

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL KAVİTE KULLANILARAK MİKRODALGA
YÖNTEMİ İLE HACİM BELİRLENMESİ

ELİF AVİNCA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL KAVİTE KULLANILARAK
MİKROLDALGA YÖNTEMİ İLE HACİM
BELİRLENMESİ

ELİF AVINCA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. BULAT RAMİ
II. DANIŞMANI
DR. CAFER KIRBAŞ

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**DETERMINATION OF VOLUME BY
MICROWAVE METHOD USING
SPHERICAL CAVITY**

ELİF AVİNCA

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS**

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. BULAT RAMİ
II. THESIS SUPERVISOR
DR. CAFER KIRBAŞ

GEBZE

2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/02/2023 tarih ve 2023/09 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/02/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Elif AVİNCA 'nın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Prof. Dr. Bulat Rami

ÜYE

: Doç. Dr. Bektaş Çolak

ÜYE

: Dr. Öğrt. Üye. Cengiz Okay

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

SI termodinamik sıcaklık birimi olan kelvin'in yeni tanımı sıcaklık ile enerji arasındaki ilişkiyi kuran Boltzmann sabiti (k_B) üzerinden gerçekleştirilmektedir. Akustik Gaz Termometresi (AGT), düşük yoğunluklu monoatomik gaz (ideal gaz) içinde mutlak ses hızının mutlak sıcaklıkla olan ilişkisini temel almakta olup termodinamik sıcaklık ölçümlerinin yapılmasına imkan vermektedir. Boltzmann sabiti AGT yöntemiyle en yüksek doğrulukta belirlenmiştir. AGT, yönteminde esas olarak ölçülen büyüklük ses hızıdır. Küresel kavite (oluk) içinde oluşan akustik rezonans frekansları üzerinden ses hızı ölçülerek monoatomik gaz içindeki sıcaklık yüksek doğrulukla belirlenebilmektedir. Ses hızının yüksek doğrulukta belirlenebilmesi için kavite hacminin dolayısıyla kavite yarıçapının yüksek doğrulukla bilinmesi gerekmektedir. Küresel kavitenin hacmi, termal genleşme nedeniyle sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Küresel rezonatördeki hacim ve değişiminin sıcaklığa bağlı olarak belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri mikrodalga kavite rezonanslarıdır. Küresel kavitede oluşan duran mikrodalga rezonansları yüksek doğrulukta ölçülerek rezonatör yarıçapı ve hacmi istenilen hassasiyet düzeyinde bulunabilmektedir. Bu tez çalışmasında, mikrodalga ölçümleri kullanılarak küresel kavite yarıçapını ve hacmini yüksek doğrulukta belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan giriş-çıkış antenlerle çelik malzemeden imal edilmiş küresel kavite içerisinde oluşan duran elektromanyetik dalgaların Elektrik (TM) ve Manyetik (TE) modlarının rezonans frekansları ölçülmüştür. Ölçülen mikrodalga rezonanslar üzerinden küresel kavitenin hacmi belirlenmiştir. Küresel kavite boyutları aynı zamanda farklı bir yöntem olan Koordinat Ölçüm Sistemi (Coordinate Measurement Machine, CMM) kullanılarak ölçülmüştür. Mikrodalga ve CMM yöntemleri ile elde edilen kavite boyutu sonuçların karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Mikrodalga tekniği ile küresel hacminin sıcaklığa bağlı olarak değişiminin belirlenmesine yönelik ölçümler gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akustik Gaz Termometre, Mikrodalga Tekniği, Koordinat Ölçüm Makinesi, Küresel Mikrodalga Kavite, Elektromanyetik Rezonanslar.

SUMMARY

The new definition of kelvin, the SI unit of thermodynamic temperature, relies on the Boltzmann constant (k_B), establishing the relationship between temperature and energy. The Acoustic Gas Thermometer (AGT), which is based on the relationship between the absolute speed of sound and the absolute temperature in a low-density monatomic gas (ideal gas), allows measurements of the thermodynamic temperature. Among various methods, used to determine the Boltzmann constant, the highest accuracy is provided by the AGT method. In the AGT technique, the primarily measured quantity is the speed of sound. By measuring the speed of sound by the acoustic resonance frequencies in the spherical cavity, the temperature in the monatomic gas can be determined with high accuracy. For determining the speed of sound with high accuracy, the volume of the cavity and, therefore, the radius of the cavity must be known with high accuracy. The volume of the spherical cavity varies depending on the temperature due to thermal expansion. One of the methods used to determine the spherical resonator volume and its change with temperature is the measurements of microwave resonances. By high-accuracy measurements of the resonances of the standing microwave wave formed in the spherical cavity the radius and volume of the resonator can be found at the desired accuracy level. In this thesis, high-accuracy measurements of spherical cavity radius and volume were performed by microwave technique. With aid of designed input/output antennas, the resonance frequencies of the Electric (TM) and Magnetic (TE) modes of the electromagnetic wave formed in the spherical cavity made of steel material were measured. The volume of the spherical cavity was determined from the measured microwave resonances. The spherical cavity was also measured using a different method, the Coordinate Measurement Machine (CMM). The results obtained by microwave and CMM methods were compared and evaluated. Using the microwave technique, the measurements were made to determine the change in the spherical volume depending on temperature, and the measurement results were evaluated.

Key Words: Acoustic Gas Thermometer, Microwave Technique, Coordinate Measurement Machine, Spherical Microwave Cavity, Electromagnetic Resonances.

TEŞEKKÜR

Tez çalışması kapsamında bana TÜBİTAK-UME Kontak Sıcaklık Laboratuvarı'nda çalışma fırsatı veren başta hocam Murat Kalemci ve hocam Ali Uytun'a, bütün çalışmam boyunca ve bu çalışmanın oluşmasında yolumu açan yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ikinci danışmanım hocam Dr. Cafer Kırbaş'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimimde desteğini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Bulat Rami'ye en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisansa başladığımda akademik danışmanlığımı yürüten Dr. Öğrt. Üye. Serkan Büyükköse'ye verdiği desteklerden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

TÜBİTAK-UME Boyutsal Laboratuvarı'nda görev alan hocam İlker Meral'e boyutsal ölçümlerinde verdiği destek ve katkılarından dolayı aynı zamanda Mikrodalga Laboratuvarı'nda görev alan hocam Dr. Erkan Danacı'ya verdiği bilgiler ile beni yönlendiren değerli hocalarıma saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Verdiği değerli bilgiler için hocam Prof. Dr. Faik Mikailzade ve hocam Dr. Öğrt. Üye. Sinan Kazan'a, destek ve katkılarından dolayı hocam Dr. Maksut Maksutoğlu'na saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca her konuda desteğini ve yardımını esirgemeyen, bu günlere gelmemde büyük emekleri olan kıymetli anneme, değerli babama ve yaşama sevincim olan kardeşlerim Berivan Avınca, Medine Avınca ve Abdülsamed Avınca'ya saygı, sevgi ve sonsuz minnet duygularımı sunarım.

Son olarak göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili arkadaşım Ülkü Asena Tosun'a, Hülya Ayan'a, Ayşe Maraşlı'ya, Dilruba Yılmaz'a, Hacer İpek'e, Murtaza Vefadar'a, Hasipcan Aydın'a ve Yusuf Cenk İltuş'a en içten sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Önemi	3
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Tezin İçeriği	4
2. TEORİ	5
2.1. TM ve TE Modlarının Türetilmesi	5
2.2. Belirsizlik Hesaplamaları	17
2.2.1. Mikrodalga Rezonans Frekansı Ölçümleri ile Belirlenen	18
Küresel Kavite Yarıçapındaki Belirsizlik Hesaplamaları	
2.2.1.1. Sıcaklık Sistemine Bağlı Olarak Değişen Belirsizlik	20
Bileşenleri	
2.2.1.2. Antenden Kaynaklanan Belirsizlik Bileşeni	20
2.2.1.3. Küresel Kavitenin Hizalanma Ayarından Kaynaklı	21
Belirsizlik Bileşeni	
2.2.1.4. Rezonans Frekansından Kaynaklı Belirsizlik Bileşeni	21
2.2.2. CMM Belirsizlik Hesaplamaları	24
2.3. Etkiler	25
2.3.1. Mikrodalga Rezonans Ölçümüne Neden Olan Etkiler	25
2.3.2. CMM Cihazından Kaynaklanan Belirsizlik Ölçümüne Neden	25
Olan Etkiler	
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	27
3.1. Mikrodalga Rezonansları Ölçümünde Kullanılan Deney Düzenegi	27

3.2. Deney Düzenğinde Kullanılan Cihaz ve Özellikleri	28
3.2.1. Vektör Ağ Analizörü	28
3.2.2. Termometre Okuyucu	30
3.2.3. Platin Direnç Termometresi	30
3.2.4. Isopad Mantolu Isıtıcı	31
3.2.5. Küresel Kavite	32
3.2.6. Antenler	33
3.2.7. CMM Cihazı ve Özellikleri	36
3.3. Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirmesi	39
3.4. Mikrodalga Rezonans Frekansı & Sıcaklık Deney Düzenği	48
3.5. Frekans Verilerinin Alınması ve Verilere Eğri Uydurma (Fitting)	53
4. SONUÇLAR ve YORUMLAR	57
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
∇	: Nabla operatörü
ω	: Açısal frekans
ϵ_0	: Elektriksel geçirgenlik
μ_0	: Manyetik geçirgenlik
μ_r	: Kavitenin iç yüzeyinin bağıl manyetik geçirgenliği
δ	: Nüfuz derinliği
σ_{cond}	: Kavitenin iç yüzeyinin elektriksel iletkenliği
Ψ	: Dalga fonksiyonu
ΔT	: Sıcaklık farkı
a	: Küresel kavitenin yarıçapı
B	: Manyetik alan
c	: Işığın boşluktaki hızı
dB	: Desibel
E	: Elektrik alan
f_{ln}	: Rezonans frekansı
g_{ln}	: Pikin yarı yüksekliğindeki genişlik
k	: Dalga sayısı
k_B	: Boltzmann sabiti
ppm	: Milyonda bir
T	: Mutlak sıcaklık
T_{TPW}	: Suyun üçlü noktasının sıcaklığı
$u_{\delta i}$	: Belirsizlik bileşenleri
$u(a)$	: Genişletilmiş belirsizlik
V	: Küresel kavitenin ölçülen hacmi
V_0	: Kavitenin ısıtılmadan önceki referans hacmi
z_{ln}	: Elektromanyetik rezonansın (l,n) moduna karşılık gelen özdeğerler
AGT	: Akustik Gaz Termometresi
BIPM	: Uluslararası Ağırlık ve Ölçü Bürosu

CCT	: Termometre Danışma Komitesi
CIPM	: Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi
CMM	: Koordinat Ölçüm Makinesi
GUM	: Ölçümde belirsizliğin ifade edilmesi için rehber
IFBW	: Ara frekans bant genişliği
ITS-90	: 1990 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği
MHz	: Megahertz
MPE	: İzin verilen maksimum hata
PRT	: Platin direnç termometresi
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
TE	: Manyetik mod
TM	: Elektrik mod
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
VNA	: Vektör Ağ Analizörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: Mikrodalga rezonansları ölçüm düzeneği şematiği.	27
3.2: Mikrodalga rezonansları ölçüm düzeneği.	28
3.3: E5071C Keysight ENA serisi vektör ağ analizörü	29
3.4: Fluke model 1502A termometre okuyucu.	30
3.5: Fluke model platin direnç termometresi.	31
3.6: Isopad mantolu ısıtıcı.	31
3.7: a) 316 L paslanmaz çelikten yapılmış küresel kavite. b) Bakırdan yapılmış küresel kavite.	33
3.8: Antenlerin üst yarım kürede 45° açı ile konumlandırılmış hali.	34
3.9: Anten bileşenleri.	35
3.10: Mikrodalga anten tasarımları.	36
3.11: CMM Cihazı.	37
3.12: Üst yarım küre için şekil analiz sonuçları.	38
3.13: Alt yarım küre için şekil analiz sonuçları.	38
3.14: 316 L paslanmaz çelik kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{11} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.	43
3.15: 316 L paslanmaz çelik kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{12} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.	43
3.16: 316 L paslanmaz çelik kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{13} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.	44
3.17: Bakır kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{11} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.	45
3.18: Bakır kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{12} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.	45
3.19: Bakır kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{13} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.	46
3.20: Mikrodalga sıcaklık deney düzeneği.	48
3.21: TM_{11} için sıcaklığın yarıçapa bağlı olarak değişimi.	49
3.22: TM_{12} için sıcaklığın yarıçapa bağlı olarak değişimi.	50

3.23:	TM ₁₁ 'in deneysel ve teorik termal genleşme sonuçlarının karşılaştırılması.	52
3.24:	TM ₁₂ 'nin deneysel ve teorik termal genleşme sonuçlarının karşılaştırılması.	52
3.25:	a) TM ₁₁ modunun fitlenmiş rezonans frekans verileri. b) Rezonans frekansların reel ve sanal kısımlarının grafiği.	54
3.26:	a) TM ₁₂ modunun fitlenmiş rezonans frekans verileri. b) Rezonans frekansların reel ve sanal kısımlarının grafiği.	55
3.27:	a) TM ₁₃ modunun fitlenmiş rezonans frekans verileri. b) Rezonans frekansların reel ve sanal kısımlarının grafiği.	56



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Rezonans frekanslarının tekrarlanabilirlik sonuçları.	20
2.2: Antenden kaynaklanan ölçüm belirsizlik sonuçları.	21
2.3: Rezonans frekanslarının belirsizlik sonuçları.	22
2.4: Mikrodalga rezonans yöntemi ile belirlenen küresel kavite yarıçapının belirsizlik tablosu.	
2.5: CMM belirsizlik tablosu.	24
3.1: TE modların teorik sonuçları.	40
3.2: TM modların teorik sonuçları.	41
3.3: 316 L paslanmaz çelik kavitenin elektromanyetik modların deneysel ölçüm sonuçları ile teorik sonuçların karşılaştırılması.	42
3.4: Paslanmaz çelik kavite yarıçapının elektromanyetik rezonanslarının hesaplanması.	42
3.5: Bakır ve paslanmaz çelik kavitelerin nüfuz derinliği ve Q faktör değerleri.	47
3.6: TM_{11} ve TM_{12} ’nin hacimce termal genleşme katsayı sonuçları.	51

1.GİRİŞ

2005 yılında, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM), Termometre Danışma Komitesi'nin (CCT) kelvin termodinamik sıcaklık ve Boltzmann sabiti k_B değerlerini nihai bir yeniden tanımlamaya hazırlık olarak belirlemek için deneylerin başlatılması ve sürdürülmesi gerektiği yönündeki tavsiyesini onaylanmıştır [1]. Buna göre, k_B 'yi 10^{-6} ppm veya daha az bir hedef belirsizliği ile yeniden belirlemeyi amaçlayan birkaç uluslararası araştırma girişimi devam etmiştir. Küresel bir kavite kullanan akustik gaz termometre, k_B 'yi bu kadar düşük bir belirsizlikle ölçmek için en umut verici tekniklerden biri olarak tanımlanmıştır [2]. Bu tekniğin en doğru uygulaması Moldover ve arkadaşları [3] tarafından yapılmıştır ve şu anda kabul edilen k_B değerine yol açmıştır [4]. Bununla birlikte, 1988'den beri deneysel tekniklerdeki gelişmeler, bu sonucun iyileştirilmesine imkan vermektedir. Özellikle, k_B 'nin çıkarsanan değeri, kavite V hacmine $V^{2/3}$ olarak bağlı olduğundan, kavite hacminin yüksek doğrulukta ölçülmesi önem arz etmektedir.

AGT ile gerçekleştirilen ilk ölçümlerde küresel kavitenin hacminin belirlenmesinde, kavite içerisine civa veya su gibi sıvılar konularak ve ilgili sıvıların literatürde var olan yoğunluk değerlerine güvenerek hacim ölçümleri gerçekleştirilmekteydi. İlk olarak Moldover tarafından [5] kavite içerisindeki mikrodalga rezonanslarının rezonatörün termal genleşme katsayısının belirlenmesinde kullanılabileceği önerilmiştir. Sonrasında Mehl ve Moldover tarafından mikrodalga rezonansların yeterli hassasiyette küresel hacim belirlenmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir [6]. Günümüzde AGT ile gerçekleştirilen termodinamik sıcaklık belirlenmesi ölçümlerinde küresel hacim belirlenmesi ve dolaylı olarak bağlı sıcaklık belirlenmesinde (T/T_{TPW}) mikrodalga rezonanslar kullanılmaktadır.

Yakın zamana kadar AGT ölçümlerinde, sabit frekanslı silindirik interferometreler kullanılıyordu. Günümüzde değişken frekanslı küresel kaviteler tercih edilmektedir. Küresel kavite kullanımının verim ölçüsü, silindirik kavitelerden yaklaşık bir kat daha yüksektir. Ayrıca küresel kavitelerde farklı modların uyarılmasından kaynaklanan problemler daha küçüktür, mikrodalga rezonansların kavitenin hacminin belirlenmesinde kullanılması, AGT ile gerçekleştirilen termodinamik sıcaklık belirlenmesini basitleştirmiştir. Küresel hacim içerisinde oluşan mikrodalga rezonansları TM_{ln} (TE_{ln}) $(2l+1)$ kat bozulmaya (degenerate)

sahiptir. Her bir TM_{ln} (TE_{ln}) modundaki çoklu rezonansların (multiplet) yeterli düzeyde çözümlenebilmesi ve bu rezonansların ortalamasının belirlenmesi sonucunda her bir modun hassas bir frekans ölçümüne izin vermesi gibi kullanışlı bir özelliğe sahiptir [2]. Küresel kaviteler diğer geometrik kavitelere göre üniform elektrik/manyetik alanlar üretmek için verimli, silindirik kaviteye göre yapımı daha kolay ve en önemlisi, silindirik kaviteler küresel kavitelere göre daha düşük bir Q (kalite faktörü) faktörüne sahip olma eğilimindedir. Bu, silindirik bir kavitedeki sesin (akustik ölçümlerde ses hızı kullanılacağından dolayı önem arz etmektedir) küresel bir kavitedekinden daha hızlı bozulacağı anlamına gelmektedir.

Tez çalışmasında, 316L paslanmaz çelikten yapılmış küresel kavite kullanılmıştır. Küresel kavite TÜBİTAK UME Sıcaklık Laboratuvarında AGT ölçümleri için tasarlanmış ve üretilmiş ilk prototiptir (UME). Prototip üretimi Türkiye sanayisinde sıradan bir mekanik atölyede gerçekleştirilmiştir. Üretimde kavite içerisinde küresellikten sapma ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine dikkat edilmemiş, ince işçilik gerçekleştirilmemiştir. Küresel kavite içerisinde akustik rezonanslar ve mikrodalga rezonans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Prototip küresel kavite içerisinde gerçekleştirilen mikrodalga rezonansları, bu tezin konusu kapsamaktadır.

Mikrodalga rezonans ölçümleri, ilk olarak oda sıcaklığında gerçekleşmiş olup her üçlü TM ve TE dejenere (1,s) modları için, (1,1)'den (1,3)'e kadar üçlü (1,s) modlar içerisindeki rezonanslar ölçülmüştür ve ortalamaları hesaplanmıştır ve teorik ile deneysel frekans değerleri karşılaştırılmıştır. Ölçümler 23,1 °C ile 117,7 °C arasında değişen farklı sıcaklık noktalarında gerçekleştirilerek küresel kavitenin yarıçapındaki değişimler analiz edilmiştir. Paslanmaz çelik kürenin boyutları CMM cihazı ile ölçülerek boyutsal karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve kavitenin iç yüzey şekli, pürüzlülüğü ve boyutları ölçülmüştür. Gerçekleştirilen ölçümlerin belirsizlik hesaplamaları yapılarak ve belirsizlik tabloları oluşturularak ölçülen hacim büyüklüğünün belirsizlikleri bulunmuştur.

Bu çalışmada sunulan ve tartışılan kavitenin hacim değeri, iki farklı teknik ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Açıklanan teknikler, kullanılan cihaz ve yöntemler Bölüm 3'te detaylı açıklanmıştır.

1.1. Tezin Önemi

Ülkemizde şu an sıcaklık birimi suyun üçlü noktası üzerinden tanımlanmaktadır fakat kelvin'in yeni tanımının 2019 yılında CIPM tarafından Boltzmann sabiti üzerinden tanımlanması ve AGT'nin birincil tanım olarak kabul edilmesiyle AGT ölçüm sisteminin kurulması ve yeni tanımın gerçekleştirilmesi ülkemiz metrolojisi için önem arz etmektedir. Ülkemizde AGT ile gerçekleştirilecek birincil sıcaklık tanımı sayesinde sıcaklık izlenebilirliği ülke içerisinde TÜBİTAK UME tarafından sağlanmış olacak ve bu sayede diğer ülkelere bağımlığımız olmayacaktır. Buna ilaveten küresel kavite kullanılarak mikrodalga rezonans ölçümleri diğer başka ölçüm büyükler üzerinde de uluslararası alanda çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Kurulan bu sistemle ülke olarak uluslararası literatüre veri sağlanmış olacak ve bu alandaki çalışmaların bir parçası olacaktır. Mikrodalga rezonans ölçümleri ile küresel kavite hacminin belirlenmesi AGT sisteminin bir alt başlığıdır ve AGT çalışmalarında bir mihenk taşı niteliği taşımaktadır. Ülkemiz literatüründe mikrodalga rezonans ölçümleri ile küresel kavite hacminin belirlenmesi konusunda bu çalışma ülkemiz akademik literatürüne bir ilk olarak girmektedir. Bu çalışma ile mikrodalga rezonansların küresel kavite içerisindeki davranışlarının çoklu çizgisel rezonanslarının (multiplet) teori ile uyumluluğu analiz edilmiş, küresel kavitenin hacminin belirlenmesindeki sonuçları araştırılmıştır. Tez çalışması içerisinde elde edilen sonuçların mikrodalga rezonansların başka alanlarındaki uygulamalara da ışık tutacağı öngörülmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Tez çalışmasının amacı, UME rezonatörün (Şekil 3.6) küresel kavite yarıçapının ve hacminin, çok çizgili (multiplet) mikrodalga rezonans frekanslarının ölçülmesi ve analiz edilmesiyle belirlenmesidir. UME rezonatörü oluşturan iki yarı kürenin düşük belirsizlikli CMM ile ölçülerek, mikrodalga rezonansları ile belirlenen ölçüm sonuçları ile karşılaştırması ve sonuçların değerlendirilmesidir. Mikrodalga modlarını kullanarak kavitenin hacmini belirlemek için mikrodalga, CMM yöntemleriyle ve farklı sıcaklıklarda elde edilen deneysel sonuçlarla küresel kavitenin hacmindeki değişimin tespit edilmesidir. Ayrıca hacmin belirlenmesindeki belirsizlik

hesaplamaları gerçekleřtirilmiř ve belirsizliklerin daha da dūřūrūlmesine iliřkin olasılıklar tartiřılmıřtır.

1.3. Tezin İçeriği

Bölüm 1’de AGT’nin tarihçesi, küresel kavitenin bu çalışmada tercih edilmesinin nedeni, mikrodalga tekniğinin önemi ve amacından bahsedilmiştir. Bölüm 2’de mikrodalga rezonanslarının küresel kavite içerisindeki teorik davranışı Helmholtz Denklemi özümü, sınır koşulları kullanılarak elde edilmiştir. Çok izgili mikrodalga rezonansları teorik olarak belirlenmiştir. Belirsizlik bileşenlerinin tanımlanması ve ölçümlerde belirsizlik hesaplamalarına neden olan etkiler irdelenmiştir. Bölüm 3’te deney düzenekleri, kullanılan cihaz ve özellikleri, yazılım ve deneysel ölçüm sonuçları anlatılmıştır. Bölüm 4’te ise sonuçlar ve yorumlar yapılmıştır.

2. TEORİ

2.1. TM ve TE Modların Türetilmesi

Bu bölümde küresel rezonatörün özdeğerleri için analitik bir çözüm türetilmiştir. Homojen ve iletken kürenin yarıçapı a olan Maxwell denklemlerinden başlanarak TM ve TE modların genel çözümleri verilmektedir.

Akım veya yükün olmadığı ortamlarda Maxwell denklemleri [7] Denklem (2.1) ile Denklem (2.4)'te verilmektedir.

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.2)$$

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

$$\nabla \times B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.4)$$

Denklem (2.3)'te curl alıp, manyetik alan (curlB) yerine Denklem (2.4)'ü koyarsak Denklem (2.5) ile Denklem (2.8) elde edilir.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) \quad (2.5)$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\frac{\partial}{\partial t} \left[\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right] \quad (2.6)$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\nabla^2 E + \nabla \cdot (\nabla \cdot E) \quad (2.8)$$

Denklemler tekrar düzenlendiğinde Denklem (2.9) – Denklem (2.11) ifadelerine ulaşılır.

$$-\nabla^2 E + \nabla \cdot (\nabla \cdot E) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2.10)$$

$$\nabla^2 E = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Işığın boşluktaki hızı, $c = 1/\varepsilon_0 \mu_0$ Denklem (2.11)'de yerine konulduğunda Denklem (2.12) ve Denklem (2.13) ifadeleri şeklinde yazılabilir.

$$\nabla^2 E = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

$$\nabla^2 B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Burada E elektrik alanı, B manyetik alanı, ε_0 , elektriksel geçirgenliği ve μ_0 manyetik geçirgenliği temsil eder. Denklem (2.12) ve Denklem (2.13) elektrik ve manyetik alanın dalga denklemleridir. Dalga denklemi Denklem (2.14) ile genel bir denklemde ifade edilebilir:

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.14)$$

Denklem (2.14) Helmholtz denklemi adı verilir.

$$\Psi = \Phi(r, \theta, \phi) \cdot T(t) \quad (2.15)$$

Değişkenlerin ayrılması kuralı (separation of variables) ile Ψ fonksiyonu Denklem (2.15) şeklinde ifade edilebilir. Ψ fonksiyonu Denklem (2.14)'te yerine konulması ile Denklem (2.14) yazılabilir.

$$\nabla^2(\Phi T) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(\Phi T)}{\partial t^2} = 0 \quad (2.16)$$

Denklemin her iki tarafını $1/\Phi T$ ile çarpıldığında Denklem (2.7) ifadesi elde edilir.

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2 T} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = 0 \quad (2.17)$$

burada $\Phi(r)$ uzamsal ve $T(t)$ zamana bağıllığı ifade etmektedir. Denklem (2.17)'de her iki teriminin eşit olması ve denklemin sağlanabilmesi için her iki terim ayrı ayrı aynı sabite eşit olmalıdır. Bu sabiti $-k^2$ ile ifade edersek sırasıyla aşağıdaki denklemleri elde ederiz:

$$\nabla^2 \Phi = k^2 \Phi \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{1}{T} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = 0 \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'un çözümü, $k = \omega/c$ [7], [8], [9], [10] dalga sayısı (wave number) olarak tanımlanmaktadır.

$$T(\omega) = T_1 e^{i\omega t} + T_2 e^{-i\omega t} \quad (2.20)$$

Denklem (2.18)'in küresel koordinatlarda (r, θ, ϕ) değişkenlerine ayrılması yöntemiyle çözersek,

$$\frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[\sin \theta \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \phi^2} \right] = -k^2 \Phi \quad (2.21)$$

$$\Phi(r, \theta, \phi) = R(r)P(\theta)Q(\phi) \quad (2.22)$$

Φ fonksiyonunu değişkenlerin ayrılması ile Denklem (2.22)'deki tanımları ve Denklem (2.21)'de yerine koyarsak ve RPQ 'ya bölersek Denklem (2.23)'ü elde ederiz.

$$\frac{1}{Rr^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{Pr^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) + \frac{1}{Qr^2 \sin^2 \theta} \frac{d^2 Q}{d\phi^2} = -k^2 \quad (2.23)$$

Eşitliğin her iki tarafını $r^2 \sin^2 \theta$ ile çarpıldığında ve Denklem (2.23) tekrar düzenlendiğinde Denklem (2.24)'e ulaşılır.

$$\frac{1}{Q} \frac{d^2 Q}{d\phi^2} = r^2 \sin^2 \theta \left[-k^2 - \frac{1}{Rr^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - \frac{1}{Pr^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) \right] \quad (2.24)$$

r , θ ve ϕ bağımsız değişkenler olduğundan, Denklem (2.24)'ün her iki tarafını bir sabite eşitleriz. Ayırma sabiti olarak $-m^2$ kullanılır ve bu da bir tamsayı kare olmalıdır.

$$\frac{1}{Q} \frac{d^2 Q(\phi)}{d\phi^2} = -m^2 \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{Rr^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{Pr^2 \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) - \frac{m^2}{r^2 \sin^2 \theta} = -k^2 \quad (2.26)$$

Denklem (2.26) r^2 ile çarpılarak Denklem (2.27) elde edilir.

$$\frac{1}{R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + r^2 k^2 = - \frac{1}{P \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) + \frac{m^2}{\sin^2 \theta} \quad (2.27)$$

Denklem (2.27) değişkenlere ayrılır. Her bir tarafı bir λ sabitine eşitleriz ve Denklem (2.28) ve Denklem (2.29) elde edilir.

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dP}{d\theta} \right) - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} + \lambda P = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + k^2 R - \frac{\lambda R}{r^2} = 0 \quad (2.29)$$

Burada λ , $l(l+1)$ değerlerine sahiptir, l bir tamsayıdır. Denklem (2.25)'in sabit katsayılı ikinci dereceden lineer diferansiyel denklemini çözersek,

$$\frac{d^2 Q}{d\vartheta^2} + n^2 Q = 0 \quad (2.30)$$

$$Q = e^{r\vartheta} \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)'i birinci ve ikinci türevlerini alıp Denklem (2.30)'da yerine yazarsak:

$$r^2 e^{r\vartheta} + n^2 e^{r\vartheta} = 0 \quad (2.32)$$

Denklem (2.32)'nin kökleri $r = \mp in$ olarak buluruz. Denklem (2.25)'in genel çözümü,

$$Q(\vartheta) = Q_1 e^{in\vartheta} + Q_2 e^{-in\vartheta} \quad (2.33)$$

veya alternatif olarak, Denklem (2.38) ile ifade edilebilir.

$$e^{in\vartheta} = \cos(n\vartheta) + i\sin(n\vartheta) \quad (2.34)$$

$$e^{-in\vartheta} = \cos(n\vartheta) - i\sin(n\vartheta) \quad (2.35)$$

$$Q(\vartheta) = Q_1 [\cos(n\vartheta) + i\sin(n\vartheta)] + Q_2 [\cos(n\vartheta) - i\sin(n\vartheta)] \quad (2.36)$$

$$Q(\vartheta) = (Q_1 + Q_2) \cos(n\vartheta) + i(Q_1 - Q_2) \sin(n\vartheta) \quad (2.37)$$

$$Q(\vartheta) = Q_3 \cos(n\vartheta) + Q_4 \sin(n\vartheta) \quad (2.38)$$

Her iki çözüm de mümkündür. Her iki durumda da, $Q(\vartheta)$ sürekliliği ve periyodikliği için m bir tamsayı olmalıdır. Denklem (2.29)'un radyal denklemini çözersek;

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + k^2 R - \frac{\lambda R}{r^2} = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{1}{r^2} 2r \frac{dR}{dr} + \frac{1}{r^2} r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + \left(k^2 - \frac{\lambda}{r^2} \right) R = 0 \quad (2.40)$$

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dR}{dr} + \left(k^2 - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) R = 0 \quad (2.41)$$

Denklem (2.40) Bessel fonksiyonlarında çözüme sahiptir. r^2 ile çarparsak,

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + 2r \frac{dR}{dr} + (k^2 r^2 - m(m+1)) R = 0 \quad (2.42)$$

$$R = \sum_{n=0}^{\infty} C_n r^{n+1}, \quad C_0 \neq 0 \quad (2.43)$$

$$R' = \sum_{n=0}^{\infty} C_n (n+1) r^{n+1-1} \quad (2.44)$$

$$R'' = \sum_{n=0}^{\infty} C_n (n+1-1)(n+1) r^{n+1-2} \quad (2.45)$$

Denklem (2.43) ve Denklem (2.44)'ü Denklem (2.42)'de yerine yazarsak,

$$\begin{aligned} r^2 \sum_{n=0}^{\infty} C_n (n+1-1)(n+1) r^{n+1-2} + 2r \sum_{n=0}^{\infty} C_n (n+1) r^{n+1-1} + (k^2 r^2 \\ - m(m+1)) \sum_{n=0}^{\infty} C_n r^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (2.46)$$

Denklem (2.46)'da r^2 ile sadeleştirirsek aşağıdaki Denklem (2.47) elde etmiş oluruz:

$$\sum_{n=0}^{\infty} C_n(n+1-1)(n+1)r^{n+1} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} C_n(n+1)r^{n+1} + k^2 \sum_{n=2}^{\infty} C_{n-2}r^{n-2+l+2} - m(m+1) \sum_{n=0}^{\infty} C_n r^{n+1} = 0 \quad (2.47)$$

$n=0$ için ve $C_0 \neq 0$ olması durumunda,

$$C_0(l-1)lr^l + 2C_0lr^l - m(m+1)C_0r^l = 0 \quad (2.48)$$

$$C_0(l-1)l + 2C_0l - m(m+1)C_0 = 0 \quad (2.49)$$

$$C_0(l^2 - l + 2l - m^2 - m) = 0 \quad (2.50)$$

Denklem (2.47)'de ki son denklemi $(l-m)(l+m) + l - m$ ifadesi şeklinde çarpanlarına ayırıp 0'a eşitlersek $l - m$ ifadesine a deriz. $a(l+m+1)$ ifadesini elde ederiz ve buradan iki ayrı kök elde etmiş oluruz. Denklemin kökleri; $l = m$, $-(m+1)$ 'dir. $n=1$ için,

$$C_1l(l+1) + 2C_1(l+1) - m(m+1)C_1 = 0 \quad (2.51)$$

Denklem (2.48)'de $C_1 = 0$ olur.

$$C_n(n+1)(n+1-1) + 2C_n(n+1) + k^2C_{n-2} - m(m+1)C_n = 0 \quad (2.52)$$

$$C_n = \frac{-k^2C_{n-2}}{(n+1)^2 + (n+1) - m(m+1)} = \frac{-k^2C_{n-2}}{(n+1-m)(n+1+m+1)} \quad (2.53)$$

$l = m$ ve $n = 2, 4, 6, \dots$ için

$$C_2 = \frac{-k^2 C_0}{2(2m+3)} = \frac{-k^2 C_0}{2^2 \left(m + \frac{3}{2}\right)} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} C_4 &= \frac{-k^2 C_2}{(1-m+4)(1+m+5)} = \frac{(-k^2)^2 C_0}{4(2m+5)2^2 \left(m + \frac{3}{2}\right)} \\ &= \frac{(-k^2)^2 C_0}{2 \cdot 2^4 \left(m + \frac{5}{2}\right) \left(m + \frac{3}{2}\right)} \end{aligned} \quad (2.55)$$

$C_1 = 0$ iken $n = 3$ ise $C_3 = -k^2 C_1$ şeklinde denklemi elde etmiş oluruz. Buradan $C_1=0$ olduğundan diğer tüm tekli ifadeler $C_3 = 0, C_5 = 0, C_7 = 0, \dots$ olur.

$$R(r) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n r^{n+l} \quad (2.56)$$

$$R(r) = r^m (C_0 + C_2 r^2 + C_4 r^4 + \dots) \quad (2.57)$$

$$R(r) = C_0 r^m \left[1 - \frac{k^2 r^2}{2^2 \left(m + \frac{3}{2}\right)} + \frac{k^4 r^4}{2 \cdot 2^4 \left(m + \frac{5}{2}\right) \left(m + \frac{3}{2}\right)} - \dots \right] \quad (2.58)$$

$$C_0 = \frac{k^m}{2^{m+\frac{1}{2}} \sqrt{\left(m + \frac{3}{2}\right)}} \quad (2.59)$$

$$R(r) = \frac{k^m}{2^{m+\frac{1}{2}} \sqrt{\left(m + \frac{3}{2}\right)}} r^m \left[1 - \frac{k^2 r^2}{4 \left(m + \frac{3}{2}\right)} + \frac{k^4 r^4}{4 \cdot 8 \left(m + \frac{3}{2}\right) \left(m + \frac{5}{2}\right)} \dots \right]$$

$$= \frac{1}{\sqrt{kr}} \left[\frac{r^m k^m \sqrt{kr}}{2^{m+\frac{1}{2}} \sqrt{\left(m+\frac{3}{2}\right)}} \left\{ 1 - \frac{(kr)^2}{4 \left(m+\frac{3}{2}\right)} + \frac{(kr)^4}{4 \cdot 8 \left(m+\frac{3}{2}\right) \left(m+\frac{5}{2}\right)} \dots \right\} \right] \quad (2.60)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{kr}} \left[\frac{(kr)^{m+\frac{1}{2}}}{2^{m+\frac{1}{2}} \sqrt{\left(m+\frac{3}{2}\right)}} \left\{ 1 - \frac{(kr)^2}{4 \left(m+\frac{3}{2}\right)} + \frac{(kr)^4}{4 \cdot 8 \left(m+\frac{3}{2}\right) \left(m+\frac{5}{2}\right)} \dots \right\} \right]$$

$$R(r) = \frac{1}{\sqrt{kr}} J_{m+\frac{1}{2}}(kr) \quad (2.61)$$

Denklem (2.28) Legendre denklemidir ve çözümü:

$$x = \cos\theta \rightarrow \frac{dx}{d\theta} = -\sin\theta \rightarrow \frac{d\theta}{dx} = -\frac{1}{\sin\theta} \quad (2.62)$$

$$x = \cos\theta \rightarrow \frac{dx}{d\theta} = -\sin\theta \rightarrow \frac{d\theta}{dx} = -\frac{1}{\sin\theta} \quad (2.63)$$

$$\frac{d}{d\theta} = -\sin\theta \frac{d}{dx} \quad (2.64)$$

$$\sin\theta \frac{dy}{d\theta} = \sin\theta \times \left(-\sin\theta \frac{dy}{dx} \right) = -\sin^2\theta \frac{dy}{dx} = -(1 - \cos^2\theta) \frac{dy}{dx} \quad (2.65)$$

$$\sin\theta \frac{dy}{d\theta} = -(1 - x^2) \frac{dy}{dx} \quad (2.66)$$

fakat bu değerleri Denklem (2.64) ve Denklem (2.66) eşitliklerini Denklem (2.28)'de yerine yazarsak,

$$\frac{1}{\sin\theta} \left(-\sin\theta \frac{d}{dx} \right) \left[-(1-x^2) \frac{dP}{dx} \right] + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{\sin^2\theta} \right] P = 0 \quad (2.67)$$

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dP}{dx} \right] + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{\cos^2\theta} \right] P = 0 \quad (2.68)$$

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dP}{dx} \right] + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{1-x^2} \right] P = 0 \quad (2.69)$$

Denklem (2.69) associated Legendre diferansiyel denklemi olarak adlandırılır. $m=0$ için Denklem (2.69)'u indirgersek,

$$\frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dP}{dx} \right] + l(l+1)P = 0 \quad (2.70)$$

$$(1-x^2) \frac{d^2P}{dx^2} - 2x \frac{dP}{dx} + l(l+1)P = 0 \quad (2.71)$$

Denklem (2.71)'i kuvvet serisi yöntemiyle çözersek,

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots \quad (2.72)$$

$$y(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k \quad (2.73)$$

Denklem (2.73)'ün y', y'' alıp ve $y(x)$ ifadesini sonrasında Denklem (2.73)'te yerine yazarsak,

$$(1-x^2) \sum_{k=0}^{\infty} k(k-1)a_k x^{k-2} - 2x \sum_{k=0}^{\infty} k a_k x^{k-1} + l(l+1) \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k = 0 \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=0}^{\infty} k(k-1)a_k x^{(k-2)} \\
& - \sum_{k=0}^{\infty} k(k-1)a_k x^k - 2 \sum_{k=0}^{\infty} k a_k x^k + l(l+1) \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k = 0
\end{aligned} \tag{2.75}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=0}^{\infty} (k+2)(k+1)a_{k+2} x^k \\
& - \sum_{k=0}^{\infty} k(k-1)a_k x^k - 2 \sum_{k=0}^{\infty} k a_k x^k + l(l+1) \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k = 0
\end{aligned} \tag{2.76}$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} [(k+2)(k+1)a_{k+2} - k(k+1)a_k - 2ka_k + l(l+1)a_k] x^k = 0 \tag{2.77}$$

$$(k+2)(k+1)a_{k+2} - k(k+1)a_k - 2ka_k + l(l+1)a_k = 0 \tag{2.78}$$

$$(k+2)(k+1)a_{k+2} - [k(k+1) + 2k - l(l+1)]a_k = 0 \tag{2.79}$$

$$(k+2)(k+1)a_{k+2} - [k(k+1) - l(l+1)]a_k = 0 \tag{2.80}$$

$$a_{k+2} = \frac{k(k+1) - l(l+1)}{(k+2)(k+1)} a_k \tag{2.81}$$

$k \rightarrow \infty$ 'da

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{a_{k+2}}{a_k} \rightarrow 0 \tag{2.82}$$

yani

$$l(l + 1) = k(k + 1) \quad (2.83)$$

burada, $k=0,1,2,\dots$

$$P_l(x) = \sum_{l=0}^{\infty} a_l x^l \quad (2.84)$$

Denklem (2.84) Legendre polinomları olarak adlandırılır. $m \neq 0$ için,

$$(1 - x^2) \frac{d^2 P}{dx^2} - 2x \frac{dP}{dx} + \left[l(l + 1) - \frac{m^2}{(1 - x^2)} \right] P = 0 \quad (2.85)$$

$$P_l^m(x) = (1 - x^2)^{|m|/2} \frac{d^{|m|}}{dx^{|m|}} P_l(x) \quad (2.86)$$

Denklem (2.86) çözümüne associated Legendre denklemi denilmektedir. $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$

$$y = P_l^m(x) = P_l^m(\cos\theta) \quad (2.87)$$

ve çözümü Denklem (2.87) ile verilmektedir. Bessel fonksiyonunun çözümünden k sınır koşullarından belirlenmektedir. TE modları ($E_r = 0$) için [11],

$$J_{m+\frac{1}{2}}(kr) = 0 \quad (2.88)$$

TM modları ($H_r = 0$) için,

$$\frac{d}{d(kr)} \left[\sqrt{(kr)} J_{m+\frac{1}{2}}(kr) \right] = 0 \quad (2.89)$$

kr , kesikli rezonans modlarıdır. Denklem (2.89) Bessel fonksiyonunun 1. türevinin sıfıra eşit olduğu noktalara karşılık gelen kök değerlerinin, z_{ln} , kr 'ye eşit olmasını

gerektirmektedir. Burada $k=2\pi f/c$ dalga sayısıdır ve Denklem (2.90)'da olduğu gibi eşitlenir.

$$kr = z_{ln} \quad (2.90)$$

k ifadesi Denklem (2.90)'da yerine konulduğunda Denklem (2.91) elde edilir.

$$\frac{2\pi f}{c} r = z_{ln} \quad (2.91)$$

Denklem (2.94) tekrar düzenlendiğinde Denklem (2.92) elde edilmektedir.

$$f = \frac{z_{ln} c}{2\pi r} \quad (2.92)$$

Denklem (2.92) ifadesi, dalga denklemlerinin küresel kavite sınır koşullarındaki çözümünde radyal değişkenin karşılığıdır ve buradaki f küresel kavite içerisinde oluşan elektromanyetik rezonansları ifade etmektedir. Sonuç olarak Denklem (2.92) küresel kavite içerisinde oluşan elektromanyetik dalgaların oluşturduğu rezonans ile küresel kavitenin yarıçapı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu denklem, küresel kavite içerisinde rezonans frekansların farklı modlar için (ln) ölçülmesiyle küresel kavitenin elde edilebileceğini göstermektedir.

2.2. Belirsizlik Hesaplamaları

Ölçülen hiçbir büyüklük doğru değer değildir ve ölçülen her büyüklük üzerinde bir hata bulunmaktadır. 1960'lı yıllarda ölçülen büyüklük değerinin gerçek değerinden sapması hata olarak adlandırılmaktaydı. BIPM tarafından oluşturulan bir çalışma grubu ile ölçülen büyüklük üzerindeki hataların hesaplanmasına yönelik bir kılavuz doküman oluşturulmasına karar verilmiştir. Çalışmalar sonunda 1995 yılında ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasına (GUM) yönelik Guide 98-3 dokümanı yayınlanmıştır [12]. Bu doküman ile ölçülen büyüklükler üzerindeki hatalar ölçüm belirsizliği olarak adlandırılmıştır. GUM dokümanı, ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasına yönelik kılavuz bilgiler sunmaktadır. Ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasında iki farklı yöntem bulunmaktadır. Tümünden gelim ve tümevarım yöntemleridir. Tümünden gelim

yönteminde ölçüm belirsizliği, ölçülen büyüklük üzerindeki tekrar üretilebilirliklerden hesaplanmaktadır. Tümevarım yöntemi ise GUM dokümanının sunduğu ve ölçüm büyüklüğünün bağlı olduğu ve ölçüm büyüklüğüne etki eden girdi büyüklükleri üzerindeki belirsizliklerin, çıktı ölçüm büyüklüğü üzerindeki toplam belirsizliğinin hesaplanmasını kapsamaktadır.

GUM kılavuz dokümanına göre belirsizlik hesaplamalarında izlenecek adımlar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- i.) Ölçümün Matematiksel Modelinin Belirlenmesi
- ii.) Belirsizlik Bileşenlerinin tanımlanması
 - i.) A Tipi Belirsizlik
 - ii.) B Tipi Belirsizlik
- iii.) Belirsizlik Bileşen Değerlerinin Hesaplanması
- iv.) Bileşik Belirsizliğin Hesaplanması
- iii.) Genişletilmiş Belirsizliğin Hesaplanması
- iv.) Ölçüm Sonuçlarının Raporlanması

Tez çalışması içerisindeki belirsizlik hesaplamaları GUM kılavuz dokümanına göre gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Mikrodalga Rezonans Frekansı Ölçümleri ile Belirlenen Küresel Kavite Yarıçapındaki Belirsizlik Hesaplamaları

Mikrodalga rezonans frekansındaki ölçüm belirsizliğinin hesaplanmasına esas olan model fonksiyon Bölüm 2’de elde edilen küresel kavite içerisindeki rezonans frekansını veren denklem kullanılarak Denklem (2.93)’te verilmektedir.

$$a = a_0(1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 + \delta_7 + \dots) \quad (2.93)$$

$$a_0 = \frac{z_{ln} c}{2\pi f_{ln}} \quad (2.94)$$

• A Tipi Belirsizlik Bileşeni

A tipi belirsizlik istatistiksel verilerden elde edilen belirsizlik tipidir. Deneyssel standart sapmanın toplam ölçüm sayısına belirlenmesi ile Denklem (2.93) ifadesinden hesaplanmaktadır.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.95)$$

$$\delta_7 = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.96)$$

Denklem (2.95) ve Denklem (2.96)'da, δ_7 , deneysel standart sapma belirsizliği (1σ), tekrarlanabilirlik, n, ölçüm sayısı, x_i , i. ölçüm değeri ve $\bar{x}$, ölçümlerin ortalamasını ifade etmektedir.

• B Tipi Belirsizlik Bileşenleri

Denklem (2.93) içerisinde verilen B tipi belirsizlik bileşenleri aşağıdaki başlıklar altında sıralanmaktadır.

- δ_1 : Isopad mantolu ısıtıcıdan kaynaklanan belirsizlik,
- δ_2 : Sıcaklık kaynağının küresel kavite üzerine etkisi
- δ_3 : Fluke Model Platin Direnç Termometresi,
- δ_4 : Fluke Model termometre okuyucusu
- δ_5 : Vektör Ağ Analizörü (VNA)
- δ_6 : İki düz anten

Bütün belirsizlik bileşenlerinin karelerinin, hassasiyet katsayısı karesinin çarpılması ve toplamalarının karekökünün alınması ile elde edilen bileşik belirsizlik Denklem (2.97)'de verilmektedir.

$$u = \sqrt{\sum_{m=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_m} \right)^2 u_m^2} \quad (2.97)$$

Ölçümün genişletilmiş belirsizlik değeri, kapsam faktörü $k=2$ ve % 95 güven seviyesinde verilmektedir ve Denklem (2.96)'da ki ifade kullanılarak elde edilmektedir.

$$U = k \cdot u_c \quad (2.98)$$

2.2.1.1. Sıcaklık Sistemine Bağlı Olarak Değişen Belirsizlik Bileşenleri

Sıcaklık deney düzeneğinde 23,1 °C ile 117,7 °C sıcaklık aralığında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan cihazlardan kaynaklı belirsizlik sırasıyla incelenmiştir.

Sıcaklık ölçümlerinde Fluke marka 5626 model 2435 seri numaralı platin direnç termometresi kullanılmıştır. Termometrenin belirsizliği kalibrasyon sertifikasında (G1KS-0084, UME / 27.06.2020) elde edilmektedir. Termometrenin kalibrasyonunda $k=2$ %95 güvenilirlik düzeyinde ve istatistiksel dağılımı normal dağılım için ölçüm belirsizliği 0,00015 °C olarak verilmektedir. Sıcaklık ölçümlerinde ayrıca Fluke marka 1529 model B05220 seri numaralı termometre okuyucusu kullanılmıştır. Termometrenin belirsizliği (G1LR-0030, UME/25-27.02.2020) kalibrasyon sertifikasında verilmiştir. Kalibrasyon sertifikası cihazın uzun dönem kararlılığını ve hatasını içermemektedir. Belirsizlik hesabının normal dağılımı için yaklaşık olarak $k=2$ ve %95 güven seviyesi ile verilmektedir. Belirsizliği $3,6 \times 10^{-3}$ °C olarak beyan edilmiştir.

Ölçüm sırasında belli aralıklarda TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} her bir mod için alınan on veri ölçülerek standart sapma formülü kullanılarak tekrarlanabilirlik değeri hesaplanmıştır. Tekrarlanabilirlik değerleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1: Rezonans frekanslarının tekrarlanabilirlik sonuçları.

Enine Manyetik Dalgalar	Ortalama Değeri, MHz	Tekrarlanabilirlik, MHz
TM_{11}	2179,71	0,0017
TM_{12}	4858,60	0,0001
TM_{13}	7404,36	0,4026

2.2.1.2. Antenden Kaynaklanan Belirsizlik Bileşeni

Anten belirsizlikleri iki kısımda incelenmektedir. İlk olarak ölçümlerde uzun anten ve kısa anten olmak üzere tasarımdan kaynaklı farklı uzunlukta anten kullanılması olarak öngörülmüştür. İkinci olarak ise, antenin uç kısmındaki canlı uç

boyutundan kaynaklı belirsizlik bileşeni düşünülmüştür. Sıcaklığa bağlı mikrodalga rezonans ölçümlerinde TM_{13} modu gözlenmemiştir. Tablo 2.2’de anten ölçüm belirsizlikleri ile ilgili sonuçlar verilmektedir.

Tablo 2.2: Antenden kaynaklanan ölçüm belirsizlik sonuçları.

Enine Manyetik Dalgalar (MHz)	Canlı Uçtan Kaynaklanan Belirsizlik (mm)	Antenin Boyundan Kaynaklanan Belirsizlik (mm)
TM_{11}	0,000594	0,000269
TM_{12}	2,213E-05	1,816E-05

2.2.1.3. Küresel Kavitenin Hizalanma Ayarından Kaynaklı Belirsizlik Bileşeni

İki yarım küre birbirine on iki M5 vida ile tutturulmaktadır. Dolayısıyla hizalanmanın doğru bir şekilde olabilmesi için vidaların arasında boşluk ve kayma olmayacak şekilde vidalar iyice sıkıştırılmalı, üst üste gelecek şekilde ayarlanmalı ve yapılan ayarlamaya tekrar dokunulmamalıdır. Hizalanma ayarı son derece önemlidir. Boşluk oluşmasından özellikle kaçınılmalıdır çünkü rezonans frekanslarını tahmin edilmesi zor bir şekilde bozmaktadır ve belirsizliği ciddi oranda etkilemektedir. Dolayısıyla iki yarım küreyi hizalama ayarı son derece hassasiyet gerektirmektedir. Yarım küreleri birbirine lehimlenerek oluşabilecek boşluklar ortadan kalkabilir [3]. Kullandığımız küre ideal bir hizalanmaya sahip olmadığından el ile birtakım yöntemler denenerek rezonans frekansları gözlenmiştir. Dolayısıyla buna bağlı olarak kavitenin hizalama ayarından gelen belirsizlik bileşeni TM_{11} ve TM_{12} için 0,000451 mm ve 1,19E-05 mm olarak bulunmuştur.

2.2.1.4. Rezonans Frekansından Kaynaklı Belirsizlik Bileşeni

Bu belirsizlik bileşeninin amacı, kavitede dalga kılavuzlarının neden olduğu TM_{1n} modlarındaki frekans kaymasını belirlemektir. Bölüm 3’te açıklanan prosedür izlenerek deneysel olarak ölçülmüştür ve ardından teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tablo 2.3’te bu bileşene ait belirsizlik tablosu verilmektedir.

Tablo 2.3: Rezonans frekanslarının belirsizlik sonuçları.

Rezonans Modları	Ölçülen Frekans (MHz)	Beklenen Frekans (MHz)	Belirsizlik Değeri (mm)
TM ₁₁	2179,45	2183,36	0,00179
TM ₁₂	4858,77	4867,59	0,00181
TM ₁₃	7400,76	7413,91	0,00177

Mikrodalga yöntemi ile yapılan çalışmalarda kullanılan cihaz ve ölçüm belirsizliğine neden olan tüm etkilerin hesaplanmasına ilişkin detaylı bilgiler verilmiştir. Ölçüm sonuçlarının belirsizliği, gerçek değere en yakın sonuca ulaşabilmek için belirsizliğe etkisi olan hata kaynaklarının değerlendirilmesiyle mümkün olabilmektedir. Tahmini belirsizlik değerleri için dağılım fonksiyon türlerini ve ilgili belirsizlik bileşeninin duyarlılık katsayısı tespit edilerek belirsizlik değerleri hesaplanmıştır.

$$u(a) = \sqrt{u_{\delta_1}^2 + u_{\delta_2}^2 + u_{\delta_3}^2 + u_{\delta_4}^2 + u_{\delta_5}^2 + u_{\delta_6}^2 + u_{\delta_7}^2 + \dots} \quad (2.99)$$

u_{δ_i} , her bir belirsizlik bileşenini ifade etmektedir. $u(a)$ ise belirsizlik değeridir.

Yapılan deneysel sonuç ve hesaplamalar göstermektedir ki $k=2$ ve %95 güvenilirlik seviyesiyle mikrodalga ölçüm belirsizliği $1,328E-04$ mm olarak hesaplanmıştır. Tüm belirsizlik bileşenleri belirsizlik tablosunda bulunmaktadır ve Tablo 2.4'te gösterilmektedir.

Tablo 2.4: Mikrodalga rezonans yöntemi ile belirlenen küresel kavite yarıçapının belirsizlik tablosu.

Belirsizlik Kaynakları	Kısmi Belirsizlikler			Duyarlılık Katsayıları	Kısmi Varyanslar	
	Değeri	Dağılım Fonk.	Çarpanı	Değeri	Değeri	Birimi
Sıcaklık Sistemi						
δ_1 : Sıcaklık probundan gelen belirsizlik	0,0002	Normal	0,5	0,0011	6,81E-15	mm ²
δ_2 : Okuma cihazından gelen belirsizlik	0,004	Normal	0,5	0,0011	3,71E-12	mm ²
δ_3 : Tekrarlılık	0,001	Normal	1	0,0011	1,21E-12	mm ²
δ_4 : Isıtıcıdan gelen belirsizlik	0,050	Normal	0,577	0,0011	7,56E-10	mm ²
δ_5 : Sıcaklık kaynağının kavite üzerine etkisi	0,04	Normal	0,577	0,0011	4,84E-10	mm ²
Anten						
δ_6 : Canlı uçtan gelen belirsizlik	0,000308	Dikdörtgen	1	0,01238	1,45E-11	mm ²
δ_7 : Anten tasarımından kaynaklanan belirsizlik	0,000144	Dikdörtgen	1	0,01238	3,18E-12	mm ²
Rezonans Frekansı						
δ_8 : TM11	0,00179	Normal	1	0,02756	2,43E-09	mm ²
δ_9 : TM12	0,00181	Normal	1	0,01238	5,02E-10	mm ²
δ_{10} : TM13	0,00177	Normal	1	0,00812	2,07E-10	mm ²
Küresel Kavite						
δ_{11} : Hizalama ayarı	0,000232	Normal	1	0,01237	2,74E-12	mm ²

Sonuç olarak, Tablo 2.4’te sertifika değeri $k=2$, toplam varyans 4,41E-09 mm², standart belirsizlik 6,64E-05 mm ve genişletilmiş belirsizlik 1,328E-04 mm olarak bulunmuştur.

2.2.2. CMM Belirsizlik Hesaplamaları

Mikrodalga ölçümlerini boyutsal analiz yöntemi ile karşılaştırması yapılmaktadır. Bu ölçümleri gerçekleştirmek için CMM cihazı kullanılmaktadır. Bölüm 3'te cihaz hakkında detaylı bilgi anlatılmaktadır. Cihazın belirsizlik bileşenleri belirsizlik tablosunda bulunmaktadır ve Tablo 2.5'te gösterilmektedir

Tablo 2.5: CMM belirsizlik tablosu.

Tanımı	Tahmini Değeri	Birimi	Değeri	Birimi	Dağılım Fonk.	Çarpımı	Değeri	Değeri	Birimi
Referans Master									
Referans master blokları ölçüm belirsizliği Q (56; 0,7L)nm L:mm	100,000 12	mm	0,05 0	µm	Normal, k=2	0,50 0	1	7,84E-04	µm ²
			0,000 7	µm	Normal, k=2	0,50 0	1	1,23E-07	µm ²
CMM									
Ölçülen referans form hatası	0,1	µm	0,100	µm	Dikdörtg en	0,57 7	1	3,33E-03	µm ²
Problama Hatası	0,00	µm	0,400	µm	Dikdörtg en	0,57 7	1	5,33E-02	µm ²
Problama sırasında, referans masterin eksenle olmamasından gelen hata	0,00	µm	5,0E-07	µm	Dikdörtg en	0,57 7	1	8,33E-14	µm ²
CMM çözünürlük	0,10	µm	0,100	µm	Dikdörtg en	0,57 7	1	8,33E-04	µm ²
Ölçülen küre form hatası			75,00 0	µm	Dikdörtg en	0,57 7	1	1,88E+03	µm ²

Sonuç olarak, Tablo 2.5'te sertifika değeri k=2 (% 95 güvenilirlik düzeyi), toplam varyans 1,88E03 µm², standart belirsizlik 4,33E01 µm ve genişletilmiş belirsizlik 86.60 µm olarak bulunmuştur.

2.3. Etkiler

2.3.1. Mikrodalga Rezonans Ölçümüne Neden Olan Etkiler

Küresel bir kavitede rezonans frekansındaki kaymalar diğer rezonatörlere göre çok küçüktür ve bu da ölçümlerde daha küçük bir istatistiksel belirsizliğe neden olur fakat paslanmaz çelikten yapılmış vidalar küreye takıldıktan sonra rezonatörde birkaç milimetrelik kayma ile birbirine göre hafifçe yanlış hizalanabilmektedir ve yarım kürelerin uygun bir göreceli konumu bulunduktan sonra vidalar sıkılarak sabitlenmektedir [13], [14], [15], [16], [17]. Dolayısıyla yarım küreler birbirine vidalandığından milimetrik düzeyde değişiklikler kaçınılmazdır. Bu da çok ciddi bir belirsizliğe neden olmaktadır. Hizalamadan sonra yapılan mikrodalga TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} ölçümlerinin tekrarlanabilirliği sırasıyla 0,0017 mm, 0,0001 mm ve 0,4026 mm'dır.

Sıcaklık ölçümleri alınırken kararlı, kalibre edilmiş platin direnç termometresi kullanılmaktadır fakat fırın hızlı ısıtma ve homojen sıcaklık dağılımına sahip olmadığından fırın içerisine kaviteyi yerleştirdiğimizde açıkta kalan kürenin üst kısmını cam yünler ile kaplanmıştır. Fırının dijital ekranından sıcaklık değerleri sürekli değiştiğinden dengeye gelmesi uzun zaman almaktadır ve yeterince stabil olmadığından ölçümler eşit sıcaklık aralıklarında yapılmamıştır. Sıcaklık arttıkça frekanslarda kaymalar yaşanmaktadır. Yöntem, en yüksek hassasiyeti ve doğruluğu vermemektedir.

2.3.2. CMM Cihazından Kaynaklanan Belirsizlik Ölçümüne Neden Olan Etkiler

CMM cihazında ölçüme başlarken kürenin iç yüzeylerinde koordinat (xyz eksenleri ve eksenler arası) belirleme yapılmaktadır çünkü cihazın küre olarak tanıyabilmesi için en az beş nokta belirlenmesi gerekmektedir. Noktalar ne kadar çok belirlenirse ölçüm sonuçları daha doğru çıkmaktadır. Alt ve üst küre için xyz eksenlerinde toplam 15488 nokta taraması yapılmaktadır. Eksenler arası nokta taraması yapılamadığından ölçüm belirsizliğini etkilemektedir.

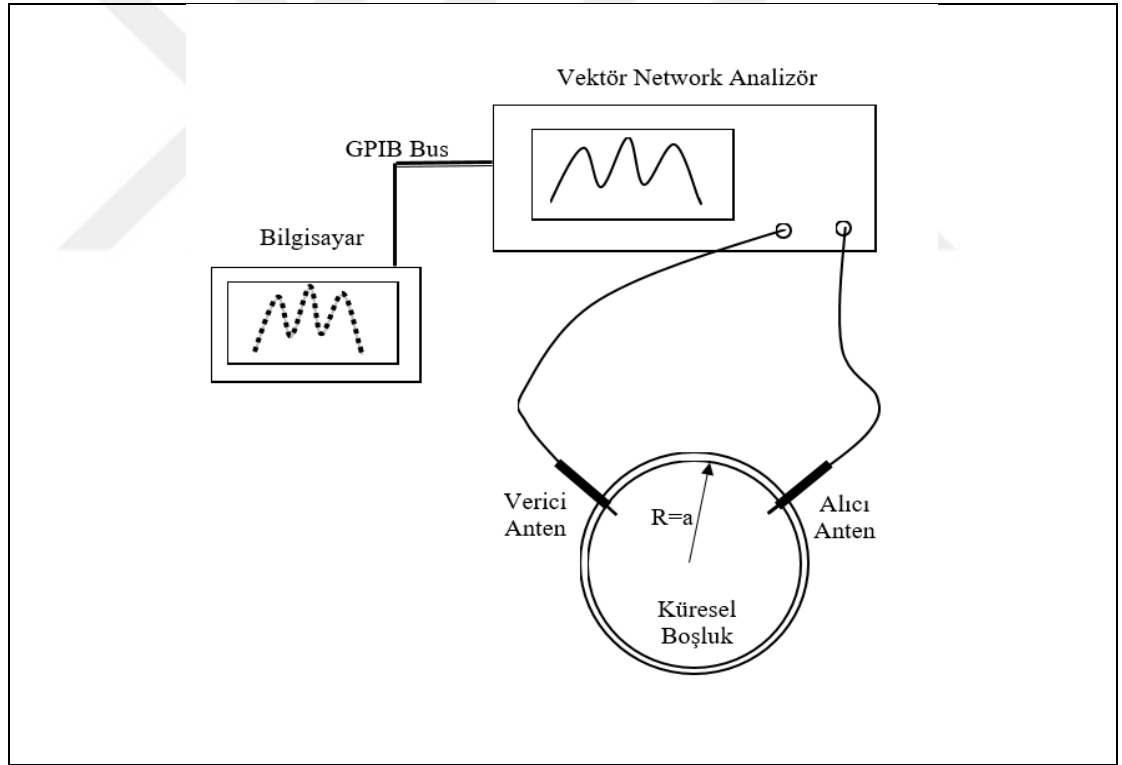
Cihazın ölçümünü etkileyen ayrıca iki önemli parametre daha bulunmaktadır. Sıcaklık ve kürenin iç yüzeyidir. Kullanılan malzemeler çelik vb. olduğu için genleşmeye bağlı ölçümde farklı sonuçlar elde edileceğinden olabildiğince bu parametreyi düşük tutulduğunda belirsizlik o kadar düşük olmaktadır. Ölçüm oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bir gün oda sıcaklığında bekletilerek ölçümlere başlanılmaktadır ve dolayısıyla belirsizlik bileşeni olarak sıcaklık parametresi ölçüm sonuçlarını etkilememektedir. Kürenin iç yüzeyi çok düzgün gibi görünse de aslında ölçüldüğünde birçok girinti ve çıkıntılar olduğu görülmektedir. İç yüzey formlarını yani küreselliğini net bir şekilde tespit etmektedir. Formu çok düzgün olmadığından yuvarlaklık hatası yüksek çıkmaktadır bu da belirsizlik hesaplamalarını yüksek oranda etkilemektedir.

Diğer bir potansiyel hata kaynağı, CMM'nin yanıtındaki anizotropidir. Bu, birkaç nedenden dolayı ortaya çıkabilir. Örneğin, prob sensörleri, örneğin x ve y yönlerinde basınç için farklı temas kuvvetlerini kaydederse, mükemmel şekilde yuvarlak bir nesne eliptik görünmektedir. Prob ucunun küreselliğindeki hatalar da benzer bir etkiye sahip olmaktadır. Benzer hatalar, CMM eksen çiftlerindeki artan karelik ve doğrusallık hatalarından da kaynaklanmaktadır. Küre gibi bir yapının nominal anizotropisi ölçülerek ve ardından yapı döndürülerek bu hatanın büyüklüğü değerlendirilebilir. Nesne üzerindeki herhangi bir gerçek anizotropi, veri setinde hareket etmektedir, ancak CMM'den kaynaklanan anizotropiler, veri setinde durağan kalmaktadır.

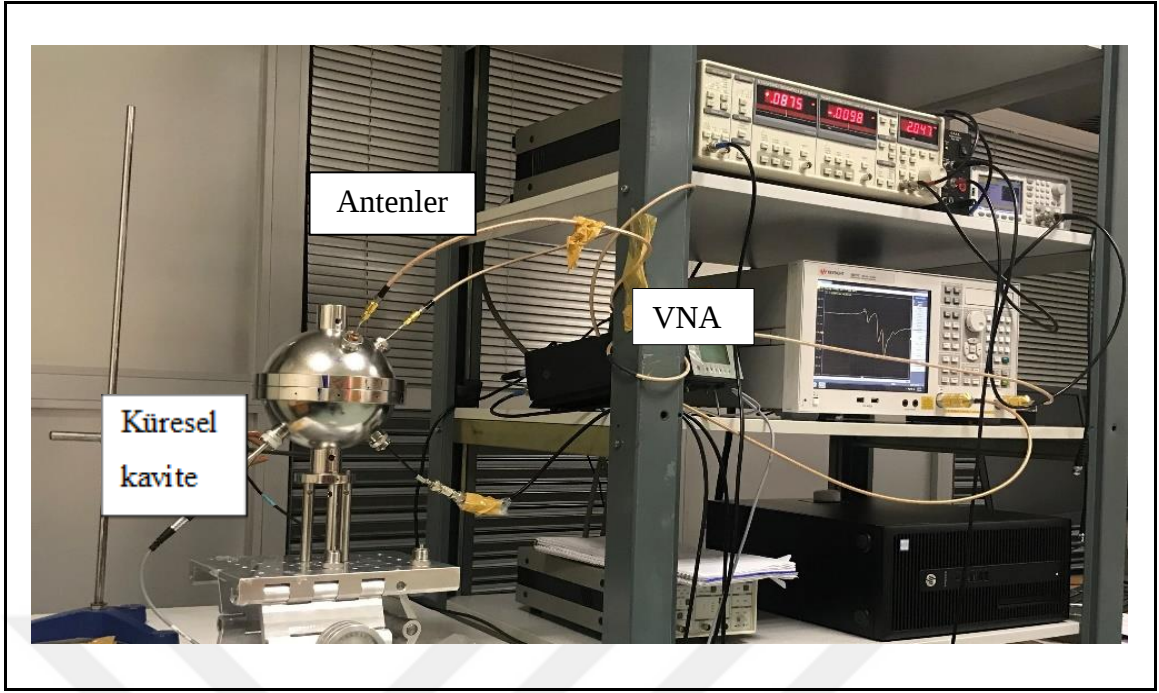
3.DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Mikrodalga Rezonansları Ölçümlerinde Kullanılan Deney Düzeneği

Rezonatör içinde oluşan elektromanyetik rezonanslar, Network analizör üzerinde S_{12} veya S_{21} parametreleri seçilerek 20 GHz'e kadar ölçümlere izin veren koaksiyel kablo ve SMA konnektörlerle küresel rezonatöre bağlı verici ve alıcı düz anten üzerinden network analiz cihazına bağlanmaktadır. Alıcı ve verici antenler, 90 derece birbiri ardına yerleştirilmiş üst yarım kürede bulunan yuvalarına montajı yapılmıştır [18]. Ölçüm düzeneğinin şematığı Şekil 3.1'de ve resmi Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.1: Mikrodalga rezonansları ölçüm düzeneği şematığı.



Şekil 3.2: Mikrodalga rezonansları ölçüm düzeneği.

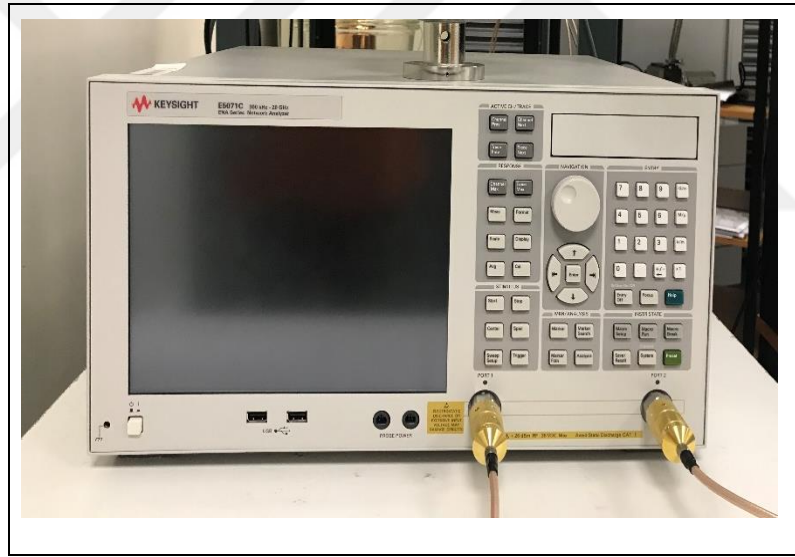
3.2. Deney Düzeneginde Kullanılan Cihaz ve Özellikleri

3.2.1. Vektör Ağ Analizörü

Ağ analizörleri, bir frekans aralığında test edilen bir cihazın büyüklüğünü ve faz bilgisini ölçebilir ve görüntüleyebilir. Temelde, bir ağ analizörü test edilen cihazın saçılma parametreleri veya S parametreleri açısından karakterize eder. S-parametreleri, gelen ve yansıyan dalgalar açısından RF ve mikrodalga frekanslarındaki performansı karakterize etmek için kullanılır. Bir ağ analizörünün temel amacı, S parametrelerini ölçmektir. S-parametreleri vektör nicelikleridir, yani hem büyüklük hem de faz bilgisini içerirler. İki bağlantı noktalı bir ağın dört S parametresi ögesi vardır: S_{11} , S_{21} , S_{12} ve S_{22} . S_{11} ve S_{22} yansıma katsayıları olarak bilinir. S_{21} ve S_{12} , iletim katsayıları olarak bilinir. Daha önce belirtildiği gibi, S parametreleri hem büyüklük hem de faz bilgisini içerir. Büyüklük tipik olarak desibel (dB) cinsinden ifade edilir. S_{11} ve S_{22} 'nin dB temsilleri, yansıyan sinyal ile gelen sinyali arasındaki dB cinsinden fark olan geri dönüş kaybı olarak bilinir. Bu nedenle, -15 dB'lik bir geri dönüş kaybı, yansıyan sinyalin büyüklük olarak gelen sinyalden 15 dB daha düşük olduğu anlamına gelir. Geri dönüş kaybı genellikle pozitif bir değer olarak ifade edilir,

bu nedenle -15 dB'lık bir geri dönüş kaybı genellikle sadece 15 dB olarak ifade edilir. Şekil 3.1'de deney düzeneğinde kullanılan VNA, ilgilenilen frekans aralığı üzerinde sinyaller üreten bir RF kaynağı içerir. Bu sinyaller Port 1'den çıkar ve kaviteye uygulanır. Kavitede herhangi bir frekansta bir sinyal uygulandığında, bu sinyalin bir kısmı kavite üzerinden VNA'nın Port 2'sine iletilir. Başka bir kısım Port 1'e geri yansıtılır. Kullanıcı daha sonra VNA'nın ekranında S_{21} veya S_{11} ölçümlerini görebilir [19].

Bir VNA mümkün olan maksimum ölçüm bant genişliklerine izin verir. Temel ilke, önceden tanımlanmış bir bant genişliği üzerinden kanalın frekans taramalı örneklemeini gerçekleştirmektir. VNA ölçüm prensibi, iletilen ve alınan sinyal arasındaki tam tutarlı oranların ölçülmesine dayandığından, hem verici hem de alıcı antenlerin VNA'ya RF kabloları ile bağlanması gerekir [20]. Şekil 3.3'te VNA cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.3: E5071C Keysight ENA Serisi Vektör Ağ Analizörü.

Keysight ENA Series E5071C koaksiyel iletim hatları ile VNA'ya bağlanan iki düz anten aracılığıyla alıcı ve verici antenden sinyal geçerken iletilen ve yansıyan dalgaları ölçmek için kullanılmıştır. İletilen ve yansıtılan sinyallerin ölçülmesi, küresel kavite içerisinde meydana gelen dalgaanın özelliklerinin belirlenmesini sağlar. Deney düzeneğinde mikrodalga rezonans frekansları ölçmek için kullanılmıştır.

3.2.2. Termometre Okuyucu

Fluke Hart Scientific 1502A, $\pm 0,006$ °C'ye kadar doğruluk sağlamaktadır. 100 ohm, 25 ohm ve 10 ohm termometreleri okumaktadır, 0,001 °C çözünürlüğe sahiptir. Maksimum doğrulukta termometre sabitleriyle eşleşecek şekilde programlanabilmektedir. Ön panel tuşunda ilgili ayarlamalar yapılmaktadır. Sıcaklık °C, °F, K veya ohm cinsinden direnç olarak gösterilmektedir. 1502A, termometrenin direncini doğru bir şekilde ölçer ve ardından cihazın içindeki yazılımdan algoritmalarını kullanarak direnci bir sıcaklık değerine dönüştürmektedir [21]. Şekil 3.4'te termometre okuyucu gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Fluke model 1502A termometre okuyucu.

3.2.3. Platin Direnç Termometresi

Platin Dirençli Termometre (PRT) modelleri, sıcaklığı dirence dönüştürmektedir. Platin Direnç Termometreleri (PRT) modelleri, sıcaklığı dirence dönüştüren en iyi ikincil standart enterpolasyon cihazı olacak şekilde tasarlanmıştır. PRT'ler, sıcaklık değişikliklerini veya gerçek sıcaklığı algılamak için bir okuma cihazıyla birlikte kullanılır. PRT'ler, 1990 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği'nde (ITS-90) - 200 °C ile 661 °C aralığını kapsar [22]. Şekil 3.5'te platin direnç termometre verilmektedir.



Şekil 3.5: Fluke Model Platin Direnç Termometresi.

3.2.4. Isopad Mantolu Isıtıcı

Sıvı ısıtmak ve kaynatmak amaçlı tasarlanmıştır fakat deneyde kaviteyi ısıtarak sıcaklık değişimini gözlemlemek için kullanmayı amaçlanmaktadır. +10 °C ile 450 °C aralığında çalışmaktadır. Sıcağa dayanıklı ve esnek özelliği sayesinde cam elyaf kaplı ısıtıcı maksimum 450 °C sıcaklığa kadar ısıtma sağlamaktadır. Ayaklarında kaymayı önleyen lastikler bulunmaktadır. Kontrol panelinde ısıtma ayarı ve açma ve kapama fonksiyonlarını göstermektedir [23]. Şekil 3.6’da ısıtıcıya ait görsel gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Isopad Mantolu Isıtıcı.

3.2.5. Küresel Kavite

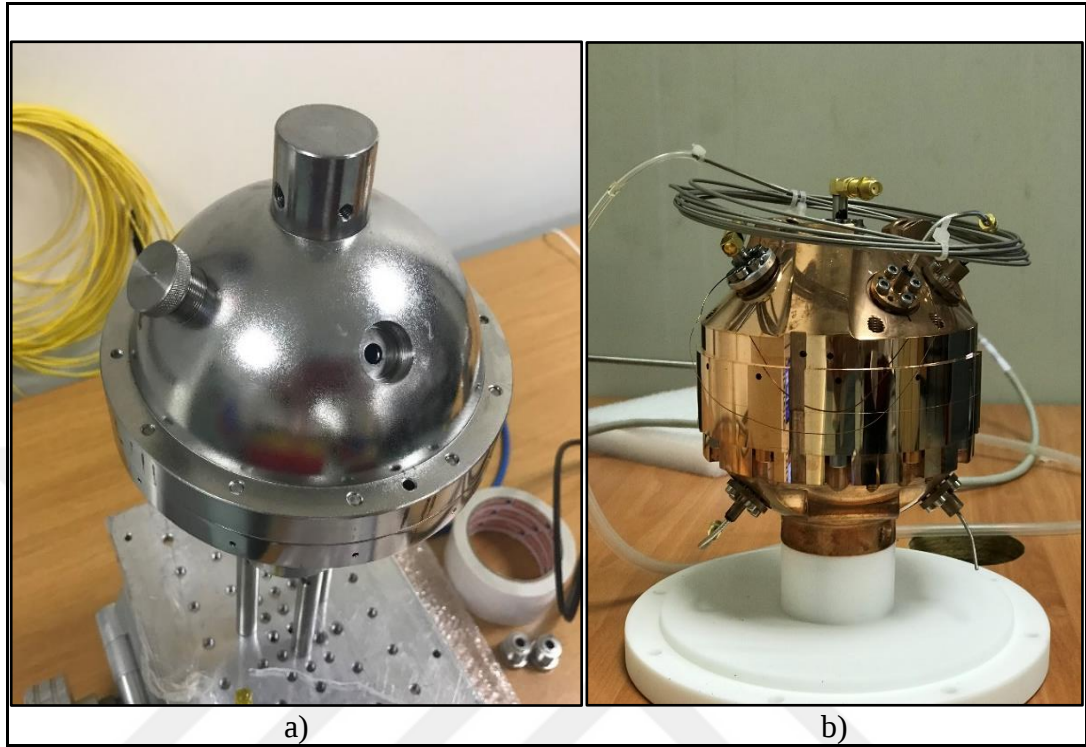
Küresel kaviteler birincil termometri, gaz geçirgenliği ölçümleri ve basınç standartları dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalara sahip metrolojik aletlerdir. Tipik olarak, yüksek ancak sınırlı elektrik iletkenliğe sahip bakır veya alüminyum gibi metallerden işlenir. Bu sonlu iletkenliğin bir sonucu, iç yüzeydeki elektromanyetik alanların metalin içine kısa bir mesafe girerek özfrekanslarda bir kaymaya ve direnir kayıplar yoluyla rezonansların genişlemesine neden olmaktadır [15], [16].

Mevcut çalışmada, mükemmel olmayan bir küresel kavitenin hacminin, dejenere, mikrodalga multiplet bileşenlerinin frekansları mikrodalga kavite kullanarak ve ölçerek doğru bir şekilde belirlenebileceği önerilerini test etmek için kullanılmıştır [24], [25]. Küresel bir kavitenin analizi, Legendre polinomlarının ve küresel Bessel fonksiyonlarının kullanılmasını gerektirir ve mod şekillerini görselleştirmek için hesaplamalı bir yaklaşım gerektirir [9].

Yarıçapı 60 mm olan 316 L iki paslanmaz çelik yarım küre ve kürenin kenarlarında on iki M5 vida ile birbirine vidalanmaktadır. Korozyona dayanıklı, yüksek sıcaklıklarda güçlü olduğundan 316 L tercih edilmektedir. Yarım kürelerin üst üste tam hizalanabilmesini sağlamak için, dış yüzeylerin ekvator bölümleri tam olarak silindirik ve küresel yüzeylerle eş merkezli olacak şekilde gelmelidir. Her yarım kürede silindirik başlıklar bulunmaktadır. Bu silindirik başlıklara üst yarım kürede elektromanyetik frekansları ölçmek için iki adet mikrodalga anten girişi vardır ve alt yarım kürede ise ses ölçümlerini algılamak ve uyarmak için iki adet mikrofon girişi vardır fakat ses ölçümlerine ait deney ölçümleri gerçekleştirilmediğinden dolayı bu çalışmada dikkate alınmamıştır ve her iki yarım kürede platin direnç termometre delikleri bulunmaktadır.

TM_{lmn} ve TE_{lmn} mikrodalga modlarının $(2l+1)$ -kat dejenerasyonunun kaldırılması, bir TM_{ln} (TE_{ln}) multipletinde her modun frekans ölçümüne izin veren bir özelliğe sahip olmaktadır [15], [16]. Mehl ve Moldover, kavitenin multipletinin ortalama öz frekansının, birinci derecede, eşit hacimli küresel bir rezonatörünkine eşit olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, kavitenin hacimsel termal genişlemesinin, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir multipletin ortalama frekansının ölçülmesiyle belirlenebildiği akustik termometride kullanılmaktadır. Dolayısıyla deneyde

kullanılan rezonatör bir elektromanyetik rezonatör ve aynı zamanda bir akustik rezonatördür. Şekil 3.7’de küresel kavitelelerin görselleri verilmektedir.



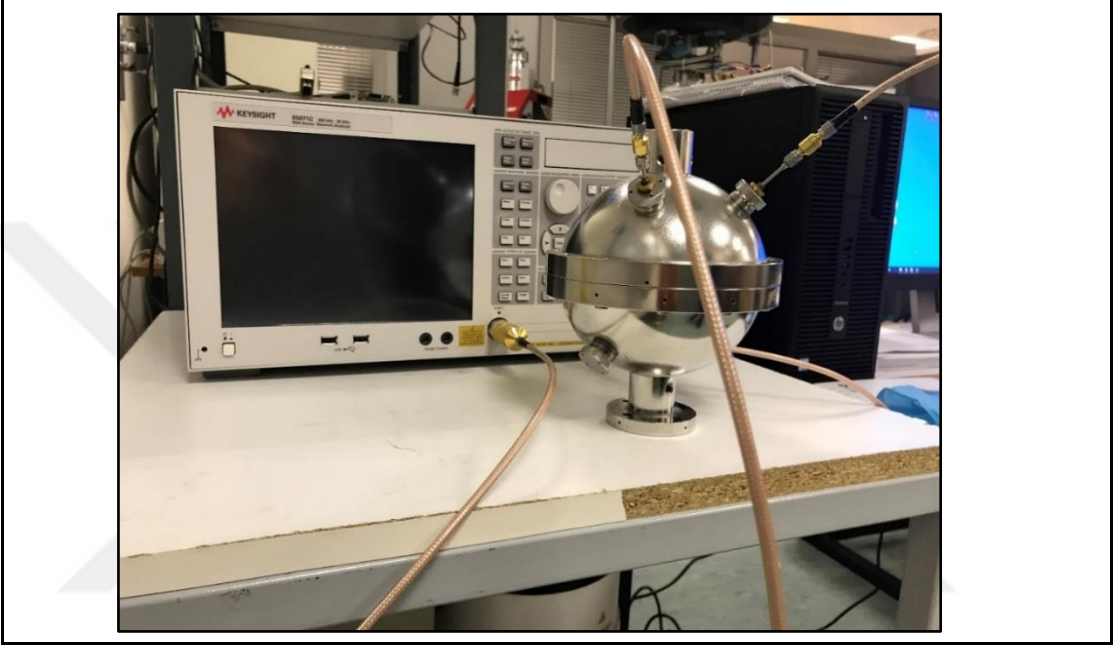
Şekil 3.7: a) 316 L paslanmaz çelikten yapılmış küresel kavite. b) Bakırdan yapılmış küresel kavite.

3.2.6. Antenler

Sistemimizde iki adet biri verici anten diğeri ise alıcı anten olmak üzere iki adettir. Verici anten, iletim hattında ilerleyen kılavuzlanmış elektromanyetik dalgayı boşlukta yayılan düzlem dalgaya çeviren bir bileşen olarak görülebilir. Dolayısıyla, antenin bir tarafı elektriksel devre olarak görünürken diğeri tarafı ise yayılan düzlem dalgaya bir arayüz sağlamaktadır. Anten, yapısı gereği çift yönlüdür. Bu nedenden ötürü gönderme ve alma fonksiyonları için kullanılmaktadır [26].

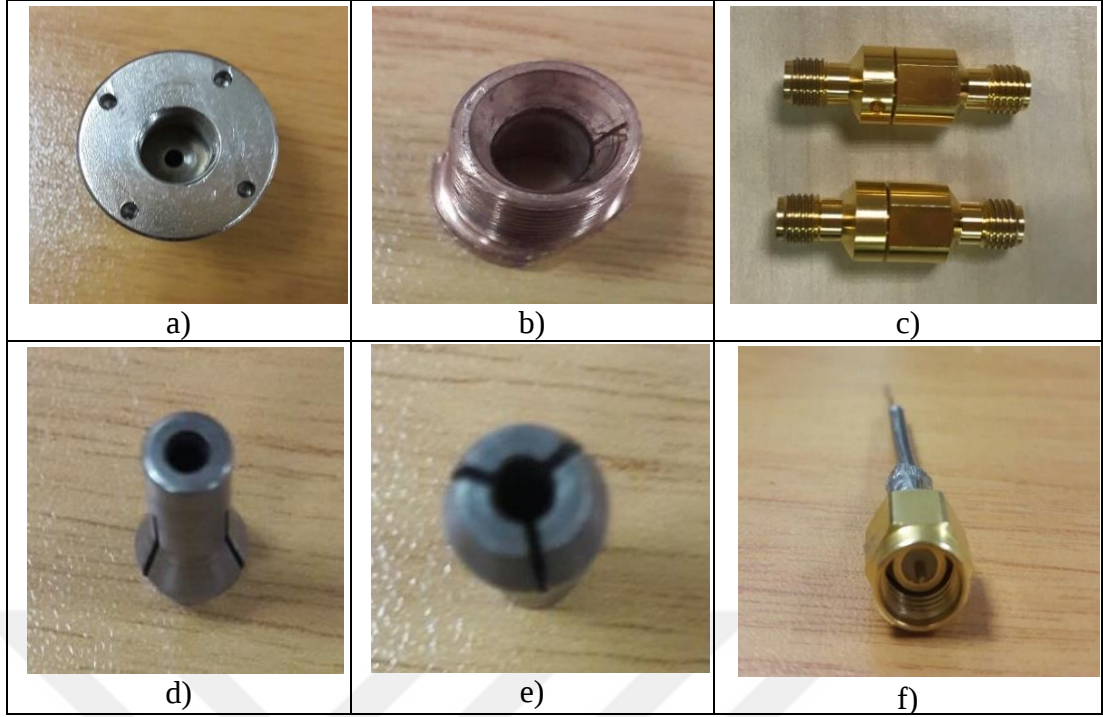
Bu çalışmada kullanılan küresel kavitede deliklerin açılal konumları, kutupsal ve azimut açıları (θ, φ) küresel koordinatlarda belirtilmektedir. Kavitenin üst yarım küresindeki bağlantı noktasının konumları $(\theta, \varphi) = \left(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right)$ ve $\left(\frac{3\pi}{4}, \frac{-\pi}{4}\right)$ olacak şekilde 3.8’de silindirik bağlantı noktalarına yerleştirilmektedir. Antenlerin konumu için ilgili radyal modların ve bitişik radyal olmayan elektromanyetik modların spektral örtüşmesini en aza indirmek için tasarlanmaktadır. TM ve TE mikrodalga modları,

koaksiyel kabloların merkez iletkenlerinin uzantıları olan antenler tarafından uyarıldı ve algılandı. Oda sıcaklığındaki bu ölçümler sırasında, mikrodalga sinyallerinin zayıflamasını en aza indirmek için VNA cihazını kaviteye koaksiyel kablolar ile bağlanmaktadır. İki küçük eş eksenli anten, merkezi iletkenleri kavitenin iç yüzeyi ile aynı hizada olacak şekilde yarı küreye monte edilmektedir [27]. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi, her iki düz anten üst yarım kürede konumlandırılmıştır.



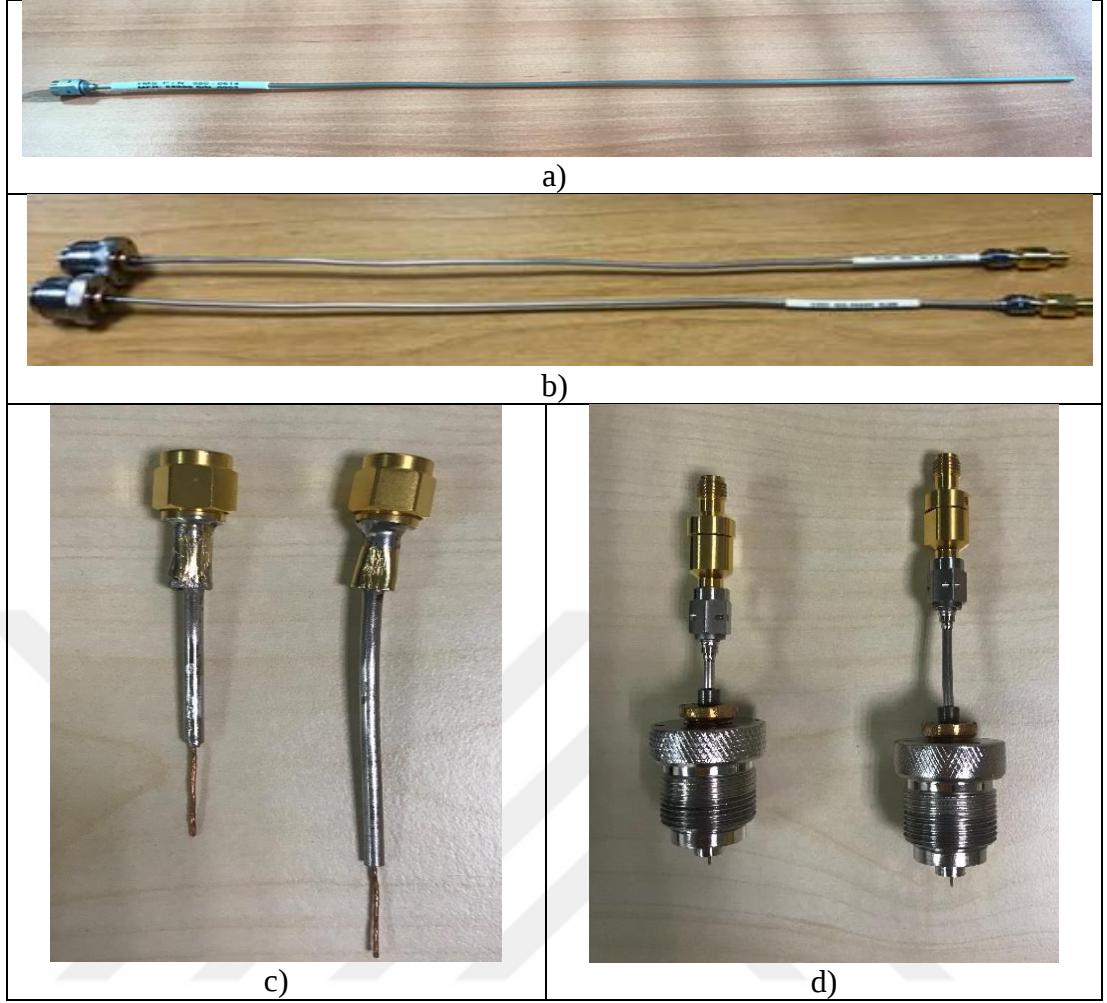
Şekil 3.8: Antenlerin üst yarım kürede 45° açı ile konumlandırılmış hali.

Mikrodalga kavitelerinde yaygın olarak iki tip anten kullanılır: Düz ve döngü antenler. Döngü antenlerinin aksine, düz antenler yalnızca TM modlarının gözlenmesine izin verir. Düz bir antenin neden olduğu pertürbasyon iyi karakterize edilmiştir ve düz antenlerin imal edilmesi de daha kolaydır. Çalışmamızda farklı uzunluklarda düz antenler tasarladık. Koaksiyel kablunun diğer ucu bir SMA konektörüne kaynaklanmıştır. Koaksiyel kablolar Şekil 3.8’de gösterildiği gibi, üst uç levhanın dış yüzeyine kapatılmış SMA konektörü ile 2.2 mm çapındaki deliklerin içine sıkı bir şekilde geçirilmiştir [28]. Şekil 3.9’da mikrodalga deney düzeneğinde kullanılan anten bileşenlerine ait görseller verilmektedir.



Şekil 3.9: a) Antenin yerleştirildiği tutucu (holder), b), c) ve d) Anteni tutucuya sabitlemek için kullanılan bileşenler, e) SMA konektör, f) SMA konektörün antene lehimlenmiş görüntüsü.

Mevcut mikrodalga ölçümleri için, bir VNA cihazının iki bağlantı noktası, esnek mikrodalga kabloları ve 50Ω uyumlu empedans SMA konektörleri kullanılarak farklı uzunluklarda yarı sert kablodan yapılmış düz antenler ile ölçümler gerçekleştirilmektedir [29]. Düz antenler ile TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} mikrodalga üçlülerinin her birini kapsayan 201 noktadan oluşan frekans taramalarını kullanarak karmaşık voltaj saçılım parametresi S_{12} 'yi ölçmektedir. 0-20 GHz frekans aralığındaki TM modlarının çoğu, komşu modlardan çakışma nedeniyle üç mod dışında ölçüm gerçekleştirilmemektedir. Ölçümlerde iki mikrodalga anteninin her bir mikrodalga üçlüsünün üç bileşenini de yaklaşık olarak eşit genliklerde uyarmadığı gözlenmektedir. Düz anten ile TE modları gözlenmemiştir. TE modları gözlemlemek için genellikle döngü antenler tercih edilmiştir. Çünkü döngü antenler tarafından üretilen sinyaller düz antenler tarafından üretilen sinyallerden 20 kat daha güçlüdür fakat TM modlarından elde edilen sonuçların kavitenin hacmi hakkında yeterince bilgi verebilmektedir [14], [18]. TE modlarını gözlemlemek için döngü anten tasarımı gerçekleştirdik fakat teorik bilgi eksikliğinden TE mod ölçümü gerçekleştirilmemiştir. Şekil 3.10'da el yapımı mikrodalga anten tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 3.10: a) Yarı-sert koaksiyel kablo, b) Mikrodalga uzun anten tasarımı, c) Farklı uzunlukta mikrodalga anten tasarımları, d) Deneyde kullanılan küçük mikrodalga anten tasarımları.

3.2.7. CMM Cihazı ve Özellikleri

İki yarım kürenin şekli ve boyutları, TÜBİTAK-UME Boyutsal Laboratuvarı ekibi tarafından gerçekleştirilen Calypso 5.8.16 çalıştıran bir Zeiss Prismo MP5 isimli üç boyutlu koordinat ölçüm makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CMM ile boyutsal metroloji, doğrudan veya tasarlanan kavitenin özelliklerinin uyuşup uyuşmadığını kontrol etmek için spektrumlarının ölçümleriyle birlikte kavitenin hacmini belirlemek için kullanılmaktadır [13]. Cihaz, CNC programı kullanmaktadır. Şekil 3.11’de CMM cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.11: CMM Cihazı

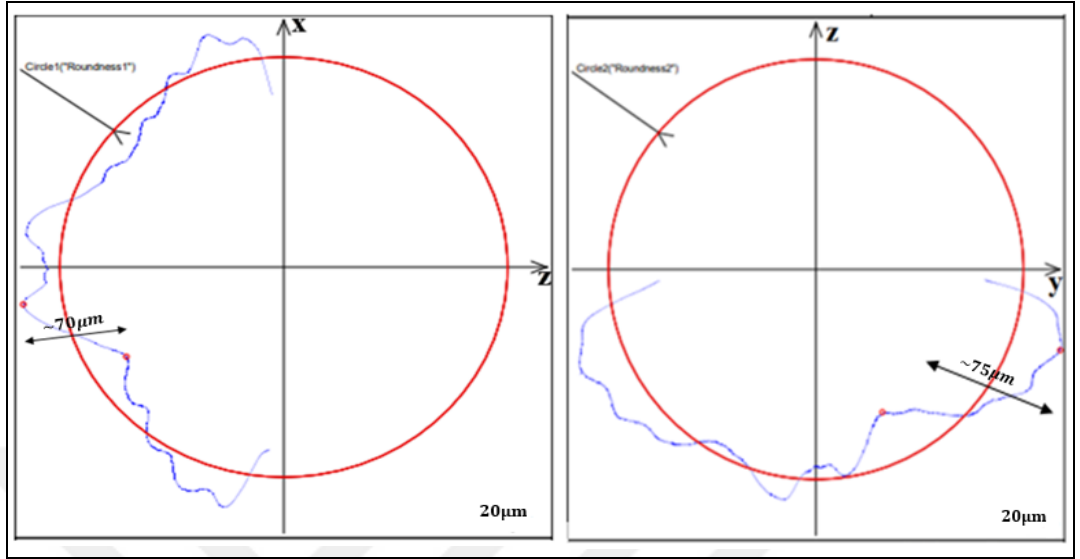
Boyutsal ölçümlere başlamadan önce, yarım küreler laboratuvarda oda sıcaklığında bir gün termal dengeye getirilmektedir. Her bir yarım küre CMM'nin probunun iç yüzeyine erişebilmesi için CMM gövdesine monte edilmiştir. Ölçümü gerçekleştirilen yarım küre çalışma tezgahına çelik vidalarla sıkıca sabitlenmiştir [3]. Her yarım küre için tipik bir CMM ölçüm sırası üç adımdan oluşmaktadır:

i.) Koordinat sisteminin orijini, ekvator bağlantı yerinin iç yüzeyinde farklı açısall yönlerde koordinat ölçümleri alındı ve iki hizalama deliğinin silindirik yüzeyinin eksenleriyle kesişmesi incelenerek belirlendi.

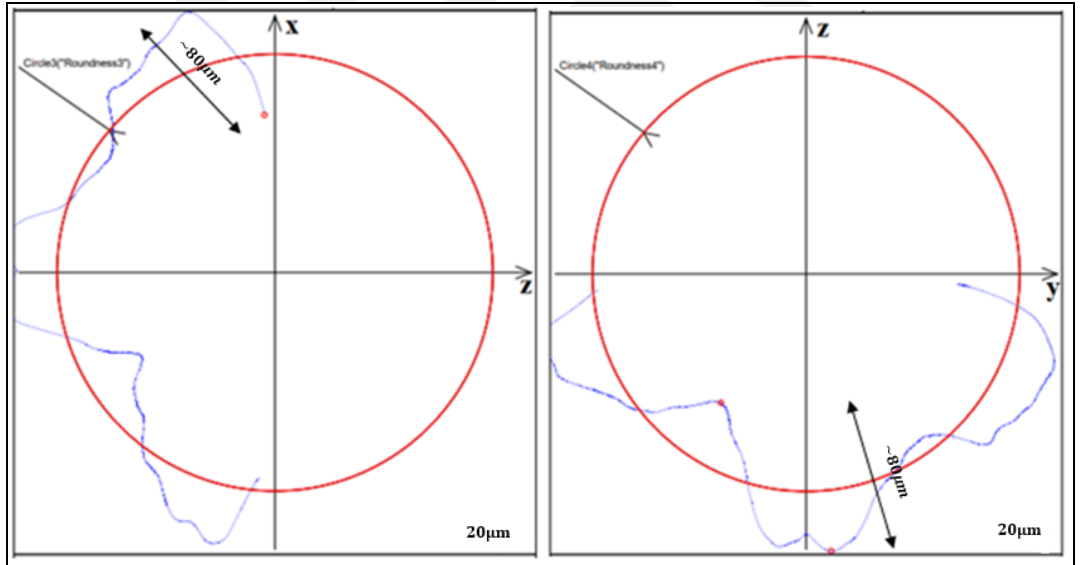
ii.) Ekvator bağlantı yerinin dış silindirik yüzeyi incelendi.

iii.) Kürenin iç yüzeyi, kutupsal koordinatlar boyunca yaklaşık olarak 0.05 mm aralıklarla yerleştirilmiş 15488 CMM veri noktası kaydedilerek incelenmiştir. Böylece, kavitenin iç yüzeyinin küreselliği ve boyutlarının test edilmesinin yanı sıra, kaydedilen veriler silindirik ekvator bağlantı yerlerinin iç küresel yüzey ile eş merkezliliğini tahmin etmiş ve ekvator bağlantı yerlerinin düzlüğünü test etmiştir [29].

Şekil 3.12 ve Şekil 13'te üst ve alt yarım kürelerin iç yüzey yuvarlaklık ölçümleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Üst yarım küre için şekil analiz sonuçları.



Şekil 3.13: Alt yarım küre için şekil analiz sonuçları.

İzin verilen maksimum hata (MPE) değeri $(0.9+L/300)$ μm ile ölçüldü. Burada L, milimetre cinsinden iki ölçüm koordinatı arasındaki mesafe. Bu ölçüm, tozun ölçüm üzerindeki etkisini azaltan ve büyük ve yoğun bir veri seti (iç yüzeye dağılmış ≈ 15488 nokta) üreten nispeten yüksek kuvvette sürekli temas (tarama) modunda yapılmıştır [17].

Ölçüm dizisi her yarım küre için bir kez tekrarlandı. CMM cihazının üreticisi tarafından sağlanan yazılımın yardımıyla verilerin bir ön analizi elde edilmiştir. Şekil 3.12’de üst ve Şekil 13’te alt yarım küre için şekil analizi sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlar, her iki yarım kürenin iç yüzeyinin, yaklaşık 75µm’lik küresel yüzeyden önemli ölçüde saptığını göstermiştir. CMM verilerinden elde edilen kürenin toplam eşdeğer yarıçap $a_{CMM} = (60.0972 \pm 0.075)$ mm. Alt ve üst yarım kürelerin ayrı veri setlerinden elde edilen $a_{ÜST} = (60.0659 \pm 0.073)$ mm ve $a_{ALT} = (60.1284 \pm 0.076)$ mm olarak bulunmuştur.

3.3. Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirmesi

Küresel bir kavitenin mikrodalga rezonansları teorisinden, elektromanyetik alanın normal modları, manyetik olmayan duvarları mükemmel bir şekilde ileterek sınırlanmış küresel yarıçapı a kavite içinde iki sınıfa ayrılır: (TM) elektrik ve (TE) manyetik modları verilen frekanslara sahiptir [24] ve iki durum içinde frekans hesaplamaları Denklem (3.1)’de verilen ifade ile yapılmaktadır.

(3.1)

$$f_{ln} = \frac{z_{ln}c}{2\pi a}$$

f_{ln} , küresel bir kavitenin (l,n) moduna karşılık gelen frekans, z_{ln} , elektromanyetik rezonansın (l,n) moduna karşılık gelen sayısal bir katsayıdır, a , kürenin yarıçapı ve c , ışık hızıdır.

Tablo 3.1: TE modların teorik sonuçları.

$J_{m+\frac{1}{2}}(x_n) = 0$ TE _{m,n} Modları							
$\begin{matrix} n \\ m \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7
1	4.4934	7.7253	10.9041	14.0662	17.2208	20.3713	23.5195
2	5.7635	9.0950	12.3229	15.5146	18.6890	21.8539	
3	6.9879	10.4171	13.6980	16.9236	20.1218	23.3042	
4	8.1826	11.7049	15.0397	18.3013	21.5254	24.7276	
5	9.3558	12.9665	16.3547	19.6532	22.9046		
6	10.5128	14.2074	17.6480	20.9835	24.2628		
7	11.6570	15.4313	18.9230	22.2953			
8	12.7908	16.6410	20.1825	23.5913			
9	13.9158	14.8386	21.4285	24.8732			
10	15.0335	19.0259	22.6627				
11	16.1447	20.2039	23.8865				
12	17.2505	21.3740					
13	18.3513	22.5368					
14	19.4477	23.6932					
15	20.5402	24.8438					
16	21.6292						
17	22.7150						
18	23.7978						
19	24.8780						

Tablo 3.2: TM modların teorik sonuçları.

$\frac{d}{dx} \left[\sqrt{x} J_{m+\frac{1}{2}}(x) \right] = 0 \quad \text{TM}_{m,n} \text{ Modları}$							
$\begin{matrix} n \\ m \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7
1	2.7437	6.1168	9.3166	12.4859	15.6439	18.7963	21.9455
2	3.8202	7.4431	10.7130	13.9205	17.1027	20.2720	
3	4.9734	8.7218	12.0636	15.3136	18.5242	21.7139	
4	6.0620	9.9675	13.3801	16.6742	19.9154		
5	7.1402	11.1890	14.6701	18.0085	21.2815		
6	8.2109	12.3915	15.9387	19.3212			
7	9.2755	13.5787	17.1896	20.6154			
8	10.3353	14.7534	18.4255	21.8939			
9	11.3910	15.9174	19.6485				
10	12.4434	17.0723	20.8603				
11	13.4929	18.2193					
12	14.5398	19.3593					
13	15.5845	20.4932					
14	16.6272	21.6216					
15	17.6682						
16	18.7076						
17	19.7455						
18	20.7821						
19	21.8175						

60 mm'lik yarıçapa sahip paslanmaz çelik kavite için beklenen rezonanslar Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'deki gibi olmalıdır [11]. Beklenen rezonanslar ve ölçtüğümüz rezonans frekansları arasında fark vardır. Bu farklar, küresel kavitenin hizalanma ayarından ve anten tasarımından kaynaklı olduğu düşünülmüştür.

Denklem (3.1)'den TM ve TE modların hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplanan sonuçlar, deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

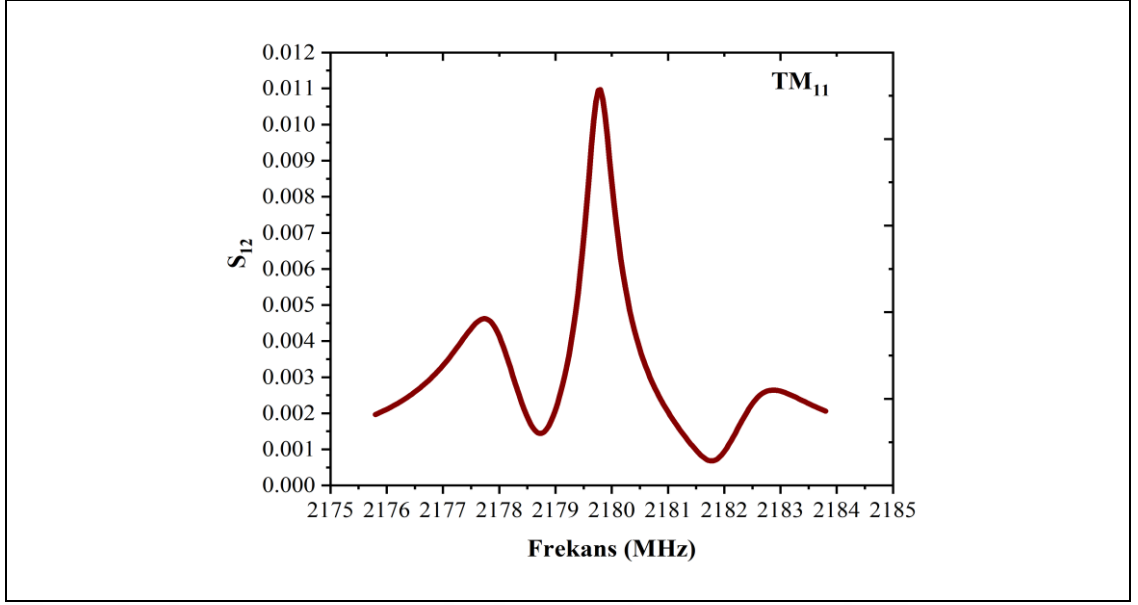
Tablo 3.3: 316 L paslanmaz çelik kavitenin elektromanyetik modların deneysel ölçüm sonuçları ile teorik sonuçların karşılaştırılması.

Modlar	Rezonans Frekans, MHz	
TM ₁₁	2179.5	2180,423
TM ₁₂	4858.8	4862,184
TM ₁₃	7400.8	7408,663

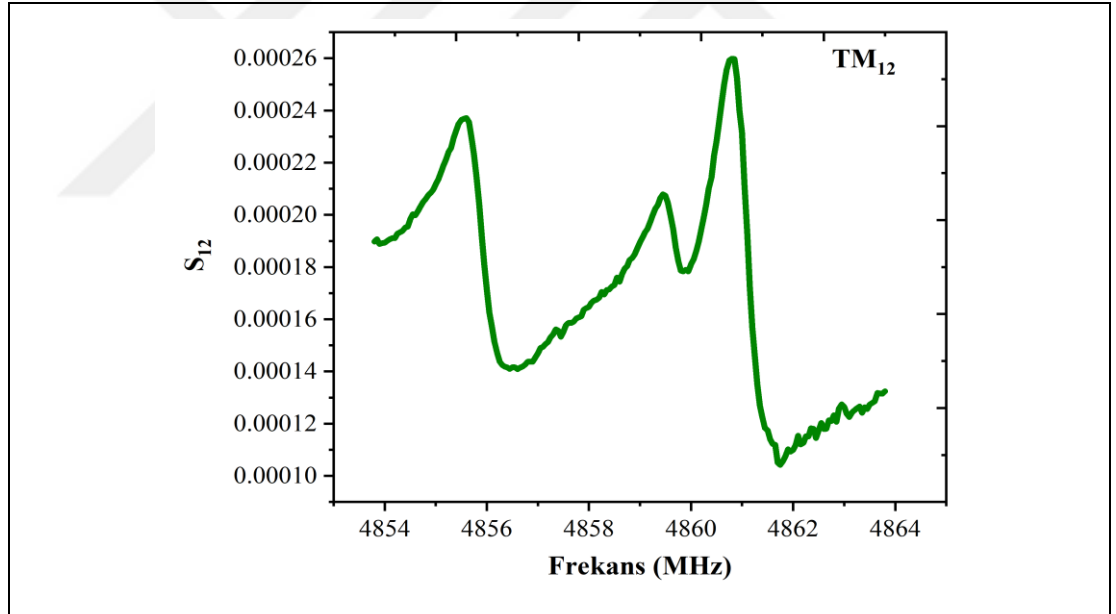
VNA ile hem 316 L paslanmaz çelikten hem de bakırdan üretilmiş olan küresel kavitelerde TM₁₁, TM₁₂ ve TM₁₃ mikrodalga rezoans üçlülerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Paslanmaz çelik kavite ölçümlerinde her birini kapsayan 201 noktadan oluşan frekans taramalarını kullanarak S_{12} 'yi ölçmüştür. Oda sıcaklığında ölçümleri gerçekleştirilen kaviteye iki küçük eş eksenli düz anten merkezi iletkenleri kavitenin iç yüzeyinden içeriye doğru birkaç milimetrelik canlı ucu içeride olacak şekilde yarı küreye monte edilmiştir. Şekil 3.14 – Şekil 3.16 aralığında verilen 316 L paslanmaz çelik kavitede gerçekleştirilen ölçüm grafikleri verilmiştir. Şekil 3.17 – Şekil 3.19 aralığında ise bakır kavitede gerçekleştirilen ölçüm grafikleri verilmiştir. Paslanmaz çelik kavite çapının hesaplanmasına ait Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4: Paslanmaz çelik kavite çapının elektromanyetik rezonanslarının hesaplanması.

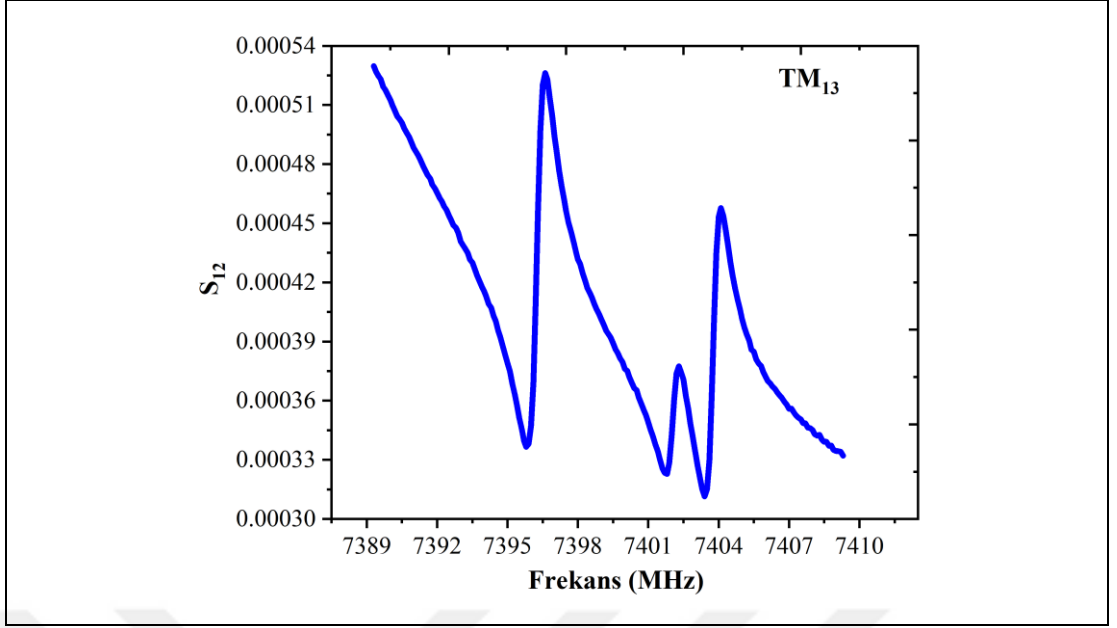
Modlar	1.Rezonans (MHz)	2.Rezonans (MHz)	3.Rezonans (MHz)	Ortalama (MHz)	Kavite Yarıçapı (mm)
TM ₁₁	2177,50	2180,00	2182,80	2180,10	60,090
TM ₁₂	4855,50	4859,20	4860,80	4858,50	60,112
TM ₁₃	7398,00	7402,50	7405,50	7402,00	60,097
				Ortalama	60,100



Şekil 3.14: 316 L paslanmaz çelik kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{11} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.



Şekil 3.15: 316 L paslanmaz çelik kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{12} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.

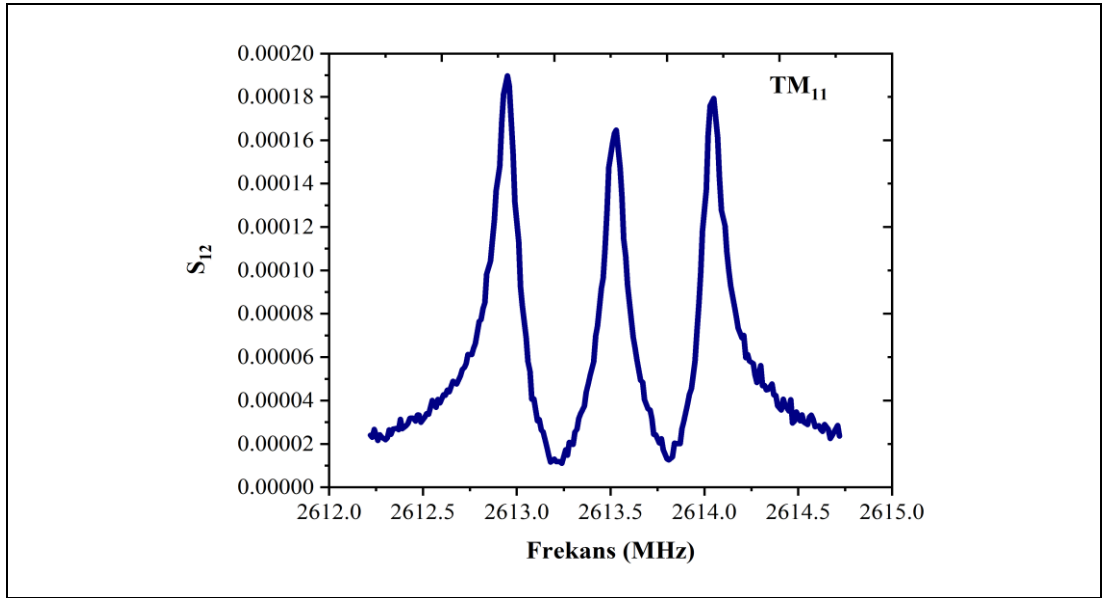


Şekil 3.16: 316 L paslanmaz çelik kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{13} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri

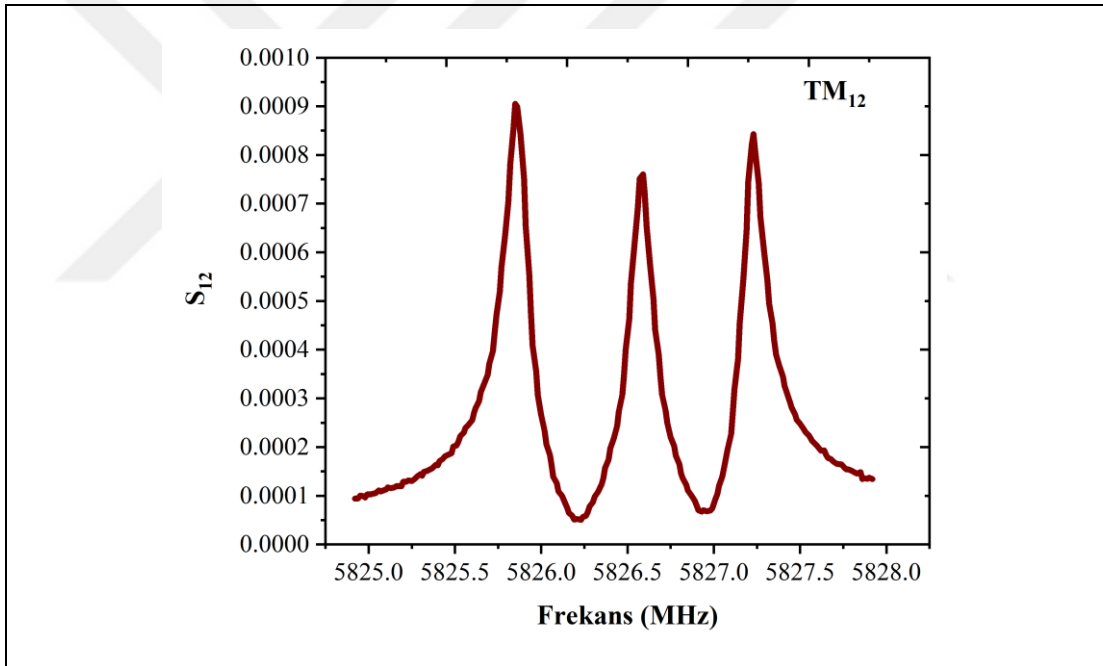
Şekil 3.14'te TM_{11} modunun frekansı bulunmuştur. TM_{11x} , TM_{11y} ve TM_{11z} modlarının genlikleri sırasıyla yaklaşık olarak 2177.5 MHz, 2180 MHz ve 2182.8 MHz olarak bulunmuştur. Burada TM_{11x} , TM_{11} 'in x eksenine göre simetrik bileşenini ifade etmektedir. TM_{11} , iyi çözömlenmiş bir triplettir ve net bir şekilde rezonanslar bellidir zaten iyi çözömlenmiş bir rezonans beklenmektedir.

Şekil 3.15'te TM_{12} modunun frekansı bulunmuştur. TM_{12x} , TM_{12y} ve TM_{12z} modlarının genlikleri sırasıyla yaklaşık olarak 4855.5 MHz, 4859.2 MHz ve 4860.8 MHz olarak bulunmuştur. TM_{12} , iyi çözönmemiş bir triplettir. Beklenen pikin iyice aşağıya doğru dip yapması beklenmektedir. TM_{12} , TM_{11} moduna göre iyi çözönmemiştir. Bununla ilgili geliştirmeler yapılmalıdır.

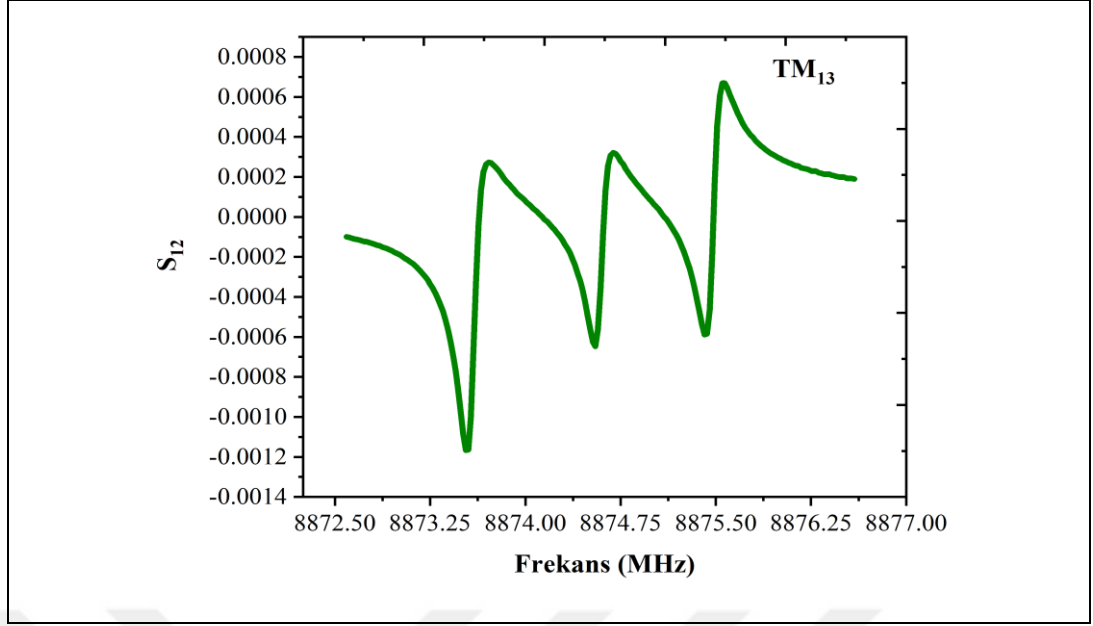
Şekil 3.16'da ise, TM_{13x} , TM_{13y} ve TM_{13z} modlarının genlikleri sırasıyla yaklaşık olarak 7398 MHz, 7402.5 MHz ve 7405.5 MHz olarak bulunmuştur. TM_{13} modu da net bir şekilde iyi çözönmeyeceği görölmektedir. 316 L paslanmaz çelikten üretilen kavite sıradan sanayide imal edilmiş bir rezonatördür. Dolayısıyla geliştirilmesi şarttır.



Şekil 3.17: Bakır kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{11} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.



Şekil 3.18: Bakır kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{12} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.



Şekil 3.19: Bakır kavitede ölçümü gerçekleştirilen TM_{13} mikrodalga üçlüsünün tarama verileri.

Bakır kavitede gözlenmiş Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da ki modların pikleri net bir şekilde triplet olduğu belli olmaktadır. Bakır kavite daha profesyonel imal edilmiştir. Rezonanslar net bir şekilde çözümlenmiştir.

Küresel kaviteler sınırlı elektrik iletkenliğine sahip bakır, çelik, alüminyum gibi metallerden üretilmektedir. Elektriksel iletkenliğinin bir sonucu olarak, kavitenin iç yüzeyindeki elektromanyetik alanların metalin içine kısa bir mesafede girerek öz frekanslarda kaymaya veya dirençli kayıplar ile rezonansların genişlemesine sebep olmaktadır [17].

(3.2)

$$\delta = (\pi\mu_r\mu_0\sigma_{cond})^{-1/2}$$

Denklem (3.2), nüfuz derinliği (skin depth) adı verilmektedir. μ_r , kavitenin iç yüzeyinin bağıl manyetik geçirgenliği, σ_{cond} , kavitenin iç yüzeyinin elektriksel iletkenliği ve μ_0 , $4\pi \times 10^{-7}$ 'dir [17], [18], [24], [30]. Kısaca deri kalınlığından bahsedilirse, elektromanyetik dalga iletken ortamda deri kalınlığının Denklem (3.2)'den bulunan değeri ne kadar ilerlendiğinde artık dalganın bir anlamı olmayacağını ifade etmektedir. Eğer dalga çok kısa mesafe ise neredeyse hiç ilerlemez. Bunun nedeni ise, iletken ortamın öz iletkenliğinden ve frekans değerinden kaynaklanmaktadır. Eğer dalga iletken ortamda daha ileri gidilsin isteniyorsa frekansın artırılması gerekmektedir.

Q faktörü olarak da bilinen kalite faktörü bir rezonans sisteminin rezonans frekansına göre bant genişliğini tanımlayan boyutsuz bir parametredir. Rezonansın ne kadar keskin ve dar olması o rezonansın iyi tanımlanmış bir rezonans sistemine sahip olmasını gösterirken, düşük ve geniş bir Q faktörüne sahip olması ise o rezonansın kötü tanımlanmış bir rezonans sistemine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Bir rezonans sisteminde enerji depolamanın verimliliğini göstermektedir. Yüksek kalite faktörüne sahip bir sistemde salınım döngüsü başına daha fazla enerji depolamaktadır ve daha az enerji kaybı olurken, düşük kalite faktörüne sahip bir sistemde ise salınım döngüsü başına daha az enerji depolamaktadır ve daha fazla enerji kaybetmektedir [31], [32].

Mikrodalga modlarının Q faktörü Denklem (3.3)'te verilmektedir.

$$Q = \frac{f_{ln}}{2g_{ln}} \quad (3.3)$$

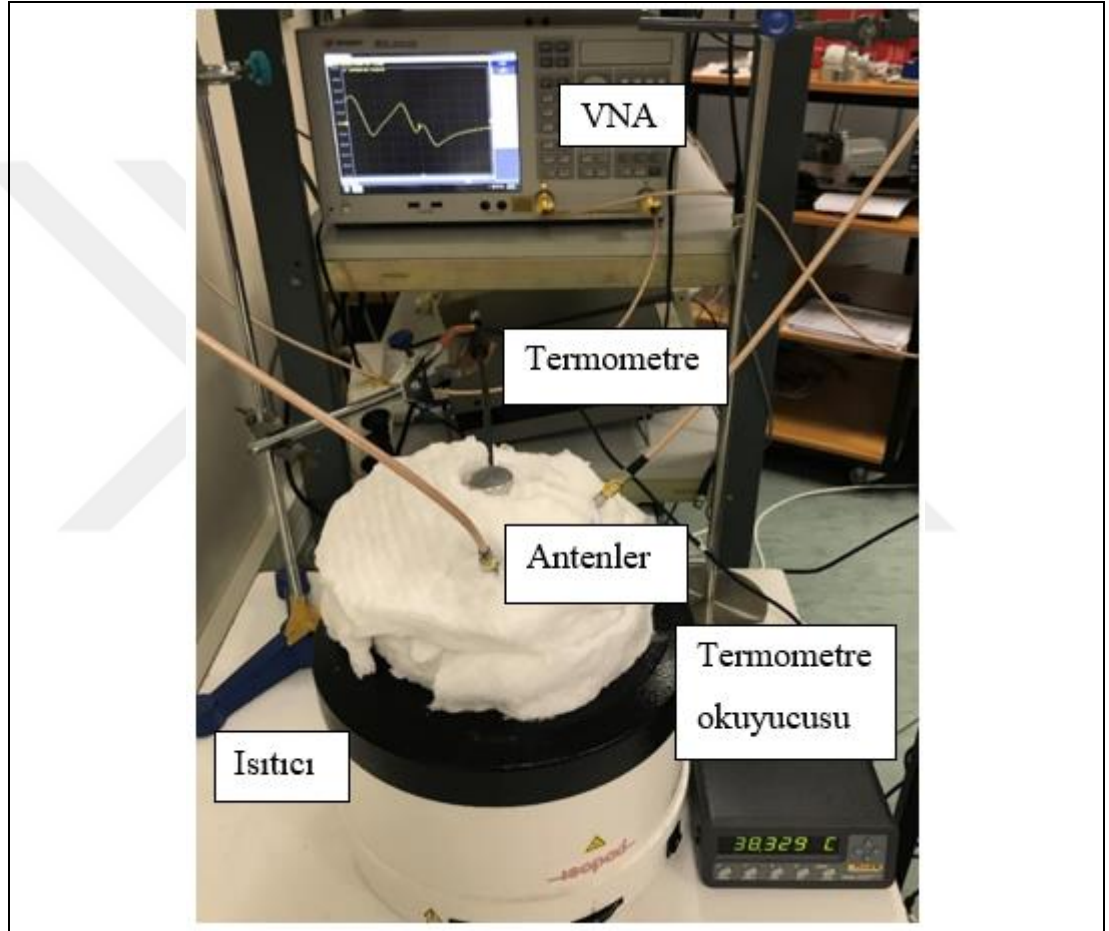
f_{ln} , maksimum değere ulaştığı rezonans frekansıdır. g_{ln} ise pikin yarı yüksekliğindeki genişliğidir. 60 mm yarıçapa sahip küresel kavitelerin oda sıcaklığında TM_{1n} modlarının f frekansları, g yarı genişlikleri, nüfuz derinliği ve kalite faktörleri Tablo 3.5'te listelenmektedir. Bakır ve paslanmaz çelik kavitelerin 20°C'de ki öz direnci nüfuz derinliği ve Q faktörünü hesaplamak için kullanılmıştır.

Tablo 3.5: Bakır ve paslanmaz çelik kavitelerin nüfuz derinliği ve Q faktör değerleri.

		Bakır				Paslanmaz Çelik			
Modlar	Özdeğerler (z_{ln})	f/MHz	g /MHz	δ_s / μm	Q	f/MHz	g /MHz	δ_s / μm	Q
TM_{11}	2183,36	2613,50	0.05	1.28	26506.11	2179,46	0.62	9.25	1748.89
TM_{12}	4867,59	5826,55	0.06	0.85	50807.02	4858,78	0.34	6.20	7231.38
TM_{13}	7413,91	8874,55	0.07	0.69	62373.84	7400,76	2.17	5.02	1702.44

3.4. Mikrodalga Rezonans Frekans & Sıcaklık Deney Düzeneği

Sıcaklıktaki değişimi gözlemleyerek küresel kavitenin yarıçapındaki değişimi hesaplamak için kurulan düzeneğdir. Bu deney düzeneğinde 23.1°C ile 117.67°C sıcaklık aralığında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Isıtıcının ortamın sıcaklığından etkilenmemesi için cam yünler kullanılarak dış ortamdan izole edilmiştir. Şekil 3.20’de mikrodalga-sıcaklık deney düzeneği verilmektedir.

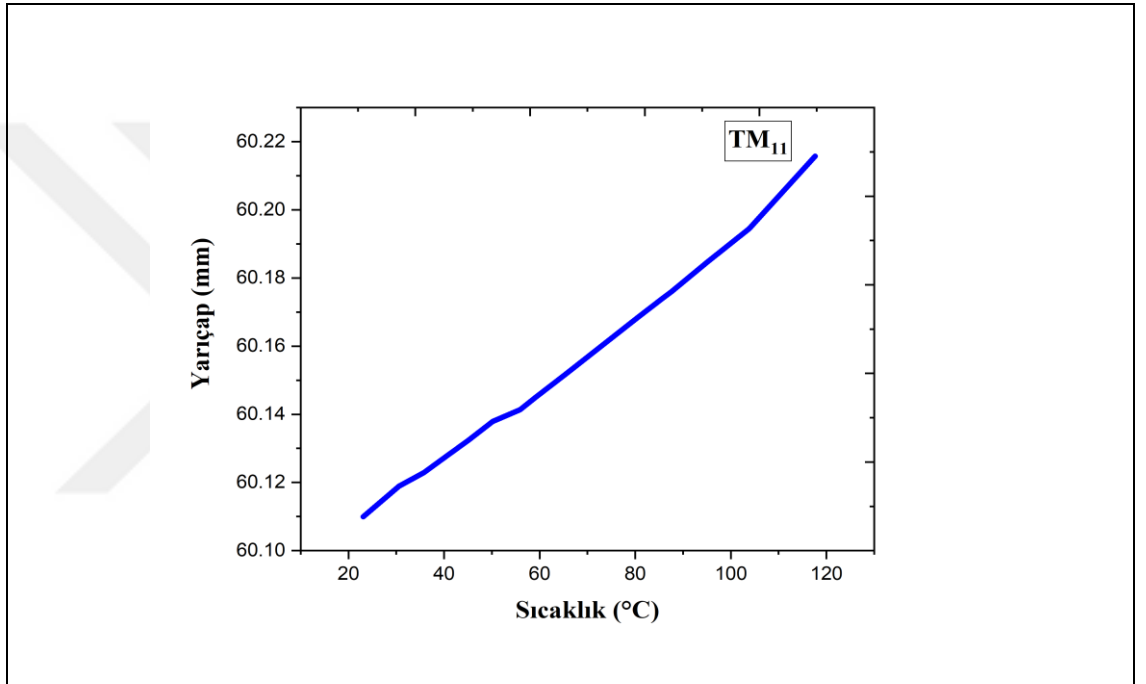


Şekil 3.20: Mikrodalga sıcaklık deney düzeneği.

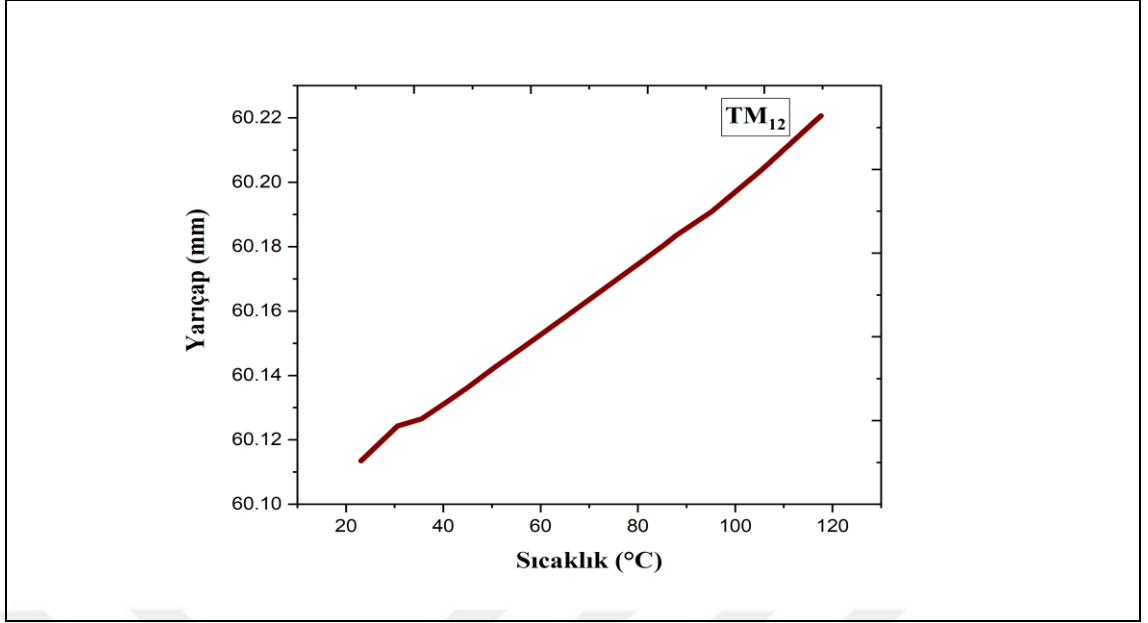
Sıcaklık ölçümlerinde TM_{11} ve TM_{12} modların ölçümü gerçekleştirilmiştir fakat TM_{13} modu gözlenmemiştir. Çünkü sıcaklık ölçümlerine başlamadan önce kavitenin hizalanma ayarı yapılırken üç rezonans frekansı aynı anda gözlemlenmemiştir. Sıcaklık ölçümleri sırasında kavitenin sıcaklığı düşünöldüğünde her bir mod için ayrı ayrı hizalanma ayarı yapılamaz. Dolayısıyla ölçüme başlamadan önce öyle bir ayarlama yapılmalı ki sıcaklık arttıkça üçlü dejenere modlar bozulmasın. On iki

vidanın bir kısmı sıkılırken bir kısmı gevşek bırakılarak bir hizalanma ayarı yapılmıştır. Bu ayar sonucunda iki mod gözlenmiş ve ölçümleri yapılmıştır. Mikrodalga rezonans frekansları ve yarıçap ilişkisini sıcaklıkla nasıl değiştiği Şekil 3.21 ve Şekil 3.22’de grafiklerde gösterilmektedir.

Sıcaklığa bağlı ölçümlerde yarıçap değerleri lineer olarak artmaktadır. Bu sebeple genleşmeye bağlı olarak 316 L paslanmaz çelikten yapılan kürenin içerisinde gözlemlenen TM_{11} ve TM_{12} modlarının değerlerinde giderek azaldıkça ve sıcaklık arttıkça yarıçap giderek genişterek artış gözlenmiştir.



Şekil 3.21: TM_{11} için sıcaklığın yarıçapa bağlı olarak değişimi.



Şekil 3.22: TM₁₂ için sıcaklığın yarıçapa bağlı olarak değişimi.

23.1°C, 40.83°C, 59.2°C, 80.57°C, 95.11°C ve 117.67°C bu beş farklı sıcaklık noktalarında ki deneysel ölçümlerin hacim değişimi gözlenmektedir ve bu değişimdeki hacim değerleri hesaplanmıştır.

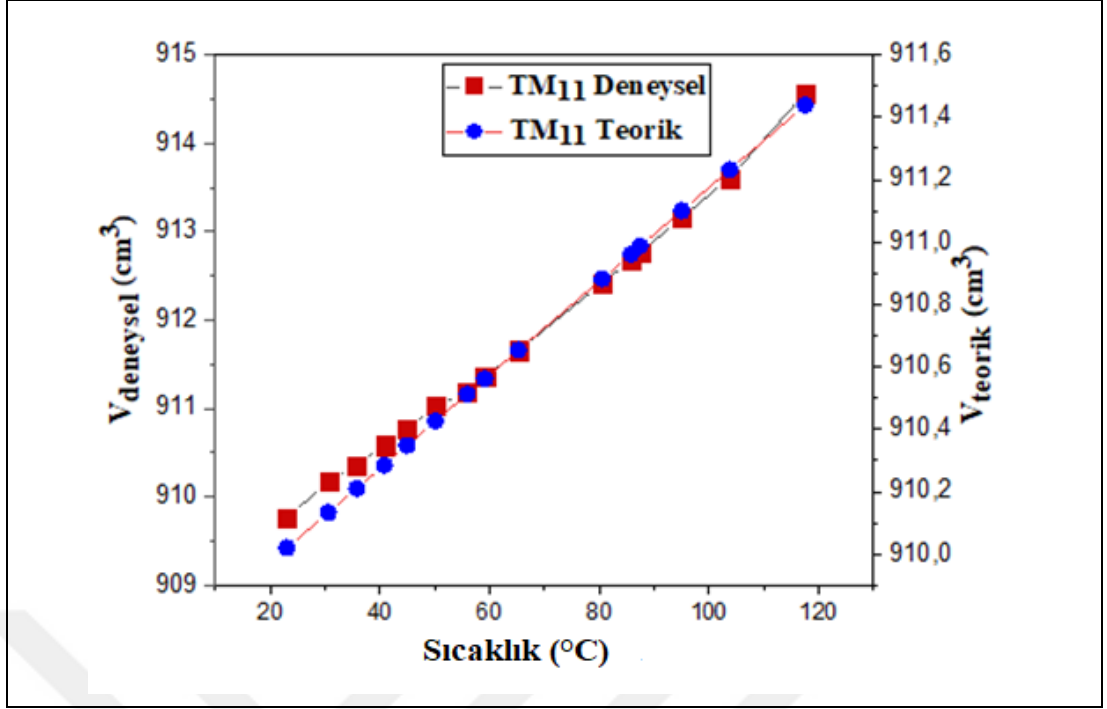
Paslanmaz çeliğin hacimce genleşme katsayısı, Tablo 3.5'teki sıcaklık noktalarındaki lineer genleşme katsayısını Denklem (3.4)'ten bulunmaktadır.

$$\Delta V = V - V_0 = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

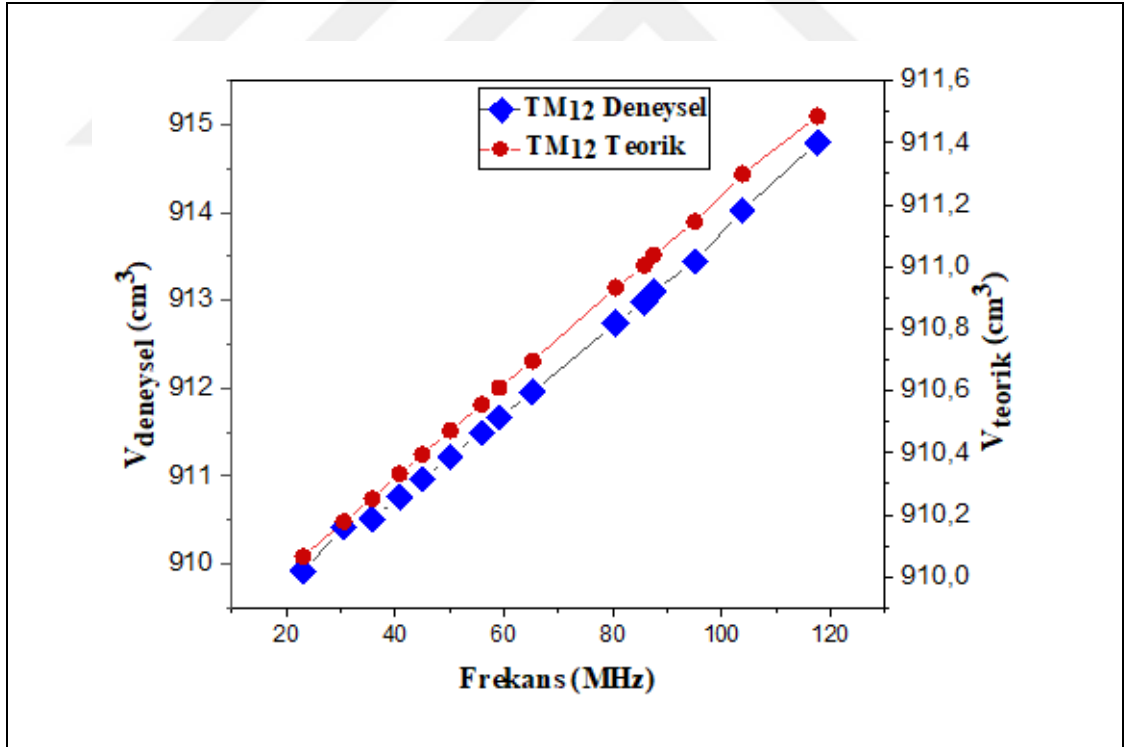
V_0 , paslanmaz çelik boşluğun ısıtılmadan önceki referans hacmi. V , paslanmaz çelik kaviteyi ısıttığımızda ölçülen hacmi. ΔV , hacimce genleşme miktarı. 3α , hacimce genleşme katsayısı. $\Delta T = T - T_{ref}$, sıcaklık farkıdır. Tablo 3.6'da sıcaklık değerlerine karşılık hesaplanan hacimce genleşme katsayıları verilmektedir. Rezonans frekanslarının deneysel ve teorik sonuçların termal genleşme sonuçları Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te grafikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.6: TM_{11} ve TM_{12} 'nin hacimce termal genleşme sonuçları.

Sıcaklık (°C)	TM_{11} için Hacimce Genleşme Miktarı (cm ³)	TM_{12} için Hacimce Genleşme Miktarı (cm ³)
23.1	910,0200109	910,0654309
30.61	910,132733	910,1781587
35.52	910,2106329	910,2518595
40.83	910,2861312	910,3315645
45.02	910,3490215	910,3944579
50.17	910,426321	910,4717613
55.76	910,5126263	910,5556692
59.38	910,5618578	910,6100067
65.09	910,6540168	910,6957158
80.87	910,8826131	910,9325793
85.61	910,9618639	911,0037284
87.84	910,9873802	911,0372015
95.08	911,1008528	911,1458765
105.26	911,2320368	911,2986819
117.67	911,4394696	911,4849605



Şekil 3.23: TM₁₁’in deneysel ve teorik sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 3.24: TM₁₂’nin deneysel ve teorik sonuçlarının karşılaştırılması.

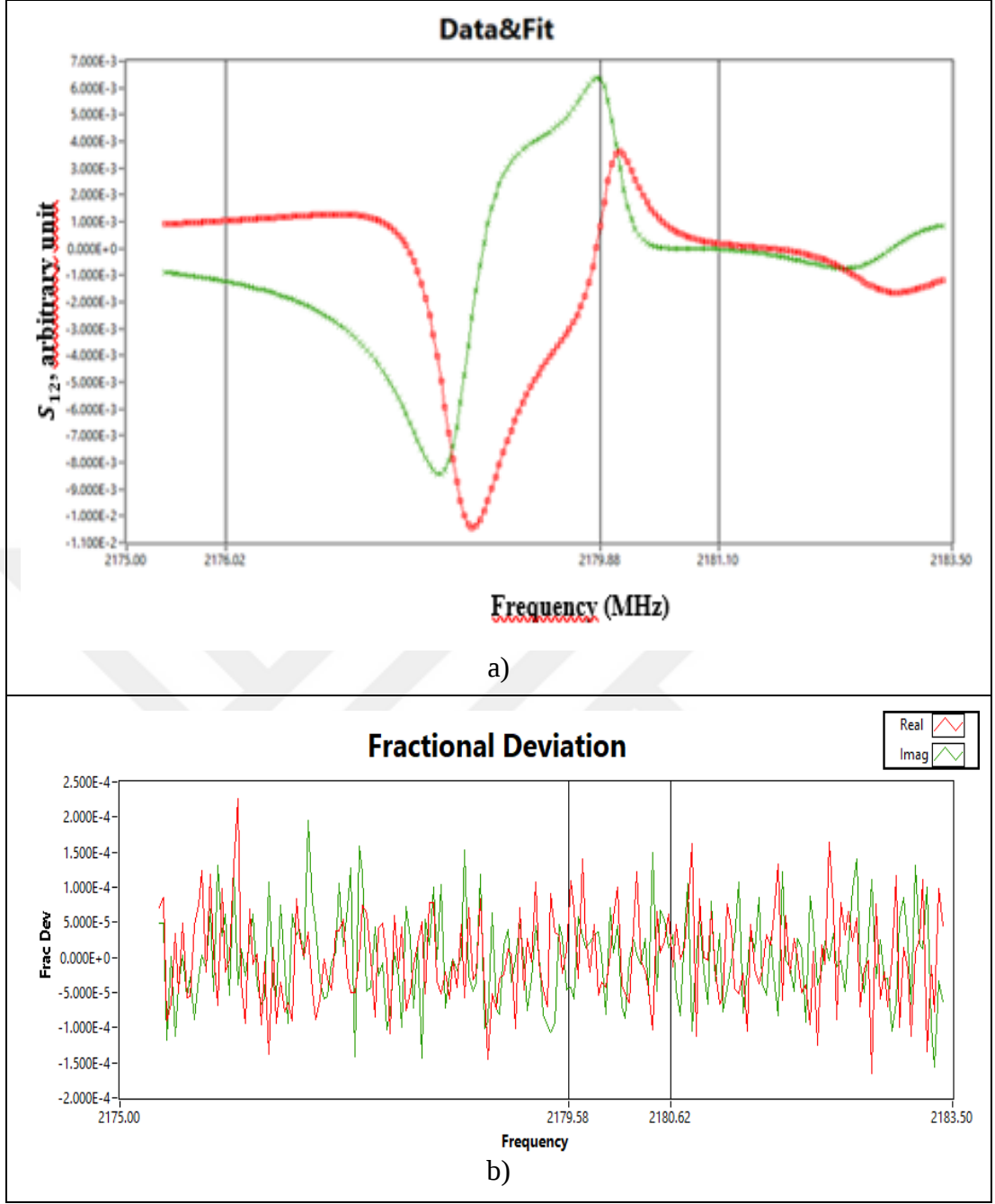
Teorik ve deneysel sonuçların termal genişmesinin sonuçları karşılaştırılmıştır. 60 mm çapında 316 L paslanmaz çelik kavitenin Denklem (3.4)’e göre grafikleri çizilmiştir. Yapmış olduğumuz mikrodalga ölçümlerle birebir termal genişme

katsayısı bulunmuştur. Genleşme katsayısı mikrodalga ölçümlerle net bir şekilde belirlenmiştir. Bir paslanmaz çelik rezonatörün genleşme katsayısını mikrodalga ile ölçülebilir hale getirilmiştir.

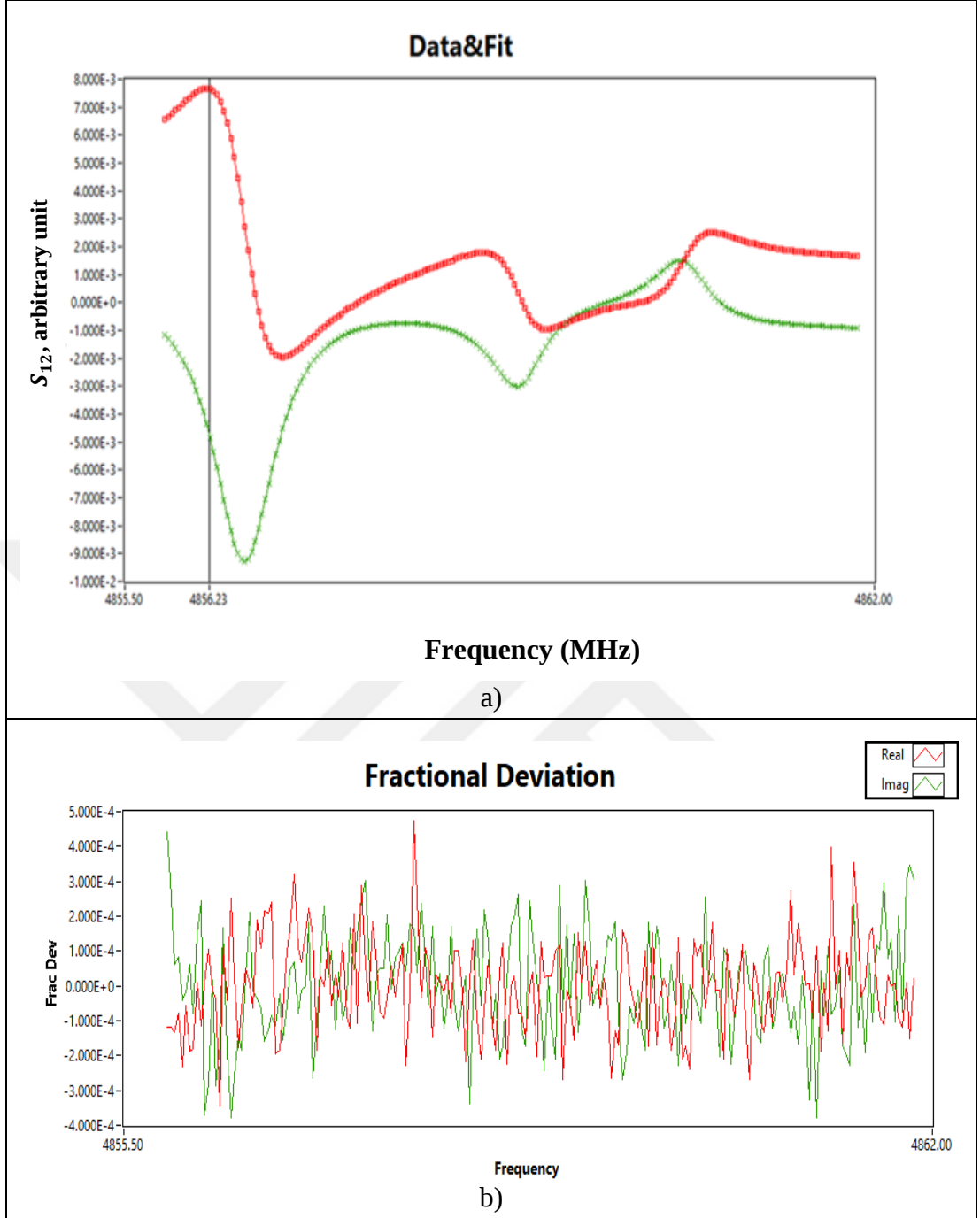
3.5. Frekans Verilerinin Alınması ve Verilere Eğri Uydurma (Fitting)

Mikrodalga rezonans ölçümlerinde vektör network analizör Labview programında yazılan yazılım kullanılarak GPIB Bus üzerinden haberleşmesi ve otomasyonu gerçekleştirilmiştir. Network analizör üzerinden ölçülen veriler bilgisayar tarafından toplanmıştır ve ölçülen veriler kullanılarak üçlü rezonansların belirlenebilmesi için fonksiyon uydurması (fitting) gerçekleştirilmiş ve üçlü rezonanslar hesaplanmıştır. Program üçlü rezonansların belirlenmesinde uydurmanın kalitesini anlayabilmek için ölçülen değerlerin uydurulan fonksiyondan sapmalarını (fractional deviations) hesaplamaktadır ve bu sapmalar belirlenen frekansların ve uydurulan eğri veya fonksiyonun kalitesini göstermektedir. Eğri uydurma işleminde Lorentzian Fonksiyonu kullanılmıştır ve least square fit yöntemi kullanılarak eğri uydurma gerçekleştirilmiştir.

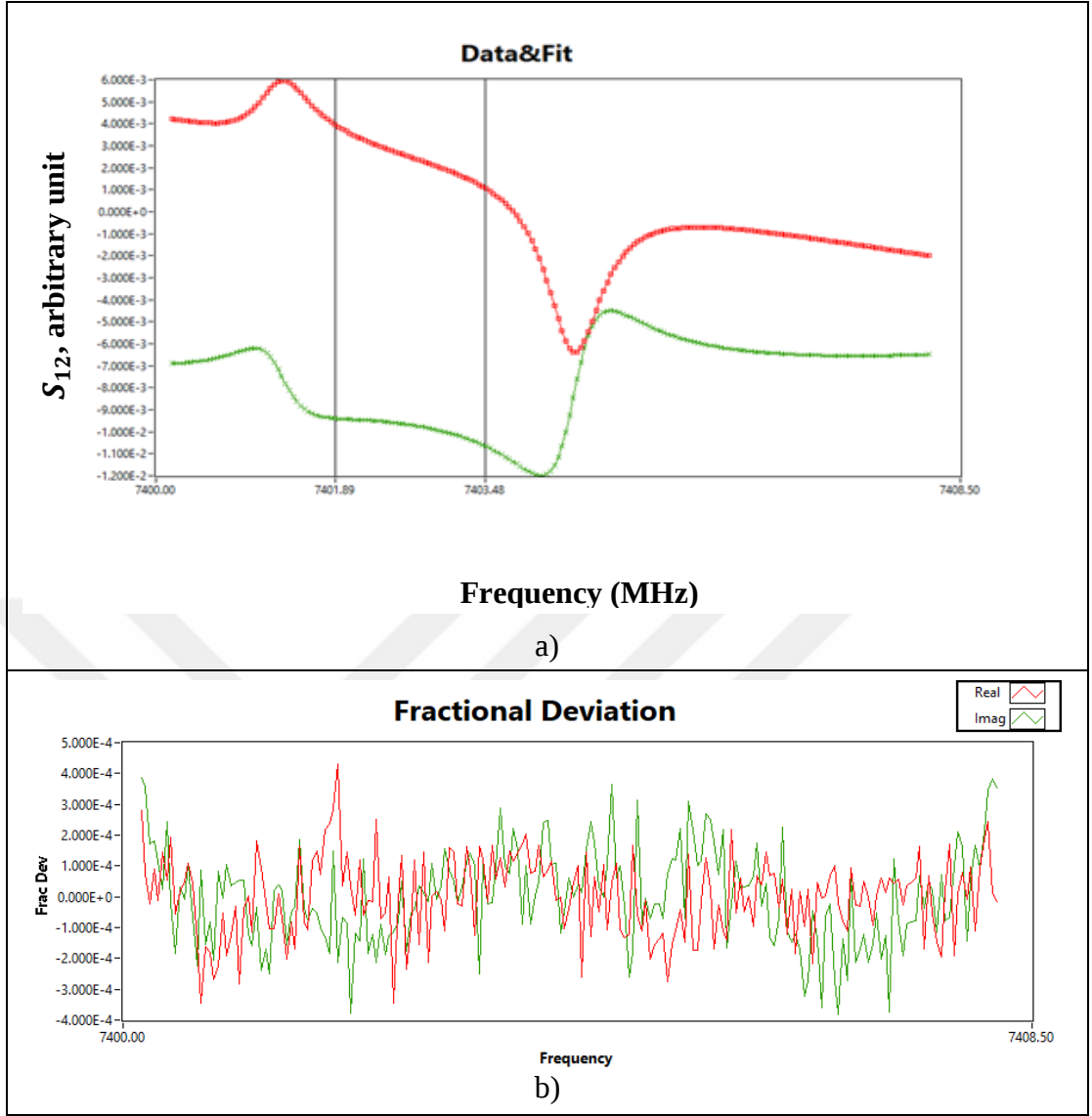
Her bir mikrodalga rezonans için vektör analizörden iletilen sinyalin gerçek ve hayali kısımları, analizörün IFBW 10 Hz değerine ayarlanarak, otomatikleştirilmiş bir arama algoritması tarafından yaklaşık olarak frekans üçlülerin ortalama frekansı etrafında merkezlenmiş 201 eşit aralıklı frekansta taranmıştır [29]. Mikrodalga rezonansların ölçü verileri Lorentzian fonksiyonuna göre Şekil 3.25, Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de ilgili grafikler verilmiştir.



Şekil 3.25: a) TM_{11} modunun fitlenmiş rezonans frekans verileri. b) Rezonans frekansların reel ve sanal kısımlarının grafiği.



Şekil 3.26: a) ÜST: TM_{12} modunun fitlenmiş rezonans frekans verileri. b) Rezonans frekansların reel ve sanal kısımlarının grafiği.



Şekil 3.27: a) TM_{13} modunun fitlenmiş rezonans frekans verileri. b) Rezonans frekansların reel ve sanal kısımlarının grafiği.

4. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Tez içerisinde teorik hesaplamalar sonucunda tanımlı küresel kavite içerisinde farklı modlarda TE ve TM elektromanyetik rezonansların olduğu ve rezonans frekansının küresel kavite çapı ile ilişkili olduğu hesaplanmıştır. Akustik Gaz Termometre kurulması amacıyla üretilen paslanmaz çelikten imal edilmiş küresel kavite içerisinde hesaplanan TE ve TM elektromanyetik rezonansların ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda sadece TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} rezonansları ölçülebilmektedir. TE modları kavitedeki ayarlama zorlukları nedeniyle ölçülememiştir. Ölçülen TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} elektromanyetik rezonanslar kullanılarak kavite yarıçapı üç farklı veri seti kullanılarak hesaplanmıştır. Elektromanyetik rezonans yöntemiyle belirlenen kavite yarıçapı ayrıca boyutsal ölçümleri ile desteklenmek amacıyla CMM ölçümleri gerçekleştirilmiş ve kavite yarıçapı mekanik olarak ölçülmüştür. Üç farklı TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} rezonanslarının ölçülmesi sonucunda Tablo 3.4'te verildiği üzere ortalama kavite yarıçapı 60,0996 mm olarak belirlenmiştir. Bölüm 3.7.2'de CMM ölçümleri sonucunda ölçülen eşdeğer kavite yarıçapı 60,0972 mm olarak elde edilmiştir. Boyutsal CMM ölçümleri sonucunda elde edilen kavite yarıçapının, elektromanyetik rezonans ölçümleri sonucunda belirlenen kavite çapına çok yakın olduğu görülmektedir. Her iki ölçüm sonucunda elde edilen değerler arasındaki hata ~ 40 ppm olarak hesaplanmıştır. Her iki yöntemde de kavite ölçümleri oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. Fakat ölçümler sırasında sıcaklık verileri kayıt altına alınmamıştır. Ölçümlerin gerçekleştirildiği ortam şartları arasında 3 K değerinde bir sıcaklık değişimi olma durumu göz önüne alındığında kavite yarıçapındaki termal genleşme nedeniyle ~ 40 ppm hatanın ~ 32 ppm değerine düşebileceği düşünülmektedir.

Elektromanyetik rezonans frekanslarından kavite yarıçapının gerçek zamanlı değişiminin gözlemlenmesi için kavite sıcaklığı değiştirilerek elektromanyetik rezonans frekansları sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüştür. Paslanmaz çelik malzemenin genleşme katsayısı kullanılarak ölçümlerin gerçekleştirildiği sıcaklık aralığındaki termal genleşme teorik olarak hesaplanmış ve elektromanyetik rezonans ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te teori ve ölçüm karşılaştırması verilmiştir. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'ten görüldüğü üzere elektromanyetik rezonansların ölçülmesi sonucu farklı sıcaklıklarda kavite yarıçapındaki sıcaklığa göre olan değişim teori ile

uyum içerisinde. Ölçüm ve teori arasındaki en büyük hatanın ~ 200 ppm olduğu anlaşılmaktadır. Bu tez çalışması içerisinde elde edilen sonuçlara göre, elektromanyetik rezonans ölçümleri ile en yüksek doğrulukta boyutsal ölçümleri ile elde edilen doğrulukta kavite yarıçap değerine ulaşılabilir. Ayrıca elektromanyetik rezonans ölçümleri ile farklı sıcaklıklarda termal genleşme nedeniyle kavite yarıçapındaki değişimlerde yüksek doğrulukta belirlenebildiği gösterilmiştir.

Tez çalışması sonucunda kavite tasarımında kaviteyi oluşturan yarım kürelerin birleşme noktasındaki küçük boşlukların önemli olduğu ve elektromanyetik rezonans frekansları çok hassas bir şekilde etkilendiği gözlenmiştir. Bu tip boşlukların rezonans frekanslarını tahmin etmesini zor bir şekilde bozabileceği anlaşılmıştır. Bu nedenle iki yarım kürenin birbirine mümkün olan sıklıkta birleştirilmesi ve hatta mümkünse lehimlenerek birleştirilmesi gerekmektedir. Bu yöntemle ortaya çıkan kavitenin birleşme noktasında bir boşluk oluşmayacaktır. Yarım kürelerin hizalanma ayarı yapılırken, vidaları kademeli sıkıldığında rezonans frekansında önemli ölçüde bozulmalara uğradığı gözlenmiştir. Vidaların bir kısmı gevşek iken diğer kısımları iyice sıkıştırılmış şekilde bırakılarak ölçümler alınmıştır.

Ölçülen mikrodalga iki düz anten ile modlar arasında, TE_{11} modu üçlü tepe noktaları göstermemiştir ve analize dahil edilmemiştir. Tez çalışmasında kullanılan paslanmaz çelik küresel kavitenin TE modları uyarma ve tespit etmede yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Antenler, Şekil 3.8’de ki gibi silindirik yuvanın içine oturtulmuştur. Şekil 3.9’da ki parçalarla antenin silindirik yuvanın içinde sıkıca oturtulacak şekilde dizayn edilmiştir ve kaviteye takıldığında antenin canlı ucu kavitenin iç kısmından birkaç milimetre küre içerisine dahil edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan anten kavitenin iç yüzeyi ile neredeyse aynı hizada olabileceği sonucuna varılmıştır. Basit ve montaj kolaylığı nedeniyle düz antenler tercih edilmiştir fakat anten tasarımlarının daha hassas şekilde geliştirilmesi bu çalışmanın devamı niteliğini taşıyacağı düşünülmektedir. Döngü antenlerinin (özel yerleştirme ve montaj özelliklerinden dolayı) kullanılmasıyla ortaya çıkan açıklanamayan pertürbasyonlar ve dejenere mikrodalga modlarının zayıf şekilde çözülmüş, üst üste binen bileşenlerini yerleştirmedeki zorluklar belirlenmiştir. Buna göre analizler, 2,1 GHz ve 7,4 GHz frekans aralığında yer alan ilk üç üçlü dejenere TM_{1n} moduyla sınırlandırılmıştır. TM_{1n} modlarının, farklı bir simetriye ($l>1$) sahip diğer TM_{1n} modlarından çok daha düşük bir verimlilikle uyarıldığı ve algılandığı açıktır. Prensip olarak, her bir multiplet için toplam, o multipletin tüm $2l+1$ bileşenlerini kapsamalıdır; ancak bazı bileşenler

üst üste binebilir veya antenlerin konumları nedeniyle zayıf bir şekilde uyarılabilir veya algılanabilir.

Ölçümlerin daha fazla iyileştirme olasılıkları üzerine tartışılmıştır ve belirsizlik bütçesinde belirsizlik kaynaklarını minimum seviyeye düşürme olasılığı üzerinde durulmuştur. Yarım küreler birleştirildiğinde, düşük belirsizlikle hizalamayı veya hassas yanlış hizalamayı garanti edebilen bir prosedür benimsenmesi gerekliliği tespit edilmiştir. Tipik olarak bu, eş merkezliliği sağlamak için iç yüzeyle aynı anda kavite üzerindeki dış özelliklerin işlenmesini ve hizalamayı sağlamak için hassas bir aparatın kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır.

Hacimleri bilinen paslanmaz çelik ve bakır kaviteelerin deri kalınlığı ve kalite faktörlerinin sonuçları Tablo 3.5'te karşılaştırılmıştır. Bakırdan üretilen kavitenin kalite faktörü paslanmaz çelikten üretilen kaviteye göre çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kalite faktörlerinin farklı çıkması kavite yapım malzemelerin elektriksel iletkenliklerine bağlı olduğu gösterilmiştir.

Mikrodalga tekniği, kavitenin geometrisini, antenlerden gelen pertürbasyonları ve kaviteelerin deri kalınlığı hakkında bilgi vermektedir. Bu yüzden kavitenin hacmini belirlemek için farklı sıcaklıklarda anlık ölçümler alabilmenin en kullanışlı yöntemlerden biridir. Mikrodalga sıcaklık sisteminde, sıcaklıkla yarıçapın değişimini belirlemek için karşılık gelen rezonans frekansları ilk üç üçlü dejenere TM_{11} , TM_{12} ve TM_{13} mikrodalga modları dikkate alınmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlarda mikrodalga rezonans frekansları TM_{11} % 0,04 TM_{12} % 0,07 ve TM_{13} % 0,11 hata ile ölçülmüştür.

CMM tekniği ile farklı sıcaklıklarda anlık ölçümler yapılmamıştır. Çünkü cihaz için en önemli parametrelerden biri sıcaklıktır. Ölçülen malzeme sürekli sıcaklıkla değişeceğinden cihazın probu stabil davranmayacağından ve sıcaklıktan etkileneceğinden sıcaklık ölçümleri yapılmamıştır.

Mikrodalga ölçümlerini minimum düzeyde belirsizlikle ölçebilmek için mevcut deney aparatında birtakım değişiklikler önerilmektedir. İstatistiksel önemi ve düşük belirsizliği korumak için, kavite yüzeyinin kapsamlı bir şekilde örneklenmesi gerekir. Yüzeye verilen zararı sınırlamak için son derece dikkatli olunmalıdır. İç yüzeylerin doğru hizalanmasını sağlamak için bir yarım küre hizalama şeması da uygulanmalıdır. Bu uzun ölçüm prosedürü, oda sıcaklığındaki dengesizlikler ve CMM'nin "ısınması" ile ilişkili etkiler nedeniyle sapma olasılığını ortaya çıkarır. Bu, ekvator düzlemi ile yarım küre yüzeyinin alt kutbu arasındaki yüksekliği aralıklı olarak ölçerek veya

alternatif olarak tekrar ölçümleri yaparak etkili bir şekilde korunmalıdır. Aslında üst ve alt yarım kürelerden bir araya getirilmiş bir kürenin eşdeğer yarıçapını bilmek isteniyor ve analizde bunun her yarım küre için ayrı ayrı değerlendirilen yarıçapın ortalaması alınarak tahmin edilebileceğini varsayılmıştır. Bu varsayımı test etmek için üst ve alt yarım küreden birer veri setinden tam bir küresel veri seti oluşturulmuştur. Dolayısıyla üst ve alt yarım kürelerin iç yarıçapları sırasıyla 60.065 mm ve 60.128 mm olduğu bulunmuştur. Bu iki veri seti için yarıçap değerleri 0.063 mm kadar farklılık göstermiştir. CMM'nin izin verilen maksimum hata (Maximum Permissible Error, MPE) rakamının çok altında $u(k=2)=86 \mu\text{m}$ belirsizliğe sahip bir yarım kürenin eşdeğer yarıçapına ilişkin bir tahmin üretebildiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, CMM, ölçüm yönteminin anizotropisi nedeniyle yarı kürelerin yuvarlaklığını eşit derecede yüksek hassasiyetle tahmin edememektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2022), International Committee of Weights and Measures, <https://www.bipm.org/en/committees> , (Erişim Tarihi: 10/11/2022).
- [2] Fellmuth B., Gaiser C., Fischer J., (2006), "Determination of the Boltzmann constant - Status and prospects", Meas Sci Technol., 17.
- [3] Moldover M. R, Trusler J. P. M., Edwards T. J., et al., (1988), "Measurement of the Universal Gas Constant R Using a Spherical Acoustic Resonator", J Res Natl Bur Stand, 93, 85–144.
- [4] Mohr P. J., Taylor B. N., Newell D. B., (2008) "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006", Rev Mod Phys., 80, 633–730.
- [5] Moldover M. R., Waxman M., Greenspan M., (1978), "Spherical Acoustic Resonators for Temperature and Thermophysical Property Measurements", High Temp. - High Press., 11, 75–86.
- [6] James B., Mehl R., Moldover M., (1986), "Measurement of the ratio of the speed of sound to the speed of light", Phys Rev A., 34, 3341–3344.
- [7] Cuccaro R., (2012), "Hygrometric applications of microwave quasi-spherical", Doktora Tezi, Politecnico di Torino Metrologia : Scienza e Tecnica delle Misure.
- [8] Jackson J., D., (1988), "Classical Electrodynamics", 3rd Edition, John Wiley.
- [9] Russell D. A., (2010) "Basketballs as spherical acoustic cavities", Am J Phys., 78, 549–554.
- [10] Yadav R. A., Yadav T. K., Maurya M. K., et al. (2009), "Normal modes and quality factors of shielded composite dielectric spherical resonators", Indian J Phys., 83, 1421–1438.
- [11] Gallagher S, Gallagher W. J., (1985), "The spherical resonator", IEEE Trans Nucl Sci., 32, 2980–2982.
- [12] ISO/IEC Guide (2008), Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995), International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission.
- [13] De Podesta M., May E. F., Mehl J. B., et al. (2010), "Characterization of the volume and shape of quasi-spherical resonators using coordinate measurement machines", Metrologia, 47, 588–604.
- [14] Pitre L., Sparasci F., Truong D., et al. (2011), "Measurement of the Boltzmann constant k_B using a quasi-spherical acoustic resonator", Int J Thermophys., 32, 1825–1886.

- [15] Pitre L., Moldover M. R., Tew W.L., (2006), "Acoustic thermometry: New results from 273 K to 77 K and progress towards 4 K", Metrologia, 43, 142–162.
- [16] Underwood R. J., Mehl J. B., Pitre L., et al. (2010), "Waveguide effects on quasispherical microwave cavity resonators", Meas Sci Technol., 21.
- [17] Underwood R., Flack D., Morantz P., et al. (2011), "Dimensional characterization of a quasispherical resonator by microwave and coordinate measurement techniques", Metrologia, 48, 1–15.
- [18] Benedetto G., Gavioso R. M., Spagnolo R., et al. (2004) "Acoustic measurements of the thermodynamic temperature between the triple point of mercury and 380 K", Metrologia, 41, 74–98.
- [19] Web 2, (2022), Brushing Up on Network Analyzer Fundamentals, <https://www.mwrf.com/technologies/testmeasurement/article/21849241/brushing-up-on-network-analyzer-fundamentals>., (Erişim Tarihi: 10/11/2022).
- [20] Zaidi A., Athley F., Medbo J., et al. (2018) "5G physical layer: Principles, models and technology components", Academic Press.
- [21] Web 3, (2022), Fluke Calibration 1502A, <https://www.fluke.com/tr-tr/urun/kalibrasyon-araclari/sicaklik-kalibratorleri/fluke-calibration-1502a-1504> , (Erişim Tarihi: 10/11/2022).
- [22] Guide U. 5626/5628. 2014.
- [23] Web 4, (2022), Isolab Isıtıcı, <https://www.labor.com.tr/urun/isolab-balon-isitici-6000-ml-450-degc>, (Erişim Tarihi: 10/11/2022).
- [24] Ewing M. B., Mehl J. B, Moldover M. R., et al. (1988), "Microwave measurements of the thermal expansion of a spherical cavity", Metrologia, 25, 211–219.
- [25] Greenspan M., (1986), "Gas-filled spherical resonators: Theory and experiment", J Acoust Soc Am., 79, 253–272.
- [26] Web 5, (2022), <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>, (Erişim Tarihi: 10/11/2022).
- [27] Mehl J. B., Moldover M. R., Pitre L., (2004), "Designing quasi-spherical resonators for acoustic thermometry", Metrologia, 41, 295–304.
- [28] Zhang K., Feng X. J., Zhang J. T., et al. (2017), "Microwave measurements of the length and thermal expansion of a cylindrical resonator for primary acoustic gas thermometry", Meas Sci Technol., 28.

- [29] Gavioso R. M., Benedetto G., Albo P. A. G., et al. (2010), "A determination of the Boltzmann constant from speed of sound measurements in helium at a single thermodynamic state", *Metrologia*, 47, 387–409.
- [30] May E. F., Pitre L., Mehl J. B., et al. (2004), "Quasi-spherical cavity resonators for metrology based on the relative dielectric permittivity of gases", *Rev Sci Instrum.*, 75, 3307–3317.
- [31] Web 6, (2022), Quality factor, https://www.wikipedia.org/wiki/Q_factor, (Erişim Tarihi: 10/11/2022).
- [32] Collin R., (1967), "Foundations for Microwave Engineering. Electron", 2nd Edition, An IEEE Press Classic Reissue.



ÖZGEÇMİŞ

2017 yılında İstanbul Üniversitesi Fizik bölümünü bitirmiş ve aynı yıl Pedagojik Eğitimi de tamamlamıştır. 2013 yılında Sakıp Sabancı Üniversitesi'nde ince film kaplamaları ile ilgili Nanoteknoloji Laboratuvarı'nda staj yapmıştır. Şubat 2019'da Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2019'da Yüksek Lisans tez çalışmalarını TÜBİTAK UME Kontak Sıcaklık Laboratuvarı'nda sürdürmüştür. 2021 yılı Temmuz ayı itibariyle Gebze Teknik Üniversitesi'nde Kuantum Algılama ve Güvenli İletişim için Dönüşüm Teknolojileri isimli NATO SPS Projesi'nde çalışmalarına devam etmektedir.