlarından dolayı sayın Doç Dr. Bahattin TÜRETKEN'e ve Dr. Erkul BAŐARAN'a teşekkür ederim.

Çalışmama yaptığı katkılarından dolayı proje ve laboratuvar yöneticim sayın Prof. Dr. Alex VERTY'e, iş arkadaşlarıma ve aramızdan ayrılmış olan Sayın Dr. Sergiy GAVRILOV'a teşekkür ederim.

Manevi destekleri ile hep yanımda olan sevgili aileme, ağabeyim sayın Cihan ÇEVİRME'ye ve hep yanımda olan sevgili eşim Abdullah Bayhan SAYINTI'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. MAXWELL DENKLEMLERİ	3
BÖLÜM 3. S PARAMETRELERİ	9
3.1 . S Parametrelerinin Tanımlanması	11
3.2 . Dikdörtgen Dalga Kılavuzu	13
3.3 . Elektromanyetik Dalgaların Dalga Kılavuzunda Yayılması	14
1.1. Dalga Kılavuzunda TE Modunda Yayılan Dalgalar	16
BÖLÜM 4. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	20
4.1 . Serbest Alan Yöntemi	20
4.2 . Koaksiyel Uç Yöntemi	22
4.3 . İletim Hattı Yöntemi	23
4.4 . Rezonatör Yöntemi.....	26
4.5 . Admitans Tüneli Yöntemi.....	28
4.6 . Geçiş/Yansıma Yöntemi	28
BÖLÜM 5. ÖLÇÜM DÜZENEGİ VE ÖLÇÜM YAPILMASI	30
BÖLÜM 6. HESAPLAMA METOLARI	33
6.1 . Nicolson Ross Weir Yöntemi	33
6.2 . Etkin Yöntem (NIST).....	34

6.3 . Dalga Kılavuzu Yöntem.....	35
BÖLÜM 7. SONUÇLAR.....	42
7.1 . X-Band Frekansı Dielektrik Katsayısı Sonuçları	43
7.2 . Ku-Band Frekansı Dielektrik Katsayısı	49
7.3 . P Band frekansı dielektrik katsayısı	53
7.4 . X-Band Benzetim Sonuçları	55
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82
EKLER	83
Ek A	84
Ek B	85
Ek C	87

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Δ	: Del operatörü
E	: Elektrik alan
H	: Manyetik alan
NRW	: Nicolson-Ross Weir Yöntemi
ϵ_r	: Kompleks dielektrik katsayısı
ϵ_0	: Havanın dielektrik katsayısı
μ	: Manyetik geçirgenlik katsayısı
μ_0	: Havanın manyetik geçirgenlik katsayısı
T	: Zaman
Z	: Empedans
A	: Dalga kılavuzunun geniş kenar uzunluğu
B	: Dalga Kılavuzunun dar kenar uzunluğu
I	: Akım
V	: Gerilim
L	: Malzemenin kalınlığı
λ	: Dalga boyu
ϵ_r'	: Kompleks dielektrik katsayısının gerçel kısmı
ϵ_r''	: Kompleks dielektrik katsayısının sanal kısmı
Imj.	: Sanal
γ	: Yayılım sabiti
γ_0	: Havanın yayılım sabiti
T	: İletim katsayısı
Γ	: Yansımaya katsayısı
Φ	: Akı
E	: Elektro Motor Kuvvet(EMK)
TE	: Enine Elektrik (Transverse Electric)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Pozitif noktasal bir yükün elektrik alan çizgileri	4
Şekil 2.2.	Birbirine çok yakın pozitif ve negatif yük sisteminin elektrik alan çizgileri	4
Şekil 3.1.	İki portlu devrenin S- parametrelerinin belirlenmesi.....	9
Şekil 3.2.	İki portlu devrenin S- parametrelerinin belirlenmesi.....	11
Şekil 3.3.	İki kapılı bir devrede S parametresinin tanımı [12]	12
Şekil 3.4.	Dikdörtgen kesitli bir dalga kılavuzu.....	13
Şekil 3.5.	Dalga kılavuzunun, $\lambda/4$ uzunluklu kısa devre parçalarından meydana gelişi.....	14
Şekil 3.6.	Elektrik alan dalga yayılımı.....	15
Şekil 3.7.	Dalga kılavuzundaki elektrik alan.....	15
Şekil 3.8.	Bir dalga kılavuzunda H_{10} - modu yürüten dalgalar.	15
Şekil 3.9.	Dalga kılavuzundaki manyetik alan (anlık üst görünüş)	16
Şekil 4.1.	Paralel Plaka yöntemi	21
Şekil 4.2.	Koaksiyel Uç Yöntemiyle külçe (bulk) örneğin karakterizasyonu.	23
Şekil 4.3.	Dalga kılavuzu içindeki duran dalga örneğinin (a) Kısa devre, (b) Açık, (c) Sınırlı empedans katmanı ile sonlandırılması.....	24
Şekil 4.4.	İletim hattı ölçüm diyagramı.	25
Şekil 4.5.	Dalga Kılavuzu Sistemi.	28
Şekil 5.1.	X-Band ölçüm düzeneği	30
Şekil 7.	1. 2 mm Teflon örneğin X-band frekansında (a), (b) gerçel ve sanal kısımları	44
Şekil 7.2.	10 mm Polietilen örneğin X-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları	45
Şekil 7.3.	2 mm Pleksiglas örneğin X-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.	46
Şekil 7.4.	2 mm Kestamid örneğin X-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.	47

Şekil 7.5.	10mm Teflon örneğın X-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.....	48
Şekil 7.6.	1 mm teflon örneğın Ku-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları.....	50
Şekil 7.7.	2 mm Polietilen örneğın Ku-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.....	51
Şekil 7.8.	2 mm Kestamid örneğın Ku-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları.....	52
Şekil 7.9.	1 ve 2 mm kalınlıkta teflon örneğın P-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.....	53
Şekil 7.10.	4 ve 8 mm kalınlıkta Kestamid örneğın P-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları.....	54
Şekil 7.11.	2mm Teflon örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 7.12.	2mm Teflon örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	55
Şekil 7.13.	2 mm Teflon örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Şekil 7.14.	2 mm Teflon örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Şekil 7.15.	10 mm Teflon örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.16.	10 mm Teflon örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.17.	10 mm Teflon örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 7.18.	10 mm Teflon örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 7.19.	18 mm Teflon örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 7.20.	18 mm Teflon örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	59

Şekil 7.21.	18 mm Teflon örneğın S ₂₁ Lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	60
Şekil 7.22.	18 mm Teflon örneğın S ₂₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	60
Şekil 7.31.	2 mm Polietilen örneğın S ₁₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	61
Şekil 7.32.	2 mm Polietilen örneğın S ₁₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	61
Şekil 7.33.	2 mm Polietilen örneğın S ₂₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	62
Şekil 7.34.	2 mm Polietilen örneğın S ₂₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	62
Şekil 7.35.	10 mm Polietilen örneğın S ₁₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	63
Şekil 7.36.	10 mm Polietilen örneğın S ₁₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	63
Şekil 7.37.	10 mm Polietilen örneğın S ₂₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	64
Şekil 7.38.	10 mm Polietilen örneğın S ₂₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	64
Şekil 7.39.	18 mm Polietilen örneğın S ₁₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	65
Şekil 7.40.	18 mm Polietilen örneğın S ₁₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	65
Şekil 7.41.	18 mm Polietilen örneğın S ₂₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	66
Şekil 7.42.	18 mm Polietilen örneğın S ₂₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	66
Şekil 7.43.	2 mm Pleksiglas örneğın S ₁₁ lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	67
Şekil 7.44.	2 mm Pleksiglas örneğın S ₁₁ faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	67

Şekil 7.45.	2 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	68
Şekil 7.46.	2 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	68
Şekil 7.47.	10 mm Pleksiglas örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	69
Şekil 7.48.	10 mm Pleksiglas örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	69
Şekil 7.49.	10 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	70
Şekil 7.50.	10 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	70
Şekil 7.51.	18 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	71
Şekil 7.52.	18 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	71
Şekil 7.53.	18 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	72
Şekil 7.54.	18 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	72
Şekil 7.63.	2 mm Kestamid örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	73
Şekil 7.64.	2 mm Kestamid örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	73
Şekil 7.65.	2 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	74
Şekil 7.66.	2 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	74
Şekil 7.67.	10 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	75
Şekil 7.68.	10 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	75

Şekil 7.69.	10 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	76
Şekil 7.70.	10 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	76
Şekil 7.71.	18 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	77
Şekil 7.72.	18 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	77
Şekil 7.73.	18 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	78
Şekil 7.74.	18 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	78
Ek A.1.	X band frekansı ölçüm düzeneğının teknik çizimi.....	84
Ek C.1.	30 mm Teflon örneğın S_{11} Lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	87
Ek C.2.	30 mm Teflon örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	88
Ek C.3.	30 mm Teflon örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	88
Ek C.4.	30 mm Teflon örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	89
Ek C.5.	50 mm Teflon örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	89
Ek C.6.	50 mm Teflon örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	90
Ek C.7.	50 mm Teflon örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	90
Ek C.8.	50 mm Teflon örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	91
Ek C.9.	30 mm Pleksiglas örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	91
Ek C.10.	30 mm Pleksiglas örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	92

Ek C.11.	30 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	92
Ek C.12.	30 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	93
Ek C.13.	50 mm Pleksiglas örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	93
Ek C.14.	50 mm Pleksiglas örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	94
Ek C.15.	50 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	94
Ek C.16.	50 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	95
Ek C.17.	30 mm Kestamid örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	95
Ek C.18.	30 mm Kestamid örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	96
Ek C.19.	30 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	96
Ek C.20.	30 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	97
Ek C.21.	50 mm Kestamid örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	97
Ek C.22.	50 mm Kestamid örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	98
Ek C.23.	50 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	98
Ek C.24.	50 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	99

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Elekrostatik ve manyostatik yöntem denklemleri	6
Tablo 5.2.	Frekans bandlarına ve standart dalga kılavuzlarına ait bilgiler.	32
Tablo 6.1.	Yöntemlere göre örnek kalınlıkları	40

ÖZET

Anahtar kelimeler: Kompleks dielektrik katsayısı, S parametreleri, dalga kılavuzu yöntemi, Geçiş/Yansıma ölçümleri

Bu çalışmada kompleks dielektrik geçirgenlik katsayısının deneysel incelenmesinin yanı sıra 1970'ten başlayarak günümüze kadar devam eden tarihi süreci de araştırılmıştır. Bu çalışmalar mühendislik ve araştırma uygulamalarında malzemelerin mikroskobik ve makroskobik ölçümlerini sağlamıştır. Bu sayede elektromanyetik malzemelerin özellikleri, dielektrik malzemeler, yarı iletkenler, iletkenler, manyetik malzemeler ve birleştirilmiş malzemeler ile ilgili bilgi edinilmiştir

Kompleks dielektrik geçirgenlik katsayısını hesaplayan yöntem 1970 yılında Nicolson Ross tarafından çalışılmış ve 1974 yılında Weir tarafından birleştirilmiştir. Bu nedenle Nicolson Ross Weir Yöntemi olarak bilinir. 1997 Boughriet ve arkadaşları tarafından NRW Yöntemindeki belirsizlikler belli bir sınıra çekilerek Etkin Yöntem oluşturulmuştur.

Çalışmanın ilk bölümünde S parametreleri ve dalga kılavuzu ile ilgili genel bilgi verilmiştir (Bölüm 2). Çalışmanın bir sonraki bölümünde farklı ölçüm yöntemleri ile ilgili genel bilgi verilmiştir (Bölüm 3).

Bu çalışmada NRW ve Etkin Yöntem kullanılarak az kayıplı sınırlı kalınlıktaki malzemeler incelenmiştir. NRW yöntemin algoritmaları kullanılarak az ve çok kayıplı malzemelerin kompleks dielektrik katsayılarını hesaplayan Türkiye Ukrayna Ortak Araştırma Laboratuvarı'nda, Sergiy GAVRİLOV tarafından geliştirilen ' Dalga Kılavuzu Yöntemi' ile bir uygulama yapılmıştır, sonuçlar yorumlanarak gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY COEFFICIENT

SUMMARY

Keywords: Complex dielectric coefficient, S parameters, wave guide method, transmission/reflection measurements

In this study, experimental analysis of complex dielectric permittivity coefficient and its historical process since 1970 are investigated. These efforts provided microscopic and macroscopic measurements of materials in engineering and research areas. Further information procured about the properties of electromagnetic materials, dielectric materials, semi-conductors, conductors, magnetic materials and compound materials are based on these studies and researches.

A method calculates complex dielectric permittivity coefficient studied by Nicolson Ross in 1970 and combined by Weir in 1974. This method is known as Nicolson Ross Weir (NRW) method. Effective Method has been defined by Boughriet and his friends with pulling back the ambiguities in NRW method to a certain level.

In the first part of the study, general information about S Parameters and Wave Guides are provided (Section 2). These are the stones of the system's principles and calculation methods. In the second part of the study, general information about different measurement systems is given (Section 3).

This study is done with “Wave Guide Method”, NRW Algorithm and Effective method, using the Transmission/Reflection measurement results. Results are interpreted and future works are investigated.

Low-loss limited-gravity materials wave analysed by using NRW Method and the “Wave Guide Method” developed by Sergiy GAVRILOV in Turkey – Ukraine Joint Research Laboratory, using NRW algorithms, which calculates dielectric coefficients of low-high loss materials.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu çalışmanın ilk kısmında (Bölüm.2) temel fizik denklemi olan Maxwell denklemleri ile ilgili kısa bilgi verilmiştir. 3. bölümde ise S parametreleri ile dalga kılavuzları hakkında genel bilgi verilmiştir. Bu bilgiler kompleks dielektrik katsayısının hesaplanmasının temelini oluştururlar.

Tezin bir sonraki aşamasında (Bölüm.4)) bazı ölçüm yöntemlerine kısaca değinilmiştir. Bu çalışmada Geçiş/Yansıma ölçüm yönteminden olan Dalga Kılavuzu Yöntemi incelenmiştir.

5. Bölümde Dalga Kılavuzu ölçüm yönteminin hesaplama yöntemleri verilmiştir. üç ayrı hesaplama yöntemi ile kompleks dielektrik geçirgenlik katsayısı incelenmiştir. Bunlardan birincisi NRW Yöntemi, ikincisi Etkin Yöntem, üçüncüsü ise yeni bir uygulama olan Dalga Kılavuzu Yöntemi'dir. Bu çalışmada katı ve az kayıplı malzemeler NRW ve Etkin Yöntemle hesaplanmıştır. Yüksek kayıplı ve manyetik malzemelerin dielektrik katsayılarının hesaplandığı Dalga Kılavuzu hesaplama algoritması Türkiye Ukrayna Ortak Araştırma Laboratuvarında, Sergiy GAVRILOV tarafından geliştirilmiştir.

Az kayıplı, sınırlı kalınlıktaki malzemelerin ölçüm sonuçları NRW ve Etkin Yöntemi kullanılarak Matlab Programında hazırlanan kod ile hesaplanmıştır. Yüksek kayıplı ve kalın malzemelerin ölçüm sonuçlarını hesaplayan Dalga kılavuzu yöntemi için Sergiy GAVRILOV tarafından Fortran programında bir kod hazırlanmıştır. Sonuçlar Matlab Programı ile çizdirilmiştir.

6. Bölümde ölçüm düzeneği ve ölçüm yapılması ile ilgili bilgi verilmiştir.

Son bölümde ise (Bölüm.7) 5. Bölümde çizdirilen Kompleks dielektrik katsayısı grafikleri yorumlanmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen kompleks dielektrik katsayısının gerçel değeri “CST Computer Simulation Technology-Mikrodalga uygulamaları” hazır paket programında çizilen düzenekte oluşturulan sanal malzeme için veri parametreleri olarak girilip, bu değer s parametreleri hesaplamada kullanılmışlardır. Hesaplama sonucunda elde edilen s parametreleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonuçları Matlab Programında çizilerek bu bölüme ilave edilmiştir. Bu bölümün sonunda gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

BÖLÜM 2. MAXWELL DENKLEMLERİ

Genel olarak Maxwell Denklemlerini ifade ederek işe başlayalım.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (\text{Gauss Yasası}) \quad (2.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Faraday yasası}) \quad (2.3)$$

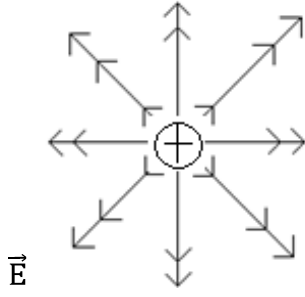
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (\text{Maxwell düzeltmeli amper yasası}) \quad (2.4)$$

Maxwell denklemleri yüklerin(ρ) alanları nasıl oluşturduğunu söyler. Bunun tersi olarak kuvvet yasası alanların yükleri nasıl etkilediğini söyler. Şimdi bu denklemleri kısaca açıklayalım:

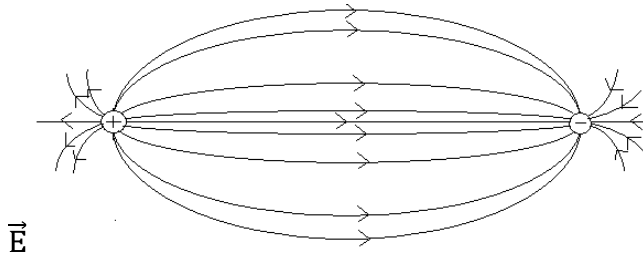
Gauss Yasası: Noktasal q yükünü

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (2.5)$$

olarak ifade ederiz. Bu alanları ifade etmek için Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'deki gibi vektör çizebiliriz. Alanları $\frac{1}{r^2}$ şeklinde azaldıkları için başlangıç noktasından uzağa gidildikçe vektörler daha kısa hale gelir. Yönelim ise daima yarıçap doğrultusundadır. Fakat bu alanı temsil etmenin daha güzel bir yolu vardır ve bu, alan çizgilerini oluşturmak üzere okları birleştirmektir.



Şekil 2.1. Pozitif noktasal bir yükün elektrik alan çizgileri



Şekil 2.2. Birbirine çok yakın pozitif ve negatif yük sisteminin elektrik alan çizgileri

Bu yöntemde bir S yüzeyinden geçen elektrik alanın akısı:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{a} \quad (2.6)$$

olarak yazılır. Akı S yüzeyinden geçen alan çizgilerinin sayısının bir ölçüsüdür. Bu temsili bir çizimdir. Çünkü kuvvet çizgileri sonsuz sayıdadır. Alan şiddeti alan çizgilerinin yoğunluğu ile orantılıdır. Bu bize kapalı yüzeyden geçen akının yüzey içindeki toplam yükün bir ölçüsü olacağını söyler. Pozitif bir yükten çıkan alan çizgileri ya yüzeyden geçip dışarı çıkmalı ya da içerideki bir negatif yükün üzerinde hiçbir katkı yapmamalıdır. Bu yükün alan çizgileri yüzeyin bir tarafından girip diğer tarafından çıkacak şekildedir ve bu gaus yasası olarak bilinir.

Başlangıç noktasındaki noktasal bir yük olarak E'nin r yarıçaplı bir küreden geçen akısı;

$$\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{1}{\epsilon_0} q_{i\text{ç}} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir. Yükü kapsayan her yüzeyden geçen akı q/ϵ_0 'dır. Toplanabilirlik ilkesine göre toplam alan tek, tek alanların toplamıdır.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (2.8)$$

O zaman bunların hepsini kapsayan bir yüzeyden geçen akı

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \sum_{i=1}^n (\oint \vec{E}_i \cdot d\vec{a}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\epsilon_0} q_i\right) \quad (2.9)$$

Olarak yazılır. Böylece herhangi bir kapalı yüzey için

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{i\text{ç}} \quad (2.10)$$

olup, burada $Q_{i\text{ç}}$ yüzey içinde kalan toplam yüküdür. Gauss yasası bir integral denklemdir ve bu denkleme diverjans teoremi uygulayarak diferansiyel denklem haline dönüştürebiliriz:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{a} = \int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) d\vec{\tau} \quad (2.11)$$

$Q_{i\text{ç}}$ 'i ρ yük yoğunluğu cinsinden yeniden yazılırsa:

$$Q_{i\text{ç}} = \int_V \rho d\vec{\tau} \quad (2.12)$$

olarak buluruz. Böylece Gauss yasası

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) d\vec{\tau} = \int_V \left(\frac{q}{\epsilon_0}\right) d\vec{\tau} \quad (2.13)$$

haline gelir. Bu her bir hacim için geçerli olduğundan

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (2.14)$$

Şeklinde yazılır [1].

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ ifadesi ise tek başına manyetik yük bulunamayacağını gösterir.

Faraday Yasası [1]:

Tablo 2.1. Elektrostatik ve manyostatik yöntem denklemleri[2]

Temel Bağıntılar	Elektrostatik Yöntem	Manyetostatik Yöntem
Geçerli denklemler	$\vec{\nabla}_x \vec{E} = 0$ $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ $\vec{\nabla}_x \vec{H} = J$
Yapısal bağıntılar	$\vec{D} = \epsilon E$	$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$

Çizelgedeki $\nabla_x E$ bağıntısı değiştirilecek ve Faraday Elektromanyetik İndüksiyon Yasası'na götürecek temel önerme ile başlanarak dönüşüm ve hareket elektromotor kuvvet (EMK) kavramları anlatılacaktır.

1831'de Michael Faraday üç deneyini aşağıdaki gibi açıklamıştır. [2].

-Bir tel halka manyetik alanın içinden sağa doğru çekildiğinde halkanın üzerinden akım geçtiği gözlemlenmiştir.

-Halka sabit tutulup mıknatısı sola doğru hareket ettirildiğinde, yine halkadan akım geçtiği gözlenmiştir.

-Halka ve mıknatısın her ikisinde sabit iken manyetik alanın şiddetini değiştirdiğinde halka üzerinde akım şiddeti oluşmuştur.

Birinci deney akı kuralına uygun şekilde ifade edilebilen hareket kaynaklı emk'ya bir örnektir:

$$\epsilon = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.15)$$

İkinci deneyde özel görelilik teoremi ışığında halkanın bağlı hareketidir. Fakat Faraday görelilik hakkında hiç bir şey bilmiyordu. Faraday şunu düşündü. Değişen bir manyetik alan bir elektrik alan indükler. deney 2'deki emk'yı açıklayan işte bu indüklenmiş elektrik alandır. Gerçekten Faraday'ın bulduğu emk akımın değişme hızına eşitse,

$$\epsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2.16)$$

dur. O zaman \vec{E}

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.17)$$

(2.17)'deki değişmeye bağlıdır. Denklem bu haliyle Faraday Yasası'dır. Bunun diferansiyel şekli yazılırsa:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.18)$$

elde edilir.

Maxwell Düzeltmeli amper Yasası:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19) Maxwell Düzeltmeli Ampere Yasasıdır [1].

Amper yasası (Maxwell'den önce)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu_0 \vec{j} \quad (2.20)$$

idi. Bunu açarsak

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \nabla \cdot \vec{E}) = -\nabla \cdot (\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (2.21)$$

Sol taraf sıfır olmalıdır. Sağ tarafın sıfır olması gerekirken olmamıştır. Amper yasasında $\epsilon_0 (\frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$ 'yi \vec{j} ile birleştirdiğimde bu işlemin fazlalık diverjansı tam yok etmeye yeterlidir.

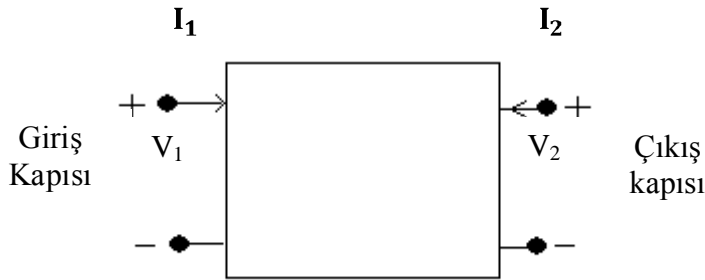
$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.22)$$

Denklem (2.22) Maxwell Düzeltmeli Amper Yasasıdır. Değişen bir elektrik alan bir manyetik alan indükler. Maxwell kendi fazlalık terimine yer değiştirme akımı adını vermiştir [2].

$$\vec{j}_d = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.23)$$

BÖLÜM 3. S PARAMETRELERİ

Düşük frekanslardaki devrelerin belirli uyarımlar karşısındaki tepkisi yani karakterize edilmesi z , y ve h gibi parametreleri kullanarak belirlenirken mikrodalga devrelerinin veya elemanlarının karakterize edilmesinde S-parametreleri kullanılmaktadır. Aşağıda S parametreleri tanımlanmakta ve parametrelerin ölçümleri açıklanmaktadır. Lineer bir devrenin tanımlanması ve karakterize edilmesinde, belirli şartlar oluşturularak söz konusu devrenin uygulanan bir sinyale göstereceği tepki belirlenerek analizi yapılır. Böylece devrenin belirli durumdaki tepkisi önceden belirlenir. Uygulamada kullanılan devre analizi yöntemlerinde, devrenin bir portunda kısa devre, açık devre veya gücün bir yük üzerinde harcanması gibi şartlar oluşturulduğunda diğer porta bir sinyal uygulanarak devrenin karakterize edilmesinde kullanılan parametreler belirlenir. Bu parametreler, aynı temele dayanmakta olup, bilinen bir parametre seti kullanılarak diğer parametre seti hesaplanabilir. Lineer bir devrenin h , y ve z parametreleri Şekil (3.1) , (3.2) ve (3.3)'te verilmiştir [3].



Şekil 3.1. İki portlu devrenin S- parametrelerinin belirlenmesi.

h-Parametreleri

$$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2 \quad (3.1)$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2 \quad (3.2)$$

y-parametreleri

$$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2 \quad (3.3)$$

$$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2 \quad (3.4)$$

z-parametreleri

$$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2 \quad (3.5)$$

$$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2 \quad (3.6)$$

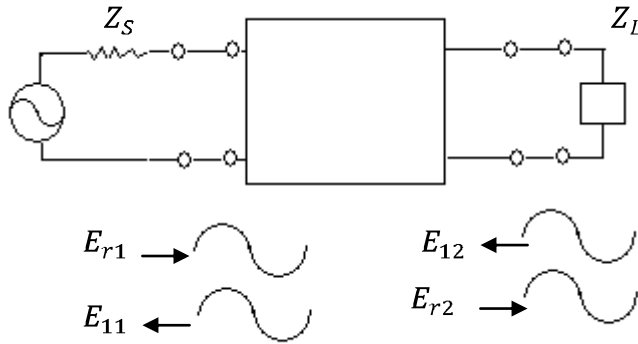
Bu üç parametre seti arasındaki tek fark değişkenlerdir. Bu parametrelerin belirlenmesi amacıyla bir porta kısa devre veya açık devre uygulandığında, diğer porttan uygulanan akım veya gerilim değerleri ölçülür. Örneğin; h-parametrelerinden h_{11} ve h_{21} , ikinci portun kısa devre yapılması ile hesaplanır. Bu durumda $V_2=0$ olacağından $h_{11} = \frac{V_1}{I_1}$ ve $h_{21} = \frac{I_2}{I_1}$ olarak hesaplanır [11].

Yüksek frekanslarda, söz konusu parametrelerin belirlenmesinde kullanılan kısa devre açık devre gibi şartların oluşturulmasında ve portlardaki akım ve gerilim ölçümlerinde bazı problemler ile karşılaşmaktadır. Frekans yükseldiğinde, kısa devre, bir indüktans gibi, açık devre ise kapasitans kaçağı gibi davranmaktadır. Ayrıca akım ve gerilim ölçümünde kullanılacak uygun cihaz bulunmamakta olup, akım ve gerilim değerleri ölçüm yapılan noktaya göre değişmektedir. Bir iletim hattı, karakteristik empedansı Z_0 'dan farklı bir yükü sonlandırıldığı durumda, hat üzerindeki sinyalin bir kısmı yük üzerinde harcanırken bir kısmı geri yansır. Bu durumda iletim hattı üzerindeki gerilim değeri ölçüm yapılan noktaya göre değişir.

Yüksek frekanslardaki bu problemlerin giderilmesi amacıyla değişken olarak güç değerlerinin kabul edildiği s- parametreleri tanımlanmıştır [3].

3.1. S Parametrelerinin Tanımlanması

S-parametreleri, akım ve güç değerleri yerine, gelen ve giden dalga değerlerini kullanması nedeniyle özellikle mikrodalga devrelerinde kullanışlıdır. Dalga kılavuzlarında akım ve gerilim ölçümleri yapılmayacağından S-parametrelerinin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. İki portlu lineer bir devre, Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi bir iletim hattına yerleştirilerek bu hattın karakteristik empedansına eşdeğer bir yük ile sonlandırıldığında S- parametreleri hesaplanabilmektedir [3].



Şekil 3.2. İki portlu devrenin S- parametrelerinin belirlenmesi.

Kaynaktan gelen sinyal devreyi, uyarıcı sinyaldir. Tepki sinyali ise yansıyan sinyal ile devre çıkışından alınan transfer sinyalinden oluşmaktadır. Şekil 3.2’deki gelen ve giden sinyalin değerleri, eşitlik (3.7) ve (3.8) kullanılarak hesaplanır.

$$E_{r1} = S_{11}E_{r1} + S_{12}E_{r2} \quad (3.7)$$

$$E_{r2} = S_{21}E_{r1} + S_{22}E_{r2} \quad (3.8)$$

E_{11} ve E_{12} devreye uygulanan gerilimler E_{r1} ve E_{r2} yansıyan gerilimlerdir. Eşitlik (3.7) ve (3.8)’de her iki taraftaki gerilim değerleri, iletim hattının karakteristik

empedansının kareköküne bölünerek normalize edildiğinde eşitlik bozulmaz, elde edilen oranların karesi gücü ifade eder ve bu doğrultuda yeniden düzenlenirse Eşitlik (3.9) ve (3.10) elde edilir:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (3.9)$$

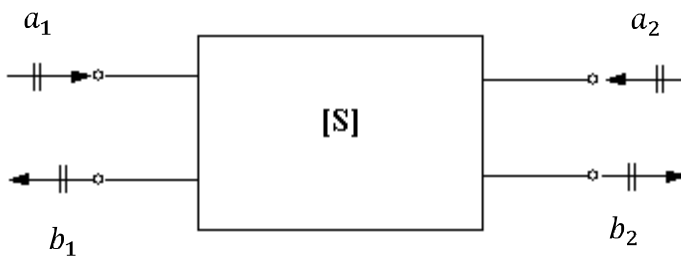
$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (3.10)$$

Şekil 3.3.'de iki portlu bir lineer devrenin s-parametreleri ile gelen ve yansıyan dalgaları gösterilmektedir. İkinci portta iletim hattının empedansına eşdeğer bir empedans bağlandığında, empedansın üzerine uygulanan sinyal tamamen harcanır. [3]Geriye yansıyan sinyal olmayacağından, $a_2=0$ olur. Eşitlik (3.9) ve (3.10)'da verilen değişken sayısı bire ineceği için S_{11} ve S_{21} kolaylıkla hesaplanır [3].

$$a_2 = 0 \text{ ise ; } S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \text{ ve } S_{21} = \frac{b_1}{a_2} \quad (3.11)$$

Aynı empedans birinci porta bağlanarak bu işlemler tekrarlandığında ise $a_1=0$ olur ve S_{22} ile S_{12} hesaplanır [10]:

$$a_1 = 0 \text{ ise ; } S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \text{ ve } S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad (3.12)$$



Şekil 3.3. İki kapılı bir devrede S parametresinin tanımı.[12]

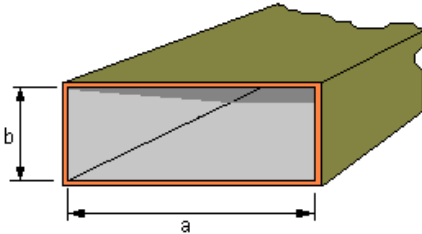
$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0}$$

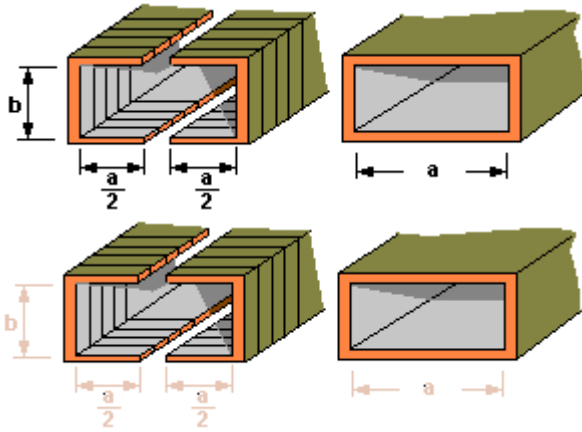
$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0}$$

3.2. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu



Şekil 3.4. Dikdörtgen kesitli bir dalga kılavuzu

Yaklaşık 1000 MHz üzerindeki bölgede büyük yüklerin koaksiyel kablolar vasıtasıyla taşınması sırasında, aşırı zayıflatma ve dolanan arklara karşı daha az dayanabilme gibi, bazı önemli dezavantajlar görülür. Zayıf güçlü sinyallerde ortaya çıkan dezavantajların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalabilmesi için, bunların büyük güçlerdeki kayıplarının telafi edilebilir olması gerekmektedir. Zayıflatma kayıpları iletkenin özgül kapasitansı ve endüktansı ve hem de kabuk etkisi nedeniyle meydana gelir ve bu kayıplar frekansın artışıyla birlikte bir hayli fazlalaşır. Dolanan ark dayanıklılığı, iç ve dış iletkenler arasındaki açıklığın küçük olması nedeniyle çok kısıtlanır. Bahsettiğimiz dezavantajlar nedeniyle radar tesislerinde yüksek frekanslı sinyaller dalga kılavuzları ile taşınırlar. Dalga kılavuzları dairesel, eliptik veya dikdörtgen kesitli metalik borulardır, ancak en çok dikdörtgen kesitli olanlar kullanılır [4].



Şekil 3.5. Dalgı kılavuzunun, $\lambda/4$ uzunluklu kısa devre parçalarından meydana gelişi

Teorik olarak bir dikdörtgen dalgı kılavuzu, $\lambda/4$ uzunluğa sahip, yan yana dizilmiş çok sayıda kısa devre parçalarından meydana gelir. Bu biçimdeki parçalardan ikisi karşı karşıya getirilerek, dikdörtgen biçimli kesite sahip bir dalgı kılavuzu elde edilir. Ancak, bir dalgı kılavuzunda sinyaller ilk defa belirli bir frekansla yayılırlar. Bu frekans dalgı kılavuzunun boyutlarına, özellikle a kenarına bağlıdır. Eğer sinyalin dalgı boyu, sınır dalgı boyu denilen $\lambda_{\text{sınır}}$ 'dan daha küçük ise yayılma mümkün olabilir.

Dikdörtgen kesitli bir dalgı kılavuzunun sınır dalgı boyu formülü

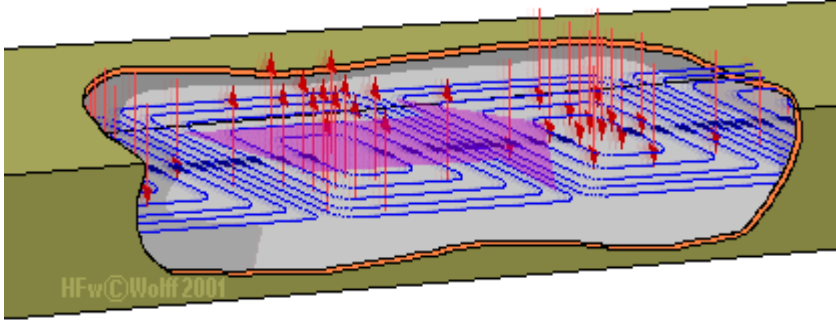
$$\lambda_{\text{sınır}} = 2a \quad (3.13)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $\lambda_{\text{sınır}}$ sınır dalgı boyunu, a dalgı kılavuzunun geniş kenarını gösterir.

3.3. Elektromanyetik Dalgaların Dalgı Kılavuzunda Yayılması

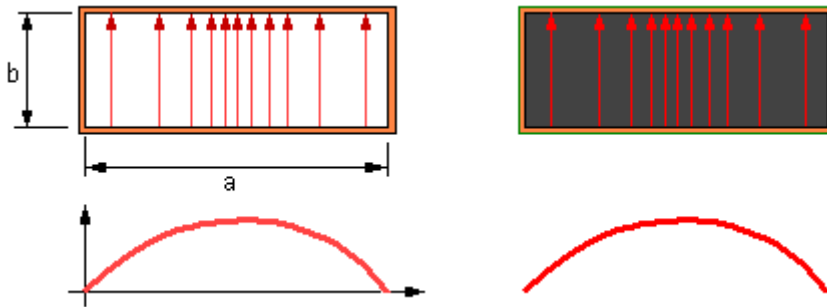
Bir dalgı kılavuzuna yüksek frekanslı enerji beslendiğinde, dalgı kılavuzu içinde E- elektrik alanına ve H-manyetik alanına sahip elektromanyetik dalgalar meydana

gelir. Bu elektromanyetik dalgalar dalga kılavuzu içinde ışık hızına yakın bir hızda yayılırlar.

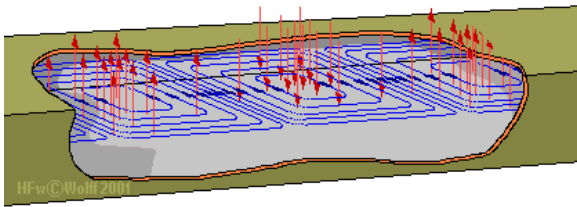


Şekil 3.6. Elektrik alan dalga yayılımı

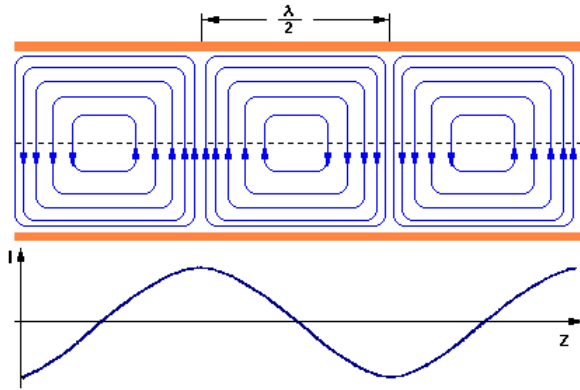
a-duvarları arasında, b-duvarlarına yaklaştıkça azalan ve b- duvarına vardığında kısa devre olan, bir E-alanı meydana gelir. E-alanı kesitsel olarak sinüs biçimli bir dağılım gösterir.



Şekil 3.7. Dalga kılavuzundaki elektrik alan



Şekil 3.8. Bir dalga kılavuzunda H_{10} - modu yürüyen dalgalar.



Şekil 3.9. Dalga kılavuzundaki manyetik alan (anlık üst görünüş)

Dalga kılavuzu boyunca elektrik alanı frekansla periyodik olarak polaritesini değiştirir ve her bir $\lambda/2$ aralığında maksimuma ulaşır. Dalgalar, zaman ekseninde bakıldığında, mevcut durumlarını sürdürmezler, aksine giriş sinyaline uygun olarak genliklerini ve polaritelerini değiştirirler. Dalga kılavuzlarının zayıflatma davranışı frekansa oldukça sıkı bir şekilde bağlıdır. Sınır frekansında çalıştırılan bir dalga kılavuzu yüksek zayıflatma gösterir, frekans yükseltildiğinde bir minimuma ulaşır. Bir dikdörtgen kesitli dalga kılavuzunun iletkenlik kalitesini tayin eden temel farklar, bu dalga kılavuzunun a kenar boyutunun taşınan frekansla olan ilişkisidir. Büyük frekanslar için küçük boyutlu dalga kılavuzları gerekir, ama frekans daha düşük ise daha büyük boyutlu dalga kılavuzları kullanılır. Bir dalga kılavuzunun dolanan arklara dayanıklılığı dalga kılavuzunun boyutlarına bağlıdır ve büyük kesitli dalga kılavuzlarına göre, küçük kesitli (yüksek frekanslarda kullanılan) dalga kılavuzlarının dolanan arklara dayanıklılığı daha azdır. Bir dikdörtgen kesitli dalga kılavuzunda dar kenar, yani b kenarı belirleyicidir. Daha büyük güçlerin taşınabilmesi için dalga kılavuzunun dolanan arklara karşı sağlamlığının artırılması gerekir, bu nedenle dalga kılavuzu içine basınçlı hava basılarak dışarıdan nemli hava sızıntısı da önlenir.

4.1. Dalga Kılavuzunda TE Modunda Yayılan Dalgalar

Dalga kılavuzunda elektromanyetik dalganın TE modunda yayılması için yayılan dalgada $E_z = 0$ olmalı ve ayrıca sınır değerlerini sağlamalıdır [9]. Buna TE enine elektrik dalgalar denir [1]

$$1) \quad E_{\parallel} \text{ ise, } \frac{\partial H_z}{\partial x} = 0, \quad (E_y = 0) \quad x = 0 \text{ için } x \text{ yönünde} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = 0 \quad (E_y = 0) \quad x = a \text{ için } y \text{ yönünde} \quad (3.15)$$

$$2) \quad E_{\parallel} \text{ ise, } \frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad (E_z = 0) \quad y = 0 \text{ için } y \text{ yönünde} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad (E_z = 0) \quad y = b \quad (3.17)$$

şeklinde sınır şartlarını sağlamak zorundadır.

$$H(x, y, z) = [A \sin(k_x x) + B \cos(k_x x)] \cdot [C \sin(k_y y) + D \cos(k_y y)] e^{i\beta_g z} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = [A k_x \sin(k_x x) + B k_x \cos(k_x x)] \cdot [C \cos(k_y y) + D \sin(k_y y)] e^{i\beta_g z} \quad (3.19)$$

yazılabilir. $x=0$ için A katsayısı 0 olmalıdır. Aynı ifade de $x=a$ için ise;

$$k_x a = m\pi, \quad k_x = \frac{m\pi}{a} \quad (m = 0,1,2,3) \quad (3.20)$$

eşitliği ile sağlanabilir. Aynı işlem ikinci durum için de yazılabilir

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad (E_x = 0) \quad y = 0 \quad (3.21)$$

ve

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = 0 \quad (E_x = 0) \quad y = b \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = [A_x \sin(k_x x) - B k_x \cos(k_x x)] \cdot [C k_y \cos(k_y y) - D k_y \sin(k_y y)] e^{i\beta z} \quad (3.23)$$

elde edilir. O halde $y = 0$ için

$$C = 0 \quad k_y b = n\pi \quad k_y = \frac{n\pi}{b} \quad n = 0,1,2,3 \quad (3.24)$$

ifadesine ulaşılır. Bu özel çözümler birlikte manyetik alan fonksiyonu;

$$H(x, y, z) = B \cos(k_x x) D \cos(k_y y) \cdot e^{i\beta z} \quad (3.25)$$

olarak ifade edilir.

$$\vec{B} \cdot \vec{D} = \vec{H}_0 \quad (3.26)$$

dönüşümü ile birlikte son manyetik alan fonksiyonu

$$H(x, y, z) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) C \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \cdot e^{i\beta z} \quad (3.27)$$

olarak yazılır. (3.18 ve 3.22) ile belirlenen k_x ve k_y değerleri aşağıdaki denklemde yerine koyulursa;

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (3.28)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (3.29)$$

bulunur. TE₁₀ modu için $c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$, n=0 ve m=1 alınarak,

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (3.30)$$

bulunur [9].

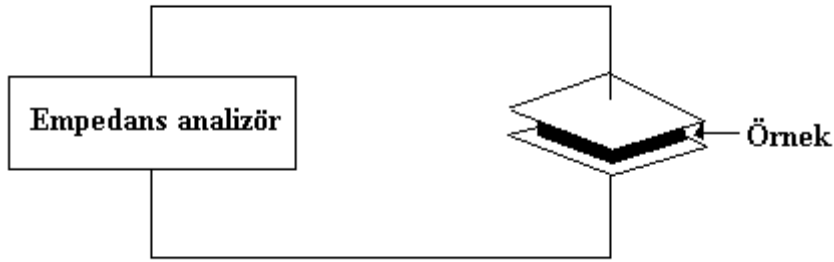
BÖLÜM 4. ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Malzemenin mikrodalga karakteristiği, geleneksel ölçüm sistemleri ya da gelişmiş vektör network analizörleri (PNA) kullanılarak yapılır. Bundan öncekiler ucuz ama zaman alan sistemlerdir. Buna karşılık network analizör ile karakterize etme işlemi geniş frekans bandı olanağı sağlar. Gereken frekanslarda ve çevre koşullarında kesin ölçümler için sistemi standartlaştırmak ve kalibre etmek gerekir. Bu çalışmada malzeme karakterizasyonunda geleneksel yöntemlerden bahsedilmiştir. Örnek hazırlama, sistemin çözünürlüğü, örnek sayısının fazlalığı gibi maddeler ölçümün doğruluğu için gereklidir [13].

Dielektrik katsayısının hesaplandığı bazı yöntemleri şu şekilde sıralayabiliriz: Serbest Alan Yöntemi, Koaksiyel Uç Tekniği, İletim Hattı Tekniği, Kaviti Yöntemi, Admitans Tüneli Yöntemi, Geçiş/Yansıma Yöntemi. Aşağıda bu yöntemlerle ilgili açıklamalar yapılmıştır.

4.1. Serbest Alan Yöntemi

Paralel plaka yönteminde alınan örnekteki (Şekil 4.1) elektriksel geçirgenliği hesaplamak için iki paralel plaka arasındaki kapasite ölçülür. İlk önce boş plakanın kapasitesi ölçülür. RAM örneği plakalar arasına dikkatli bir biçimde işlenir. Bunlar daha sonra RAM'ın elektriksel geçirgenliğini belirlemede kullanılır. Örnek, homojen, manyetik olmayan ve ince tabakaya dikkatli şekilde işlenmiş olmalıdır. Kalınlığın 10 mm'den az olması tercih edilir. Ayrıca plakaların yüzeyleri düz ve tamamen pürüzsüz olmalıdır. LCR metre ya da bir empedans analizörle empedans ölçülebilir. Elektriksel geçirgenlik ve kayıp tanjantı (4.2) hesaplanır



Şekil 4.1. Paralel Plaka yöntemi

$$\epsilon' = \frac{C_{\text{örnek}}}{C_0} \quad (4.1)$$

$$\tan \delta_e = \frac{C_{\text{örnek}} - G_0}{\omega C_{\text{örnek}}} \quad (4.2)$$

$C_{\text{örnek}}C_0$ ve G_0G_0 , örnek yokken plakalar arası kapasite ve elektriksel iletkenliği ve $C_{\text{örnek}}$ ve $G_{\text{örnek}}$ varken plakalar arası değerleri gösterir [13]. Yüksek frekansta kesilemeyen örnekler için tercih edilebilir [14].

Kolay ve kullanışlı olmasına rağmen bu yöntem düşük frekansı içerir. Örnek arasındaki hava boşluğu yüksek frekans hesaplamada önemli hatalara neden olabilir. Bu yöntem için bir başka hata nedeni de kenarların saçaklanmasıdır. Birçok durumda örneği kenara tam uydurarak ya da korumalı elektrod kullanarak bunun önüne geçilebilir. Bu yöntem geniş frekans bandı ölçümlerini, yüksek doğruluk ve duyarlılıkla UHF'ye çıkan frekanslara kadar içerir. Bu yöntem mikrodalga bölgesinde etkin olarak uygulanır, aynı zamanda düşük frekansları da karakterize edebilir. Düşük frekans performansı ve yüksek frekans yansıtıcılığı, deneme-yanılma yöntemiyle elde edilmiştir. Mikrodalga bölgesindeki kayıp, rapora eklenmiştir. Poliüretan köpükler başarılı biçimde test edilmiştir. Akrilik paneller molibden teller ile 1mm çapında çeşitli aralıklar kullanılıp yerleştirilerek benzerlik saptamada standart belirlemede kullanılmıştır.[13]

4.2. Koaksiyel Uç Yöntemi

Paralel plaka yöntemi doğruluğu % 0.1 hata ile vermesine rağmen örnek kalınlıkları kaçınılmaz kalınlıkta olduğunda uygun olmayabilir. Koaksiyel uç tekniği genellikle külçe(bulk) ve piramit-soğurucu yapıları tanımlamada kullanılır. Bu yöntem da, alınan örneğin son derece kalın olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla başka bir karıştırıcı etkiden yansıma yoktur. Yansıma katsayısının ara yüzde hesaplanmasına gerek yoktur. Kayıpsız hattın uzunluğu l , ise yansıma katsayısı hattın sonunda,

$$\rho_1 = \rho e^{-2j\beta l} \quad (4.3)$$

olur ve ρ kablo ve örnek arasındaki yansıma katsayısı ise

$$\rho = \frac{Z_{\text{örnek}} - Z_c}{Z_{\text{örnek}} + Z_c} Z_c \quad (4.4)$$

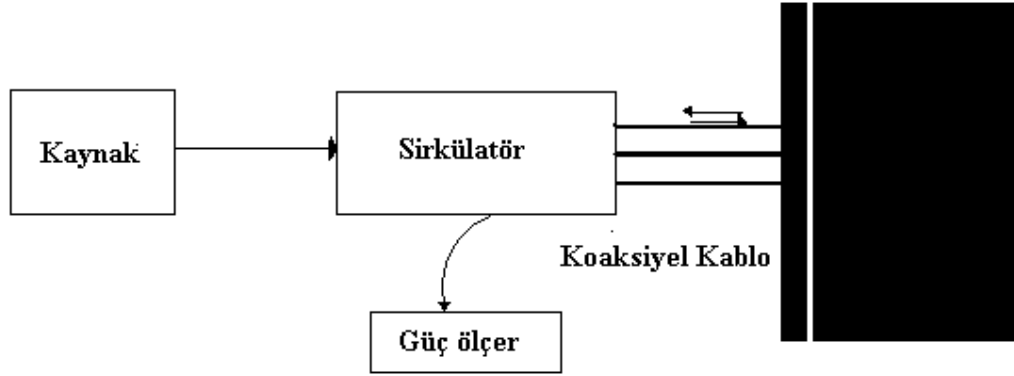
olarak yazılır. Z_c ve Z örnekleri sırasıyla örneklerin karakteristik empedanslarıdır. Manyetik-olmayan tür varsayıldığında karmaşık elektriksel iletkenlik aşağıdaki bağıntıyla gösterilebilir:

$$Z_{\text{örnek}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{örnek}}}} \quad (4.5)$$

Koaksiyel uç tekniği yönsüz homojen ve manyetik olmayan malzemeler için yararlıdır. Ele alınan bu örnek, düz bir yüzeye sahip olmalı ve uç-örnek arasındaki hava boşluğu olmamasına özen gösterilmelidir. Bu yöntem sıvılar için de geçerlidir. Minimum kalınlık düz yüzeyler için yaklaşık $(2/\sqrt{\epsilon_r})$ belirlenmiştir.

Geniş frekans aralıklı, ölçüm uçları ticari olarak satılmaktadır. Bu yöntemle RAM 20 MHz-20 GHz aralığında karakterize edilebilir. Bilinmesi gerekenlerden biride koaksiyel kablo içi kayıplardır. Kayıplar; iletim kaybı (frekansın karesiyle orantılıdır), dielektrik kaybı ve doğrudan frekansla orantılı kayıptır. Diğer yandan

zayıflamadaki değişimin nedeni sadece frekans değildir, kalibrasyon gerekmektedir. Yani doğru sonuçlar için her frekansta kalibrasyon yapmak gerekir.



Şekil 4.2. Koaksiyel Uç Yöntemiyle külçe (bulk) örneğin karakterizasyonu.

4.3. İletim Hattı Yöntemi

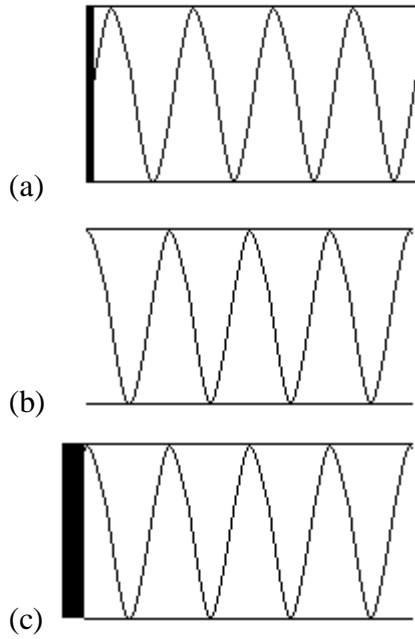
Paralel plaka ve koaksiyel uç yöntemlerin sadece manyetik-olmayan malzemeler üzerine uygulanabilirliğinden bahsedilmiştir. Bu yöntemle empedansın sanal ve gerçel kısmı ölçülebilir. Paralel plaka yöntemi, yansıyan gücün genlik ve fazından, karmaşık yansıma katsayısını saptar. Ferrit gibi hem manyetik hem de yalıtkan davranış gösteren malzemeleri karakterize etmek için dört bağımsız niceliğin ölçülmesi gerekir. İletim hattı tekniği, koaksiyel ya da yarıklı dalga kılavuzu bölmesini kullanılarak çoklu ölçümlerin alınabildiği bir yöntemdir. Bu yöntem için örneğin gerilim yansıma katsayısının ölçülmesi gerekir. Yansıma katsayısıyla empedans bulunur ve sonuç olarak malzeme parametreleri bulunur.

İletim hattı, dalga kılavuzu ya da koaksiyel hat yükü sonlandırıldığında, duran dalgalar oluşur. Genlikler ile maksimum ve minimum noktaları bağlanan yüke göre değişir (Şekil. 6). Ölçümler açık/kısa devre sonlandırılmalarını da içerir. Empedans duran dalga paternindeki sınır değişikliklerinden ve VSWR metrede görünen yansıma katsayısından hesaplanır. Gerekli düzeneğin blok diyagramı Şekil.4.2.'de görülmektedir.

İletim hattı yöntemi, kısa devre yöntemi ile geliştirilmiş olan malzeme parametreleri kullanılarak geliştirilmiş bir yöntemdir. Açık ve kısa devre durumlarındaki empedans, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenliğin hesaplanmasında, aşağıdaki bağıntıları kullanır.

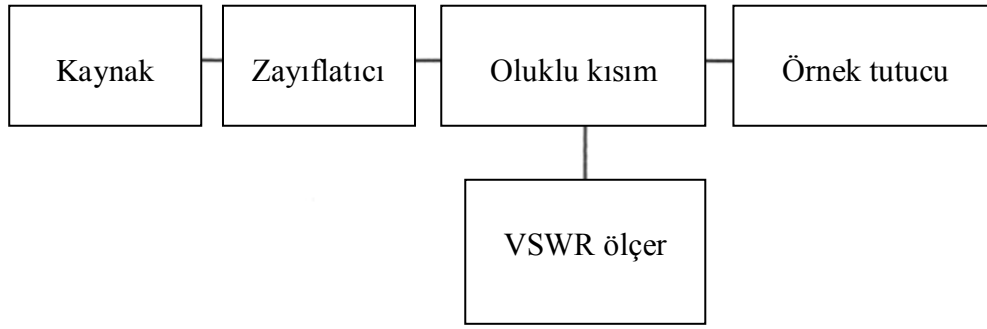
$$Z = \sqrt{Z_{\text{açık}} Z_{\text{kısa devre}}} \quad (4.6)$$

$$\gamma = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{Z_{\text{açık}}}{Z_{\text{kısa devre}}}} \quad (4.7)$$



Şekil 4.3. Dalga kılavuzu içindeki duran dalga örneğinin (a) Kısa devre, (b) Açık, (c) Sınırlı empedans katmanı ile sonlandırılması.

Duran dalga oranı (VSWR), seçilen kesitteki maksimum ve minimum noktaların oranı olarak tanımlanır. VSWR bulunduğunda, Smith Grafiğinden empedans bulunabilir. Smith Grafiği elle yapılan iletim hattı çözümlerinde, ortak merkezli VSWR çemberleri ve sabit reaktans daireleriyle oldukça güçlü bir grafik aracıdır.



Şekil 4.4. İletim hattı ölçüm diyagramı.

Ölçülen VSWR değeri yansıma katsayısının genliğini verir. Γ yansıma katsayısı aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (4.8)$$

$$K = \frac{1+S_{11}^2-S_{21}^2}{2S_{21}} \quad (4.9)$$

S_{11} ve S_{21} sırasıyla 1. ve 2. kapıdan 1.kapıya gelen yansıma oranlarını gösterir.

Yüzler ve tabaka arasındaki iletim katsayısı benzer şekilde,

$$T = \frac{S_{21}+S_{11}-\Gamma}{1-\Gamma(S_{21}+S_{11})} \quad (4.10)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik (4.4)'ten de;

$$Z_{\text{örnek}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = Z_c \left(\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \quad (4.11)$$

yazılır. Benzer şekilde kırılma indisini:

$$\sqrt{\mu_r \epsilon_r} = -\frac{c}{j\omega d} \ln(T) \quad (4.12)$$

biçiminde tanımlarız. Tekrar eşitlik (4.11) ve (4.12) çözüldüğünde, örneğin dielektrik sabitini ve bağlı manyetik geçirgenliğini hesaplarız.

Örnekler dalga kılavuzuna ya da koaksiyel hata yüzleri düz olacak, hava boşluğu olmayacak şekilde, eksene dik olarak pürüzsüz biçimde dikkatlice işlenmelidir. Koaksiyel kablo ortamında bazen standart kablonun çapı, test örneğini yerleştirilebilecek kadar büyük olmayabilir. Bu problem ucu incelen daha geniş çaplı bir kablonun uygun biçimde bağlanmasıyla sağlanır.

Örnek kalınlığı eşitlik (4.7) ve (4.12)' de gösterilmektedir. Alternatif olarak, çoklu frekans ölçümleri için örnek kalınlığı belirlenmelidir. Dikkatlice işlenmiş örneklerde kesinlik, iletim hattı tekniği koaksiyel kabloda %10 iken dalga kılavuzu yönteminde %5 tir. Bu yöntem yönsüz malzemeler için de geçerlidir.

İletim hattı tekniği Radar Soğurucu Malzemeleri (RAM) büyük ölçüde karakterize etse de bazı limitleri vardır. Örnek kalınlığı $\lambda/12$ - $\lambda/18$ arasında olmalıdır. Örnek kalınlığı $\lambda/2$ seçildiğinde ‘Periyodik “drop out(düşüş)” denilen önemli bir hata yapılmış olur. Bu ölçüde geniş-bant karakterizasyonunda farklı kalınlıklarda örnekler hazırlamak gerekir. Çelişkili durumları engellemek için tolerans belirlenmelidir. Tarayan sinyal kaynaklarıyla ya da zaman-düzlemler-yansıma ölçümü yöntemiyle, geniş bantta hızlı ölçümler alınabilir. Zaman düzlemler yansıma ölçümü yöntemi, atma biçimli dalga gönderip taranan veriyi bilgisayar kontrollü geniş bantlı osiloskopta göstermeye dayanır. Daha sonra frekans düzlemine hızlı Fourier dönüşümüyle (FFT) geçilir. Ölçümlerin doğruluğu için pencereleme zamanlarının seçimi kritiktir. Daha kesin sonuçlar için daha istikrarlı kaynaklar kullanmak gerekir.

4.4. Rezonatör Yöntemi

Karakterize etme yöntemlerinde, örnek ve metal arasındaki hava boşluğundan empedans oldukça fazla etkilenir. Hava boşluğu hatasının az olduğu yöntemler dalga kılavuzu ya da koaksiyel kavitedir. Rezonans kavite yöntemi dielektrik katsayısı 1-100 arasında değişebilen geniş bir aralıkta uygulanabilir. Bu aslında tek frekansta geçerli, kompleks analiz yapılabilen bir yöntemdir. Ama aynı zamanda yönsüz

malzemeler için de geçerlidir. Bu az kayıplı homojen malzemeler ve sıvılar için kesinliği en fazla olan yöntemdir [13].

Hem dikdörtgen dalga kılavuzu hem de koaksiyel kavite yöntemi bu yöntemde kullanılır. Çoklu frekans ölçümleri için ayarlanabilen kaviteler, tarayan sinyal kaynaklarıyla beraber kullanılır. Kavite rezonatörleri genellikle özel yapım olup ayarlama zorlukları ve mühendislik problemleriyle sık karşılaşılır. Kavitenin rezonans frekansı ve kalite faktörü, malzeme parametrelerini elde etmeye yarar. Ölçümler boş kavite ve içinde örnek varken alınır. Disk ya da çubuk yapıların karakterizasyonunda kavite sıvı örnekle doldurulur.

Düşük dielektrik katsayısı ve orta kayıplı örneklerde, az yoğunluklu soğurucu durumunda, Kavite Karışıklık Yöntemi önerilir. Elektriksel geçirgenliğin gerçel ve sanal kısımlarısına ile;

$$\varepsilon' = 1 + \frac{f_2 - f_1}{2f_1} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon'' = \frac{1}{4V} \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2} \right) \quad (4.14)$$

şeklinde yazılır. V örneğin kaviteye göre önemsiz hacmidir. Eşitlik (4.13) ve (4.14) f_1 ve f_2 frekansları kavitenin örnekli ve örneksiz konumdaki rezonans frekanslarıdır. Q_1 ve Q_2 de ilgili kalite faktörleridir. Kalite faktörü yarım güç noktalarından bulunabilir $f_{yüksek}$ ve $f_{düşük}$ kavitenin frekansıdır.

$$Q = \frac{f_{yüksek} + f_{düşük}}{2(f_{yüksek} - f_{düşük})} \quad (4.15)$$

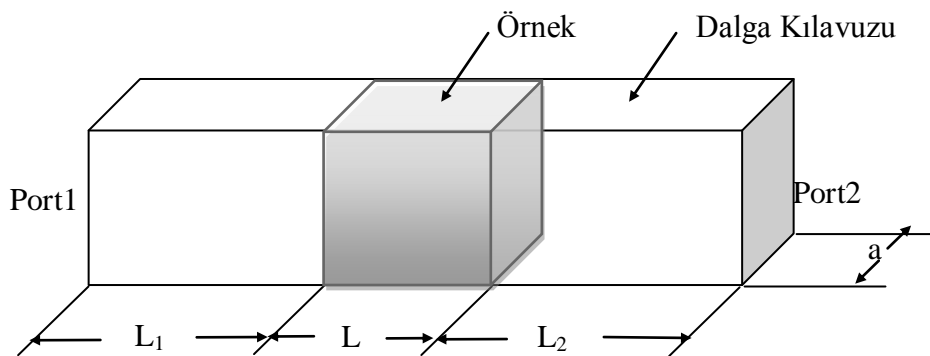
şeklinde yazılır. Kavite yöntemi geniş ölçüde sıvı örnekler ve manyetik malzemeleri karakterize etmede kullanılmıştır. ferrit örneklerin manyetik ve dielektrik parametrelerini kavite Yöntemiyle ölçmek için örneği, kavitedeki elektrik ve manyetik alanın maksimum olduğu uygun noktalara yerleştirmek gerekir.

Kavite Karışıklık Yöntemi, ince iletken polimerlerin iletkenliğini tanımlamak için geliştirilmiştir. Yarı-durgun (quasi-static) yaklaşımlar kullanılarak bu az iletken malzemelerin manyetik geçirgenliğinin gerçel ve sanal kısımlarıyla ilişki kurulur. Manyetik geçirgenlik, rezonans frekansındaki değişimler ve farklı sıcaklıklardaki kalite faktörü ölçülerek hesaplanır. Manyetik geçirgenlikten ise dielektrik geçirgenlik hesaplanır [13].

4.5. Admitans Tüneli Yöntemi

İnce plakaların iletkenliği ya da soğurucu malzemeyi karakterize etmek için plaka iletkenliğinden yararlanır. Admitans Tüneli diye de bilinen soğurucu kaplı oda bu amaç için geliştirilmiştir. Admitans Tüneli serbest açıklıklı bir ortamın sonuna örnek başlangıcına da anten yerleştirilerek oluşturulur. Sürekli dalga kaynağı ile örnekten gelen yansımalar ölçülür. Aynı anten alıcı ve verici olarak kullanılır. Kübik yapı dış etkilerden bozulmayan bir düzlem dalga elde etmek için uygundur. Sistemi kalibre etmek için genlik ve faz ölçümlerinde metal plaka kullanılmıştır. Bu yöntem 'Rockwell International Corporation' tarafından geliştirilmiştir. Tarayan frekans kaynağıyla çoklu frekans ölçümleri eklenebilir [13].

4.6. Geçiş/Yansıma Yöntemi



Şekil 4.5. Dalga Kılavuzu Sistemi.

Bu çalışmada Geçiş/Yansıma Yöntemi olan Dalga kılavuzu ölçüm yöntemi incelenmiştir. Aşağıda Dalga Kılavuzu ölçüm yöntemi ile ilgili bilgi verilmiştir [5].

Geniş bir dalga kılavuzuyla düşük frekanstaki (100-400MHz) yansıma ölçümleri gerçekleştirilirken günümüzde yüksek frekanslara taşınmıştır [6]. Yansıma değerleri malzeme parametrelerine çevrilebilir.

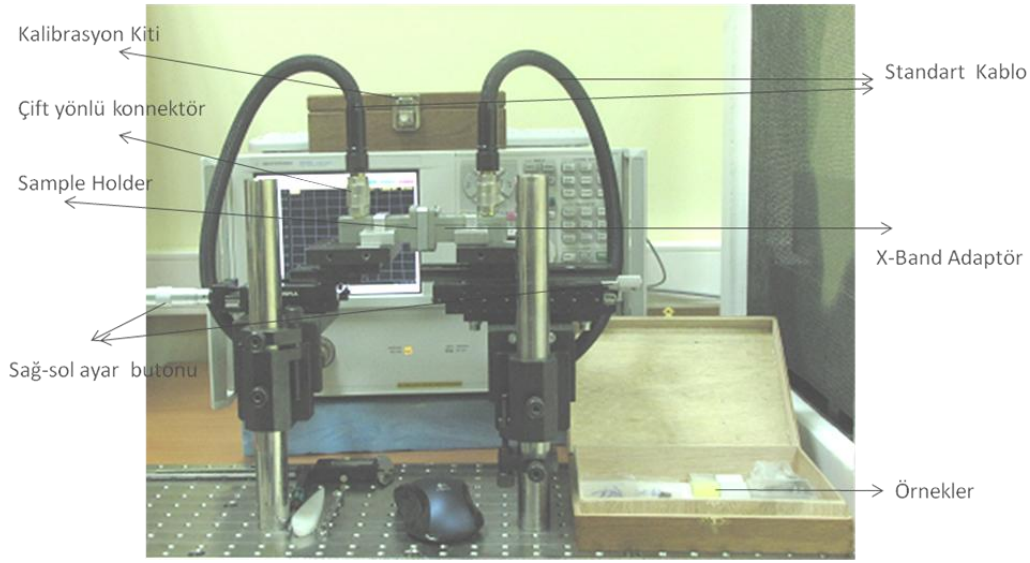
Büyük boyutlardaki dalga kılavuzu açıklıkları daha geniş soğurucu malzemeleri karakterize etmeye yarar. Dalga kılavuzu, dielektrikteki düzlem dalga yansımasını ölçmede koaksiyel kabloya göre daha etkilidir Bu metot, yüksek kırılma indisli soğurucu malzemelere de uygulanabilir. Bu sistemin bir diğer avantajı da kurulumun çok kolay kalibre edilebilmesidir.

Bu rezonanssız metotlar belirli frekans bantlarını kapsayarak malzemelerin elektromanyetik özelliklerinin ölçülmesi, kutuplaşma mekanizmalarının çalışma prensibi, geniş bant fonksiyonlu malzemeler ve yapılar geliştirilmesi için kullanılır.

Bu Geçiş/Yansıma yönteminde ölçüm yapılacak örnek sistemin bir bölmesinin içine dalga veya koaksiyel hat gibi eklenir. Bu ölçümlerde örnek ile dalga metal arasındaki boşluktan empedans olumsuz etkilenir. Bu durum dalga kılavuzu yönteminde oldukça azdır [13]. Örnek dolu dalga kılavuzu parçası için ilgili saçılma denklemleri ile elektrik geçirgenlik (permittivity) ve manyetik geçirgenlik katsayısı (permeability) çalışmaları kapsamında elektromanyetik özellikleri elde edebiliriz [5].

BÖLÜM 5. ÖLÇÜM DÜZENEGİ VE ÖLÇÜM YAPILMASI

Ölçüm için Tablo. 5.1’ de verildiği gibi üç ayrı frekans bandı kullanılmıştır.



Şekil 5.1. X-Band ölçüm düzeneği

Bu çalışmada üç ayrı frekans bandında çalışılmıştır (X-P-Ku Band) (Tablo 5.2). Üç ayrı düzenekte ölçüm alınmıştır. Düzeneklerde standart dalga kılavuzları ve standart TRL (Transmission-Reflection-Line) kalibrasyonu kullanılmıştır.

Dalga Kılavuzu ölçüm düzeneği Şekil 5.1’de görülen kısımlardan oluşmaktadır. Sistem standart kalibrasyon kiti ile kalibre edildikten sonra örnek, örnek boşluğuna (sample holder) yerleştirilerek ölçüm yapılır. Dalga kılavuzları ile yapılan yansıma (S_{11}) ölçümü için kalibrasyon esnasında seçilen birinci referans yüzeyin neresi olduğu önemlidir. Kalibrasyon yapılırken bunlardan birincisinin bitiş noktasından (Short) kısa devre yapılması gerekmektedir. Ölçüm yapılırken örnek tam

bu bitiş noktasından başlamalıdır. Kullanılan örnek boşluğu ile örnek kalınlığı farkından oluşabilecek faz kaymaları doğru hesaplanmalıdır.

Ölçüm için numune hazırlanırken ölçülerinin tam olmasına dikkat edilmelidir. Dalga kılavuzunun içine boşluksuz yerleştirilmelidir. Örnekte kalınlık farkı olmamasına dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada dört farklı dielektrik malzemenin farklı kalınlıklardaki kompleks dielektrik katsayıları farklı üç yöntemle incelenmiştir. Dielektrik malzemelerde iletkenlerin tersine, yüklerin tümü belirli atom ve moleküllere bağlanmıştır. Yapabilecekleri hareket atom veya molekülün içinde sınırlı hareket etmektir. Böyle mikroskobik yer değiştirmeler bir iletkendeki yüklerin tümüyle yeniden düzenlenmesi kadar belirgin değildir, fakat onların yığılmalı etkisi dielektrik malzemelerin belirli davranışından kaynaklanmaktadır. Her malzeme üzerinde yük depolayabilme yeteneğine göre dielektrik katsayısı adı verilen sabitle ölçülür. ϵ ile gösterilir. Bu katsayı sayesinde birçok parametreyi hesaplayarak malzemenin özelliği ile ilgili bilgi edinmiş oluruz [1].

Ölçümü yapılan malzemeler teflon, polietilen, pleksiglas, kestimiddir. Bunlar az kayıplı malzemelerdir. Malzeme kalınlıkları arttıkça rezonans piki vermeye başlamaktadır. Rezonans kuantum mekaniğine göre; ışık ile maddenin etkileşmesini örneklersek, bu durumda atom ile elektromanyetik alan birbiri ile kenetlenen iki periyodik sistem olarak düşünülür. Atomların doğal frekansları geçiş frekansları olarak bilinir ve gelen ışığın frekansı da ayarlanabilir. Bu durumda elektromanyetik alanın frekansı atomun frekansına ayarlanırsa ya elektromanyetik alandan atoma ya da atomdan elektromanyetik alana enerji aktarımı olur. İki frekansın birbirine ayarlanmasına “rezonans” denir [16].

Bunların öncelikle S parametreleri ($S_{11(\text{Lineer-Faz})}$ - $S_{21(\text{Lineer-Faz})}$) Network Analizör cihazı ile ölçülmüştür. Hesaplamalar NRW ve Etkin Yöntem'e göre matlab programında kod yazılarak yapılmıştır ve aynı programla grafikler çizilmiştir. Bölüm 7'de sonuçlar kısmındaki grafiklerde geçen 'Program' Agilent Material Measurement Software isimli hazır paket programdır. Dielektrik katsayısını NRW

yöntemle hesaplamaktadır [8]. Ölçüm sonrası alınan sonuçlarla bu program sonrası alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Hesaplanan kompleks dielektrik katsayıları sonuçları “CST Computer Simulation Technology-Mikrodalga Uygulamaları hazır paket programında çizilen düzende oluşturulan sanal malzeme için veri parametreleri olarak girilip, bu değer s parametreleri hesaplamada kullanılmışlardır. Gerçek düzenek Tablo 5.1’de verilen dalga kılavuzu ölçülerinde çizilmiştir. Buradan alınan benzetim sonuçları gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.1. Frekans bandları ve standart dalga kılavuzlarına ait bilgiler.

	X-Band	Ku-Band	P-Band
Frekans(GHz)	8.2-12.4	12.4-18	9.84-15
Standart dalgakılavuzu İç boyutları(mm)	(22.86-10.16)	(25.40-12.70)	(9.525-19.05)

BÖLÜM 6. HESAPLAMA METOLARI

Bu çalışmada alınan ölçümlerde Geçiş/Yansıma ölçüm yönteminden biri olan Dalga Kılavuzu Yöntemi tercih edilmiştir. Birçok Dalga Kılavuzu Yöntemi ile yapılan ölçümleri hesaplamak için bir çok hesaplama yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan aşağıdaki yöntemler:

- Nicolson-Ross Weir yöntemi
- Etkin yöntem
- Dalga Kılavuzu Yöntemi

çalışılmıştır. Bu çalışmaların algoritmaları şu şekildedir:

6.1. Nicolson Ross Weir Yöntemi

1970 yılında Nicolson Ross tarafından çalışılmış ve 1974 yılında Weir tarafından tekrardan düzenlenmiştir [19,20]. S_{11} ve S_{21} parametreleri ile hesaplama yapılmaktadır [6]. Elektrik (Permittivity) ve manyetik (Permeability) geçirgenlik katsayıları hesaplanır [17]. Düşük rezonanslı malzemeleri hesaplar fakat duyarlılığını kaybeder. Bu yöntem kısaca NRW yöntemi olarak adlandırılır [5]. NRW algoritmasında yansıma katsayısı;

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (6.1)$$

K (4.17)'de hesapladıktan sonra (4.17)'de yerine yazılır.

$$K = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2)^2 + 1}{2S_{11}} \quad (6.2)$$

İşaretin pozitif veya negatif olması $\Gamma \leq 1$ şartına göre seçilir. İletim yansımaya katsayısı ise

$$\mathbf{T} = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (6.3)$$

İle ifade edilir. Buradan itibaren elektrik ve manyetik geçirgenlik hesaplanır.

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0^2}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_c^2}\right)}} \quad (6.4)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[\left(\frac{1}{\lambda_c^2}\right) - \left(\frac{1}{\Lambda^2}\right) \right]} \quad (6.5)$$

Λ 'yı ise,

$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{\mathbf{T}} \right) \right]^2 \quad (6.6)$$

ifadesinden hareketle hesaplayabiliriz. λ_0 serbest alan dalga boyu, λ_c kesim dalga boyu olarak verilir.

6.2. Etkin Yöntem (NIST)

Boughriet ve arkadaşları. (1997). Yarım dalga boyu frekansındaki yanlışlıkları belirli bir sınıra çekerek aşağıdaki algoritmaları geliştirmişlerdir [6]. Nicolson Ross Weir Yöntem'deki formüllerden (4.16), (4.17), (4.18), kullanılarak aşağıdaki algoritmalarından yalnızca elektrik geçirgenlik katsayısı hesaplanabilir [17]. Bu yöntem NRW'deki yanlışlık doruklarını daha doğru sonuca indirgemıştır [5].

$$\lambda_{0g} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0^2}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_c^2}\right)}} \quad (6.7)$$

Buradan Etkin μ (μ_{ff}) aşağıdaki gibi hesaplanır. Bu yöntemde $\mu_{ff} = \mu = 1$ alınmalıdır:

$$\mu_{ff} = \frac{\lambda_{0g} (1+\Gamma)}{\Lambda (1-\Gamma)} \quad (6.8)$$

$$\epsilon_{ff} = \frac{\lambda_{0g} (1-\Gamma)}{\Lambda (1+\Gamma)} \quad (6.9)$$

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \epsilon_{ff} + \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2} \frac{1}{\mu_{ff}} \quad (6.10)$$

Buradan;

$$\epsilon_{ff} = (\epsilon_{ff} \mu_{ff})^n = \left(\frac{\lambda_{0g}}{\Lambda}\right)^n \quad (6.11)$$

yazılır.

6.3. Dalga Kılavuzu Yöntem

Şekil 4.6.'da mükemmel bir örnek ve dalga kılavuzu düşünelim. TE_{10} modunda örnek yansımaya ve iletim katsayısı arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir [5]:

$$S_{11} = R_1^2 \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (6.12)$$

$$S_{22} = R_2^2 \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (6.13)$$

$$S_{21} = S_{12} = R_1 R_2 \left[\frac{T(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \right] \quad (6.14)$$

Burada $T = \exp(-\gamma L)$, $R_1 = \exp(-\gamma_0 L_1)$, $R_2 = \exp(-\gamma_0 L_2)$, γ_0, γ hava ve örnek için temel modda yayılım sabitleridir. Yansıma katsayısı Γ aşağıdaki gibi yazılır [18].

$$\Gamma = \frac{\frac{\mu - \mu_0}{\gamma - \gamma_0}}{\frac{\mu + \mu_0}{\gamma + \gamma_0}} \quad (6.15)$$

Örneğin manyetik geçirgenlik katsayısını $\mu = (\mu'_r - i\mu''_r)\mu_0 = \mu_r\mu_0$ olarak yazabiliriz. Elektrik geçirgenlik ϵ_r ile hava ve örnek için yayılım sabitini (γ_0, γ)

$$\epsilon = (\epsilon'_r - i\epsilon''_r)\epsilon_0 = \epsilon_r\epsilon_0 \quad (6.16)$$

$$\gamma_0 = i \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} \quad (6.17)$$

$$\gamma = i \frac{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}\right)^2} \quad (6.18)$$

olarak yazabiliriz. Şu ana kadar genel formüller verilmiştir. Dalga Kılavuzu yöntemi çözümleri için bir kalınlıktaki ölçüm sonuçları yeterli değildir. Birbirinin katı olan iki kalınlık alınarak bunların iletim ve yansıma parametreleri ölçülür. Yukarıdaki denklemleri iki kalınlık için tekrar yazacak olursak [21],

$$T_{(1)} = \exp(-\gamma L_1) \quad (6.19)$$

$$T_{(2)} = \exp(-\gamma L_2) \quad (6.20)$$

$$\Gamma_{(1)} = \Gamma_{(2)} = \Gamma \quad (6.21)$$

olur. Aşağıda $S_{21(1)}$, $S_{21(2)}$ yazılmıştır:

$$S_{21(1)} = \left[\frac{T_{(1)}(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T_{(1)}^2} \right] \quad (6.22)$$

$$S_{21(2)} = \left[\frac{T_{(2)}(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T_{(2)}^2} \right] \quad (6.23)$$

İletim katsayısı ise şu şekilde yazılır:

$$T_{(2)} = T_{(1)} \exp(-\gamma \Delta L) \quad (6.24)$$

$\Delta L = L_{(2)} - L_{(1)} - (L_{(2)} > L_{(1)})$ parametrelerinden $S_{21(2)}$ 'yi aşağıdaki

gibi yazabiliriz:

$$S_{21(2)} = \left[\frac{T_{(1)}(-\gamma \Delta L)(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 T_{(1)}^2 \exp(-2\gamma \Delta L)} \right] \quad (6.25)$$

(6.22) numaralı denklemi kullanarak S_{21} için 2. dereceden denklem yazarsak:

$$T_{(1)}^2 \Gamma^2 S_{21(1)} + T_{(1)}(1-\Gamma^2) - S_{21(1)} = 0 \quad (6.26)$$

olur. Buradan $T_{(1)}^2$ belirlenir:

$$T_{(1)}^2 = \left[\frac{-T_1(1-\Gamma^2) + S_{21(2)}}{S_{21(2)}\Gamma^2} \right] \quad (6.27)$$

Bundan sonra $S_{21(2)}$ parametresi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_{21(2)} = \frac{T_{(1)} \exp(-\gamma\Delta L)(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 \left[\frac{T_{(1)}(1-\Gamma^2) + S_{21(1)}}{S_{21(1)}\Gamma^2} \right] \exp(-2\gamma\Delta L)} \quad (6.28)$$

Sonra buradan iletim katsayısını $T_{(1)}$ yazabiliriz.

$$T_{(1)} = \frac{S_{21(2)}S_{21(1)} \sin(\gamma'\Delta L)2i}{S_{21(1)}(1-\Gamma^2) - S_{21(2)}(1-\Gamma^2) \exp(-i\gamma'\Delta L)} \quad (6.29)$$

$i = \sqrt{-1}$; $\gamma' = \gamma/i$ 'ye eşittir. Şimdi (6.19) ve (6.29) numaralı denklemleri kullanarak $(1 - \Gamma^2)$ 'yi yazarsak;

$$(1 - \Gamma^2) = \exp \left\{ \ln \left[\frac{S_{21(2)}S_{21(1)} \sin(\gamma'\Delta L)2i}{S_{21(1)} - S_{21(2)} \exp(-i\gamma'\Delta L)} \right] + i\gamma' L_1 \right\} \quad (6.30)$$

$$\Gamma = \pm \sqrt{1 - \exp \left\{ \ln \left[\frac{S_{21(2)}S_{21(1)} \sin(\gamma'\Delta L)2i}{S_{21(1)} - S_{21(2)} \exp(-i\gamma'\Delta L)} \right] + i\gamma' L_1 \right\}} \quad (6.31)$$

Kompleks manyetik geçirgenlik katsayısı (6.15) numaralı denklemden tanımlanır:

$$\mu_r = \gamma_r' \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right) \quad (6.32)$$

$$\gamma_r' = \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad (6.33)$$

$$\gamma_0' = \frac{\gamma_0}{i} \quad (6.34)$$

Kompleks dielektrik katsayısını γ_r' yi kullanarak bulabiliriz.

$$\gamma_r'^2 = \frac{\mu_r \epsilon_r \frac{\lambda_0^2}{4a^2}}{1 - \frac{\lambda_0^2}{4a^2}} \quad (6.35)$$

Buradan

$$\epsilon_r = \frac{\gamma_r'^2}{\mu_r} + \frac{\lambda_0(1-\gamma_r'^2)}{4a^2\mu_r} \quad (6.36)$$

ifadesini yazabiliriz. Malzeme parametreleri gösteriyor ki eğer yayılım sabiti hesaplanabilirse, ϵ_r ve μ_r 'de hesaplanabilir. (6.19)'dan $T_{(1)}$ ve (6.29)'dan $S_{21(1)}$ denklemlerini kullanarak Transendental Denklemini yazarsak,

$$S_{21(1)} = \frac{S_{21(2)}S_{21(1)} \sin(\gamma'\Delta L)(1-\Gamma^2)2i}{F_1F_2} \quad (6.37)$$

olur. F_1 ve F_2 'yi

$$F_1 = S_{21(1)}(1 - \Gamma^2) - S_{21(2)}(1 - \Gamma^2)\exp(-i\gamma'\Delta L) \quad (6.38)$$

$$F_2 = 1 + \frac{4\Gamma^2 S_{21(2)}^2 S_{21(1)}^2 \sin^2(\gamma'\Delta L)}{S_{21(1)}^2(1-\Gamma^2)^2 - S_{21(2)}S_{21(1)}(1-\Gamma^2)^2 + S_{21(2)}^2(1-\Gamma^2)^2 \exp(-i2\gamma'\Delta L)} \quad (6.39)$$

olarak tanımlarız. F_1 ve F_2 'yi yerine yazarsak istenilen transandantal denklem olan (6.37)'yi elde etmiş oluruz ki bu aşağıdaki gibidir.

$$1 = \frac{S_{21(2)} \sin(\gamma' \Delta L) 2i}{[S_{21(2)} - S_{21(1)} \exp(-i\gamma' \Delta L)] \left[1 + \frac{4\Gamma^2 S_{21(2)}^2 S_{21(1)}^2 \sin^2(\gamma' \Delta L)}{(1-\Gamma^2)^2 [S_{21(1)}^2 - 2S_{21(2)} S_{21(1)} \exp(-i2\gamma' \Delta L)]} \right]} \quad (6.40)$$

$$\Gamma^2 = 1 - \exp \left\{ \ln \left[\frac{S_{21(2)} S_{21(1)} \sin(\gamma' \Delta L) 2i}{S_{21(1)} - S_{21(2)} \exp(-i\gamma' \Delta L)} \right] + i\gamma' L_{(1)} \right\} \quad (6.41)$$

$$(1 - \Gamma^2)^2 = \exp \left\{ 2 \left\{ \ln \left[\frac{S_{21(2)} S_{21(1)} \sin(\gamma' \Delta L) 2i}{S_{21(1)} - S_{21(2)} \exp(-i\gamma' \Delta L)} \right] + i\gamma' L_{(1)} \right\} \right\} \quad (6.42)$$

Denklem (6.40) çözülür ve daha sonra malzemenin kompleks elektrik geçirgenlik katsayısı (ϵ_r) ve manyetik geçirgenliği (μ_r) bulunur. a dalga kılavuzunun x eksenindeki boyutudur [21]. Üç yöntem içinde uygun örnek kalınlığı aşağıda verilmiştir (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. Yöntemlere göre örnek kalınlıkları

Hesaplama Algoritması	Ölçüm	Optimum Kalınlık	Hesaplanan
Nicolson-Ross Yöntem	S_{11}, S_{21} ,	$\lambda_g/4$	ϵ_r, μ_r
Etkin Yöntem	S_{11}, S_{21} ,	$\lambda_g/4$	ϵ_r
Dalga Kılavuzu Yöntemi	S_{21}	Birbirin iki katı olan iki kalınlık	ϵ_r, μ_r

λ_g grup dalga boyu olmak üzere.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\left(\sqrt{\left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2} \right)} \quad (6.43)$$

formülü ile hesaplanır ve bu değer uygun örnek kalınlığını bulmada kullanılır. [6]

BÖLÜM 7. SONUÇLAR

7.1 başlığında. X band frekansında iki ayrı yöntemle inceleme yapılarak Agilent material Measurement Software Programı ile karşılaştırması yapılmıştır [8].

7.2. bölümünde ise Ku-band frekansında üç ayrı malzemenin iki ayrı yöntemle incelemesi yapıp yine Agilent material Measurement Software Programı ile karşılaştırması yapılmıştır [8].

7.3. bölümünde ise P-band frekansının hesaplama sonuçları görülmektedir. Yorumlar grafiklerin altında verilmiştir.

Bu çalışmadaki yöntemlerden X-band frekansı için Etkin Yöntem'in NRW Yöntemden daha hassas ve kararlı oldu sonucu çıkarılmıştır.

7. 4. Bölümünde ise benzetim sonuçları yer almaktadır.

Ku-band frekansında ise iki yöntemin birbirine yakın olmasının yanı sıra bazı frekans noktalarında NRW Yöntemin daha hassas ve kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ölçüm esnasındaki hatalar ve hesaplama esnasındaki faz kaymalarının hassasiyetinin yeterli olamaması ve örnek hazırlanırken hassasiyetin düşük olması söylenebilir.

P-band ölçümünde ise iki farklı kalınlıktaki malzeme ile manyetik, rezonans özelliği gösteren malzemeler, düşük kayıplı ve yüksek kayıplı malzemeler ölçülebilmektedir. Fakat bu yöntem fazın $0 < faz > \pm 180$ dışındaki bölgelerinde çalışmamaktadır. Malzemenin dalga boyunun yarısına denk gelen kalınlıklarda Rezonans oluşmasından dolayı faz $0 < faz > \pm 180$ bölgesinin dışına çıkmaktadır. Ölçüm ve

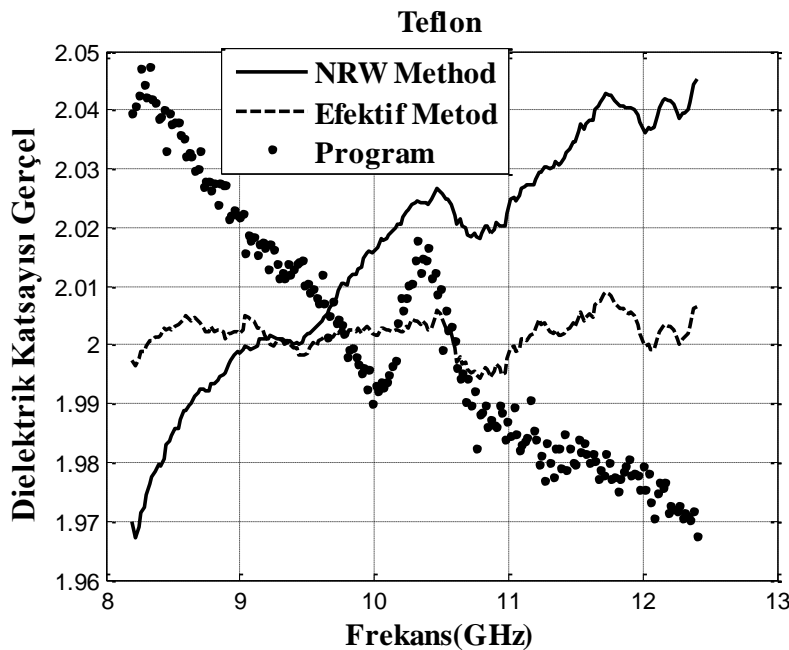
benzetim incelemesinde ince malzemelerde uyumluluk hassasiyeti daha düşüktür. Kalın malzemelerde ise uyum çok iyidir.

Malzemeler kalınlaşmaya başladıkça rezonans tepesi oluşturmaya başlamıştır. Bu rezonans tepelerinin konumu malzeme içinde ilerleyen dalga boyunun yarısına denk geldiği noktadadır. Aynı zamanda fazlarında bu bölgede $\pm 180^\circ$ değişim gösterdiği gözlemlenmiştir.

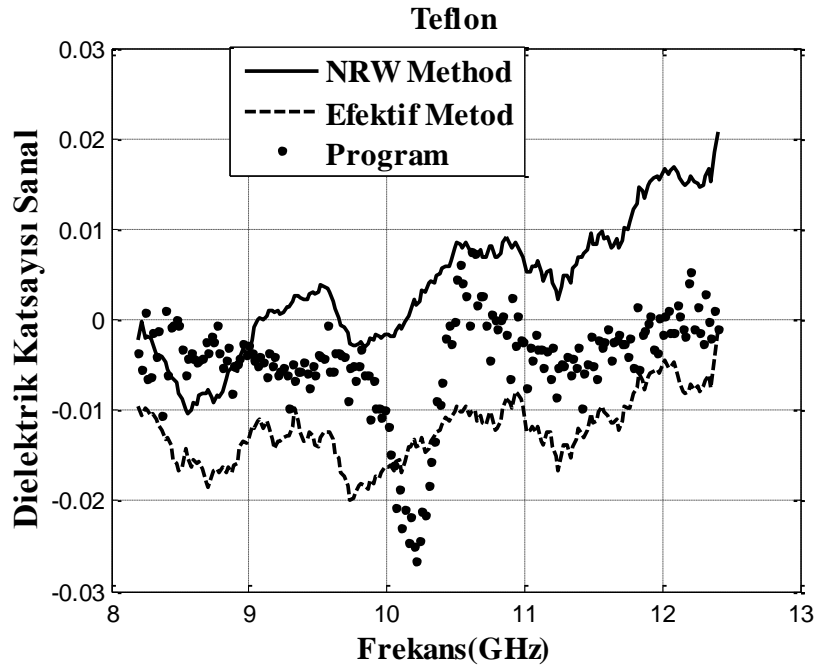
Ölçüm ve benzetim sonuçları büyük oranda uyumlu çıkmıştır. Yansıma ve iletim ölçümlerine ait faz değerleri bazı bölgelerde ölçüm hataları nedeniyle farklılık göstermişlerdir. Bu hatalar nedeniyle rezonans tepelerinde ölçüm ve benzetim değerleri arasında küçük kaymalar oluşmuştur (Şekil 7.55).

Yapılan deneysel ve teorik bilgiler ışığında her üç yöntemin de hata hesapları yapıldıktan sonra daha hassas ölçüm ve hesaplama yapılabilmesi için yeni yöntemler geliştirmek, aynı zamanda dispersiv malzemeleri bu uygulamalara dahil etmek olabilir.

7.1. X-Band Frekansı Dielektrik Katsayısı Sonuçları



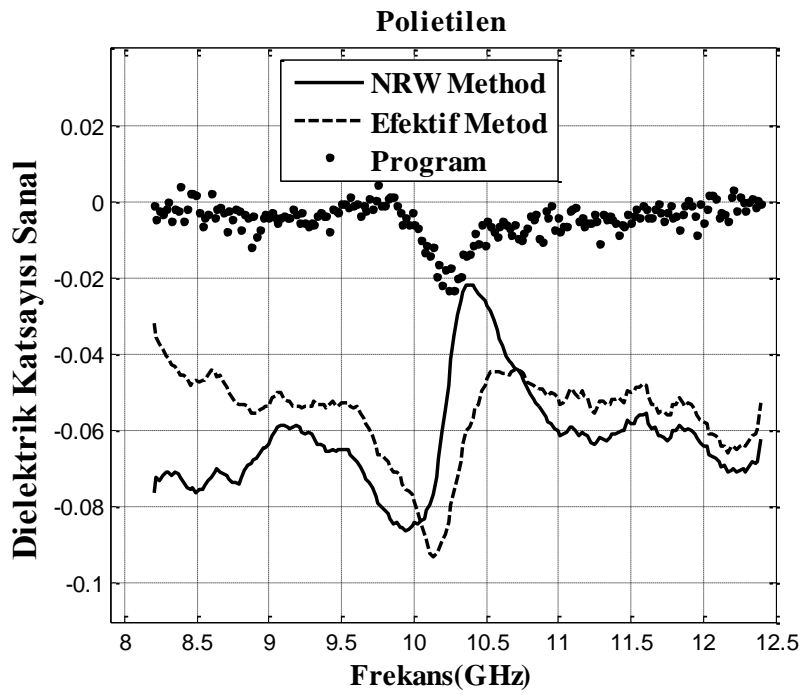
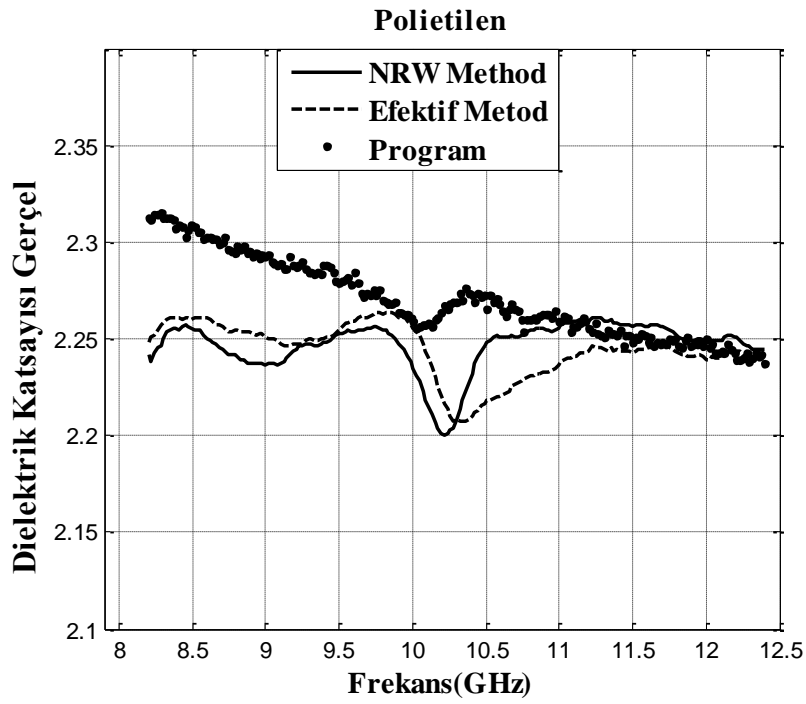
(a)



(b)

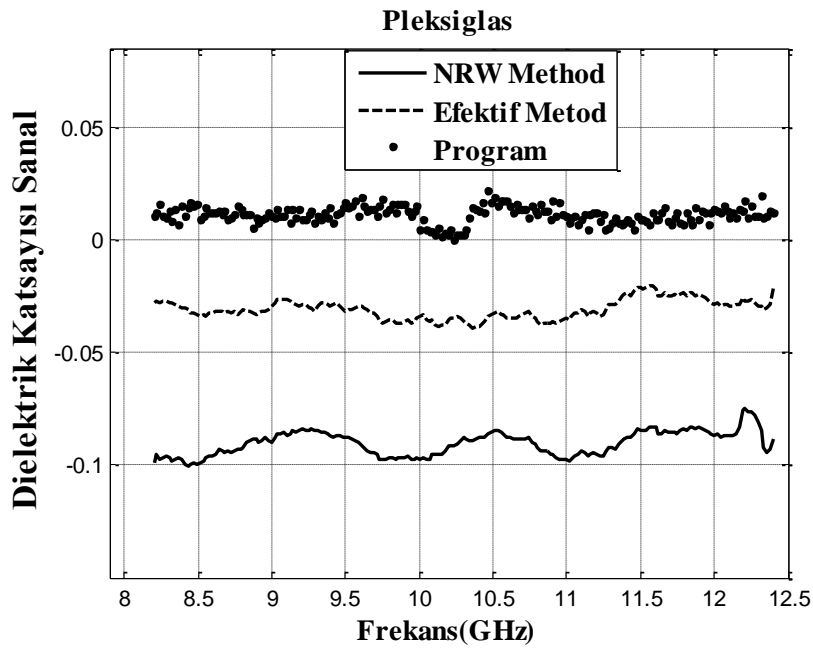
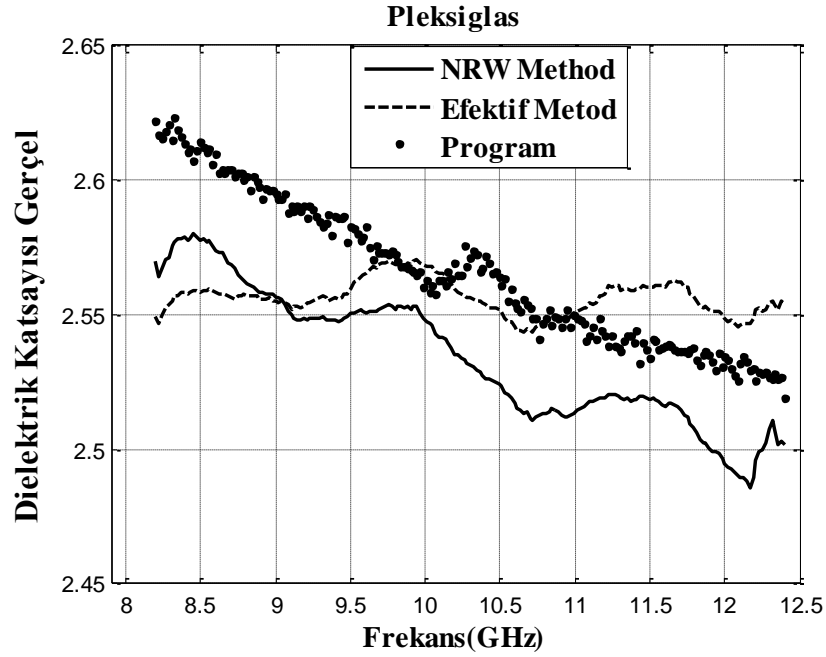
Şekil 7.1. 2 mm Teflon örneğın X-band frekansında (a), (b) gerçel ve sanal kısımları

NRW Yöntem ve program frekans taraması sırasında gerçel kısımda başlangıç ve bitiş frekansı arasında ∓ 0.07 'lik bir değişim sergilemiştir. Bu değişimler birbirlerinin tersidir. Aynı yöntem olmalarına karşın bunun sebebi ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır. Etkin Yöntem ise frekans taramasında gerçel ve sanal kısımda daha kararlı bir sonuç vermiştir.



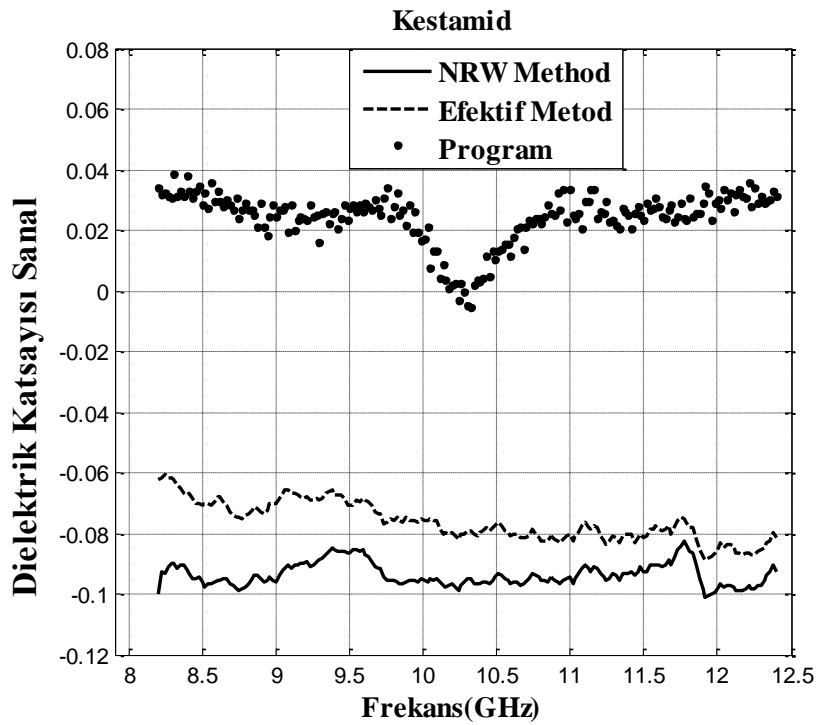
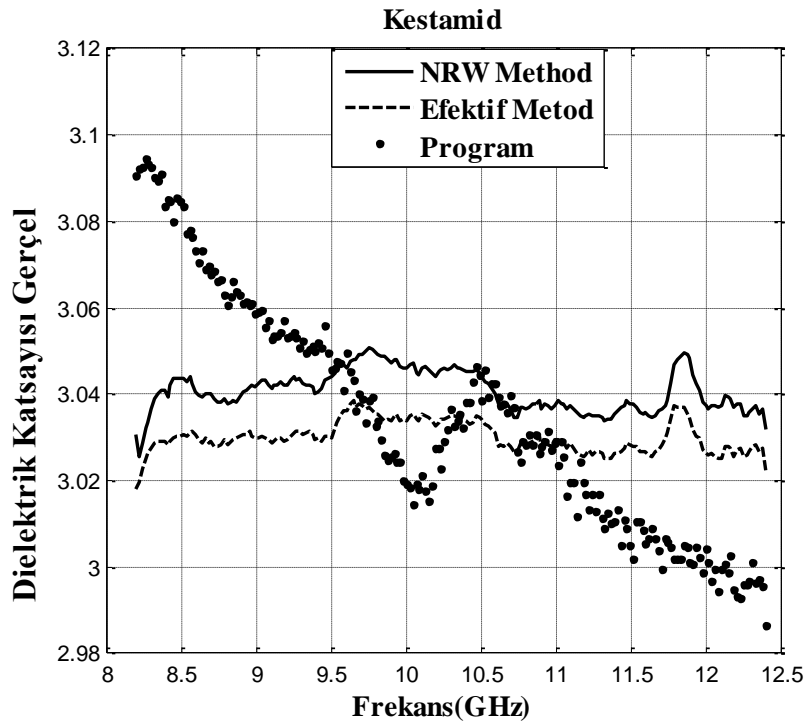
Şekil 7.2.10 mm Polietilen örneğin X-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları

Poliyeten örneğinde NRW ve Etkin Yöntemin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Program yine frekans taraması ile birlikte -0.09 civarında azalan bir eğri oluşturmuştur.



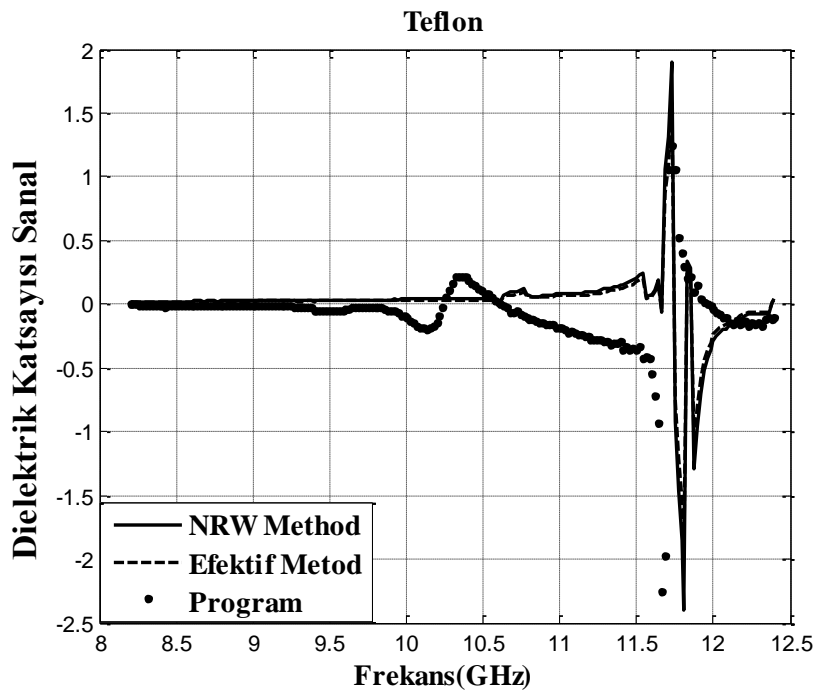
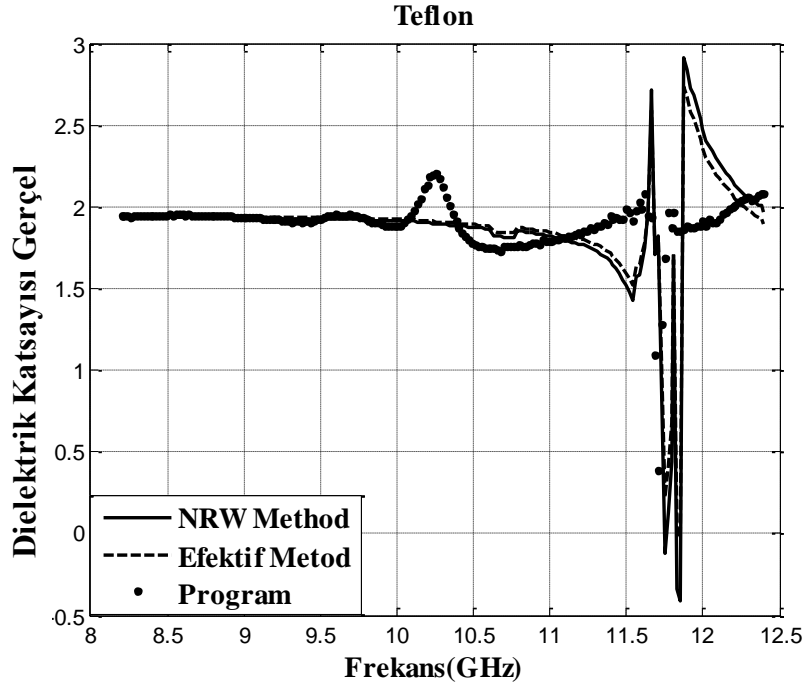
Şekil 7.3. 2 mm Pleksiglas örneğin X-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.

Bu malzemede de Etkin Yöntem diğerlerinden daha kararlıdır.



Şekil 7.4. 2 mm Kestamid örneğın X-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.

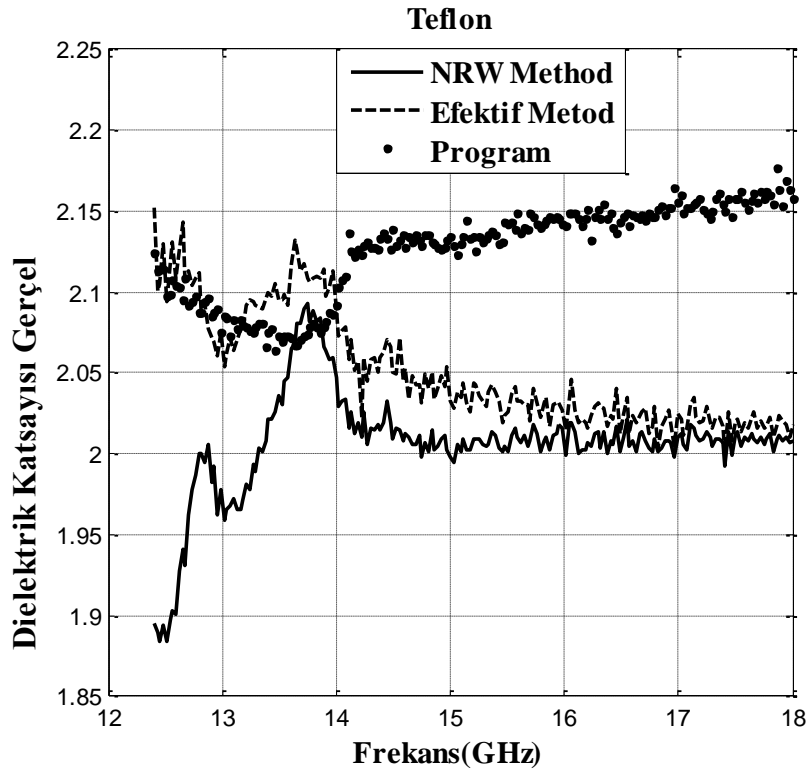
Kestamid örneğinin hesaplama sonucunda ise Etkin ve NRW yöntem birbirine yakın ve kararlı sonuçlar vermişlerdir.



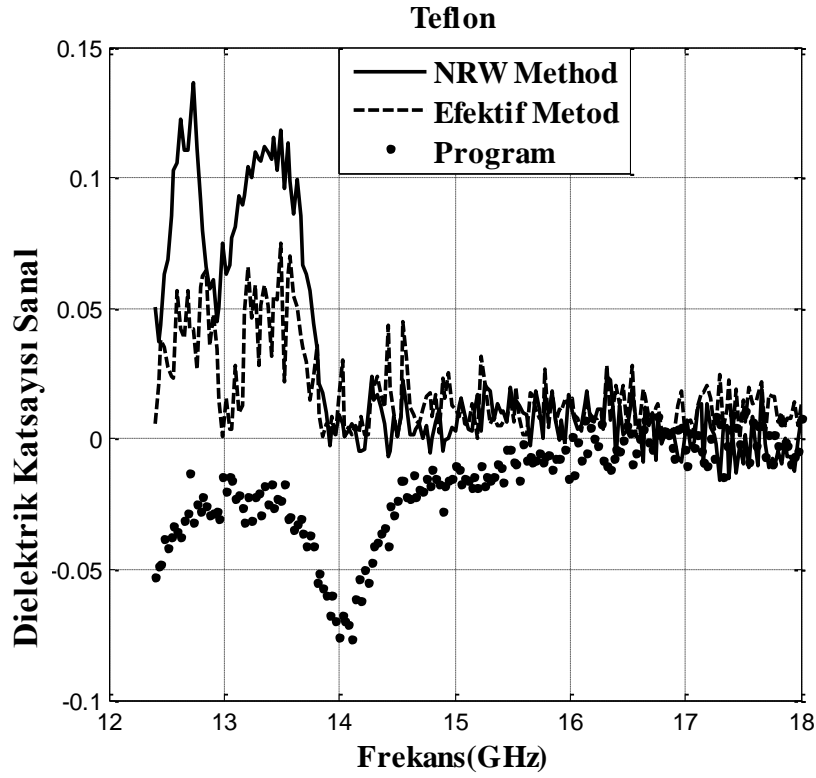
Şekil 7.5. 10mm Teflon örneğinin X-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları.

10mm kalınlıkta ki teflon rezonans piki vermesinden dolayı bu hesaplama yöntemleri için uygun kalınlık olmadığı anlaşılmaktadır. Etkin ve NRW yöntem yaklaşık olarak aynı sonucu vermiştir. Programda oluşan pikler burada bulunmamaktadır.

7.2. Ku-Band Frekansı Dielektrik Katsayısı

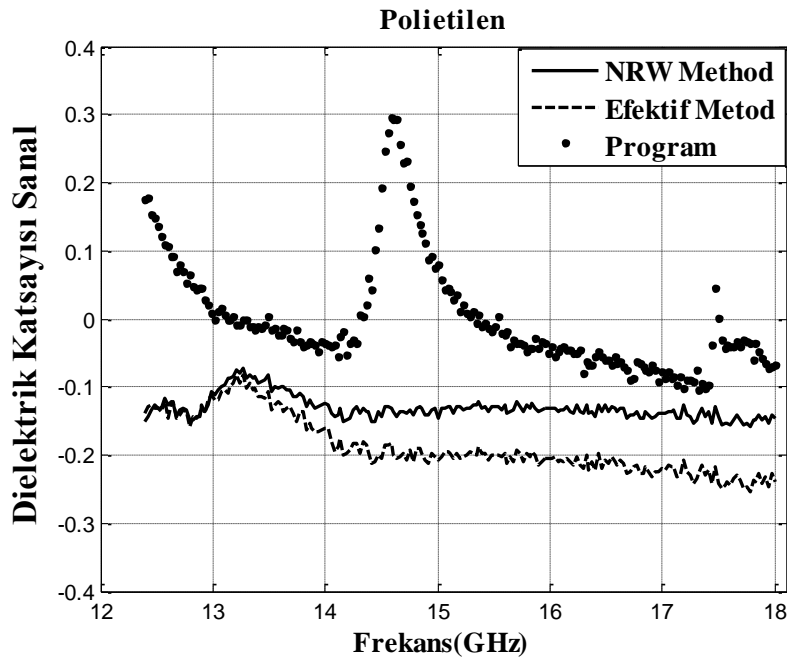
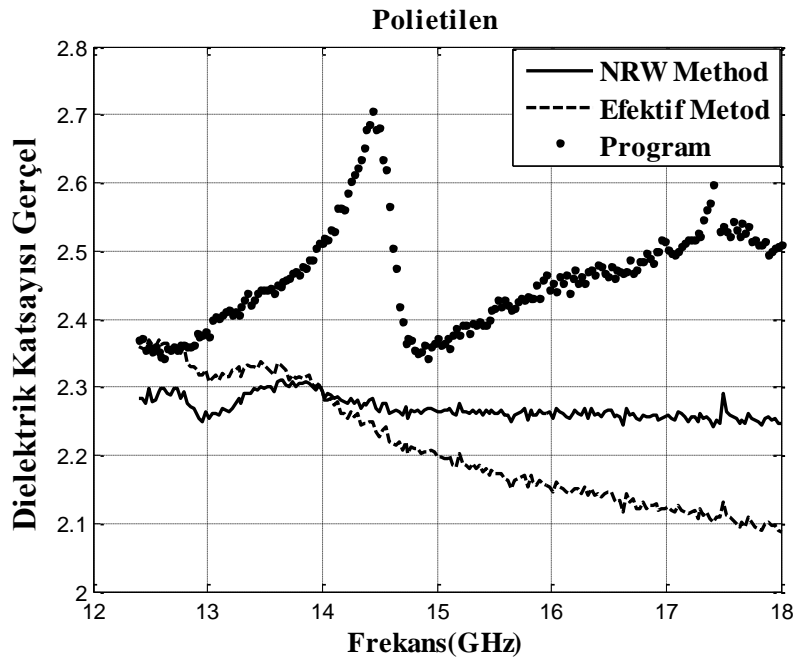


(a)



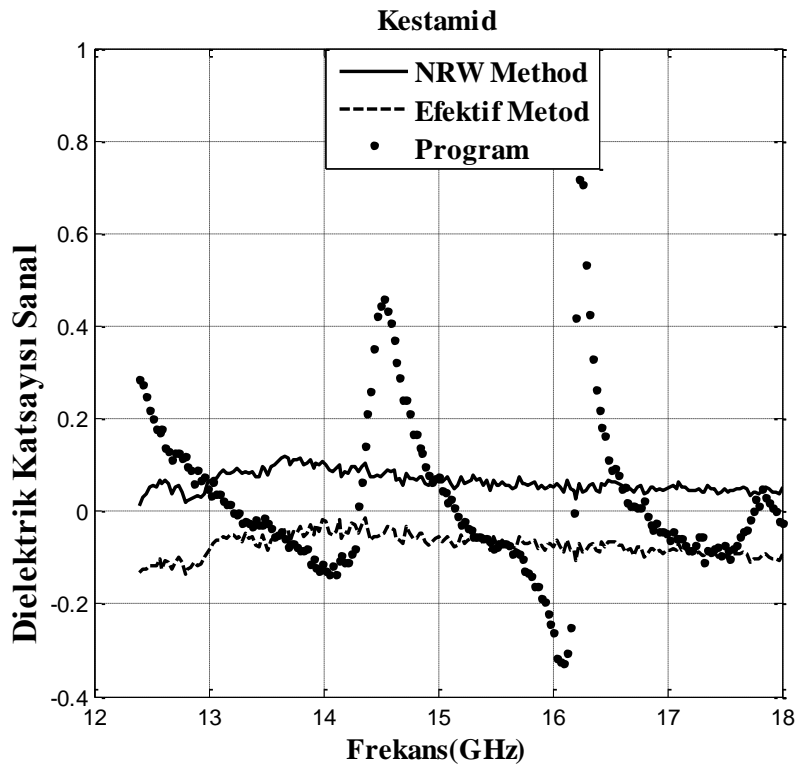
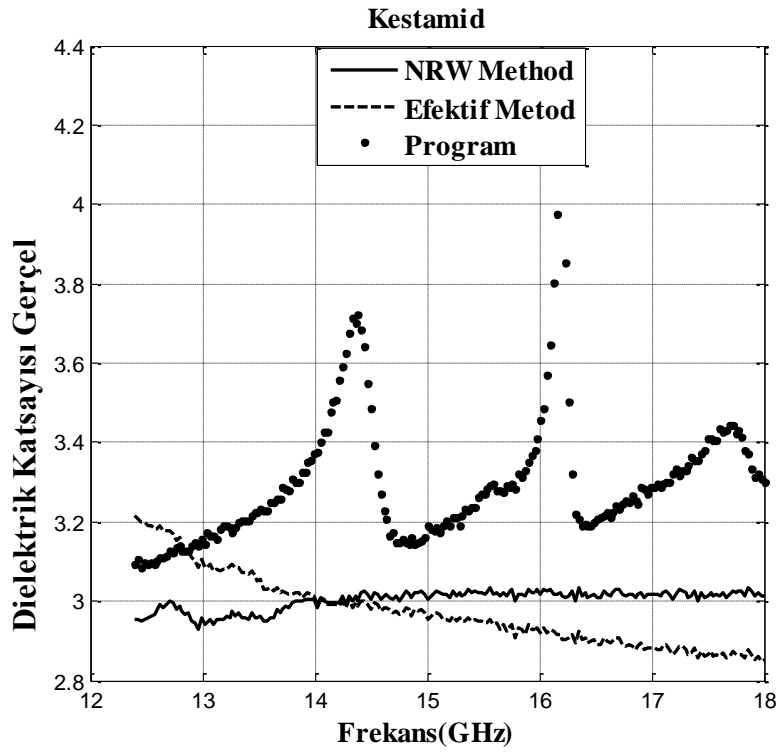
Şekil 7.6. 1 mm teflon örneğın Ku-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları.

Bu frekans bandında NRW Etkin yöntemler 12.4-14GHz arasında ölçüm hataları kaynaklı ve franksa bağılı değişim göstermişlerdir. Fakat 14-18GHz arasında ise daha kararlı ve yakın sonuçlar vermiştir. Programdan daha hassas sonuçlar elde edilmiştir.



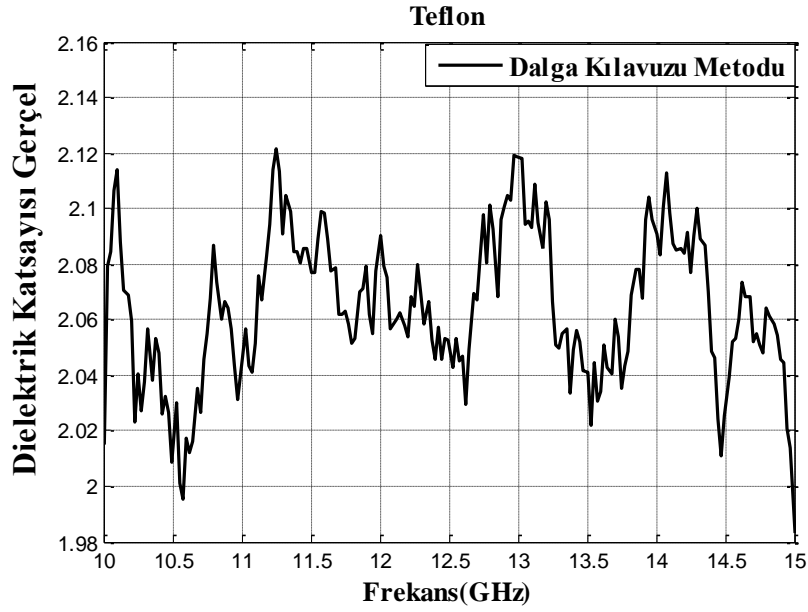
Şekil 7.7. 2 mm Polietilen örneğin Ku-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları

NRW ve Etkin yöntem birbirine yakın sonuçlar vermişlerdir.

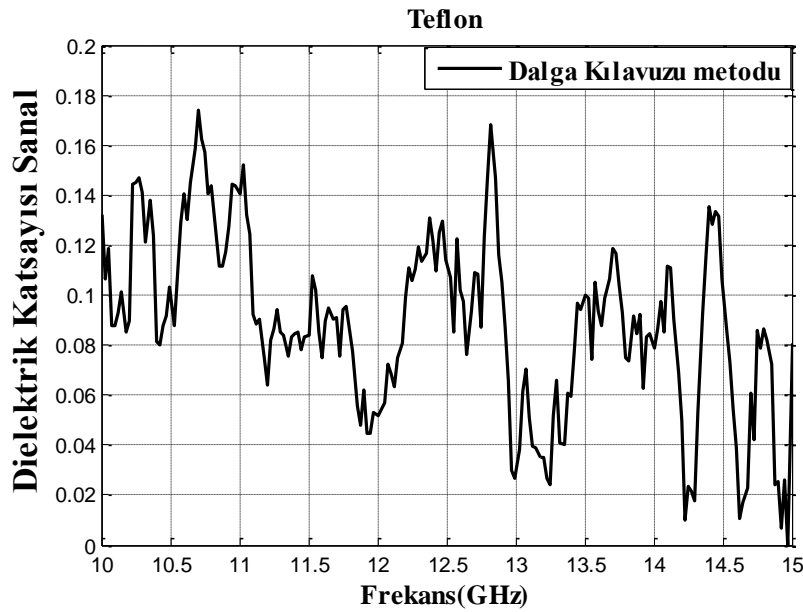


Şekil 7.8. 2 mm Kestamid örneğın Ku-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları.

7.3. P Band frekansı dielektrik katsayısı



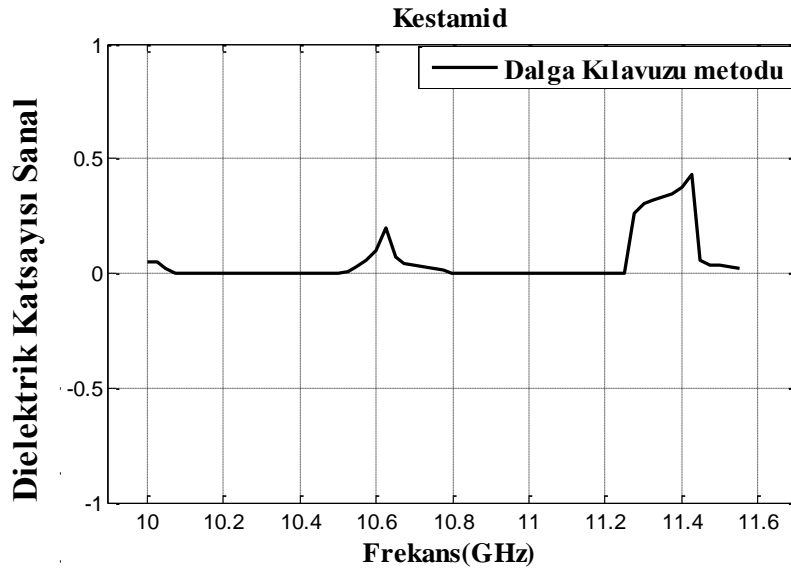
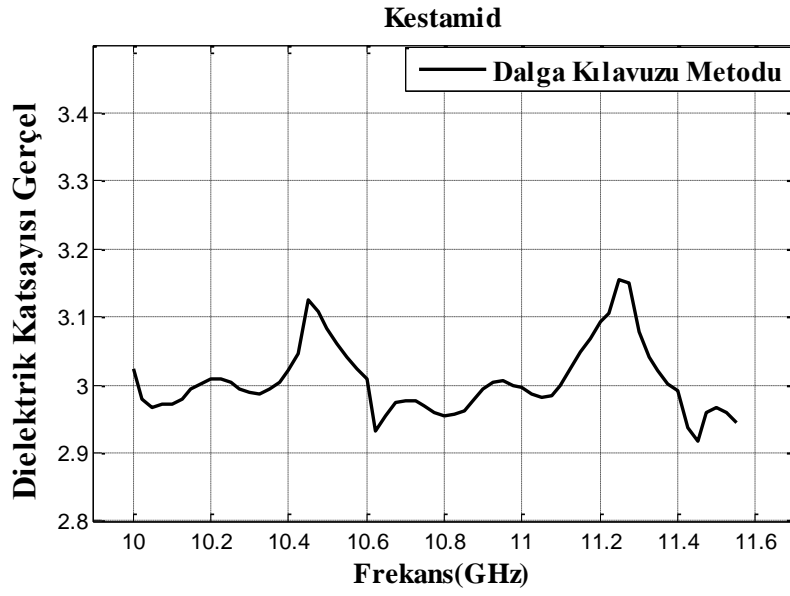
(a)



(b)

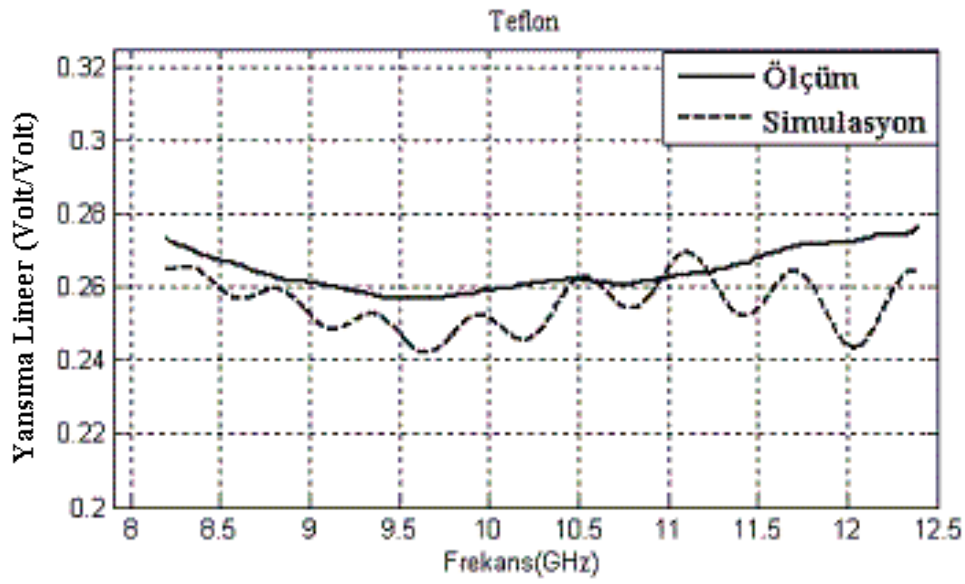
Şekil 7.9. 1 ve 2 mm kalınlıktaki teflon örneğin P-band frekansında (a) (b) Gerçel ve Sanal kısımları

Bu çalışmada frekans taraması ile birlikte maksimum ± 0.1 'lik salınımlar gerçekleştirilmiştir.

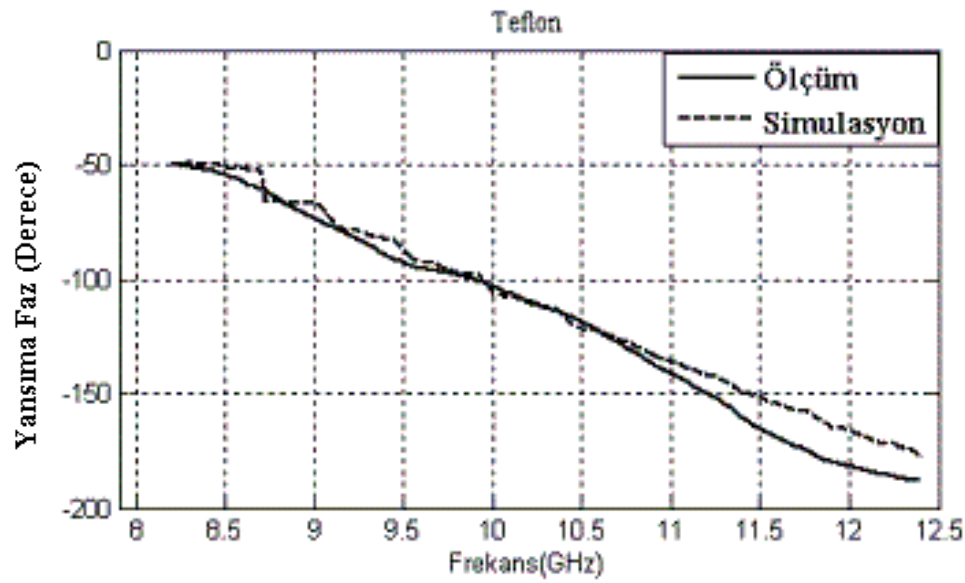


Şekil 7.10. 4 ve 8 mm kalınlıktaki Kestamid örneğin P-band frekansında (a), (b) Gerçel ve Sanal kısımları

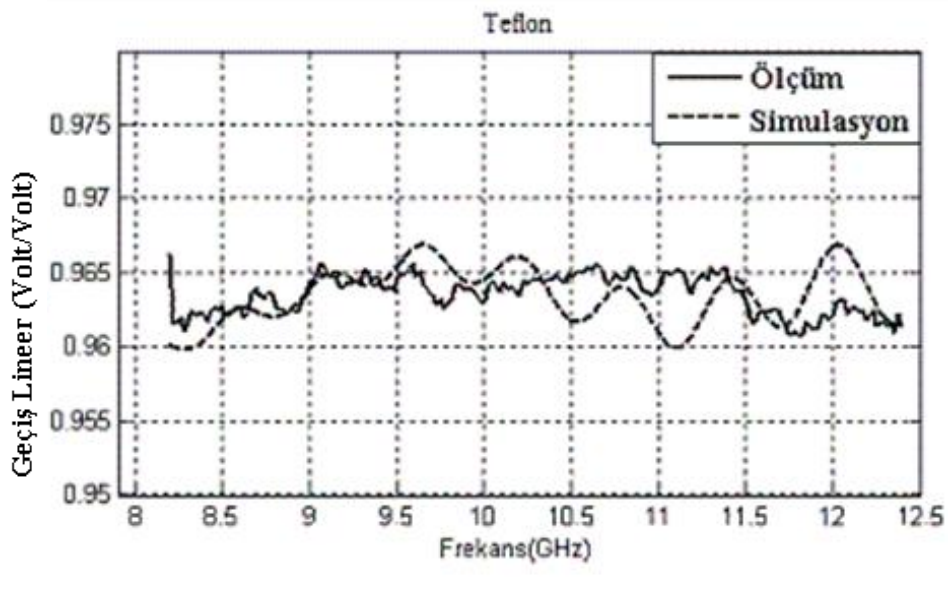
7.4. X-Band Benzetim Sonuçları



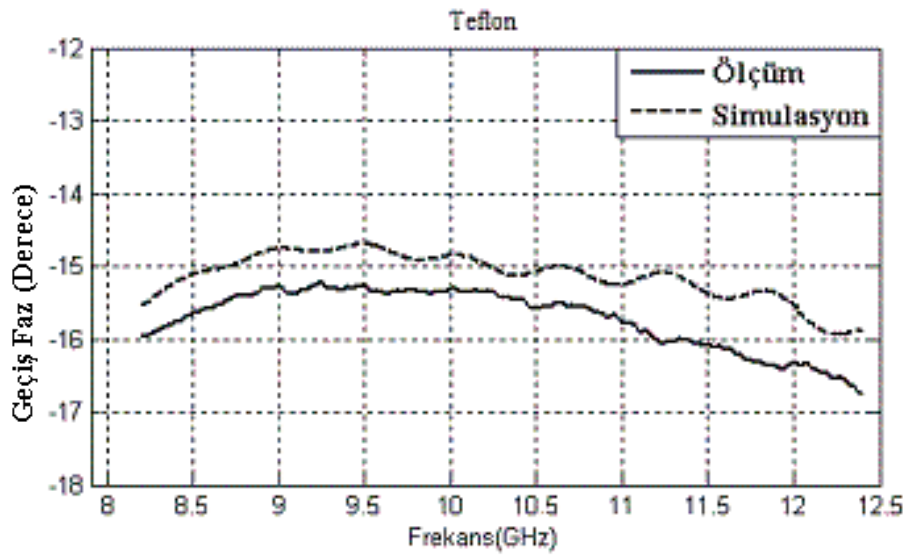
Şekil 7.11. 2mm Teflon örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



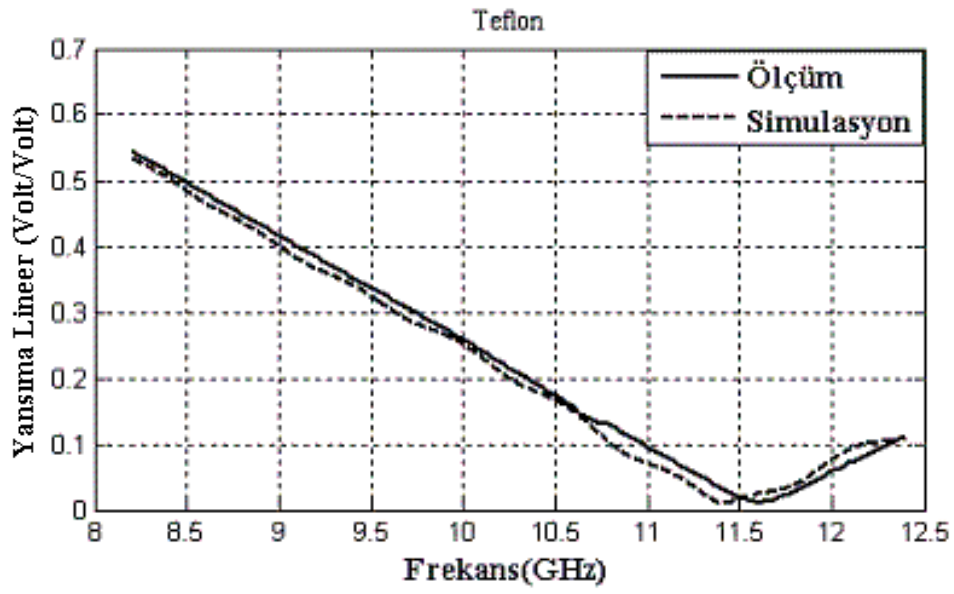
Şekil 7.12. 2mm Teflon örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



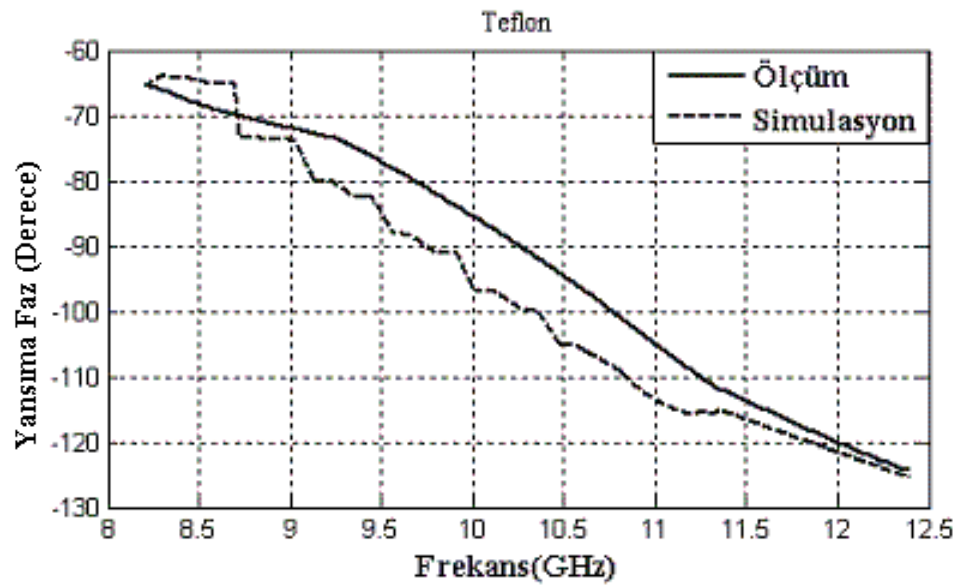
Şekil 7.13. 2 mm Teflon örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



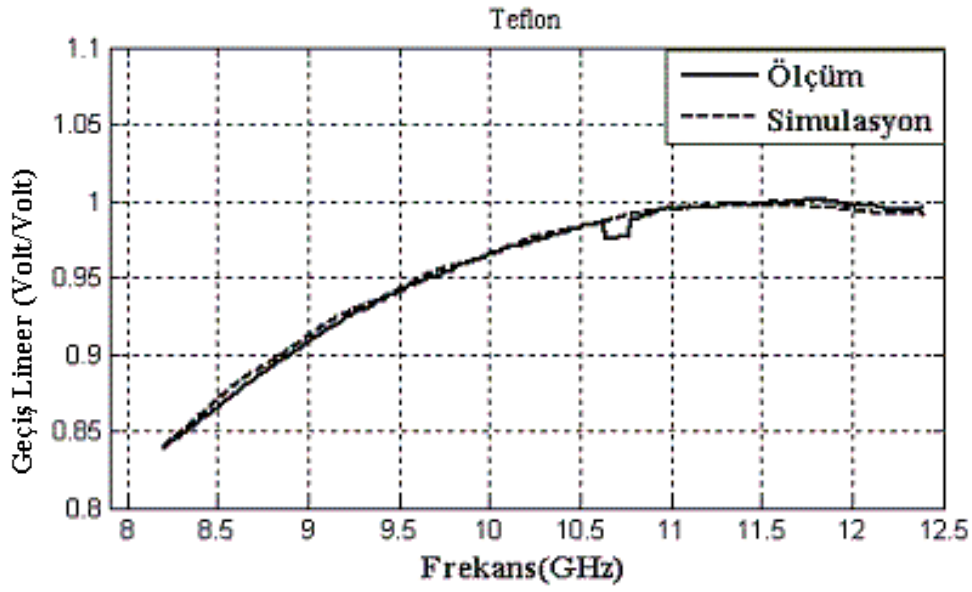
Şekil 7.14. 2 mm Teflon örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



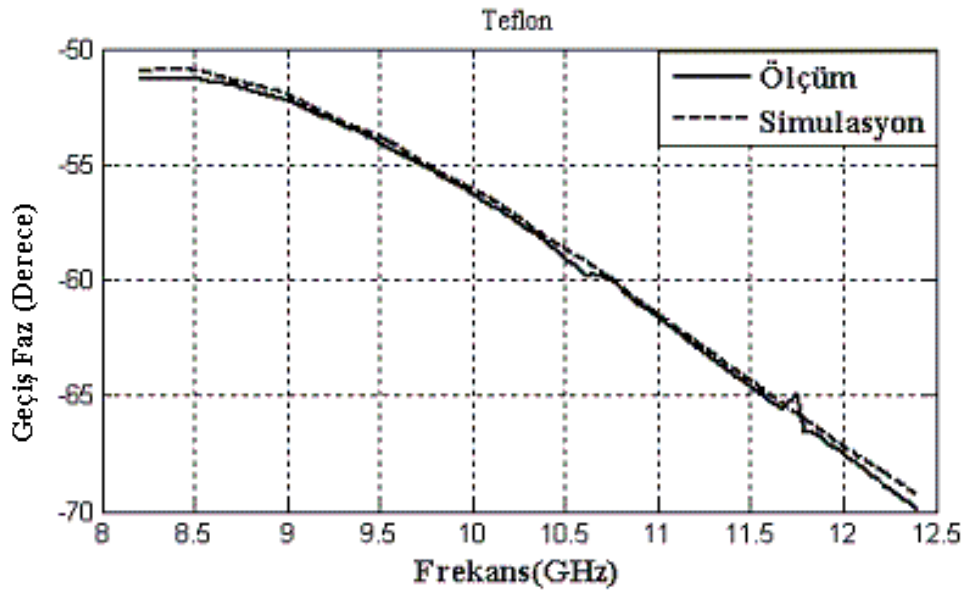
Şekil 7.15. 10 mm Teflon örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



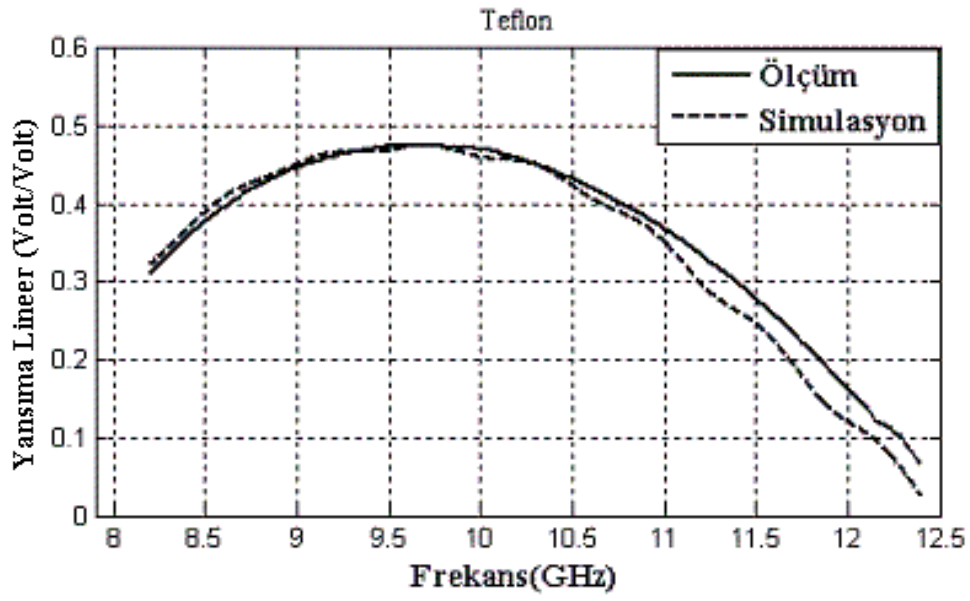
Şekil 7.16. 10 mm Teflon örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



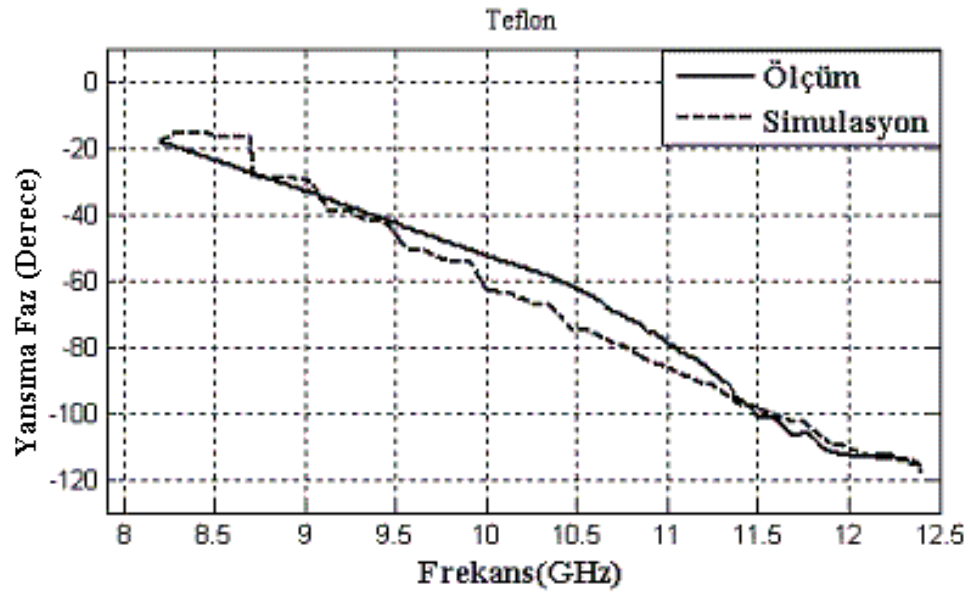
Şekil 7.17. 10 mm Teflon örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



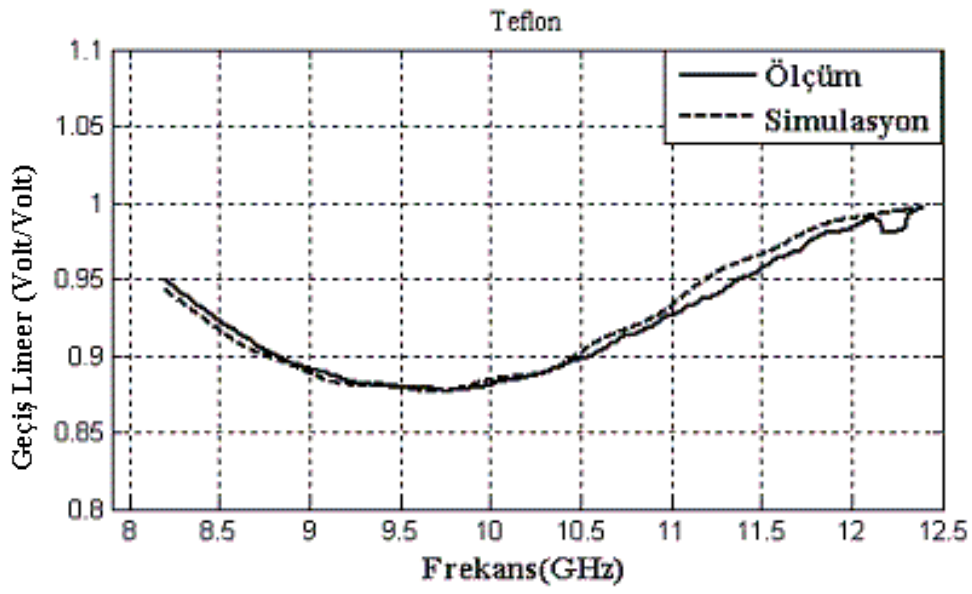
Şekil 7.18. 10 mm Teflon örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



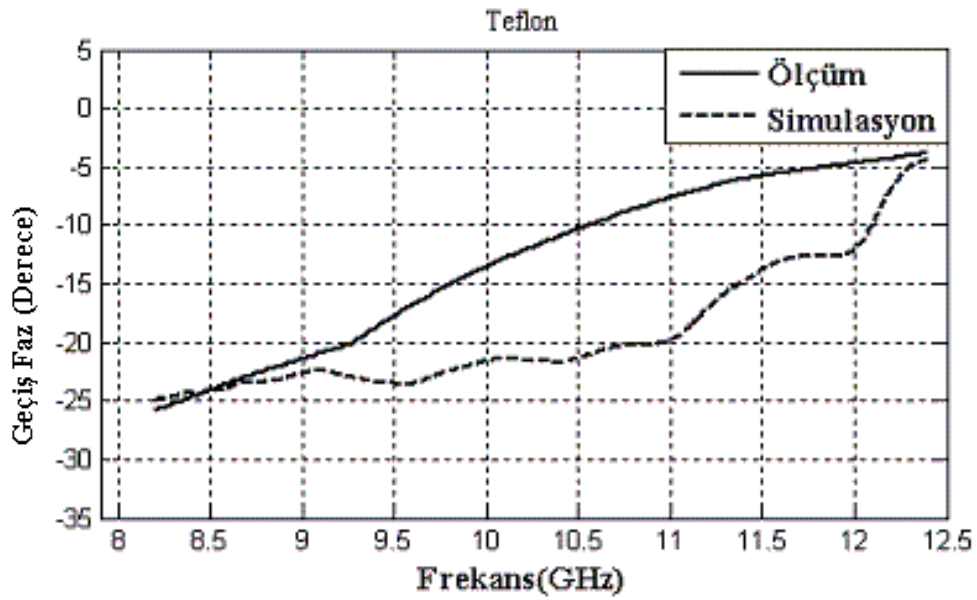
Şekil 7.19. 18 mm Teflon örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



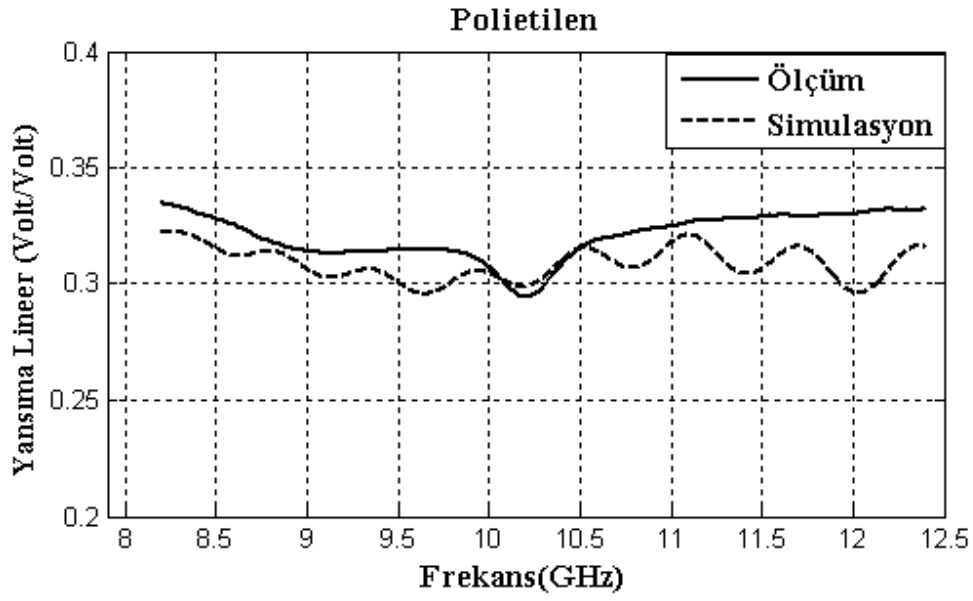
Şekil 7.20. 18 mm Teflon örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



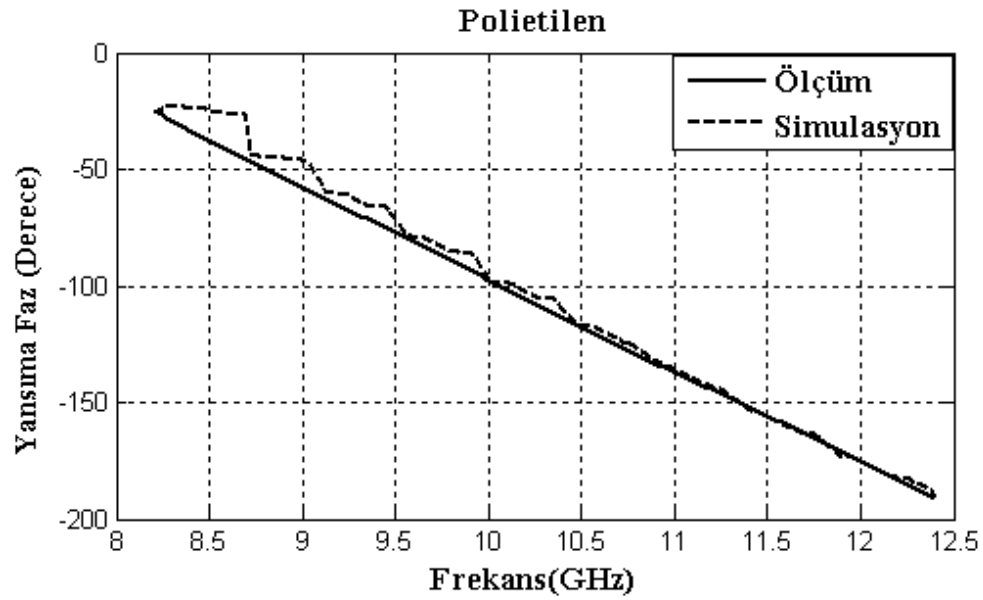
Şekil 7.21. 18 mm Teflon örneğin S_{21} Lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



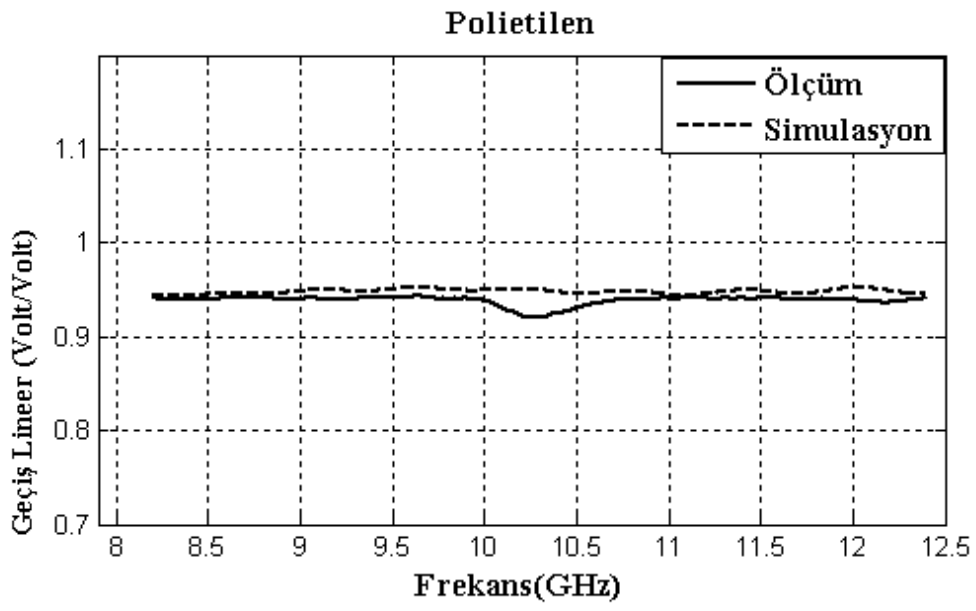
Şekil 7.22. 18 mm Teflon örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



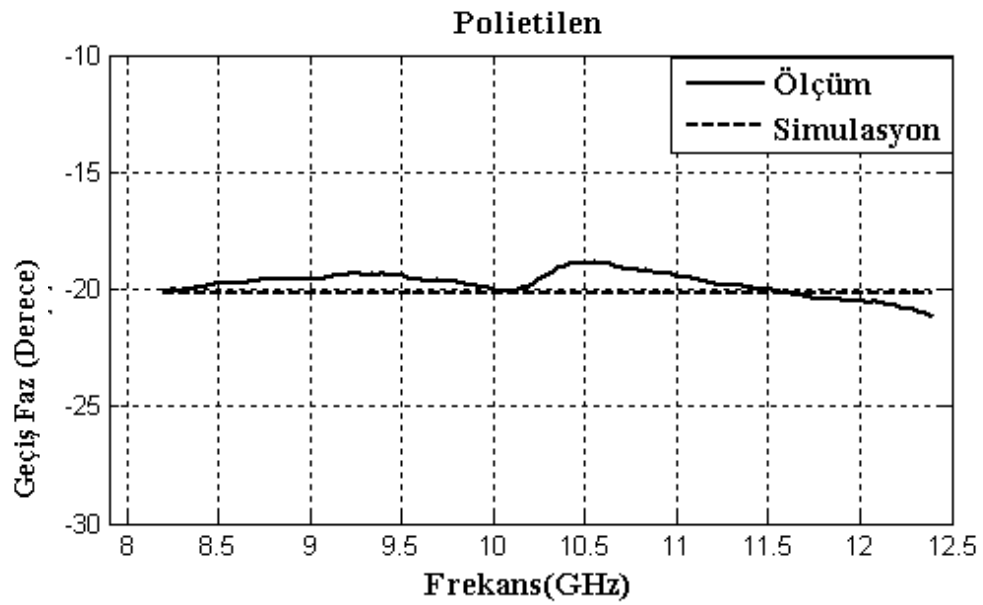
Şekil 7.23. 2 mm Polietilen örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



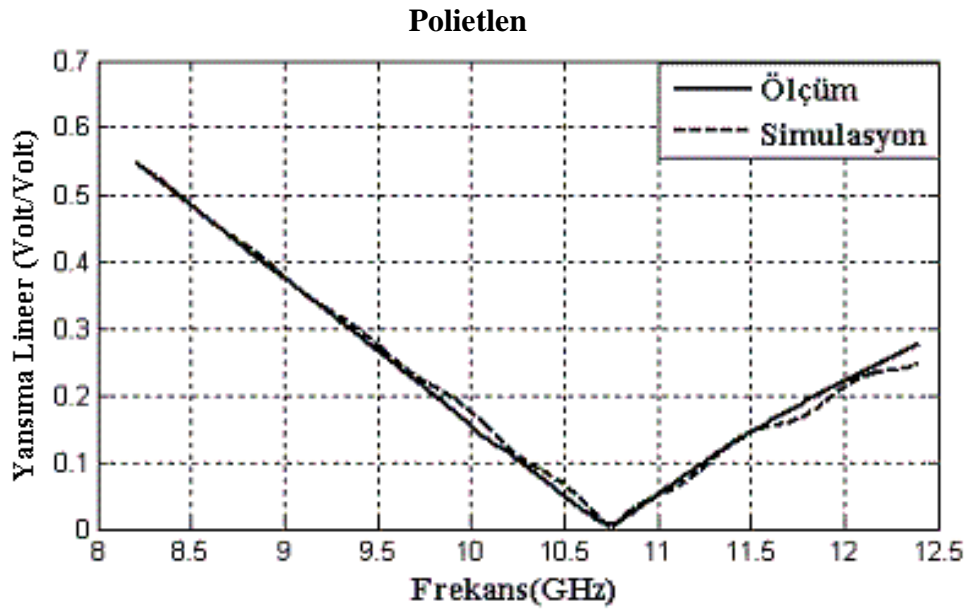
Şekil 7.24. 2 mm Polietilen örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



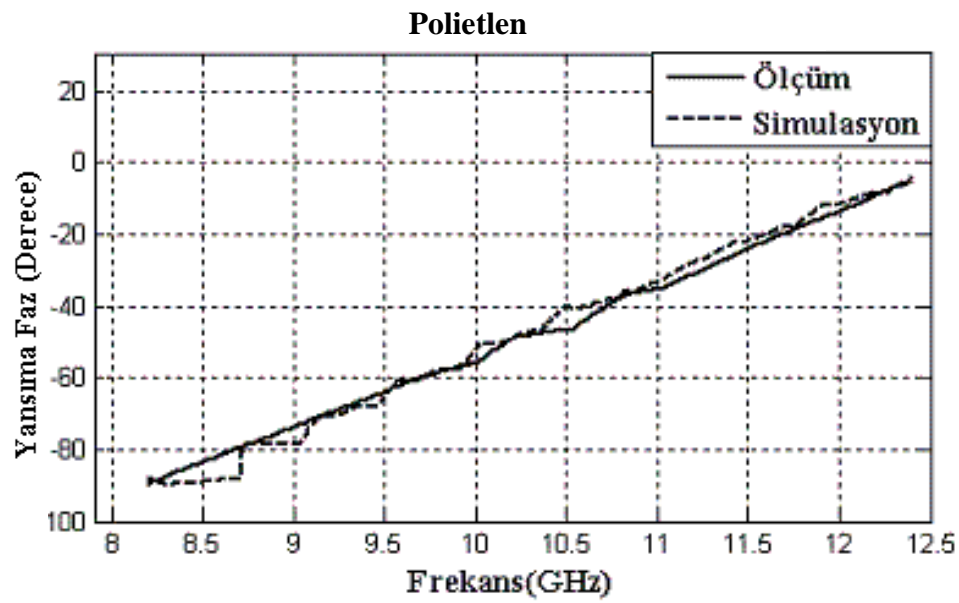
Şekil 7.25. 2 mm Polietilen örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



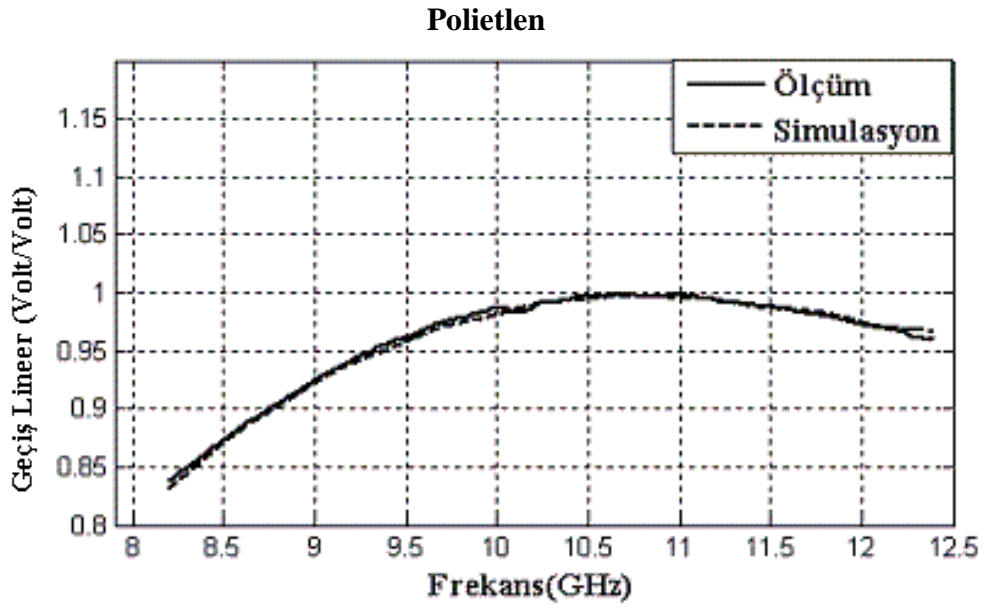
Şekil 7.26. 2 mm Polietilen örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



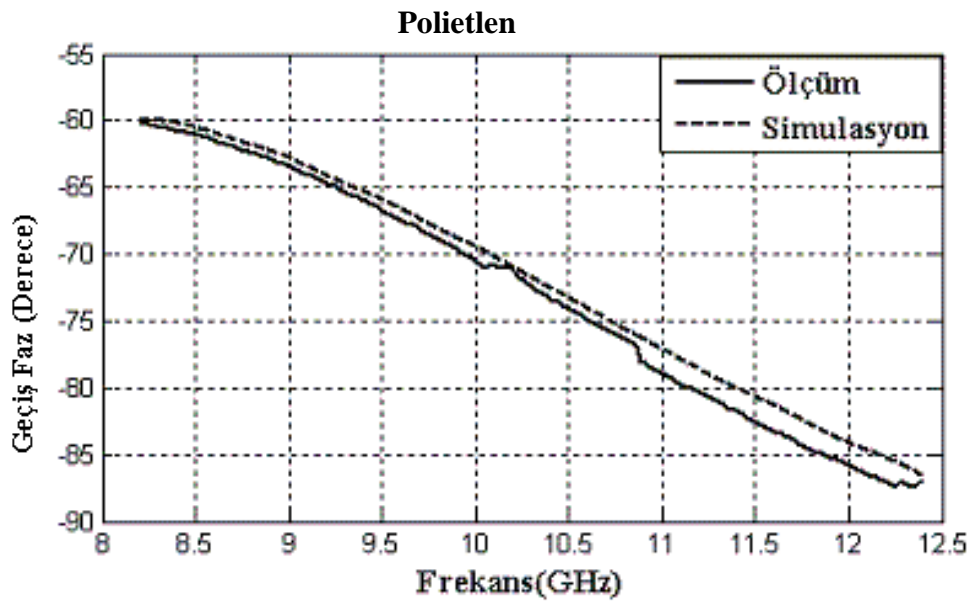
Şekil 7.27. 10 mm Polietilen örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



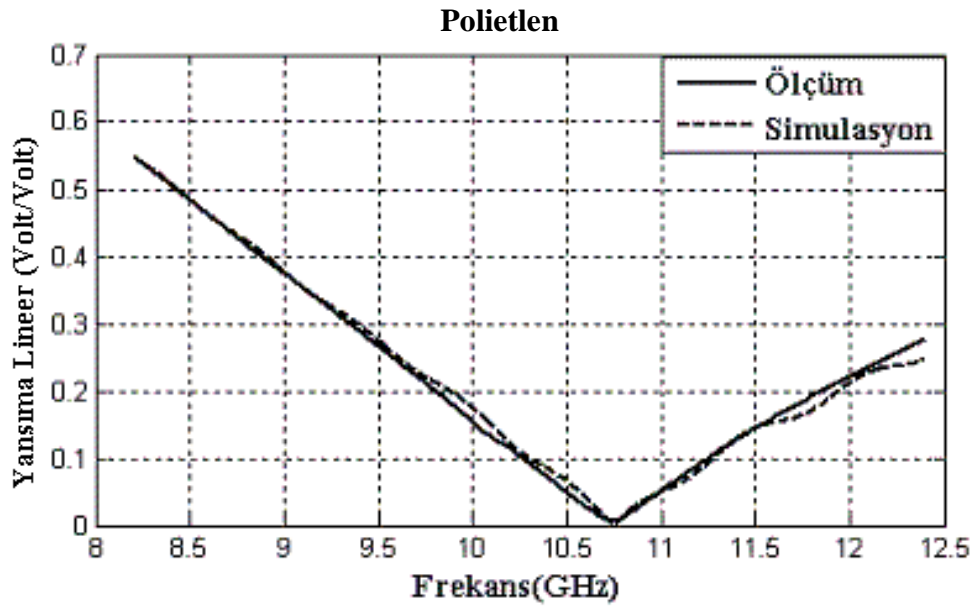
Şekil 7.28. 10 mm Polietilen örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



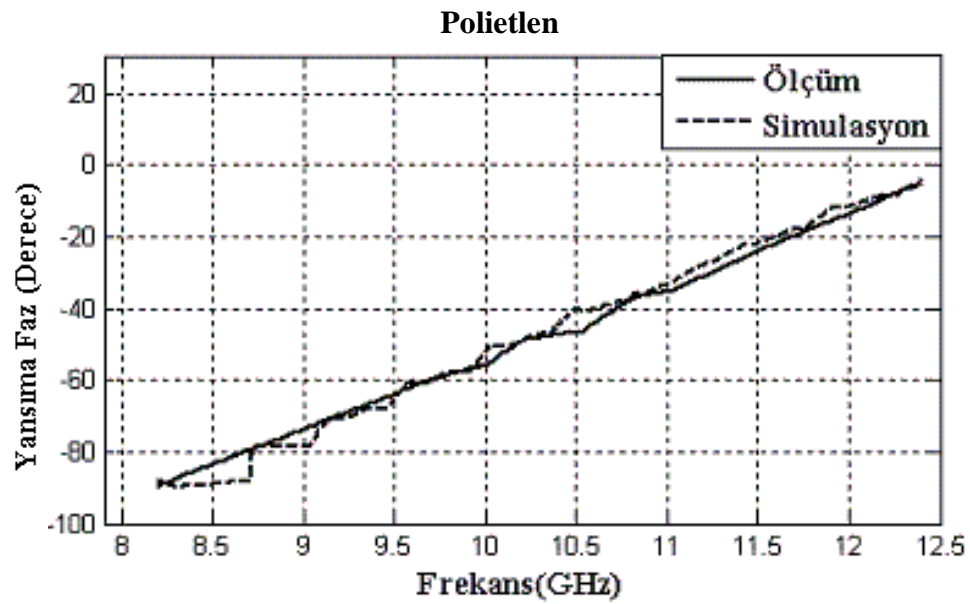
Şekil 7.29. 10 mm Polietilen örneğin S_{21} linear ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



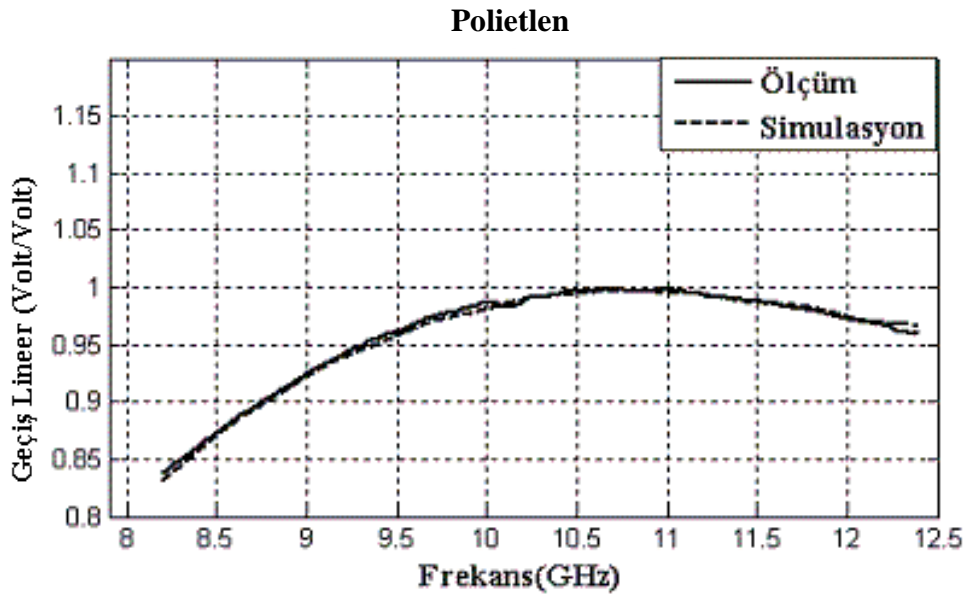
Şekil 7.30. 10 mm Polietilen örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



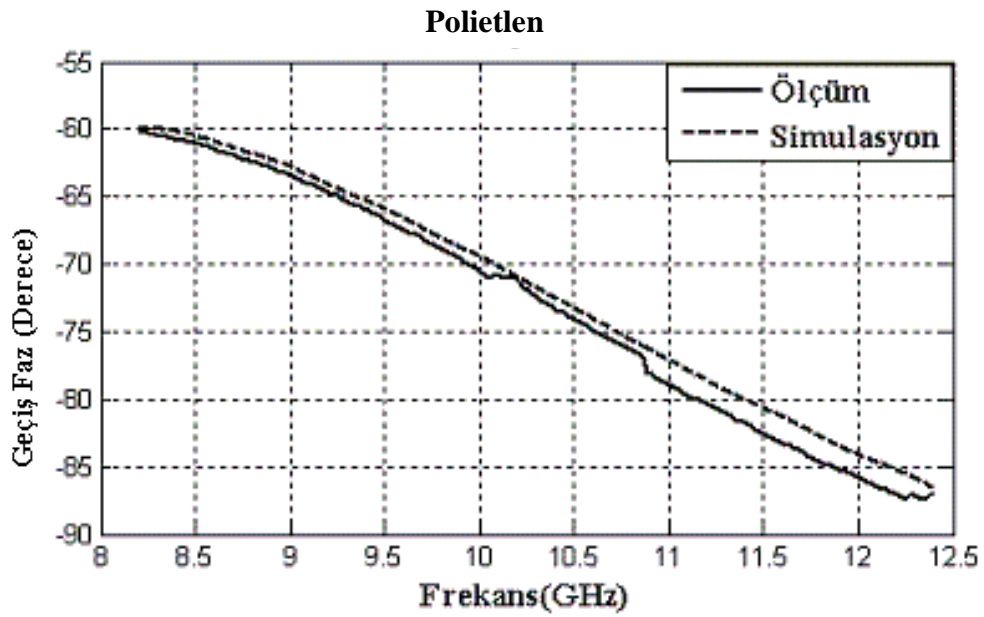
Şekil 7.31. 18 mm Polietilen örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



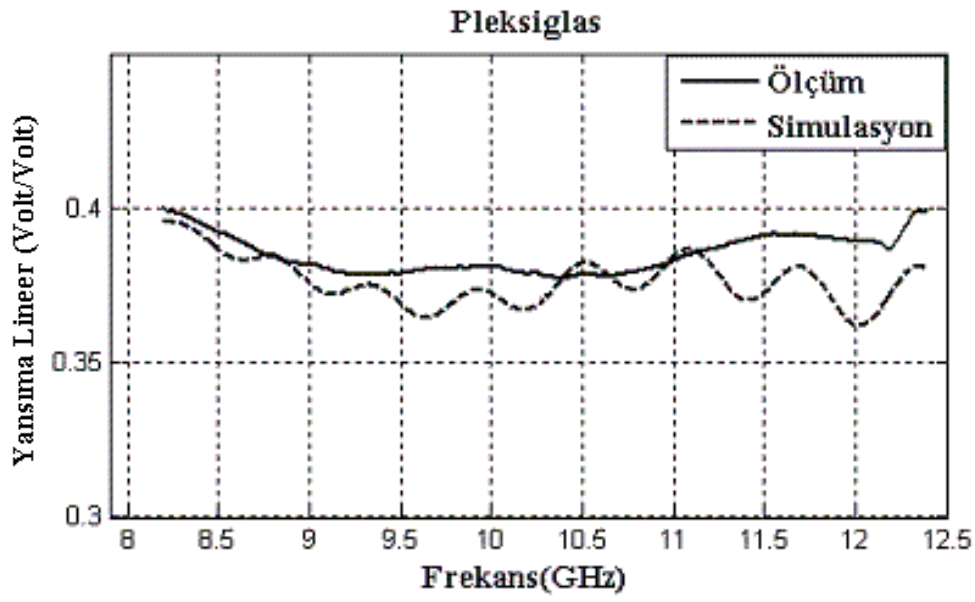
Şekil 7.32. 18 mm Polietilen örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



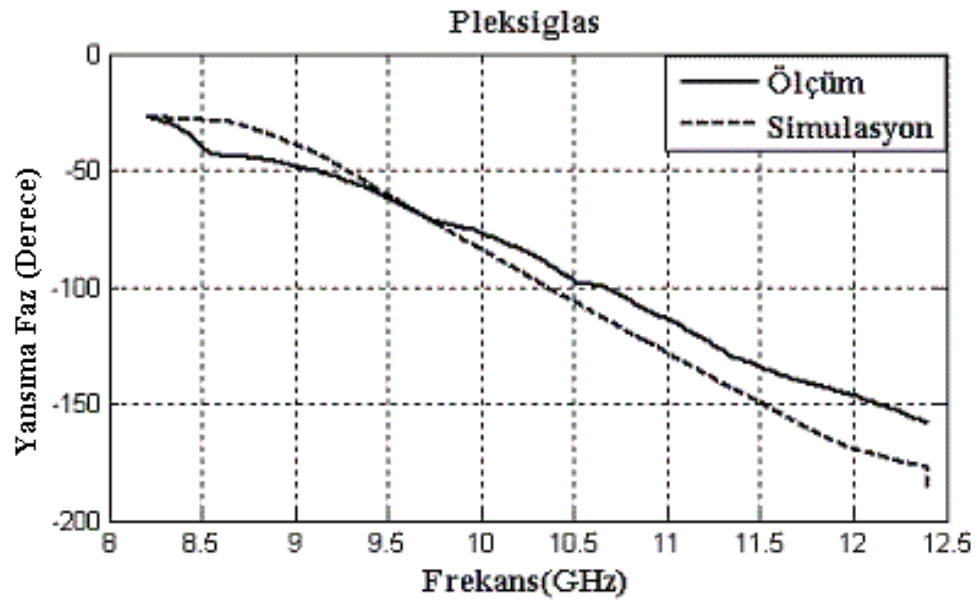
Şekil 7.33. 18 mm Polietilen örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



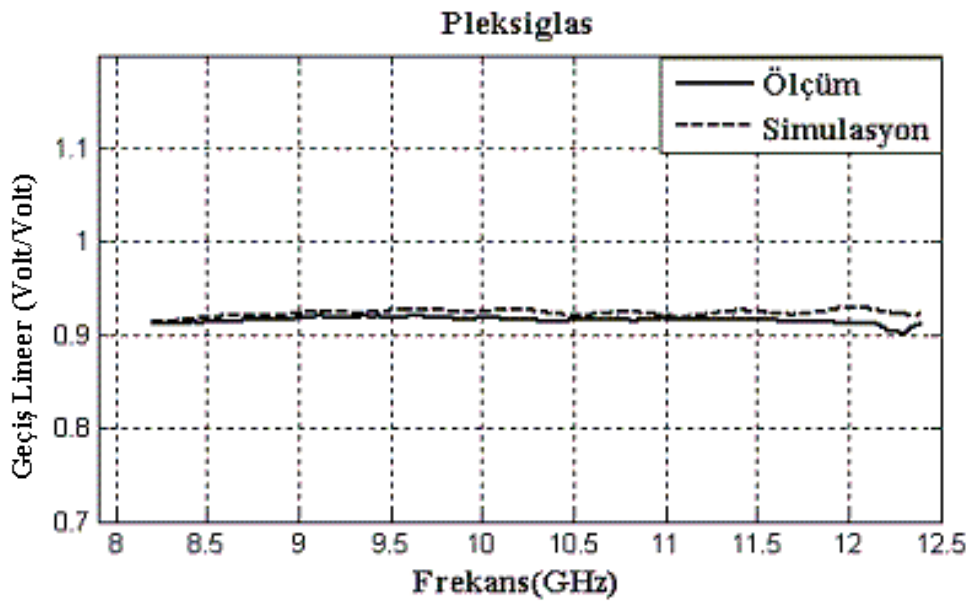
Şekil 7.34. 18 mm Polietilen örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



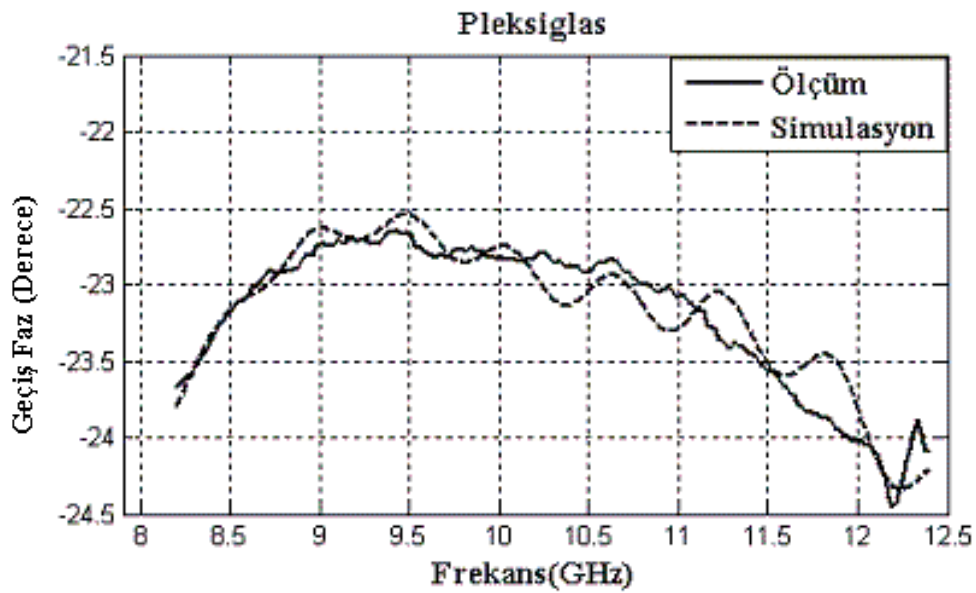
Şekil 7.35. 2 mm Pleksiglas örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



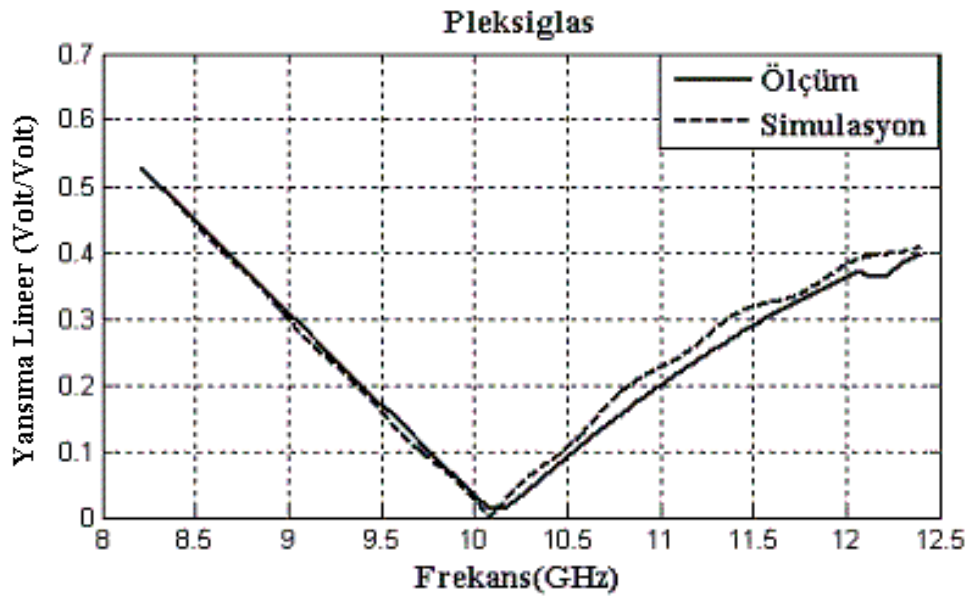
Şekil 7.36. 2 mm Pleksiglas örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



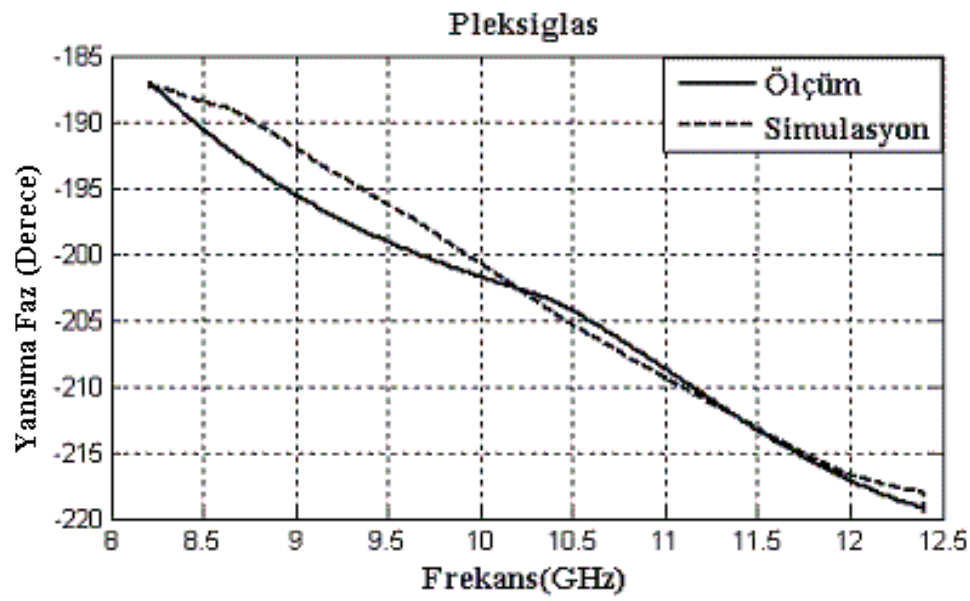
Şekil 7.37. 2 mm Pleksiglas örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



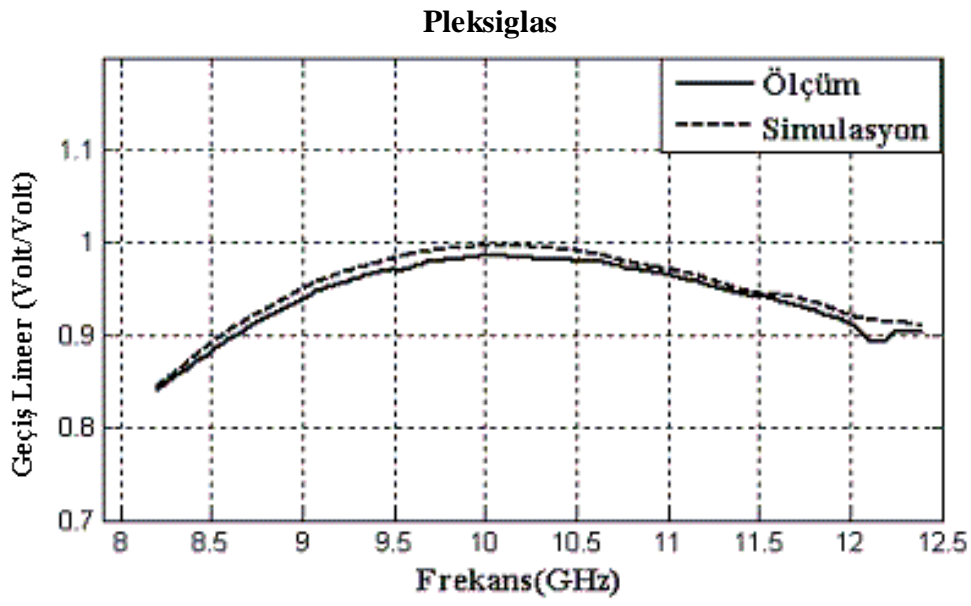
Şekil 7.38. 2 mm Pleksiglas örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



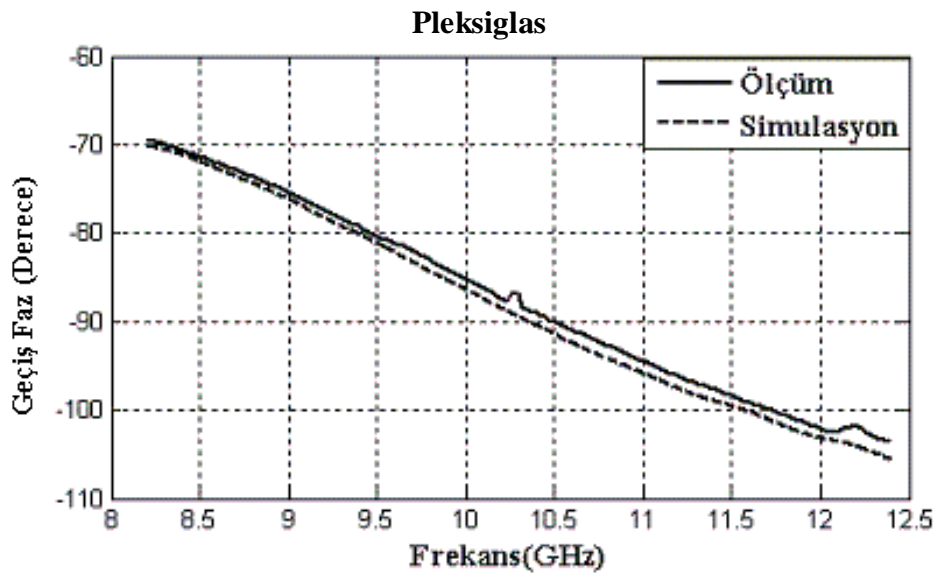
Şekil 7.39. 10 mm Pleksiglas örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



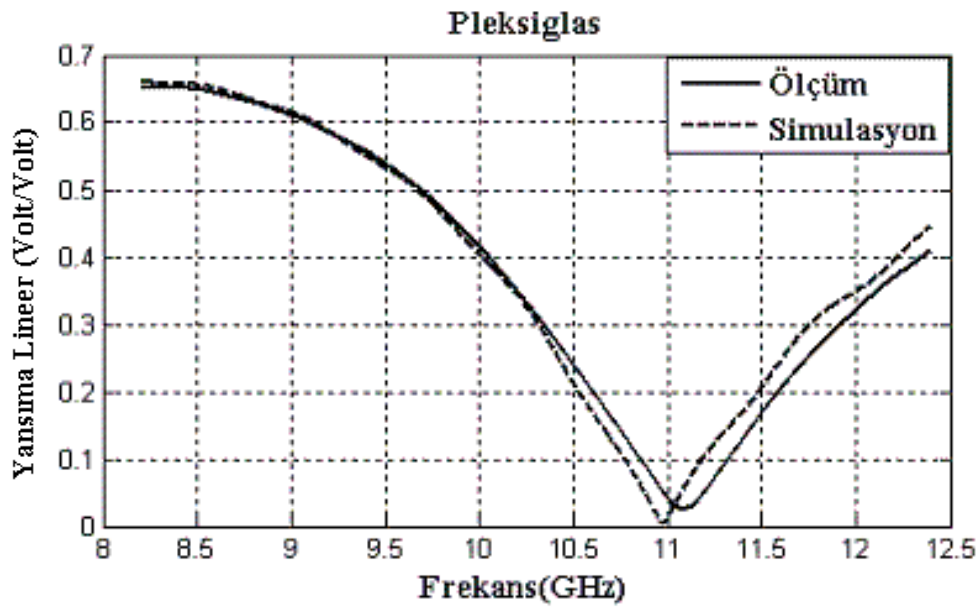
Şekil 7.40. 10 mm Pleksiglas örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



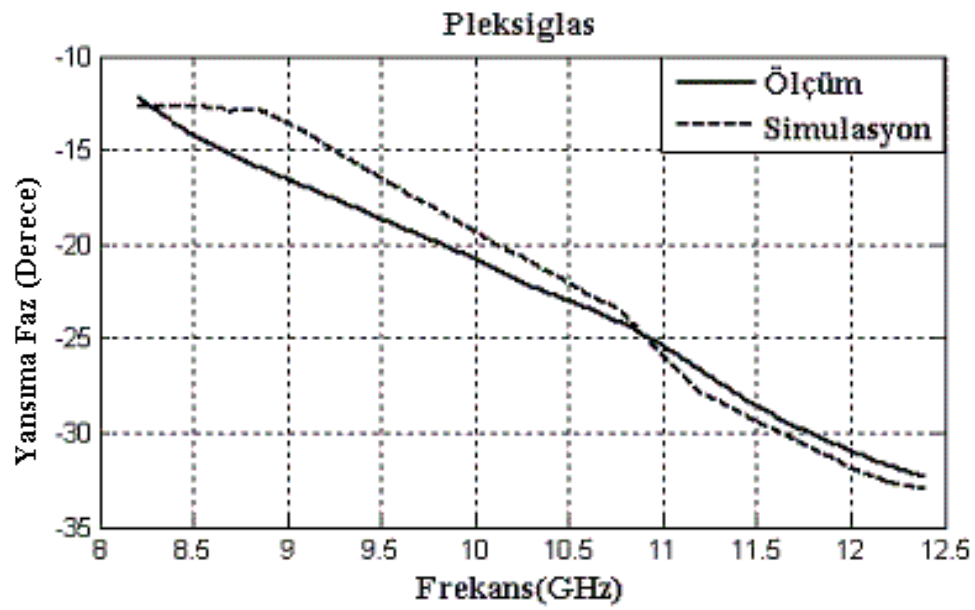
Şekil 7.41. 10 mm Pleksiglas örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



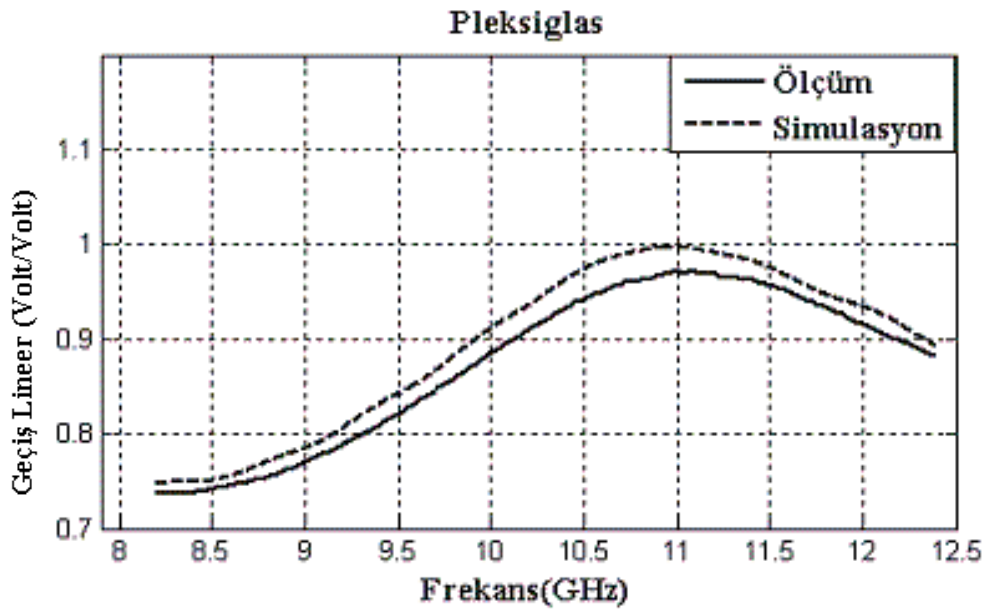
Şekil 7.42. 10 mm Pleksiglas örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



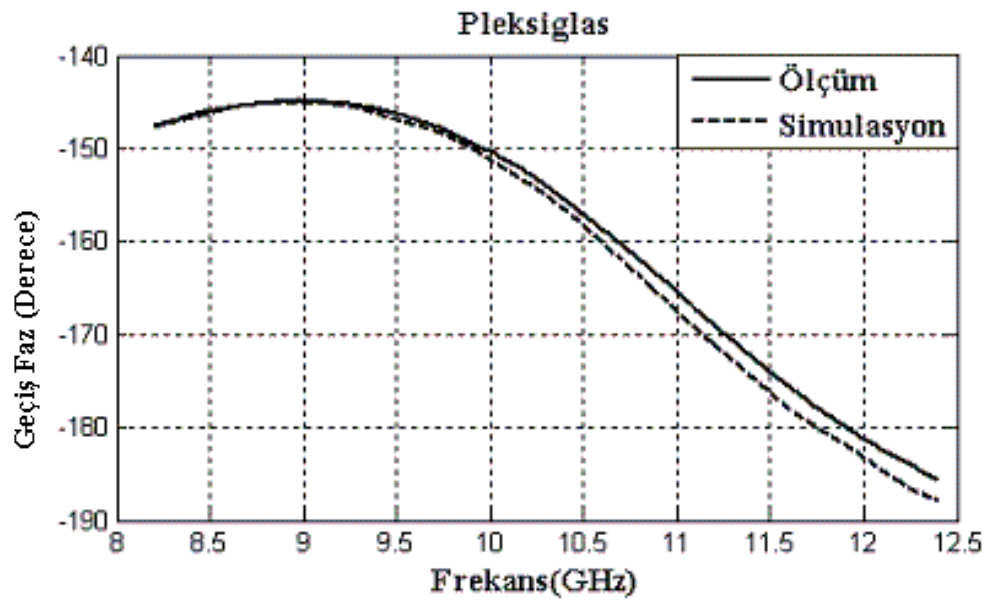
Şekil 7.43. 18 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



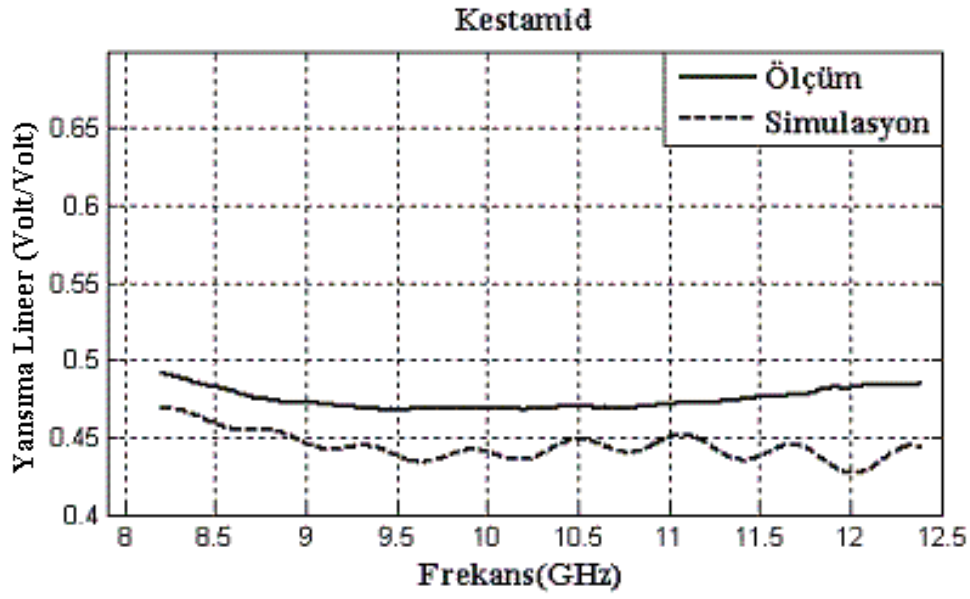
Şekil 7.44. 18 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



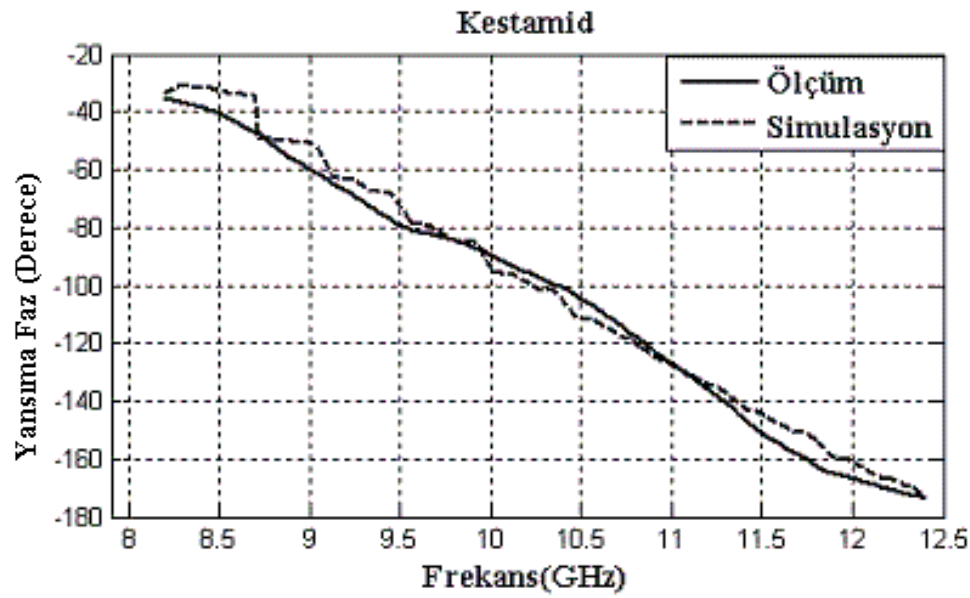
Şekil 7.45. 18 mm Pleksiglas örneğin S_{21} linear ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



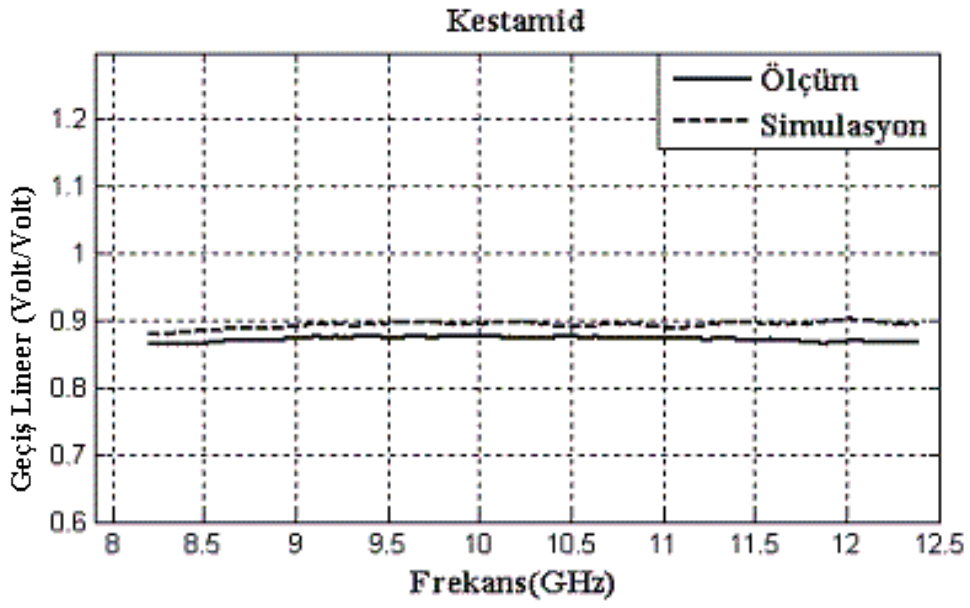
Şekil 7.46. 18 mm Pleksiglas örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



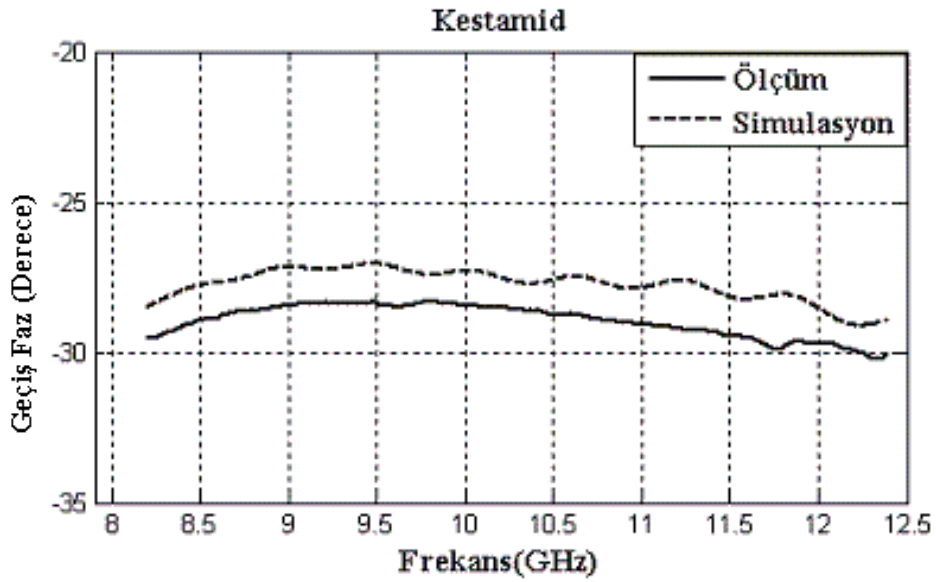
Şekil 7.47. 2 mm Kestamid örneğin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



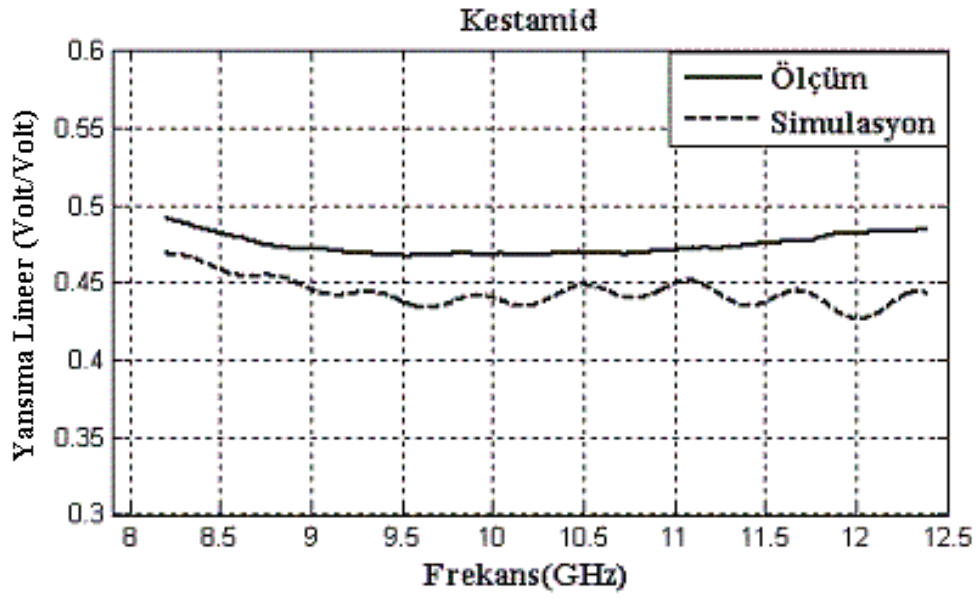
Şekil 7.48. 2 mm Kestamid örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



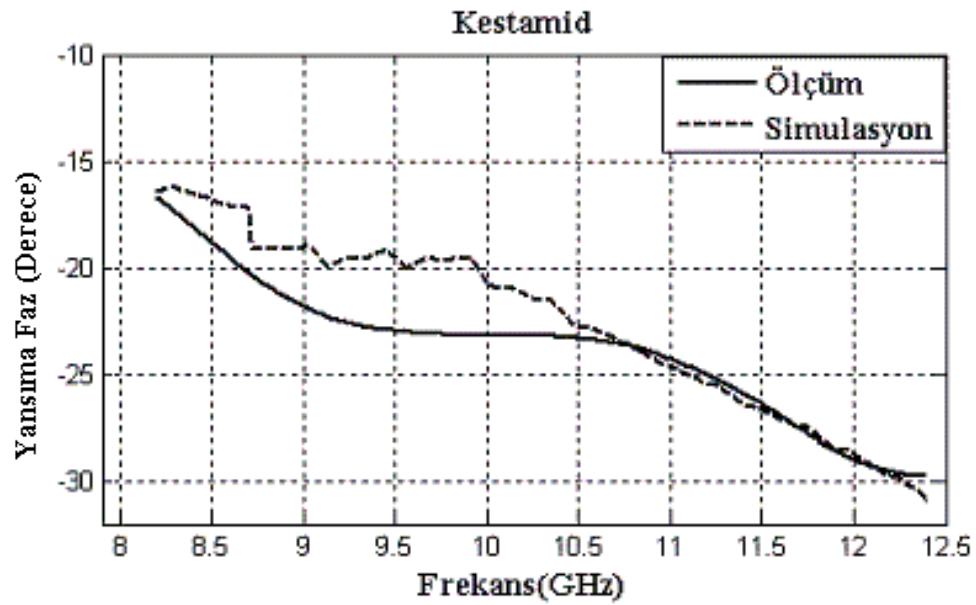
Şekil 7.49. 2 mm Kestamid örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



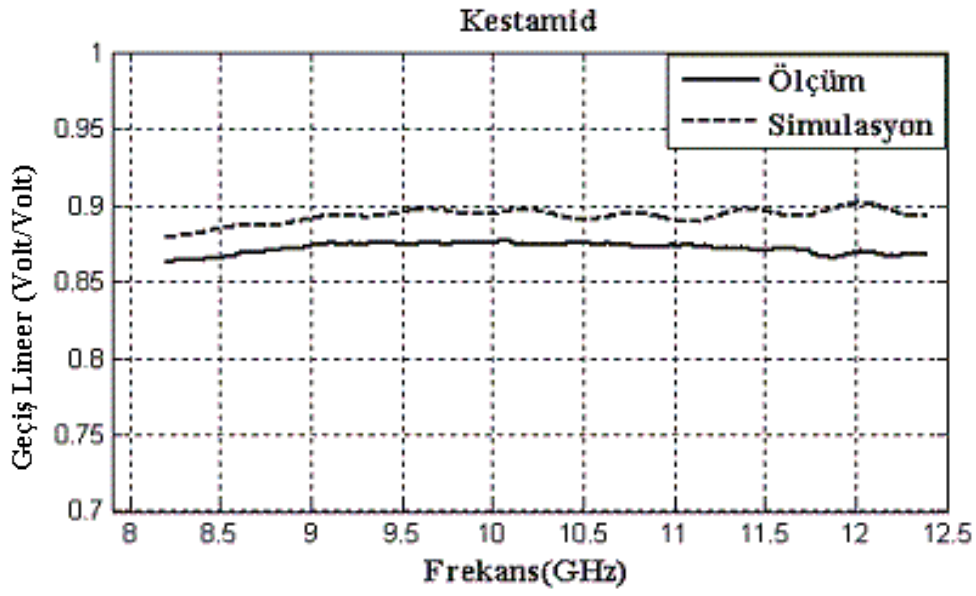
Şekil 7.50. 2 mm Kestamid örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



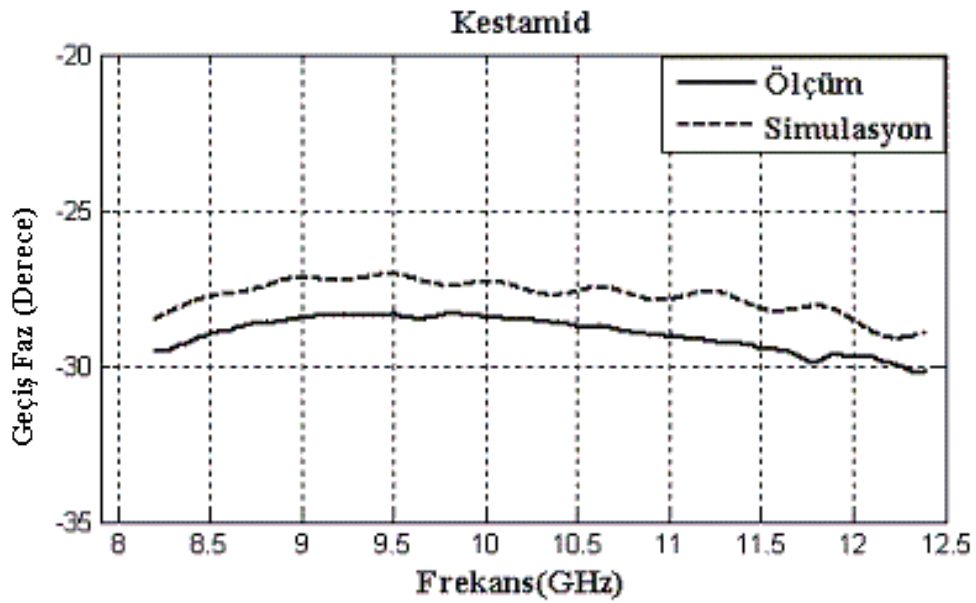
Şekil 7.51. 10 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



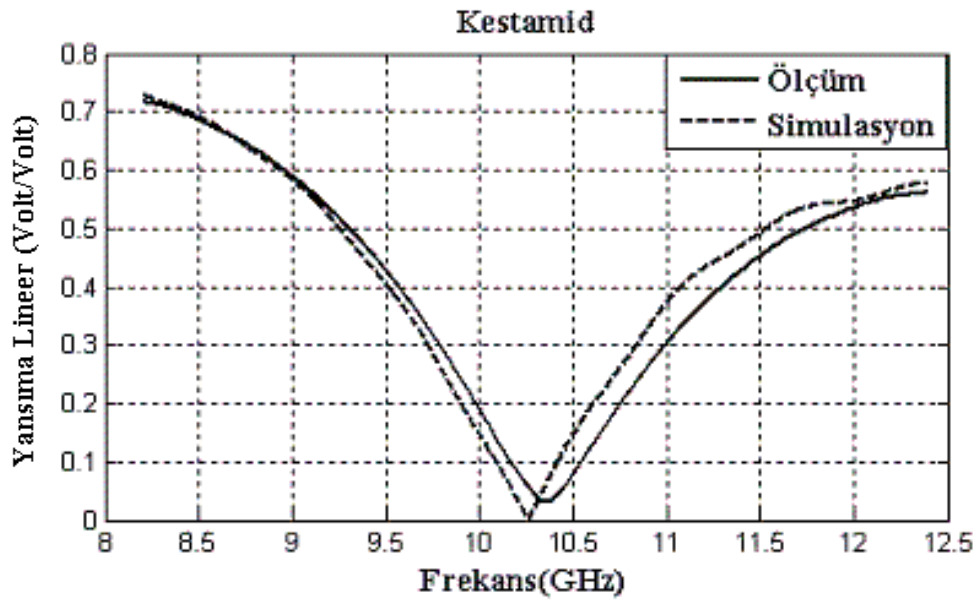
Şekil 7.52. 10 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



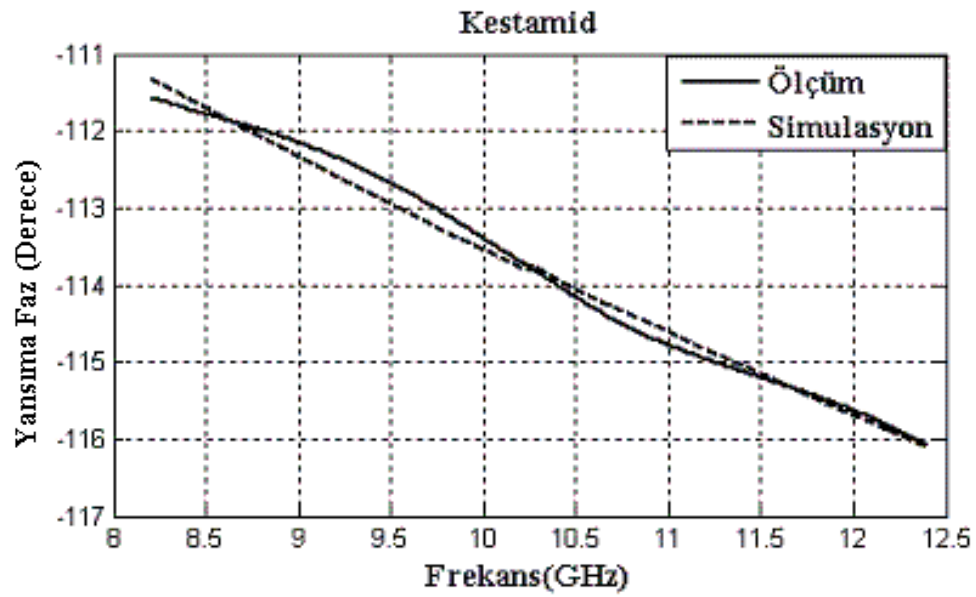
Şekil 7.53. 10 mm Kestamid örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



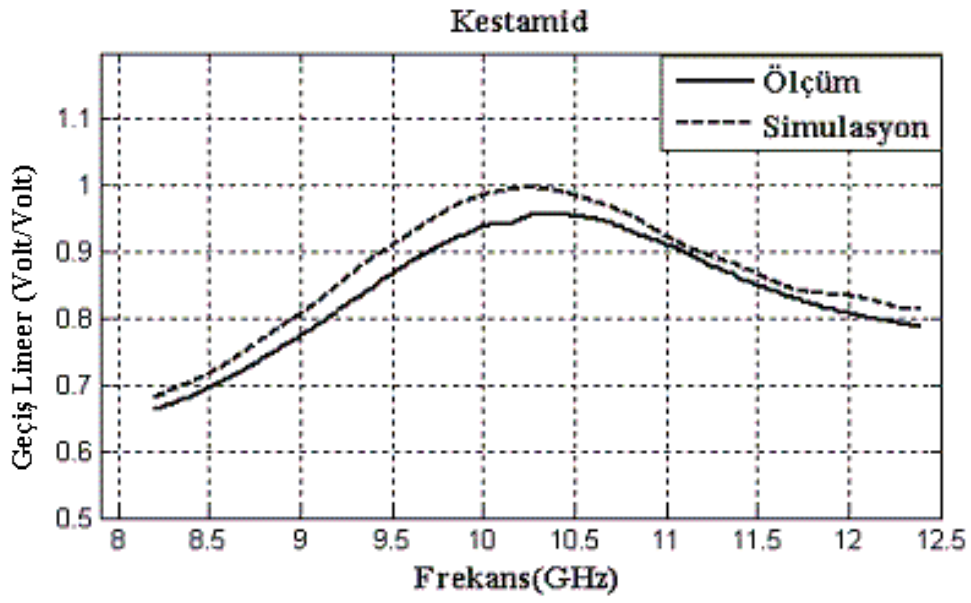
Şekil 7.54. 10 mm Kestamid örneğin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



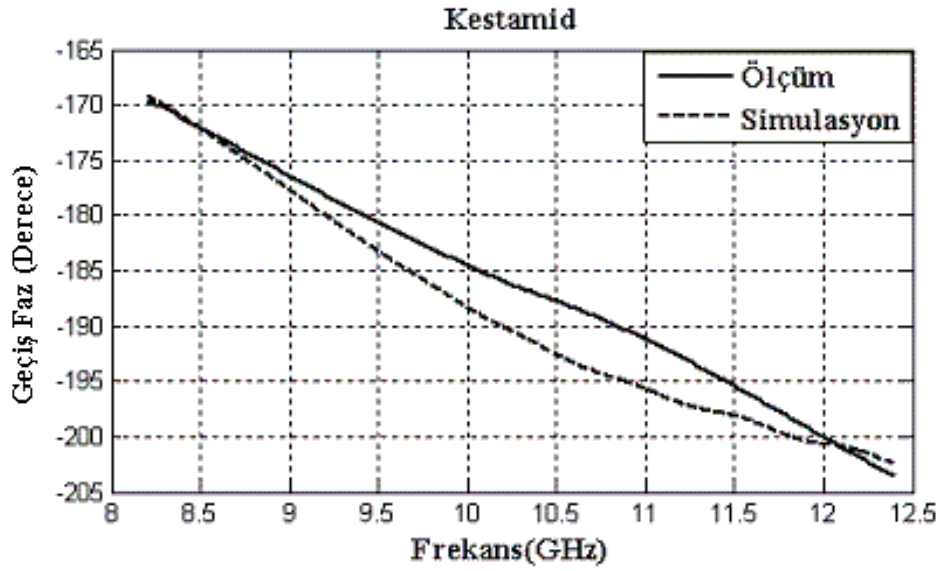
Şekil 7.55. 18 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.56. 18 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.57. 18 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.58. 18 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

KAYNAKLAR

- [1] GRIFFITHS, D. J. Elektromagnetic Theory, Third edition, Prentice Hall International (UK) Limited London pp ,
- [2] CHANG, D. K., Field and Wave Electromagnetic 2nd Edition January 1989
- [3] YARAN, S., ALTINSOY, İ., CELEB, M., HAYIRLI, İ., 3..Ulusal Ölçümbilm Kongresi Eskişehir 7-8Ekim 1999
- [4] <http://www.amanogawa.com/archive/PlaneWave/PlaneWave-2.html>
(01.01.2010)
- [5] CHEN, L. F, Ong C. K. and NEO, C. P., Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization,John Wiley&Sons Ltd.2004
- [6] Measurement the Permittivity and Permeability of Lossy Materials NIST Technical Note 1536 february 2005
- [7] Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials Application Note
- [8] Agilent 85071E Material measurement software
- [9] BÜYÜKGÜÇLÜ, M. A Serbest Ortam Ölçüm Tekniği Kullanılarak EMC Soğurucu Malzemelerin Mikrodalga Etkileşiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Haziran 2007

- [10] Agilent AN 154 S parameter Desing Aplication Note
- [11] BURNIKELL, J., GAUDIÖN M, S Parameter an Introduction 2006
(www.polarinstruments.com, (12.05.2009)
- [12] <http://www.eie.polyu.edu.hk/~martin/rfmsc/node9.html#SECTIO>,
(15.11.2009)
- [13] VINOY,. K. J. And JHA R. M., Radar Absorbing Materials National
Aerospace Laboratories Bangalore India 560 017 Kltiver Academic
Publishers Boston / Dordrecht / London 1996
- [14] Measurement of dielectric material properties Application Note
Rothe&Schwartz
- [15] Material Measurement Tecnique India Presentation January 2006
- [16] APAYDIN,. F, Manyetik Rezonans, Hacettepe Üniversitesi
- [17] BOUGHERIET, A. H., LEGRAND, C., CHAPOTON, A. ,Non iterative
Stable Transmission/Reflection Method Low-Loss Material Complex
Permittivity Determination IEE Trans. On Micr. Teor. And Techn. Vol45.
No1 January 1997
- [18] MILJANIC, V., BILJIC, L., RCASKOVSKY, D., Discssion of some
Experimental Methods For permittivity Measurement on Some 12-
Tungstophosphoric Acid Hexahydrate in The Frequency Range 8-12GHz
Microwave Riwiev.,Belgrade ,Zarkovo Nuclear Institute , Military
Academy December 1997
- [19] BERNING, P. H., Theory and calculations of optical thin films , in G.
Hass, Ed., “Physics of thin films”, Vol. 1, Academic Press, New York and
London, 1963.

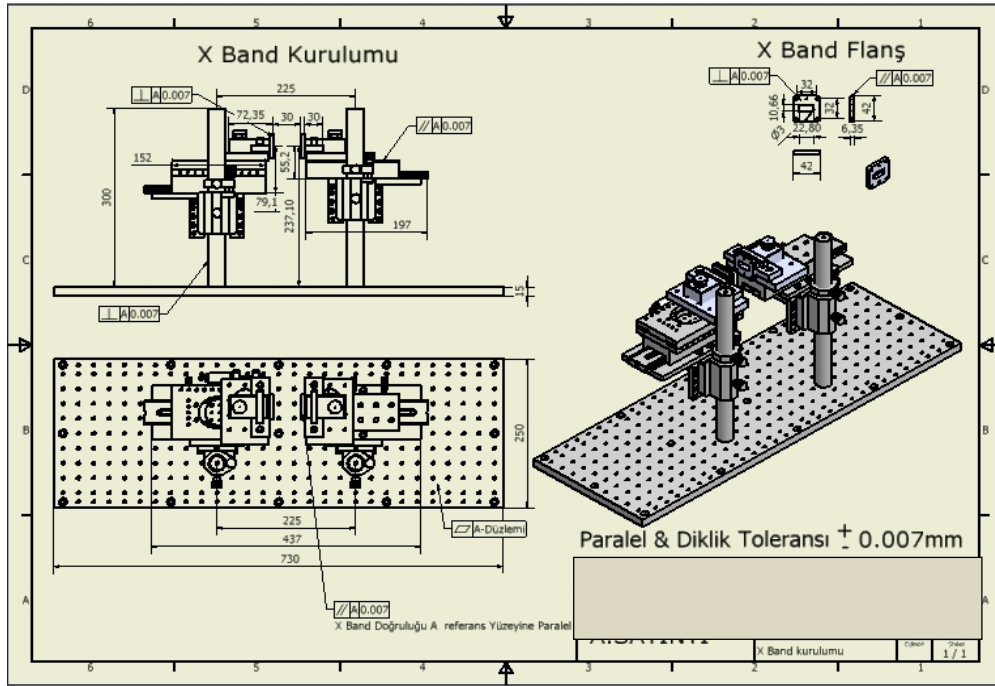
- [20] BAKER, J., JANEZIC, M. D., GROSVENOR, J. H., GEYER, Jr. R G. Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability, NIST Technical Note 1355-R, 236 pages, December 1993.
- [21] GAVRİLOV, S., Türkiye Ukrayna Ortak Araştırma Laboratuvarı Yıllık Raporu 2008

ÖZGEÇMİŞ

Aysun SAYINTI 25.12.1980 KUMRU/ORDU' da doğdu. İlk orta eğitimini burada tamamladıktan sonra Kırıkkale Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden 2004 yılında mezun oldu.2007 yılında Sakarya üniversitesinde yüksek Lisans eğitimine başladı. 2005 yılında Tübitak Marmara Araştırma merkezinde araştırmacı olarak çalışmaya başladı. Birçok projede “Mikrodalga ve elektromanyetik uygulamalar” konularında görev aldı. Ve hala aynı yerde çalışmaktadır.

EKLER

Ek A



Ek A.1. X band frekansı ölçüm düzeneğinin teknik çizimi

Ek B

NRW yöntemi için Matlab Programında yazılan kod:

```

clear all
clc
L1=50/1000;%1.portun başlangıç ve bitiş uzaklığı
L2=198/1000;%2.portun başlangıç ve bitiş uzunluğu
L=2/1000; %sample kalınlığı
a=22.86/1000; %dalga kılavuzu genişliği
c=3e8 % 3e8 m/sn ışık hızı
%h1=FREKANS
h1=
%h1:frekans noktalarımız
lamda0=(3e8./h1)%her frakans noktasındaki dalga boyu
lamdac=(45/1000)%cutt-off frekansı
nu0=j*sqrt(((2.*pi.*h1)./c).^2-((2*pi)./lamdac).^2)

A1=
%A1:S11 genlik değeri
b=
%b=S11 faz değeri
teta11=((pi./180).*(b));%S11 faz hesabı
S11=A1.*exp(j.*teta11);%S11 parametre hesabı
A=
%A=S21 Genlik değeri
g=
g=S21
teta21=((pi/180)*(g));%S21 faz hesabı
S21=A.*exp(j.*teta21)%S21 parametre hesabı
K=((1.+(S11.^2.-S21.^2))./(2.*S11));
gama=K+sqrt(K.^2.-1)%yansıma katsayısı
T=((S11+S21)-gama)./(1.-(S11+S21).*gama);%geçiş katsayısı
kappa=sqrt(1./(-1./(2.*pi.*(L)).*log(1./T)).^2));
mur=(1.+gama)./((1-gama).*kappa.*sqrt((1./lamda0.^2)-(1./lamdac.^2)))%manyetik geçirgenlik
epsn=(lamda0.^2./mur).*((1./lamdac.^2)-((1./(2*pi*L)).*log(1./T)).^2)%elektrik geçirgenlik
epsnimj=

```

```

eps1=
epsimj=
epsso=
epssoimj=
%diğer yöntemlerin değerleri
hold on
h=h1/1e9
%plot(h,eps1,'k-',h,epsimj,'k-',h,epsn,'k--',h,epsnimj,'k--
',h,epsso,'k.',h,epssoimj,'k.');
```

ylabel('Dielektrik katsayısı','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');xlabel('Frekans (GHz)','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');legend('NRW Yöntem','NRW Yöntem İmj.','Etkin Yöntem','Efektif yöntem imj','Program Reel','Program İmj',0);set(legend,'FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');grid;title('Teflon','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');axis([12.3 18.1 -0.54.1]) ;

```

subplot(1,2,1),plot(h,epsn,'k-',h,eps1,'k--
',h,epsso,'k.');
```

ylabel('Dielektrik Katsayısı Reel','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');xlabel('Frekans (GHz)','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');legend('NRW Method','Etkin Yöntem','Program',0);grid;title('Teflon','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');set(legend,'FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');grid;grid %;axis([7.9 12.5 0.95 0.97])

```

subplot(1,2,2),plot(h,epsnimj,'k-',h,epsimj,'k--
',h,epssoimj,'k.');
```

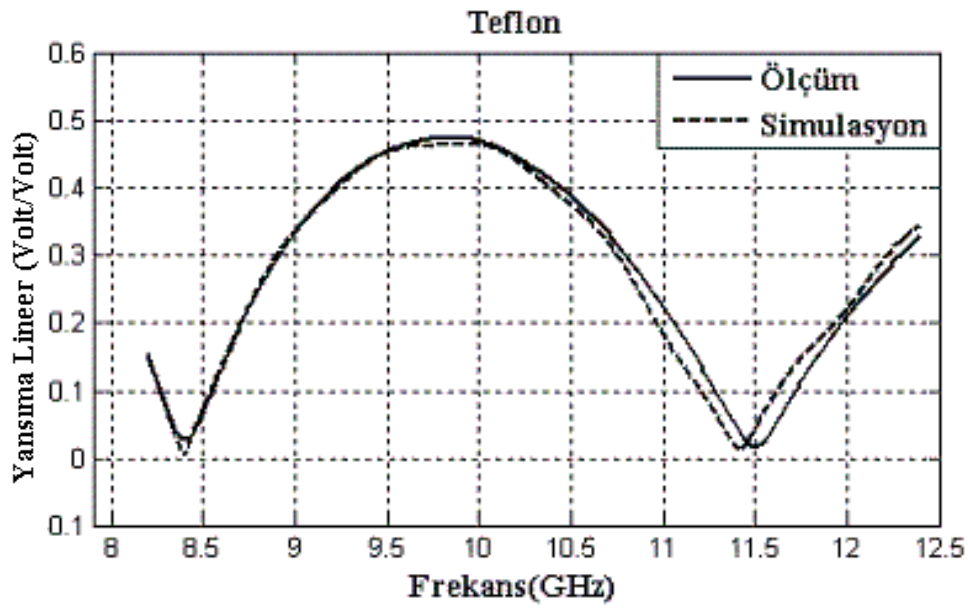
ylabel('Dielektrik Katsayısı İmj.','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');xlabel('Frekans (GHz)','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman');legend('NRW Method','Etkin Yöntem','Program',0);grid

```

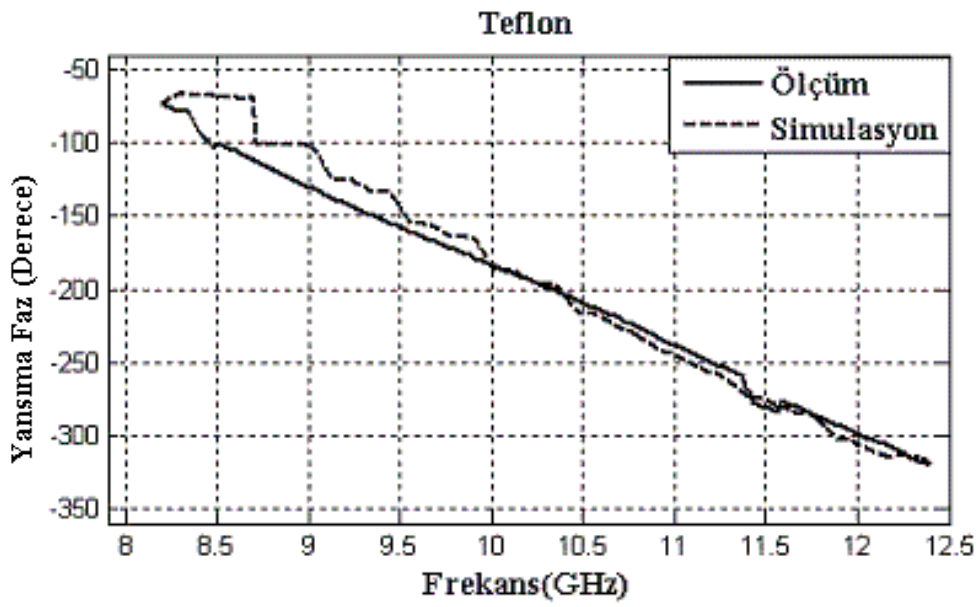
;title('Teflon','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times
New
Roman');set(legend,'FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times
es New Roman');grid;grid %;axis([7.9 12.5 -18 -14])
%plot(h1,epsn)
lineobj = findobj('type','line');
set(lineobj,'linewidth',1.8);
textobj = findobj('type','text');
set(textobj,'fontweight','bold');
```

Ek C

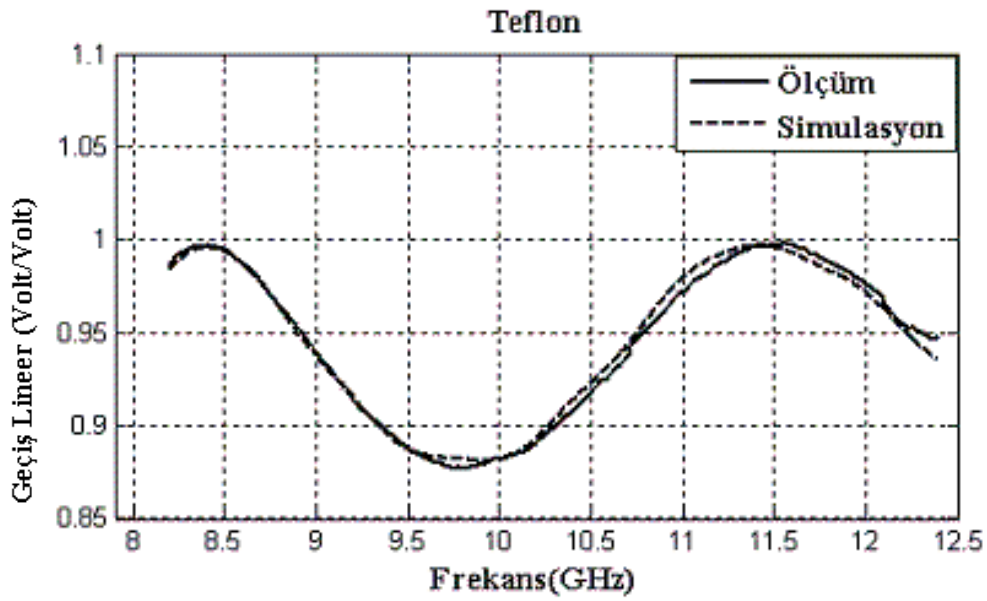
30mm ve 50mm kalınlıktaki teflon, kestamid, pleksiglas örneklerinin network analizör cihazında yapılan ölçümleri ile elde edilen S parametre değerleri ile, CST programından elde edilen benzetim sonuçlarının S parametre değerleri ile karşılaştırılmaları aşağıdaki gibidir.



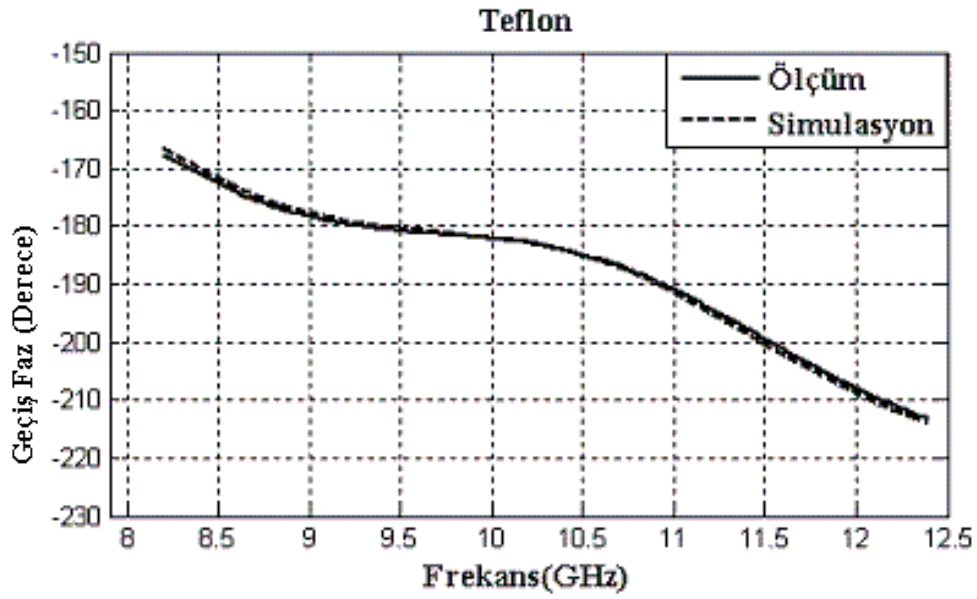
Ek C.2.. 30 mm Teflon örneğın S_{11} Lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



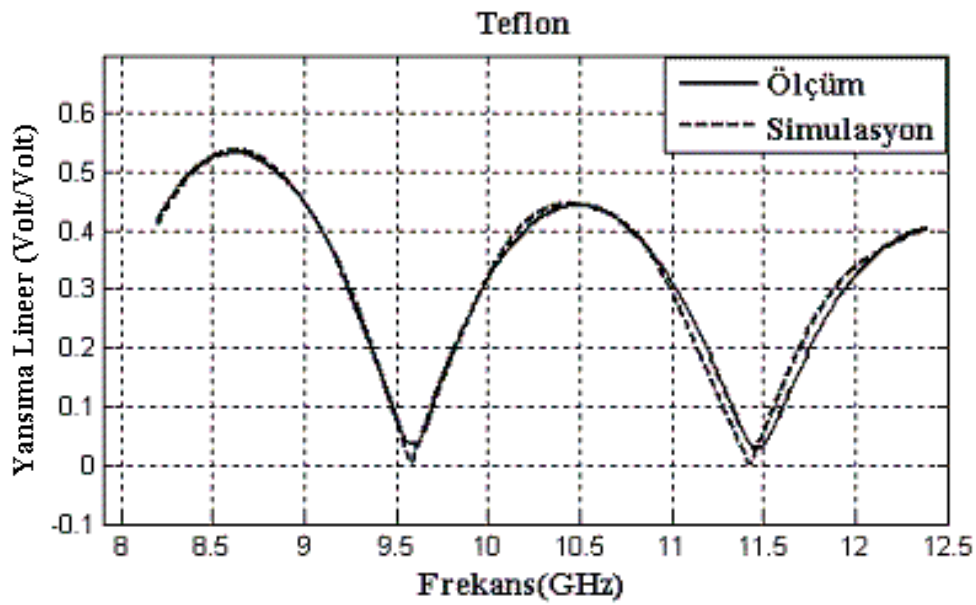
Ek C.3. 30 mm Teflon örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



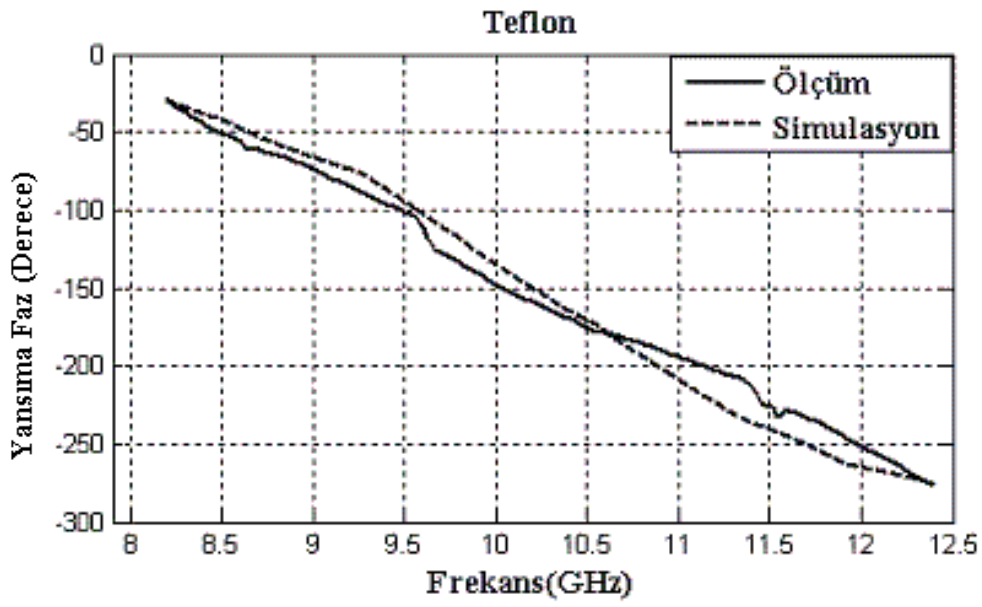
Ek C.4. 30 mm Teflon örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



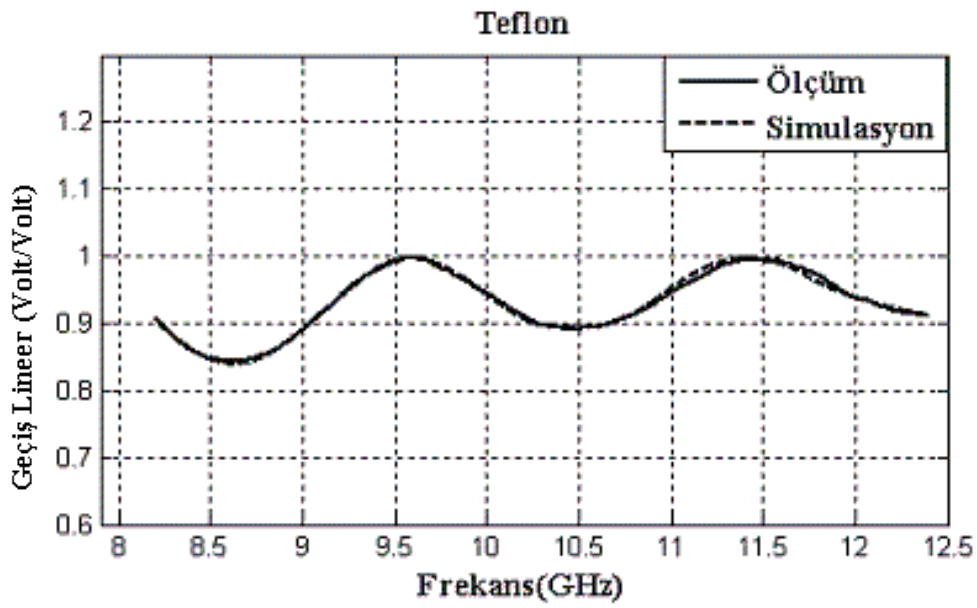
Ek C.5. 30 mm Teflon örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



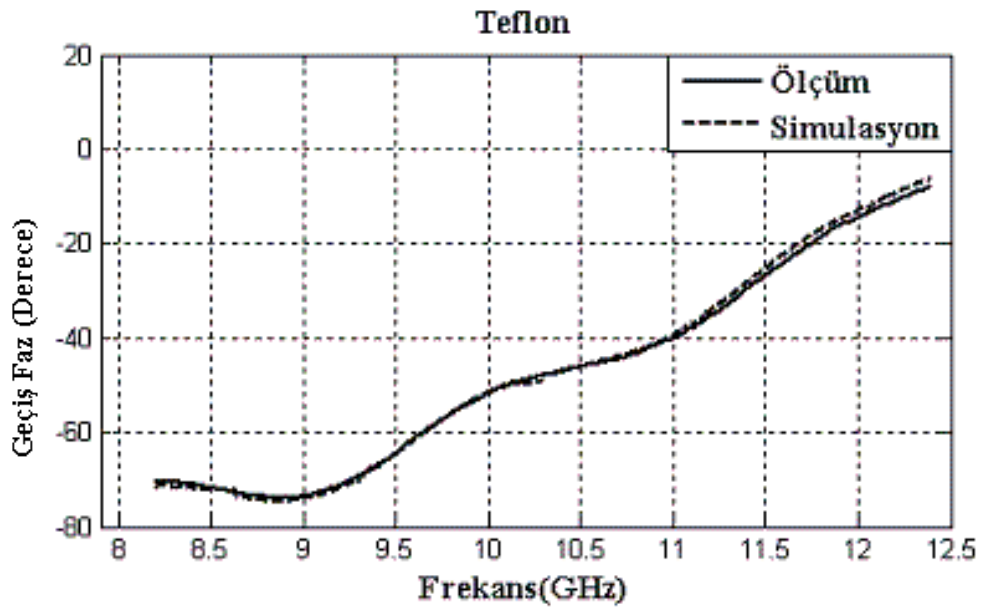
Ek C.6. 50 mm Teflon örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



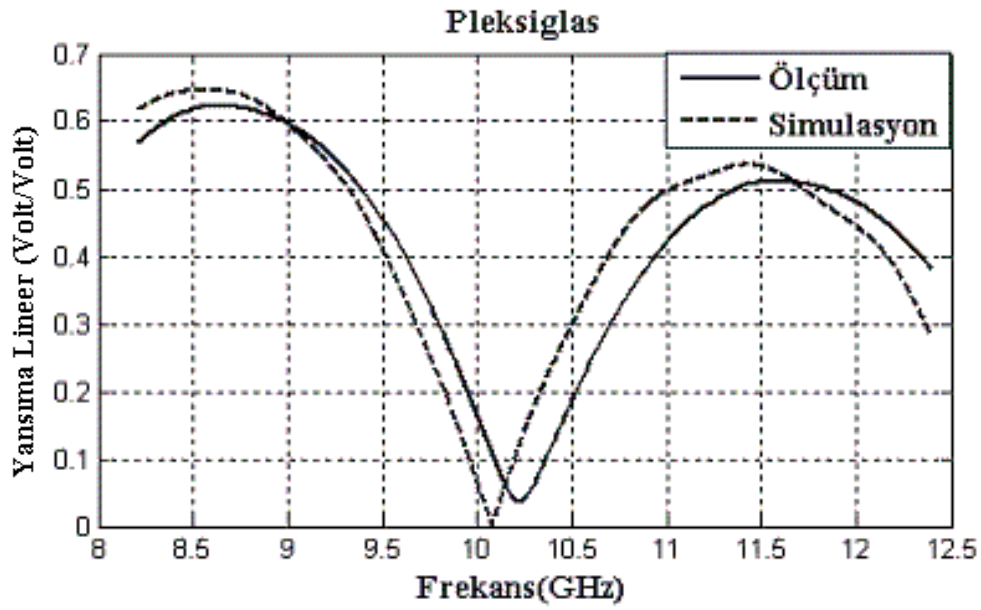
Ek C.7. 50 mm Teflon örneğin S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



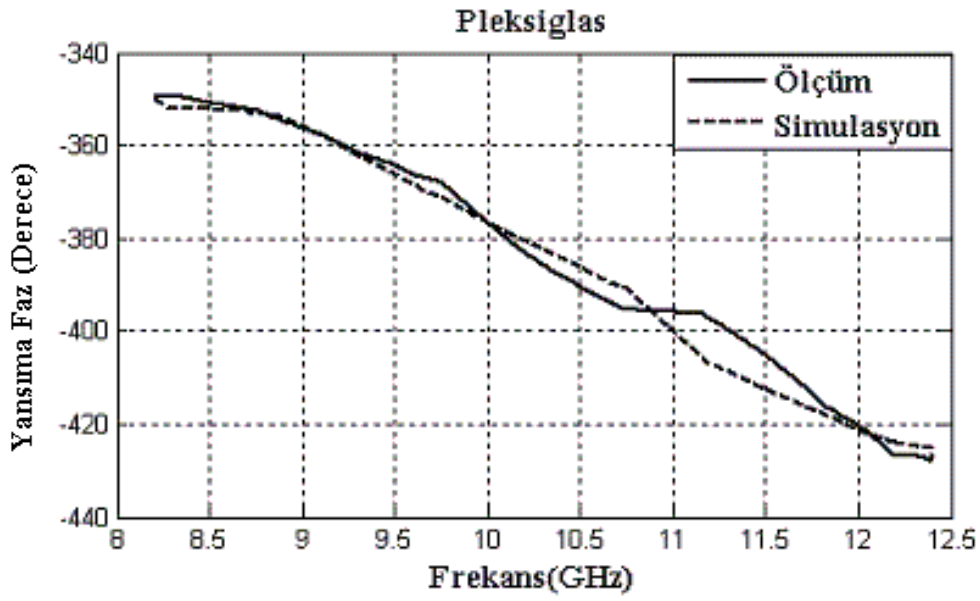
Ek C.8. 50 mm Teflon örneğin S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



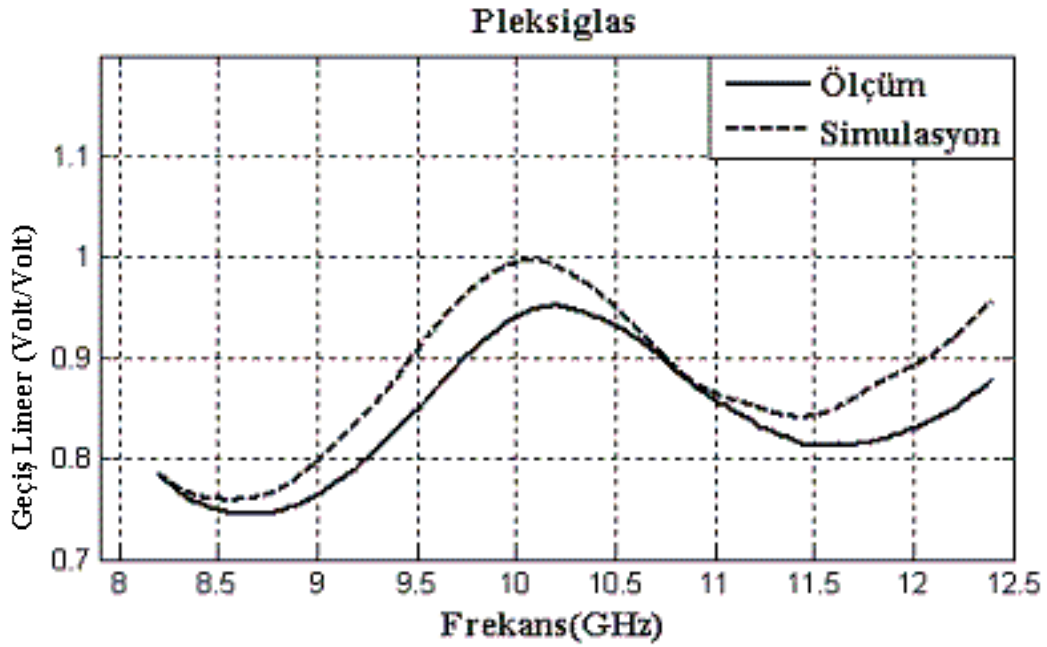
Ek C.9. 50 mm Teflon örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



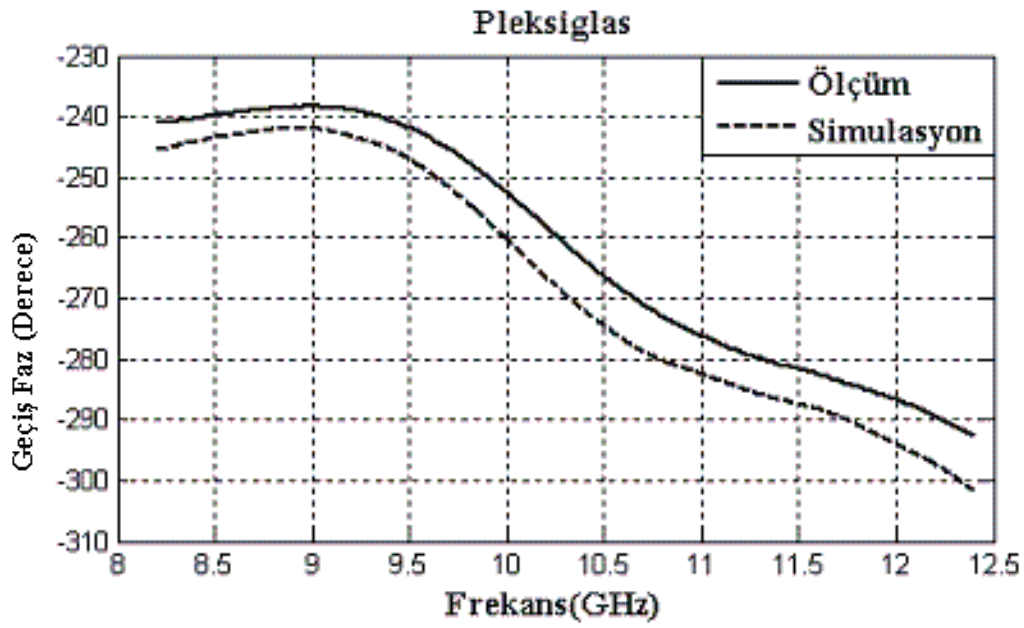
Ek C.10. 30 mm Pleksiglas örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



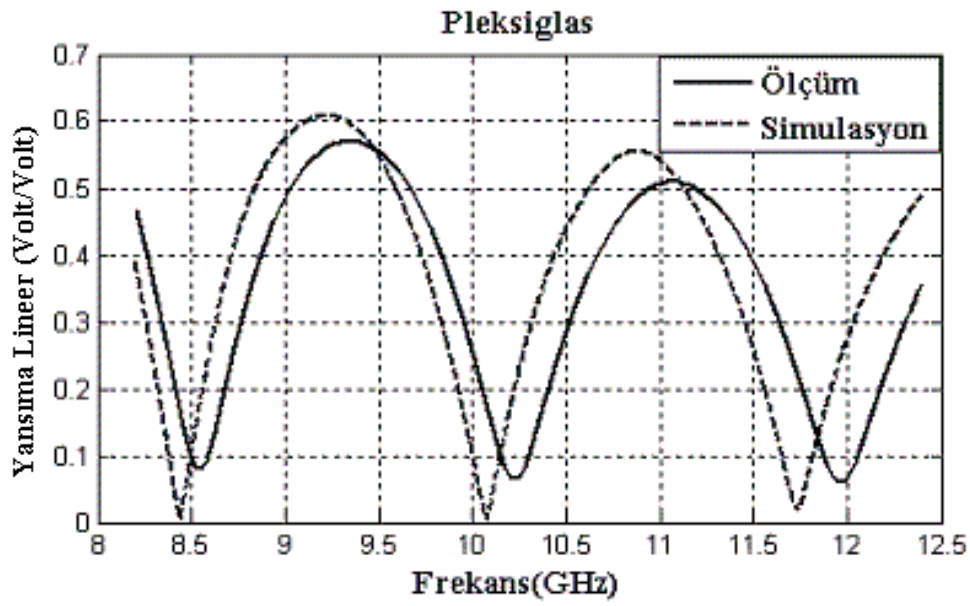
Ek C.11. 30 mm Pleksiglas örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



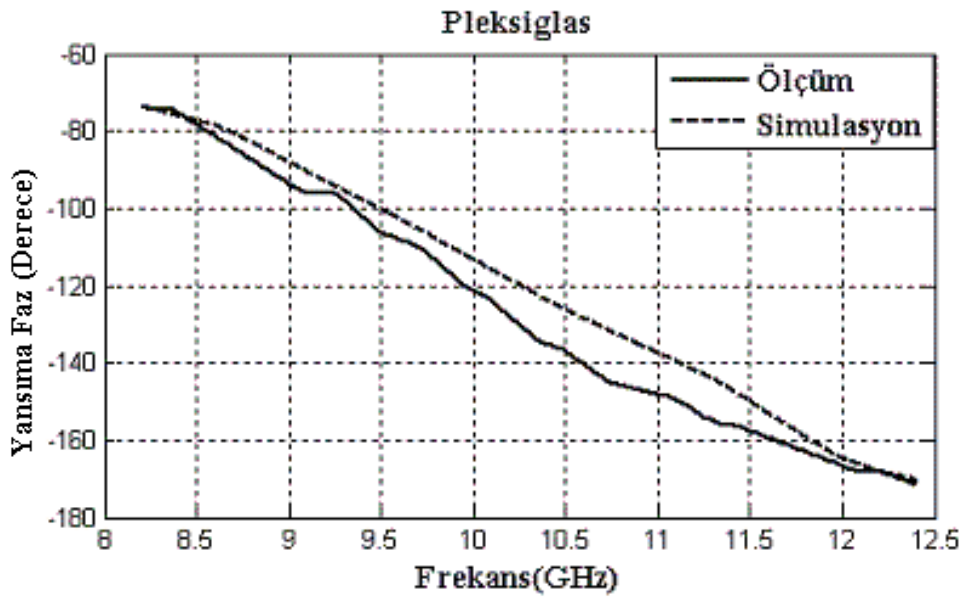
Ek C.12. 30 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



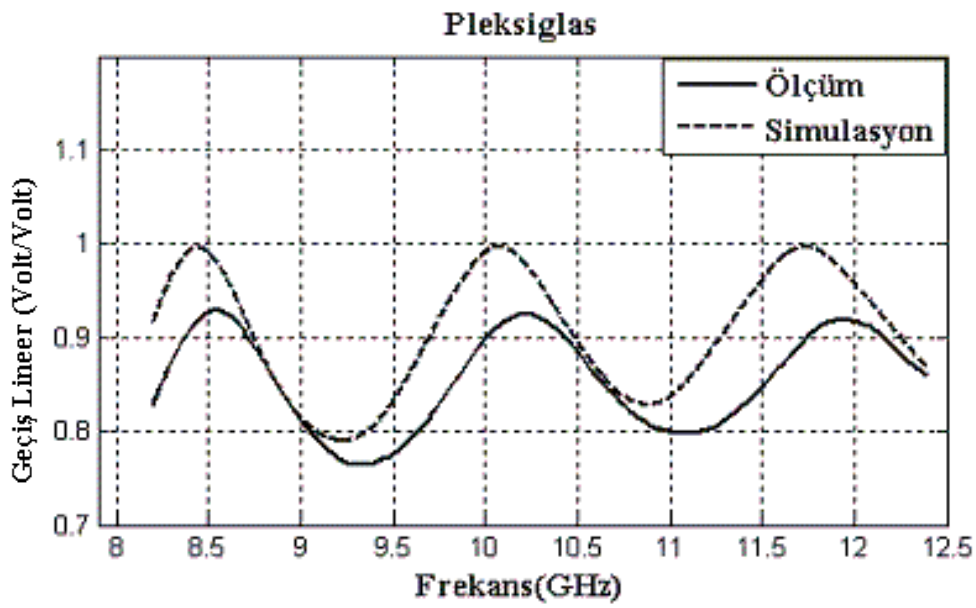
Ek C.13. 30 mm Pleksiglas örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



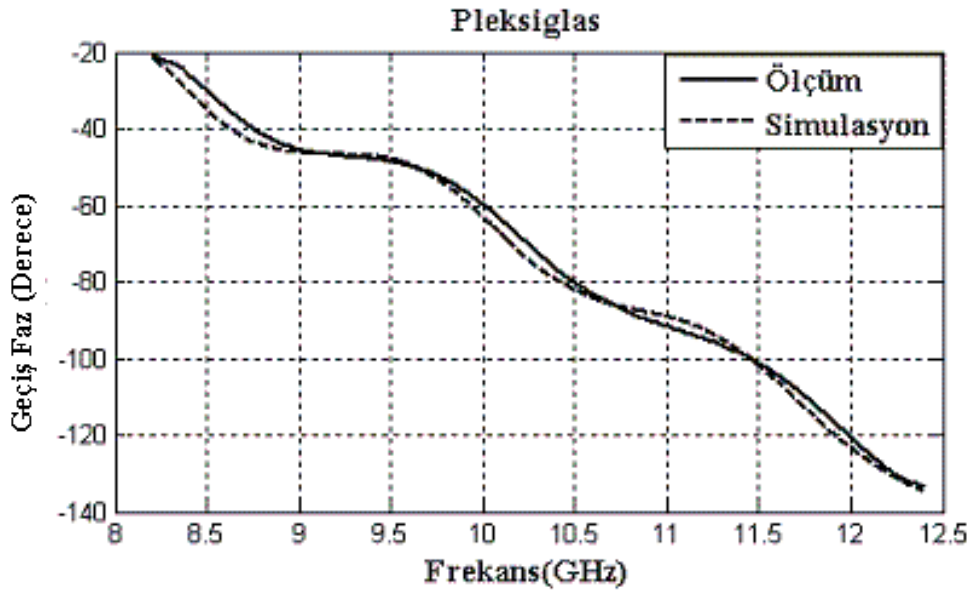
Ek C.14. 50 mm Pleksiglas örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



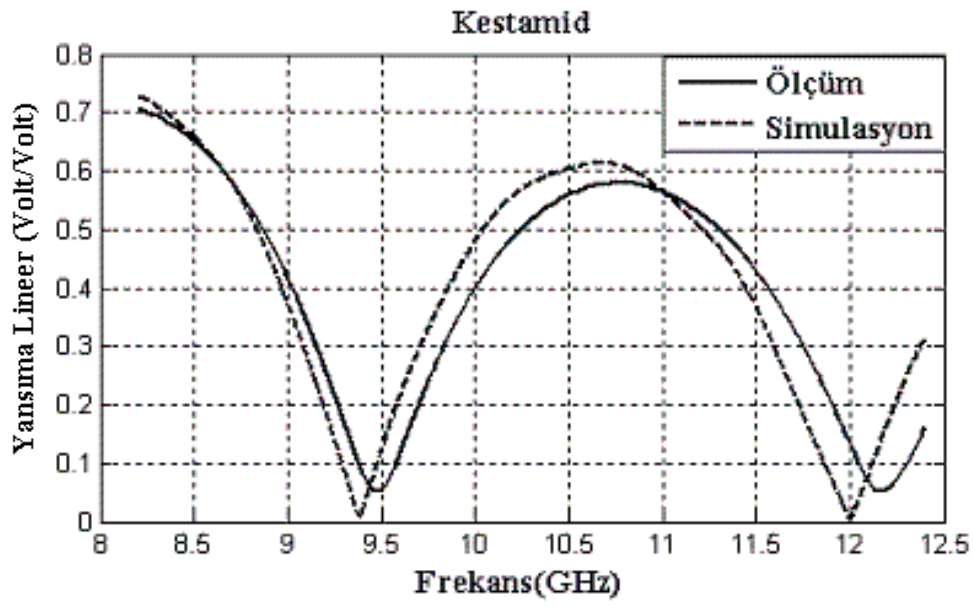
Ek C.15. 50 mm Pleksiglas örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



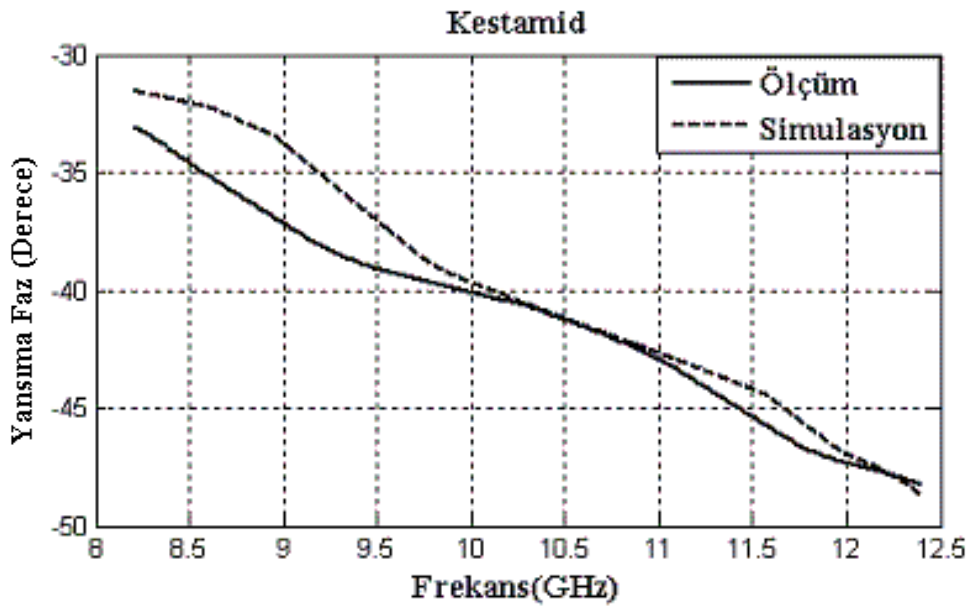
Ek C.16. 50 mm Pleksiglas örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



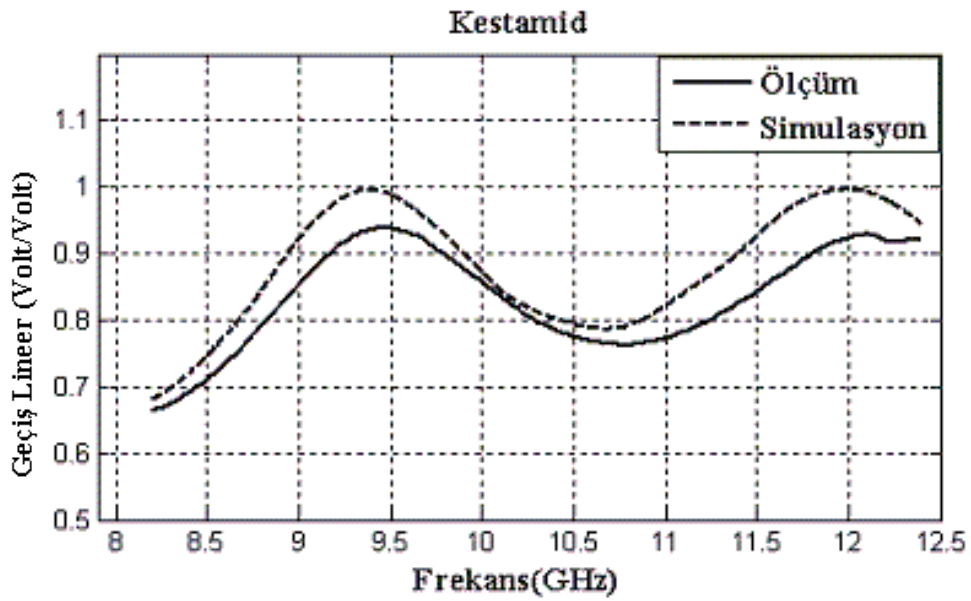
Ek C.17. 50 mm Pleksiglas örneğinin S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



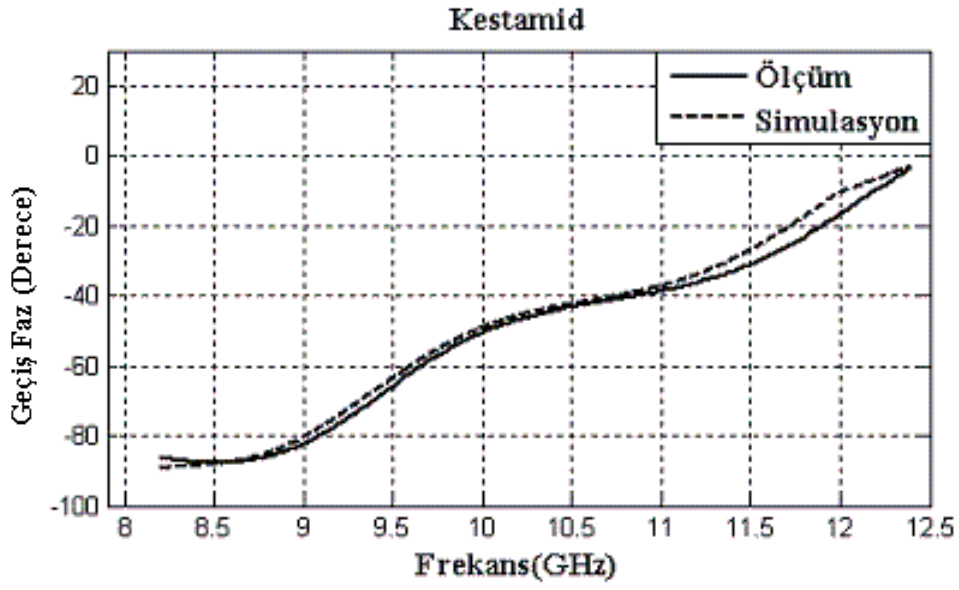
Ek C.18. 30 mm Kestamid örneğinin S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



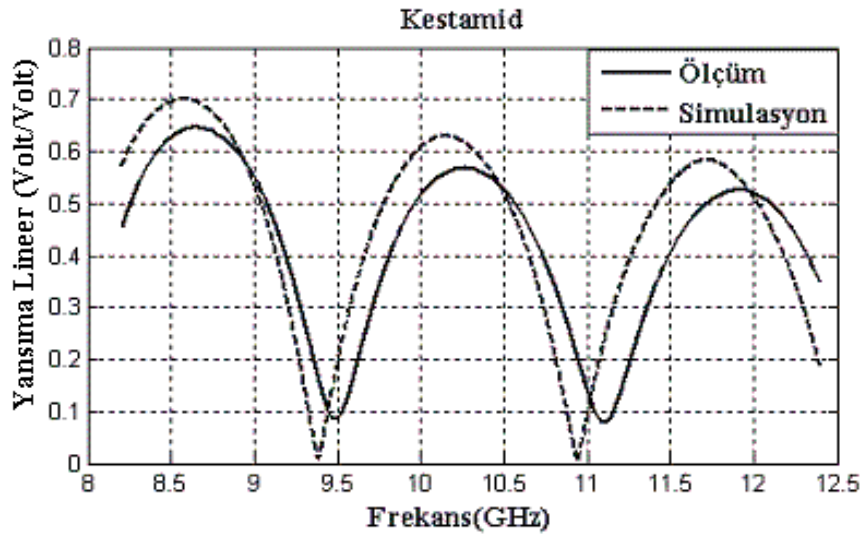
Ek C.19. 30 mm Kestamid örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



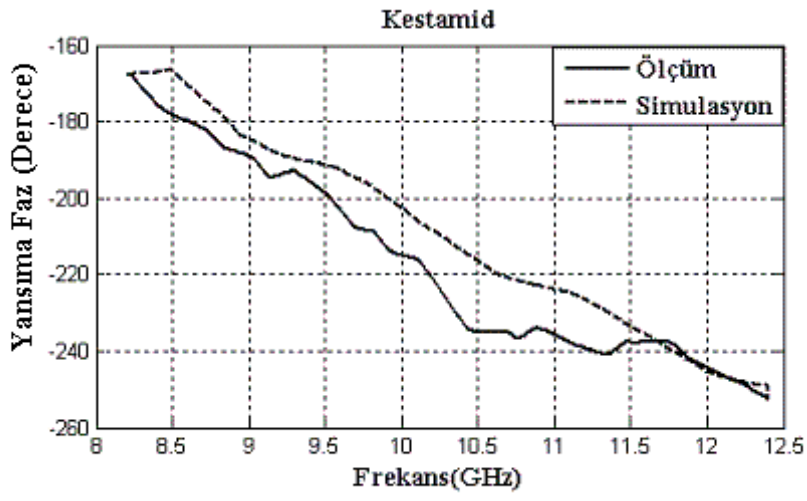
Ek C.20. 30 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



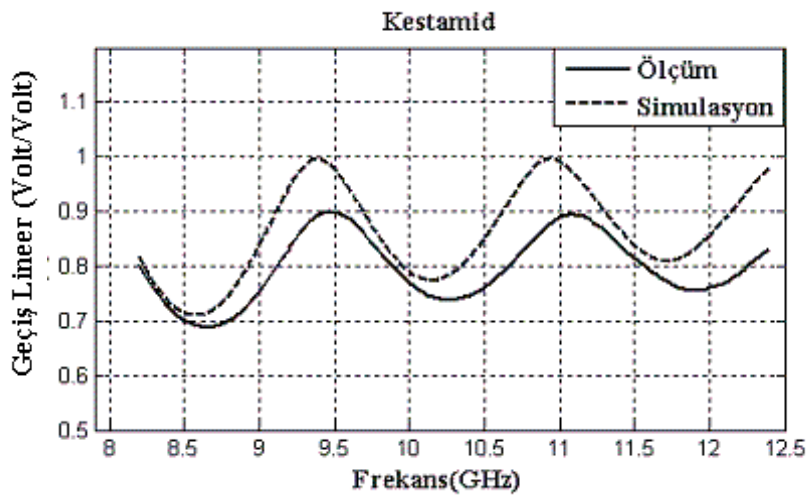
Ek C.21. 30 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



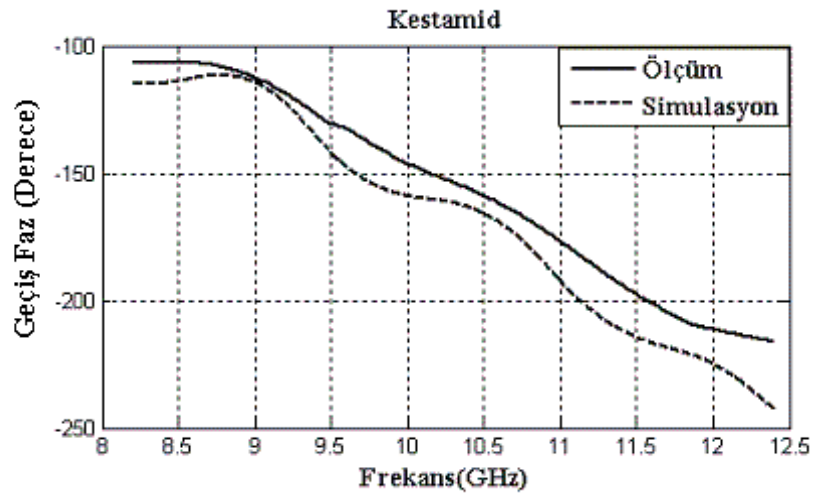
Ek C.22. 50 mm Kestamid örneğın S_{11} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Ek C.23. 50 mm Kestamid örneğın S_{11} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Ek C.24. 50 mm Kestamid örneğın S_{21} lineer ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması



Ek C.25. 50 mm Kestamid örneğın S_{21} faz ölçüm ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması