

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

R BANT DİKDÖRTGEN BOŞLUK REZONATÖRÜ İÇİN UYGUN
UYARIM AÇIKLIK YARIÇAPININ BULUNMASI

MERVE DURMUŞ

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

R BANT DİKDÖRTGEN BOŞLUK REZONATÖRÜ İÇİN UYGUN
UYARIM AÇIKLIK YARIÇAPININ BULUNMASI

MERVE DURMUŞ

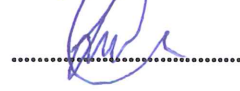
Doç.Dr. Alp Oral SALMAN
Danışman, Kocaeli Üniv.



Dr. Öğr. Üyesi Adnan SONDAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Prof. Dr. İsmail Hakkı TAYYAR
Jüri Üyesi, Karabük Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, malzeme karakterizasyonunda kullanılacak bir R bant rezonatörün uyarımı için en uygun açıklık yarıçapının teorik, deneysel ve benzetimsel olarak bulunması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmam sırasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, çalışmalarım sırasında beni yönlendiren ve bana güvenen danışmanım Doç. Dr. Alp Oral SALMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım sırasında, birçok aşamada beni destekleyen çalışma arkadaşım Dilek GÜN'e ve değerli hocam Dr. Erkul BAŞARAN'a teşekkür ediyorum.

Hayatım boyunca bana destek olan, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran – 2018

Merve DURMUŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. DALGA KILAVUZLARI VE MİKRODALGA REZONATÖRLER	3
1.1. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu	3
1.2. Mikrodalga Boşluk Rezonatörleri.....	6
1.2.1 Dikdörtgen boşluk rezonatörlerinin rezonans frekansı.....	7
2. REZONATÖRLERİN AÇIKLIK İLE UYARIMI.....	9
2.1. İki Kapılı Rezonatör Sisteminin Açıklık İle Uyarımı	10
3. İKİ KAPILI İLETİMDE KALİTE FAKTÖRÜ ÖLÇÜMÜ.....	15
3.1. Yüklü, Yüksüz ve Genişletilmiş Kalite Faktörü	15
3.2. İletim Hattı Tipi Kalite Faktörü Ölçümleri	18
4. ÖLÇÜMLER VE BENZETİMLER	22
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	46
EKLER	48
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	52
ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dikdörtgen dalga kılavuzu geometrisi	4
Şekil 1.2.	Dikdörtgen boşluk rezonatörü	7
Şekil 2.1.	İki kapılı rezonatör sistemi ve eşdeğer devresi	10
Şekil 3.1.	Rezonatörler	15
Şekil 3.2.	Bir rezonatörün genişletilmiş eşdeğer devresi	16
Şekil 3.3.	Port 3'ün Norton eşdeğer devresi.....	17
Şekil 3.4.	Port 1 ve Port 2 arasına yerleştirilen bir mikrodalga rezonatörün eşdeğer devresi	18
Şekil 3.5.	Port 1' ve Port 2' arasındaki eşdeğer devre.....	19
Şekil 3.6.	İletim hattı rezonatörünün rezonans eğrisi	20
Şekil 4.1.	Kullanılan uyarım plakalarının geometrisi.....	23
Şekil 4.2.	Farklı açıklık yarıçaplarına sahip uyarım plakaları.....	23
Şekil 4.3.	Ölçümde kullanılan rezonatör ve adaptörler	24
Şekil 4.4.	Açıklık uyarımlı rezonatör ve besleme adaptörleri.....	25
Şekil 4.5.	Network analizör kalibrasyonu	26
Şekil 4.6.	Farklı yarıçaplardaki açıklıkların rezonansa etkisinin s-parametreleri ölçümü öncesinde ölçüm düzeneği	27
Şekil 4.7.	Kılavuz adaptörlerinin CST modellemesi	28
Şekil 4.8.	Ölçüm düzeneği CST modellemesi	29
Şekil 4.9.	Mesh görünümleri	30
Şekil 4.10.	Farklı açıklık yarıçapları için S_{11} ve S_{21} eğrileri	31
Şekil 4.11.	Farklı açıklık yarıçapları için ölçülen ve benzetilen S_{11} ve S_{21} eğrileri.....	32
Şekil 4.12.	Yüklü kalite faktörü değerleri	36
Şekil 4.13.	Yarıçapa göre ölçülen ve benzetilen rezonans frekansı ve genlik değerleri.....	40
Şekil 4.14.	Yüklü kalite faktörü ve rezonans genlik eğrileri.....	41
Şekil 4.15.	Genişletilmiş kalite faktörü ve rezonans genlik eğrileri.....	42

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Ölçüm ve benzetim sonuçlarından hesaplanan kalite faktörü değerleri.....	35
Tablo 4.2. Hesaplanan yarıçap değerleri(Teorik yarıçaplar).....	37
Tablo 4.3. Ölçüm ve benzetim sonuçlarından elde edilen rezonans frekansı değerleri.....	38
Tablo 4.4. Rezonans genlik değerleri	39
Tablo A.1. Standart dikdörtgen dalga kılavuzu verileri	49



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E	: Elektrik alan, (V/m)
E_x	: Elektrik alanın x yönündeki bileşeni, (V/m)
E_y	: Elektrik alanın y yönündeki bileşeni, (V/m)
E_z	: Elektrik alanın z yönündeki bileşeni, (V/m)
E_t	: Enine elektrik alan, (V/m)
H	: Manyetik alan, (A/m)
H_x	: Manyetik alanın x yönündeki bileşeni, (A/m)
H_y	: Manyetik alanın y yönündeki bileşeni, (A/m)
H_z	: Manyetik alanın z yönündeki bileşeni, (A/m)
H_{g1}	: g1 kılavuzunun açıklık merkezinde oluşturduğu manyetik alan, (A/m)
H_{1rx}	: Giriş açıklığında oluşan x yönlü manyetik alan, (A/m)
H_{2rx}	: Çıkış açıklığında oluşan x yönlü manyetik alan, (A/m)
H_{101}	: Açıklık etkisi ile rezonatör içinde oluşan manyetik alan, (A/m)
$H_{z'}$: Giriş açıklığının merkezindeki z' yönlü manyetik alan, (A/m)
$H_{z'r}$: Giriş açıklığının merkezindeki z' yönlü manyetik alan, (A/m)
M_0	: Dipol genliği
$M_{z'1}$: Giriş açıklığında z' yönlü oluşan dipol
$M_{z'2}$: Çıkış açıklığında z' yönlü oluşan dipol
M_{x1}	: Giriş açıklığında x yönlü oluşan dipol
M_{x2}	: Çıkış açıklığında x yönlü oluşan dipol
\bar{e}	: Enine değişim
a	: x eksenindeki kılavuz (rezonatör) kenar uzunluğu, (m)
b	: y eksenindeki kılavuz (rezonatör) kenar uzunluğu, (m)
d	: z eksenindeki kılavuz (rezonatör) kenar uzunluğu, (m)
m	: x eksenindeki mod indisi
n	: y eksenindeki mod indisi
l	: z eksenindeki mod indisi
ϵ	: Dielektrik sabiti, (F/m)
ϵ_r	: Bağıl elektrik geçirgenlik sabiti, (F/m)
μ	: Manyetik geçirgenlik sabiti, (H/m)
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik sabiti, (H/m)
λ	: Dalga boyu, (m)
λ_g	: Kılavuz dalga boyu, (m)
λ_c	: Kesim dalga boyu, (m)
f	: Frekans, (Hz)
f_{mnl}	: Rezonans frekansı (mnl modunda yayılan dalganın), (Hz)
f_0	: Rezonans frekansı, (Hz)
f_{cmm}	: Kesim frekansı (mn modunda yayılan dalganın), (Hz)
ω	: Açısal frekans, (rad/s)
ω_0	: Açısal rezonans frekansı, (rad/s)
ω_{101}	: 101 modunda uyarılan rezonatörün açısal rezonans frekansı, (rad/s)
c	: Işığın serbest uzaydaki yayılma hızı, (m/s)
k	: Yayılma sabiti

k_c	: Kesim dalga sayısı
k_{mnl}	: Rezonans dalga sayısı
k_0	: Serbest uzay yayılma sabiti
k_{101}	: 101 modunda uyarılan rezonatörün rezonans dalga sayısı
β	: Yayılma faz sabiti, (rad)
β_{mn}	: Yayılma faz sabiti (mn modunda yayılan dalganın), (rad)
β_{10}	: 10 modunda yayılan dalganın faz sabiti, (rad)
B_{mn}	: Genlik (mn modunda yayılan dalganın)
A_{mn}	: Genlik (mn modunda yayılan dalganın)
A^+	: İleri yönde ilerleyen dalganın genliği
A^-	: Geri yönde ilerleyen dalganın genliği
α_m	: Açıklığın manyetik kutuplanabilirlik değeri, (m^3)
α_0	: Maksimum çıkış gücünde araya giriş kaybı, (dB)
r	: Açıklık yarıçapı, (m)
Γ	: Yansıma katsayısı
Y_{in}	: Giriş açıklığındaki admitans değeri
L	: İndüktans değeri, (H)
C	: Kapasitans değeri, (F)
B	: Açıklık eşdeğer devresindeki giriş admitans değeri
B_{ex}	: Genişletilmiş devrenin Norton eşdeğer devresindeki süseptans değeri
n	: Açıklık eşdeğer devresindeki transformatörün sarım sayısı
R	: Direnç değeri, (Ω)
R_e	: Efektif seri yük direnci, (Ω)
R_0	: İletim hattı tipi kalite faktörü ölçümlerinde yüksüz rezonatörün rezistans değeri, (Ω)
R_c	: Genişletilmiş devre iç rezistansı, (Ω)
R_{ex1}	: Genişletilmiş devrede K_1 dönüştürücüsü tarafında dönüştürülen giriş rezistansı, (Ω)
R_{ex2}	: Genişletilmiş devrede K_2 dönüştürücüsü tarafında dönüştürülen çıkış rezistansı, (Ω)
$R_s + jX_s$: Kuplaj dönüşümü
G_0	: Rezonatörün genişletilmiş eşdeğer devresinin iletkenliği
G_{ex}	: Genişletilmiş devrenin Norton eşdeğer devresindeki iletkenlik değeri
Z_0	: Seri rezonans devresinin empedansı
Z_L	: Genişletilmiş eşdeğer devrenin toplam empedans değeri
V_s	: Genişletilmiş kaynak modeli, (V)
V	: Port 3'ün gerilim değeri, (V)
I	: Genişletilmiş eşdeğer devre akımı, (A)
P_0	: Genişletilmiş eşdeğer devrede rezonatör içerisinde dağılan güç, (W)
P_{ex1}	: Genişletilmiş eşdeğer devrede girişte dağılan güç, (W)
Q	: Kalite faktörü
Q_0	: Yüksüz kalite faktörü
Q_L	: Yüklü kalite faktörü
Q_{ex}	: Genişletilmiş kalite faktörü
κ	: Kuplaj katsayısı
κ_1	: Girişteki kuplaj katsayısı
κ_2	: Çıkıştaki kuplaj katsayısı
K_1	: Port 1'deki empedans dönüştürücüsü
K_2	: Port 2'deki empedans dönüştürücüsü

- S_{21} : 1. kapıdan bakıldığında 2. kapıda gözlenen saçılma parametresi
 S_{21e} : Rezonans frekansındaki S_{21} genlik değeri, (dB)

Kısaltmalar

- BW : Bandwidth (Bant Genişliği)
KOÜ : Kocaeli Üniversitesi
MİLTEK : Milimetre Dalga, Elektromanyetik ve Güvenlik Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (Milimeter Wave, Electromagnetic and Security Technologies)
RF : Radio Frequency (Radyo Frekansı)
TE : Transverse Electric (Enine Elektrik)
TEM : Transverse Electromagnetic (Enine Elektromanyetik)
TM : Transverse Magnetic (Enine Manyetik)
TOSM : Through, Open, Short, Match Calibration (İletim, Açık, Kısa, Uyumlu Yük Kalibrasyonu)

R BANT DİKDÖRTGEN BOŞLUK REZONATÖRÜ İÇİN UYGUN UYARIM AÇIKLIK YARIÇAPININ BULUNMASI

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, dalga kılavuzu rezonatör yöntemi ile yapılacak olan malzeme karakterizasyonunda kullanılmak üzere R bantta çalışan bir dikdörtgen boşluk rezonatöründe kullanılacak en uygun (optimum) açıklık yarıçapının teori, deney ve benzetimler yardımıyla tespit etmektir.

Öncelikle, malzeme karakterizasyonu için kullanılmak üzere Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde yer alan MİLTEK Laboratuvarı'nda önceden satın alınmış olan, R bant dalga kılavuzu parçasına uygun, üzerinde 3 mm ile 13 mm arasındaki çeşitli yarıçaplarda açıklıklar bulunan plaka çiftleri, optimum yarıçapı bulmak üzere yaptırılmıştır. Deneyler sırasında, hazırlanan bu plaka çiftleri, tek tek n tipi konektör (bağlayıcı) girişi olan dalga kılavuzu adaptörlerinin ve dalga kılavuzu parçasının aralarına bağlanmış, network analizör yardımıyla tüm yarıçap değerleri için s-parametreleri ölçülmüştür. Bu parametrelerden rezonatörün uyarım durumları (yetersiz, kritik ve aşırı bağlaşım) gözlemlenmiştir.

Ölçümde kullanılan farklı yarıçaptaki her bir rezonatör yapısının CST Studio Suit programı yardımıyla benzetimleri yapılmıştır.

Ölçümler ve benzetimlerden her bir yarıçap değeri için elde edilen rezonans eğrileri kullanılarak MATLAB programında yazılan bir kod yardımıyla kalite faktörü değerleri hesaplanmış ve bu değerler teorik yarıçap değerlerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Teorik yarıçap değerleri ile kullanılan yarıçap değerleri karşılaştırılmış ve hata analizi yapılmıştır.

Tüm bu çalışmaların sonunda rezonans eğrileri, kalite faktörü değerleri ve teorik yarıçap değerleri kullanılarak malzeme karakterizasyonunda kullanılacak rezonatör için en uygun yarıçap değeri 7 mm olarak bulunmuştur ve R bant rezonatörü malzeme karakterizasyonu ölçümlerine hazır hale getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açıklık Uyarımı, Dalga Kılavuzu Rezonatör Methodu, Rezonatörler.

FINDING PROPER EXCITATION APERTURE RADIUS FOR AN R-BAND RECTANGULAR CAVITY RESONATOR

ABSTRACT

The purpose of this work is to determine the optimum aperture radius to be used in a rectangular cavity resonator operating in R band for the electromagnetic material characterization using by the waveguide resonator method, with the help of theoretical, experimental and simulations.

First, pairs of plates, which is suitable for the R-band waveguide section previously purchased in the MILTEK Laboratory of Kocaeli University, Department of Electronics and Communication Engineering, with apertures in various radii of between 3 mm and 13 mm were made to find the optimum radius for use in material characterization. During the experiments, these plate pairs were connected between waveguide adapters with n-type connector input and waveguide sections, and s-parameters were measured for all radius values with a network analyzer. From these parameters, the excitation states of the resonator (under, critical and over-coupling) were observed.

Each resonator with different radii used in the measurement is simulated with the help of CST Studio Suit.

For each radius value obtained from measurements and simulations, quality factor values were calculated by using a code written in MATLAB program using resonance curves and these values were used to obtain the theoretical radius values. Theoretical radius values and used radius values were compared and error analysis was performed.

At the end of all these studies, the optimum radius value for material characterization was found to be 7 mm using resonance curves, quality factor values and theoretical radius values and the R band resonator was made ready for material characterization measurements.

Keywords: Aperature Excitation, Waveguide-Resonator Method, Resonators.

GİRİŞ

Malzemelerin elektromanyetik özelliklerinin bulunmasında, dalga kılavuzu rezonatör metodu oldukça sık kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte malzeme özellikleri tek bir frekansta hassas olarak bulunabilmektedir. Dalga kılavuzu rezonatör tekniği kullanılarak malzeme karakterizasyonu yapılmadan önce, kullanılacak rezonatörün uyarımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Dalga kılavuzları ve rezonatörler, duvarlarında bulunan bir açıklık yardımı ile uyarılabilirler. İletken bir duvar üzerindeki açıklığın etkisi ilk olarak Bethe [1] tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, iki kavitenin arasında bulunan ortak duvar üzerindeki açıklığın rezonansa etkisi ve kavitenin elektromanyetik alanları incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, açıklığın merkezinde elektrik ve manyetik dipoller oluştuğu ve ikinci kavitede bu dipoller ile aynı formda elektrik ve manyetik alanlar meydana geldiği bulunmuştur. Daha sonra Collin [2], bu sonuçları rezonatör ve dalga kılavuzu sistemleri için genelleştirmiştir. Dalga kılavuzu alanları kullanarak, açıklık ile uyarılmış rezonatör için alan denklemlerini ve açıklık yarıçapının hesabını incelemiştir. Bu incelemede kavite sistemi için elektrik eşdeğer devresi kullanmıştır.

Açıklık uyarımının genel prensipleri birçok çalışmada bulunmaktadır [3-5]. Bu çalışmalarda, çeşitli rezonatör ve dalga kılavuzu sistemleri için eşdeğer devre çözümleri yapılmıştır. Genel prensiplerin yanında, iki rezonatör arasındaki uyarım, uyarım plakasının kalınlığı ve açıklığın şeklinin etkisinde araştırılmıştır [6-8].

Bu tez çalışmasında, açıklık yarıçapının rezonatör uyarımına etkisi teorik olarak, deneysel ve benzetim yardımıyla incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalara ek olarak, açıklığın rezonansa etkisi ve rezonatörün kalite faktörü değerleri deneysel olarak ve benzetim yolları ile bulunmuş, elde edilen rezonans eğrilerinden açıklık teorisi kullanılarak teorik yarıçap değerleri hesaplanmıştır. Böylelikle kullanılan yarıçap değerleri ile teorik yarıçap değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve hata miktarları bulunmuştur.

Uyarım durumları (az, kritik ve çok uyarım) yarıçap değerlerine göre belirlenmiş ve malzeme karakterizasyonu için kullanılacak en uygun uyarım yarıçap değeri bulunmuştur.

Bölüm 1’de dalga kılavuzları ve mikrodalga rezonatörler için alan denklemleri ve elektromanyetik dalga özellikleri anlatılmıştır. Bölüm 2’de iki kapılı bir kavite sisteminin açıklık ile uyarımı ele alınmıştır. Bölüm 3’te iletim hattı tipi ölçümler için kalite faktörü hesaplamaları gösterilmiştir. Bölüm 4’te ölçüm ve benzetim sonuçları verilmiş ve bu sonuçlarının yorumları yapılmıştır. Bölüm 5’te sonuçlar genel hatlarıyla ele alınmış ve ölçüm ile ilgili öneriler verilmiştir.

1. DALGA KILAVUZLARI VE MİKRODALGA REZONATÖRLER

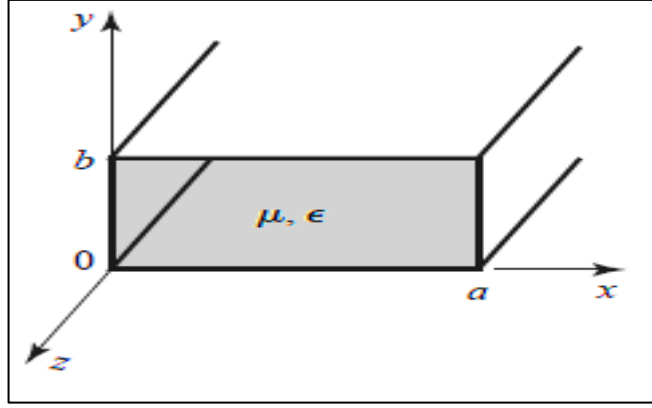
1.1. Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

Dalga kılavuzları elektromanyetik dalgaları veya ses dalgalarını taşıyan ve yönlendiren yapılardır. Dalga kılavuzları özellikle yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların iletilmesinde kullanılır. Bunlar değerli metal malzemelerden (bakır, kısmen gümüş ya da altın kaplı pirinç gibi) üretilmiş tüplerdir. Bir dalga kılavuzu dikdörtgen, dairesel yada eliptik kesitli olabilir, ancak kısa bağlantılarda en çok kullanılanı dikdörtgen biçimli olandır.

Dalga kılavuzları, eş eksenli kabloları göre elektromanyetik enerjiyi çok daha kayıpsız iletilir. Enerji iletilmesi için kullanılan elektrik ve manyetik alanlar metal yüzeylerde sıfırdır ve bu alanlar dalga kılavuzu duvarları arasında kalan hacimde hapsedilmiştir. Dalga kılavuzunun kapalı yapıya sahip olması hem içerden dışarıya sızmayı önler (böylece ışınım sırasında bir kayıp olmaz), hem de iletilen çok zayıf sinyalleri dışardan gelen gürültülere karşı korur [9].

Dikdörtgen dalga kılavuzları geniş bantlı mikrodalga elemanlarıdır, boyutlarına bağlı olarak belirli frekans bantlarında çalışırlar. Standart dikdörtgen dalga kılavuzları için kılavuz boyutları ve frekans bantları EK-A'da verilmiştir. Dikdörtgen dalga kılavuzları yapılarından dolayı yüksek geçiren filtre gibi davranırlar. Boyutlarına bağlı olan bir kesim frekansına sahiptirler ve bu kesim frekansından yüksek olan frekanstaki dalgaları iletebilirler.

Dikdörtgen dalga kılavuzlarında TE ve TM dalga modları iletebilir. Tek bir iletkeni sahip olduğu için TEM dalga modu iletilmez. Bir dikdörtgen dalga kılavuzunun geometrisi Şekil 1.1'de gösterilmiştir [9].



Şekil 1.1. Dikdörtgen dalga kılavuzu geometrisi [9]

Şekil 1.1’de gösterilen dalga kılavuzunun için, dielektrik sabiti ϵ ve manyetik geçirgenlik sabiti μ olan bir malzeme ile dolu olduğu ve dalga ilerleme yönünün z olduğu varsayılmıştır. Kılavuzda yayılan dalganın TE modunda olduğunu düşünürsek, elektrik alanın ilerleme yönündeki bileşeni ($E_z = 0$) sıfır olacağından, z yönünde sadece manyetik alanın bileşeni H_z olacaktır [9].

$$H_z(x, y, z) = h_z(x, y)e^{-j\beta z}. \quad (1.1)$$

Bu bileşen Denklem (1.1)’deki gibi tanımlanabilir. β yayılma faz sabitidir. Helmholtz denklemlerinden yola çıkılarak,

$$\left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + k_c^2 \right) h_z(x, y) = 0 \quad (1.2)$$

denklemini elde edilir. Denklem (1.2)’de k_c , kesim dalga sayısını belirtir ve $k_c = \sqrt{k^2 - \beta^2}$ ile bulunur. k yayılma sabitidir.

Denklem (1.2)’de verilen kısmi diferansiyel denklem değişkenlere ayırma yöntemi ile çözülebilir. $h_z(x, y)$ için genel çözüm, Denklem (1.3)’te verilmiştir.

$$h_z(x, y) = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y) \quad (1.3)$$

Bu denklem sınır koşulları altında düzenlenirse, Denklem (1.4) elde edilir.

$$H_z(x, y, z) = A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.4)$$

Denklem (1.4)'de m ve n yayılan modun indisidir. TE modu için diğer dalga bileşenleri,

$$E_x = \frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.5)$$

$$E_y = \frac{-j\omega\mu m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.6)$$

$$H_x = \frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.7)$$

$$H_y = \frac{j\beta n\pi}{k_c^2 b} A_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.8)$$

olarak bulunur. Kesim dalga sayısı Denklem (1.9)'dan hesaplanır.

$$k_c = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.9)$$

Faz sabiti ise Denklem (1.10)'dan bulunabilir [9].

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.10)$$

Dalga kılavuzunun kesim frekansı, yayılan dalganın modundan (TE veya TM) bağımsız olarak Denklem (1.11)'den hesaplanır.

$$f_{c_{mn}} = \frac{k_c}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (1.11)$$

Bir dalga kılavuzunda en küçük kesim frekanslı mod, baskın mod olarak adlandırılır. Belirtilen geometride $a > b$ olarak alındığı için, en küçük kesim frekansı TE_{10}

modununkidir. TE modunda m ve n mod indisleri sıfır olduğunda alan bileşenleri sıfırlanacağı için TE₀₀ modu yoktur [9].

TM modunda H_z = 0 olur. Dalganın yayılım yönünde elektrik alanın bileşeni bulunmaktadır. TM modu için dalga denklemlerinin oluşturulması TE modu ile aynı yöntemle yapılır. TM modu için alan bileşenleri,

$$E_x = \frac{-j\beta m\pi}{k_c^2 a} B_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.12)$$

$$E_y = \frac{-j\beta n\pi}{k_c^2 b} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.13)$$

$$H_x = \frac{j\omega \epsilon n\pi}{k_c^2 b} B_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.14)$$

$$H_y = \frac{-j\omega \epsilon m\pi}{k_c^2 a} B_{mn} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} e^{-j\beta z} \quad (1.15)$$

olarak bulunur. TM modunda m veya n indislerinden herhangi biri sıfır olduğunda, bütün alan bileşenleri sıfırlanmaktadır. Bu sebeple TM modunda m veya n sıfır olamaz [9].

1.2. Mikrodalga Boşluk Rezonatörleri

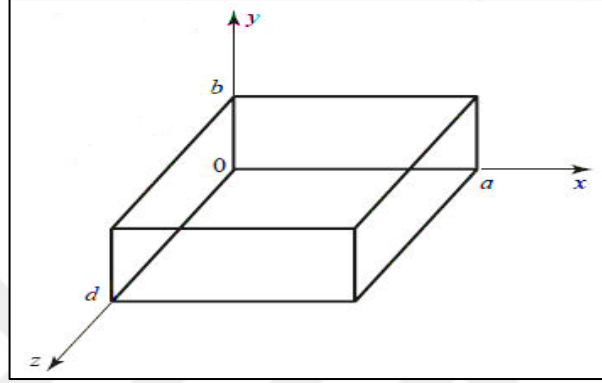
Belli bir frekansta titreşen ya da rezonans yapan, dolayısıyla belirli frekanslardaki dalgaları iletmeye veya güçlendirmeye yarayan elemanlara rezonatör adı verilir. Rezonatörler, toplu devre elemanlarından, mikroşerit yapılardan, dalga kılavuzlarından veya dielektrik malzemelerden oluşturulabilirler.

Yüksek frekanslarda dalga kılavuzundan elde edilen rezonatörlerin kayıpları oldukça düşüktür, bu sebeple mikrodalga frekanslarında, dalga kılavuzunun açık uçları kapatılarak kapalı bir kutu yani boşluk oluşturulur. Elektrik enerji ve manyetik enerji boşluk kısmında depolanır.

Boşluk rezonatörlerine uyarım, küçük bir açıklık, küçük bir sonda veya döngü ile sağlanabilir. Yapının üç boyutunda olan alan değişimlerine bağlı olarak, boşluk rezonatörü birden fazla rezonans moduna sahip olabilir [9].

1.2.1. Dikdörtgen boşluk rezonatörlerinin rezonans frekansı

Dikdörtgen boşluk rezonatörünün geometrisi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Dikdörtgen boşluk rezonatörü [9]

Şekil 1.2’deki boşluğun rezonans frekansının bulunması için dikdörtgen dalga kılavuzu denklemlerinin, boşluğun sınır koşulları altında incelenmesi gerekmektedir. Boşluk kayıpsız varsayılarak, dikdörtgen dalga kılavuzlarının TE veya TM modlarındaki enine elektrik alanları, Denklem (1.16)’daki gibi yazılabilir.

$$\vec{E}_t(x, y, z) = \vec{e}(x, y) \left(A^+ e^{-j\beta_{mn}z} + A^- e^{+j\beta_{mn}z} \right) \quad (1.16)$$

Burada $\vec{e}(x, y)$ enine değişimi ve A^+ , A^- ise ileri ve geri ilerleyen dalgaların genliklerini göstermektedir. TE veya TM modunun m, n indisli yayılma sabiti Denklem (1.17) ile verilir.

$$\beta_{mn} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2} \quad (1.17)$$

Burada, $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ ve ω açısal frekans, ϵ ile μ ise boşluğu dolduran malzemenin elektrik ve manyetik geçirgenlikleridir.

$z=0$ 'da $\vec{E}_t = 0$ koşulunu Denklem (1.16)'ya uygulayarak $A^+ = A^-$ elde edilir (Kayıpsız olarak varsayılan boşluğun duvarları mükemmel iletkenlerdir ve yansıyan ile gelen dalganın genlik değerleri birbirine eşittir.). $z=d$ 'deki $\vec{E}_t = 0$ koşulu da, Denklem (1.18)'i verir.

$$\vec{E}_t(x, y, d) = -\vec{e}(x, y)A^+ 2j \sin \beta_{mn} d = 0 \quad (1.18)$$

Tek aşikâr olmayan ($A^+ \neq 0$) çözüm,

$$\beta_{mn} d = l\pi, \quad l=1,2,3,\dots \quad (1.19)$$

değerlerinde oluşur. Bu da boşluğun boyunun, rezonans frekansında yarım dalga boyunun katları olduğu anlamına gelir. Rezonans frekanslarından başka frekanslarda veya boşluğun boyunun yarım dalga boyunun katlarından farklı uzunlukta olduğu durum için aşikâr olmayan çözüm yoktur [9].

Dikdörtgen boşluk için rezonans dalga sayısı, Denklem (1.20)'deki gibi tanımlanabilir.

$$k_{mnl} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (1.20)$$

m, n, l indisleri, sırasıyla x, y, z yönlerindeki duran dalga örüntüsünün değişim sayısını göstermek üzere, TE_{mnl} ve TM_{mnl} boşluk rezonans modları olarak tanımlanır ve bu modların rezonans frekansı, Denklem (1.21) ile verilir.

$$f_{mnl} = \frac{ck_{mnl}}{2\pi\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (1.21)$$

Burada c serbest uzaydaki ışığın hızı ve ϵ_r ile μ_r sırasıyla boşluğu dolduran malzemenin bağıl elektrik ve manyetik geçirgenlik sabitleridir. Eğer $b < a < d$ ise, TE_{101} ve TM_{110} modları, baskın modlardır [9].

2. REZONATÖRLERİN AÇIKLIK İLE UYARIMI

Kullanılan uygulamaya göre elektromanyetik dalgaları sınırlandırmak veya yönlendirmek gerekebilir. Çeşitli iletim hattı elemanları veya antenler kullanılarak elektromanyetik dalgalar yönlendirilebilir. Elektromanyetik dalgaları belirli bir modda veya frekansta sınırlandırmak için çeşitli uyarım yöntemleri mevcuttur. Dalga kılavuzları kullanılarak iletilen bir elektromanyetik dalgayı, bir kılavuzdan diğerine veya bir rezonatöre bağlaştırabilmek için ortak duvarda açılan küçük bir açıklık kullanılabilir. Açıklık kullanılarak yapılan uyarımda dalganın istenilen özelliklerde sınırlandırılarak iletimi sağlanabilir [9].

Lineer boyutları dalga boyuna göre oldukça küçük olan açıklıklar için, açıklığı elektrik ve manyetik dipol ışınması olarak kabul eden yaklaşık bir teori bulunmaktadır [1]. Açıklık eşdeğeri olarak kabul edilen manyetik ve elektrik dipoller, gelen dalganın normal elektrik alanı ve dik manyetik alanı ile orantılıdır. Rezonatörlerin, dikdörtgen dalga kılavuzu kullanılarak uyarılmasında açıklık uyarımı oldukça sık kullanılan bir yöntemdir. Dikdörtgen dalga kılavuzu alanlarından yola çıkılarak, rezonatörde açıklığın etkisiyle meydana gelen rezonans modları bulunabilir. İstenilen modda ve istenilen frekansta rezonatör uyarılabilir [2]. Rezonatörlerin uyarımında üç çeşit bağlaşım durumu bulunmaktadır. Bunlar,

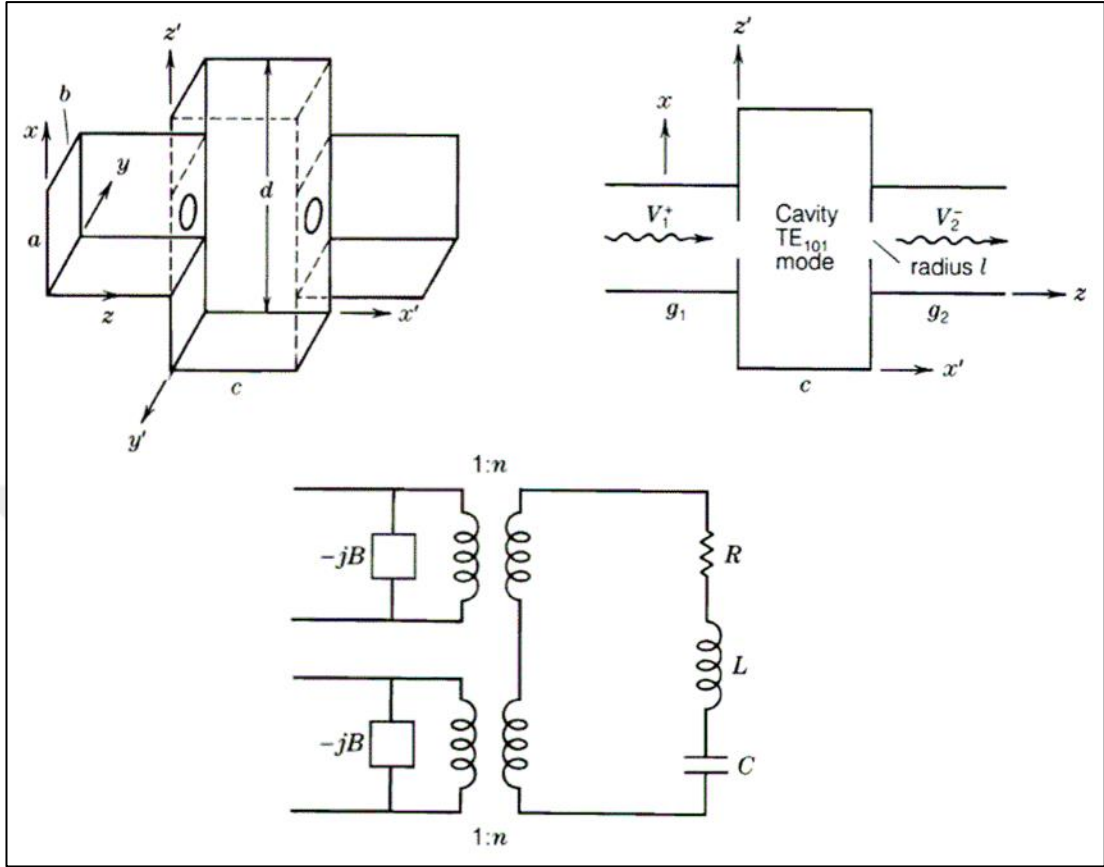
yetersiz bağlaşım (under coupling),

kritik bağlaşım (critically coupling)

aşırı bağlaşım (over coupling)'dir.

Rezonatörlerin kullanılacakları uygulamaya göre uyarım çeşidi belirlenir. Malzeme karakterizasyonunda kullanılacak olan bir rezonatör için uygun bağlaşım türü kritik bağlaşımdır. Kritik bağlaşım durumunda, rezonatör rezonans frekansında besleme hattına uyumludur, böylelikle besleme hattı ile rezonatör arasında yansıma olmaz [9].

2.1. İki Kapılı Rezonatör Sisteminin Açıklık İle Uyarımı



Şekil 2.1. İki kapılı rezonatör sistemi ve eşdeğer devresi [2]

Şekil 2.1’de gösterilen iki kapılı rezonatör sisteminde rezonatörün TE_{101} ve dalga kılavuzlarının TE_{10} modunda uyarıldığını varsayalım. Açıklıkta x yönünde manyetik dipoller meydana gelecektir [1]. g_1 kılavuzunun açıklık merkezine gelen TE_{10} modu x yönlü H_{g1} manyetik alanını oluşturacaktır [2].

$$H_{g1} = 2j\beta_{10}NA \quad (2.1)$$

A, gelen modun genliğidir. Rezonatörün rezonans frekansı, $\omega_0 = \omega_{101} = k_{101} \left(\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \right)$ olarak yazılabilir. k_{101} , rezonatörün yayılma sabitidir ve sadece rezonatör boyutlarına bağlı olarak değişir.

$$k_{101} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{c}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2} \quad (2.2)$$

Rezonatörde oluşan alan, çıkıştaki açıklığı manyetik dipol ile uyararak g2 dikdörtgen dalga kılavuzuna elektromanyetik enerji aktarımını sağlar. g2 ve g1 açıklıklarında $M_0 a_x$ dipolü açıklık merkezinde H_x bileşeni olan TE_{10} modu yayar [2]. Bu bileşen Denklem (2.3)'deki gibi tanımlanır.

$$H_{1rx} = H_{2rx} = -2j\beta_{10} \left(\frac{M_0}{ab} \right) \quad (2.3)$$

Rezonatörün oluşturduğu tepki alanını bulabilmek adına giriş ve çıkış açıklıklarındaki dipolleri $M_{Z'1}$ ve $M_{Z'2}$ olarak alınabilir. Bu dipoller, H_{101} alanı için bir TE_{101} alanı üretir[2].

$$H_{101} = \sqrt{\frac{4}{bcd}} k_{101}^{-1} \left[-\frac{\pi}{d} \sin \frac{\pi x'}{c} \cos \frac{\pi z'}{d} a_{x'} + \frac{\pi}{c} \sin \frac{\pi z'}{d} \cos \frac{\pi x'}{c} a_{z'} \right] \quad (2.4)$$

$$h_{101} = \frac{k_0^2}{k_{101}^2 - k_0^2 \left(1 + \frac{1-j}{Q} \right)} \sqrt{\frac{4}{bcd}} \frac{\pi}{k_{101} c} (M_{Z'1} - M_{Z'2}) \quad (2.5)$$

Rezonatör için yayılma sabiti ve frekans $k_{101}^2 = \omega_0^2 k_0^2 / \omega^2$, $\omega_0 = \omega_{101}$ şeklindedir. Giriş açıklığının merkezindeki $H_{z'}$ alanı, Denklem (2.6)'daki gibi tanımlanır.

$$H_{z'} = H_{z'r} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 \left(1 + \frac{1-j}{Q} \right)} \frac{4}{bcd} \left(\frac{\pi}{k_{101} c} \right)^2 (M_{Z'1} - M_{Z'2}) \quad (2.6)$$

Çıkış açıklığının merkezindeki alan ise bu değer negatifdir. İşlem kolaylığı için W katsayısını Denklem (2.7)'deki gibi tanımlayalım.

$$W = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 \left(1 + \frac{1-j}{Q} \right)} \frac{4}{bcd} \left(\frac{\pi}{k_{101} c} \right)^2 \quad (2.7)$$

$M_{z'1} = M_{x1}$ ve $M_{z'2} = M_{x2}$ olarak yazılabilir.

Giriş açıklığı için,

$$M_0 = M_{x1} = \alpha_m \left(H_{g1} - \frac{2j\beta_{10}}{ab} M_{x1} + WM_{x1} - WM_{x2} \right) \quad (2.8)$$

dipolü elde edilir. Çıkış açıklığındaki dipol ise,

$$M_{x2} = \alpha_m \left(-\frac{2j\beta_{10}}{ab} M_{x2} + WM_{x2} - WM_{x1} \right) \quad (2.9)$$

olarak bulunur. α_m açıklığın manyetik kutuplanabilirlik niceliğidir ve dairesel açıklığın yarıçapına (r) bağlı olarak değişir [1-2].

$$\alpha_m = \frac{4}{3} r^3 \quad (2.10)$$

Çıkış açıklığındaki dipol denklemini M_{x2} için çözersek ve giriş açıklığı denkleminde

$$\text{yerine koyarsak } M_{x1} \left[1 + \alpha_m \left(\frac{2j\beta_{10}}{ab} - W \right) - \frac{\alpha_m^2 W^2}{1 + \alpha_m \left(\frac{2j\beta_{10}}{ab} - W \right)} \right] = \alpha_m H_{g1} \text{ elde edilir.}$$

$g1$ dikdörtgen dalga kılavuzundaki yansımaya katsayısı, Denklem (2.11)'deki gibi tanımlanır.

$$\Gamma = -1 + \frac{2jX(1 + \alpha_m U)}{(1 + \alpha_m U)^2 - \alpha_m^2 W^2} \quad (2.11)$$

$$X = \frac{2\alpha_m \beta_{10}}{ab}, \quad U = \frac{2j\beta_{10}}{ab} W \quad (2.12)$$

Yansımaya katsayısından yola çıkılarak girişteki admitans değeri Denklem (2.13)'den bulunur.

$$Y_{in} = \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} = \frac{1}{jX} - \frac{\alpha_m W}{jX \left(1 - \frac{\alpha_m W}{1+jX}\right)} \quad (2.13)$$

Devre eşdeğerine ulaşmak için $K = (4\alpha_m / bcd)(\pi / k_{101}c)^2$ değişkeni tanımlayıp admitans denklemini düzenlersek,

$$Y_{in} = \frac{1}{jX} - \frac{K\omega^2}{jX \left[\omega_0^2 - \omega^2 \left(1 + \frac{1-j}{Q}\right) \right] - \frac{\omega^2 K}{1+(1/jX)}} \quad (2.14)$$

elde edilir. Şekil 2.1'de verilen eşdeğer devre için giriş admitans değeri, Denklem (2.15)'deki gibi tanımlanır.

$$Y_{in} = -jB - \frac{n^2\omega^2}{j\omega L \left(\omega^2 - \omega_0^2 - j\omega^2 \frac{R}{\omega L} \right) - \frac{n^2\omega^2}{1-jB}} \quad (2.15)$$

$\omega_0^2 = 1/LC$, $\omega L/R = Q$ olarak alınıp Denklem (2.15) düzenlenirse, Denklem (2.16) elde edilir.

$$Y_{in} = -jB - \frac{n^2\omega^2}{j\omega L \left(\omega_0^2 - \omega^2 + \omega^2 \frac{j}{Q} \right) - \frac{n^2\omega^2}{1-jB}} \quad (2.16)$$

Eşdeğer devrenin bağlaşım teorisi ile uyuşması için $\frac{1}{jX} = -jB$ olmalıdır. Buradan,

$B = \frac{ab}{2\beta_{10}\alpha_m}$ olarak bulunur. İki kapılı rezonatör sistemi kayıplı bir iletim sistemi

olarak gösterilir. Bu şekilde giriş ve çıkış dalga kılavuzları bağlaştırılabilir. Bu gösterimde çıkış dikdörtgen dalga kılavuzu rezonatör için rezistif yük gibi davranır [2].

Denklem (2.16)'yı B cinsinden düzenleyip tekrar yazarsak, Denklem (2.17) elde edilir.

$$Y_{in} = -jB + \frac{n^2}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C} - \frac{jn^2B}{1+B^2} + R + \frac{n^2}{1+B^2}} \quad (2.17)$$

B normalde oldukça büyük bir değere sahiptir. Efektif seri yük direnci $R_e = \frac{n^2}{B^2}$ olarak tanımlanır. Giriş gücünün küçük bir kısmının rezonatör içinde dağılması için yüzey empedansının katkısı olan R, $\frac{n^2}{B^2}$ değerinden oldukça küçük olmalıdır [2]. Yük direnci, Denklem (2.18)'deki gibi tanımlanır.

$$R_e = \frac{n^2}{B^2} = \frac{8\alpha_m^2 \beta_{10} Z_0}{k_0 ab (cd)^2} \left(\frac{\pi}{k_{101} c} \right)^2 \quad (2.18)$$

Yük direnci ile ilişkili olan genişletilmiş kalite faktörü Q_{ex} , Denklem (2.19)'daki gibi bulunur [2].

$$Q_{ex} = \frac{B^2}{n^2 \omega C} = \left(\frac{acb^2 d}{8\alpha_m^2 \beta_{10}} \times \left(\frac{k_{101} c}{\pi} \right)^2 \right) \quad (2.19)$$

3. İKİ KAPILI İLETİMDE KALİTE FAKTÖRÜ ÖLÇÜMÜ

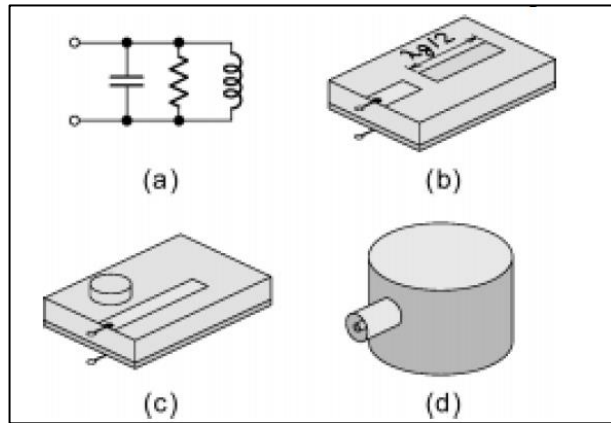
Rezonatörler, osilatörler ve RF filtreleri için temel elemanlardır. Diğer devre elemanları gibi bir rezonatör kullanılmadan önce deneysel olarak test edilmelidir ve özellikleri bulunmalıdır. Bir rezonatör için üç temel özellik,

1. rezonans frekansı,
2. bağlaşım faktörü,
3. yüksüz kalite faktörü bulunmalıdır.

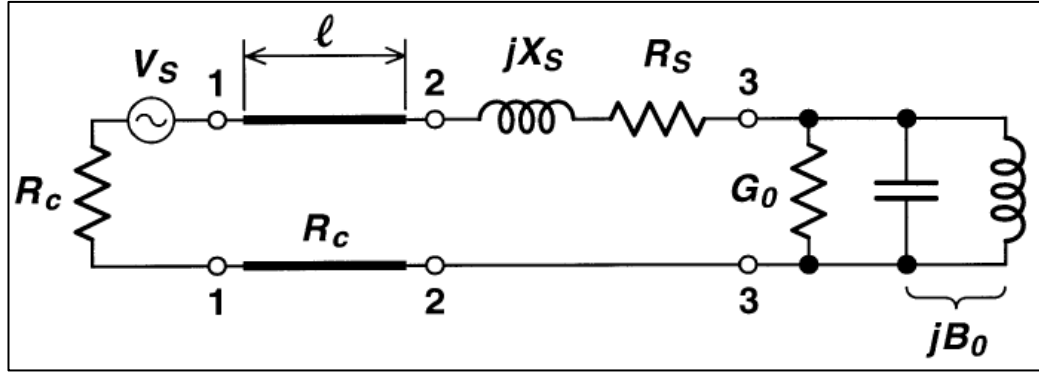
RF rezonatörleri grid dip metre veya Q metre gibi özelleşmiş ölçüm aletleri ile test edilebilirler. Ancak son zamanlarda network analizörler diğer ölçüm cihazları yerine oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [10]. Network analizör kullanılarak yapılan kalite faktörü ölçümü için üç muhtemel devre tipi mevcuttur. Bu devre tipleri iletim tipi, yansıma tipi ve reaksiyon tipidir [11].

3.1. Yüklü, Yüksüz ve Genişletilmiş Kalite Faktörü

Toplu elemanlı rezonatörler kapasite ve indüktör kullanılarak yapılan devrelerin kombinasyonudur ve Şekil 3.1.a'daki gibidir.



Şekil 3.1. Rezonatörler



Şekil 3.2. Bir rezonatörün genişletilmiş eşdeğer devresi

Şekil 3.2, Şekil 3.1'deki tüm rezonatörler için yaklaşık dağıtılmış elemanlı eşdeğer devresini göstermektedir. Şekil 3.2 aynı zamanda V_s için genişletilmiş kaynak modelini ve giriş iletim hattı için uyumlu iç empedansı içerir. Kaynak, giriş portu ile rezonatöre bağlanmış olan network analizörü modeller. Giriş (port 1) ve bağlaşım (port 2) arasındaki iletim hattı uzunluğu (l) fiziksel olarak oldukça kısa olmalıdır [10]. Port 3 rezonatörün kendisini temsil etmektedir. Empedans $R_s + jX_s$ bağlaşım mekanizmasının dönüşüm özelliklerini temsil eder. Çevre bağlaşımı için X_s pozitif reaktans, sonda bağlaşımı için X_s negatif reaktanstır. Rezonatörün reaktansı paralel LC kombinasyonu ile gösterilir.

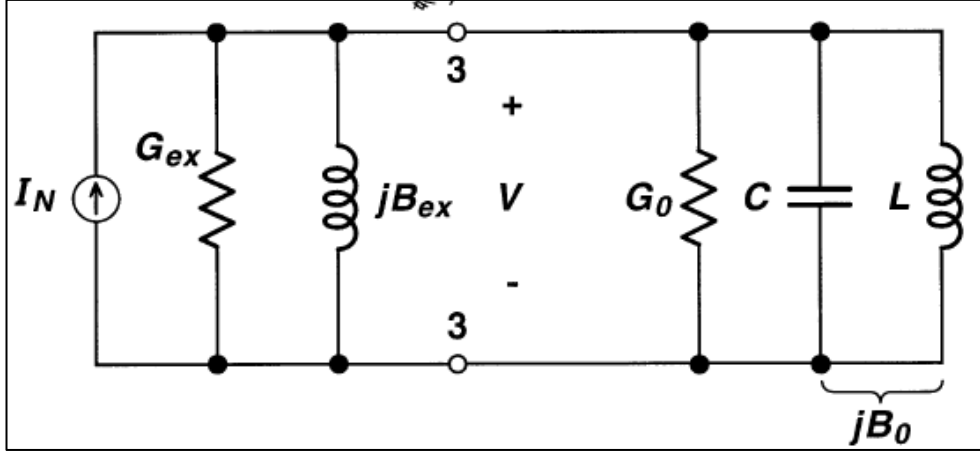
Port 3'ün sağ tarafından bakıldığında yüksüz kalite faktörü görülür ve rezonans frekansı Denklem (3.1)'den hesaplanır.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Yüksüz kalite faktörü Q_0 ile gösterilir ve Denklem (3.2)'den bulunur.

$$Q_0 = \frac{2\pi f_0 C}{G_0} \quad (3.2)$$

İletkenlik G_0 , rezonatörün içindeki dağılımı temsil eder [10-11]. Bu dağılım iletkenlik kaybı ve dielektrik kaybindan meydana gelir. Port 3'teki devrenin Norton eşdeğeri Şekil 3.3'deki gibidir.



Şekil 3.3. Port 3'ün Norton eşdeğer devresi

Eşdeğer devredeki süseptans B_{ex} , rezonans frekansına etki eder. Bu etki oldukça küçük bir etkidir. G_{ex} iletkenliği G_0 'a paraleldir ve Q değerini azaltarak yeni bir kalite faktörü değeri (Q_L) oluşmasını sağlar. Bu yeni değer yüklü kalite faktörü olarak adlandırılır [10]. Rezonatörler için G_{ex} iletkenliği ve B_{ex} süseptansı ile ilişkili genişletilmiş kalite faktörü Q_{ex} değeri bulunmaktadır.

Yüklü, yüksüz ve genişletilmiş kalite faktörü arasındaki ilişki, Denklem (3.3)'de verilmiştir. Genişletilmiş kalite faktörü, yüksüz kalite faktöründen yola çıkılarak bulunabilir.

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ex}} \quad (3.3)$$

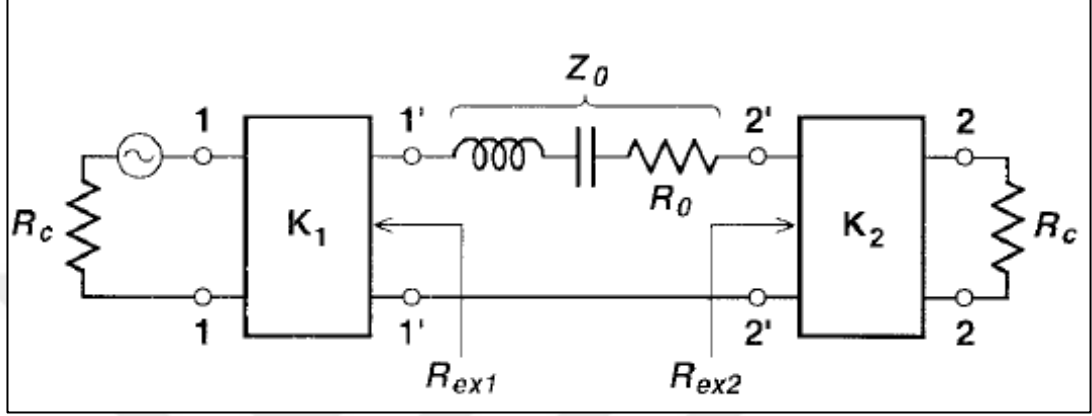
Genişletilmiş devredeki güç dağılımının, rezonatör içindeki güç dağılımına oranı bağlaşım katsayısı olarak adlandırılır ve κ ile gösterilir. G_0 ve G_{ex} ortak voltaj değerine sahiptir bu yüzden güçlerin oranı iletkenliklerin oranına eşittir [10].

$$\kappa = \frac{V^2 G_{ex}}{V^2 G_0} = \frac{G_{ex}}{G_0} = \frac{Q_0}{Q_{ex}} \quad (3.4)$$

Eşdeğer devrede ve rezonatörün içinde eşit bir güç dağılımı olduğunda bağlaşım kritik adımı alır. Kritik altı bağlaşımında, rezonatör içinde genişletilmiş devreden daha fazla güç dağılımı meydana gelir. Kritik üstü bağlaşımında ise genişletilmiş devrede

rezonatörün içine göre daha fazla güç kaybı meydana gelir. Network analizör kullanılarak yapılan ölçümlerde network analizörün kendisi yük olarak davranır ve ölçümden elde edilen kalite faktörü değeri yüklü kalite faktörü Q_L değeridir [10].

3.2 İletim Hattı Tipi Kalite Faktörü Ölçümleri

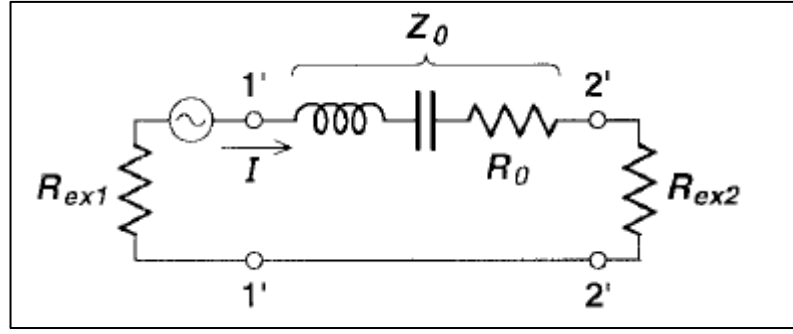


Şekil 3.4. Port 1 ve Port 2 arasında yerleştirilen bir mikrodalga rezonatörünün eşdeğer devresi [10]

İletim hattı tipi rezonatörler için güvenilir devre modellemesi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Rezonatör, seri rezonans devresi ile modellenmiştir. Rezistans R_0 yüksüz rezonatördeki kaybı temsil eder. Empedans dönüştürücüler K_1 ve K_2 , giriş ve çıkışta rezonatör ve genişletilmiş devre arasındaki bağlantıyı temsil eder. Genişletilmiş devre, iç rezistansı R_c olan Thevenin kaynak modelini de içerir ve devrenin yükü empedans uyumlaması için R_c olarak alınır. (Tipik değeri 50Ω)

Yüksek Q 'lu rezonatörler için, seri rezonans devresinin empedansı, frekansın lineer fonksiyonu olarak Denklem (3.5)'teki gibi yazılabilir [10].

$$Z_0 = R_0 \left(1 + jQ_0 2 \frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (3.5)$$



Şekil 3.5. Port 1' ve 2' arasındaki eşdeğer devre [10]

Şekil 3.5, giriş ve çıkış rezistanslarının, empedans dönüştürücüleri K_1 ve K_2 ile dönüştürüldükten sonraki halini gösterir.

$$R_{ex1} = \frac{K_1^2}{R_c}, \quad R_{ex2} = \frac{K_2^2}{R_c} \quad (3.6)$$

Giriş bağlaşım katsayısı, genişletilmiş eş değer devrenin giriş kısmında dağılan gücün, rezonatörün giriş kısmında dağılan güce oranıdır. Şekil 3.5'teki bütün devre elemanlarından aynı I akımı akar. Girişteki bağlaşım katsayısı Denklem (3.7)'den bulunur.

$$\kappa_1 = \frac{P_{ex1}}{P_0} = \frac{|I|^2 R_{ex1}}{|I|^2 R_0} = \frac{R_{ex1}}{R_0} = \frac{K_1^2}{R_c R_0} \quad (3.7)$$

Çıkıştaki bağlaşım katsayısı da aynı yolla Denklem (3.8)'den bulunabilir.

$$\kappa_2 = \frac{P_{ex2}}{P_0} = \frac{K_2^2}{R_c R_0} \quad (3.8)$$

Eşdeğer devre için toplam empedans değeri Denklem (3.9) kullanılarak hesaplanabilir.

$$Z_L = R_{ex1} + R_{ex2} + Z_0 \quad (3.9)$$

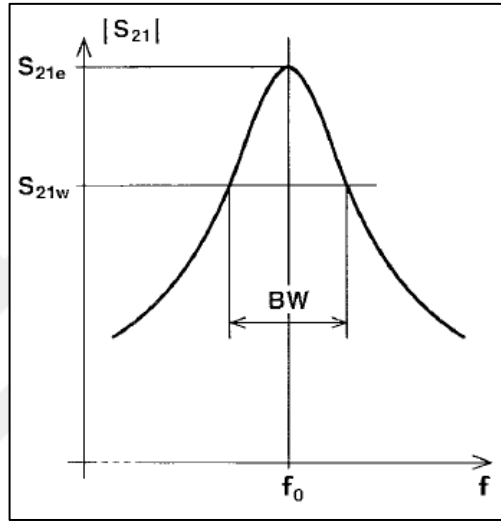
Yüksek kalite faktörlü rezonatörler için tanımlanan empedans fonksiyonu eşdeğer devrenin toplam empedansına eşitlenebilir.

$$Z_L = R_{ex1} + R_{ex2} + Z_0 = R_0 \left(1 + jQ_0 2 \frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (3.10)$$

Empedans eşitliğinden yola çıkılarak yüklü kalite faktörü Q_L , Denklem (3.11)'den bulunur.

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \kappa_2 + \kappa_1} \quad (3.11)$$

Frekansın bir fonksiyonu olarak, S_{21} parametresinin genlik değeri Şekil 3.6'daki gibi bir eğri oluşturur [10].



Şekil 3.6. İletim hattı rezonatörünün rezonans eğrisi [10]

Şekil 3.5'teki eşdeğer devre için S_{21} değeri frekansa bağlı olarak Denklem (3.12)'deki gibi yazılır.

$$S_{21}(f) = -\frac{2\sqrt{\kappa_1\kappa_2}}{1 + \kappa_1 + \kappa_2} \left(\frac{1}{1 + jQ_L 2 \frac{f - f_0}{f_0}} \right) \quad (3.12)$$

Rezonans frekansında S_{21} genliği $|S_{21e}|$ olarak gösterilip, Denklem (3.13)'den bulunabilir.

$$|S_{21}(f_0)| = |S_{21e}| = \frac{2\sqrt{\kappa_1\kappa_2}}{1 + \kappa_1 + \kappa_2} \quad (3.13)$$

Genişletilmiş yüklerin ikisinde, karakteristik empedans R_c 'ye eşit ise $|S_{21}|$ değeri araya giriş kaybı ile zdeşitir ve genellikle desibel olarak gösterilir. Maksimum çıkışta araya giriş kaybı Denklem (3.14)'deki gibi tanımlanır.

$$\alpha_0 = 20 \log |S_{21}(f_0)| \quad (3.14)$$

Pasif rezonatörler için $|S_{21}| < 1$ 'dir ve α negatiftir. İletim hattı tipi kalite faktörü ölçüm için giriş ve çıkış bağlaşımı özdeş olmalıdır.

$$\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa \quad (3.15)$$

zdeş bağlaşım katsayıları için $|S_{21}(f_0)|$ değeri, Denklem (3.16)'ya indirgenir.

$$|S_{21e}| = \frac{2\kappa}{1 + 2\kappa} \quad (3.16)$$

Buradan yola çıkılarak toplam bağlaşım katsayısı, saçılma parametresinin genliğinden Denklem (3.17) kullanılarak hesaplanabilir.

$$2\kappa = \frac{|S_{21e}|}{1 - |S_{21e}|} \quad (3.17)$$

Rezontarn yüklü Q değeri, iletilen sinyalin -3 dB bant genişliği ve rezonans frekansı kullanılarak Denklem (3.18)'den bulunur [10].

$$Q_L = \frac{f_0}{BW} \quad (3.18)$$

Yüksüz Q değeri ise bulunan yüklü Q değerinden Denklem (3.19) kullanılarak hesaplanır.

$$Q_0 = \frac{Q_L}{1 - |S_{21e}|} \quad (3.19)$$

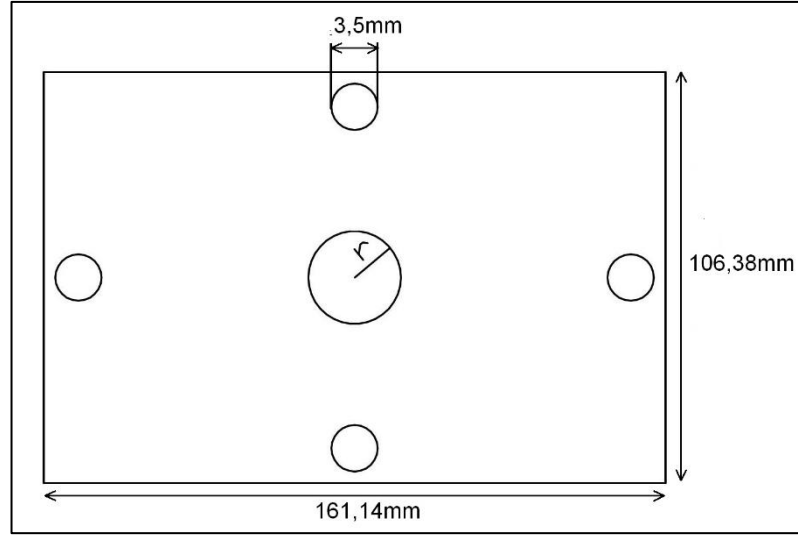
Rezonatörler için kalite faktörleri arasındaki ilişkiyi gösteren Denklem (3.3) kullanılarak genişletilmiş kalite faktörü Q_{ex} hesaplanabilir [10].

4. ÖLÇÜMLER VE BENZETİMLER

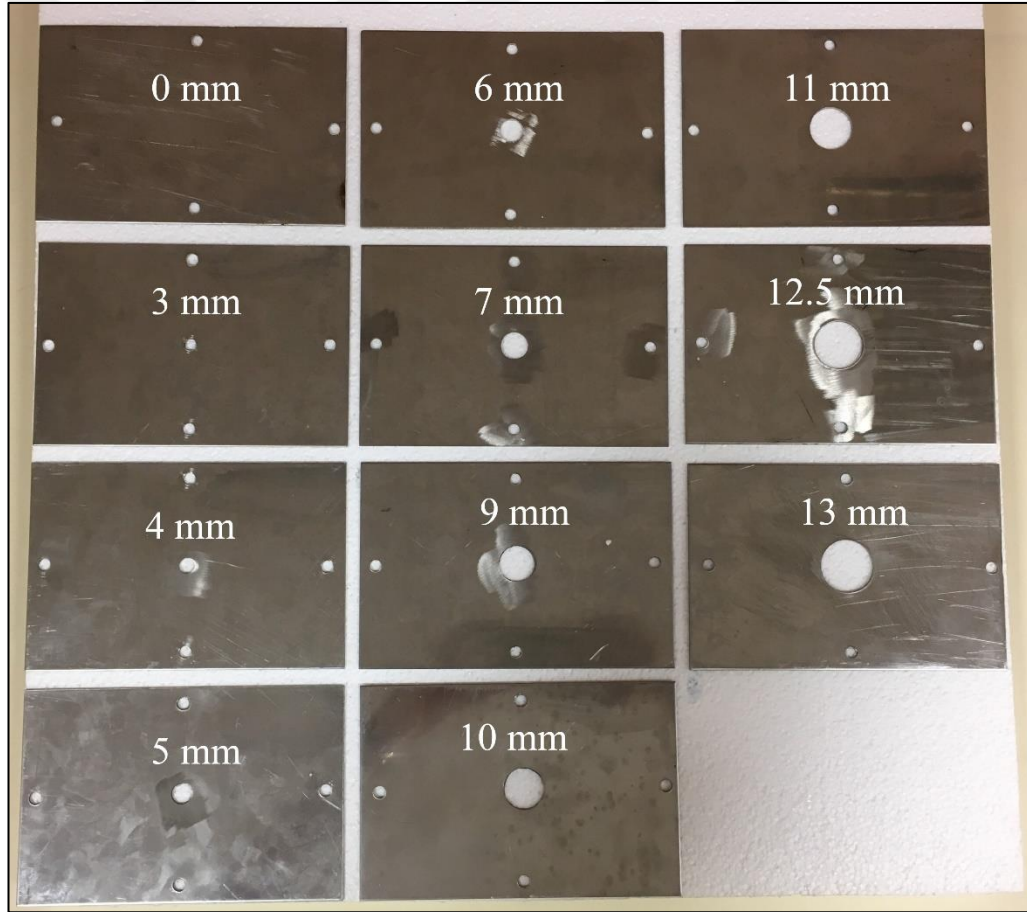
Bölüm 2’de teorisi verilmiş olan uyarım açıklığının rezonansa etkisi bu bölümde deney ve benzetim yardımıyla incelenmiştir. Malzeme karakterizasyonunda kullanılacak olan bir rezonatör için en uygun açıklık yarıçapının bulunması amaçlanmıştır. En uygun yarıçap değerlendirmesi için Bölüm 3’te teorisi verilen network analizör ile saçılma parametreleri ölçümünden kalite faktörü hesaplamaları ve Bölüm 1.2.1.’de verilen rezonans frekansı formülleri kullanılmıştır.

Ölçümler için KOÜ-MİLTEK Laboratuvarı’nda bulunan R bant dalga kılavuzu bölümü kullanılmıştır. Bu kılavuz bölümünün eni ve yüksekliği standart R bant dalga kılavuzu boyutlarında (EK-A), uzunluğu ise 79 mm’dir. Bu kılavuz bölümünün network analizör ile ölçümünün yapılabilmesi için parçanın dalga kılavuzu adaptörleri ile network analizöre bağlanması gerekmektedir. Dalga kılavuzu bölümü kullanılarak rezonatör oluşturmak için, ilk olarak kılavuzun açık olan uçlarını kapatacak çelik plakalar hazırlanmıştır. Bu plakalar dalga kılavuzu bölümüne civatalar ile bağlanarak boşluk yapısını oluşturur.

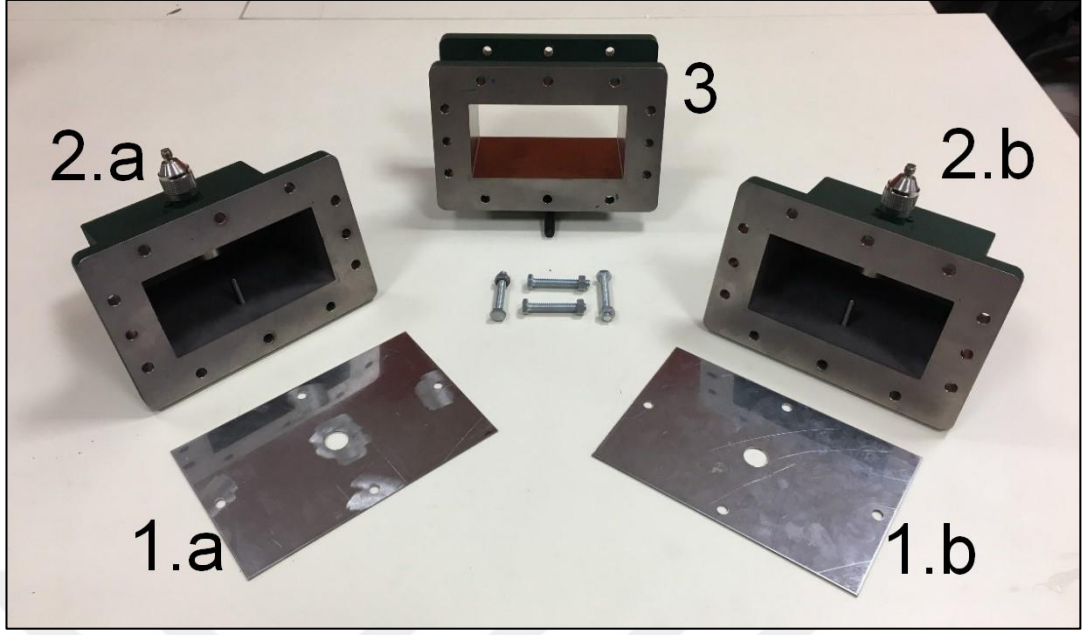
Hazırlanan boşluk rezonatörünün uyarımının gerçekleştirilmesi için ise plakaların merkezlerine farklı yarıçaplarda dairesel uyarım açıklıkları KOÜ Makine Mühendisliği mekanik atölyesinde uygun matkap uçları kullanılarak açılmıştır. Açıklıkların yarıçap değerleri, 3-7 mm ve 9-11 mm arası 1 mm’lik aralıklarla olacak şekilde, 12,5 mm ve 13 mm’dir. 8 mm ile 12 mm yarıçaplarına ait açıklıklar, atölyede bu uçlar olmadığından hazırlanamamıştır. Oluşturulan uyarım plakalarının geometrisi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kullanılan uyarım plakalarının geometrisi



Şekil 4.2. Farklı açıklık yarıçaplarına sahip uyarım plakaları



Şekil 4.3. Ölçümde kullanılan rezonatör ve adaptörler (1.a, 1.b uyarım plakaları, 2.a, 2.b eş eksenliden dalga kılavuzuna geçiş adaptörleri, 3 dalga kılavuzu bölümü)

Şekil 4.3’de gösterilen eş eksenliden dalga kılavuzuna geçiş adaptörlerinin eş eksenli kablo ucunda kullanılan 7 mm’den 3,5 mm’ye eş eksenli bağlantı elemanıdır. Bu eleman network analizörün 3,5 mm’lik eş eksenli kablolarına bağlantı yapılabilmesi için kullanılmıştır. Plaka çiftleri, dalga kılavuzu bölümü ile dalga kılavuzu arasına yerleştirilerek civatalar ile sabitlenmiştir. Oluşturulan açıklık uyarımlı rezonatör yapısı Şekil 4.4’ de verilmiştir. Oluşturulan rezonatörün ölçümleri KOÜ Mikrodalga Laboratuvarı’nda bulunan Rohde&Schwarz marka ZVB-20 model vektörel network analizör ile gerçekleştirilmiştir.

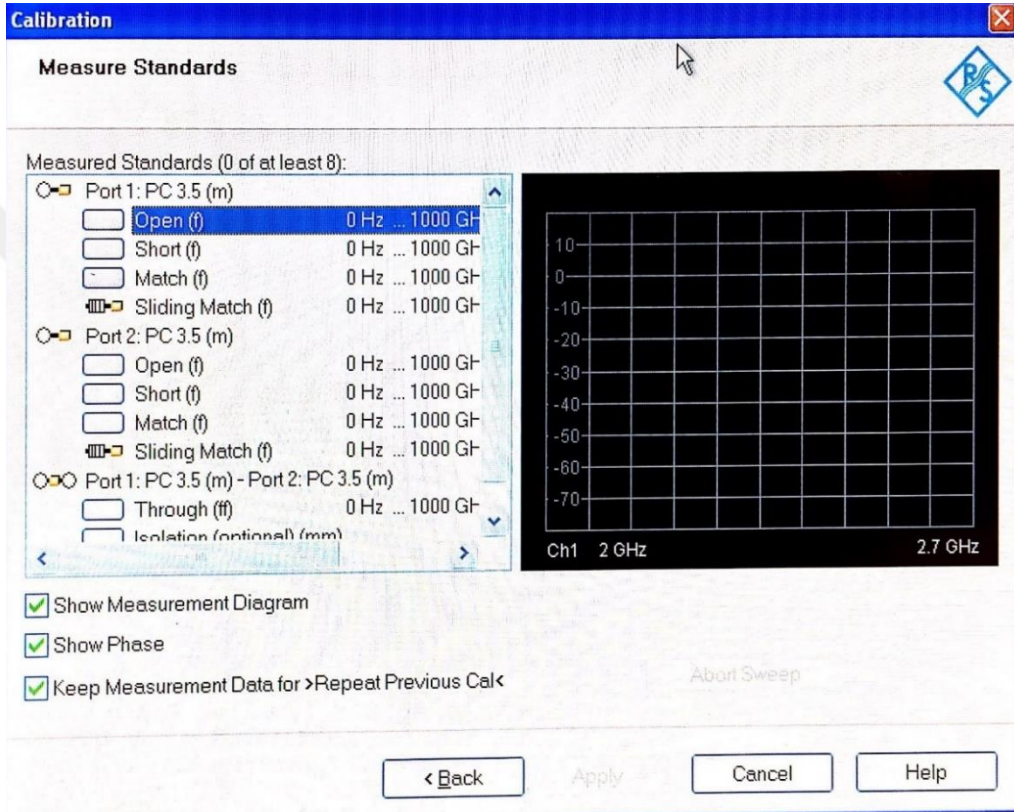


Şekil 4.4. Açıklık uyarımlı rezonatör ve besleme adaptörleri

Ölçüm yapılmadan önce network analizör ile adaptörler arasında bağlantıyı sağlayan eş eksenli kabloların etkisini yok etmek için network analizöre eş eksenli kablo kalibrasyonu (through calibration-cable calibration) uygulanmıştır. Kablo kalibrasyonu, network analizörün kalibrasyon kiti ile gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon kitinde yer alan kısa devre, açık devre, uyumlu yük ve geçiş bağlantıları kullanılarak, network analizör yazılımında bulunan TOSM (Through-open-short-match) kalibrasyon adımları yapılmıştır. İki eş eksenli kablo içinde uçlar sırasıyla kısa devre, açık devre ve uyumlu yük elemanları ile kalibre edilmiş, daha sonra geçiş bağlantısı ile kablolar birbirine bağlanarak kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır. Kalibrasyon referansları ve sistem arayüzü Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



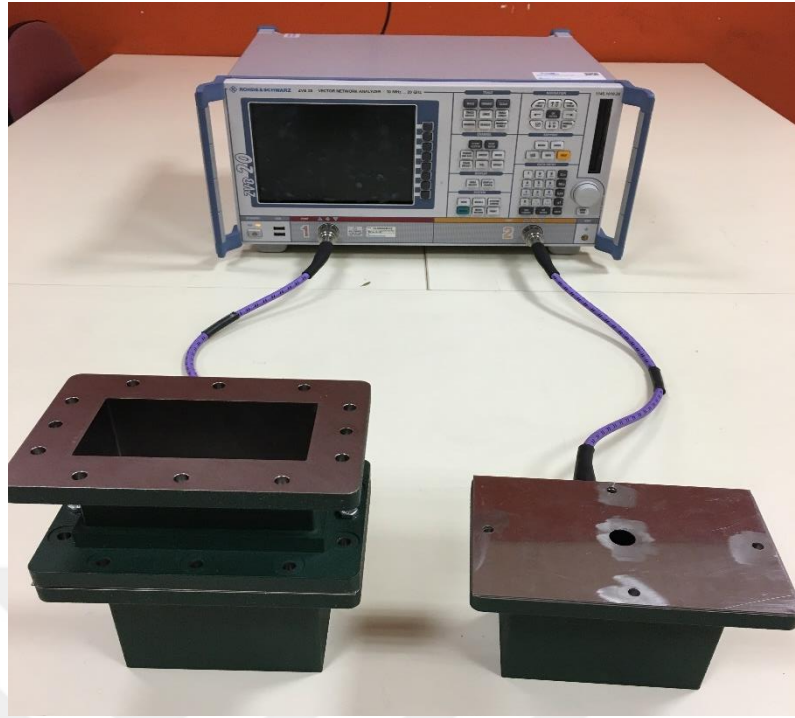
(a) Kalibrasyonda kullanılan referanslar



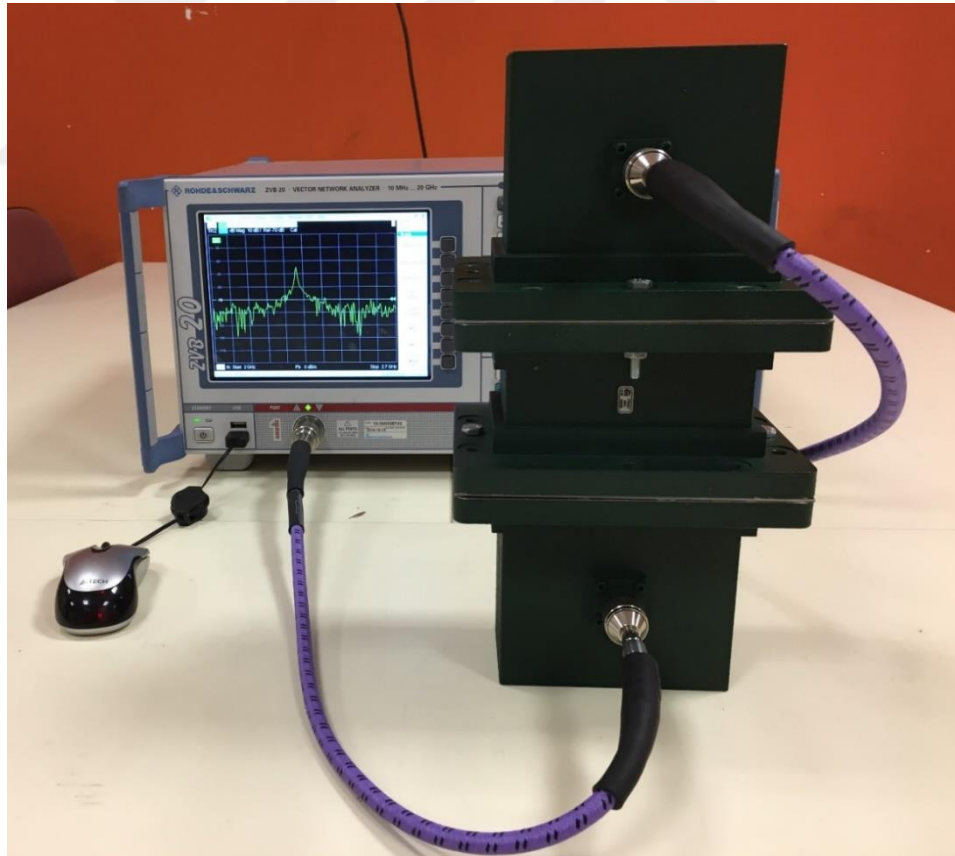
(b) Network analizör kalibrasyon arayüzü

Şekil 4.5. Network analizör kalibrasyonu

Kalibrasyonu yapılan kablolar adaptörler ve rezonatör bağlanarak rezonatör ölçüm için hazır hale getirilmiştir ve bu sistem Şekil 4.6'de verilmiştir. Her yarıçap değeri için plakalar bağlanarak S_{11} ve S_{21} ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm frekans aralığı 2100 MHz ile 2600 MHz olarak alınmıştır.



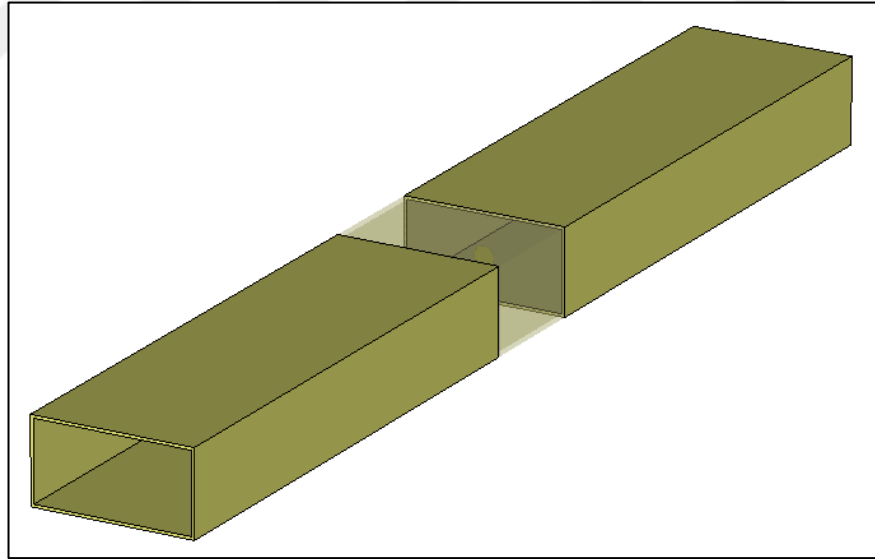
(a) Ölçüm düzeneği açık hali



(b) Ölçüm düzeneği birleştirilmiş hali

Şekil 4.6. Farklı yarıçaplardaki açıklıkların rezonansa etkisinin s-parametreleri ölçümü öncesinde ölçüm düzeneği

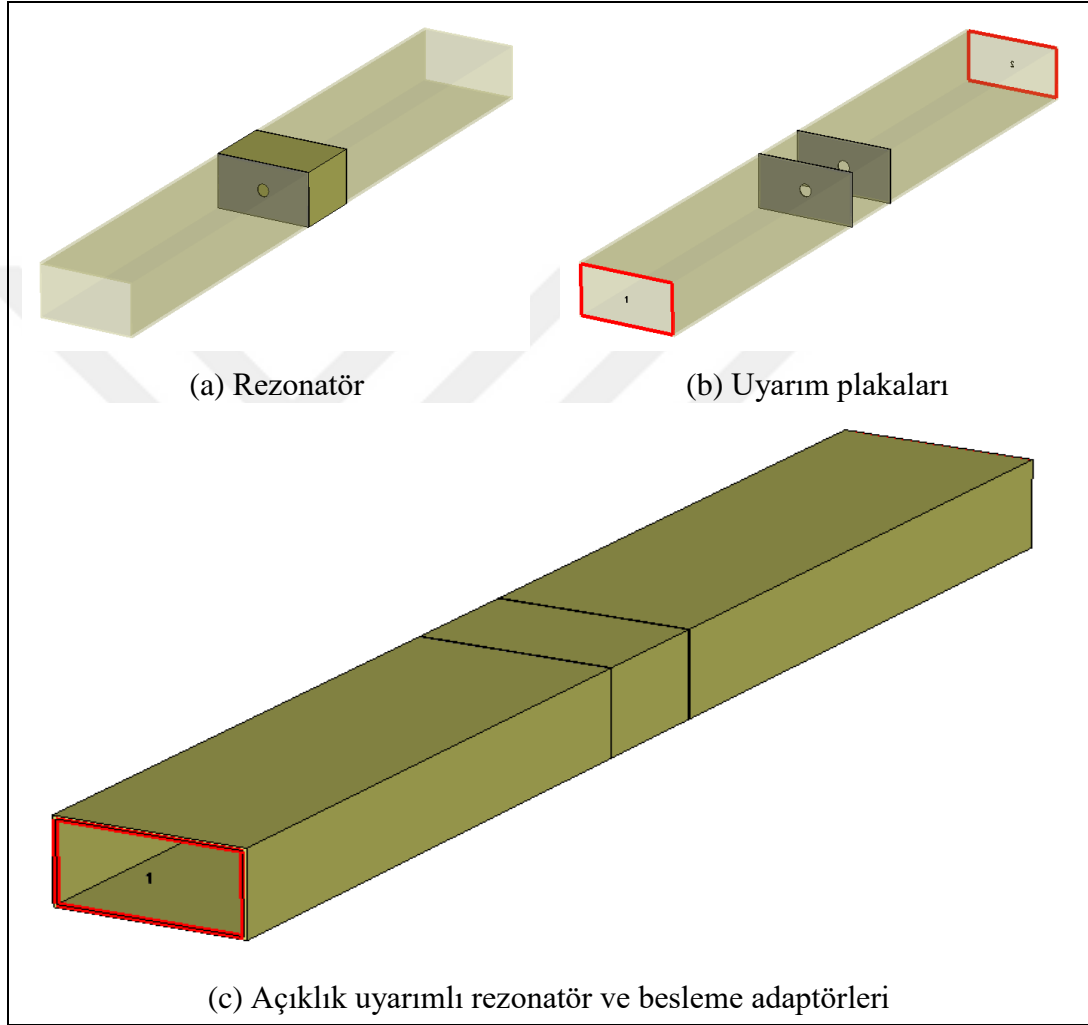
Ölçüm sonuçlarının desteklenmesi ve hata karşılaştırması yapılabilmesi adına ölçüm için oluşturulan yapının orijinal boyutları kullanılarak CST Studio Suit – Microwave Studio programında çizimi yapılmıştır. CST Studio Suit programı, elektromanyetik yapıların benzetimlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan bir benzetim programıdır. Programda, ölçümde beslemeyi gerçekleştiren adaptörler, iki adet dalga kılavuzu parçası ve dalga kılavuzu portu kullanılarak modellenmiştir. Bu dalga kılavuzu parçalarının uzunluğu, kılavuz içindeki elektromanyetik dalganın ilerleyen dalga olabilmesi için iki kılavuz dalga boyu ($2\lambda_g$) olarak alınmıştır. Besleme adaptörlerinin modellemesi için 2 adet dikdörtgen prizma kullanılmış ve çizim programında bulunan dikdörtgen prizma modellemeleri ile yapılmıştır. R bant dalga kılavuzunun iç ve dış boyutları kullanılarak iç içe dikdörtgen parçalar oluşturulmuştur ve bu parçalar birbirlerinden çıkartılarak içi boş dalga kılavuzları elde edilmiştir. Dalga kılavuzlarının, gerçek kılavuz ile uyumlu olması adına malzemesi kayıplı bakır olarak seçilmiştir. Kılavuz adaptörlerini modellemek için oluşturulan bu dalga kılavuzları Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Kılavuz adaptörlerinin CST modellemesi

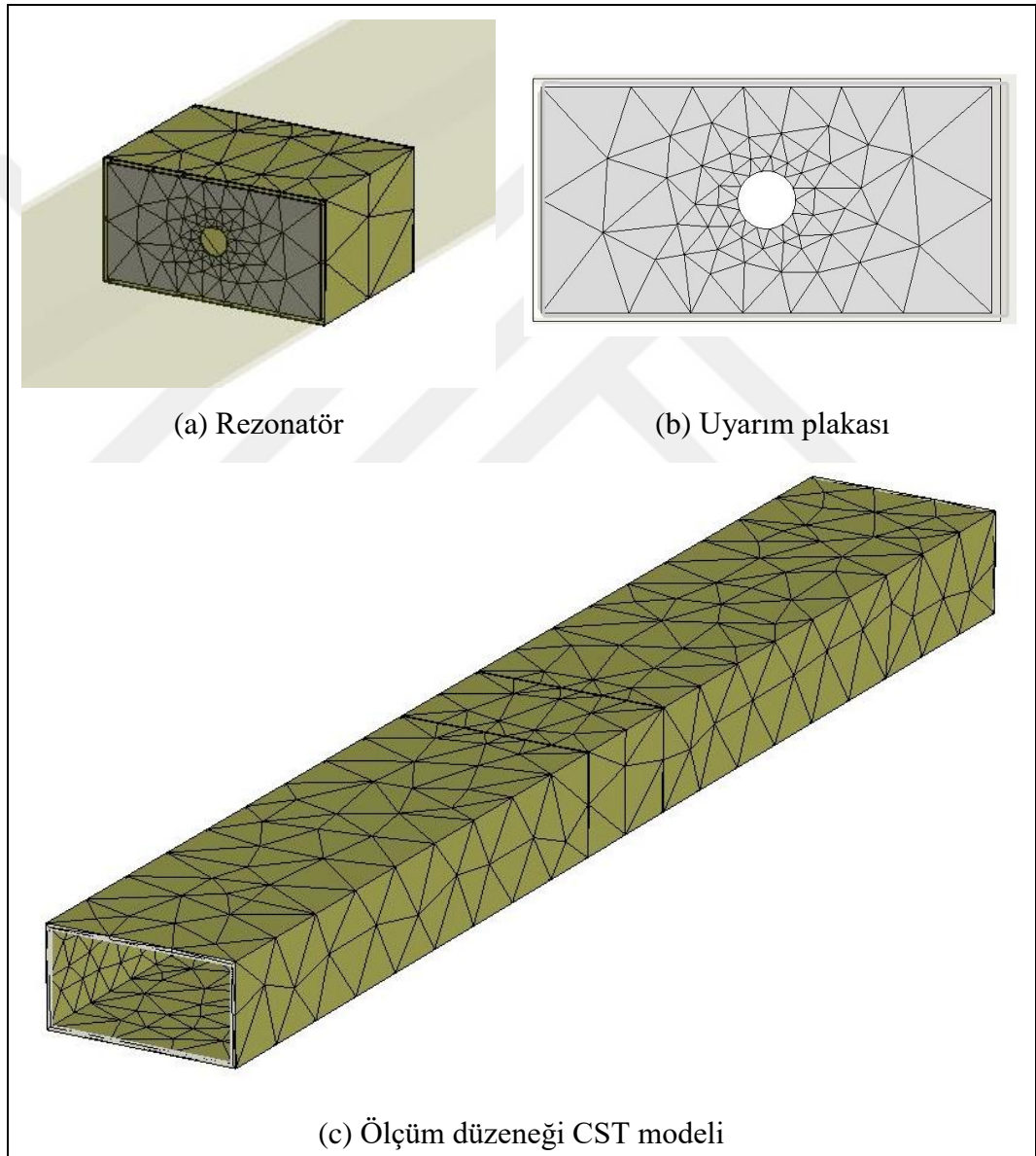
Oluşturulan kılavuzların birbirine bakmayan kapılarına dalga kılavuzu portları tanımlanarak kılavuz içine TE_{10} modunun iletimi sağlanmıştır. Oluşturulan iki dalga kılavuzunun orta noktasına gelecek şekilde 79 mm uzunluğunda bir R bant kılavuz parçası çizilmiştir. Bu parça ile beslemeyi gerçekleştiren kılavuzların bağlantı noktalarına 1 mm kalınlığında çelik plakalar yerleştirilmiştir. Yerleştirilen plakaların

merkezlerine silindirik modelleme kullanılarak 1 mm kalınlığında farklı yarıçaplarda silindirler çizilmiştir. Plakalardan bu silindirler çıkartılarak dairesel açıklıklar oluşturulmuştur. Ölçüm sonuçları ile karşılaştırma yapılabilmesi için açıklık yarıçapları hazırlanan plakaların yarıçap değerleri ile aynı seçilmiştir. Programda oluşturulan sistem Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



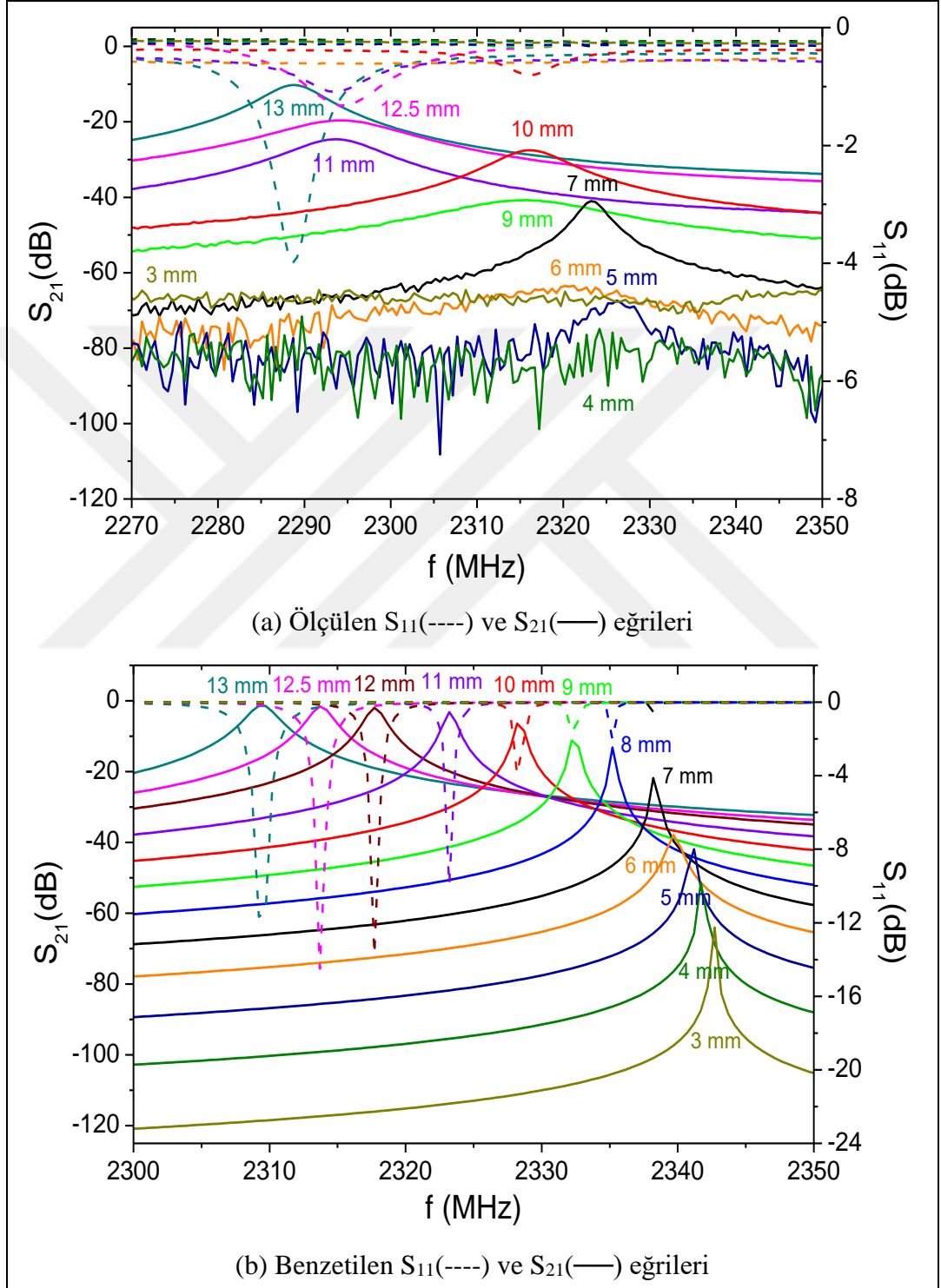
Şekil 4.8. Ölçüm düzeneği CST modellemesi

Benzetimlerde analizler yapılırken modellemelerin mesh yapıları Şekil 4.9’da gösterildiği gibi CST’nin kendi seçeneği olan uyumlu üçgenleme (adaptive mesh) ile gerçekleştirilmiştir. Üçgenlemelerden görüldüğü gibi geniş yüzeylerde benzer boyutlarda üçgenleme yapılmışken, bizim için önemli olan açıklık civarında daha küçük üçgenlemelerle hata miktarı program tarafından minimize edilmiştir. Dolayısıyla üçgenlemeden sonuçlara gelecek olan hatanın ihmal edilebilir düzeyde olacağı düşünülmektedir.



Şekil 4.9. Mesh görüntüleri

Her bir yarıçap değeri için frekans düzleminde analizler gerçekleştirilmiş ve saçılma parametreleri elde edilmiştir. Şekil 4.10'da ölçümler ve benzetimler sonucunda elde edilen S_{11} ve S_{21} eğrileri hepsi bir arada gösterilmiştir.

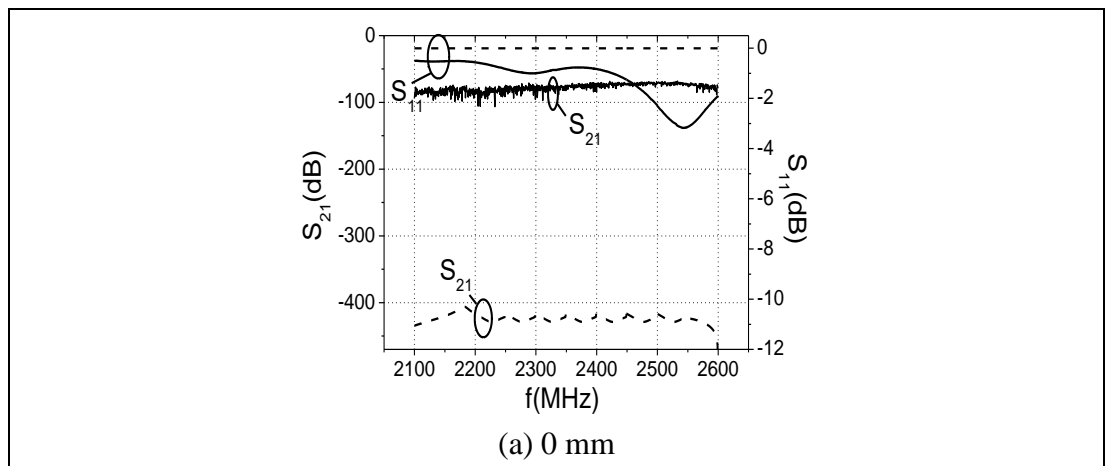


Şekil 4.10. Farklı açıklık yarıçapları için S_{11} (----) ve S_{21} (—) eğrileri

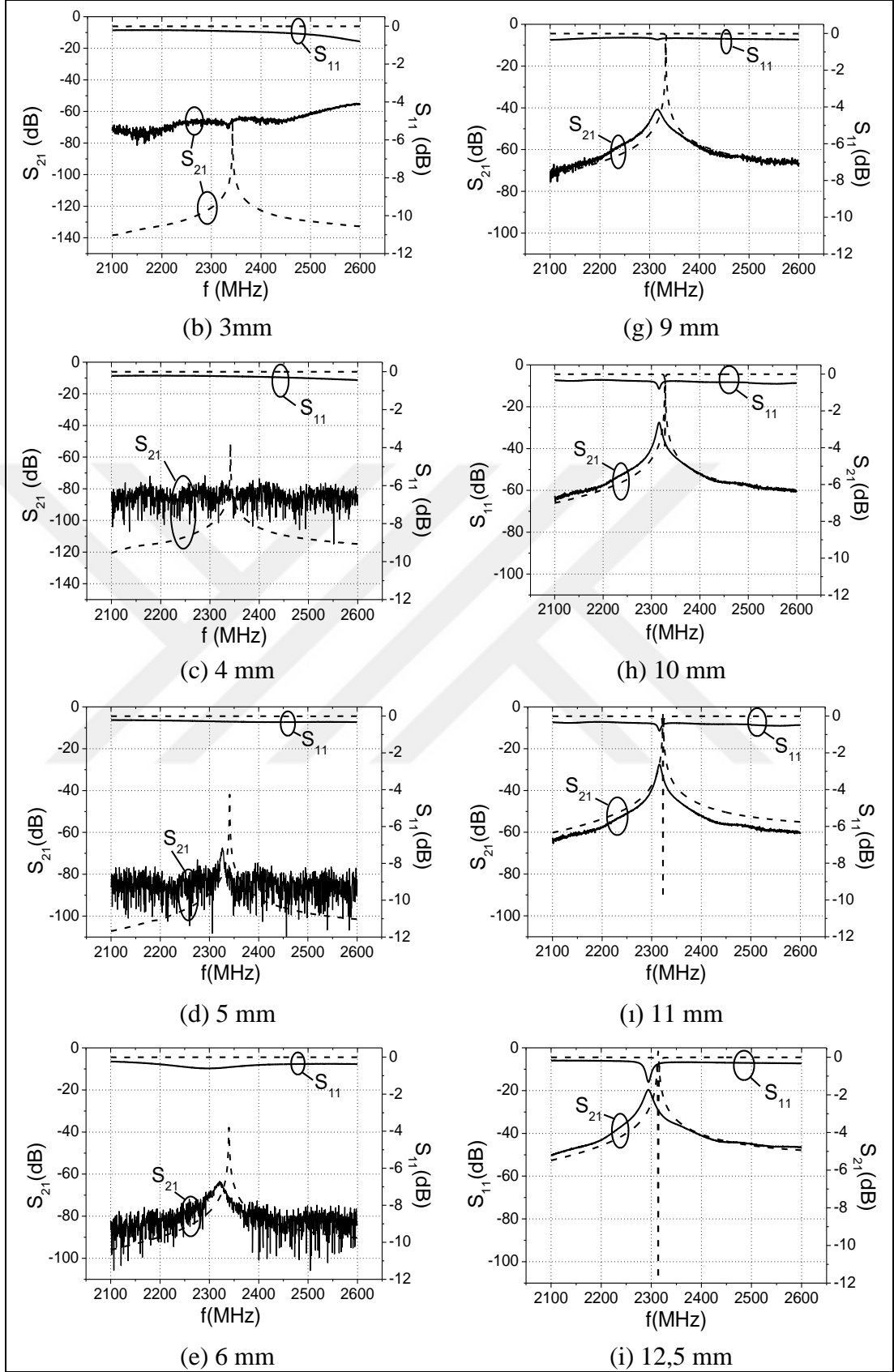
Şekil 4.10’da verilen ölçüm sonuçlarında 3 mm ve 4 mm yarıçapa sahip açıklıklar için olan S_{21} eğrilerinin genlikleri, yetersiz bağlaşımdan dolayı çok düşük kaldığı için network analizörün gürültüsünde (-80 dB civarı) kaybolmuştur. 5 mm yarıçapa sahip açıklıktan itibaren rezonans davranışı gözlemlenmiştir. S_{21} eğrilerinde, yarıçap değeri arttıkça rezonans frekansının düşük frekanslara doğru sola kaydığı görülmüştür. Yarıçap değeri arttıkça S_{21} eğrilerinin yayvanlaşmasından, yüklü kalite faktörü (Q_L) değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. S_{11} eğrilerinin de S_{21} eğrileri ile birlikte, açıklık yarıçapı arttıkça rezonans frekansının düşük frekanslara kaydığı gözlemlenmiştir. 9 mm yarıçapına sahip açıklıktan itibaren açıklık yarıçap değeri arttıkça S_{11} eğrisinin genlik değeri çok fazla artmaktadır. Bu da rezonatör içerisine giren gücün istenenden çok fazla olduğunu göstermektedir (aşırı bağlaşım).

Benzetim sonuçlarının da ölçüm sonuçları ile benzer davranışta olduğu görülmektedir. Benzetimlerden elde edilen eğrilerde, rezonans frekanslarının, ölçüm eğrilerindeki rezonans frekanslarına göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Benzetimlerden elde edilen S_{11} eğrilerinin ise ölçümden elde edilen eğrilere göre daha yüksek genlik değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Benzetimlerde, ölçümde eksik olan 8 mm ve 12 mm yarıçaplarına sahip açıklıklar için de analizler gerçekleştirilmiştir.

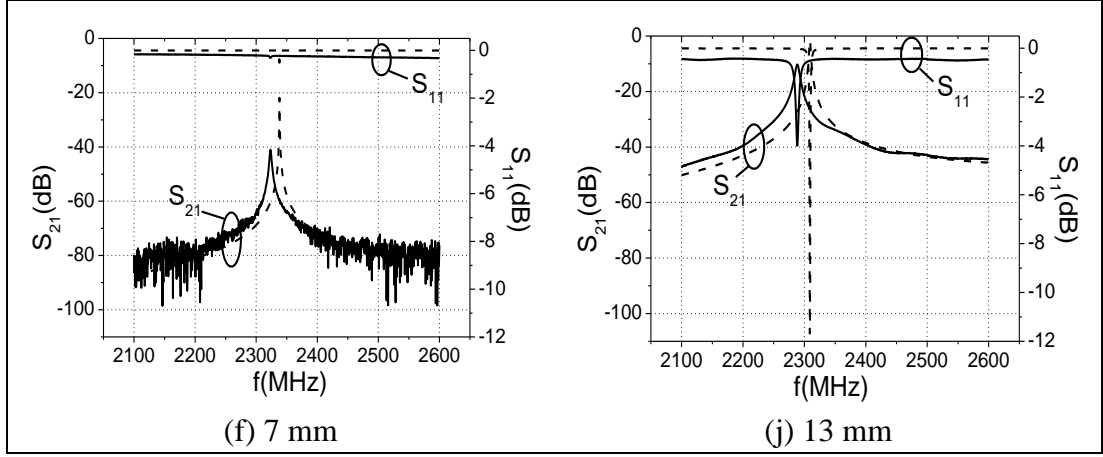
Benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen S_{11} ve S_{21} eğrileri her yarıçap değeri için ayrı ayrı olarak Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Farklı açıklık yarıçapları için ölçülen (—) ve benzetilen (----) S_{11} ve S_{21} eğrileri



Şekil 4.11. (Devam) Farklı açıklık yarıçapları için ölçülen (—) ve benzetilen (----) S_{11} ve S_{21} eğrileri



Şekil 4.11. (Devam) Farklı açıklık yarıçapları için ölçülen (—) ve benzetilen (----) S_{11} ve S_{21} eğrileri

Elde edilen S_{21} eğrilerinden 0 mm (açıklık yok) için olanı incelendiğinde rezonatörde tam yansıma durumu gözlenmektedir. Bu ölçüm aslında network analizörün dinamik aralığını gösterir, TOSM kalibrasyonu için minimum ölçülebilecek değere denk gelmektedir. 3 mm ve 4 mm yarıçap değerlerinde, rezonans eğrilerinin (S_{21}) network analizörün gürültüsünden daha az bir seviyede olduğu ve bu gürültü içinde kaybolduğu görülmüştür. Bu sebeple yapılacak olan hesaplamalarda bu yarıçap değerleri için elde edilen sonuçlar kullanılmamıştır. Diğer yarıçap değerleri için olan grafikler incelendiğinde, rezonans eğrilerinin (S_{21}) tepe noktalarının 5 mm ve 6 mm için düşük seviyede (yaklaşık değeri ölçüm sonuçlarına göre -70 dB, benzetim sonuçlarına göre -40 dB), 7 mm için orta seviyede (yaklaşık değeri ölçüm sonuçlarına göre -40 dB, benzetim sonuçlarına göre -20 dB) ve diğer yarıçaplar için ise yüksek seviyede (yaklaşık değeri ölçüm sonuçlarına göre -30 dB ile -10 dB arasında, benzetim sonuçlarına göre -11 dB ile -1 dB) olduğu gözlemlenmiştir.

S_{21} eğrisinin rezonans genlik seviyesi temel alınarak, yapılan ölçüm için yarıçaplara göre uyarım sınıflandırması, 5 mm ve 6 mm için yetersiz bağlaşım, 7 mm için kritik bağlaşım ve diğer yarıçap değerleri için aşırı bağlaşım olarak alınmıştır.

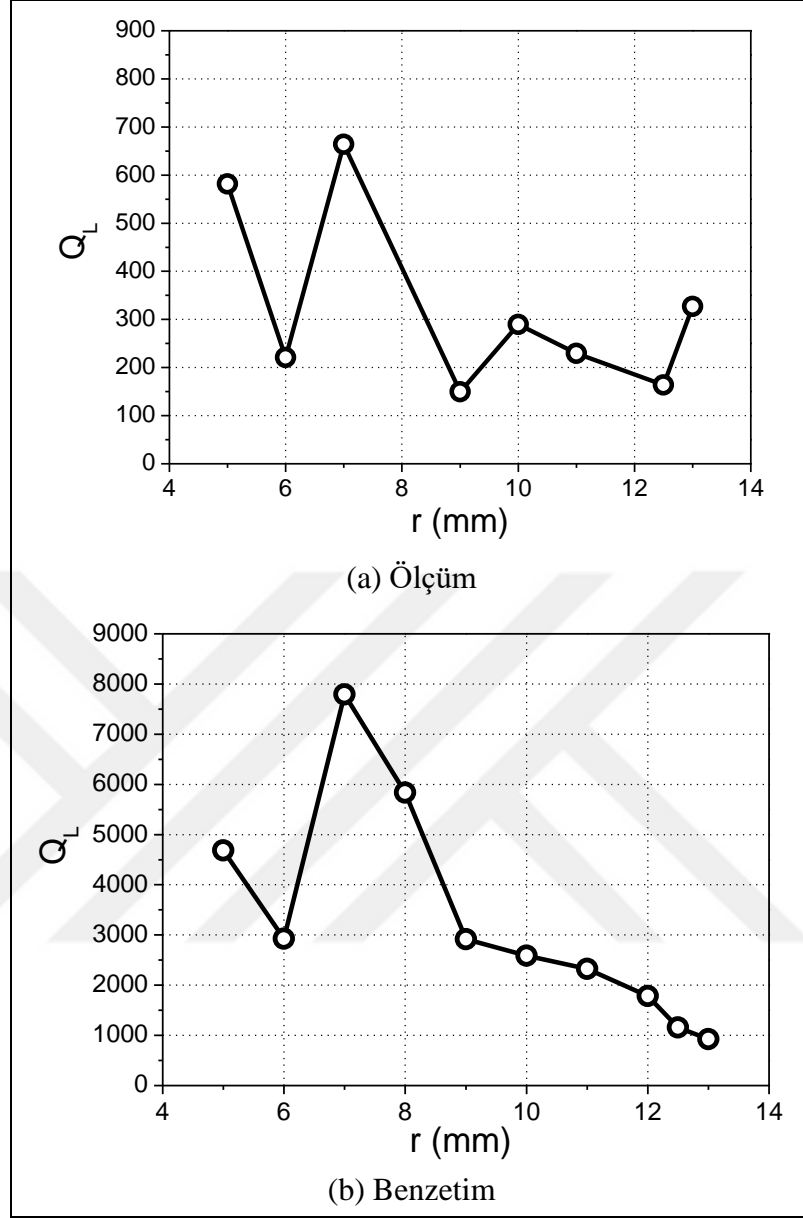
Ölçüm ve benzetim sonuçlarından elde edilen S_{21} eğrileri, Bölüm 3'te anlatılan kalite faktörü değerlerinin hesaplamalarında kullanılmıştır. Hesaplamalar için gerekli olan denklemler MATLAB programında oluşturulmuştur. Kalite faktörü hesaplamaları için kullanılan program EK-B'de verilmiştir. İlk olarak her yarıçap değeri için yüklü kalite faktörü değerleri Q_L , Denklem (3.18) kullanılarak hesaplanmıştır.

Yüklü kalite faktörü değerleri ve S_{21} eğrilerinin maksimum genlik değerleri kullanılarak yüksüz kalite faktörü Q_0 değerleri Denklem (3.19)'dan bulunmuştur. Yüklü ve yüksüz kalite faktörü değerleri Denklem (3.3)'de yerlerine yazılarak genişletilmiş kalite faktörü değerleri Q_{ex} elde edilmiştir. Yarıçap değerleri için, ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre hesaplanan kalite faktörü değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Ölçüm ve benzetim sonuçlarından hesaplanan kalite faktörü değerleri

r(mm)	Q_L		Q_0		Q_{ex}	
	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm	Benzetim
5	581,5	4682	581,7988	4720	582230	1359900
6	221,0667	2924	221,2150	2962	329650	228420
7	663,7714	7793	669,7246	8482	74673	95919
8	-	5837	-	7469	-	26725
9	149,4	2915	150,7828	4022	16290	10590
10	289,47	2586	302,19	4941	6878,5	5428
11	229,33	2323	243,6984	7635	3889,6	3338
12	-	1782	-	8864	-	2231
12.5	163,87	1156	182,98	6928	1568,6	1388
13	326,9	923	472,5148	5948	1060,8	1093

Malzeme karakterizasyonunda kullanılacak olan bir rezonatörün hassasiyetinin yüksek olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için rezonatörün yüklü kalite faktörü değerinin Q_L yüksek alınması gerekir. Yapılan ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre en yüksek Q_L değeri ölçüm için 663,7714, benzetim için ise 7793'tür ve bu değerler 7 mm yarıçapa sahip açıklık için bulunmuştur.



Şekil 4.12. Yüklü kalite faktörü değerleri

Hem Tablo 4.1'e hem de Şekil 4.12'ye bakıldığında benzetimlerden elde edilen yüklü kalite faktörü değerlerin ölçümden elde edilen yüklü kalite faktörü değerlerine göre 10 kat daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun CST'nin üçgenleme hatasından kaynaklanmadığı Şekil 4.9'dan görülmektedir. Ölçüm ve benzetim sonuçları arasındaki fark oluşmasının rezonans metodunun çok hassas bir metot olmasından ve keskin rezonans eğrilerini içermesinden ayrıca CST'nin sayısal çözüm metodlarını kullanmasından dolayı rezonans eğrisini çizdirmekte zayıf kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Benzetimlerde, ölçümlerde kullanılmayan 8 mm ile 12 mm yarıçapları için elde edilen yüklü kalite faktörü değerleri eğrilerde gözlenen yarıçap arttıkça, azalan yüklü kalite faktörü davranışına uymuştur. Benzetimlerde 8 mm yarıçapa sahip açıklık için elde edilen yüklü kalite faktörü değeri, 7 mm yarıçapa sahip olan açıklık için elde edilen yüklü kalite faktörü değerinden daha düşük çıkmıştır. 8 mm için ölçüm gerçekleştirilemese bile benzetim sonuçlarından yola çıkılarak 7 mm yarıçapının daha yüksek yüklü kalite faktörüne sahip olduğu gözlemlenmiştir ve ölçümlerinin yapılamamasına rağmen 8 mm yarıçapın kritik bir yarıçap olmadığı gözlemlenmiştir.

Kalite faktörü değerleri hem hassasiyet durumunu belirlemek hem de Bölüm 2’de anlatılan teorik yarıçap hesabı için bulunmuştur. Hesaplanan genişletilmiş kalite faktörü değerleri, Denklem (2.19)’da yerine yazılarak manyetik kutuplanabilirlik (α_m) değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerden Denklem (2.10) kullanılarak teorik yarıçap değerleri bulunmuştur. Teorik yarıçaplar ve kullanılan ile teorik yarıçaplar arasındaki hata miktarları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Hesaplanan yarıçap değerleri (Teorik yarıçaplar)

r(mm)	r_{teorik} (mm)		Hata(%)	
	Ölçüm	Benzetim	Ölçüm	Benzetim
5	4.2	4.9	16	2
6	5.3	5.7	11.67	5
7	6.8	6.6	2.86	5.71
8	-	8.1	-	1.25
9	8.8	9.5	2.23	5.56
10	10.2	10.6	2	6
11	11.2	11.5	1.82	4.55
12	-	12,3	-	2.5
12.5	13	13.3	4	6.4
13	13.9	13.8	6.92	6.15

Buradaki hataların sebepleri,

1- uyarım plakalarındaki yüzey eğrilikleri,

2- uyarım açıklıklarının plakanın tam merkezinde olmamasıdır. Uyarım plakası montaj deliklerinin, tam olarak dalga kılavuzu montaj deliklerine denk gelmemesinden dolayı açıklığın merkezinde çok küçük bir miktarda olsa kayma oluşmuştur.

Tablo 4.2'den görüldüğü üzere, ölçümde kullanılan bazı yarıçap değerleri için hata miktarları kabul edilebilir bir düzeydedir. Kritik bağlaşım değeri için kabul edilen ve en yüksek Q_L değerine sahip olan yarıçap değeri 7 mm için hata oranı bazı diğer yarıçaplara nazaran daha düşüktür.

Kalite faktörü ve teorik yarıçapların yanı sıra en uygun uyarım açıklık yarıçapının bulunmasında rezonans frekansı da göz önünde bulundurulmalıdır. Rezonans frekansı Denklem (1.21) kullanılarak rezonatör boyutlarına ve rezonatörün dolu olduğu malzemenin veya ortamın elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak hesaplanabilir. Ölçümlerde kullanılan R bant rezonatör için Denklem (1.21)'den hesaplanan rezonans frekansı $f_r = 2343,51\text{MHz}$ 'dir. Ölçüm ve benzetim sonuçlarından yarıçapa bağlı olarak gözlenen rezonans frekansı değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Ölçüm ve benzetim sonuçlarından elde edilen rezonans frekansı değerleri

r (mm)	f_r (MHz)	
	Ölçüm	Benzetim
5	2326.2	2341
6	2321.2	2339
7	2323	2338
8	-	2335
9	2315.7	2332
10	2314.8	2328
11	2294.3	2323
12	-	2317.5
12.5	2293.2	2313.5
13	2288.3	2309

Tablo 4.3'ten görüldüğü üzere yarıçap büyüdükçe rezonans frekansı hem ölçümlerde hem de benzetimlerde azalmaktadır. Bu davranış ölçüm sonuçlarında 5 mm ve 6 mm yarıçaplarında tam olarak sağlanmamaktadır. Bunun sebebi bu yarıçaplarda düşük seviyede bir rezonans eğrisi elde edilmesi ve network analizörün gürültüsünün elde edilen eğri ile karışmasıdır. Kritik bağlaşım için kabul edilen 7 mm değerinden itibaren beklenen azalma davranışı görülmektedir. 5 mm ve 6 mm yarıçaplarındaki tutarsız davranış göz ardı edilirse hesaplanan rezonans frekansı ile en yakın rezonans frekansı değeri 7 mm yarıçap değeri içindir.

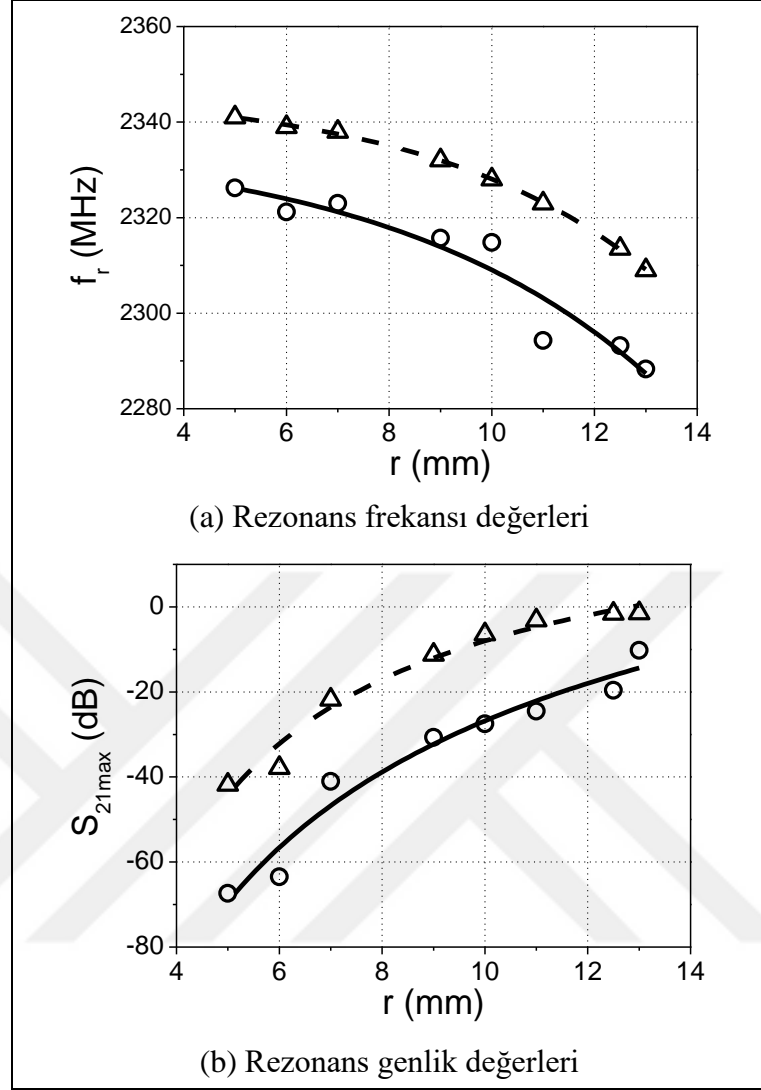
Rezonans genlik değerleri, bağlaşım durumunun sınıflandırılmasında ve kalite faktörü hesaplamalarında kullanılmaktadır ve bu değerler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Rezonans genlik değerleri (maksimum değerler)

r (mm)	S_{21max} (dB)	
	Ölçüm	Benzetim
5	-67.37	-41.8
6	-63.47	-37.85
7	-41.02	-21.8
8	-	-13.21
9	-30.7	-11.2
10	-27.5	-6.4
11	-24.5	-3.15
12	-	-1.95
12.5	-19.6	-1.58
13	-10.2	-1.47

Tablo 4.4 incelendiğinde yarıçap değeri arttıkça rezonans genlik değerinin de arttığı görülmektedir. Açıklık boyutu büyüdükçe rezonatör içine giren enerji miktarı artacağı için genlik değerinin büyümesi beklenen bir durumdur.

Rezonans frekansı (Tablo 4.3) ve genlik değeri (Tablo 4.4) değişimlerini daha net görebilmek adına Şekil 4.13 çizdirilmiştir. Bu grafikte o ve Δ karakterleri ölçüm ve benzetim değerlerini, eğriler de bu noktalardan geçen en iyi üstel eğrileri göstermektedir.

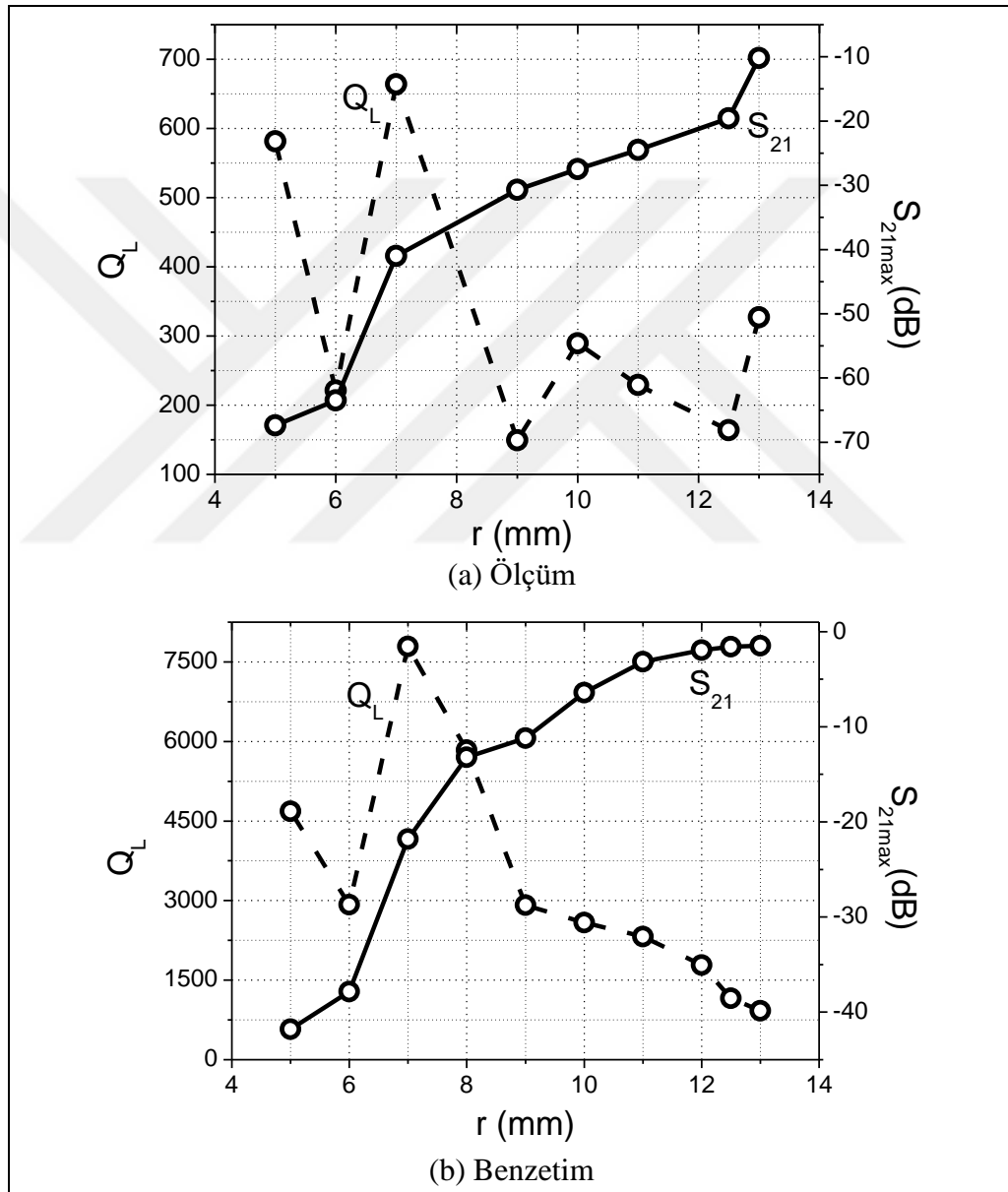


Şekil 4.13. Yarıçapa göre ölçülen (—) ve benzetilen (----) rezonans frekansı ve genlik değerleri

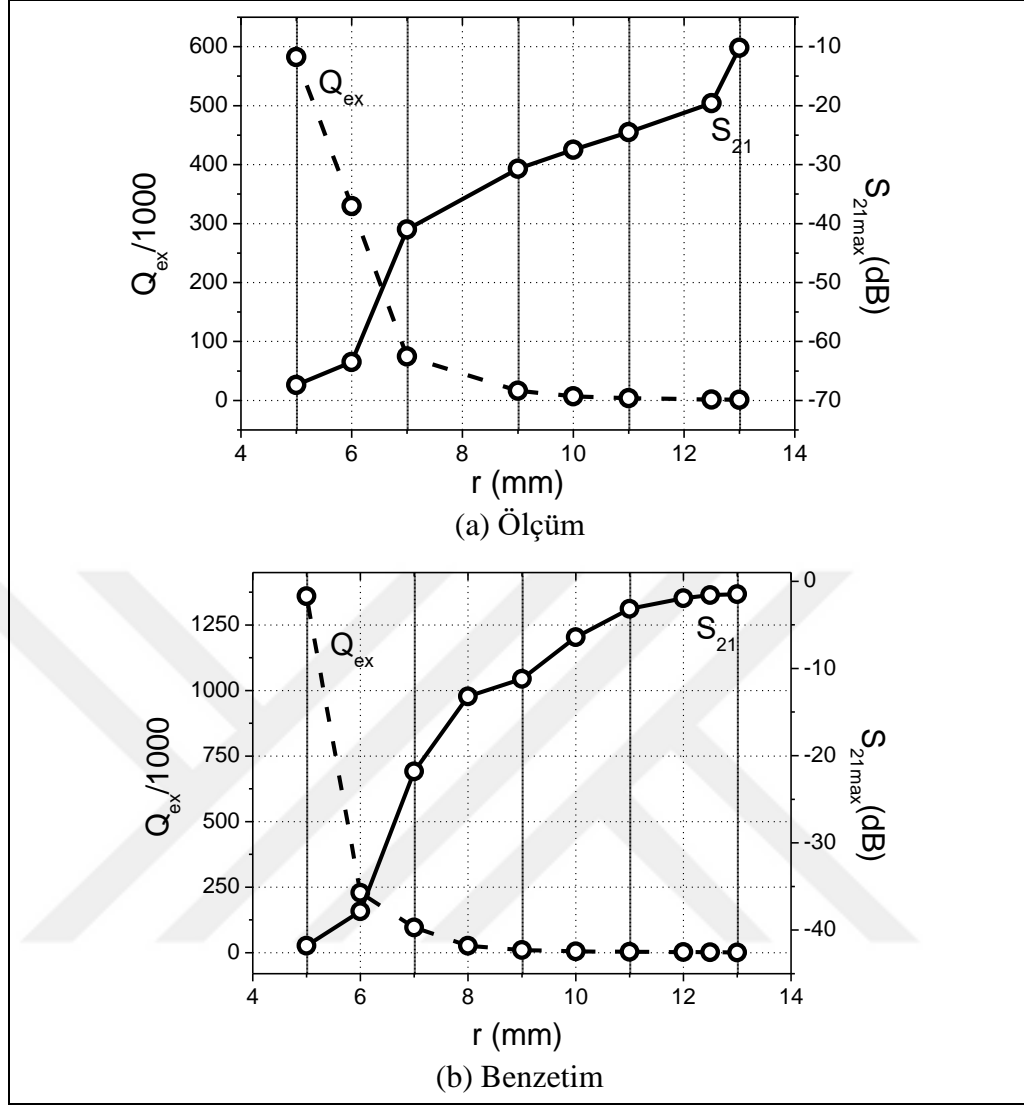
Rezonatörün açıklık ile uyarımında kullanılacak en uygun yarıçapın bulunmasında, bir grafik metodu geliştirilmesine çalışılmıştır. Bu amaçla kalite faktörü eğrileri ile S_{21} rezonans eğrileri genlik değerleri birlikte çizdirilmiş ve bu eğrilerin kesişim noktasının en uygun açıklık yarıçapını verebileceği düşünülmüştür ve Q_L , Q_{ex} eğrileri ile S_{21} rezonans eğrileri genlik değerleri hem ölçüm hemde benzetim için çizdirilmiştir (Şekil 4.14, Şekil 4.15).

Grafiklerden $Q_L - S_{21}$ eğrileri (Şekil 4.14), kesişim noktaları ölçüm için 6 mm, benzetim için ise 8 mm olarak bulunmuştur. Ortalama 7 mm değeri gözlemlenmiştir. Formülasyondan hesaplanan en uygun açıklık yarıçapı değeri Denklem (2.19)'dan Q_{ex} değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle $Q_{ex} - S_{21}$ grafiğinin daha doğru

değer vereceği düşünülmüştür. Ancak $Q_{ex} - S_{21}$ eğrilerinin (Şekil 4.15) kesişim noktaları ölçüm için 6 mm, benzetim için yaklaşık 6,5 mm olarak gözlemlenmiştir, ortalama 6,25 mm değeri elde edilmiştir. $Q_L - S_{21}$ grafiğinin tam değer, $Q_{ex} - S_{21}$ grafiğinin ise yaklaşık değer verdiği görülmüştür. Grafik metodunun en uygun yarıçapı bulmada iyi bir fikir verdiği, özellikle $Q_L - S_{21}$ grafiklerinin tam değeri verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. Yüklü kalite faktörü (----) ve rezonans genlik eğrileri (—)



Şekil 4.15. Genişletilmiş kalite faktörü (----) ve rezonans genlik eğrileri (—)

Hem ölçüm sonuçları hemde benzetim sonuçlarından yola çıkılarak en yüksek hassasiyete (en yüksek Q_L değerine) sahip olan, hesaplanan rezonans frekansına en yakın frekans değerinde rezonansa giren ve kritik bağlaşım durumunu sağlayabilen uyarım yarıçapı 7 mm olarak bulunmuştur. Bu değerlendirmeler rezonatörün malzeme karakterizasyonunda kullanılacağı düşünülerek yapılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, öncelikle malzeme karakterizasyonunda kullanılmak üzere açıklık uyarımlı bir rezonatörü gerçekleştirmek için farklı yarıçaplarda açıklıklara sahip uyarım plakaları hazırlanmıştır. Her bir plaka çifti R bant dalga kılavuzu bölümüne bağlanarak açıklık uyarımlı boşluk rezonatörü yapısı elde edilmiştir. Bu rezonatörün saçılma parametresi ölçümlerini gerçekleştirmek için network analizör kullanılmıştır. Elde edilen boşluk yapısı eş eksenliden dalga kılavuzuna geçiş adaptörleri ile network analizöre bağlanarak, her yarıçap değeri için saçılma parametreleri (S_{11} ve S_{21}) ölçümü yapılmıştır.

Ölçüm sonuçlarını desteklemek amacıyla oluşturulan boşluk yapısı ve kılavuz adaptörleri CST Studio Suit-Microwave Studio programında çizilmiştir. Boşluk yapısı için gerçek ölçüler birebir alınırken, kılavuz adaptörlerinin modellenmesi için dalga kılavuzu bölümleri ile program içinde bulunan dalga kılavuzu portları kullanılmıştır. Adaptörlerin modellenmeleri için kullanılan kılavuz bölümlerinin uzunluğu, bölüm içinde ilerleyen dalga oluşması için iki kılavuz dalga boyu olarak alınmıştır, bölümlerin diğer boyutları ise standart R bant dalga kılavuzu boyutlarıdır. Programda çizilen sistem için frekans düzleminde analizler gerçekleştirilmiş ve saçılma parametreleri (S_{11} ve S_{21}) eğrileri elde edilmiştir. Benzetim ve ölçümden elde edilen rezonans (S_{21}) eğrileri birlikte değerlendirilmiştir. Ölçümden elde edilen rezonans eğrilerinin 3 mm ve 4 mm yarıçap değerlerinde network analizör gürültüsünde kaybolduğu gözlenmiş ve bu sebeple hem ölçüm hemde benzetim için elde edilen bu eğriler hesaplama ve değerlendirmelerde kullanılmamıştır. Diğer yarıçap değerleri için rezonans eğrileri incelendiğinde eğrilerin tepe noktalarının 5 - 6 mm için düşük, 7 mm için orta ve 9 - 11 mm ile 12,5 -13 mm için yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkılarak ölçüm ve benzetim için yarıçaplara göre rezonatörün, 5 - 6 mm'de yetersiz, 7 mm'de kritik ve diğer yarıçaplarda aşırı uyarıldığı değerlendirilmiştir.

Malzeme karakterizasyonunda kullanılmak üzere oluşturduğumuz rezonatör için bağlaşım türünün kritik bağlaşım olması gerekmektedir ve bunu sağlayan yarıçap değerinin 7 mm olduğu görülmüştür.

Bağlaşım türünün yanında malzeme karakterizasyonunda kullanılacak uygun bir rezonatör için kalite faktörü değerleri ve rezonans frekansı da dikkate alınmalıdır. Ölçüm ve benzetimden elde edilen rezonans eğrileri, network analizör ile yapılan ölçümler için kalite faktörü hesaplamalarında kullanılmıştır. Öncelikle yüklü kalite faktörü değerleri, sonrasında yüksüz kalite faktörü değerleri hesaplanmıştır. Yüklü ve yüksüz kalite faktörü değerlerinden genişletilmiş kalite faktörü değerleri bulunmuştur. Malzemenin tek bir frekansta yüksek hassasiyetle karakterize edilmesi için yüklü kalite faktörü değerinin olabildiğince yüksek olması gerekir. Ölçüm ve benzetim sonuçlarından elde edilen yüklü kalite faktörleri incelenmiş ve en yüksek yüklü kalite faktörü değeri 7 mm yarıçapındaki uyarım açıklığı için bulunmuştur.

Kalite faktörü hesaplamaları hem hassasiyeti değerlendirmek hem de teorik yarıçap değerlerinin elde edilmesi için yapılmıştır. İki kapılı rezonatör sisteminin açıklık ile uyarımında kullanılan teorik yarıçap değeri, genişletilmiş kalite faktörüne bağlı bir değerdir. Kullanılan her yarıçap değerine karşılık gelen teorik yarıçap değerleri, genişletilmiş kalite faktörü değerleri kullanılarak hesaplanmıştır ve aralarındaki hata miktarları tespit edilmiştir. Ölçüm ve benzetim sonuçları için hesaplanan teorik yarıçap değerlerinin kullanılan değerlere oldukça yakın çıktığı gözlemlenmiştir.

Oluşturulan rezonatör için uygun açıklık yarıçapı değerlendirmesinde rezonans frekansıda dikkate alınmıştır. Rezonatör boyutlarına bağlı olarak bir rezonans frekansı hesaplanmıştır ve bu değer 2343,51 MHz'dir. Her yarıçap değeri için elde edilen rezonans eğrilerinden yola çıkılarak rezonans frekansı değerleri bulunmuştur. Hesaplanan rezonans frekansına en yakın frekans değeri 7 mm yarıçap değeri için sağlanmıştır.

Yapılan tüm değerlendirmeler sonucunda malzeme karakterizasyonunda kullanılmak istenen R bant rezonatörün uyarımı için en uygun açıklık yarıçapının 7 mm olduğuna karar verilmiştir.

Buradaki hataların sebepleri, uyarım plakalarındaki yüzey eğrilikleri, uyarım açıklıklarının plakanın tam merkezinde olmamasıdır. Uyarım plakası montaj deliklerinin tam olarak dalga kılavuzu montaj deliklerine denk gelmemesinden dolayı açıklığın merkezinde çok küçük bir miktarda olsa kayma oluşmuştur. Açıklık çalışmaları amacına uygun bir şekilde son bulmuştur. R bant rezonatör en uygun açıklık yarıçapı ile beraber MİLTEK Laboratuvarı'nda malzemelerin karmaşık elektrik ve manyetik geçirgenliklerinin bulunmasında kullanılabilir bir hale getirilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] Bethe H. A., Theory of Diffraction by Small Holes, *Phys. Rev.*, 1944, **66**, 163-182.
- [2] Collin R. E., *Field Theory of Guided Waves*, Wiley & Sons Ltd., New York, 1990.
- [3] Stratton J. A., *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill Book CO., Inc., New York, 1941.
- [4] Montgomery C. G., *Principles of Microwave Circuits*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1948.
- [5] Marcuvitz N., *Waveguide Handbook*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 1951.
- [6] McDonald N.A., Electric and Magnetic Coupling Through Small Apertures in Shield Walls of Any Thickness, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1972, **20**(10), 689-695.
- [7] McDonald N. A., Polynomial Approximations for the Electric Polarizabilities of Some Small Apertures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1985, **33**(11), 1146-1149.
- [8] Wheeler H. A., Coupling Holes Between Resonant Cavities or Waveguides Evaluated in Terms of Volume Ratios, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1964, **12**(2), 231-244.
- [9] Pozar D. M., *Microwave Engineering*, 4th ed., Wiley & Sons Ltd., New York, 2012.
- [10] Kajfez D., Chebolu S., Abdul-Gaffoor M. R., Kishk A. A., Uncertainty Analysis of the Transmission Type Measurement of Q-Factor, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(3), 367-371.
- [11] Kajfez D., Hwan E. J., Q Factor Measurements with Network Analyzer, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, **32**(7), 666-670.
- [12] Kajfez D., Q Factor Measurements with Scalar Network Analyzer, *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, 1995, **142**(5), 369-372.
- [13] Cheng K. D., *Mühendislik Elektromanyetiğinin Temelleri*, Palme Yayıncılık, Ankara, 2012.

- [14] Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K., *Microwave Electronics Measurement and Materials Characterization*, Wiley & Sons Ltd., New York, 2004.
- [15] Collin R. E., *Foundations for Microwave Engineering*, Wiley & Sons Ltd., New York, 2001.





EK-A

Tablo A.1. Standart dikdörtgen dalga kılavuzu verileri

Bant	Frekans Aralığı(GHz)	TE₁₀ Modu Kesim Frekansı(GHz)	EIA Gösterimi (WR-XX)	İç Boyutlar (a x b)(cm)	Dış Boyutlar (a x b)(cm)
L	1.12-1.70	0.908	WR-650	16.51 x 8.255	16.916 x 8.661
R	1.70-2.60	1.372	WR-430	10.922 x 5.461	11.328 x 5.867
S	2.60-3.95	2.078	WR-284	7.214 x 3.404	7.620 x 3.810
H(G)	3.95-5.85	3.152	WR-187	4.755 x 2.215	5.080 x 2.540
C(J)	5.85-8.20	4.301	WR-137	3.485 x 1.580	3.810 x 1.905
W(H)	7.05-10.0	5.259	WR-112	2.850 x 1.262	3.175 x 1.587
X	8.20-12.4	6.557	WR-90	2.286 x 1.016	2.540 x 1.270
Ku(P)	12.4-18.0	9.486	WR-62	1.580 x 0.790	1.783 x 0.993
K	18.0-26.5	14.047	WR-42	1.07 x 0.43	1.27 x 0.635

Ka(R)	26.5-40.0	21.081	WR-28	0.711 x 0.356	0.914 x 0559
Q	33.0-50.5	26.342	WR-22	0.57 x 0.28	0.772 x 0.488
U	40.0-60.0	31.357	WR-19	0.48 x 0.24	0.681 x 0.442
V	50.0-75.0	39.863	WR-15	0.38 x 0.19	0.579 x 0.391
E	60.0-90.0	48.350	WR-12	0.31 x 0.15	0.513 x 0.356
W	75.0-110.0	59.010	WR-10	0.254 x 0.127	0.458 x 0.330
F	90.0-140.0	73.840	WR-8	0.203 x 0.102	0.406 x 0.305
D	110.0-170.0	90.854	WR-6	0.170 x 0.083	0.368 x 0.2858
G	140.0-220.0	115.750	WR-5	0.130 x 0.0648	0.333 x 0.268

EK-B

Kalite Faktörü Hesaplamaları için Kullanılan MATLAB Kodu

```
function Q_hesabi(F_max,F1_3db,F2_3db,Q_ex,S21_max)

F_max=input('Rezonans frekansini giriniz(GHz)=');
F1_3db=input('Ilk 3db frekansini giriniz(GHz)=');
F2_3db=input('Tikinci 3db frekansini giriniz(GHz)=');
S21_max=input('Rezonans genlik degerini giriniz(dB)=');

S21=10^(S21_max/20); % Desibel olarak girilen S21 değerinin lineere çevrilmesi
Q_1=(F_max)/(F2_3db - F1_3db) % Yüklü kalite faktörü hesabı: Denklem (3.18)
Q_0=Q_1/(1-S21) % Yüksüz kalite faktörü hesabı : Denklem (3.19)
Q_ex=((1/Q_1)-(1/Q_0))^(-1) % Genişletilmiş kalite faktörü hesabı: Denklem (3.3)
End
```

Teorik Yarıçap Değeri Hesaplamaları için Kullanılan MATLAB Kodu

```
function r_hesabi(a,b,c,d,Q_ex,r)

a=input('Dalga kılavuzunun kısa kenarini giriniz(m)=') % R bant dk için
% a=0.05461;
b=input('Dalga kılavuzunun uzun kenarini giriniz(m)=') % R bant dk için
% b=0.1092;
c=input('Rezonatorun boy uzunlugunu giriniz(m)=')
% Lab. bulunan kılavuz uzununluğu c=0.079;
d=input('Rezonatorun yuksekligini giriniz(m)=')
% Kullanılan rezonator için R bant kılavuzun kısa
% kenar uzunluğu ile aynı değere sahiptir
% a=d=0.05461;
Q_ex=input('Kalite faktorunu giriniz=');
% Genişletilmiş kalite faktörü değeri
k_101=sqrt((pi/c)^2 + (pi/d)^2);
% TE 101 modunun yayıldığı rezonatorün yayılma
% sabitidir.
Beta=sqrt(k_101^2 -(pi/a)^2);
% Dalga kılavuzundan uyarılan TE10 modunun faz
% sabitidir.

r=((9*a*(b^2)*(c^3)*d*(k_101^2))/(8*16*2*Q_ex*Beta*
(pi^2)))^(1/6)% Teorik yarıçap değeri denklemi (2.19)
End
```

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Durmuş M.**, Salman A. O., Yıldırım T. Ş., NRW Metodu ile Malzemelerin Elektromanyetik Özelliklerinin Bulunması, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018, **1**(1), 13-19.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 2011 yılında Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2015 yılında lisans öğreniminden mezun olarak, aynı sene Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği AnaBilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2017 yılından beri Piri Reis Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

