

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**MANYETİK BAĞLAŞIMLA KABLOSUZ PASİF SENSÖR TASARIMI**

**YELİZ DİKERLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğretim Üyesi Seyit Ahmet SİS (Tez Danışmanı)**  
**Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ**  
**Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA**

**BALIKESİR, KASIM - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Yeliz DİKERLER** tarafından hazırlanan “**MANYETİK BAĞLAŞIMLA KABLOSUZ PASİF SENSÖR TASARIMI**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 27 Kasım 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

**Danışman**

Dr. Öğr. Üyesi Seyit Ahmet SİS  
Balıkesir Üniversitesi

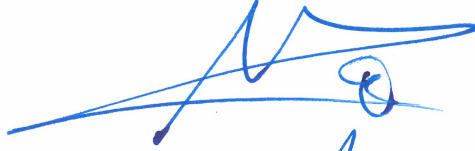
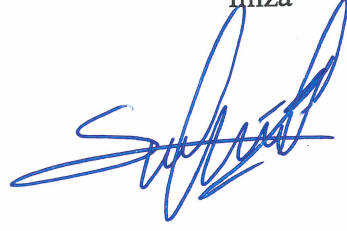
**Üye**

Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ  
Balıkesir Üniversitesi

**Üye**

Dr. Öğr. Üyesi Hakan AKÇA  
İstanbul Gelişim Üniversitesi

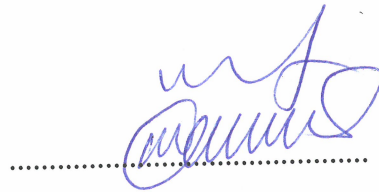
İmza



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR



## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “Manyetik Bağlaşım ile Kablosuz Pasif Sensör Tasarımı” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yeliz DİKERLER

(imza)



## ÖZET

**MANYETİK BAĞLAŞIMLA KABLOSUZ PASİF SENSÖR TASARIMI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**YELİZ DİKERLER**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞRETİM ÜYESİ SEYİT AHMET SİS)**  
**BALIKESİR, KASIM - 2019**

Sıcaklık değişimlerinin izlenmesi, endüstriyel uygulamalar, günlük yaşamda kullanılan cihazlar, tıbbi ve araştırma geliştirme faaliyetleri gibi birçok uygulamada kritik öneme sahiptir. Zorlu ortamlar ve izleme sistemleri için fiziksel bağlantıların mümkün olmadığı yerlerde çalışabilen sıcaklık sensörlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sinyal iletişimi için fiziksel temas veya batarya gibi güç kaynağı gerektiren mevcut sıcaklık sensörlerinin çoğu ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Bu çalışmada, sıcaklık değişimlerini ölçmek için kullanılabilen manyetik bağlaşımla kablosuz pasif bir sıcaklık sensörü tasarımı ve deneysel ortamda ölçümlerinin gerçekleştirilmesi sunulmaktadır.

Sıcaklık değişiminden kaynaklı sistemde meydana gelen frekans kayması ve empedans değişimi tespitine dayanan tamamen pasif bir endüktif-kapasitif (L-C) sensör temassız olarak sıcaklık değişimlerinin izlenmesi için entegre edilmiştir. Sensörde kullanılan bobin yapılarının tasarımı Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Simülasyonu Ansys-Maxwell-14.0 programında yapılmıştır. Sonuç olarak sıcaklık değişimlerinin izlenmesinin, sensör devresinde fiziksel bağlantı, güç kaynakları veya aktif elemanlar gerektirmeden gerçekleştirilebileceği doğrulanmaktadır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Sıcaklık sensörü, endüktif kapasitif (L-C) sensör devresi, pasif sensörler, kablosuz sensörler.



## **ABSTRACT**

**WIRELESS PASSIVE SENSOR DESIGN USING MAGNETIC COUPLING**  
**MSC THESIS**  
**YELİZ DİKERLER**  
**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**  
**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**  
**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. SEYİT AHMET SİS)**  
**BALIKESİR, NOVEMBER - 2019**

Monitoring the temperature change is very critical in many applications such as industrial machines, home appliances, medical devices and laboratory equipments. For demanding environments and monitoring systems, wireless temperature sensors, which can operate without a physical connection, are needed. Most existing temperature sensors do not satisfy the needs because they require either physical contact or a battery power supply for signal communication. In this master of science (MSc) thesis, the design and experimental realization of a wireless passive temperature sensor based on magnetic coupling is presented.

A complete passive inductive capacitive (L-C) sensor based on the detection of the frequency and impedance variation in the system due to temperature changes is designed for monitoring the temperature change without a physical contact. The Low Frequency Electromagnetic Field Simulation Ansys-Maxwell-14.0 is utilized to design and analyze the performance of the magnetic coils (loops). It is experimentally verified that the temperature monitoring can be carried out without requiring physical connection, power supplies or active elements in the sensor circuit.

**KEYWORDS:** Temperature sensor, inductive capacitive (L-C) sensor circuit, passive sensors, wireless sensors.

Science Code / Codes :90512/90513/90516

Page Number :72

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. EŞDEĞER DEVRE MODELİ</b> .....	<b>7</b>
2.1 Manyetik Bağlaşım ile Kablosuz Pasif Sensör Devre Modeli .....	7
2.2 Kuplajlanma Çeşitleri .....	10
2.2.1 Zayıf Kuplajlanma Rejimi .....	10
2.2.2 Güçlü Kuplajlanma Rejimi .....	10
2.2.3 Kuplajlanma Katsayısı .....	10
<b>3. BOBİN SİMÜLASYONU, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU</b> .....	<b>12</b>
3.1 Gelişmiş Tasarım Sistemi(ADS) Tasarımı .....	12
3.2 Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Simülasyonu Ansys Maxwell-14.0 Tasarımı.15	
3.3 43 $\Omega$ NTC Termistörün Karakterizasyonu.....	24
3.4 Bobin Devrelerinin Deney Düzeninde Hazırlanması.....	27
<b>4. KABLOSUZ PASİF SICAKLIK SENSÖRÜ İÇİN DENEY DÜZENİ</b> .....	<b>30</b>
4.1 Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artış Testi .....	34
4.2 Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Azalış Testi .....	36
4.3 Paralel NTC Termistörler Bağlı Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artış ve Azalış Testleri.....	38
<b>5. ANALİZ VE BULGULAR</b> .....	<b>39</b>
5.1 NTC Termistör Ölçümü Sonuçları.....	39
5.2 Kablosuz Pasif Sensörün Simülasyon Sonuçları .....	40
5.3 Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artışı ve Azalışı Algılaması Deneysel Sonuçları.....	40
5.4 Paralel NTC Termistörlerin Kullanıldığı Durumda Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artışı ve Azalışı Algılaması Deneysel Sonuçları.....	57
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>68</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>70</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>72</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Manyetik bağlaşımla kablosuz pasif sensör eşdeğer devre modeli. ....	7
Şekil 3.1: Seri RLC devresi.....	12
Şekil 3.2: Kablosuz pasif sıcaklık sensörü ADS devresi. ....	13
Şekil 3.3: Bobin tel genişliği ve yüksekliği. ....	15
Şekil 3.4: 5 Sargılı bobin çizimi.....	16
Şekil 3.5: Karşılıklı hizalanmış eşdeğer bobinler. ....	16
Şekil 3.6: Ters yönde yerleştirilmiş bobinler. ....	17
Şekil 3.7: Bakır bobin özellikleri. ....	18
Şekil 3.8: Bobin iç yarıçapı.....	18
Şekil 3.9: Bobin dış yarıçapı .....	19
Şekil 3.10: Hava malzemeli kutu içine yerleştirilmiş bobinler. ....	19
Şekil 3.11: Bobinlerin içine yerleştirildiği kutu boyutları.. ....	20
Şekil 3.12: Bobinin 1 A giriş akımı. ....	20
Şekil 3.13: Bobinin 1 A çıkış akımı.....	21
Şekil 3.14: Eşdeğer diğer bobinin 1 A giriş akımı.....	21
Şekil 3.15: Bobinin 1 A çıkış akımı.....	22
Şekil 3.16: Ansys-Maxwell-14.0 tasarımı analiz sonuçları ekran görüntüsü.....	22
Şekil 3.17: PCB kartına basılmış bobin .....	23
Şekil 3.18: NTC termistörün ağ analizör cihazına bağlanması.....	24
Şekil 3.19: S1P termistör cevaplarının ADS devresinde termistör elemanına uygulanması.....	25
Şekil 3.20: S1P termistör cevaplarının ADS sensör devresine uygulanması.....	26
Şekil 3.21: Harici bobin devresinin ağ analizör cihazına bağlanması. ....	27
Şekil 3.22: Derinliği 1 cm olan cam fanusa karşılıklı hizalanarak yerleştirilmiş harici ve iç bobin devreleri.....	28
Şekil 3.23: Cam fanus üzerine yerleştirilmiş harici (algılama) bobin devresi. ....	28
Şekil 3.24: Cam fanus içine yerleştirilmiş iç bobin devresi.....	29
Şekil 4.1: Harici bobin devresi.....	30
Şekil 4.2: Sensör bobin devresi.....	31
Şekil 4.3: Kablosuz pasif sıcaklık sensörü için deney düzeneği.....	31
Şekil 4.4: Harici bobin devresi ile ağ analizör cihazı arasındaki bağlantı .....	32
Şekil 4.5: Ağ analizör cihazı port 2 çıkışına bağlı kablosuz pasif sensör düzeneği.....	33
Şekil 4.6: Oda sıcaklığındaki (27,5 °C) kablosuz pasif sensör .....	33
Şekil 4.7: Fanus içinin ısıtılmasının sağlanması. ....	34
Şekil 4.8: 50,9 °C'deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü.....	35
Şekil 4.9: Ağ analizör cihazı ekranından izlenebilen yansıma katsayısı grafiği.....	36
Şekil 4.10: 92,7 °C'deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü.....	36
Şekil 4.11: 84,1 °C'deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü.....	37
Şekil 4.12: Zayıf kuplajlanma rejiminde çalışan kablosuz pasif sensör test düzeneği. ....	37
Şekil 4.13: Üç tane 43 Ω NTC termistörlerin paralel bağlandığı test düzeneği.....	38
Şekil 5.1: Smith chart grafiği .....	39
Şekil 5.2: 43 Ω NTC termistörün direnç-sıcaklık grafiği.....	40
Şekil 5.3: Sensör devresinin oda sıcaklığındaki (27,5 °C) yansıma katsayısı- frekans grafiği.....	41
Şekil 5.4: Sensör devresinin yaklaşık 47,5 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği .....	41
Şekil 5.5: Sensör devresinin yaklaşık 67,5 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği. ....	42

<b>Şekil 5.6:</b> Sensör devresinin yaklaşık 87,5 °C'deki yansımaya katsayısı-frekans grafiği. ....	42
<b>Şekil 5.7:</b> Sensör devresinin 100 °C'deki yansımaya katsayısı-frekans grafiği .....	43
<b>Şekil 5.8:</b> Sensör devresinin ADS simülasyonu oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-frekans grafiği .....	43
<b>Şekil 5.9:</b> Sensör devresinin oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği.....	44
<b>Şekil 5.10:</b> Sensör devresinin oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği. ....	44
<b>Şekil 5.11:</b> Oda sıcaklığındaki (27,5 °C) yansımaya katsayısı grafiği.....	45
<b>Şekil 5.12:</b> 30 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	46
<b>Şekil 5.13:</b> 40 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	46
<b>Şekil 5.14:</b> 50 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	47
<b>Şekil 5.15:</b> 60 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	47
<b>Şekil 5.16:</b> 70 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği .....	48
<b>Şekil 5.17:</b> 80 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	48
<b>Şekil 5.18:</b> 90 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	49
<b>Şekil 5.19:</b> 100 °C'deki yansımaya katsayısı grafiği. ....	49
<b>Şekil 5.20:</b> Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği. ....	50
<b>Şekil 5.21:</b> Harici bobin devresinin ağ analizör cihazına bağlanması. ....	51
<b>Şekil 5.22:</b> Azalma sürecindeki 90 °C'de yansımaya katsayısı grafiği. ....	51
<b>Şekil 5.23:</b> Azalma sürecindeki 80 °C'de yansımaya katsayısı grafiği. ....	52
<b>Şekil 5.24:</b> Azalma sürecindeki 70 °C'de yansımaya katsayısı grafiği .....	52
<b>Şekil 5.25:</b> Azalma sürecindeki 60 °C'de yansımaya katsayısı grafiği. ....	53
<b>Şekil 5.26:</b> Azalma sürecindeki 50 °C'de yansımaya katsayısı grafiği. ....	53
<b>Şekil 5.27:</b> Azalma sürecindeki 40 °C'de yansımaya katsayısı grafiği .....	54
<b>Şekil 5.28:</b> Azalma sürecindeki 30 °C'de yansımaya katsayısı grafiği. ....	54
<b>Şekil 5.29:</b> Azalma sürecindeki oda sıcaklığında (27,5 °C) yansımaya katsayısı grafiği. ....	55
<b>Şekil 5.30:</b> Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği. ....	56
<b>Şekil 5.31:</b> Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği. ....	56
<b>Şekil 5.32:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 30 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	57
<b>Şekil 5.33:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 40 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	58
<b>Şekil 5.34:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 60 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	58
<b>Şekil 5.35:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 70 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	59
<b>Şekil 5.36:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 80 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	59
<b>Şekil 5.37:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 90 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	60
<b>Şekil 5.38:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 100 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	60
<b>Şekil 5.39:</b> Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği.....	61
<b>Şekil 5.40:</b> Oda sıcaklığı(27,5 °C)-100 °C'deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği .....	61
<b>Şekil 5.41:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 90 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	62
<b>Şekil 5.42:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 80 °C'de yansımaya katsayısı grafiği.....	63

<b>Şekil 5.43:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 70 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.....	63
<b>Şekil 5.44:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 60 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.....	64
<b>Şekil 5.45:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 50 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.....	64
<b>Şekil 5.46:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 40 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.....	65
<b>Şekil 5.47:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 30 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.....	65
<b>Şekil 5.48:</b> Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin oda sıcaklığında(27,5 °C) yansımaya katsayısı grafiği. ....	66
<b>Şekil 5.49:</b> Oda sıcaklığı(27,5 °C)-100 °C’deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği .....	67
<b>Şekil 5.50:</b> Oda sıcaklığı(27,5 °C)-100 °C’deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği. ....	67



# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> Sistem parametre değerleri .....	23
--	----



## SEMBOL LİSTESİ

$\mu_0$	: Havanın Manyetik Geçirgenliği (H/m)
<b>a</b>	: Tel Yarıçapı (mm)
<b>AC</b>	: Alternatif Akım (A)
<b>ADS</b>	: Gelişmiş Tasarım Sistemi
<b>C</b>	: Kapasitans (f)
<b>d</b>	: Bobinler Arası Mesafe (mm)
<b>EMF</b>	: Elektromotor Kuvvet
<b>f</b>	: Frekans (Hz)
<b>ISM</b>	: Endüstriyel Bilimsel Tıbbi
<b>ADS</b>	: Gelişmiş Tasarım Sistemi
<b>k</b>	: Kuplaj Katsayısı
<b>L</b>	: Endüktans (H)
<b>L-C</b>	: Endüktif Kapasitif
<b>l<sub>h</sub></b>	: Dikdörtgen Kesitli Telin Kenar Uzunluğu (mm)
<b>M</b>	: Karşılıklı Endüktans (H)
<b>MEMS</b>	: Mikroelektro Mekanik Sistem
<b>N</b>	: Sarım Sayısı
<b><math>\eta</math></b>	: Verimlilik
<b>NTC</b>	: Negatif Sıcaklık Katsayısı
<b>P</b>	: Güç (W)
<b>PTC</b>	: Pozitif Sıcaklık Katsayısı
<b>Q</b>	: Kalite Faktörü
<b>r</b>	: Bobin Yarıçapı (mm)
<b>R</b>	: Direnç ( $\Omega$ )
<b>RF</b>	: Radyo Frekans
<b>SAW</b>	: Yüksek Sıcaklık Yüzey Akustik Sensörleri
<b>T</b>	: Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>V</b>	: Gerilim (V)
<b>Z</b>	: Empedans ( $\Omega$ )
<b><math>\Gamma, S</math></b>	: Yansıma Katsayısı (dB)
<b><math>\lambda</math></b>	: Dalga Boyu (m)
<b><math>\sigma</math></b>	: İletkenlik (S/cm)
<b><math>\omega</math></b>	: Radyal Frekans (radyan)

## **ÖNSÖZ**

Tez çalışmalarım boyunca yol göstericiliği, maddi ve manevi tüm desteğinden dolayı Sayın Dr. Öğretim Üyesi Seyit Ahmet SİS'e; Yüksek Lisans süresince desteğini benden esirgemeyen Balıkesir İl Sağlık Müdürlüğüne sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2019**

**Yeliz DİKERLER**





## 1. GİRİŞ

Sıcaklık değişimlerinin izlenmesi, gıda endüstrisi, lojistik, tarım, taşınabilir tıbbi ekipman, akıllı kablosuz sağlık izlemesi gibi günlük yaşamdaki birçok alanda kritik öneme sahiptir. Örneğin, seralarda, bitkinin büyüme durumunun ayarlanması ve doğru tarımın sağlanması gerçek zamanlı sıcaklık izlemesi özellikle yarar sağlamaktadır. Kümes hayvanlarında ve benzeri yerlerdeki ortam sıcaklığının izlenmesi, hayvanların sağlığı ve üreme üzerinde hassas kontrol sağlanması önem arz etmektedir. Yiyeceklerin depolanması ve taşınması sırasında, bozulma olasılığını azaltmak için sebzelerin, meyvelerin ve etlerin sıcaklık değişimlerinin sürekli takip edilmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak günlük yaşamda yaygın olarak kullanılan alanlardan bazıları da, aşırı ısınmayı ve kuru yanmayı önlemek için araba tanklarının sıcaklığını ve çeşitli enfeksiyonları önlemek için insan vücudunun sıcaklığını gerçek zamanlı izlemek için akıllı ve taşınabilir izleme ekipmanlarının üretimini içermektedir (Huang, Dong, & Wang, 2016). Bu tür uygulamaların birçoğunda, dışarıdan sistem ile temasın zor olduğu ortamlardaki ve fiziksel bağlantıların mümkün olmadığı sıcaklık izleme sistemlerindeki zorluklar ortaya koyulmaktadır (Rodriguez & Jia, 2011).

Bu alanda yüksek sıcaklık algılama cihazları olarak yüksek sıcaklık termokuplları, yüksek sıcaklık optik sensörleri, yüksek sıcaklık yüzey akustik sensörleri (SAW) ve kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sensörleri kullanılmaktadır (Bently, 1998). Bir termokupl, sıcaklık ölçümü için olan ucu yani sıcak olanı ve genellikle 0 °C'de referans olarak çalışan diğer ucu yani soğuk olanı bağlantı noktalarında birleştirilen iki farklı metal telden oluşan bir düzendir. Bazı mevcut ticari yüksek sıcaklık termokuplları, 2300 °C'ye kadar olan sıcaklıkları bile ölçebilmektedir. Ancak, bir termokupldan çıkan sinyal zayıf olduğundan gürültülerden kolayca etkilenebilmektedir (Bently, 1998). Ayrıca, yüksek sıcaklık ortamlarında uzun süreli çalışma sırasında önemli ölçüde kayma görülmektedir ve sadece birkaç gün ile sınırlı bir ömre sahiptirler (Bently, 1998). Yüksek sıcaklık optik sensörleri, yoğunluk, spektrum, faz ve polarizasyon gibi çeşitli değişkenlerle karakterize edilen sıcaklığı optik sinyallere dönüştüren cihazlardır. Optik sensörlerin çalışma prensibi, nesnelere tarafından yayılan termal radyasyonu tespit ederek sıcaklıkları veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişen termal genleşme katsayısına ve kırılma indisine sahip kısa bir parçanın optik yol uzunluğundaki değişiklikleri veya sıcaklığa bağlı optik saçılmaları tespit ederek ölçüm yapmaktadır (Xiao, Deng, May, & Wang, 1999). Bu optik sensörlerin çoğu, küçük boyutlu, hafif ve 1.500 °C'ye kadar olan sıcaklıkları bile test edebilmesi gibi

özellikleriyle birçok önemli avantaj sunmaktadır. Dezavantaj olarak, ölçüm hassasiyeti, doğruluğu ve aralığındaki performansı sınırlı olduğundan örneğin elektromanyetik girişim, radyasyon, korozyon ve dönen bileşenler gibi ortamlardaki ölçüm uygulamalarında zorluklar içermektedir (Xiao, Deng, May, & Wang, 1999). Yüksek sıcaklık yüzey akustik dalga (SAW) sensörlerinin ölçüm prensibi ise, sıcaklık değişiminden kaynaklı yüzey akustik dalgasının faz hızındaki değişimin tespit edilmesine dayanmaktadır. Hız değişimi, sensörün frekans veya faz özellikleri ölçülerek izlenmekte ve daha sonra ölçüme karşılık gelen sıcaklık miktarıyla ilişkilendirilmektedir. Tüm akustik dalga cihazları, mekanik bir dalga oluşturmak için salınımlı bir elektrik alanı uygulayan ve sonrasında ölçüm için elektrik alana geri dönüştürülen piezoelektrik akustik dalga sensörleridir. Bu tür sensörler, özellikle düşük termal kütle, düşük iletkenlik veya yüksek sıcaklıklarda güçlü radyasyon eşleşmesi nedeniyle sıcaklık ölçümü için prob yerleştirmenin zor olduğu bazı ortamlarda avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, akustik dalganın malzemenin yüzeyinde yayılma sürecinde, yayılma yolunun özelliklerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmesi dalganın hızını ve/veya genliğini etkilemektedir. Bu nedenle, bu tekniğin dezavantajı, ses hızının yalnızca sıcaklığa değil, aynı zamanda farklı çevre koşullarında yol boyunca değişen çevresel, geometrik ve malzeme özelliklerine de bağlı olmasıdır. Etkiler düşük sistem kapasitesi, düşük bant genişliği sağladığından uygulama aralığı sınırlanmaktadır (Seifert & Weigel, 1997).

Herhangi bir sıcaklık sensöründeki en önemli özellik, ölçülecek olan nesne, alan vb. ile iyi bir termal bağlantı sağlanmasıdır. Bu bağlantı, ölçülen ile sensör arasında termal enerji transferiyle gerçekleşmektedir. Transfer edilen termal enerji sensör yardımıyla elektrik sinyaline dönüştürülür. Sensörün ısıtılması veya soğutulması, ölçümlerde hata oluşturabilecek termal enerjinin de transferine yol açabilmektedir (Li, et al., 2015). Sensör bulunan bir devre ile, nesne veya alan etrafındaki sıcaklık değişimleri takip edilerek bu hatalar azaltılabilmektedir, çünkü enerji aktarımı herhangi bir dış etken tarafından değil, iletim kaynaklı sağlanmaktadır. Böyle bir devre için ideal sensör aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

**Boyut:** Termal enerji transferi nedeniyle oluşabilecek hatayı azaltmak ve fiziksel bağlantıların mümkün olmadığı, temasın zor olduğu ortamlara kolay entegrasyon sağlamak için küçük boyut.

**Bağlantı şekli (Kablolu veya kablosuz):** Sensör bulunan devre, ölçüm yapılacak nesne veya alandan kablolarla bağlantının mümkün olmadığı ortamlar için kablosuz.

**Elektriksel beslemesi (Aktif veya pasif olma durumu):** Uzun süreli izleme için dahili olarak kalıcı olması gereken bir devre, sensöre harici olarak güç sağlanması için herhangi bir güç kaynağına sahip olmamalıdır.

Son on yılda hakkında birçok çalışma yapılan ve fiziksel bağlantı ihtiyacını ortadan kaldıran kablosuz sensörler, veri toplama ve aktarma yöntemine bağlı olarak aktif veya pasif modda çalışmaktadırlar. Aktif sensörler dahili bir kaynakla güçlendirilirken pasif sensörler uzaktan güç almaktadır. Kablosuz aktif sensörler, geniş bir bölgeyi kapsayan çok çeşitli parametreleri izleyebilse de, kurulum, bakım maliyetleri ve batarya ömrü sınırlamalarından dolayı dezavantaja sahiptirler. Diğer taraftan kablosuz pasif sensörler, aktif olanlara kıyasla sınırlı bir işlevselliğe sahip olmasına rağmen daha ucuz, uygulaması daha kolay ve daha uzun ömürlü olduğundan avantaj sağlamaktadırlar (Rodriguez & Jia, 2011). Kablosuz pasif sensörlerin en yaygın çeşidi olan endüktif kapasitif (L-C) devre bazlı sensörler endüktans, kapasitans ve direnç değerleri ile belirlenen bir rezonans frekansına sahip devrelerdir ve bu değerlere bağlı olarak rezonans frekansının değişkenlik göstermesi ile ilgili parametre izlenebilmektedir. Endüktif kapasitif (L-C) kablosuz pasif sensörler, ilk önce 1967'de Collins tarafından göze yerleştirilen minyatür bir basınç sensörünü gerçekleştirmek için bir çift düz spiral bobin kullanılmasıyla kendinden söz ettirmiştir (Huang, Dong, & Wang, 2016). Ancak 1990'lara kadar mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) teknolojisinin gelişmesinden dolayı fazla dikkate alınmamışlardır (Huang, Dong, & Wang, 2016). Bu tür sensörlerin ana bileşenleri endüktif sargı, kapasitör ve termistördür. Endüktif sargı, sensördeki ilgili parametre bilgilerinin harici bir cihaza kablosuz olarak iletilmesini sağlayan harici (algılama) bobini ile sensör bobini arasındaki endüktif kuplajın sağlanması için kullanılmaktadır. Kapasitör, sensörün rezonans frekansını düzenlemek için ve termistör ise sensör tasarımında algılama elemanı olarak kullanılmaktadır (Veetil, 2017).

Termistörler genel olarak iki farklı tipe sınıflandırılır: NTC termistörleri ve PTC termistörleridir. Sıcaklık algılama elemanı olarak kullanıldığı durumlarda, negatif sıcaklık katsayılı (NTC) termistörleri sıcaklıktaki artış ile direncin azaldığı ve pozitif sıcaklık katsayılı (PTC) termistörleri sıcaklıktaki artış ile direncin arttığı termistörlerdir. Sıcaklık sensörü olarak bir termistör kullanıldığında, tüm özelliklerinin sıfır güç direncine

dayandığı varsayılır, yani bu termistörden geçen elektrik akımının ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek fark edilebilir bir sıcaklık artışı (kendiliğinden ısınması) ile sonuçlanmadığı anlamına gelmektedir. Bu çalışmadaki sensör devresinde, 43  $\Omega$  NTC termistörü algılama elemanı olarak yer almakta ve sıcaklık değişimi, termistör direncinin ters orantılı olarak değişmesine neden olmaktadır. Veri iletimi ve güç aktarımı için gerekli olan endüktif kuplaj bağlantılı sistem, harici ve iç bobini olarak görev yapan iki RLC devresinden oluşmakta ve harici bobine alternatif voltaj uygulanmaktadır. Uygulanan alternatif voltaj bir manyetik alan indüklenmesine neden olur ve ardından indüklenen manyetik alan sayesinde üretilen iç bobindeki voltaj ile sensör ve bobin arasında manyetik bağlantı meydana gelmiş olmaktadır. Elektromanyetik bir alana maruz kaldığında, sensörün sergilediği endüktans ve kapasitans değerine bağlı olarak belirli bir frekansta rezonansa girmektedir. Güç aktarımında daha iyi bir verim elde etmek için, her iki RLC devresinin de aynı rezonans frekansına ayarlanması gerekmektedir, fakat verimlilik, bobin değerleri, geometriler, hizalamalar ve bobinler arasındaki mesafe gibi parametrelere göre de değişkenlik göstermektedir (DeRouin, Pereles, Sansom, Zang, & Ong, 2013). Bu sensör tasarımı için, empedans değeri termistör direncinin bir fonksiyonu olarak değişkenlik göstermektedir (Karipott, 2017). İlgili parametrede değişiklikler, frekans tepkisini değiştiren endüktif kuplaj yoluyla okuyucu tarafından izlenebilmektedir. Küçük boyutları, basit yapıları, düşük maliyetleri, entegrasyon kolaylığı ve sabit karakterizasyonları nedeniyle endüktif kapasitif (L-C) sensörleri kablo ile temasın zor olduğu ortamlarda kısa mesafeler için güç iletiminde özellikle avantaj sağlamaktadır. Geçmişte birçok önemli araştırma endüktif kapasitif (L-C) devre bazlı kablosuz pasif algılama teknolojilerini geliştirmek ve uygulamalarını sıcaklık sensörleri gibi birçok alanda genişletmek için katkıda bulunmuşlardır (Mutashar, Hannan, Samad, & Hussain, 2014). Bu çalışmalardan bazıları şunlardır:

Rodriguez & Jia (2011) de dönen bileşenlerde çalışabilen bir kablosuz pasif sıcaklık sensörünün geliştirilmesi yer almaktadır. Bu çalışmada sıcaklık algılaması, kablosuz ve sıcaklığa duyarlı malzemelerle birleştirilmiş endüktif kapasitif (L-C) ayarlı bir devre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışma, sıcaklık izlemenin devrede fiziksel temas, güç kaynakları veya aktif elemanlar gerektirmeden yapılabileceğini göstermektedir.

Veetil (2017) deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü çalışmasında, dışarıdan herhangi bir güç kaynağı gerektirmeden fare modelindeki sıcaklık değişimini gerçek zamanlı olarak etkin

bir şekilde izleyebilen, klinik kullanıma uygun bir sensör sistemi tasarlanmıştır. İmplant edilebilir sensör sayesinde, fare içinde meydana gelen yaralanma bölgesindeki enfeksiyonun başlamasını ve buna bağlı olarak vücut içinde gerçekleşen lokalize sıcaklık artışının sürekli izlenmesiyle enfeksiyonun erken tespiti için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Karipott (2017) daki projede, sıcaklık sensörü bir implant vidası içine yerleştirilerek implantasyon bölgesindeki enfeksiyonu ve buna bağlı olarak meydana gelen lokal sıcaklık artışını tespit etmek için kullanılmaktadır. Termistördeki sıcaklık değişimlerinin rezonans frekansında kaymaya yol açması ile enfeksiyon durumu takip edilebilmektedir.

Wang & Chen (2008) de frekans değişim çıkışına dayanan kablosuz pasif bir endüktif kapasitif (L-C) sensörü anlatılmaktadır. Zorlu ortamlara dayanıklı fiziksel temas gerektirmeyen bu sensörde, aktif elemanlara veya güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu proje, zorlu ortamlardaki kablosuz pasif sıcaklık algılama teknolojilerinin ve gömülü sağlık izleme teknolojilerinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Yan, et al. (2018) deki çalışmada baskı devre kartı (PCB) tabanlı bir kablosuz pasif sıcaklık sensörü sunulmuştur. PCB bazlı sıcaklık sensörü basit yapılı, küçük boyutlu, kolay işlemleri, uygun entegrasyonlu ve düşük maliyetli olması yönleriyle kullanımda avantaj sağlamaktadır. PCB malzemesinin kablosuz pasif sensöründe sıcaklık ölçümleri için uygulanabilirliği bu çalışma ile kanıtlanmıştır.

Bu çalışmada, manyetik bağlaşımla kablosuz pasif bir endüktif kapasitif (L-C) sensörü ile sıcaklık değişimleri takibinin yapılabilmesi için iki RLC devresi tasarlanmıştır. Devrelerde 6.5 MHz Endüstriyel Bilimsel Tıbbi (ISM) çalışma frekansında görev yapan harici (algılama) ve iç (sensör) bobinleri 1 cm mesafede konumlandırılmış ve bobinler baskılı devre kartı (PCB) üzerinde basıldıktan sonra sensör devresi Rohde & Schwarz FSH8 ağ analizör cihazı ile test edilmiştir. Baskılı devre kartı (PCB) üzerine basılabilmesi, ince uyumlu, hafif, çevre dostu ve uygun maliyetli yapılar üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bobin değerlerinin geometrisi ve verimliliğinin belirlenmesinde Gelişmiş Tasarım Sistemi (ADS) programı kullanılarak gerekli incelemeler yapılmıştır. Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Simülasyonu Ansys-Maxwell-14.0 programı ise, bobinleri simüle etmek, değerlerini hesaplamak ve bobin tasarımını doğrulamak için kullanılmıştır. Oda sıcaklığından (27,5 °C) 100 °C'ye kadar 10 °C'lik artışlarla ve 100 °C'den oda sıcaklığına

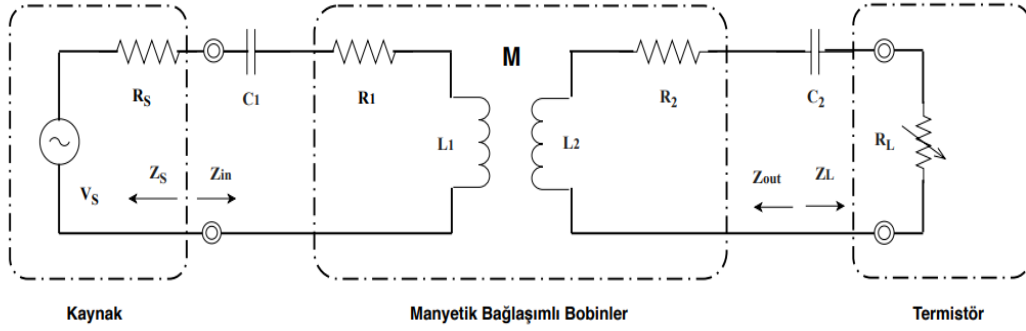
(27,5 °C) kadar 10 °C'lik azalışlarla ölçülen sıcaklık bilgisi ve güç, 5 sargılı harici bobin ve bu bobin ile eşdeğer olan iç bobin arasındaki endüktif kuplaj yoluyla algılanmıştır. Sensör devresi tarafından ölçülen sinyale göre değişkenlik gösteren rezonans frekansı ve yansıma katsayısı, karmaşık bir güç sistemine ihtiyaç duyulmadan harici bobin kullanımı ile kolaylıkla ölçülebilmüş ve bir ağ analizör cihazı yardımıyla izlenebilmiştir. II. Bölümde, manyetik bağlaşımlı kablosuz pasif sensörün eşdeğer devre modeli, III. Bölümde, bobin simülasyonu, üretimi ve karakterizasyonu, IV. Bölümde, kablosuz pasif sıcaklık sensörü için deney düzeneği ve V. Bölümde analiz ve bulgular verilmiştir. Son olarak, sonuç ve öneriler VI. Bölümde özetlenmiştir.



## 2. EŞDEĞER DEVRE MODELİ

### 2.1 Manyetik Bağlaşım ile Kablosuz Pasif Sensör Devre Modeli

Sıcaklık değişimlerinin takibi için manyetik bağlaşım ile kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sensöründe harici (algılama) ve iç (sensör) bobini olarak görev yapan iki RLC devrenin eşdeğer devre modeli Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Manyetik bağlaşım ile kablosuz pasif sensör eşdeğer devre modeli.

Bu sensör tasarımı için, empedans değeri termistör direncinin bir fonksiyonu olarak değişkenlik göstermektedir. RLC devrelerinde bobinlerin rezonansa çalışabilmesi ve güç aktarımının yüksek verimlilikte yapılabilmesi için devreye seri olarak harici kapasitörler bağlanmaktadır. İzole edilmiş iki devre arasındaki sinyal transferinin temeli, zamanla değişen bir manyetik alan tarafından üretilen elektromotor kuvvet (emf) gerilim kaynağına dayanmaktadır (Bicakcı & Sis, 2017).

Faraday yasası olarak da bilinen bu kavramda, karşılıklı endüktansa dayanan bir birleştirme devresi oluşturmak için indüktörler kullanılmaktadır (Sis & Kavut, 2018). Transformatörün çalışma prensibine benzer şekilde, birincil devrede değişen akım sayesinde, ikincil devrede bir yük ile çıkış akımı üretmek için AC voltajı indükleyen manyetik akı üretilecektir. Bobin bulunan iki RLC devresinin, manyetik kuplaj ile birbirine bağlanması karşılıklı endüktans ( $M$ ) aracılığıyla gerçekleşmektedir (Chaimanonart, 2009).

Şekil 2.1’de gösterilen  $V_S$  güç kaynağına bağlı devre modelindeki tüm  $R$ ,  $L$  ve  $C$  parametreleri çevrim geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmadaki sensör devresinde, harici ve iç bobinleri eşdeğer olup, endüktans değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$L_1 = L_2 = N^2 \mu_o \sqrt{(r-a)(r+a)} \left[ \left( \frac{2}{k} - k \right) K(k) - \left( \frac{2}{k} \right) E(k) \right] \quad (2.1)$$

burada  $K$  ve  $E$ , birinci ve ikinci dereceden tam eliptik integrallerdir;

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 2\beta}} \quad (2.2)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} d\beta \sqrt{1-k^2 \sin^2 2\beta} \quad (2.3)$$

$\mu_o$ ,  $N$ ,  $a$  ve  $r$  sırasıyla havanın manyetik geçirgenliği, sarım sayısı, kablunun yarıçapı ve bobinin yarıçapını ifade etmektedir. Eğer bobinlerin sargıları dairesel kesitli teller yerine PCB üzerine basılı yollarla düzlemsel iletkenler olarak üretilirlerse, bu düzlemsel iletkenin kesiti dikdörtgensel olacaktır. Kenar uzunlukları  $l$  ve  $h$  olan dikdörtgen kesitli bir telin yaklaşık olarak aynı elektriksel özellikleri sağlayacak  $a$  yarı çaplı bir tel eşleniği her iki kesit için alanları eşitleyerek aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$\pi a^2 = lh \quad (2.4)$$

Şekil 2.1'de gösterilen bobinlerin rezonansa çalışabilmesi ve güç aktarımının yüksek verimlilikte yapılabilmesi için devreye seri bağlanan kapasitörlerin  $C_1$  ve  $C_2$  değerleri, tasarım frekansında rezonansı sağlayacak şekilde seçilmektedir. Rezonans frekansı, sensörün frekans tepkisinde ani bir değişimin görüldüğü noktayı göstermekte ve şu şekilde hesaplanmaktadır (Sis & Kavut, 2018):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.5)$$

Modeldeki  $R_{1,2}$  toplam kayıp rezistansı olup, radyasyon ( $R_r$ ) ve iletken ( $R_c$ ) kayıplarını temsil eden dirençlerin toplamına eşittir.  $R_r$  ve  $R_c$  her iki bobin devresi için sonlu iletkenlikten ve elektromanyetik ışımadan dolayı oluşan kayıpları temsil etmekte ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:



$$R_c = \frac{2\pi r N}{2\pi a} \sqrt{\frac{\mu_o \omega}{2\sigma}} \quad (2.6)$$

$$R_r = 20N^2\pi^2 \left(\frac{2\pi r}{\lambda}\right)^4 \quad (2.7)$$

$$R_{1,2} = R_c + R_r \quad (2.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $\omega$  radyal frekans,  $\lambda$  çalışma frekansındaki dalga boyu ve  $\sigma$  telin iletkenliğidir.

Bobin bulunan iki RLC devresinin bağlanmasını sağlayan, manyetik kuplajı temsil eden karşılıklı endüktans ( $M$ ) bobin geometrisine bağlı olup, bobinler arasındaki mesafenin ( $d$ ) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$M = \mu_o \sqrt{(r_1)(r_2)} \left[ \left(\frac{2}{l} - l\right) K(l) - \left(\frac{2}{l}\right) E(l) \right] \quad (2.9)$$

$$l = \sqrt{\frac{4(r_1)(r_2)}{(r_1 + r_2)^2 + d^2}} \quad (2.10)$$

burada  $K$  ve  $E$ , 2. ve 3. denklemlerde olduğu gibi birinci ve ikinci dereceden eliptik integrallerdir. 10. denklemdaki  $r_1$  ve  $r_2$  ile harici ve iç bobinin yarıçapı ifade edilmektedir. Şekil 2.1'de gösterilen girişinde  $R_s$  kaynak direnci olan bir RF kaynak ve çıkışına bir  $R_L$  yükü bağlanan devre modelinin güç aktarım verimliliği  $\eta$ , yüke aktarılan gücün ( $P_L$ ) kaynağından temin edilen güce ( $P_{AVS}$ ) oranı olarak şu şekilde hesaplanmaktadır (Sis & Kavut, 2018):

$$\eta = \frac{4R_s R_L \omega^2 M^2}{x_1^2 + x_2^2} \quad (2.11)$$

$$x_1 = [(R_1 + R_s)(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) + (R_2 + R_L)(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})] \quad (2.12)$$

$$x_2 = [(R_1 + R_s)(R_2 + R_L) - (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) + \omega^2 M^2] \quad (2.13)$$

## 2.2 Kuplajlanma Çeşitleri

Manyetik bağlaşımla kablosuz pasif bir endüktif kapasitif (L-C) sensöründeki iki RLC devresinde bulunan bobinlerin, manyetik kuplaj ile birbirine bağlanması  $M$  değerine bağlı olarak zayıf kuplajlanma veya güçlü kuplajlanma rejimi ile adlandırılan iki farklı rejimde gerçekleşmektedir.

### 2.2.1 Zayıf Kuplajlanma Rejimi

Bobinler arası mesafenin belli bir mesafenin üzerinde olması durumu ya da diğer bir ifadeyle bobinler arası karşılıklı endüktansın ( $M$ ) belli bir değer altındaki durumda sistemin çalıştığı rejimdir. Şekil 2.1'deki devre modelinde gösterilen parametreler göz önünde bulundurulduğunda, zayıf kuplajlanma rejimi için  $M$ 'nin sağlaması gereken koşul aşağıdaki gibidir:

$$\omega M < R_1 + R_L \quad (2.14)$$

### 2.2.2 Güçlü Kuplajlanma Rejimi

Bobinler arası mesafenin belli bir değer altındaki kalması ya da karşılıklı endüktansın ( $M$ ) belli bir değer üzerinde olması durumudur. Şekil 2.1'deki devre modelinde gösterilen parametreler göz önünde bulundurulduğunda, güçlü kuplajlanma rejimi için  $M$ 'nin sağlaması gereken koşul aşağıdaki gibidir:

$$\omega M > R_1 + R_L \quad (2.15)$$

Güçlü kuplajlanma rejiminde tepe verimliliği mesafeden ve buna bağlı olarak karşılıklı endüktans değerinden bağımsızdır. Bu rejimde, mesafeden bağımsız, başka bir deyişle güç aktarımında mesafe değişse bile yüke sabit bir güç sağlayabilen kuplajlanmış bobinler birçok uygulamada avantaj sağlamaktadır. Örneğin kablosuz güç transfer sistemlerinde mesafeden bağımsız verimlilik elde edilebilmesi için RF kaynak frekansının karşılıklı endüktans ( $M$ ) değeri ile değişkenlik gösteren  $\omega_{tek}$  veya  $\omega_{çift}$ 'den birine ayarlanması gerekmektedir (Bicakcı & Sis, 2017).

### 2.2.3 Kuplaj Katsayısı ( $k$ )

Bobinler arası manyetik kuplajlanmayı belirleyen diğer bir kavram olan kuplaj katsayısı  $k$ , endüktif sistemlerinin kablosuz aralığını belirleyen bir faktör olup, 0 ile 1 arasında

değişkenlik göstermektedir. Kuplaj katsayısının 0 olması bobinler arası hiçbir manyetik bağlantının bulunmadığı, 1 olması ise harici bobin devresinde üretilen tüm manyetik akının sensör bobin devresine aktarıldığı anlamına gelmektedir ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Wang & Chen, 2008):

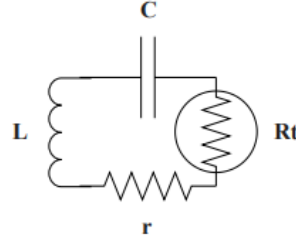
$$k(d) = \frac{M(d)}{\sqrt{L_R L_S}} \quad (2.16)$$



### 3. BOBİN SİMÜLASYONU, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

#### 3.1 Gelişmiş Tasarım Sistemi (ADS) Tasarımı

İkinci bölümde eşdeğer devre modeli anlatılan kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sıcaklık sensöründe, harici (algılama) ve iç (sensör) bobini olarak görev yapan dairesel bobinli iki RLC devresinden birisi olan ve sıcaklık algılama elemanı olarak termistör içeren sensör bobin devresi şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Seri RLC devresi.

Burada  $L$ , endüktans,  $C$ , kapasitans,  $R_t$ , termistör direncini ve  $r$ , bakır bobin direncini temsil etmektedir (Xie, Wang, Dong, Deng, & Huang, 2019). Devrenin empedansı olan  $Z_S$  ise şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Z_S(j\omega) = r + R_t + j(X_L - X_C) \quad (3.1)$$

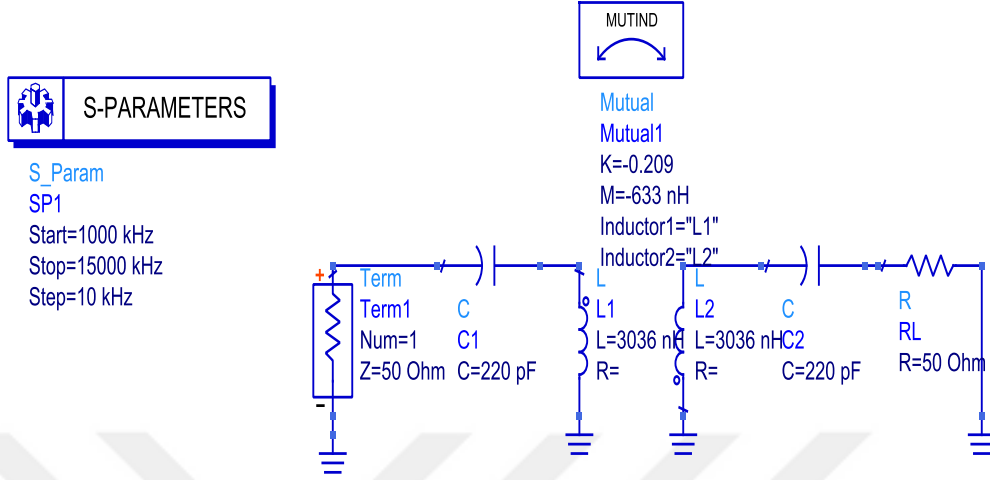
Yukarıdaki denklemde yer alan endüktif reaktans,  $X_L$  ve kapasitif reaktans,  $X_C$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$X_L = 2\pi f_o L \quad (3.2)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_o C} \quad (3.3)$$

Beş sargılı dairesel bobinlerin yer aldığı iki RLC devresi, ADS ve Ansys-Maxwell-14.0 programlarında tasarlanıp sıcaklık değişimlerinin izlenmesi için en ideal parametre değerleri belirlendikten sonra baskılı devre kartı (PCB) üzerine basılarak üretilmiştir.

Sensör devresinin ADS programı üzerinde simülasyonu Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



**Şekil 3.2:** Kablosuz pasif sıcaklık sensörü ADS devresi.

Bu devrede,  $C_1$  ve  $C_2$  kapasitörleri, harici bobin devresinin rezonans frekansını sensör bobin devresinin rezonans frekansına yakın tutarak önemli ölçüde sinyal artışı sağlamak amacıyla bobinlere seri şekilde bağlanmıştır (Karipott, 2017). Rezonans frekansı ve yansıma katsayısı değişimlerinden yararlanılan sıcaklık izlemesinde, takibin yapılabilmesi için yansıma katsayısının ve yansıma katsayısının minimum noktası olan frekansın gözle görülür değişim göstermesi istenmektedir.

Devrede  $L_1=L_2=3036$  nH,  $C_1=C_2=220$  pF ve  $R_L=50$   $\Omega$  değerlerinde parametreler seçildiğinde istenilen ideal değişimler meydana gelmektedir. Bu çalışmadaki manyetik bağlaşımla kablosuz pasif sıcaklık sensörünün devre tasarımında 50  $\Omega$ , deneyde ise ideal değere en yakın 43  $\Omega$  negatif sıcaklık katsayılı (NTC) termistör sıcaklık algılama elemanı olarak yer almakta ve devredeki toplam direncin, sıcaklığa bağlı şekilde termistör direnci olarak değişmesine neden olmaktadır. NTC termistörlerinde sıcaklıktaki artış ile direnç değeri ters orantılı olarak azalmaktadır.

Şekil 3.2’deki devre simülasyon düzeneğinin frekans aralığı da ISM bandındaki 6.5 MHz çalışma frekansını kapsayacak şekilde 1000-15000 kHz aralığında seçilmiş ve 10 kHz adımlarla değiştirilerek giriş yansıma katsayısı değişimi hesaplanmıştır (Xie, Wang, Dong, Deng, & Huang, 2019). Sıcaklık değişimlerinin takip edilebildiği ve yansıma katsayısının

minimum noktası olan rezonans frekansının elde edildiği yansıma katsayısı şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$S_{11} = \frac{V_{yansiyen}}{V_{uygulanan}} \quad (3.4)$$

Bu aynı zamanda yansıma katsayısı  $\Gamma$  ile eşdeğerdir ve  $\Gamma$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\Gamma = \frac{V_{yansiyen}}{V_{uygulanan}} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad Z_o = 50 \Omega \quad (3.5)$$

$$Z_{in} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 R_2 + Z_L} \quad (3.6)$$

$Z_{in}$ , harici bobin devresinin yani ölçüm yapılan ortamın dış kısmında, primer taraftaki terminallerinin eşdeğer giriş empedansıdır.  $Z_o$  ise kaynak empedansıdır ve devre tasarımlarında  $50 \Omega$  değerindedir.

Bir döngüde sistemde depolanan enerjinin, harcanan enerjiye oranı olan kalite faktörü (Q faktörü), kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sıcaklık sensörünün enerji iletim verimliliğini tanımlamakta ve şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Q = \frac{1}{r + R_t} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.7)$$

Yukarıda tasarımı anlatılan devrede,  $r$ ,  $L$  ve  $C$  parametreleri sabit değerdedirler. Bu sebeple kalite faktörü yalnızca termistörün  $R_t$  direncine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Termistör direncinin sıcaklık ile ilişkisi neredeyse doğrusal olup, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\Delta R_t = k \Delta T \quad (3.8)$$

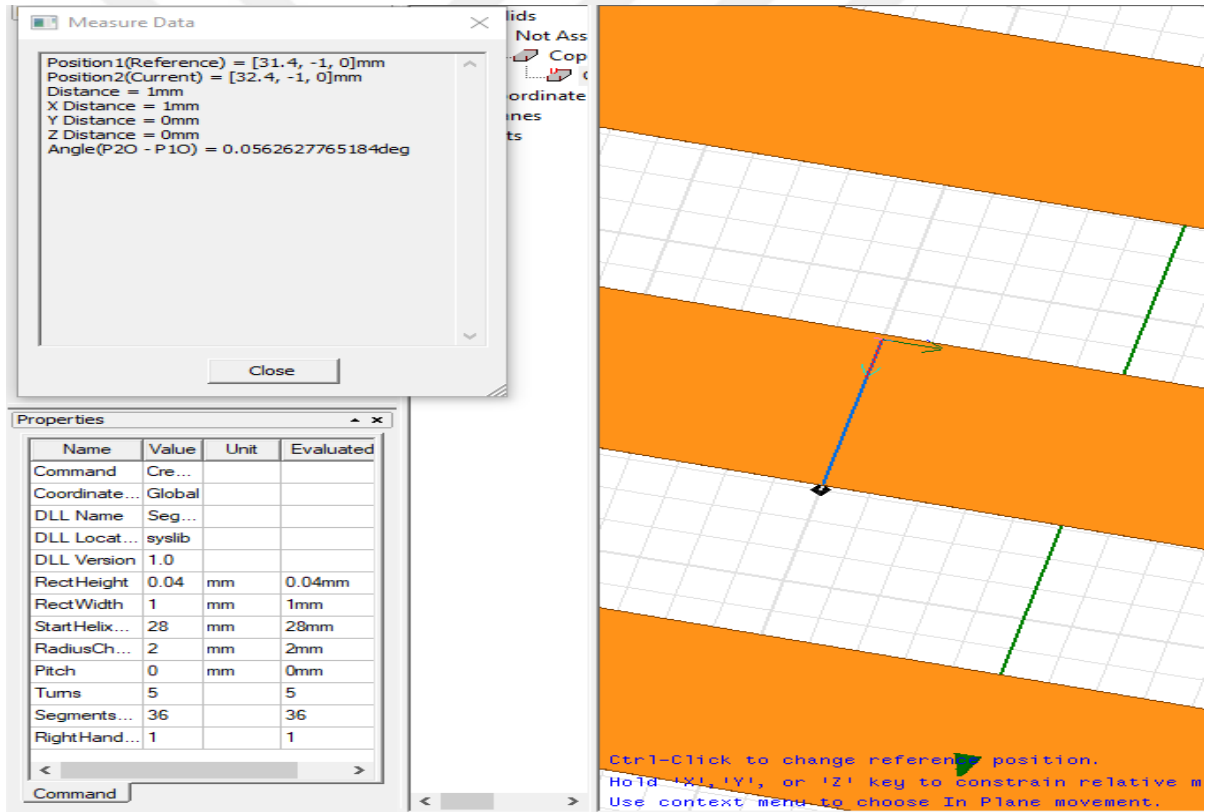
formüldeki  $k$ , NTC termistöründe negatif olan orantılılık sabitidir. Böylece sıcaklık arttıkça termistörün direnç değeri azalmaktadır. Bu çalışmadaki sensörün kalite faktörü, L-C devresindeki dirençle ters orantılı olarak değişmekte ve NTC termistörünün direnci sıcaklıktaki artışla azaldıkça, rezonansın kalite faktörü artış göstermektedir. Kalite faktörünün yüksek değerde olması, endüktif kuplaj yoluyla daha fazla güç alınması ve verilerin daha verimli bir şekilde dış alıcıya aktarılmasında avantaj sağlamaktadır. Ayrıca

sistemin daha hassas olmasına ve daha hızlı geri bildirim sağlamasına da yardımcı olmaktadır.

### 3.2 Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Simülasyonu Ansys-Maxwell-14.0 Tasarımı

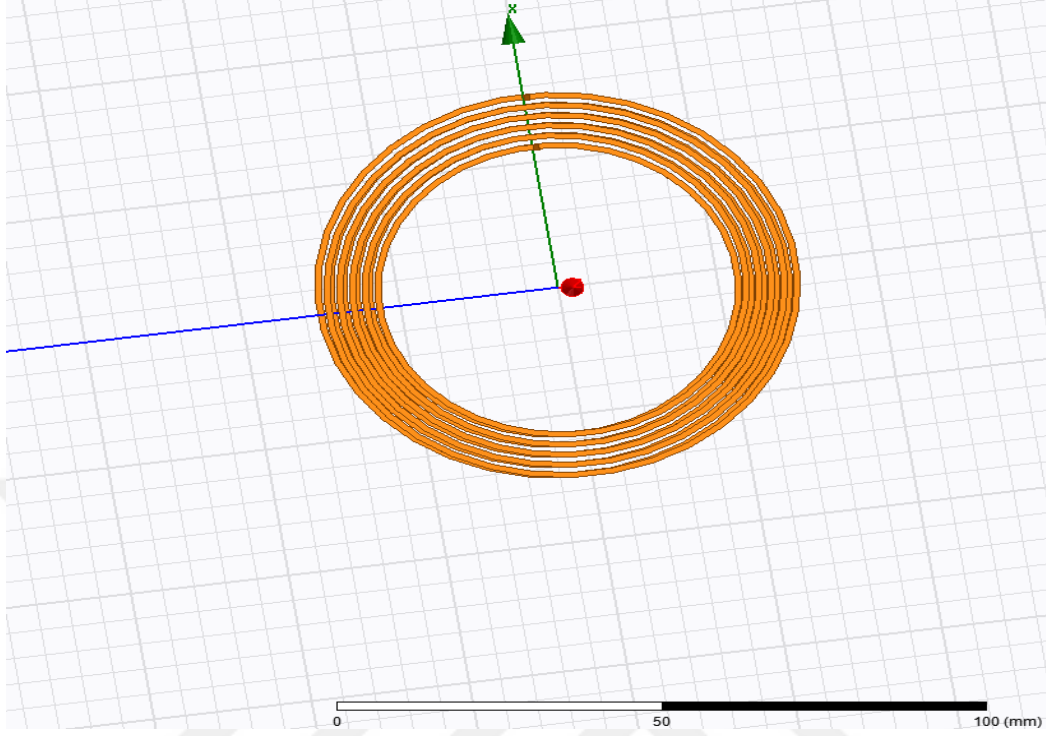
ADS tasarımı yapılan kablosuz pasif sıcaklık sensöründeki değerleri optimize edilen bobinlerin geometrilerinin tasarlanması, endüktans değerlerinin hesaplanması ve doğrulanması Ansys-Maxwell-14.0 programı ile gerçekleştirilmiştir. Bu program tasarımında bobinleri oluşturmak için 1 mm genişliğinde ve 0.04 mm yükseklikte bakır tel kullanılmıştır.

Şekil 3.3'de Ansys-Maxwell-14.0 programında çizimleri gerçekleştirilen birbirine eş harici ve iç bobinin bakır tel genişliğinin 1 mm ve yüksekliğinin 0.04 mm olduğu görülmektedir.



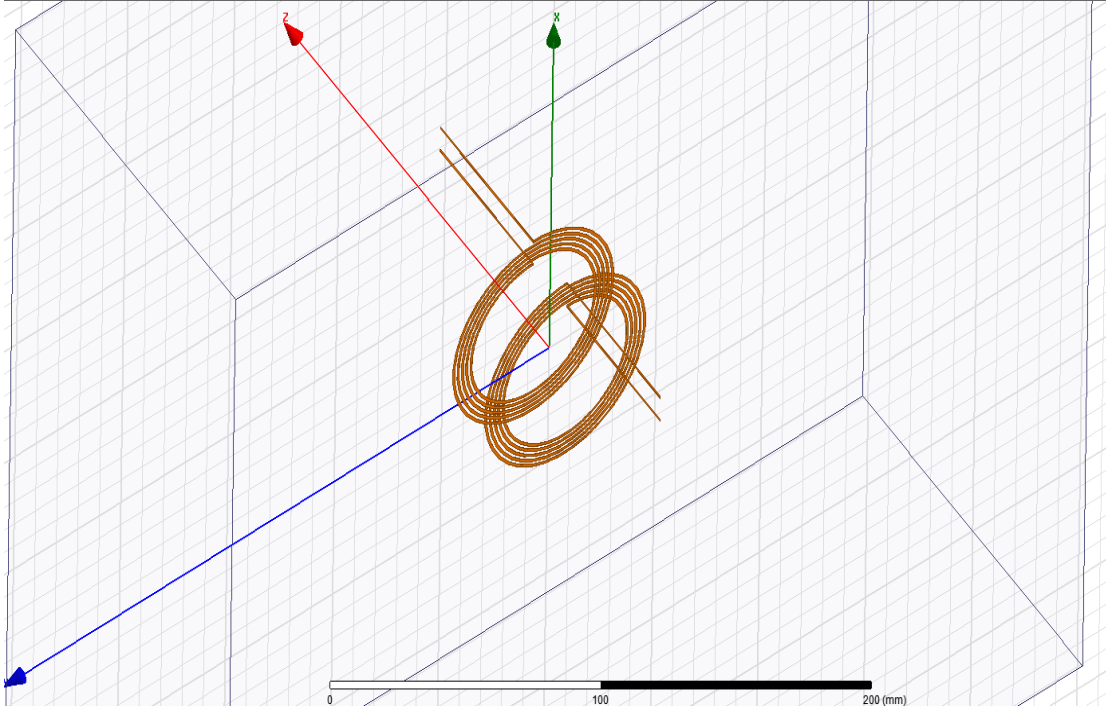
Şekil 3.3: Bobin tel genişliği ve yüksekliği.

5 sargılı eş bobinlerin akım bağlantıları yapılmadan önceki çizimi Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4: 5 sargılı bobin çizimi.

Hızalanmış bobinlerin Ansys-Maxwell-14.0 programında çizimi ise Şekil 3.5'deki gibidir.

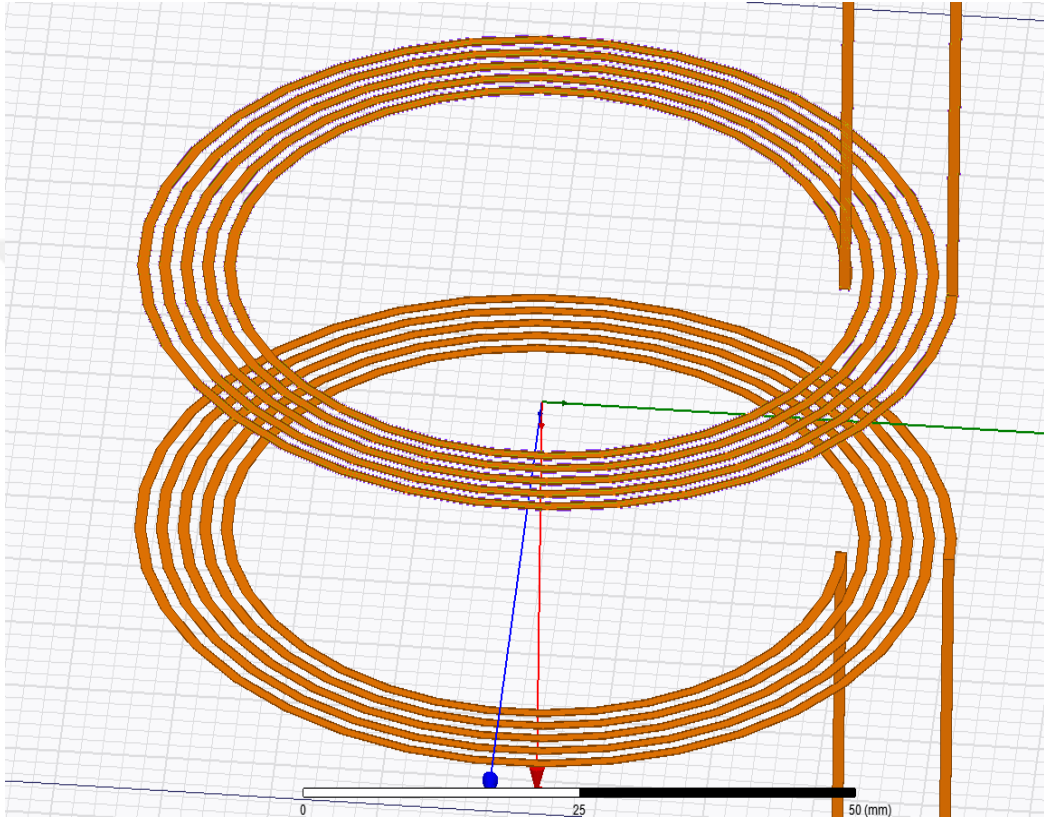


Şekil 3.5: Karşılıklı hizalanmış eşdeğer bobinler.



ADS tasarım analizlerinde, sıcaklık takibinin yapılabilmesi için yansıma katsayısının ve minimum noktası olan rezonans frekansının fark edilir değişim gösterdiği parametre olan 3036 nH endüktans değerini sağlayan bobinler arası mesafe 11 mm olarak belirlenmiştir. Bu mesafeye göre bobinler hizalanmıştır.

Şekil 3.6'da aynı bobinlerin ters yönde yerleştirilmiş ve daha yakından gösterimleri verilmektedir.



**Şekil 3.6:** Ters yönde yerleştirilmiş bobinler.

Şekil 3.7’de 0.04 mm yüksekliği ve 1mm genişliğinde çizimi yapılan ideal bobinlerin özellikleri verilmektedir.

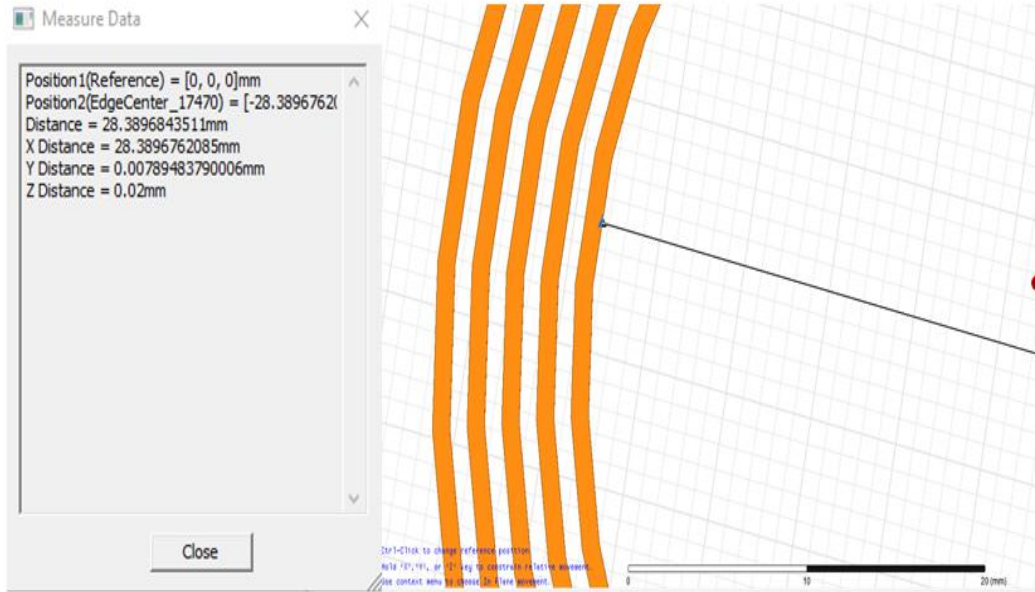
Properties: Circular Spiral Inductor\_6son - Maxwell3DDesign1 - Modeler

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreatePolyline			
Coordinate Sys...	Global			
Number of points	2			
Number of cur...	1			
-Cross Section				
Type	Rectangle			
Orientation	Auto			
Width/Diameter	0.04	mm	0.04mm	
Top Width	0	mm	0mm	

Show Hidden

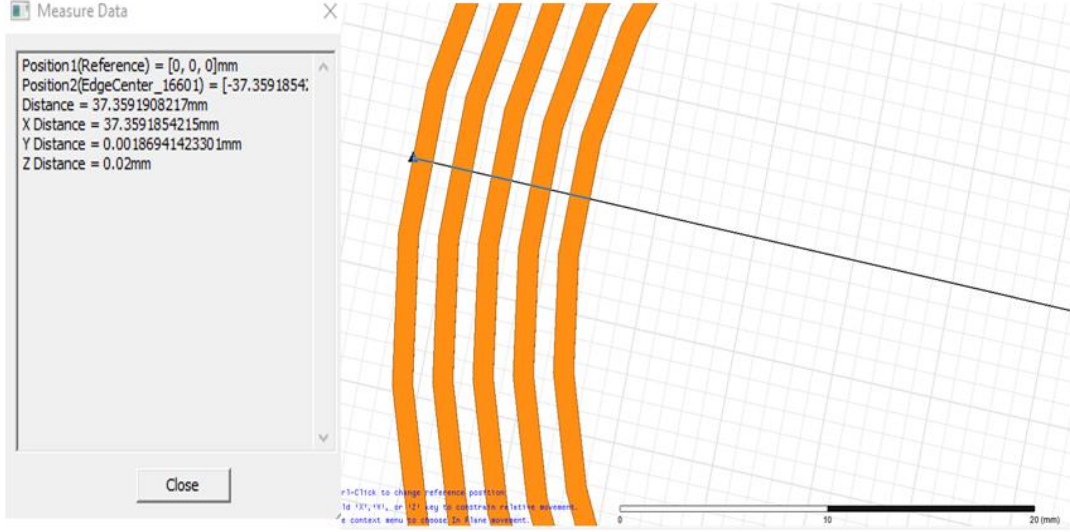
Şekil 3.7: Bakır bobin özellikleri.

3026 nH endüktans değerinin sağlanması için bobinlerin sahip olması gereken iç yarıçapı Şekil 3.8’de gösterildiği gibi yaklaşık 28.39 mm dir.



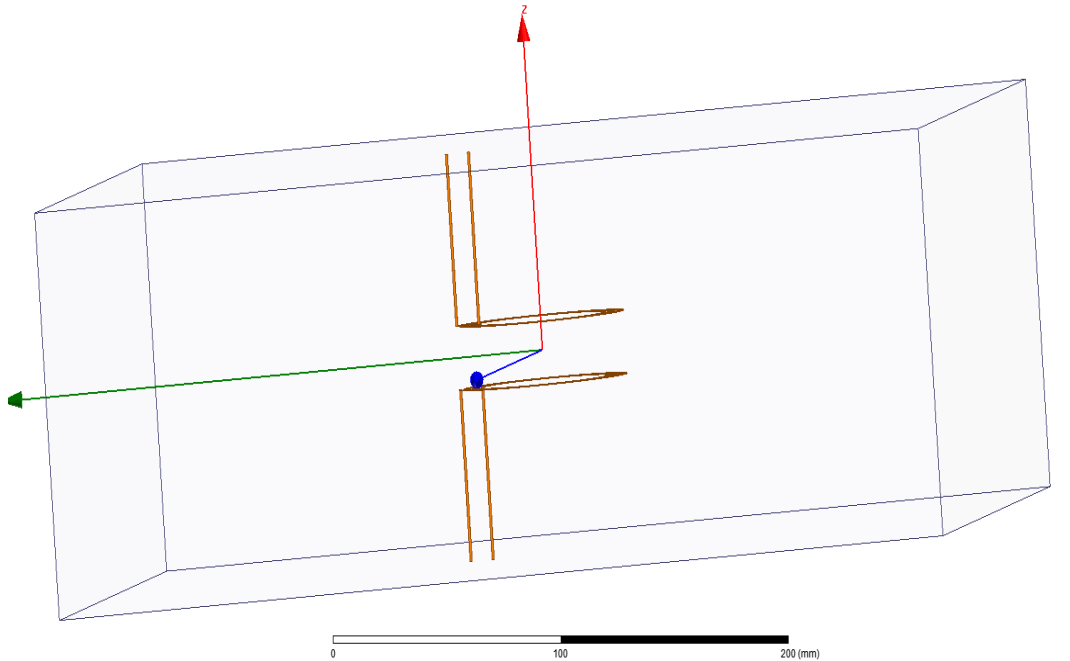
Şekil 3.8: Bobin iç yarıçapı.

Bobinlerin dış yarıçapı ise Şekil 3.9’da gösterildiği gibi yaklaşık 37.36 mm olması gerekmektedir.



Şekil 3.9: Bobin dış yarıçapı.

11 mm mesafede bulunan karşılıklı hizalanmış bobinlerin Ansys-Maxwell-14.0 çizimi Şekil 3.10’da gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Hava malzemeli kutu içine yerleştirilmiş bobinler.

Şekil 3.11’de özellikleri gösterilen 400 mm x 400 mm x 120+2dz boyutlarındaki malzemesi hava seçilmiş kutu içine bobinler yerleştirilmiştir.

Properties: Circular Spiral Inductor\_6son - Maxwell3DDesign1 - Modeler

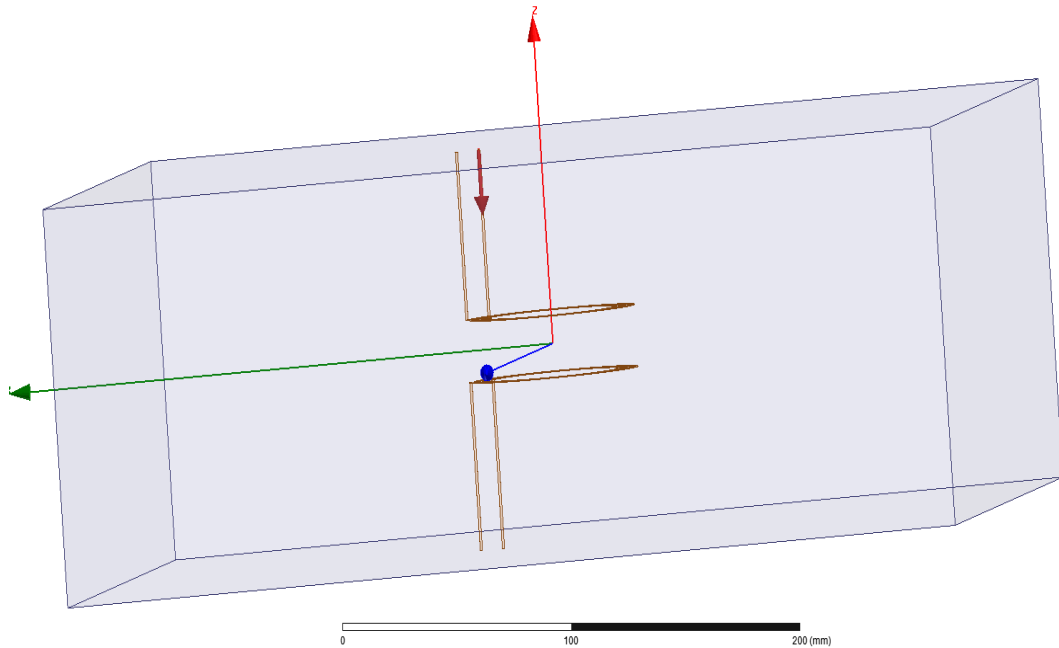
Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateBox			
Coordinate Sys...	Global			
Position	-200mm , -200mm , -60mm-dz		-200mm , -200m...	
XSize	400	mm	400mm	
YSize	400	mm	400mm	
ZSize	120mm+2*dz		142mm	

Show Hidden

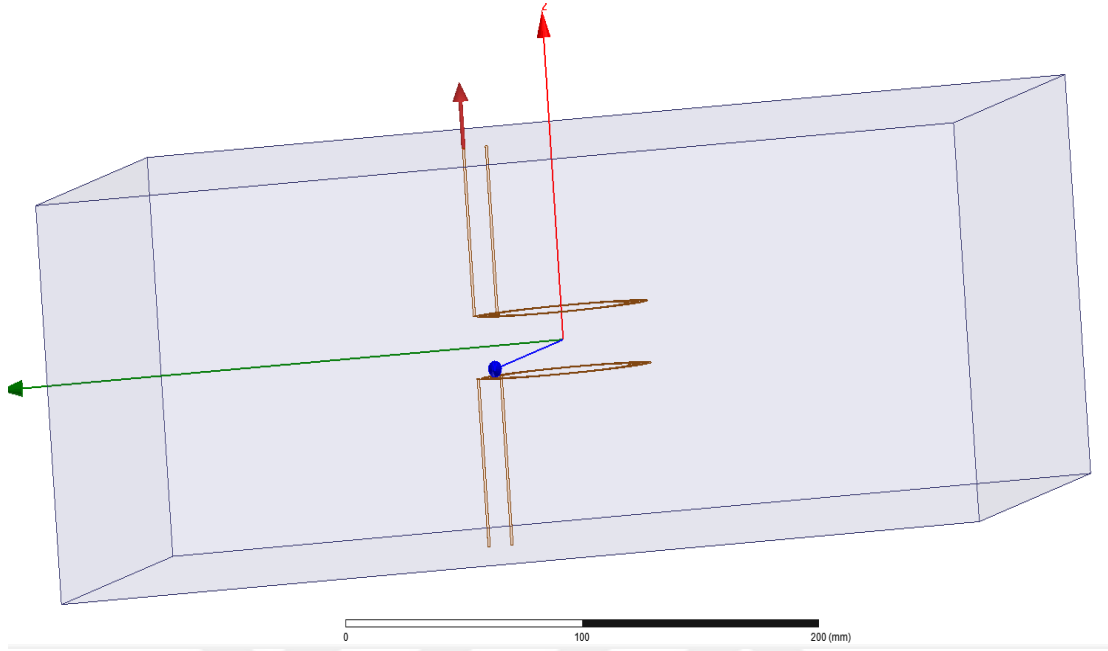
Şekil 3.11: Bobinlerin içine yerleştirildiği kutu boyutları.

dz parametresi ile bobinler arasındaki mesafeye simülasyon esnasında değişken atanmaktadır ve kutunun boyutu bu mesafeye göre değişiklik göstermektedir. Şekil 3.12’de bobinlerden birisinin bir ucuna uygulanan 1 A giriş akımının yönü ok ile gösterilmektedir.



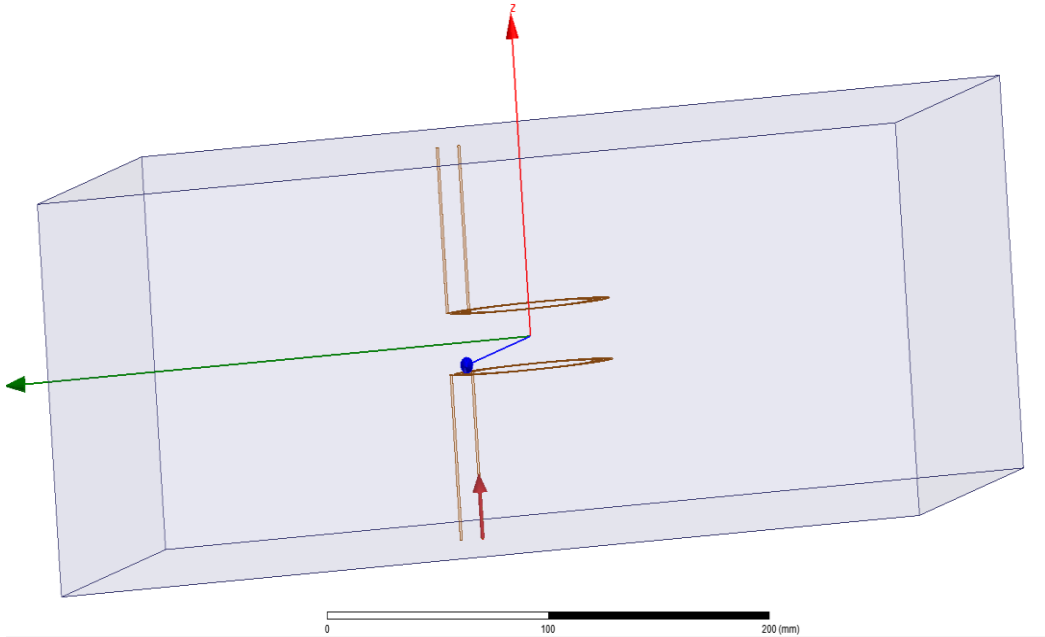
Şekil 3.12: Bobinin 1 A giriş akımı.

Şekil 3.13’de ise bobinin diğer ucuna uygulanmış giriş akımının çıkıştaki yönü gösterilmektedir.



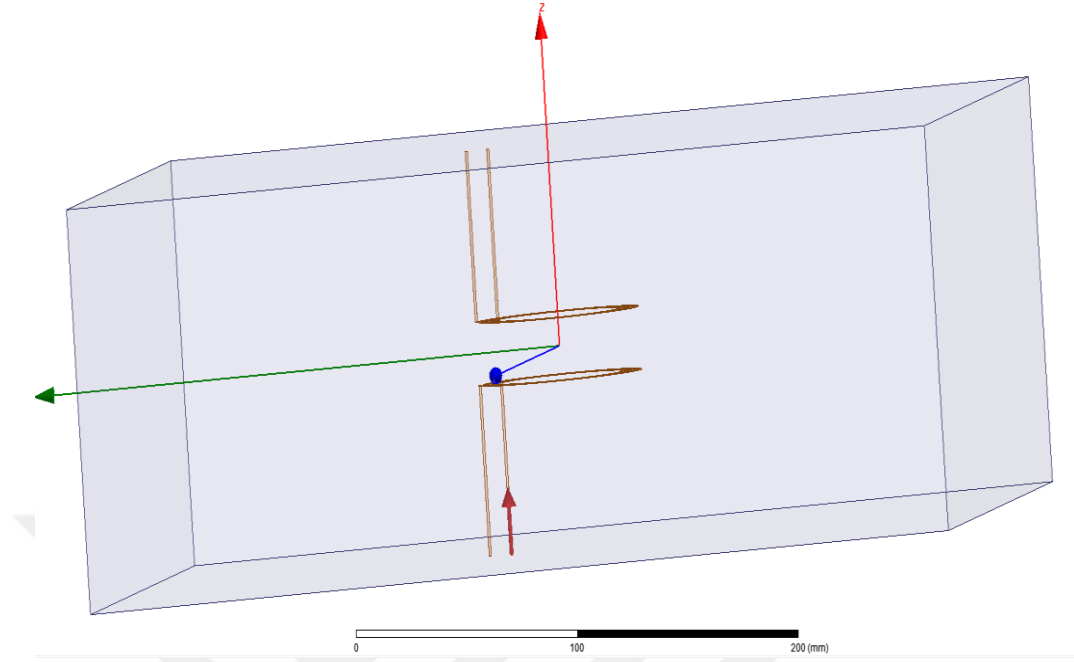
Şekil 3.13: Bobinin 1 A çıkış akımı.

Şekil 3.14’de karşılıklı hizalanmış eşdeğer diğer bobinin bir ucuna uygulanan 1 A giriş akımının yönü gösterilmektedir.



Şekil 3.14: Eşdeğer diğer bobinin 1 A giriş akımı.

Şekil 3.15’de aynı değerdeki çıkış akımının yönü gösterilmektedir.



Şekil 3.15: Bobinin 1 A çıkış akımı.

3036 nH endüktans değerini sağlayan bobinler arası mesafenin en ideal olduğu 11 mm mesafeye göre yapılan Ansys-Maxwell-14.0 programındaki hesaplamalarda kuplaj katsayısının ( $k$ ) -0.2095 ve bobinlerin endüktans değerlerinin 3036 nH olduğu Şekil 3.16’da görülmektedir

dz [mm]	Matrix1.CplCoef(Current1,Current3) Setup1 : LastAdaptive
11.000000	-0.209590
dz [mm]	Matrix1.L(Current1,Current1) [uH] Setup1 : LastAdaptive
11.000000	3.036288

Şekil 3.16: Ansys-Maxwell-14.0 tasarımı analiz sonuçları ekran görüntüsü.

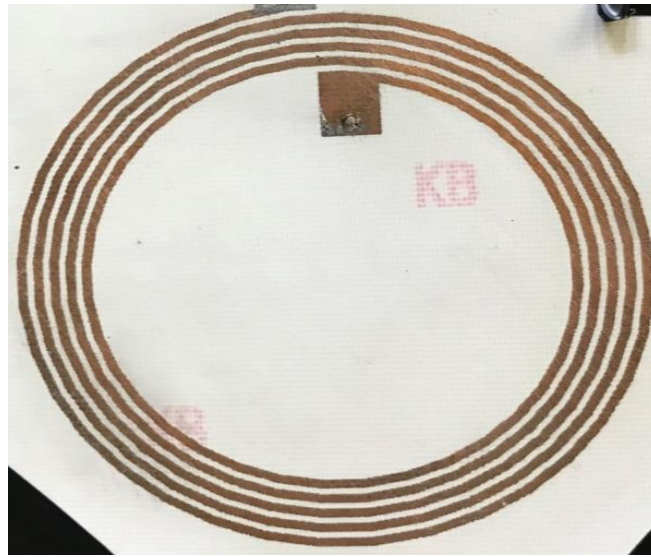
Kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sıcaklık sensörünün verimliliğini arttırmak ve iletim kaybını azaltmak için, tasarım modeli ADS ve Ansys-Maxwell-14.0 programlarında simüle edilmiş ve analizi yapılmıştır. Bu analizlere göre sıcaklık değişimlerinin takibinde

kablosuz pasif sensörün sahip olması gerekenen ideal endüktans, kapasitör, kuplaj katsayısı, bağlanma mesafesi ve karşılıklı endüktans değerleri Tablo 3.1’de sıralanmıştır.

**Tablo3.1:** Sistem parametre değerleri.

Harici Bobin Endüktansı ( $L_R$ )	3036 nH
Sensör Bobin Endüktansı ( $L_S$ )	3036 nH
Termistör Direnci ( $R_L$ )	43 $\Omega$
Harici Kapasitansı ( $C_R$ )	220 pF
Sensör Kapasitansı ( $C_S$ )	220 pF
Kuplaj Katsayısı ( $k$ )	-0209
Harici Bobin Yarıçapı ( $r_R$ )	37.36 mm
İç Bobin Yarıçapı ( $r_S$ )	37.36 mm
Bağlanma Mesafesi ( $d$ )	11 mm
Karşılıklı Endüktans ( $M$ )	-633 nH

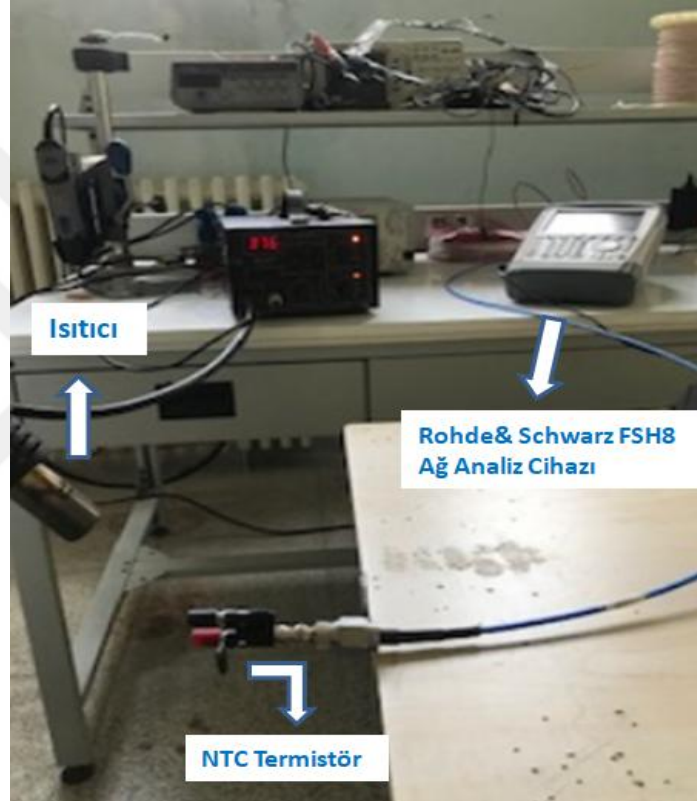
Şekil 3.17’de ise deneyde kullanılacak birbirine eş 5 sargılı dairesel harici ve iç bobinlerin baskılı devre kartına basıldıktan sonraki hali gösterilmektedir.



**Şekil 3.17:** PCB kartına basılmış bobin.

### 3.3 43 $\Omega$ NTC Termistörün Karakterizasyonu

Manyetik bağlaşımla kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sıcaklık sensörünün tasarımlarında sıcaklık algılama elemanı olarak kullanılan ve sıcaklık artışı ile direnç değeri düşen 43  $\Omega$  NTC termistörü, PCB karta basılmış sensör bobin devresine bağlanmadan önce Şekil 3.18'deki gibi kablo ile direk ağ analizör cihazına bağlanmış ve oda sıcaklığından (27,5  $^{\circ}\text{C}$ ) 100  $^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar yaklaşık 20  $^{\circ}\text{C}$ 'lik adımlarla arttırılarak ağ analizör cihazı ekranından izlenebilen sıcaklık değişim cevabı olan yansıma katsayısı grafikleri ve buna bağlı değişen rezonans frekansı ile değerlendirilmiştir.



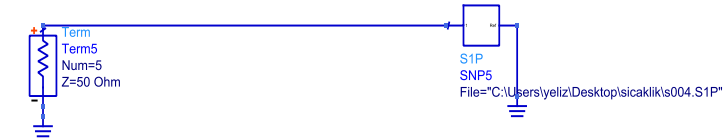
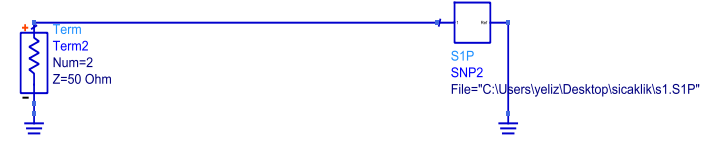
Şekil 3.18: NTC termistörün ağ analizör cihazına bağlanması.

Ağ analizör cihazında termistör sıcaklık cevapları olarak 5 noktada kaydedilen S1P dosyalarının, ADS programında termistör olan elemana yüklendiği devre Şekil 3.19'da gösterilmektedir. Bu devre analizi ile direnç değişikliklerine göre sıcaklık artışında termistör performansı değerlendirilmiştir. Sıcaklık artışı ile termistör direncinde azalma meydana geldiği net olarak görülmüştür.



### S-PARAMETERS

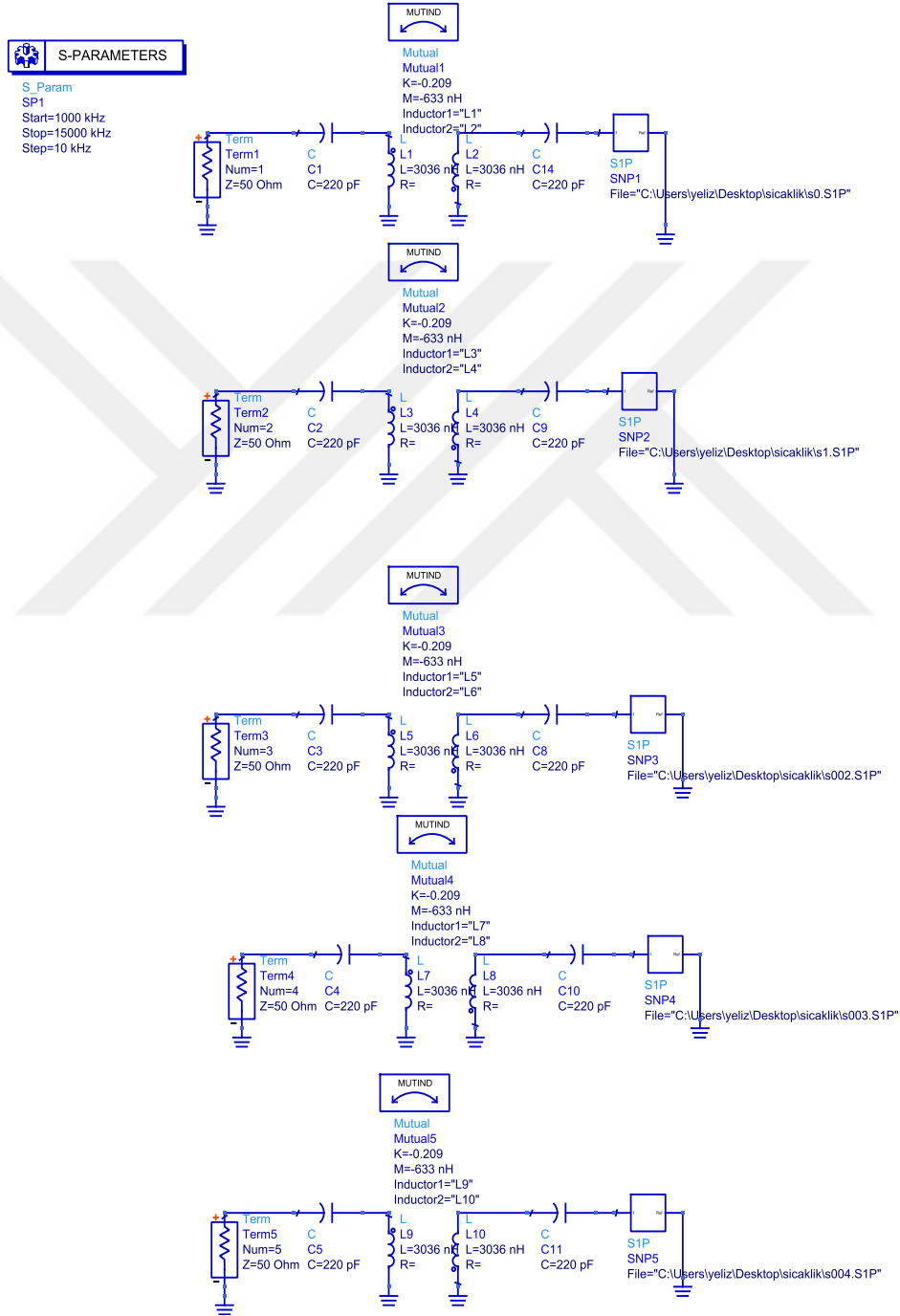
S\_Param  
SP1  
Start=1000 kHz  
Stop=15000 kHz  
Step=10 kHz



**Şekil 3.19:** S1P termistör cevaplarının ADS devresinde termistör elemanına uygulanması.

5 noktada kaydedilen S1P dosyalarının, ADS programı sensör tasarımındaki termistör olan elemana yüklendiği devre ise Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Bu devre analizi ile elde

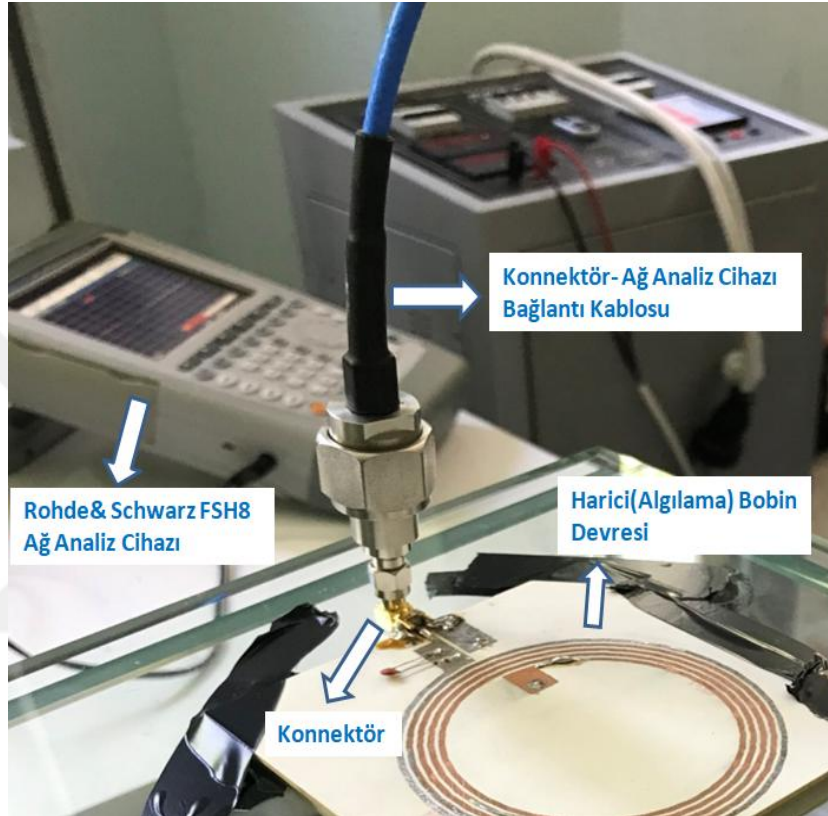
edilen yansıma katsayısındaki ve buna bağlı rezonans frekansındaki değişikliklere göre sıcaklık artışında sıcaklık sensörünün performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen yansıma katsayısı-frekans grafiği değerlendirildiğinde, bu sensör devresinin ihtiyacı karşılayacağı net olarak görülmüştür.



Şekil 3.20: S1P termistör cevaplarının ADS sensör devresine uygulanması.

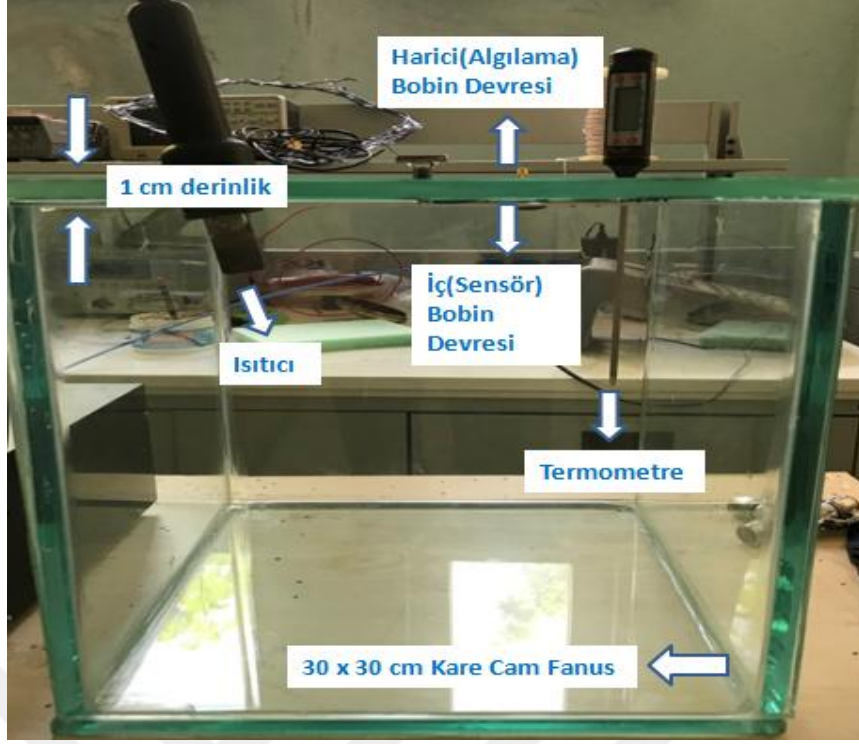
### 3.4 Bobin Devrelerinin Deney Düzeneginde Hazırlanması

Termistör tarafından algılanacak sıcaklık değişimlerinin cevabı olan frekans varyasyonlarının Rohde&Schwarz FSH8 ağ analizör cihazı ekranından izlenebilmesi için harici bobin devresi Şekil 3.21'deki gibi bir konnektör yardımıyla ağ analizör cihazına bağlanmıştır (Rodriguez & Jia, 2011).



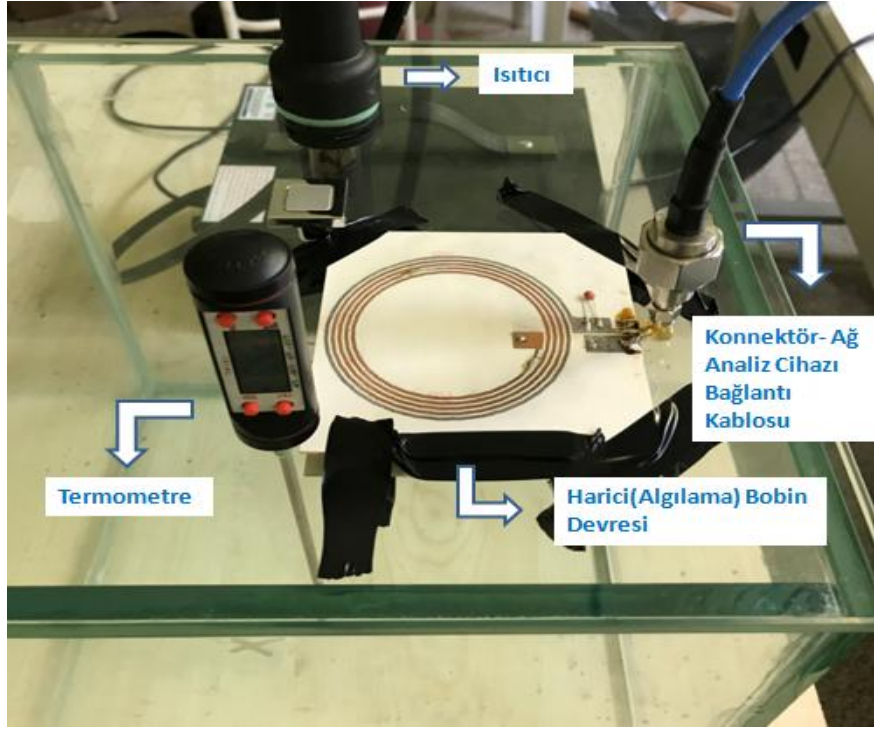
Şekil 3.21: Harici bobin devresinin ağ analizör cihazına bağlanması.

Devrede harici ve iç bobin olarak görev yapmakta olan iki bobin Ansys-Maxwell-14.0 programındaki çiziminde olması gereken 11 mm bobinler arası mesafenin sağlanması için, Şekil 3.22'deki gibi deney düzeninde harici bobin devresi derinliği 1 cm olan 30 x 30 cm boyutlarındaki kare cam fanus üzerine, iç bobin devresi ise harici devrenin tam karşısında olacak şekilde fanus içine yerleştirilmiştir.



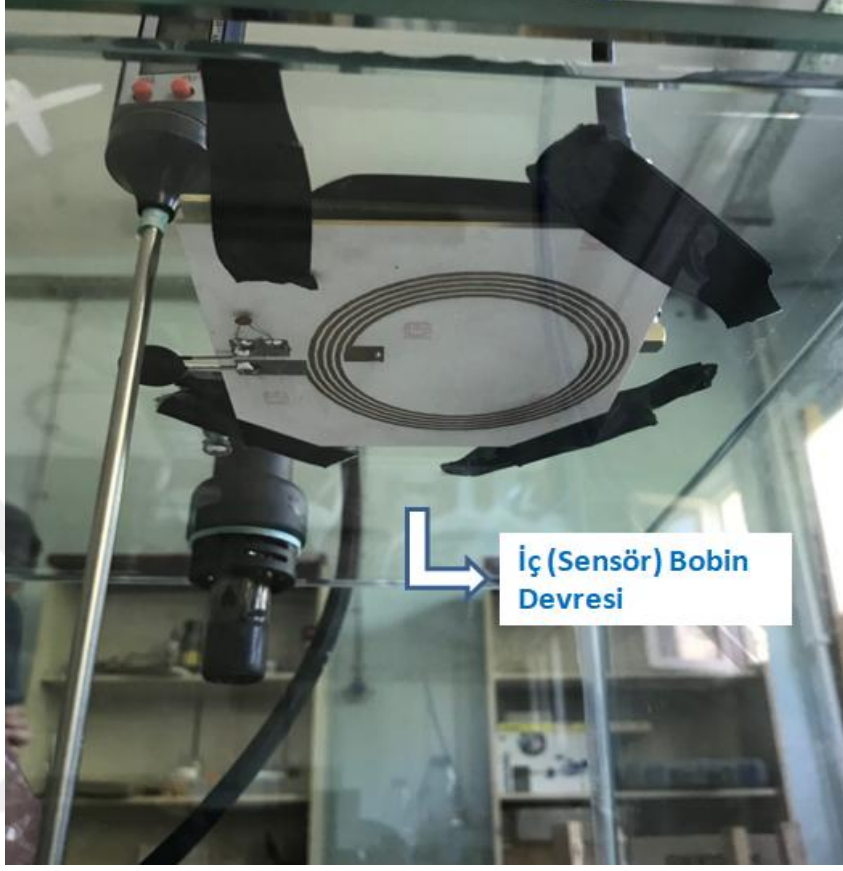
**Şekil 3.22:** Derinliği 1 cm olan cam fanusa karşılıklı hizalanarak yerleştirilmiş harici ve iç bobin devreleri.

Harici bobin devresi 30 x 30 cm boyutlarındaki cam fanus üzerine Şekil 3.23'deki gibi yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.23:** Cam fanus üzerine yerleştirilmiş harici (algılama) bobin devresi.

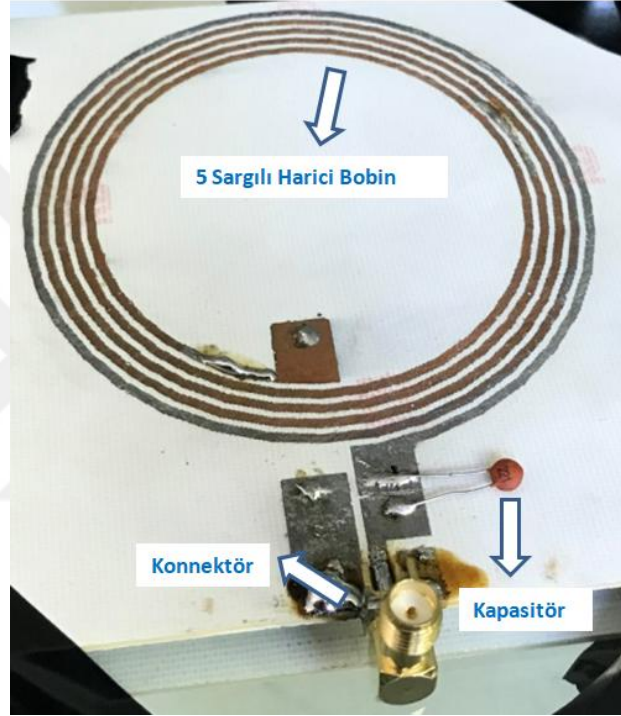
11 mm bobinler arası mesafenin sağlanması için, iç bobin devresi 1 cm derinliği olan cam fanus içine harici bobin devresinin tam karşısına hizalanarak Şekil 3.24'deki gibi yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.24:** Cam fanus içine yerleştirilmiş iç bobin devresi.

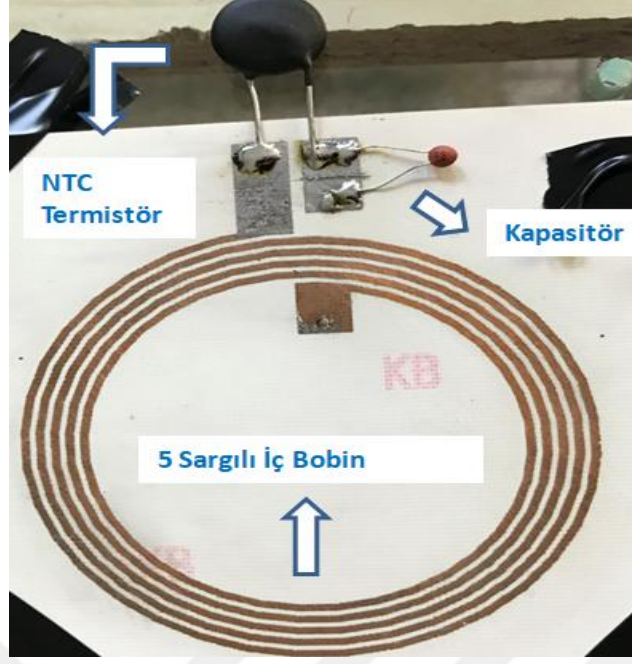
#### 4. KABLOSUZ PASİF SICAKLIK SENSÖRÜ İÇİN DENEY DÜZENEGİ

Şekil 3.17’de gösterilen PCB devre kartına bastırılmış bobinlere, tasarımda belirlenen ideal parametre değerlerine göre kapasitör, direnç, termistör elemanları ve harici bobin devresinin ağ analizör cihazına bağlanmasını sağlayacak konnektör lehimlenerek bağlanmıştır. Lehimlemelerden sonra tamamlanmış olan harici bobin devresi Şekil 4.1’de ve sensör devresi Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Harici bobin devresi.





Şekil 4.2: Sensör bobin devresi.

PCB kartı üzerinde devreler tamamlandıktan sonra, 30 x30 x 30 cm'lik küp şeklinde sıcaklığa dayanıklı özel hazırlanmış cam fanusta gerçekleştirilecek deneyler için düzenek Şekil 4.3'deki gibi hazırlanmıştır. Bobin devrelerinden, harici olanı cam fanus üzerine, sensör olanı ise tam karşısına bulunacak şekilde fanus içine sabitlenmiştir.



Şekil 4.3: Kablosuz pasif sıcaklık sensörü için deney düzeneği.

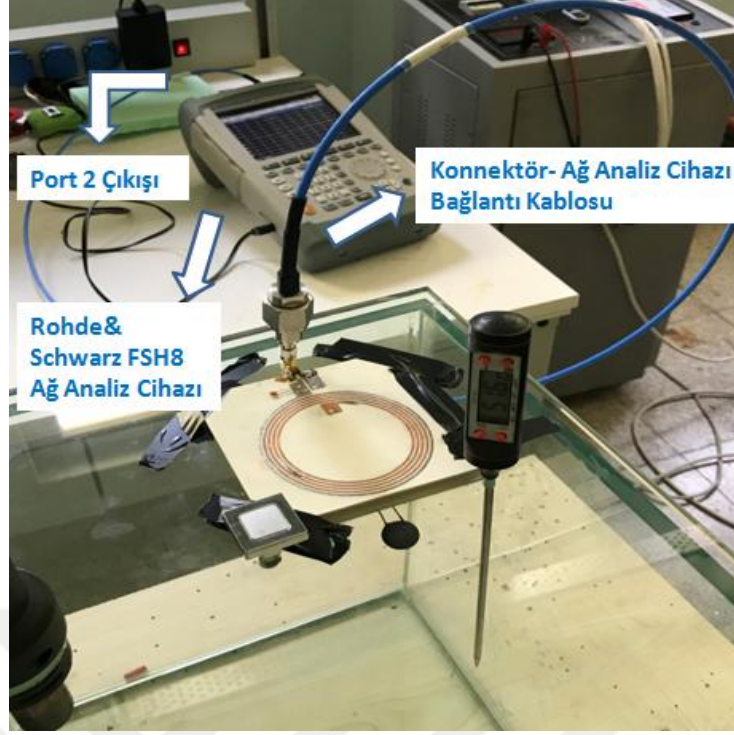
Fanus içinde sıcaklık artışını sağlayacak olan ısıtıcı ve sıcaklık takibini yapacak termometre, sensör devresindeki algılama elemanı olan termistörün yakınına yerleştirilerek düzenek oluşturulmuştur. Ağ analizörünün, harici bobin devresine bağlanmasından önce cihazın kalibrasyon işlemleri yapılmış ve daha sonra teorik olarak belirlenen ISM banttaki çalışma frekansı olan 6.5 MHz’i de kapsayacak şekilde frekans aralığı ayarlanmıştır.

Şekil 4.4’de gösterilen bir ucu harici bobin devresindeki konnektöre bağlı kablo, yansıma katsayısı parametresinin izlenmesi ve ağ analizör cihazı ekranında görüntülenebilmesi amacıyla Şekil 4.5’deki gibi cihazın Port 2 çıkışına bağlandığında kablosuz pasif devre tamamlanmıştır.



**Şekil 4.4:** Harici bobin devresi ile ağ analizör cihazı arasındaki bağlantı.





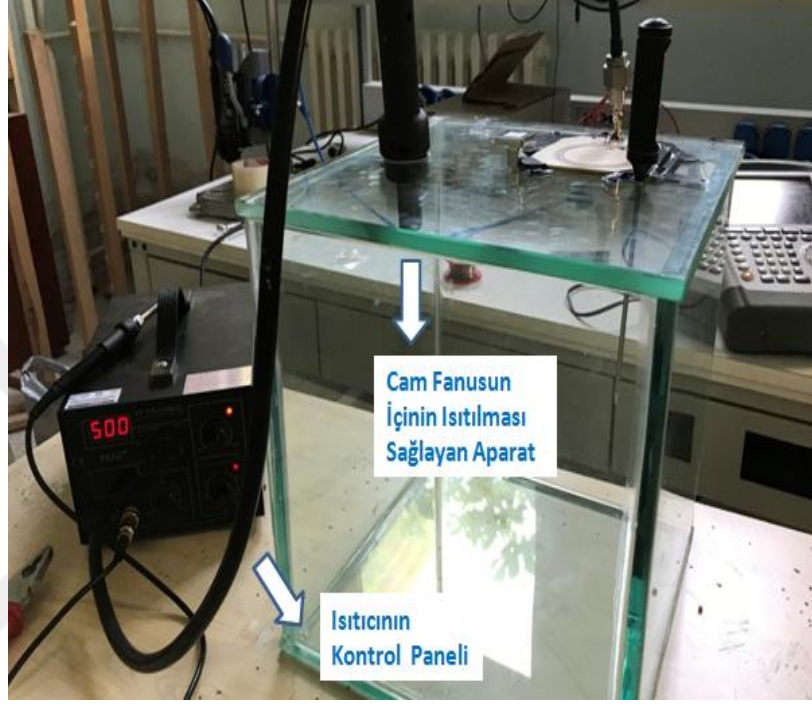
Şekil 4.5: Ağ analizör cihazı port 2 çıkışına bağlı kablosuz pasif sensör düzeneği.

Şekil 4.6'da ölçümler başlamadan önce oda sıcaklığında (27,5 °C) bulunan deney düzeneği gösterilmektedir.



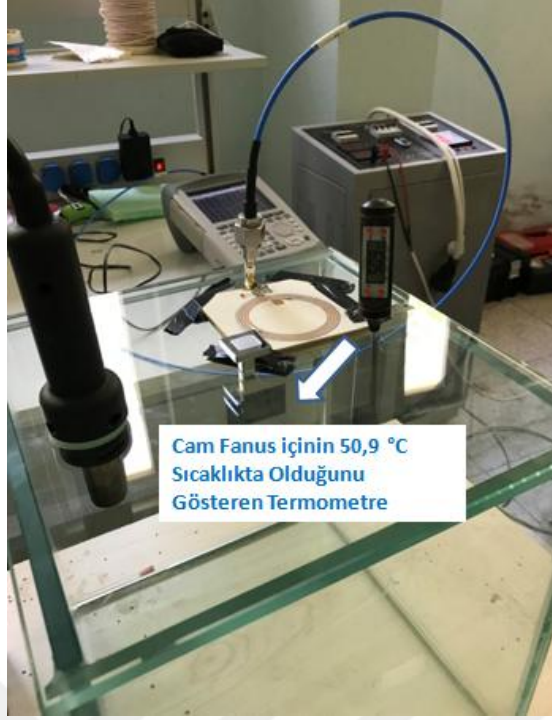
#### 4.1 Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artış Testi

Devrenin bağlantı işlemlerinin tamamlanmasından sonra, ölçümler için özel hazırlanan fanus oda sıcaklığında (27,5 °C) bulunduğundan teste 27,5 °C’de başlanmış ve Şekil 4.7’de gösterilen ısıtıcı yardımıyla 100 °C’ye kadar 10 °C’lik artışlarla sıcaklık arttırılarak test tamamlanmıştır.



Şekil 4.7: Fanus içinin ısıtılmasının sağlanması.

Yüksek sıcaklık noktası, deney için kullanılan cam fanusun dayanıklılığına göre ayarlanmıştır. Fanus, üst sınır olan 100 °C’ye kadar dayanıklı olması için fırınlanıp temperlenmiştir. Bu sebeple, oda sıcaklığından 100 °C’ye kadar ölçüm sonuçları alınmıştır. Şekil 4.8’de termometrenin üzerinde yazan değere göre fanus içinin 50,9°C sıcaklıkta olduğu ve ısıtılma sürecinin termometre yardımıyla kontrollü olarak sağlandığı görülmektedir.



**Şekil 4.8:** 50,9 °C’deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü.

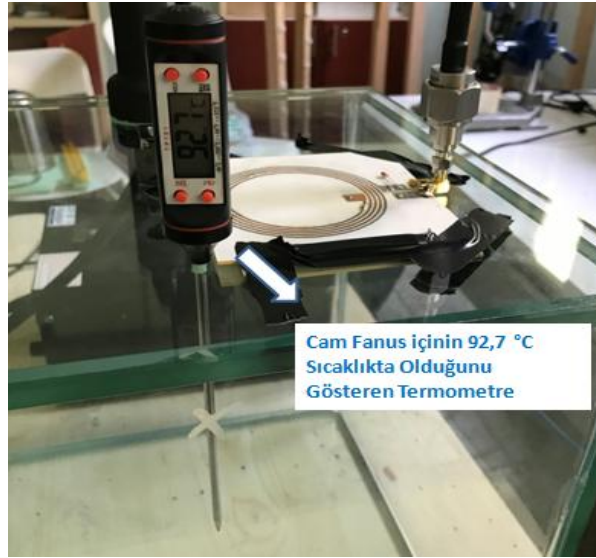
Test süresince kontrollü bir şekilde ısıtılan kablosuz pasif sensörün sıcaklık değişimine bağlı yansıma katsayısı cevabı, her adımda ağ analizör cihazı ekranından Şekil 4.9’daki gibi izlenmiş ve daha sonra sıcaklık değişimlerinin takibinde yararlanılan yansıma katsayısının ve rezonans frekansının yorumlanabilmesi için cihaza kaydedilmiştir. Yansıma katsayısının minimum olduğu nokta, sensör devresinin o sıcaklıktaki rezonans frekansını göstermektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak rezonans frekansında azalma ve bazı sıcaklıklarda kayma gerçekleşebilmektedir.



Şekil 4.9: Ağ analizör cihazı ekranından izlenebilen yansımaya katsayısı grafiği.

#### 4.2 Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Azalış Testi

Sıcaklık artış testinden sonra, 100 °C ile oda sıcaklığı (27,5 °C) aralığında sıcaklık azalış testi gerçekleştirilmiştir. Bir önceki test sonunda sıcaklığı 100 °C olan cam fanus oda sıcaklığına kadar kontrollü bir şekilde 10 °C'lik azalışlarla soğutulmuş ve bu süreçteki her adımda ağ analizör cihazı ekranı üzerinden izlenebilen yansımaya katsayısı cevapları kaydedilmiştir. Şekil 4.10'da soğutulma sürecinde 92,7°C sıcaklık değerindeki deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.10: 92.7 °C'deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü.



Şekil 4.11’de soğutulma sürecinde  $84.1^{\circ}\text{C}$  sıcaklık değerindeki deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.11:  $84.1^{\circ}\text{C}$ ’deki kablosuz pasif sıcaklık sensörü.

Sıcaklık testleri boyunca ağ analizör cihazı ekranından izlenen yansıma katsayısı grafiğine göre tek bir rezonans dip noktası olduğundan bobinlerin zayıf kuplajlanma rejiminde çalıştığı Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12: Zayıf kuplajlanma rejiminde çalışan kablosuz pasif sensör test düzeneği.

Zayıf kuplajlanma rejiminde, bobinler arası mesafe azaldıkça karşılıklı endüktans ( $M$ ) değeri ve tepe verimliliği artış göstermektedir. Güçlü kuplajlanma rejiminde ise, bobinler arası mesafenin daha da azalması ve karşılıklı endüktans ( $M$ ) değerinin artmasıyla, tepe verimlilik değeri belli bir noktaya kadar arttıktan sonra sabitlendiğinden dolayı tepe verimliliği mesafeden ve karşılıklı endüktans değerinden bağımsızdır. Bağımsız olması sayesinde mesafe değişse bile yüke sabit bir güç sağlayabilen güçlü kuplajlanma rejiminin gerçekleşmesi avantaj sağlamaktadır.

#### 4.3 Paralel NTC Termistörler Bağlı Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artış ve Azalış Testleri

Avantaj sağlayan güçlü kuplajlanmanın görülüp görülmeyeceğini tespit etmek için 3 tane  $43 \Omega$  NTC termistörü sensör devresine paralel bağlanmış ve bu devrede sıcaklık artış ve azalış testleri tekrarlanmıştır. Şekil 4.13'de bu testlerin gerçekleştirildiği düzenek gösterilmektedir. Bu düzenekte de yukarıda detaylı anlatılan sıcaklık testlerindeki tüm aşamalar aynen gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13: Üç tane  $43 \Omega$  NTC termistörlerin paralel bağlandığı test düzeneği.

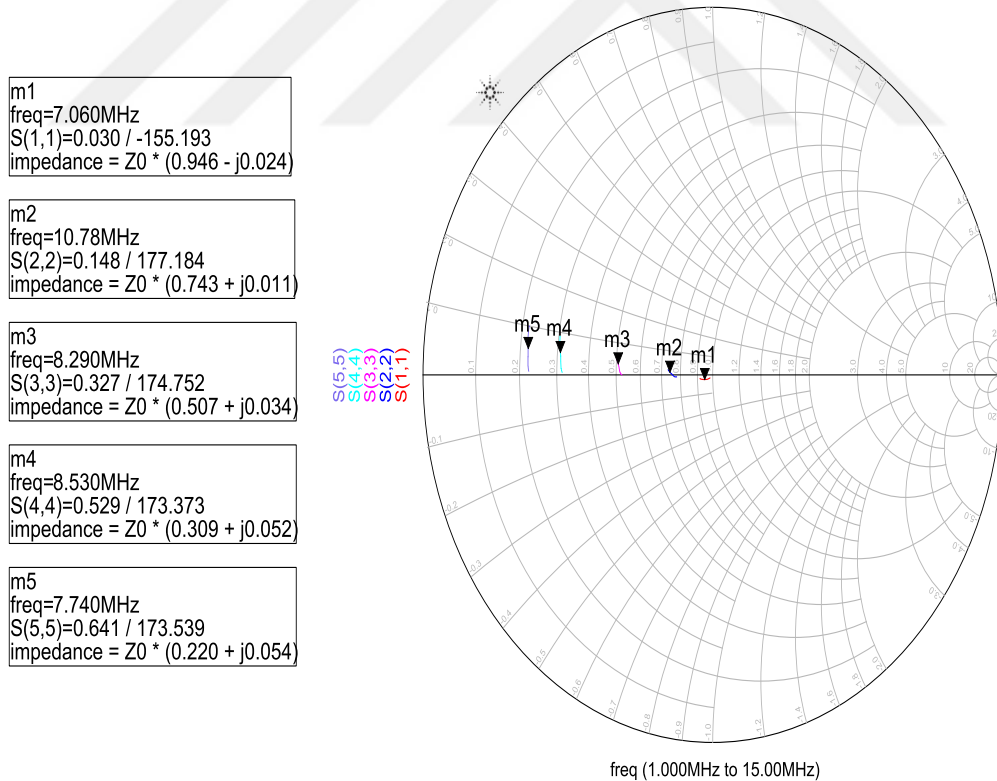
## 5. ANALİZ VE BULGULAR

Dördüncü bölümde anlatılan kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sıcaklık sensörü deney düzeneği ile sıcaklık testleri gerçekleştirilmiş ve sıcaklık izlemesi, yansımaya katsayısı ile yansımaya katsayısının minimum noktası olan rezonans frekansındaki değişiklikler değerlendirilerek yapılmıştır.

### 5.1 NTC Termistör Ölçümü Sonuçları

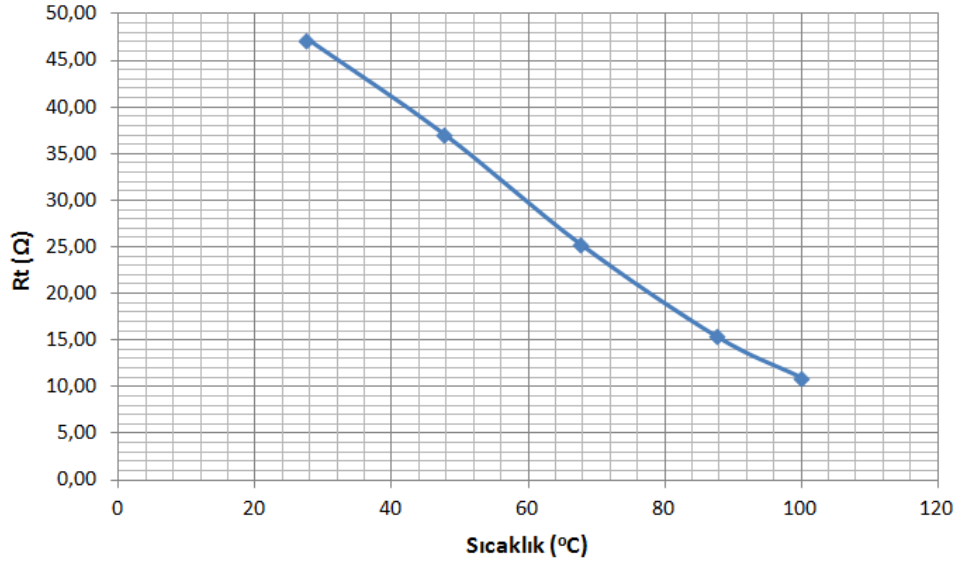
43  $\Omega$  NTC termistörün performans incelemesinde, sıcaklık oda sıcaklığından (27,5 °C) 100 °C'ye kadar yaklaşık 20 °C'lik adımlarla arttırılarak 5 noktada ağ analizör cihazına S1P uzantılı olarak kaydedilmiş değişim dosyalarının Şekil 3. 19'daki ADS tasarımında termistör elemanı yerine yüklenmesiyle smith chart grafiği elde edilmiştir.

Termistörün oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar olan sıcaklık artışında direnç değerinin 47,3  $\Omega$ 'dan 11  $\Omega$ 'a kadar azaldığı Şekil 5.1'de yer alan smith chart grafiğinde görülmektedir.



Şekil 5.1: Smith chart grafiği.

Termistörün oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar olan sıcaklık artışıdaki direnç davranışı ise Şekil 5.2'de yer alan grafikte gösterilmektedir.



Şekil 5.2: 43 Ω NTC termistörün direnç-sıcaklık grafiği.

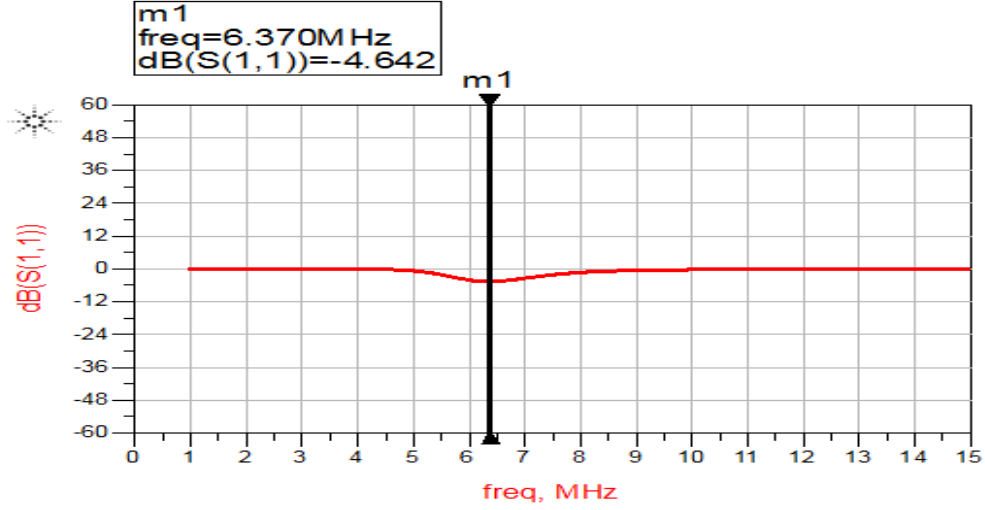
Yukarıda direnç değişim grafikleri yer alan 43 Ω NTC termistörünün, sıcaklık artışı ile direnç değerinde azalma gösterdiği ve bu çalışmadaki kablosuz pasif sıcaklık sensörü için uygun olduğu görülmektedir.

## 5.2 Kablosuz Pasif Sensörün Simülasyon Sonuçları

5.1'de sıcaklık artışında termistörün direnç davranışını değerlendirmek için ADS tasarımında termistör elemanı yerine yüklenen oda sıcaklığından (27,5 °C) 100 °C'ye kadar yaklaşık 20 °C'lik adımlarla arttırılarak 5 noktada ağ analizör cihazına S1P uzantılı olarak kaydedilmiş değişim dosyalarının, Şekil 3.21'de yer alan ADS sensör tasarımındaki termistör elemanı yerine yüklenmesiyle elde edilen yansıma katsayısı-frekans grafikleri aşağıdaki gibidir:

Sensör devresinin oda sıcaklığında ADS simülasyonunda çizdirilen yansıma katsayısı-frekans grafiği Şekil 5.3'deki gibidir.

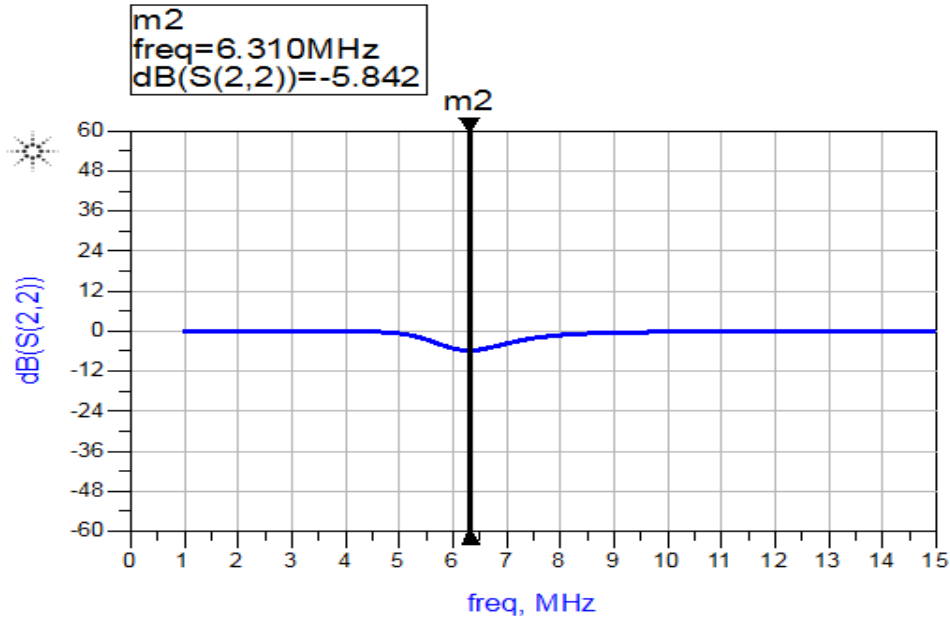




**Şekil 5.3:** Sensör devresinin oda sıcaklığındaki (27,5 °C) yansımaya katsayısı-frekans grafiği.

Bu sıcaklıkta, yansımaya katsayısının minimum noktasının -4.642 dB ve rezonans frekansını oluşturan bu noktanın frekansının 6.370 MHz olduğu görülmektedir.

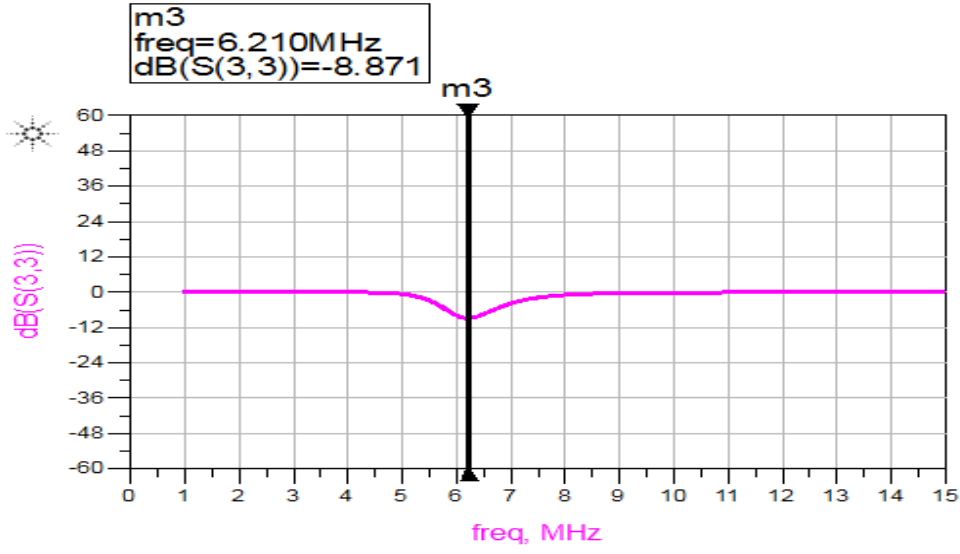
Sensör devresinin yaklaşık 47,5 °C'deki yansımaya katsayısı-frekans grafiği Şekil 5.4'de yer almaktadır.



**Şekil 5.4:** Sensör devresinin yaklaşık 47,5 °C'deki yansımaya katsayısı-frekans grafiği.

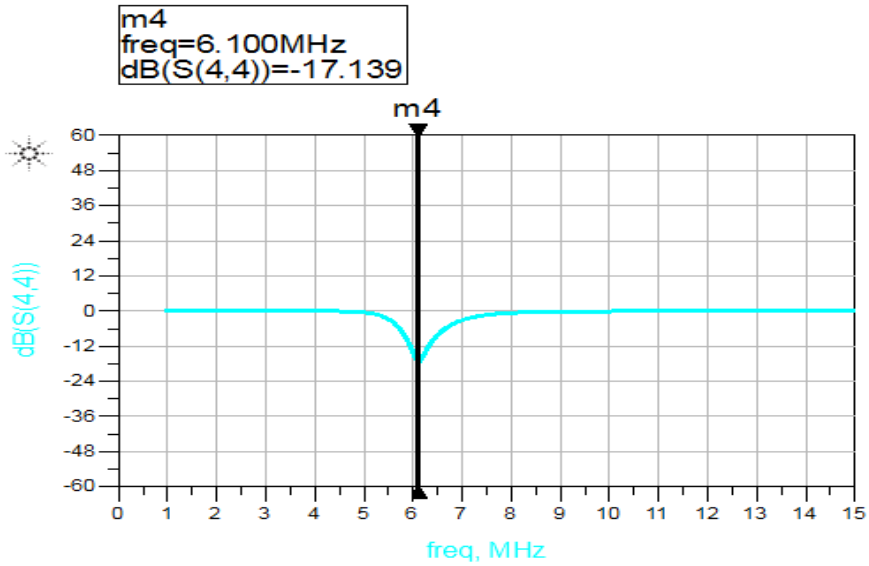
Bu sıcaklıkta, yansımaya katsayısının minimum noktasının -5.842 dB ve rezonans frekansını oluşturan bu noktanın frekansının 6.310 MHz olduğu görülmektedir.

Sensör devresinin yaklaşık 67,5 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği Şekil 5.5'de yer almaktadır.



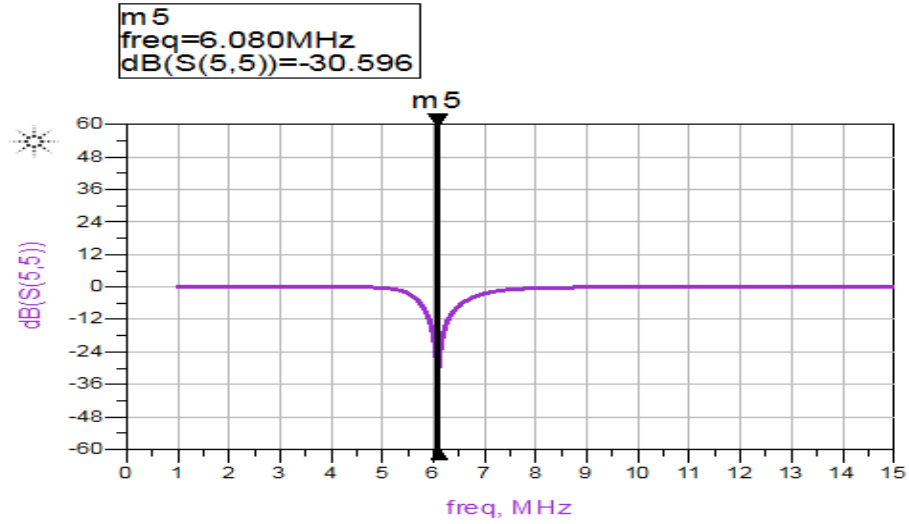
Şekil 5.5: Sensör devresinin yaklaşık 67,5 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği.

Bu sıcaklıkta, yansıma katsayısının minimum noktasının -8.871 dB ve rezonans frekansını oluşturan bu noktanın frekansının 6.210 MHz olduğu görülmektedir. Sensör devresinin yaklaşık 87,5 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği Şekil 5.6'da yer almaktadır.



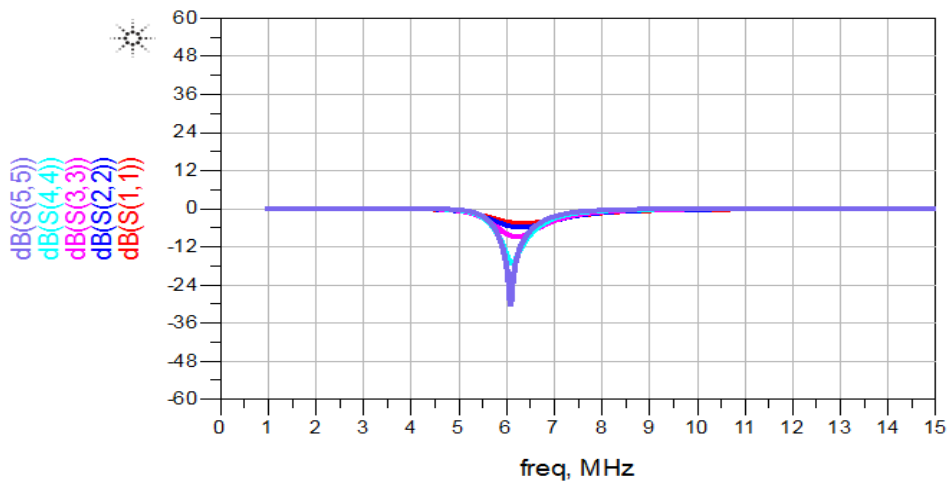
Şekil 5.6: Sensör devresinin yaklaşık 87,5 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği.

Bu sıcaklıkta, yansıma katsayısının minimum noktasının -17.139 dB ve rezonans frekansını oluşturan bu noktanın frekansının 6.100 MHz olduğu görülmektedir. Sensör devresinin 100 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği Şekil 5.7'de yer almaktadır.



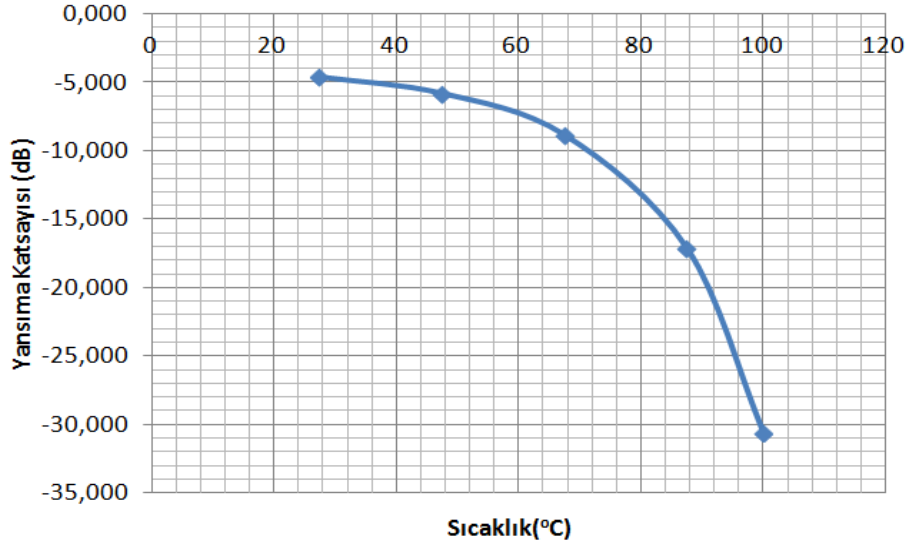
Şekil 5.7: Sensör devresinin 100 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği.

Bu sıcaklıkta, yansıma katsayısının minimum noktasının -30.596 dB ve rezonans frekansını oluşturan bu noktanın frekansının 6.080 MHz olduğu görülmektedir. Sensör devresinin oda sıcaklığından (27,5 °C) 100 °C'ye kadar sıcaklık artışındaki davranışı Şekil 5.8'de yer alan yansıma katsayısı-frekans grafiğinde gösterilmektedir.



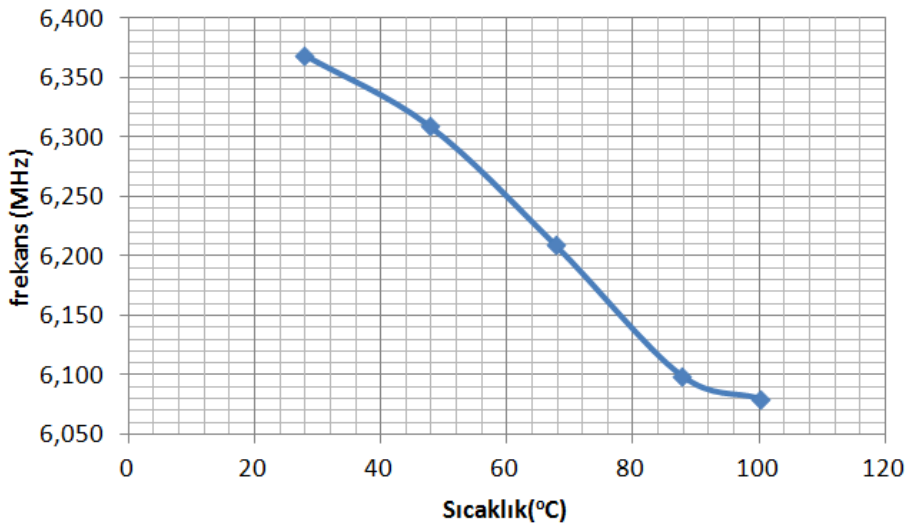
Şekil 5.8: Sensör devresinin ADS simülasyonu oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansıma katsayısı-frekans grafiği.

ADS simülasyonlarındaki yansıma katsayısı değerlerine göre, sensör devresinin oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar olan sıcaklık artışıdaki davranışı Şekil 5.9'da yer alan yansıma katsayısı-sıcaklık grafiğinde gösterilmektedir.



**Şekil 5.9:** Sensör devresinin oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansıma katsayısı-sıcaklık grafiği.

ADS simülasyonlarındaki rezonans frekansı değerlerine göre, sensör devresinin oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar olan sıcaklık artışıdaki davranışı Şekil 5.10'da yer alan rezonans frekansı-sıcaklık grafiğinde gösterilmektedir.



**Şekil 5.10:** Sensör devresinin oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği.

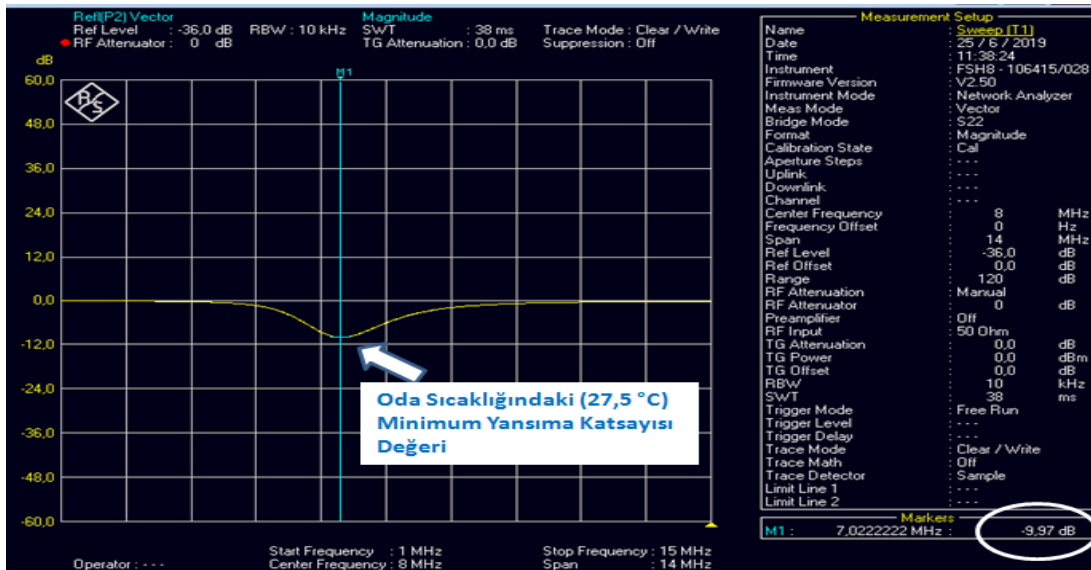
Yukarıda yansıma katsayısı-frekans, yansıma katsayısı-sıcaklık ve rezonans frekansı-sıcaklık değişim grafiklerinde sıcaklık takibinin yapılabilmesi için yansıma katsayısında ve minimum noktası olan frekansta istenilen gözle görülür değişimi gösterdiği ve bu çalışmadaki kablosuz pasif sıcaklık sensörünün sıcaklık izlemesi için uygun olduğu görülmektedir.

Sıcaklık testleri için özel hazırlanan cam fanusta, oda sıcaklığı (27,5 °C) ile 100 °C aralıkta 10 °C'lik artış ve azalışlarla testler gerçekleştirilmiştir. Test süresince kontrollü bir şekilde ısıtılan ve soğutulan kablosuz pasif sensörün sıcaklık değişimine bağlı yansıma katsayısı cevabı, ağ analizör cihazı ekranından Şekil 4.9'daki gibi izlenmiş ve sıcaklık değişimlerinin takibinde yararlanılan yansıma katsayısının ve buna bağlı rezonans frekansının yorumlanabilmesi için cihaza kaydedilmiştir. Bu kaydedilen dosyalarda yansıma katsayısı değerinin minimum olduğu nokta, sensör devresinin o sıcaklıktaki rezonans frekansını ifade etmektedir.

### 5.3 Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artışı ve Azalışı Algılaması Deneysel Sonuçları

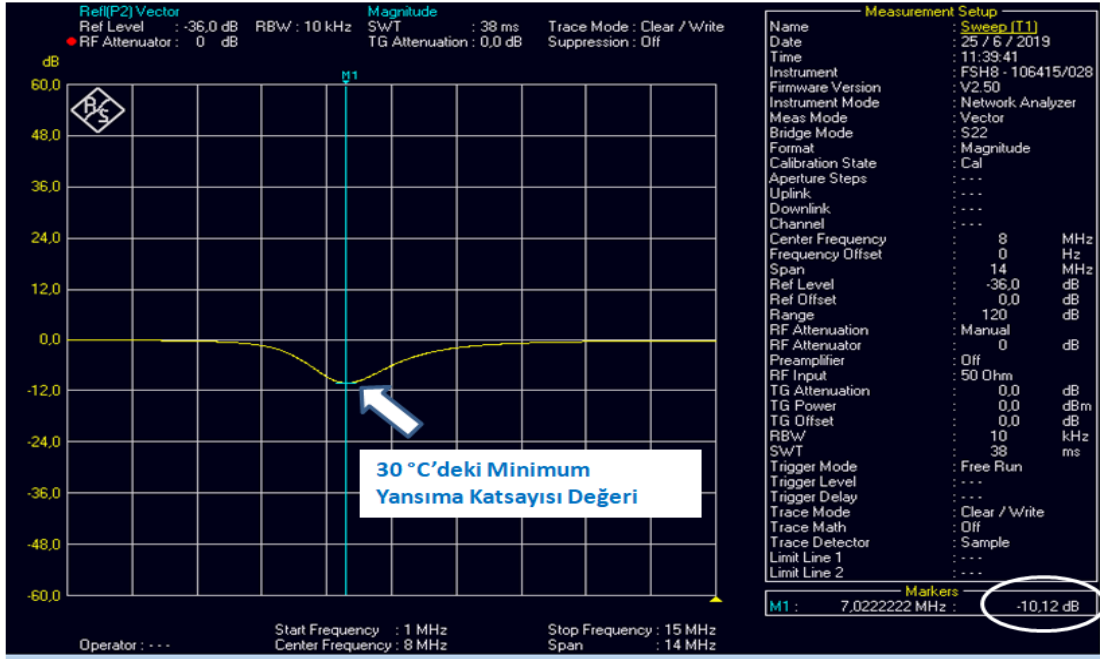
Sıcaklık artışı boyunca yansıma katsayısı ile sensörün sıcaklığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şu şekildedir:

Oda sıcaklığındaki kablosuz pasif endüktif kapasitif (L-C) sıcaklık sensörünün Şekil 5.11'de görüldüğü gibi minimum yansıma katsayısı değeri -9.97 dB'dir.



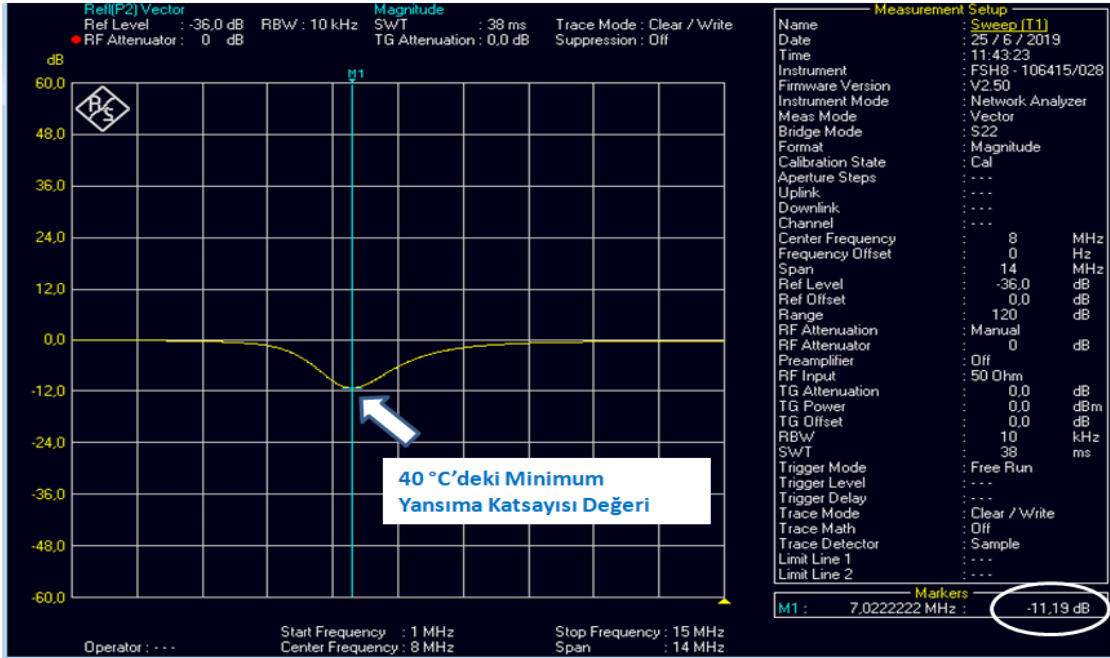
Şekil 5.11: Oda sıcaklığındaki (27,5 °C) yansıma katsayısı grafiği.

30 °C’de sensörün Şekil 5.12’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -10.12 dB’dir.



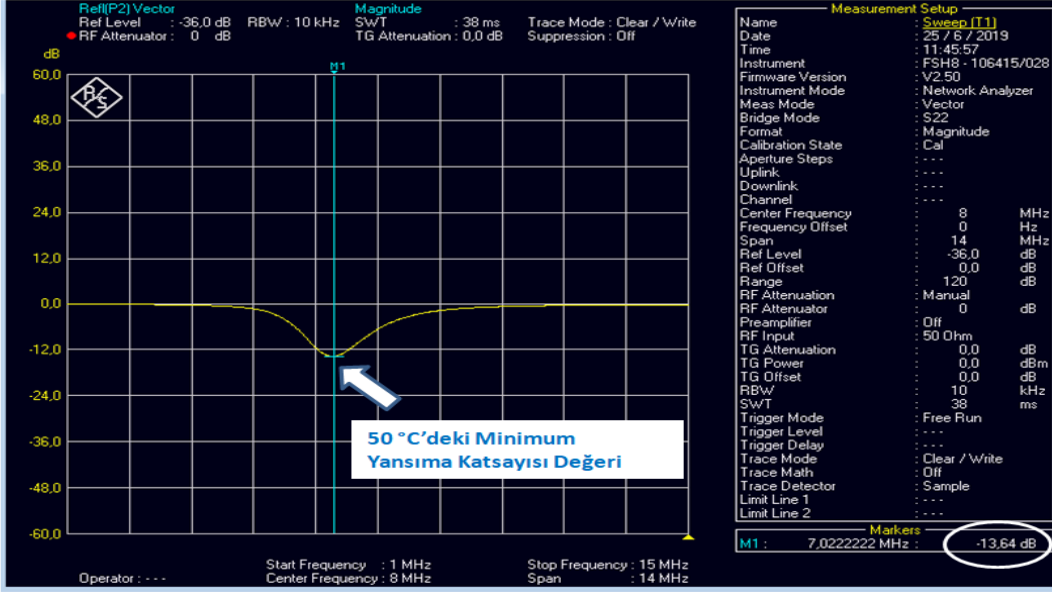
Şekil 5.12: 30 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

40 °C’de sensörün Şekil 5.13’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -11.19 dB’dir.



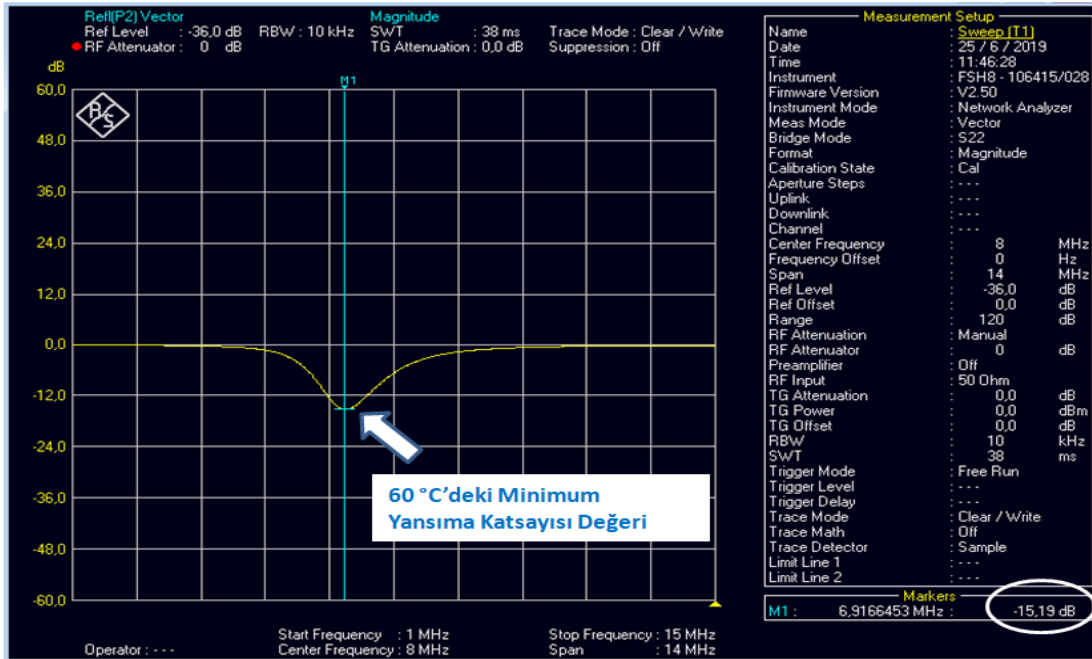
Şekil 5.13: 40 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

50 °C’de sensörün Şekil 5.14’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -13.64 dB’dir.



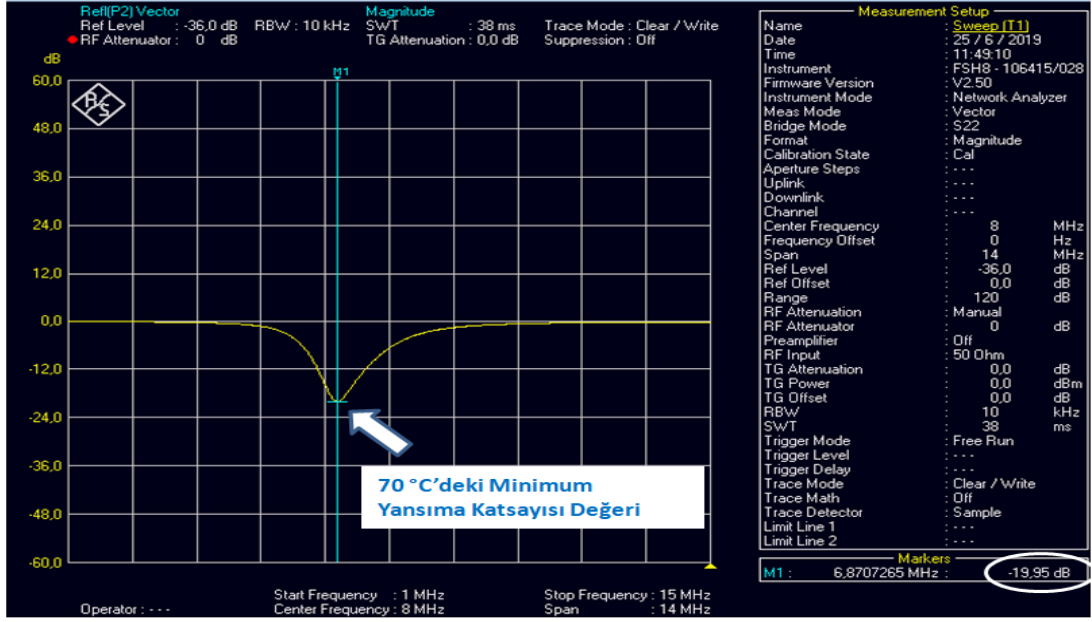
Şekil 5.14: 50 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

60 °C’de sensörün Şekil 5.15’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -15.19 dB’dir.



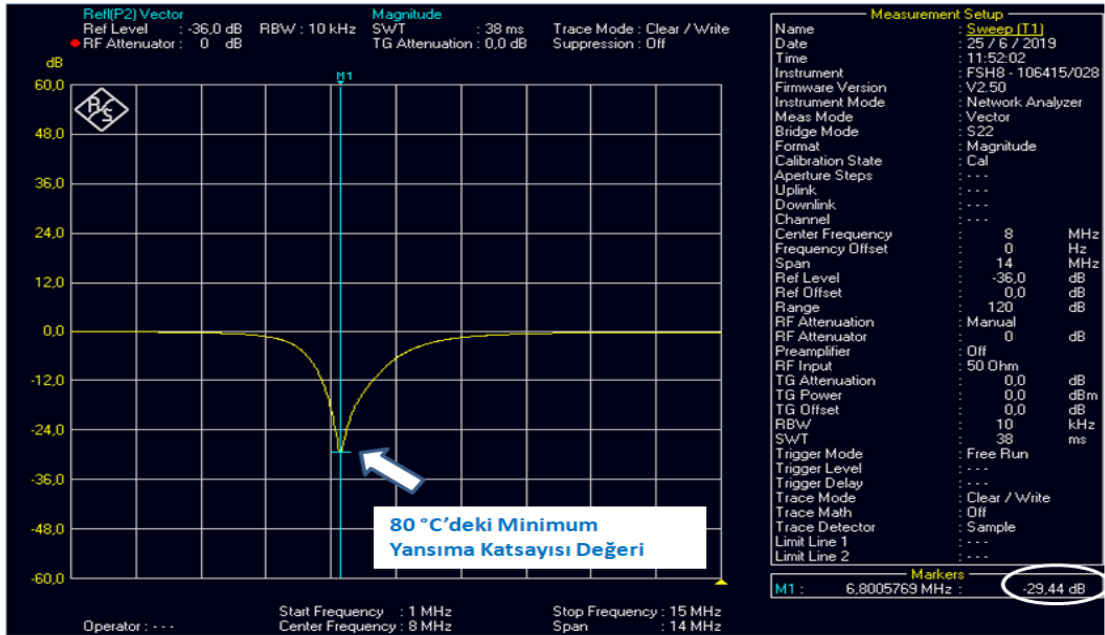
Şekil 5.15: 60 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

70 °C’de sensörün Şekil 5.16’da görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -19.95 dB’dir.



Şekil 5.16: 70 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

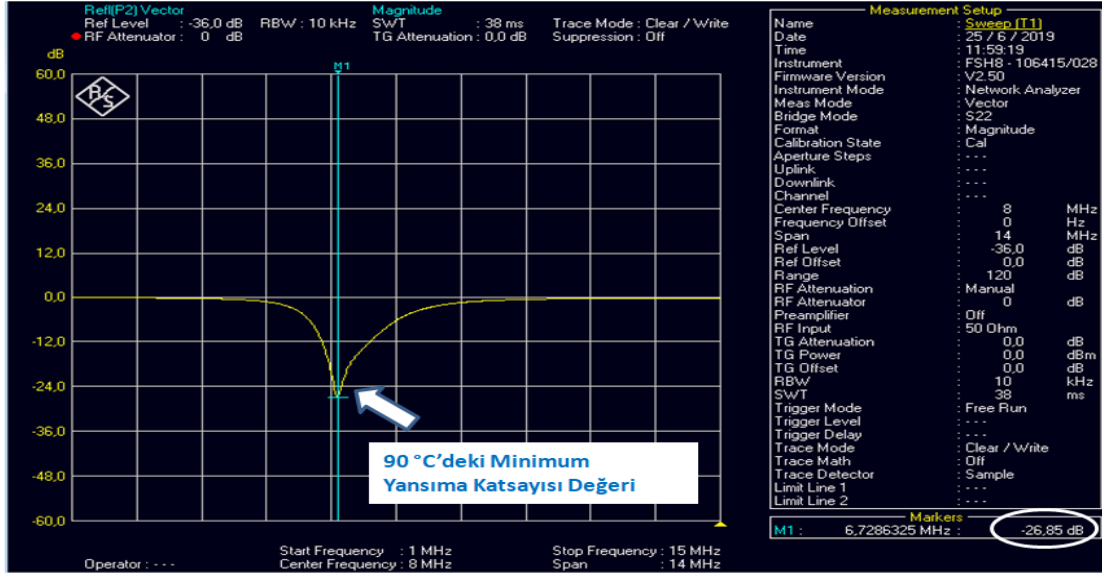
80 °C’de sensörün Şekil 5.17’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -29.44 dB’dir.



Şekil 5.17: 80 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

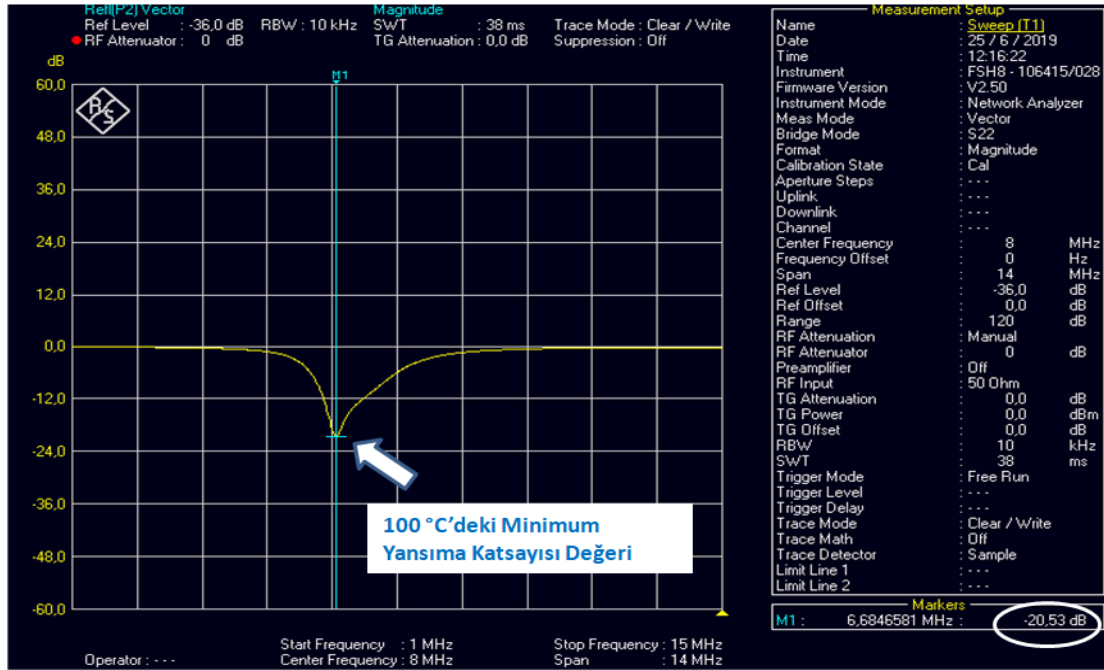


90 °C’de sensörün Şekil 5.18’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -26.85 dB’dir.



Şekil 5.18: 90 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

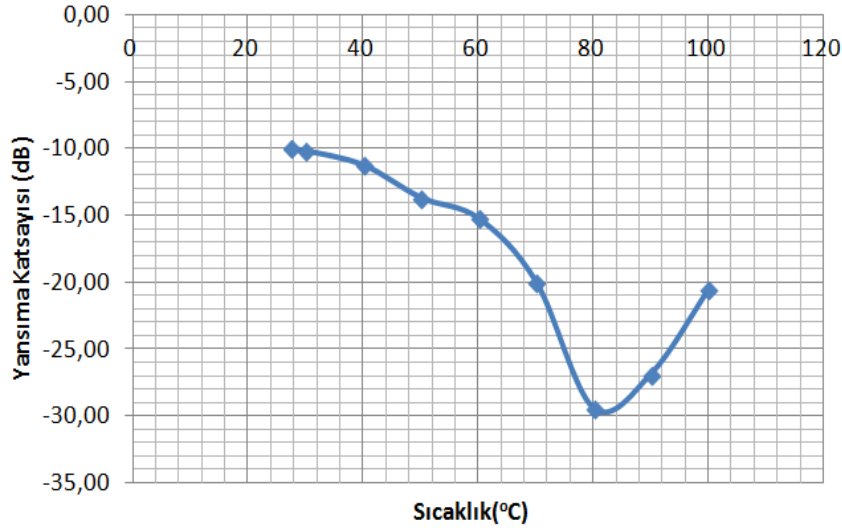
100 °C’de sensörün Şekil 5.19’da görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -20.53 dB’dir.



Şekil 5.19: 100 °C’deki yansımaya katsayısı grafiği.

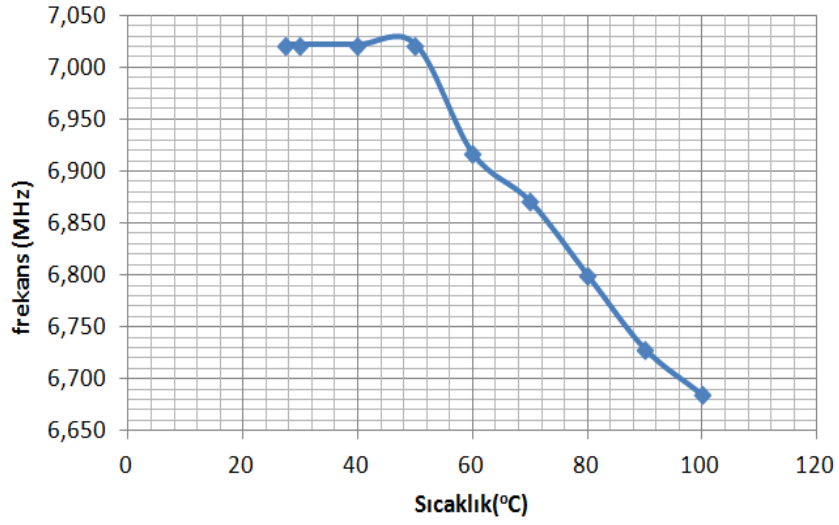
Yukarıda laboratuvar testleri boyunca Rohde&Schwarz FSH8 ağ analizör cihazına kaydedilmiş yansımaya katsayısı grafikleri yer almaktadır. Bu grafiklerde, yansımaya katsayısı 60 dB ile -60 dB arasında ve frekans başlangıç 1 MHz - bitiş 15 MHz arasını tarayacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, ölçümlerin hangi tarih-saatte yapıldığı ve kaynak empedansının da 50  $\Omega$  olduğu bilgileri yer almaktadır. Kablosuz pasif sıcaklık sensörünün cevabı olan yansımaya katsayısı grafikleri değerlendirildiğinde, sıcaklık artışı ile yansımaya katsayısının minimum noktasının 80 °C'ye kadar azalış gösterdikten sonra 100 °C'ye kadar arttığı görülmektedir. Rezonans frekansı da 50 °C'ye kadar sabit kaldıktan sonra 100 °C'ye kadar azalmıştır. Bu durum aynı zamanda 50 °C'den sonra grafiklerde sola doğru kaymanın meydana geldiği anlamına gelmektedir. Ayrıca sıcaklık artışı boyunca sensörün, bobinler arası mesafe azaldıkça karşılıklı endüktans ( $M$ ) değerinin ve tepe verimliliğinin artış gösterdiği zayıf kuplajlanma rejiminde yani tek frekansta çalıştığı grafiklerden görülmektedir.

Şekil 5.20'de görüldüğü gibi başlangıç yansımaya katsayısı değeri -9.97 dB olup, 80°C'ye kadar sıcaklık artışı ile -29.44 dB değerine kadar azalmış, ancak daha sonra 100 °C'deki -20.53 dB bitiş değerine kadar artmıştır.



Şekil 5.20: Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği.

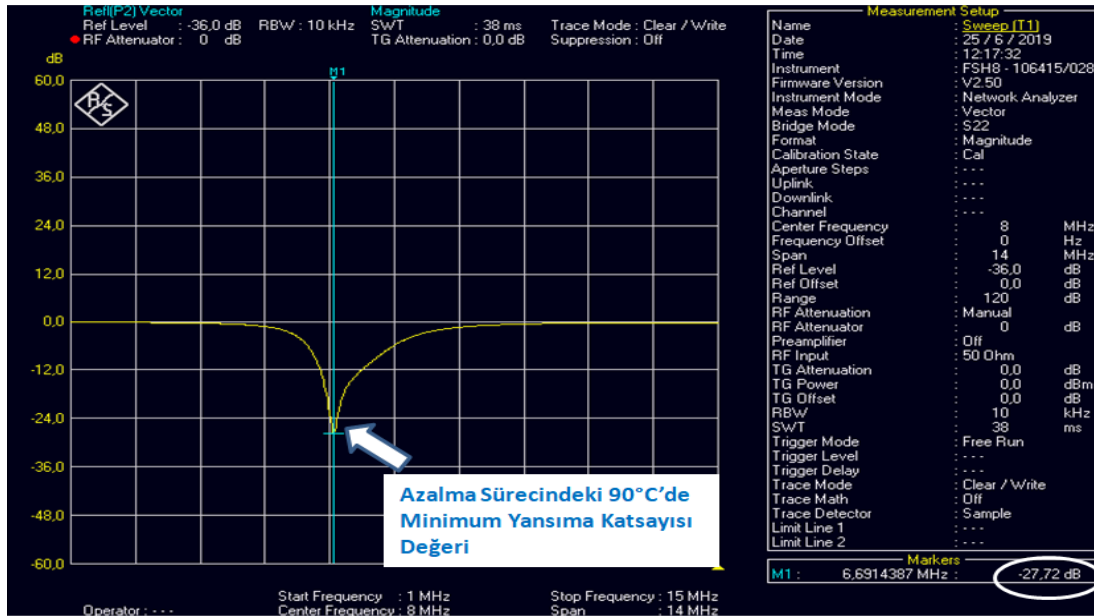
Şekil 5.21’de görüldüğü gibi rezonans frekansı 50°C’ye kadar 7.022 MHz değerinde sabit kalmış daha sonra 100 °C’deki 6.685 MHz değerine kadar azalmıştır.



**Şekil 5.21:** Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C’deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği.

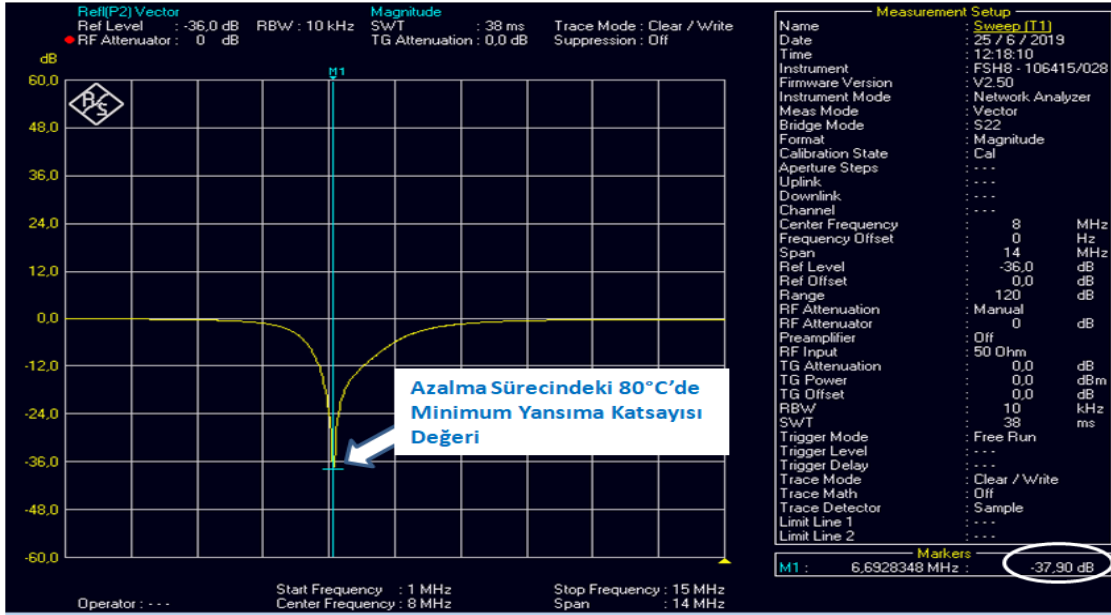
Sıcaklık azalışı boyunca yansıma katsayısı ile sensörün sıcaklığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şu şekildedir:

Azalma sürecindeki 90 °C’de sensörün Şekil 5.22’de görüldüğü gibi minimum yansıma katsayısı değeri -27.72 dB’dir.



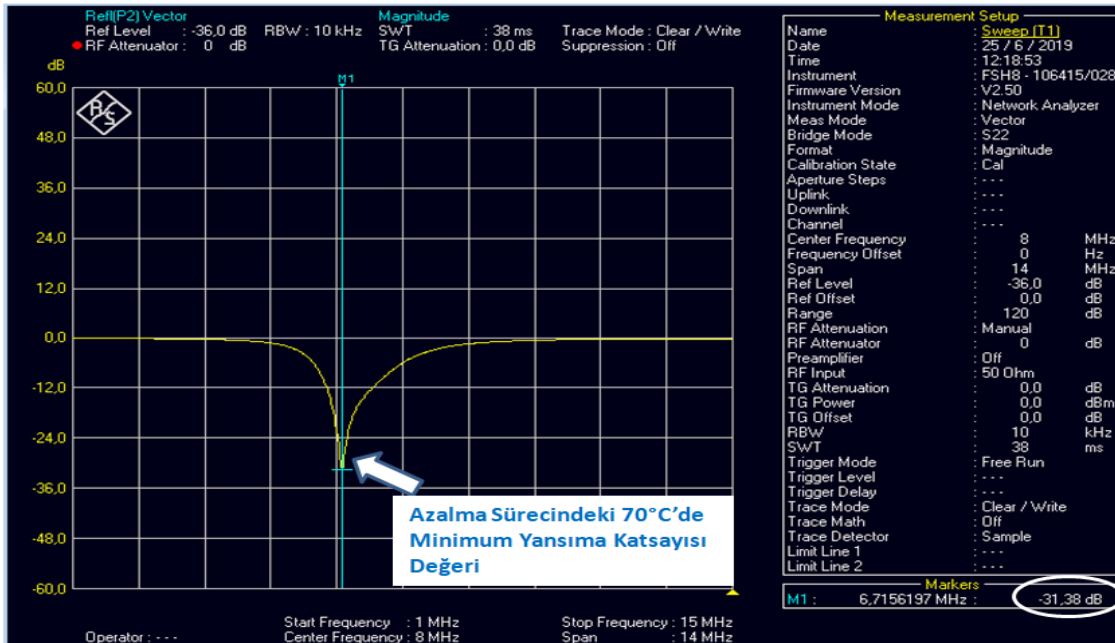
**Şekil 5.22:** Azalma sürecindeki 90 °C’de yansıma katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki 80 °C’de sensörün Şekil 5.23’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -37.90 dB’dir.



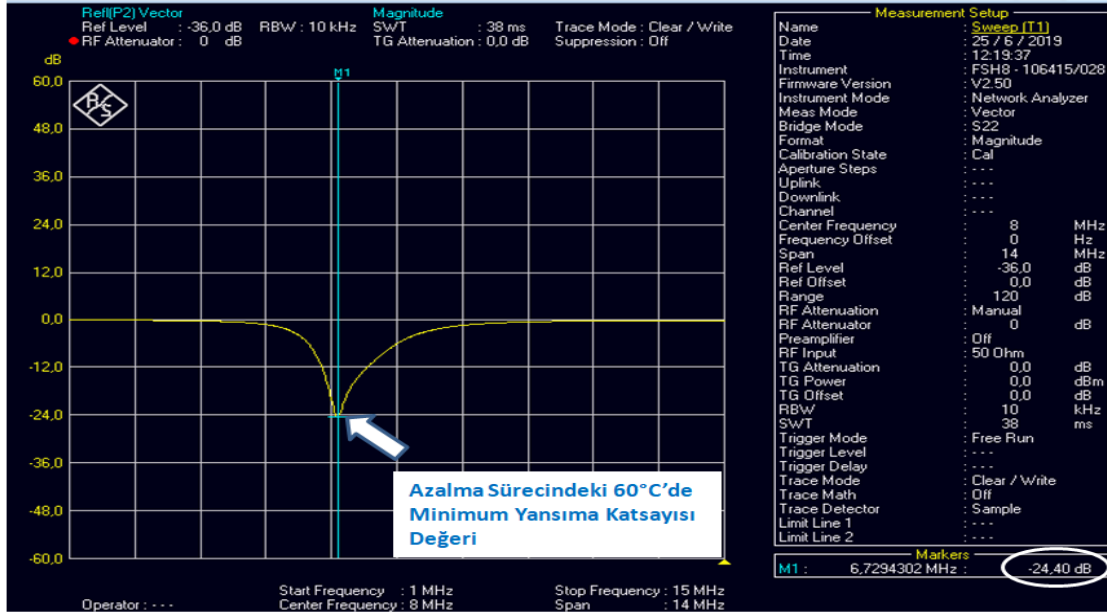
Şekil 5.23: Azalma sürecindeki 80 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki 70 °C’de sensörün Şekil 5.24’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -31.38dB’dir.



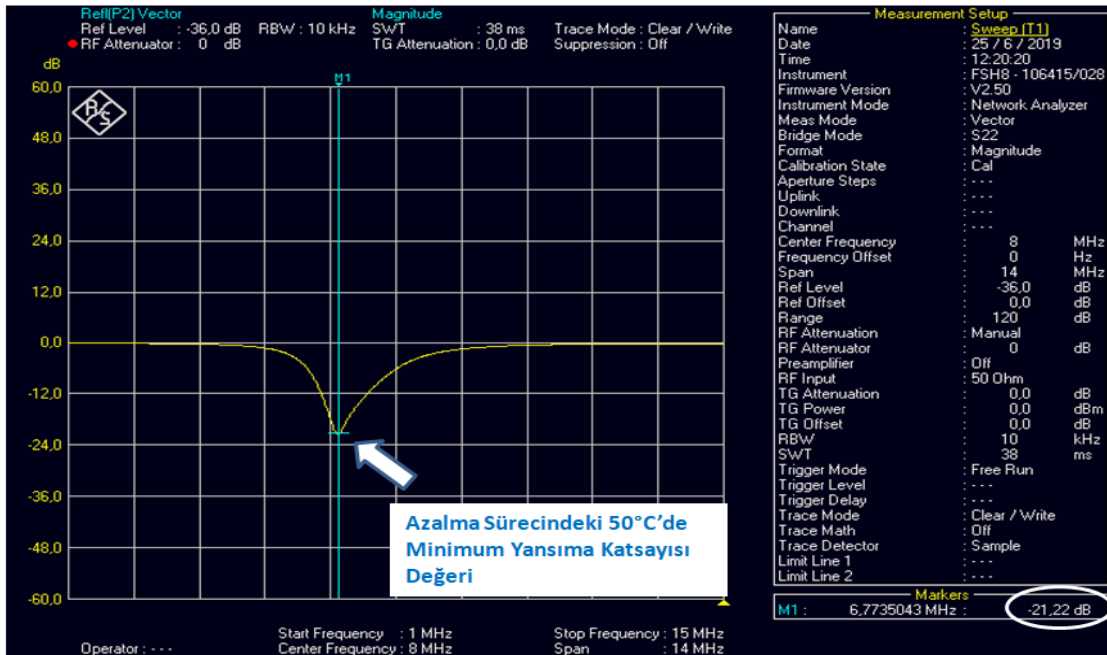
Şekil 5.24: Azalma sürecindeki 70 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki 60 °C’de sensörün Şekil 5.25’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -24.40 dB’dir.



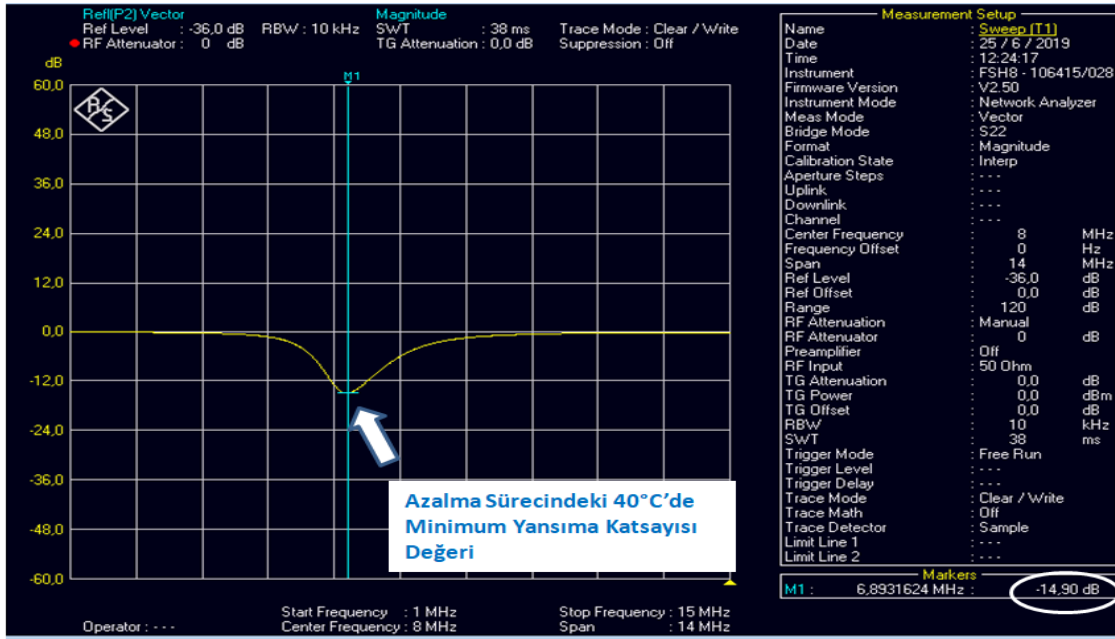
Şekil 5.25: Azalma sürecindeki 60 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki 50 °C’de sensörün Şekil 5.26’da görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -21.22 dB’dir.



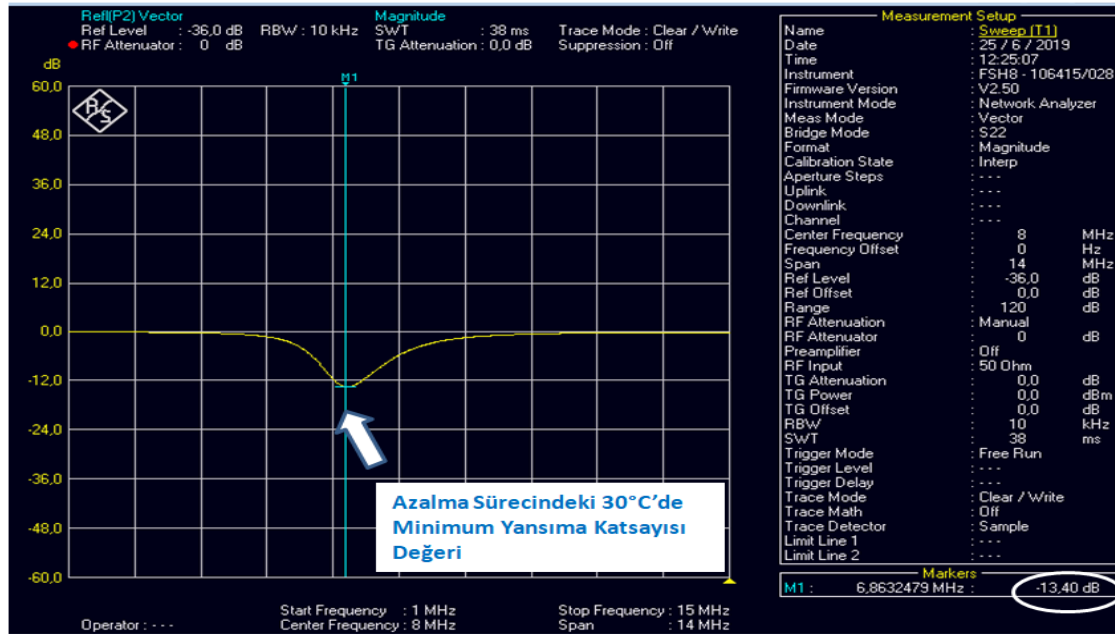
Şekil 5.26: Azalma sürecindeki 50 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki 40 °C’de sensörün Şekil 5.27’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -14.90 dB’dir.



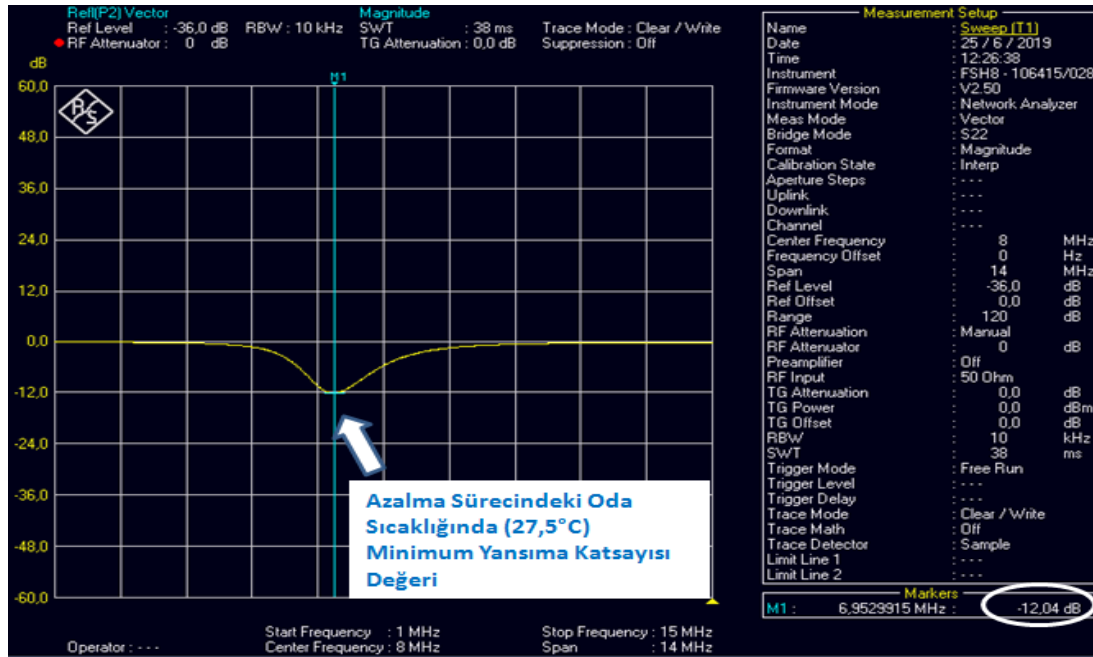
Şekil 5.27: Azalma sürecindeki 40 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki 30 °C’de sensörün Şekil 5.28’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -13.40 dB’dir.



Şekil 5.28: Azalma sürecindeki 30 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

Azalma sürecindeki oda sıcaklığında (27,5 °C) sensörün Şekil 5.29'da görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -12.04 dB'dir.

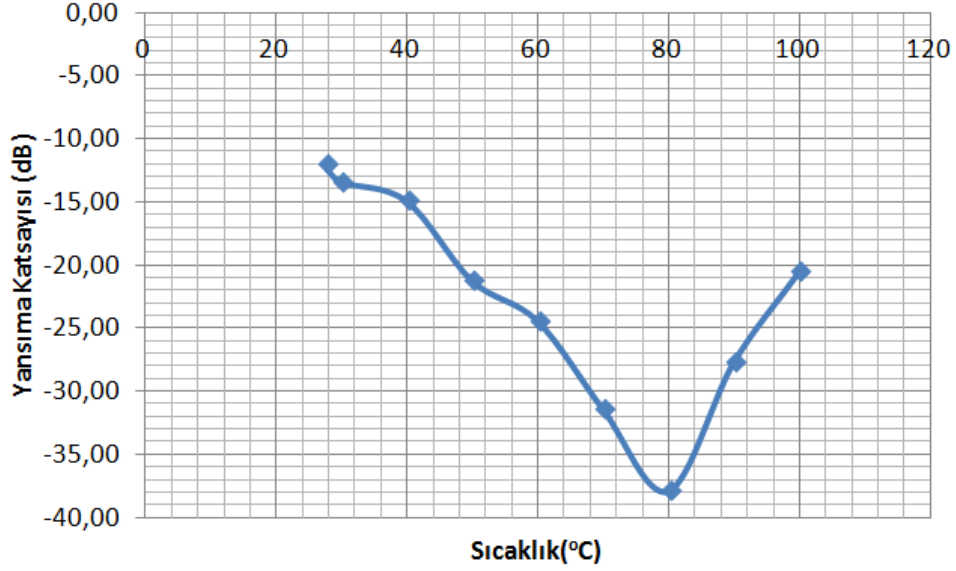


Şekil 5.29: Azalma sürecindeki oda sıcaklığında (27,5 °C) yansımaya katsayısı grafiği.

Yukarıda sıcaklık azalış testindeki yansımaya katsayısı grafikleri yer almaktadır. Kablosuz pasif sıcaklık sensörünün cevabı olan yansımaya katsayısı grafikleri değerlendirildiğinde, sıcaklık azalışı ile yansımaya katsayısının minimum noktasının 80°C'ye kadar azalış gösterdikten sonra oda sıcaklığına kadar arttığı görülmektedir. Rezonans frekansı da sadece 40 °C'den 30 °C'ye kadar soğutulma aşamasında azalmış, diğer tüm aşamalarda oda sıcaklığına kadar artmıştır. Bu durum aynı zamanda testin başlangıcından itibaren grafiklerde sağa doğru kaymanın meydana geldiği anlamına gelmektedir. Ayrıca sıcaklık azalışı boyunca da sıcaklık sensörünün, zayıf kuplajlanma rejiminde yani tek frekansta çalıştığı grafiklerden görülmektedir.

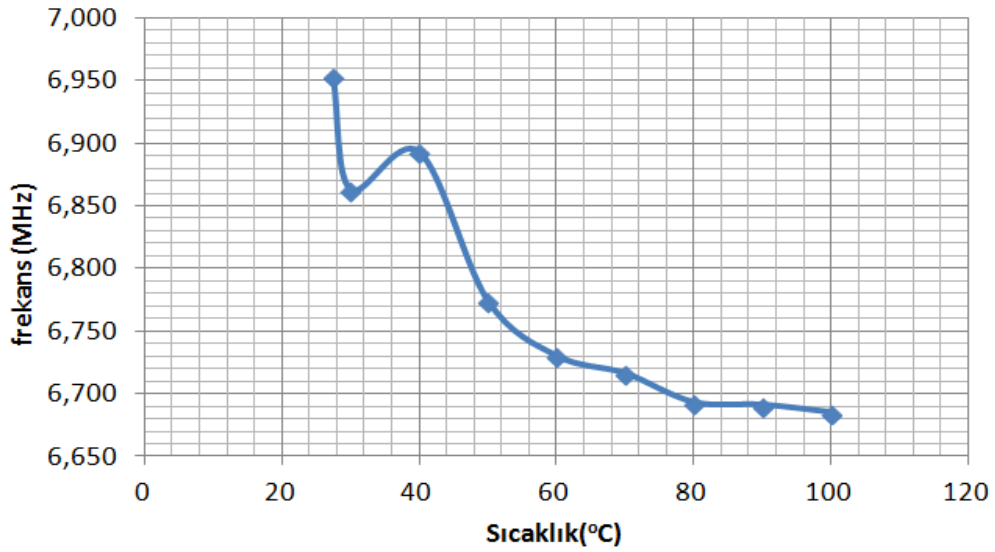


Şekil 5.30’da görüldüğü gibi başlangıç yansımaya katsayı değeri -20.53 dB olup, 80 °C’ye kadar sıcaklık azalışı ile -37.90 dB değerine kadar azalmış, ancak daha sonra oda sıcaklığındaki -12.04 dB bitiş değerine kadar artmıştır.



Şekil 5.30: Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C’deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği.

Şekil 5.31’de görüldüğü gibi rezonans frekansı 40 °C’ye kadar 6.685 MHz’den 6.893 MHz değerine artış göstermiş, sadece 30 °C için 6.863 MHz’e düşüş yaşadından sonra oda sıcaklığındaki 6.953 MHz değerine kadar artmıştır.



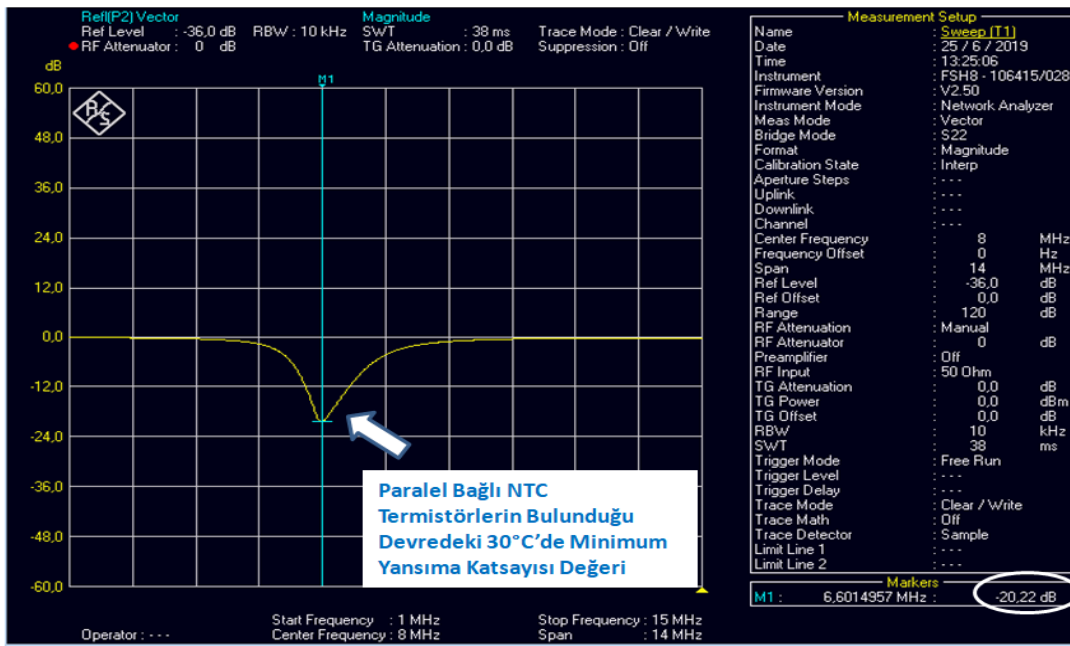
Şekil 5.31: Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C’deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği.



#### 5.4 Paralel NTC Termistörlerin Kullanıldığı Durumda Üretilen Kablosuz Pasif Sensörün Sıcaklık Artışı ve Azalışı Algılaması Deneysel Sonuçları

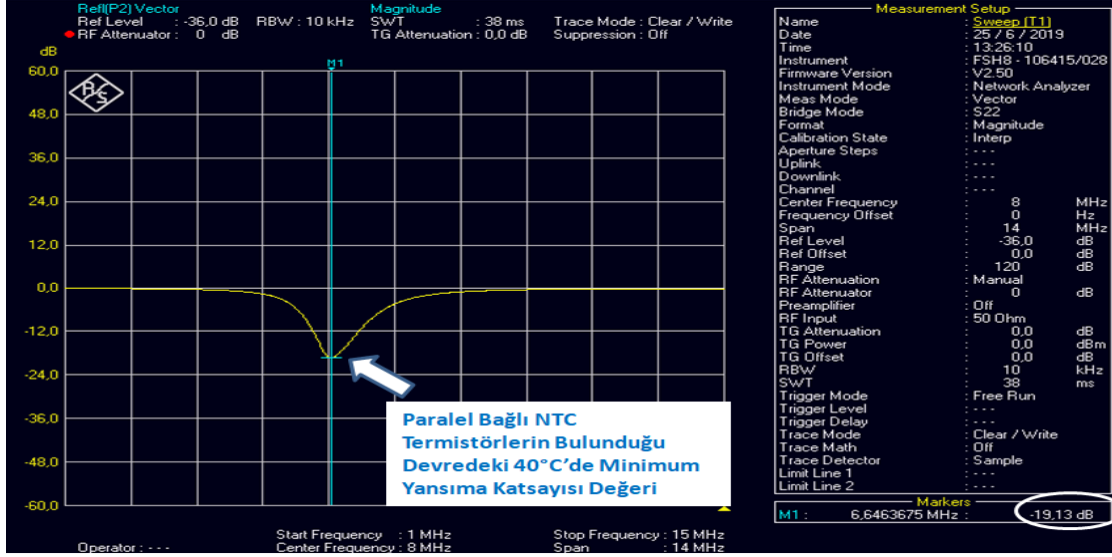
Sıcaklığın artışı ile azalışında zayıf kuplajlanma görülen ve güçlü kuplajlanmanın meydana gelip gelmeyeceğini tespit etmek için 3 tane 43  $\Omega$  NTC termistörün paralel bağlandığı sensör devresinin sıcaklık artışı boyunca yansıma katsayısı ile sensörün sıcaklığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şu şekildedir:

30 °C'de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.32'de görüldüğü gibi minimum yansıma katsayısı değeri -20.22 dB'dir.



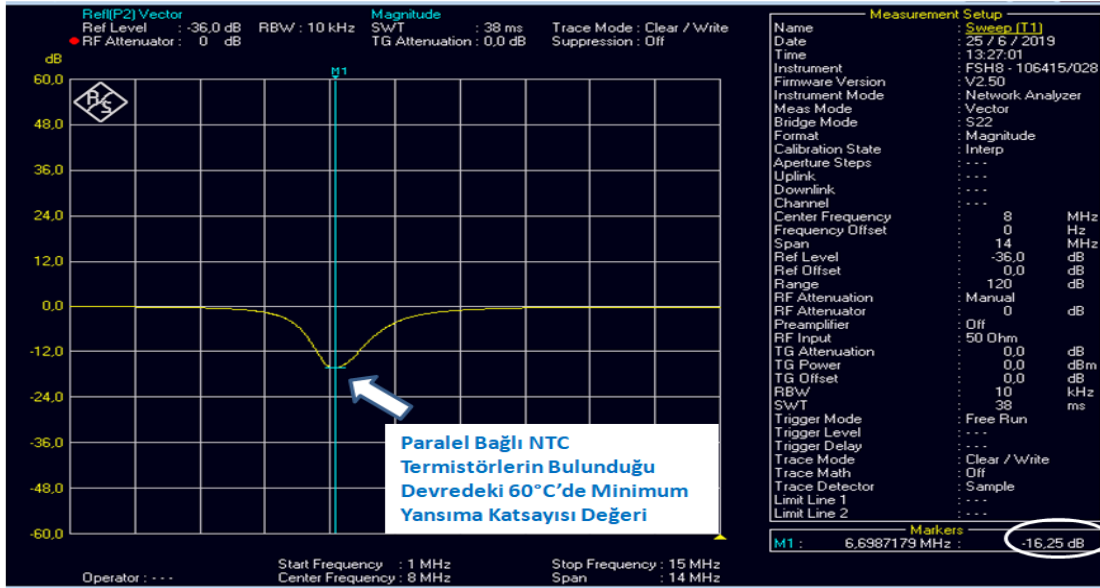
Şekil 5.32: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 30 °C'de yansıma katsayısı grafiği.

40 °C’de paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.33’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -19.13 dB’dir.



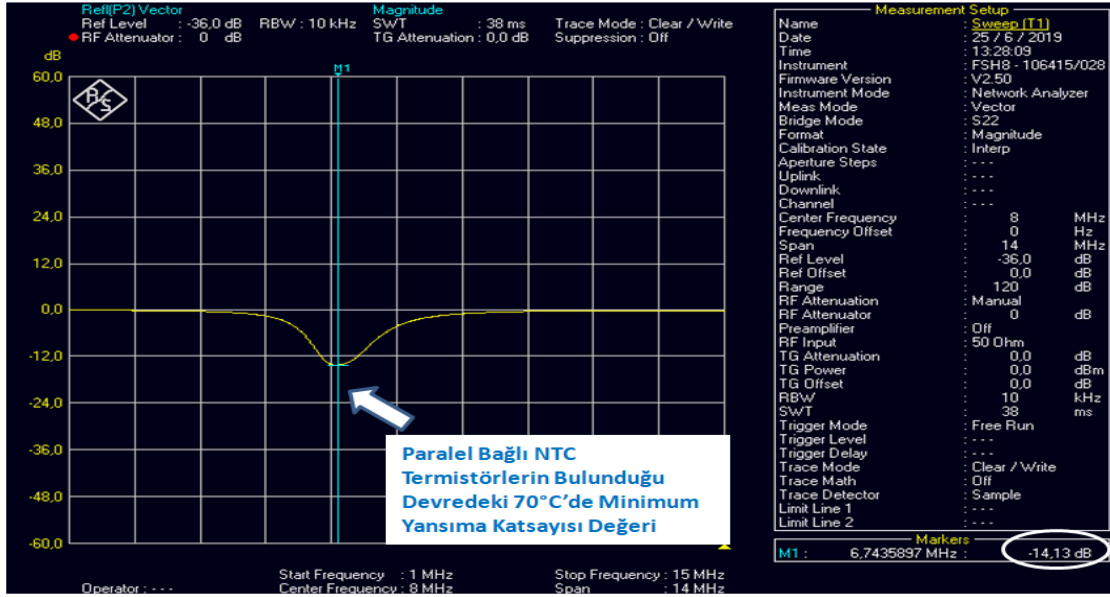
Şekil 5.33: Paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 40 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

60 °C’de paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.34’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -16.25 dB’dir.



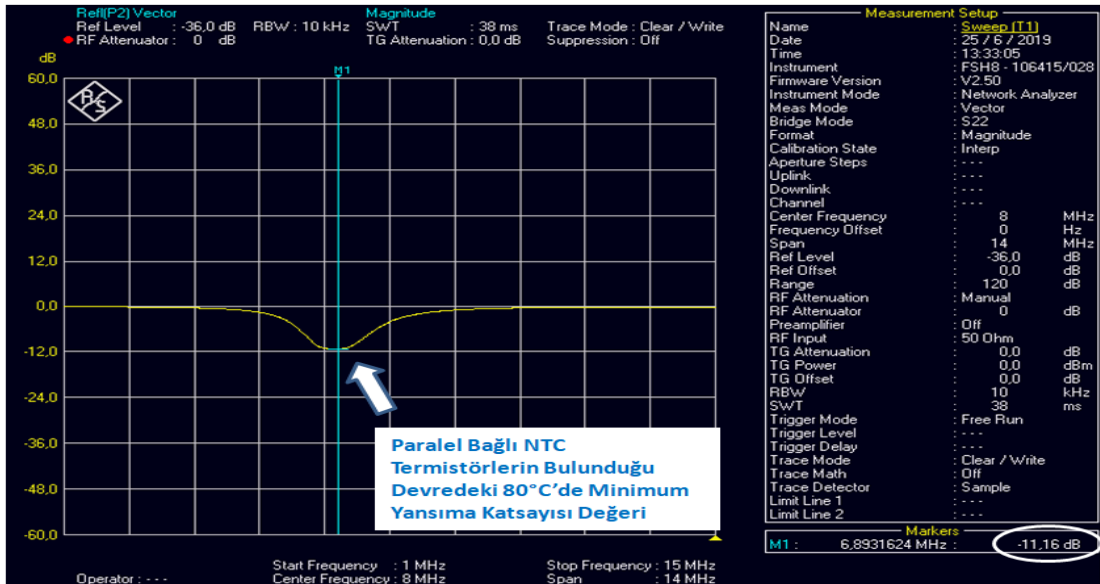
Şekil 5.34: Paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 60 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

70 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.35’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -14.13 dB’dir.



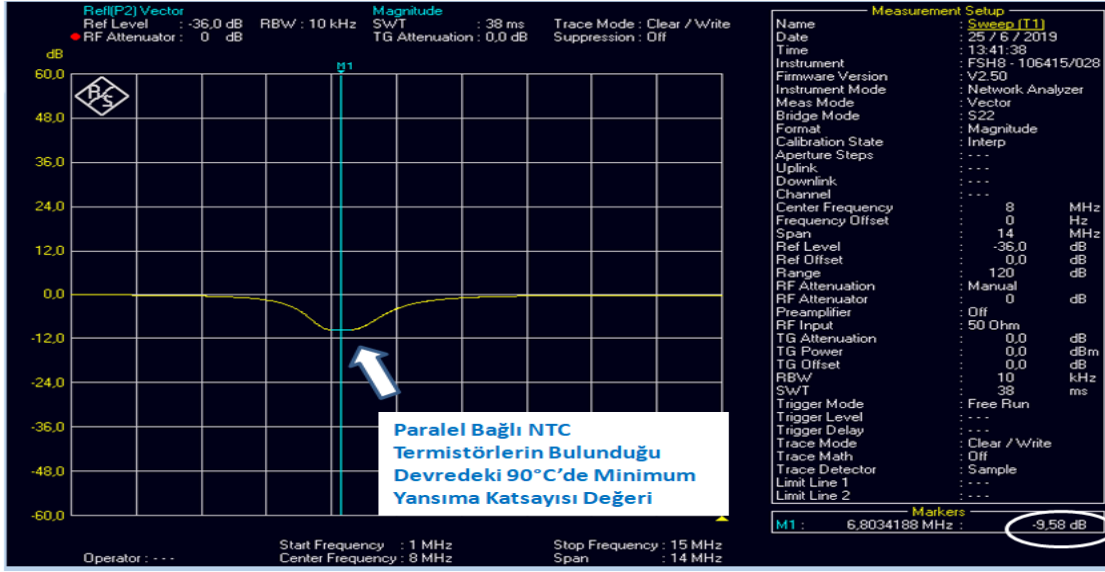
Şekil 5.35: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 70 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

80 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.36’da görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -11.16 dB’dir.



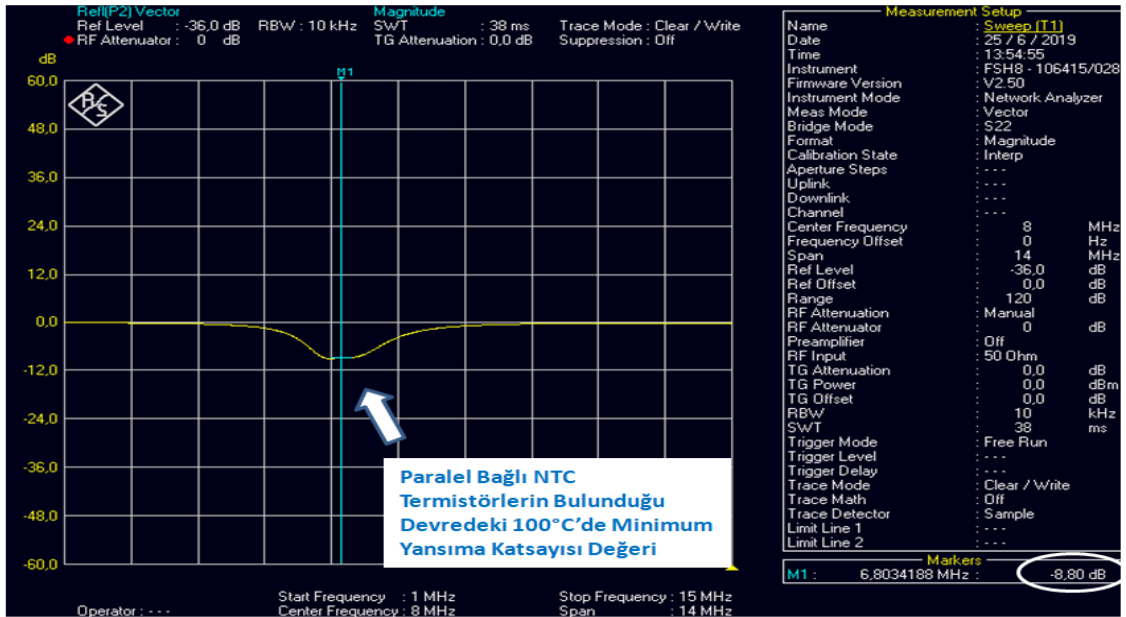
Şekil 5.36: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 80 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

90 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.37’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -9.58 dB’dir.



Şekil 5.37: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 90 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

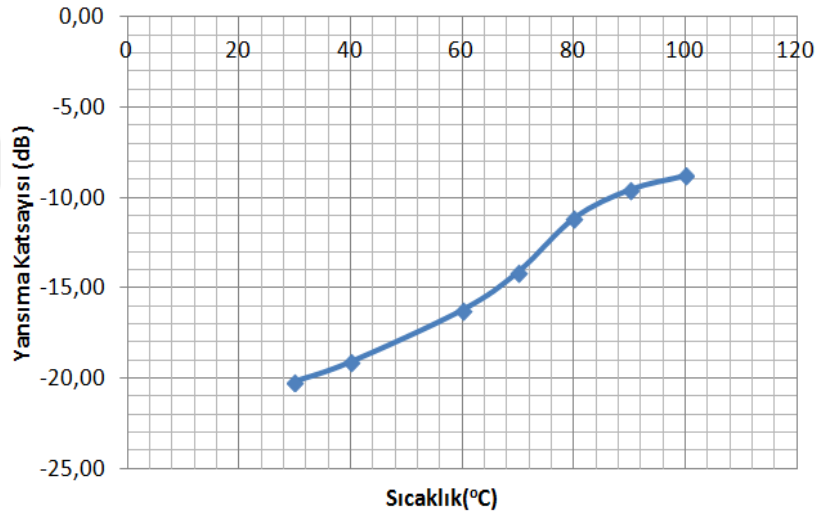
100 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.38’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -8.80 dB’dir.



Şekil 5.38: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrede 100 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

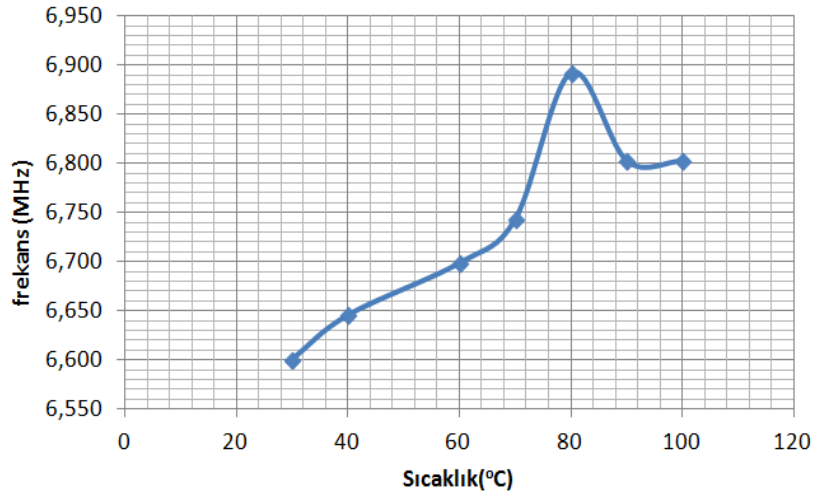
Yukarıda 3 tane NTC termistörün paralel bağlandığı sensör devresinin sıcaklık artış testindeki yansımaya katsayısı grafikleri yer almaktadır. Grafikler değerlendirildiğinde, sıcaklık artışı ile yansımaya katsayısının minimum noktasının oda sıcaklığından (27,5 °C) 100 °C'ye kadar arttığı görülmektedir. Rezonans frekansı da 90 °C'ye kadar arttıktan sonra 100 °C'ye kadar 6.803 MHz değerinde sabit kalmıştır. Bu durum aynı zamanda 90 °C'ye kadar grafiklerde sağa doğru kaymanın meydana geldiği anlamına gelmektedir. Ayrıca 70 °C'ye kadar sıcaklık sensörünün zayıf kuplajlanma rejiminde çalıştığı, 70 °C'den 100 °C'ye kadar tepe verimliliği mesafeden ve karşılıklı endüktans değerinden bağımsız ve dolayısıyla mesafe değişse bile yüke sabit bir güç sağlayabilen güçlü kuplajlanma rejiminin meydana geldiği grafiklerden görülmektedir.

Şekil 5.39'da görüldüğü gibi başlangıç yansımaya katsayısı değeri -20.22 dB olup, 100 °C'deki -8.80 dB bitiş değerine kadar artmıştır. 70 °C'de güçlü kuplajlanma başladıktan sonra 100 °C'ye kadar o sıcaklıklardaki yansımaya katsayılarına çok yakın iki değer görülmektedir.



**Şekil 5.39:** Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansımaya katsayısı-sıcaklık grafiği.

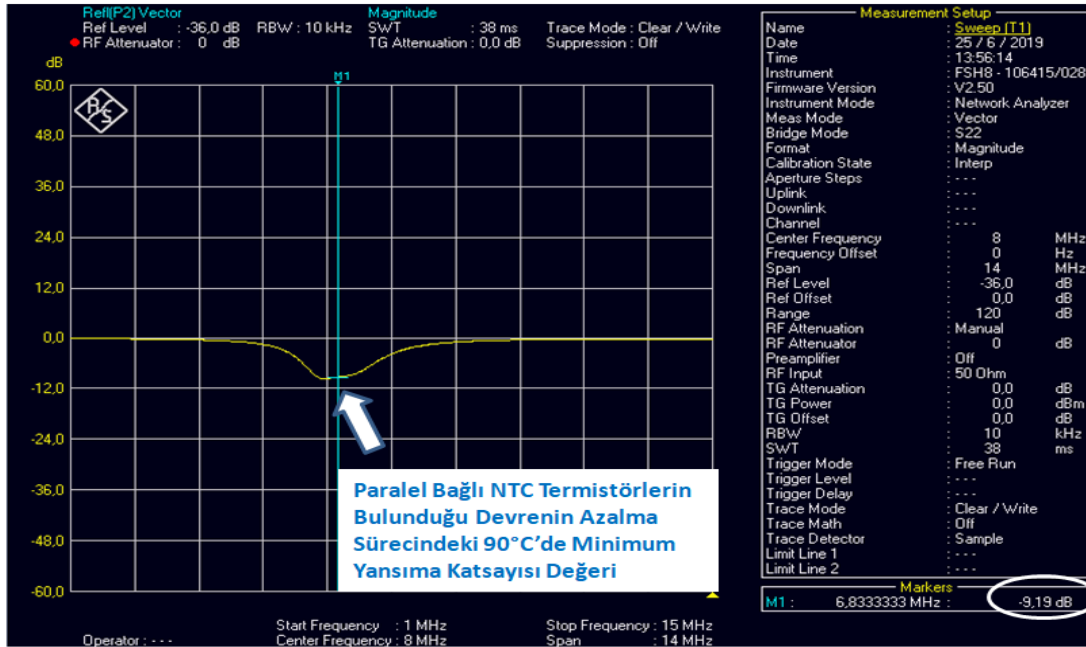
Şekil 5.40'da görüldüğü gibi rezonans frekansı 90°C'ye kadar artmış daha sonra 100°C'deki 6.803 MHz değerinde sabit kalmıştır. 70°C'de güçlü kuplajlanma başladıktan sonra 100°C'ye kadar o sıcaklıklardaki rezonans frekansına çok yakın iki değer görülmektedir.



Şekil 5.40: Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği.

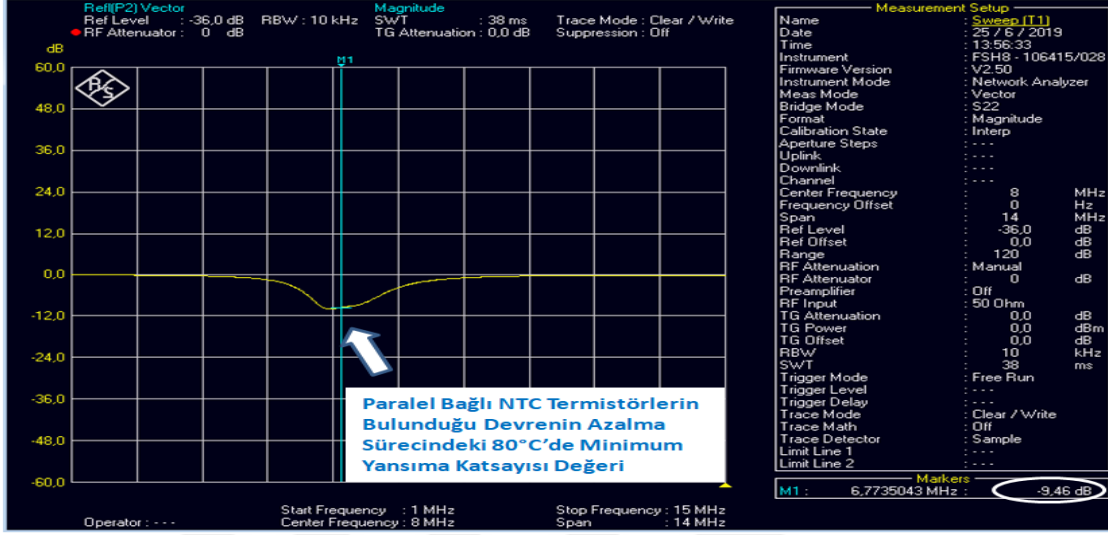
Paralel NTC termistörleri bağlı devrenin sıcaklık azalışı boyunca yansıma katsayısı ile sensörün sıcaklığı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler şu şekildedir:

90 °C'de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.41'de görüldüğü gibi minimum yansıma katsayısı değeri -9.19 dB'dir.



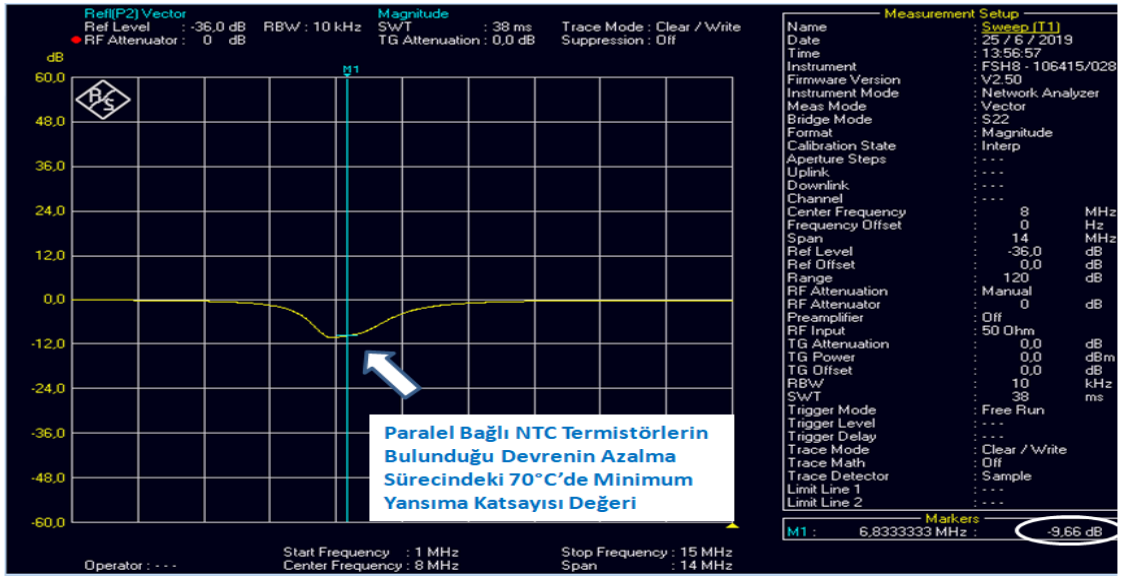
Şekil 5.41: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 90 °C'de yansıma katsayısı grafiği.

80 °C’de paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.42’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -9.46 dB’dir.



Şekil 5.42: Paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 80 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

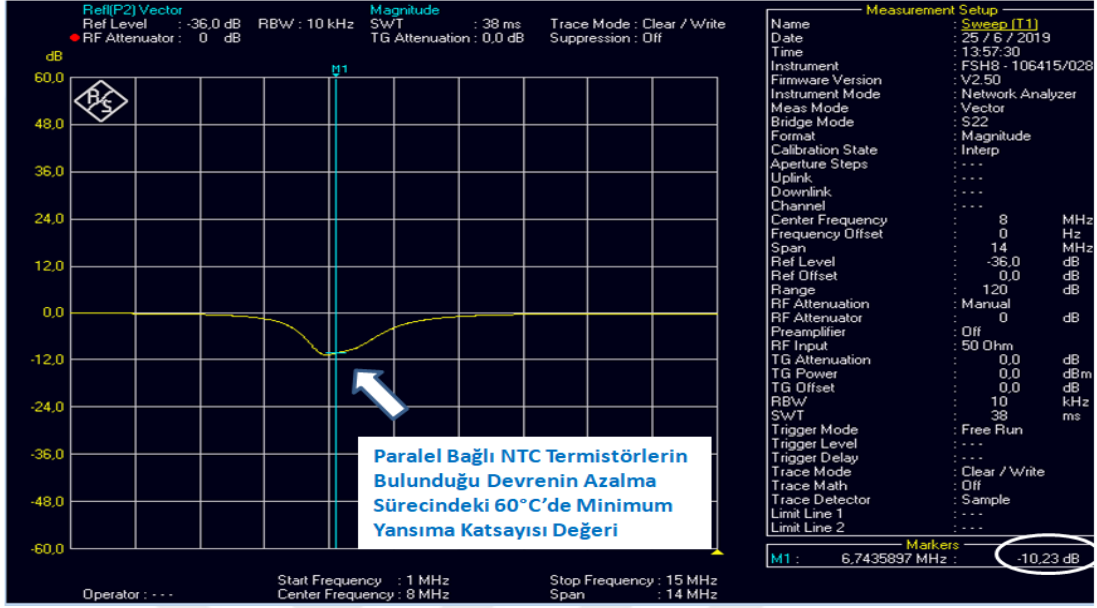
70 °C’de paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.43’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -9.66 dB’dir.



Şekil 5.43: Paralel bağı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 70 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

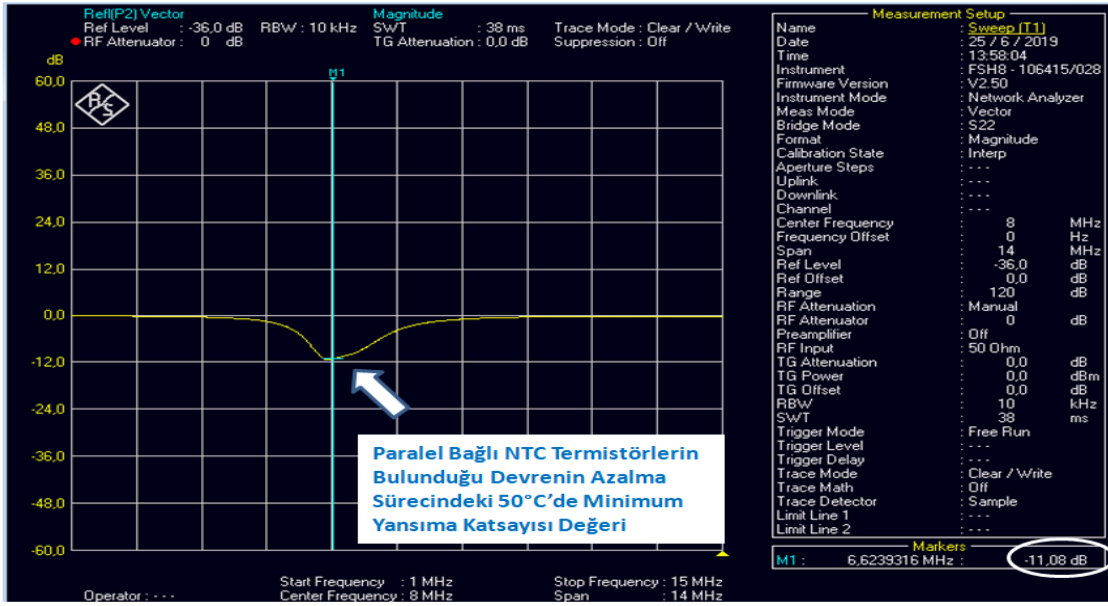


60 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.44’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -10.23 dB’dir.



Şekil 5.44: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 60 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

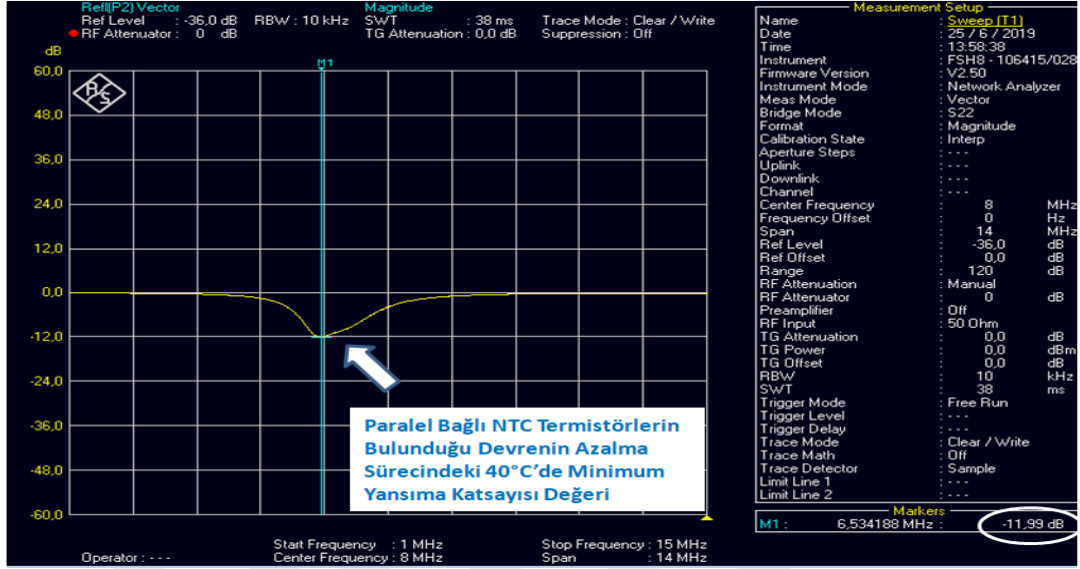
50 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.45’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -11.08 dB’dir.



Şekil 5.45: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 50 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

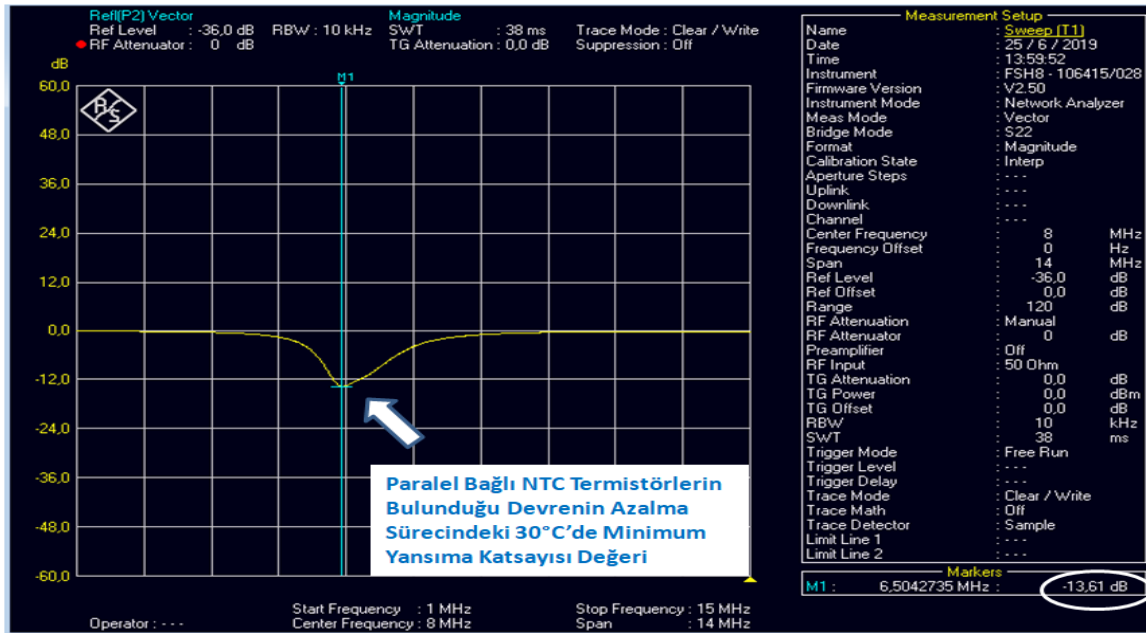


40 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.46’da görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -11.99 dB’dir.



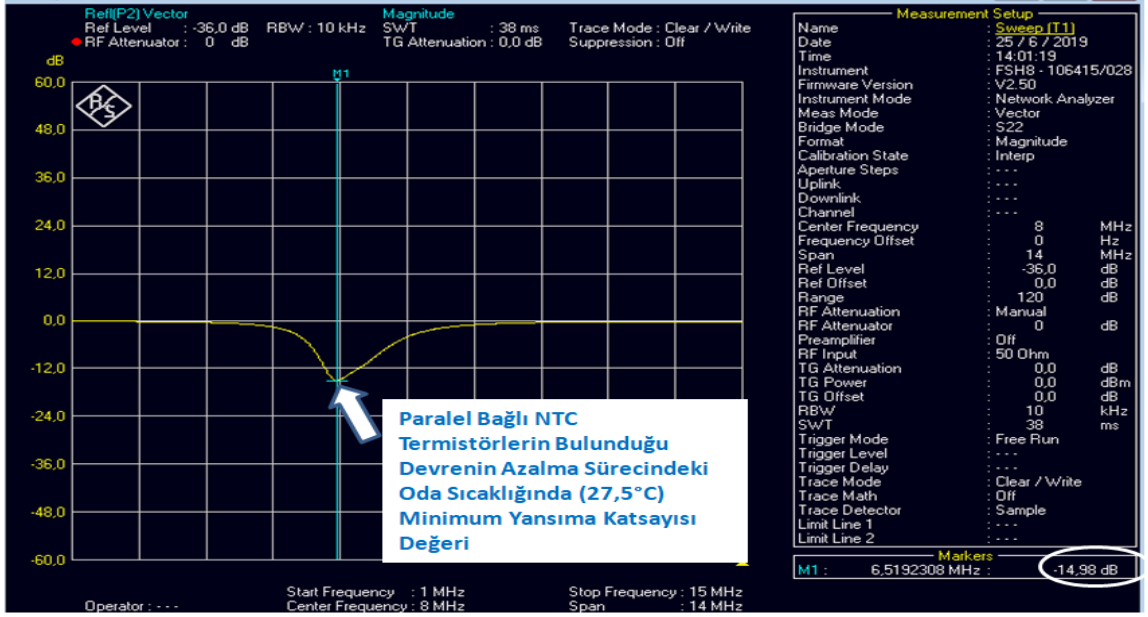
Şekil 5.46: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 40 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

30 °C’de paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.47’de görüldüğü gibi minimum yansımaya katsayı değeri -13.61 dB’dir.



Şekil 5.47: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin 30 °C’de yansımaya katsayısı grafiği.

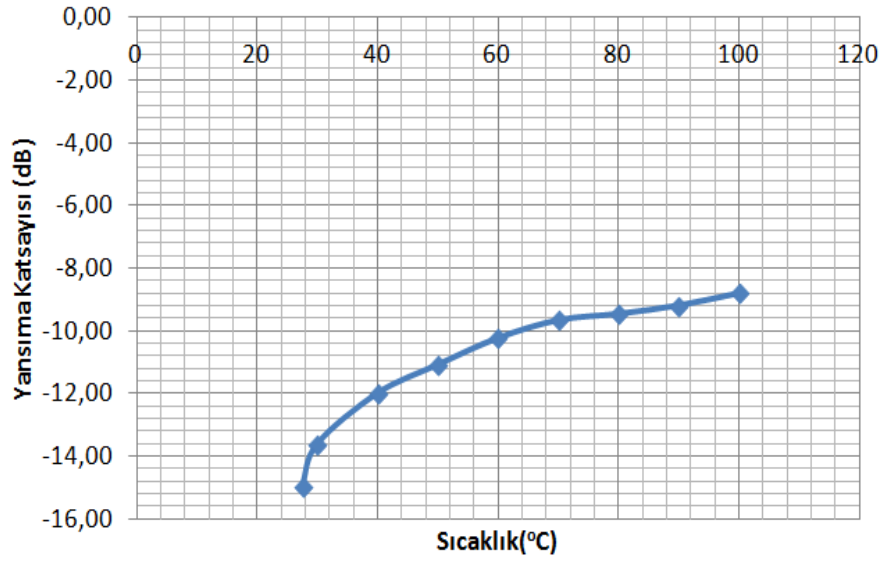
Oda sıcaklığında (27,5 °C) paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu sensörün Şekil 5.48’de görüldüğü gibi minimum yansıma katsayı değeri -14.98 dB’dir.



Şekil 5.48: Paralel bağlı NTC termistörlerin bulunduğu devrenin oda sıcaklığında (27,5 °C) yansıma katsayısı grafiği.

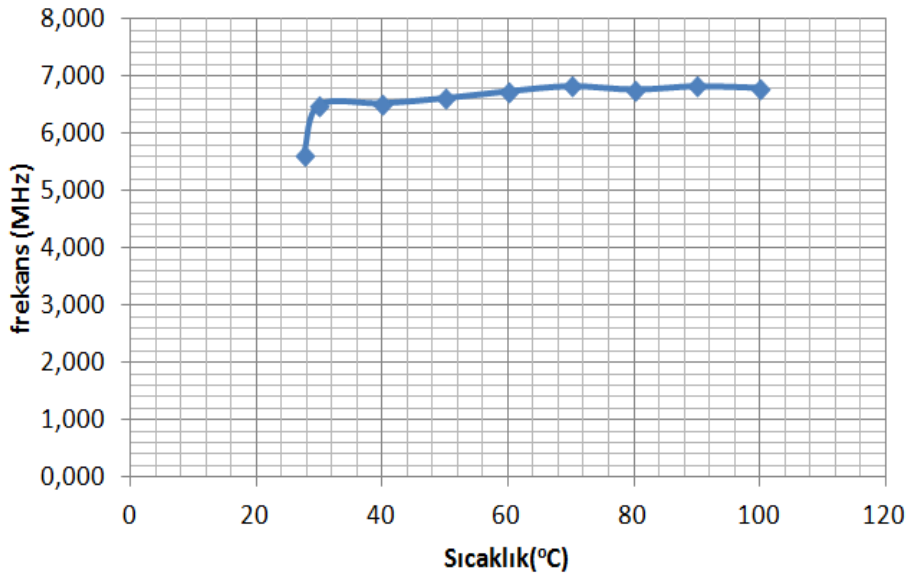
Yukarıda 3 tane NTC termistörün paralel bağlandığı sensör devresinin sıcaklık azalış testindeki yansıma katsayısı grafikleri yer almaktadır. Grafikler değerlendirildiğinde, sıcaklık azalışı ile yansıma katsayısının minimum noktasının oda sıcaklığından (27,5 °C) 100 °C’ye kadar azaldığı görülmektedir. Rezonans frekansı da sadece 70 °C’de arttıktan sonra oda sıcaklığına (27,5 °C) kadar azalmıştır. Ayrıca 70 °C’ye kadar sıcaklık sensörünün zayıf kuplajlanma rejiminde çalıştığı, 70 °C’den oda sıcaklığına (27,5 °C) kadar güçlü kuplajlanma rejiminin meydana geldiği grafiklerde görülmektedir.

Şekil 5.49’da görüldüğü gibi başlangıç yansıma katsayı değeri -8.80 dB olup, oda sıcaklığındaki -14.98 dB bitiş değerine kadar azalmıştır. 70 °C’de güçlü kuplajlanma başladıktan sonra oda sıcaklığına kadar o sıcaklıklardaki yansıma katsayılarına çok yakın iki değer görülmektedir.



Şekil 5.49: Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki yansım katsayısı-sıcaklık grafiği.

Şekil 5.50'de görüldüğü gibi rezonans frekansı başlangıçta 6.833 MHz olup, sadece 70 °C'de 6.774 MHz'den yine 6.833 MHz'e arttıktan sonra oda sıcaklığında 5.619 MHz değerine kadar azalmıştır. 70 °C'de güçlü kuplajlanma başladıktan sonra oda sıcaklığına kadar o sıcaklıklarda rezonans frekansına çok yakın iki değer görülmektedir.



Şekil 5.50: Oda sıcaklığı (27,5 °C)-100 °C'deki rezonans frekansı-sıcaklık grafiği.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, zorlu ortamlar ile izleme sistemleri için fiziksel bağlantıların mümkün olmadığı yerlerde sıcaklık değişimlerinin izlenmesinde kullanılabilen sıcaklığa dayanıklı bir manyetik bağlaşımla kablosuz pasif sıcaklık sensörü tasarımı ve deneysel olarak gerçekleştirilmesi sunulmaktadır. Sıcaklık değişimi ile sistemde meydana gelen yansıma katsayısı ve rezonans frekans kaymasının tespitine dayanan tamamen pasif endüktif kapasitif (L-C) sensör, temassız olarak fiziksel bağlantı, güç kaynakları veya aktif elemanlar gerektirmeden sıcaklık değişimlerinin izlenmesinin gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Kablosuz pasif sıcaklık sensöründeki iki bobin devresi, baskılı devre kartı (PCB) üzerine basıldıktan sonra Rohde&Schwarz FSH8 ağ analizör cihazı ile test edilmiştir. PCB üzerine basılabilmesi, ince uyumlu, hafif, çevre dostu ve uygun maliyetli yapılar üretilmesine olanak sağlamaktadır. Sensörün enerji iletim verimliliğini tanımlayan kalite faktörü, bu çalışmada anlatılan L-C devresindeki dirençle ters orantılı olarak değişmekte ve termistörün direnci sıcaklıktaki artışla azaldıkça, rezonansın kalite faktörü artış göstermektedir. Kalite faktörünün yüksek değerde olması, endüktif kuplaj yoluyla daha fazla güç alınması ve verilerin daha verimli bir şekilde dış alıcıya aktarılmasında önem arz etmektedir.

ISM banttaki çalışma frekansı olan 6.5 MHz'e ayarlanan sensör devresinin tasarım frekansı 6.5 MHz'i kapsayacak şekilde ayarlanıp simüle edildiğinde elde edilen yansıma katsayısı-frekans grafiğindeki yansıma katsayısının minimum noktası olan rezonans frekansının seçilen teorik değere çok yakın olduğu ve bu devre ile sıcaklık izlemesinin yapılabileceği görülmektedir.

Sıcaklık testlerinde, ilk önce devrede sıcaklık algılama elemanı olan NTC termistörün performans incelemesi yapılmıştır, daha sonra kablosuz pasif sıcaklık sensörünün sıcaklık artış ve azalışlarındaki yansıma katsayısı cevabı, her adımda ağ analizör cihazı ekranından izlenmiş ve daha sonra yansıma katsayısı ile rezonans frekansının yorumlanabilmesi için cihaza kaydedilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, sıcaklık artışında yansıma katsayısının minimum noktasının ve dolayısıyla rezonans frekansın azaldığı görülmektedir. Sıcaklık azalışında ise arttığı görülmektedir. Her iki durumda da devre zayıf kuplajlanma rejiminde yani tek frekansta çalışmaktadır.

Son olarak, avantaj sağlayan güçlü kuplajlanma rejiminin görülüp görülmeyeceğini tespit etmek için sensör devresine 3 tane NTC termistörleri paralel bağlanmış, sıcaklık artış ve azalışlarındaki yansıma katsayısı cevapları değerlendirilmiştir. Sıcaklık artışında 70 °C'den 100 °C'ye kadar ve sıcaklık azalışında 70 °C'den oda sıcaklığına (27,5 °C) kadar mesafeden bağımsız yüke sabit güç sağlayabilen güçlü kuplajlanma rejiminin meydana geldiği grafiklerden görülmektedir.

Sensör devresi tarafından ölçülen sinyale göre istenilen değerikliği gösteren rezonans frekansı ve yansıma katsayısı, karmaşık bir güç sistemine ihtiyaç duyulmadan harici bobin kullanımı ile kolayca llebilmiş ve bir ağ analizör cihazı yardımıyla izlenebilmiştir. Bu çalışmadaki manyetik bağlaşımla kablosuz pasif bir endüktif kapasitif (L-C) sensörünün rezonans frekansı ve yansıma katsayısındaki değerimlerden yararlanılan sıcaklık izlemesinde kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

## 7. KAYNAKLAR

- Bently, R. E. (1998). *Handbook of temperature measurement*. New York : Springer.
- Bicakcı, S. ve Sis, S. A. (2017). Rf uygulamalarda genel amaçlı tınlama frekansı takip edici sistem tasarımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 211-221.
- Chaimanonart, N. (2009). *Adaptively radio frequency powered implantable multi-channel bio-sensing microsystem for untethered laboratory animal real-time monitoring* (Doctoral Thesis, Case Western Reserve University, Ohio). Available from [http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=case1247265060](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=case1247265060)
- DeRouin, A. J., Pereles, B. D., Sansom, T. M., Zang, P. and Ong, K. G. (2013). A wireless inductive-capacitive resonant circuit sensor array for force monitoring. *Journal of Sensor Technology*, 119, 63-69.
- Huang, Q. A., Dong, L. and Wang, L. F. (2016). LC passive wireless sensors toward a wireless sensing platform: Status, prospects, and challenges. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 5, 1057-1157.
- Karipott, S. S. (2017). *A wireless, passive sensor for measuring temperature at orthopedic implant sites for early diagnosis of infections* (Master's Thesis, Michigan Technological University, Michigan). Available from <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1406&context=etdr>
- Li, C., Tan, Q., Jia, P., Zhang, W., Liu, J., Xue, C., et al. (2015). Review of research status and development trends of wireless passive LC resonant sensors for harsh environments. *Sensors*, 6, 13097-13109.
- Mutashar, S., Hannan, M. A., Samad, S. and Hussain, A. (2014). Analysis and optimization of spiral circular inductive coupling link for bio-implanted applications on air and within human tissue. *Sensors*, 14, 11522-11541.
- Rodriguez, R. I. and Jia, Y. (2011). A wireless inductive-capacitive (L-C) sensor for rotating component temperature monitoring. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2, 325-336.
- Seifert, F. and Weigel, R. (1997, October). SAW-based radio sensor and communication techniques. *Proceedings of the 27th European Microwave Conference* (pp. 1323-1346). Jerusalem, Israel.
- Sis, S. A. and Kavut, S. (2018). A frequency-tuned magnetic resonance-based wireless power transfer system with near-constant efficiency up to 24 cm distance. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 6, 3168-3180.
- Veetil, P. M. (2017). *Implantable wireless sensor networks :Application to measuring temperature for in vivo detection of infections* (Master's Thesis, Michigan Technological University, Michigan). Available from <https://digitalcommons.mtu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1408&context=etdr>

- Wang, Y. and Chen, Q. (2008). A passive wireless temperature sensor for harsh environment applications. *Sensors*, 12, 7982-7995.
- Xiao, H., Deng, J., May, R. and Wang, A. (1999). A single crystal sapphire fiber-based sensors for high temperature applications. *Journal of Lightwave Technology*, 10, 2276-2283.
- Xie, M. Z., Wang, L. F., Dong, L., Deng, W. J. and Huang, Q. A. (2019). Low cost paper-based LC wireless humidity sensors and distance-insensitive readout system. *IEEE Sensors Journal*, 12, 4717-4725.
- Yan, D., Yang, Y., Hong, Y., Liang, T., Yao, Z., Chen, X., et al. (2018). Low-cost wireless temperature measurement: Design, manufacture, and testing of a PCB-based wireless passive temperature sensor. *Sensors*, 2, 1-14.



# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Yeliz DİKERLER

Doğum tarihi ve yeri : 04.07.1992 BALIKESİR

e-posta : yelizdikerler@gmail.com

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	Yeditepe Üniversitesi /Biyomedikal Mühendisliği	2015
Lisans	Yeditepe Üniversitesi /Elektrik Elektronik Mühendisliği	2015
Lise	Balıkesir Lisesi/ Sayısal	2010