

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



**ÇEŞİTLİ BANTLARDA MİNYATÜRİZE TEL ANTEN TASARIMI,  
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YUSUF SOYLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Doç. Dr. Seyit Ahmet SİS (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ  
Prof. Dr. Fatih ÜSTÜNER

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2023**

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Çeşitli Bantlarda Minyatürize Tel Anten Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu**” 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.

**Yusuf SOYLU**

## ÖZET

**ÇEŞİTLİ BANTLARDA MİNYATÜRİZE TEL ANTEN TASARIMI, ÜRETİMİ VE  
KARAKTERİZASYONU  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
YUSUF SOYLU  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. SEYİT AHMET SİS)**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2023**

Çeşitli bantlarda tel anten tasarımı ve minyatürize etme teknikleri kullanılarak, kullanım sahasına uygun elektriksel parametreleri sağlayabilen, mekanik ihtiyaçlara uygun şekilde boyutlandırılabilen antenlerin üretimi yapılmıştır. Tez kapsamında, kamu güvenliğinde ve sivil uygulamalarda sıklıkla kullanılan 3 farklı frekans tercih edilmiştir. Kamu güvenlik uygulamaları, meskûn mahal haberleşme uygulamaları, uzaktan kontrollü akıllı otomasyon ve sayaç okuma sistemlerinde kullanılan 168-174 MHz (very high frequency) VHF anten tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Sivil uygulamalarda kablosuz internet (WiFi) uygulamalarında, askeri uygulamalarda insansız hava araçları başta olmak üzere birçok alanda kullanılan merkez frekansı 2.4 GHz olan anten tasarımı ve minyatürize teknikleri uygulanmıştır. Son olarak da, endüstride çok sık kullanılan 868 MHz için dipol tel anten minyatürleştirme konusunda tasarım ve üretim gerçekleştirilmiştir.

Tez süresince anten minyatürize teknikleri, VHF bantlarda anteni küçülterek uygulamalara ergonomi ve kullanım kolaylığı sağlaması için kullanılmıştır. Üretilen antenlerde, uygun frekansta çalışan alıcı ve verici çifti ile tasarlanan antenin haberleşmedeki katkısı saha ölçümleri ile doğrulanmıştır. Bu ölçümlere ek olarak laboratuvar ortamında 1 MHz - 600 MHz sinyal güç dedektörü kullanılarak anten performansının empedans ile ilişkisi ölçülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Minyatürize edilmiş anten, elektriksel küçük antenler, antenlerde minyatürleştirme uygulamaları, tel anten

## **ABSTRACT**

### **DESIGNING, FABRICATING AND CHARACTERIZING OF MINIATURIZED WIRE ANTENNAS IN VARIOUS BANDS**

**MSC THESIS**

**YUSUF SOYLU**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING  
(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SEYİT AHMET SİS )**

**BALIKESİR, JUNE - 2023**

Various types of wire antennas are designed utilizing miniaturization techniques. Antennas are manufactured so as to provide electrical parameters suitable for the user needs, and also suitable for mechanical and environmental conditions of real-life applications. Throughout the thesis work, three different frequencies, which are frequently used in public, security and civil applications, are preferred in the designed antennas. The first design is carried out at 168-174 MHz VHF band. This band is typically allocated for public security applications, residential area communication applications, remote-controlled smart automation and meter reading systems. The second design is carried out at the 2.4 GHz band, which is used in many areas, especially in unmanned aerial vehicles in civil applications, wireless internet applications (WiFi) and military applications. Finally, the third design is carried out at 868 MHz band, which is very frequently used in the industry. The dipole wire antennas are fabricated with utilization of some miniaturization techniques for the 868 MHz band.

During the thesis, antenna miniaturization techniques have been used to provide ergonomics and ease of use to applications by making the antennas smaller in VHF bands. The contribution of the designed antenna is observed in an open area measurement setup employing a receiver and transmitter pair operating at an appropriate frequency. In addition to these measurements, the relationship between antenna performance and impedance is measured by using a 1 MHz - 600 MHz signal strength detector in the laboratory environment.

**KEYWORDS:** Miniaturized antenna, electrical small antennas, miniaturization applications in antennas, wire antenna

Science Code / Codes : 90516/90516/90523/90516

Page Number : 74

# 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>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antenler.....	2
1.1.1 Anten Türleri.....	3
1.1.1.1 Tel Antenler.....	3
1.1.1.2 Dipol Anten .....	4
1.1.1.3 Halka Anten.....	4
1.1.1.4 Monopol Tel Anten .....	5
1.1.1.5 Açıklık Antenleri .....	6
1.1.1.6 Mikroşerit Antenler .....	7
1.1.1.7 Dizi Antenler .....	7
1.1.1.8 Yansıtıcı Antenler.....	8
1.1.1.9 Lens Antenler .....	9
1.1.2 Anten Temel Parametreleri .....	9
1.1.2.1 Işıma Örüntüsü .....	9
1.1.2.2 Işıma Güç Yoğunluğu .....	10
1.1.2.3 Yönlülük ve Maksimum Yönlülük.....	10
1.1.2.4 Antenin Verimi.....	11
1.1.2.5 Anten Kazancı .....	11
1.1.2.6 Anten Giriş Geri Dönüş Kaybı S11 .....	11
1.1.2.7 Alıcı Anten Aldığı Güç Hesabı .....	12
<b>2. ANTENLERDE MİNYATÜRLEŞTİRME TEKNİKLERİ</b> .....	<b>13</b>
2.1.1 Metamalzeme Anten .....	13
2.1.1.1 Metamalzeme Anten Tasarımı .....	13
2.1.2 Origami Anten.....	14
2.1.3 Oluklu Düzlemsel Ters-F Anten .....	15
2.1.4 Katlanmış Monopol Anten.....	17
2.1.5 Sarmal Anten.....	18
2.1.6 Fraktal Anten.....	19
<b>3. TEL ANTENLERDE MİNYATÜRLEŞTİRME TEKNİĞİ UYGULAMALARI</b> <b>21</b>	
3.1 Tek Kutuplu(Monopol) Minyatürize Sarmal Tel Anten Uygulaması.....	21
3.1.1 Çeyrek Dalga Monopol Tel Anten Uygulaması.....	21
3.1.2 Elektriksel Küçük Monopol Tel Anten Uygulaması.....	26
3.1.2.1 Sarmal Anten.....	27
3.2 Çift Kutuplu Minyatürize Sarmal Tel Anten Uygulaması .....	34

3.2.1 Yarım Dalga Dipol Tel Anten Uygulaması .....	35
3.2.2 Elektriksel Küçük Dipol Tel Anten Uygulaması .....	40
3.3 2.4 GHz Minyatürize Monopol Anten Uygulaması ve Anten Kazancının Artırılması	45
3.3.1 Anten Kazancı Odaklı 2.4 GHz Monopol Tel Anten Tasarım ve Üretim Ölçüm Sonuçları .....	49
3.3.2 Anten Kazancı Odaklı 2.4 GHz Monopol Tel Anten Ölçüm Sonuçları .....	53
<b>4. ANTEN EMPEDANS UYUMLULUĞU İLE ANTEN PERFORMANSININ İLİŞKİSİNİN ÖLÇÜLMESİ .....</b>	<b>55</b>
4.1.1 Anten Empedans Uyumluluğu ile Anten Performansının İlişkisinin Sinyal Dedektörü ile Ölçülmesi .....	59
4.1.2 Merkez Frekansı Aynı Mekanik Özellikleri ve Elektriksel Özellikleri Farklı Antenlerin Performans Karşılaştırması .....	62
<b>5. DOĞRUDAŞ ÇİFT KUTUPLU DİZİ ANTEN TASARIMI VE ÜRETİMİ.....</b>	<b>64</b>
5.1.1 Son Beslemeli Doğruduş Çift Kutuplu Dizi Anten Hesabı .....	66
5.1.2 Doğruduş Çift Kutuplu Dizi Anten Ölçüm Sonuçları .....	67
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>69</b>
<b>7. KAYNAKLAR .....</b>	<b>71</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>74</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Örnek tel anten çeşitleri 1.1.a) Helezon, 1.1.b) Dipol 1.1.c) Dairesel (kare) halka, [5].....	3
Şekil 1.2: Şekil (a) kare Şekil (b) yuvarlak halka anten modeli.....	5
Şekil 1.3: Monopol anten modeli.....	6
Şekil 1.4: Sonlu yer düzlemi ile oluşturulmuş monopol anten ışıma karakteristiği. ....	6
Şekil 1.5: Açıklık anten yapıları a) Piramit huni, b) Konik huni c) Dikdörtgen dalga kılavuzu [9].....	6
Şekil 1.6: Mikroşerit anten temel birim yapısı.....	7
Şekil 1.7: Dizi anten örnekleri a) Yagi-Uda dizi b) Mikroşerit yama dizi.....	8
Şekil 1.8: FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope). ....	8
Şekil 1.9: Işıma Örüntüsü Lob Gösterimi. ....	10
Şekil 2.1: Origami anten örneği [23].....	15
Şekil 2.2: Düzlemzel ters F anten yapısı.....	15
Şekil 2.3: Tasarlanan düzlemzel ters F anten yapısı. ....	16
Şekil 2.4: Tasarlanan düzlemzel ters F anten ışıma karakteristiği. ....	16
Şekil 2.5: Tasarlanan düzlemzel ters F anten S11 grafiği.....	17
Şekil 2.6: Katlanmış monopol anteni yapısı. ....	17
Şekil 2.7: Monopol sarmal anten yapısı.....	18
Şekil 2.8: Monopol sarmal anten örneği ışıma karakteristiği (1.9 dBi). ....	19
Şekil 2.9: Fraktal anten örneği yapısı.....	20
Şekil 2.10: 5.8 GHz Fraktal anten ışıma karakteristiği. ....	20
Şekil 2.11: 5.8 GHz Fraktal S11 simülasyon sonucu.....	21
Şekil 3.1: 169 MHz çeyrek dalga monopol anten simülasyon sonucu .....	22
Şekil 3.2: 169 MHz çeyrek dalga monopol anten simülasyon sonucu .....	23
Şekil 3.3: 169 MHz çeyrek dalga monopol anten simülasyon sonucu .....	23
Şekil 3.4: Üretilen çeyrek dalga monopol anten modelleri.....	24
Şekil 3.5: Üretilen çeyrek dalga monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu.....	25
Şekil 3.6: Üretilen çeyrek dalga monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu.....	25
Şekil 3.7: Üretilen çeyrek dalga monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu.....	26
Şekil 3.8: Toprak düzlemi ile sarmal anten geometrisi.....	27
Şekil 3.9: Sarmal anten normal mod ışıma karakteristiği. ....	28
Şekil 3.10: Sarmal anten aksenal mod ışıma karakteristiği.....	28
Şekil 3.11: Sarmal mod ve eşdeğeri için normal mod anten yapısı. ....	29
Şekil 3.12: Üretilen elektriksel küçük monopol anten modelleri.....	30
Şekil 3.9: Üretilen elektriksel küçük monopol anten modelleri.....	32
Şekil 3.10: Üretilen minyatürize monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu.....	32
Şekil 3.11: Üretilen minyatürize monopol 169 MHz antenin vna ölçüm sonucu.....	33
Şekil 3.12: Üretilen minyatürize monopol 169 MHz antenin vna ölçüm sonucu.....	34
Şekil 3.17: Dipol anten fiziksel geometrisi.....	35
Şekil 3.13: 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (S11). ....	36
Şekil 3.14: 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (Rlzd. Gain). ....	36
Şekil 3.15: 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (S11- Boşluk değişimi).....	37
Şekil 3.16: 868 MHz anten tasarım kombine simülasyon sonuçları (S11). ....	37
Şekil 3.17: 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (Rlzd. gain). ....	38
Şekil 3.18: Üretilen 868 MHz yarım dalga çift kutuplu anten modeli.....	39

Şekil 3.19:	Üretilen 868 MHz yarım dalga çift kutuplu anten s parametre ölçüm sonucu.	39
Şekil 3.20:	Üretilen 868 MHz yarım dalga çift kutuplu anten empedans ölçüm sonucu....	40
Şekil 3.21:	Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten modeli. ....	41
Şekil 3.22:	Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten simülasyon sonucu .....	41
Şekil 3.23:	Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten simülasyon sonucu .....	41
Şekil 3.24:	Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten simülasyon sonucu .....	42
Şekil 3.25:	Üretilen elektriksel küçük dipol anten modelleri.....	42
Şekil 3.27:	Üretilen minyatürize çift kutuplu 868 mhz antenin VNA ölçüm sonucu.....	43
Şekil 3.28:	Üretilen minyatürize çift kutuplu 868 MHz antenin VNA ölçüm sonucu.....	44
Şekil 3.29:	Üretilen minyatürize çift kutuplu 868 MHz antenin VNA ölçüm sonucu.....	44
Şekil 3.30:	Tasarlanan 2.4 GHz antenin simülasyon sonuçları anten 1 .....	45
Şekil 3.31:	Tasarlanan 2.4 GHz antenin simülasyon sonuçları anten 1 .....	46
Şekil 3.32:	Üretilen 2.4 GHz anten modelleri.....	46
Şekil 3.33:	Üretilen 2.4 GHz anten modelleri.....	47
Şekil 3.34:	Üretilen çeyrek dalga monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (S11). ....	47
Şekil 3.35:	Üretilen çeyrek dalga monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (Smith diyagramı).....	48
Şekil 3.36:	Üretilen çeyrek dalga monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (VSWR).....	48
Şekil 3.37:	Üretilen 2.4 GHz yüksek kazançlı anten modelleri. ....	50
Şekil 3.38:	Üretilen yüksek kazançlı Monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm görüntüsü. ....	50
Şekil 3.39:	Üretilen yüksek kazançlı monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm sonucu (Geri dönüş kaybı grafiği) - Tip 2. ....	51
Şekil 3.40:	Üretilen yüksek kazançlı monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm sonucu (Smith diyagramı) - Tip 2.....	52
Şekil 3.41:	Üretilen yüksek kazançlı monopollü 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm sonucu (VSWR grafiği) – Tip 2.....	52
Şekil 3.42:	Üretilen çeyrek dalga monopollü 2.4 GHz minyatürize yüksek kazançlı antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (S Parametre).....	53
Şekil 3.43:	Üretilen çeyrek dalga monopollü 2.4 GHz minyatürize yüksek kazançlı antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (Smith grafiği).....	54
Şekil 3.44:	Üretilen çeyrek dalga monopollü 2.4 GHz minyatürize yüksek kazançlı antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (VSWR).....	55
Şekil 4.1:	Anten performansı ölçüm platformu yerleşimi.....	56
Şekil 4.2:	Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi.....	57
Şekil 4.3:	Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi (Üretilen anten ölçümü). ....	57
Şekil 4.4:	Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi (2 cm kesilen anten ölçümü). ....	58
Şekil 4.5:	Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi (4 cm kesilen anten ölçümü). ....	58
Şekil 4.6:	Sinyal dedektörü tanıtımı.....	60
Şekil 4.7:	Sinyal dedektörü ölçüm ortamı.....	60
Şekil 4.7:	Sinyal dedektörü ölçümü esnasında ölçüm görselleri.....	61
Şekil 4.8:	Ölçülen antenler ve test düzeneği. ....	63
Şekil 5.1:	Doğrudan dizi anten besleme yöntemleri.....	65
Şekil 5.2:	Doğrudan dizi anten genel tasarımı.....	65
Şekil 5.3:	Koaksiyel hat ile oluşturulmuş doğrudan dizi anten mekanik tasarım modeli. ..	66
Şekil 5.4:	Üretilen doğrudan dizi anten ölçüm sonucu (VSWR). ....	67
Şekil 5.5:	Üretilen doğrudan dizi anten ölçüm sonucu (S11).....	68



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Çift Bant (0.9 – 1.8 GHz) PIFA tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri. ....	15
<b>Tablo 2.2:</b> 169 MHz Sarmal tek kutuplu anten tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri.....	18
<b>Tablo 2.3:</b> 5.8 GHz fraktal anten tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri. ....	20
<b>Tablo 3.1:</b> 3 farklı anten tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri.....	31
<b>Tablo 3.2:</b> Farklı mekanik özelliklerde S parametre değerleri karşılaştırma tablosu. ....	38
<b>Tablo 3.3:</b> Simülasyon ve üretilen anten özellikleri karşılaştırma tablosu. ....	40
<b>Tablo 4.1:</b> S parametre - boy cevabına bağlı performans tablosu. ....	56
<b>Tablo 4.2:</b> S parametre - anten boyu cevabına bağlı performans tablosu 2.....	59
<b>Tablo 4.3:</b> Sinyal dedektörü ile S parametre değerinin anten performansına etkisi.....	61
<b>Tablo 4.4:</b> Sinyal dedektörü ile merkez frekansı dışında bir frekanstaki performans değerlendirilmesi. ....	62
<b>Tablo 4.5:</b> Sinyal dedektörü ile merkez frekansı dışında bir frekanstaki performans değerlendirilmesi. ....	63

## SEMBOL LİSTESİ

<b>D</b>	: Yönlülük (Boyutsuz)
<b>dB</b>	: Desibel
<b>dBi</b>	: Desibel İzotropik
<b>D0</b>	: Maksimum Yönlülük(Boyutsuz)
<b><math>e_{iy}</math></b>	: Işıma Verimliliği
<b>GHz</b>	: Gigahertz
<b>Hz</b>	: Hertz
<b>MHz</b>	: Megahertz
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>PT</b>	: Toplam Işıma Gücü (Watt)
<b>Por</b>	: Işıma Yoğunluğu [ W/m <sup>2</sup> ]
<b>U</b>	: Işıma Şiddeti [W/sr]
<b>U</b>	: Işıma Şiddeti (W/birim katı açısı)
<b>U<sub>max</sub></b>	: Maksimum Işıma Şiddeti (W/birim katı açısı)
<b>U<sub>0</sub></b>	: İzotropik Kaynağın Işıma Şiddeti (W/birim katı açısı)
<b><math>\Gamma</math></b>	: Anten Giriş Uçlarındaki Yansıma Katsayısı
<b><math>\epsilon</math></b>	: Dielektrik Katsayısı
<b><math>\mu</math></b>	: Manyetik Geçirgenlik
<b>LOS</b>	: Görüş Hattı (Line of Sight)
<b>NLOS</b>	: Görüş Hattı Harici (Non Line of Sight)
<b>VNA</b>	: Vektör Devre Analizörü (Vector Network Analyzer)

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans tezimi yazarken, çalışma konumun belirlenme aşamasından, araştırma ve yazım aşaması dâhil olmak üzere bütün bu süre zarfında, engin bilgisi ve tecrübesi ile çalışmama destek olan, sabırla ve itina ile yardımcı olan ve bana inancını hiç kaybetmeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Seyit Ahmet SİS'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan başta babam Rafet SOYLU'ya, annem Nezahat SOYLU'ya, yoğun geçen tez sürecimde sabrı ve destekleri için sevgili eşim Ayşenur SOYLU'ya, bana olan inancını ve sevgisini her daim hissettiren kıymetli büyüğüm saygı değer Prof. Dr. Osman KALENDER'e ve dostlarıma, sevgilerimle teşekkür ederim.

**Balıkesir, 2023**

**Yusuf SOYLU**

# 1. GİRİŞ

Monopol antenler geçmiş dönemlerde uygulaması en yaygın ve işlemesi en kolay yapılardan olması sebebi ile birçok araştırmacının ve üreticinin odağında yer almıştır. Günümüzde dahil neredeyse bütün yenilik ve teknolojik gelişmeler askeri alanda ve sağlık alanında ortaya çıkan sorunlara çözüm getirmek veya mevcut sistemleri daha ileriye taşımak için ortaya konulmaktadır. Bu sebeple birçok ticari ve akademik kurum, anten tasarımı ile ilgili çalışma yapmaktadır. Askeri haberleşme sistemleri, çevresel koşullar göz önünde bulundurularak geliştirilmektedir. Her bölgeye göre cihaz ve haberleşme sistemi geliştirmek yerine güç tüketimi az olan ve dalga boyu 1 metreden büyük, hem meskûn mahal (NLOS) hemde açık alana (LOS) uygun haberleşme frekansları yaygın olarak tercih edilir. 10 GHz ve üzeri, noktadan noktaya haberleşme sistemleri pek yaygın değildir. Askeri uygulamalarda, operasyonel özelliği korumak, haberleşme kalitesinden fedakarlık etmeden mobil sistem ve personellerin taşıdığı haberleşme cihazlarında ergonomiyi ve uygulanabilirliği sağlamak amacı ile elektriksel küçük minyatürize edilmiş antenler tasarlanmıştır. Bu alanda yapılan çalışmalar, antenin fiziksel boyutunu küçültürken işlevselliğini arttırmaya yönelik olarak devam etmektedir. Anten minyatürleştirme için bazı yaklaşımlar, yarıklı, boşluklu, süreksiz yapılar, spiralli yapılar, küçük açısız değişimler, küçük kıvrımlar ve fraktallar gibi yeni geometrilerin veya farklı materyaller kullanılarak farklı dielektrik sabitinin kullanılmasıdır. Bu çalışmalardan ilham alınarak monopol tel antenlerde uygulanan minyatürize etme tekniklerinden spiral sarım yöntemi kullanılarak minyatürize anten tasarım ve üretimi yapılmıştır. Minyatürleştirmenin, empedans uyumluluğu ve bant genişliği gibi çeşitli anten parametrelerindeki etkisi incelenmiştir. Empedans uyumluluğu, bant genişliği, ışınım örüntülerindeki değişiklikleri tespit etmek ve üretim öncesi kıyaslayabilmek için simülasyon programı üzerinden çalışılmıştır. Tespit edilen en uygun değerlere sahip yapıya uygun tel anten üretimi yapılmıştır. Üretilen antenler VNA (Vektör Devre Analizörü) üzerinden ölçülmüş, tasarlandığı frekansta, bant genişliği ve S11 değerleri incelenmiştir. Devam eden süreçte, anten tasarımına uygun frekansta çalışan, alıcı ve verici çifti ile anten saha performansı test edilmiştir. Anten yönlülüğü, ve verimliliği, teori ve operasyonel olarak karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasının amacı;

- Monopol anten tasarımının ve üretiminin gerçekleşmesi,
- Minyatürize yaklaşımları kullanılarak monopol anten tasarımı ve üretimi yapmak,
- Spiral ve süreksiz spiral anten tasarımı yapmak,

- Düşük maliyet ile yönsüz, ebatları küçük mobil cihazlara uygun anten tasarımı yapmak olarak sıralanabilmektedir.

## 1.1 Antenler

Antenler, boşluktaki uygun frekanstaki elektromanyetik dalgaları toplayarak bu dalgaların iletim hatları içerisinde yayılmasını sağlayan ("alıcı anten") veya iletim hatlarından gelen sinyalleri boşluğa dalga olarak yayan (verici anten) cihazlardır [1]. Antenler, radyo dalgalarını belirli bir yöne (yüksek kazançlı anten) veya tüm yönlere eşit bir şekilde ("tümyönlü anten") yaymak için tasarlanabilir. Antenlerde istenilen bir ışınma desenini veya hüzmeleri elde etmek için parabolik yansıtıcı, boynuz veya parazitik eleman gibi ek parçalar kullanılabilir. Anten dizileri de aynı zamanda farklı ışınma desenleri elde etmek için kullanılabilir [2].

Tarihte antenler ilk kez 1888 yılında Alman fizikçi Heinrich Hertz tarafından üretilmiş ve Hertz'in deneyleri James Clerk Maxwell'in öngördüğü elektromanyetik dalgaların varlığını kanıtlamıştır [3].

1895 yılı itibari ile Guglielmo Marconi uzun mesafeli radyotelgraf haberleşme için anten tasarımlarına başlamış ve bu çalışması kendisine Nobel Ödülü kazandırmıştır [4].

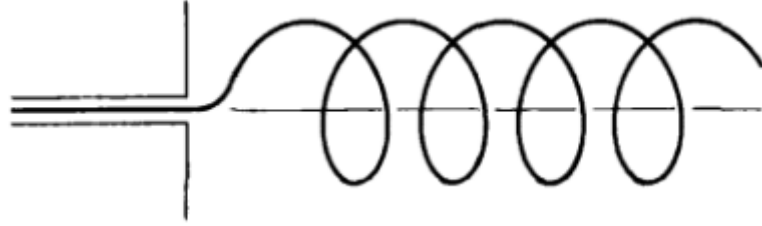
Yeni anten teknolojileri çalışmaları ikinci dünya savaşının başlaması ile hız kazanmıştır. Haberleşme konusunda yeteneklerin artırılması ihtiyaçlar ile orantılı şekilde seyretmiştir. Bu yaklaşım ile antenler, tasarım amaçlarına göre sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırma yapılırken; ışınma örüntüsü, frekans bant genişliği, mekanik özellikleri ve uygulama alanlarına bakarsak; tel antenler (monopol, dipol, spiral vb.), açıklık antenler (horn, dikdörtgen dalga kılavuzu, konik huni vb.), mikro şerit antenler (dikdörtgen ve dairesel yama antenler), dizi antenler, yansıtıcı antenler, lens antenler, geniş bant antenler olarak sınıflandırılabilir. Antenler, radyo ve televizyon yayınları, radar sistemleri, radyo dalgası iletişim sistemleri, cep telefonları, çarpışma önleyici araba algılayıcıları ve daha birçok uygulama alanına sahiptir. Bu tez çalışmasında tek kutuplu (monopol) anten konusu üzerine çalışılmış, birçok monopol anten yapısı incelenmiş ve minyatürize etme teknikleri denenmiştir.

### 1.1.1 Anten Türleri

Antenlerde kullanım amacı, uygulama alanı gibi birçok parametre farklı anten tasarımı ihtiyacı doğurmuştur. Artan ihtiyaçları paralelinde seyreden gelişen teknoloji, yeni tip antenlerinde üretilmesinin önünü açmıştır. Kullanım alanına göre farklı parametreler ve ihtiyaçlara göre tasarım ve üretim teknikleri geliştirilmiştir. Tezin bu bölümünde geçmişten günümüze anten tiplerinden bahsedilmiştir.

#### 1.1.1.1 Tel Antenler

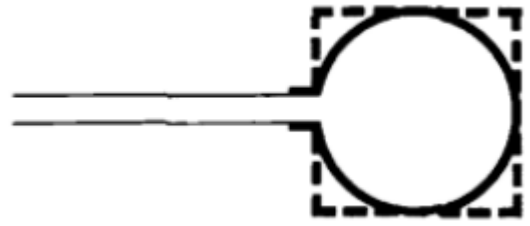
Geçmiş dönemdeki üretim şartları göz önünde bulundurulduğunda ve ihtiyaçları karşılama yeterliliği açısından en köklü ve kullanım alanı en yaygın olan anten çeşididir. Mobil araçlar, inşaatlar, deniz araçları, hava araçları, uzay araçları gibi bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kamçı tel tek kutuplu antenler, çift kutuplu antenler, loop, elips, spiral tipi antenler, halka antenler ve geometri ile tasarlanan modelleri mevcuttur.



(1.1.a)



(1.1.b)



(1.1.c)

**Şekil 1.1:** Örnek tel anten çeşitleri 1.1.a) Helezon, 1.1.b) Dipol 1.1.c) Dairesel (kare) halka, [5].

Doğrusal veya kavisli tel antenler, uygulaması basit ve maliyeti düşük olması sebebiyle çoğu uygulamada kullanılmaktadır. Üretim yöntemi ve malzeme teknolojisi olarak ulaşılabilir olması sebebiyle en eski anten tiplerindedir. Dipol, monopul, sarmal ve halka antenleri, tel anten tipleri için başlıca örneklerdendir.

### 1.1.1.2 Dipol Anten

Dipol, teorik açıdan en basit anten türlerindedir. Yaygın olarak, aralarında bağlı besleme hattı ile uç uca yönlendirilmiş eşit uzunlukta iki iletken oluşur. Antenin uzunluğu, amaçlanan frekansına göre belirlenir. İki adet çeyrek dalga çubuktan oluşan veya minyatürize tekniği uygulanarak çeyrek dalga boyuna göre davranış sergileyen dipol anten türü yarım dalga dipol anten olarak ifade edilir. Çeyrek dalganın bir kısmı ışıyıcı olarak beslemenin canlı ucunda, diğer çeyrek dalga kısım ise sinyal hattının eksi kısmına irtibatlandırılır. Yarım dalga dipolün radyasyon modeli , iletkene diktir, eksenel yönde sıfıra düşer [6].

Tek başına düşük kazançlı antenler olarak kullanılabilmelerine rağmen, dipoller ayrıca yağı anteni veya doğrudan dipol dizi antenler gibi daha karmaşık anten tasarımlarında birim elemanlar olarak kullanılır [7].

### 1.1.1.3 Halka Anten

Halka antenler, kullanım alanı ve ergonomi ihtiyacına göre dairesel, üçgen, dikdörtgen ve eliptik gibi farklı şekiller ile imal edilebilmektedir. Bu antenler, çok yönlü ışınım karakteristiğine sahiptir. Büyük ve küçük halka antenleri olarak ifade edilen iki tasarım modeli bulunmaktadır.

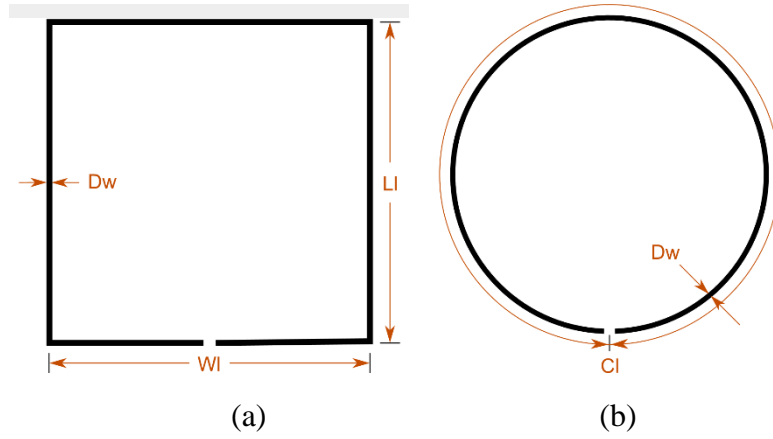
Büyük halka antenleri aynı zamanda rezonans antenler olarak da adlandırılır. Yüksek radyasyon verimliliğine sahiptirler. Bu antenler, amaçlanan dalga boyuna neredeyse eşit uzunluğa sahiptir. Bu antenin ana parametresi, yaklaşık bir dalga boyu olan ve kapalı bir halka olması gereken çevre uzunluğudur. Kapasitif etkileri artıracığından ve düşük verimle sonuçlanacağından, boyutu küçültmek için halkayı kıvrımlı hale getirmek ve bir minyatürize tekniği uygulamak tercih edilmemektedir. Anten boyu dalga boyuna eşit olduğu durum:

$$L = \lambda \quad (1.1)$$

Küçük halka antenleri ayrıca manyetik halka antenleri olarak da adlandırılır. Büyük halka antenine göre daha az rezonanslıdır. Genellikle alıcı birim anteni olarak kullanılır.

Bu antenler dalga boyunun onda biri büyüklüğündedir. Geometri olarak en çok kullanılan şekil daire ve kare halka (bkz. Şekil 1.2) antenleridir. Anten boyu dalga boyunun onda biri olduğu durum:

$$L = \frac{\lambda}{10} \quad (1.2)$$



Şekil 1.2: Şekil (a) kare Şekil (b) yuvarlak halka anten modeli.

#### 1.1.1.4 Monopol Tel Anten

Marconi anteni olarak da bilinen tek kutuplu (monopol) anten, G. Marconi tarafından 1895 yılında vericinin bir ucunu havaya yöneltmiş uzun bir tele bağlayıp, diğer ucunu da toprağa bağlayarak daha uzak mesafelere sinyal gönderebileceğini keşfetmiştir. 1896 yılında Macroni tarafından patentinin alınmasıyla monopol anten çalışmaları günümüzde de etkinliğini sürdürmeye devam etmiştir [8].

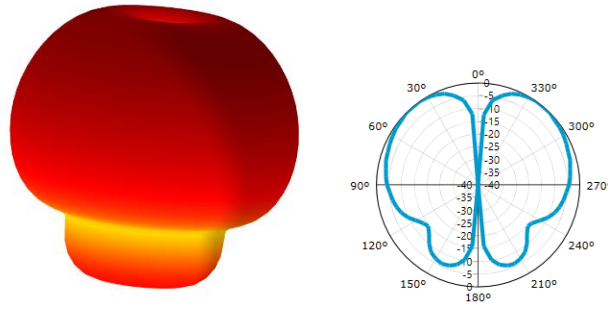
Boyu çeyrek dalga olan düz metal telden oluşan tek kutuplu antenler, yer düzlemine (ground plane) yaygın olarak dik ve besleme için belirli bir mesafe boşlukla yerleştirilir. Anten  $\lambda/4$  boyunun tam katlarında rezonans hale gelerek maksimum sinyal aktarımı yaparlar. Rezonans durumunda anten empedansı  $36,5 + j21.25 \Omega$  değerindedir. Empedansı çeyrek dalga boyunun altındaysa kapasitif, çeyrek dalga boyunun üstünde ise endüktif olur.

Tüm yönlü (omnidirectional) ışına örüntüsüne sahip olan monopol antenlerde, yayılım antene dik ve her yöne eşit bir şekilde dağılımla gerçekleşir. Bu yayılım anten eksenine doğru  $0^\circ$  a düşer (bkz. Şekil 1.4). Düşey polarize dalga yayılımı yaparlar. Buna ek olarak benzer yapıya sahip dipol antenlere göre kazancı iki kat fazla olurken, yayılım direnci ise dipol antene göre yarıya düşmektedir.





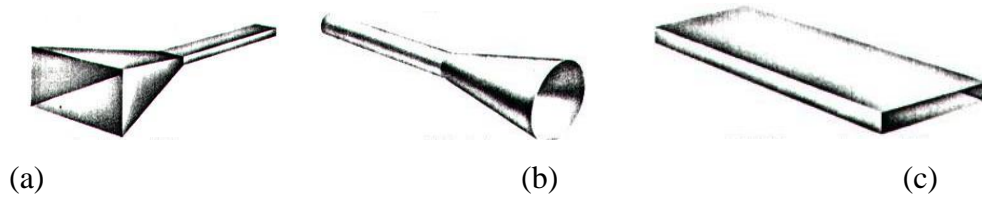
Şekil 1.3: Monopol anten modeli.



Şekil 1.4: Sonlu yer düzlemi ile oluşturulmuş monopol anten ışıma karakteristiği.

### 1.1.1.5 Açıklık Antenleri

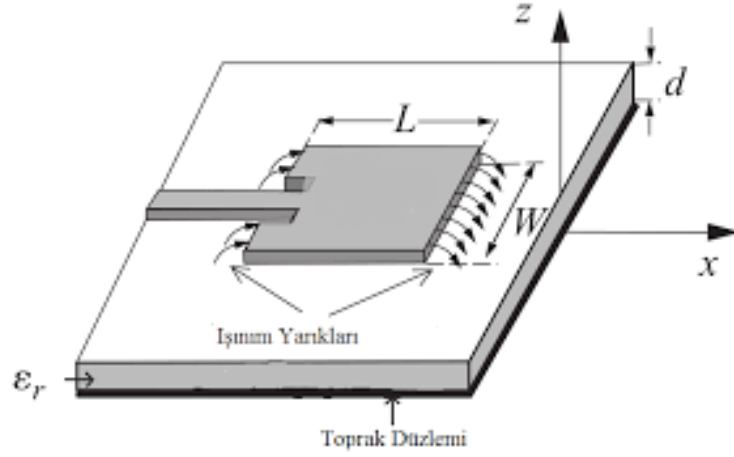
Yapı olarak karmaşık olsalarda günümüz ihtiyaçları doğrultusunda yüksek frekansta çalışabilmeleri sebebi ile geçmişe göre daha fazla bilinmektedirler. Açıklık antenler uzay araçları veya hava araçlarında montajlı olarak kullanılabilmesi sayesinde tercih edilen bir anten tipidir. Genel olarak bütün bir iletkenin oluşan ve radomsuz tipleri için, olası çevre koşullarına göre önlem amacıyla yalıtkan malzeme ile kaplanan tipleride bulunmaktadır. Dörtgen dalga kılavuzu, konik huni, piramit huni gibi açıklık anten çeşitleri bulunmaktadır.



Şekil 1.5: Açıklık anten yapıları a) Piramit huni, b) Konik huni c) Dikdörtgen dalga kılavuzu [9].

### 1.1.1.6 Mikroşerit Antenler

Mikroşerit antenler, toprak düzlemi olarak belirtilen alt tabaka üzerine iletken bir yama iletkenin yerleştirilmesiyle oluşan anten türüdür. 1970 yıllarında uzay ve havacılık uygulamaları için popüler hale gelen mikroşerit antenler, günümüzde hava araçlarında uzay uygulamalarında neredeyse yaygın kullanılan tüm iletişim araçlarında kullanılmaktadır [10]. Daire ve dikdörtgen mikroşerit yama antenler en popüler olanlarıdır. Yüksek performanslı, düşük maliyetli, düzlemsel olan veya olmayan yüzeylere uyumluluğu, rezonans frekansı gibi birçok özelliğinden dolayı çok yönlü antenlerdir. Hava ve uzay araçları, kara araçları, füze, uydu ve bazı noktalarda cep telefonlarında kullanılmaktadır.



Şekil 1.6: Mikroşerit anten temel birim yapısı.

### 1.1.1.7 Dizi Antenler

İstenilen ışınım özellikleri birçok uygulama için tek bir eleman ile mümkün olmayabilir. Ancak elektriksel ve geometrik düzende ışınım elemanları (dizi) bir araya getirilerek istenilen ışınım özelliklerinin sağlamak mümkün olabilmektedir. Dizi elemanlarının düzenlenmesine göre ışınım belli bir yönde ya da yönlerde maksimum, diğer yönlerde minimum ya da istenilen şekillerde oluşturulabilmektedir [11].



Şekil 1.7: Dizi anten örnekleri a) Yagi-Uda dizi b) Mikroşerit yama dizi.

### 1.1.1.8 Yansıtıcı Antenler

Uzayın keşfi ve bu konudaki çalışmaların öncülük ettiği, çok uzak mesafelerde veri akışı gereksinimi anten teorisini geliştirmeye zorlamıştır. Çok uzak mesafeler arasında iletişim kurması için çok uzak mesafelere (milyonlarca kilometre) sinyal iletilmesi ve alınmasını sağlayan antenlerdir. Bu tarz uygulamalar için en fazla kullanılan anten modeli parabolik yansıtıcı antenlerdir. Uzak mesafelere veri iletişiminin gerçekleşmesi için anten kazancının yüksek olması gerekmektedir. Bu tip antenler yüksek kazancı sağlayabilmek için çapları büyük olmaktadır. Çanak çapı 500 metre olan örnekler bulunmaktadır [12]. Dünyanın en büyük yansıtıcı anteninden söz etmek gerekirse, FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) adlı teleskop anteni dünyada bu güne kadar inşa edilen en büyük radyo teleskoplarından olma özelliğini taşıyan çanak ile evrenin ilk anları, gökadalardan ve yıldızların nasıl oluştuğuyla ilgili çalışmalar yürütülmektedir.



Şekil 1.8: FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope).

### **1.1.1.9 Lens Antenler**

Sinyallerin, istenmeyen yönlere yayılmasını engellemek için kullanılır. Uygun materyaller kullanılarak farklı geometrik şekillendirme yöntemleri sayesinde, ıraksak enerjinin düzlem dalgalara dönüşmesini sağlanmaktadır. Özellikle yüksek frekanslarda, parabolik yansıtıcıların kullanıldığı benzer uygulamalar için kullanılırlar. Lens antenlerin boyutları ve ağırlıkları, düşük frekanslar için çok büyüktür. Bununla birlikte, kullanılan materyal ve geometrik şekline göre ince lens anten veya kalın lens anten olarak isimlendirilirler [13].

### **1.1.2 Anten Temel Parametreleri**

Anten ölçüm sonuçlarını anlamlandırmak ve tasarımda öncelikli ihtiyaçların belirlenmesi amacı ile anten parametrelerinin değerlendirilmesi gerekir. Bu araştırma fazında, tez çalışmasında faydalanılan temel parametrelerin kısa tanımları belirtilmiştir.

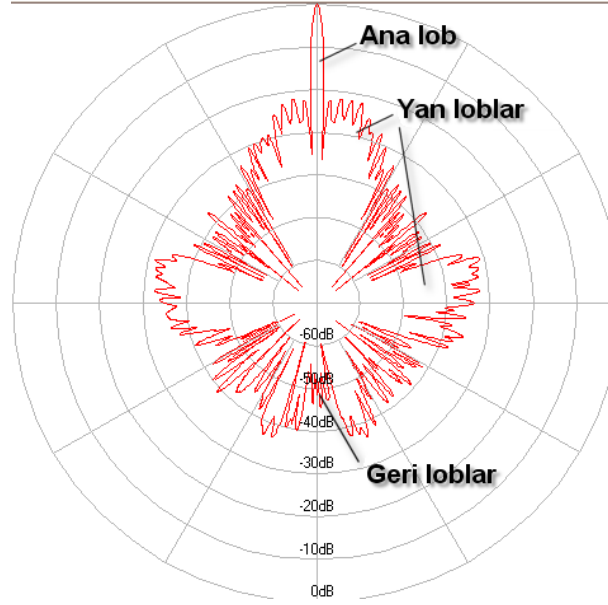
#### **1.1.2.1 Işıma Örüntüsü**

Anten ışıma örüntüsü, bir antenden yayınlanan enerjinin göreceli yoğunluğu veya elektrik ya da manyetik alan kuvvetlerini yöne bağlı olarak gösterir. Antene ait yönel karakteristiklerini ifade eder [14].

Anten ışıma örüntüsü, bir radar anteninin yöne bağlı olarak yayın kuvveti çizgesel olarak gösterilir ve böylece o yöndeki yayın gücü için bir betimleme yapılır. Bu çizgeler, ölçü yöntemleri veya bilgisayarda simulasyon programları ile oluşturulur.

Bir düzlem içinde her yönde eşit miktarda yayın yapabilen bir yön bağımsız (omni-directional) antene karşılık, yön bağımlı anten ile yayın bir yönde yoğunlaşır ve bu sayede daha az bir gönderim gücü ile daha uzun menzillere ulaşmak mümkün olabilir. Bir antene ait gönderim ve alım çizgesinin karşılıklılık özelliği nedeniyle, hem gönderilen yayının belirli bir yöndeki kuvvetini, hem de antenin bu yöndeki alım duyarlılığı tayin etmek mümkün olmaktadır.

Yatay anten ışıma örüntüsü hem kartezyen hem de kutupsal koordinat sisteminde çizilebilir. Kartezyen koordinat sistemi ile anten verileri daha iyi gösterilebilir. Yayın gücü kutupsal koordinat sisteminde bölgesel eğrilerle belirtilir. Işıma örüntüsü merkezinde antenin bulunduğu antene ait elektromanyetik alanının iki boyutlu düzlemdeki havadan görünüşü verilir.



Şekil 1.9: Işıma Örüntüsü Lob Gösterimi.

### 1.1.2.2 Işıma Güç Yoğunluğu

Bir antenin birim katı açıdan yaydığı güçtür. Uzaktan bağımsız antenden yansıyan ışınım güç yoğunluğunu verir.

$$U(\theta, \phi) = r^2 P_{or} \left[ \frac{W}{sr} \right] \quad \text{Işıma şiddeti} \quad (1.3)$$

Örneğin; sonsuz küçüklükteki bir dipol antenin ışınım güç yoğunluğu aşağıdaki gibidir:

$$P_{or} = A_0 \sin\theta / r^2 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Antenin güç yoğunluğu} \quad (1.4)$$

### 1.1.2.3 Yönlülük ve Maksimum Yönlülük

Bir antenin yönlülüğü; antenin belli bir yöndeki ışınım şiddetinin, referans antenin ışınım şiddetine oranı şeklinde tanımlanır. Referans anten olarak izotropik kaynak yani tüm yönlü anten seçilir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_T} \quad D(\text{dB}) = 10 \log_{10}[D] \quad (1.5)$$

$$\text{Maksimum yönlülük: } D_{maks} = \frac{U_{maks}}{U_0} = \frac{4\pi U_{maks}}{P_T} \quad (1.6)$$

#### 1.1.2.4 Antenin Verimi

Anten verimliliği, antenin yaydığı ışığa gücünün antene uygulanan toplam elektriksel güce oranı olarak ifade edilebilmektedir.

- $e_0$  = Toplam verimlilik
- $e_r$  = Uyumsuzluk (mismatch) verimliliği
- $\Gamma$  = Antenin giriş terminallerindeki gerilim yansıma katsayısı
- $e_c$  = İletim verimliliği (boyutsuz)
- $e_d$  = Dielektrik verimliliği (boyutsuz)

$$e_0 = \frac{P_{rad}}{P_T} \rightarrow e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad [15] \quad (1.7)$$

#### 1.1.2.5 Anten Kazancı

Antenin verilen yöndeki kazancı, “verilen bir yöndeki ışığa şiddetinin, güç ışık veren anten tarafından yönbağımsız olarak toplandığında elde edilecek ışığa şiddetine oranı” olarak tanımlanmaktadır [15].

Kayıpsız bir antenin kazancı antenin yönlülüğüyle doğru orantılıdır. Anten kazancı, yaygın olarak dB (desibel) türünden (ya da izotropik antene göre olduğunu belirtmek için dBi türünden) verilir. Anten kazancı, antene uygulanan güce göre daha büyük bir çıkış gücünün elde edilmesini sağlamaz, anten çıkış gücünün belirli bir yöne doğru yönlendirilmesidir [16].

$$G = \frac{\text{ışık şiddeti}}{\text{toplam giriş (almış) gücü}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{boyutsuz}) \quad (1.8)$$

#### 1.1.2.6 Anten Giriş Geri Dönüş Kaybı S11

Geri dönüş kaybı RF ve mikrodalga devre uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir parametredir. Giriş portuna uygulanan gücün ne kadarının geri yansıdığına göstergesidir. Özellikle giriş port empedans uyumsuzluklarının ve anten çalışma frekanslarının tespitinde kritik öneme sahiptir.

$$\Gamma = \frac{V_{Yansıyan}}{V_{Giren}} = \rho \angle \phi = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1.9)$$

$$\Gamma_{dB} = 10 \log_{10} |\Gamma|^2 \quad (1.10)$$

$\Gamma_{dB} = -10dB$  ise,  $|\Gamma|^2=0.1$ 'dir. Yani gücün geri yansıma oranı %10 olarak belirtilir. %90'ı ise antenden ışıkmaktadır. Genelde yansıma katsayısının -10 dB'nin altında kaldığı frekans bölgesi, empedans bant genişliği olarak isimlendirilmektedir.

### 1.1.2.7 Alıcı Anten Aldığı Güç Hesabı

Friis iletim denklemi, bir anten tarafından ideal koşullar altında belirli bir mesafeden bilinen miktarda güç ileten başka bir antenden alınan gücü verir. Formül, 1945'te Bell Laboratuvarlarında Herald T. Friis tarafından türetilmiştir.

Verici antenin bir güç ( $P_t$ ) gönderdiği kabul edilirse verici antenin çok yönlü, kayıpsız ve alıcı antenin uzak alanda olduğunu varsayılır.

Verici antenden R uzaklıkta olan alıcı antene gelen düzlem dalganın Güç Yoğunluğu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\rho = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (1.11)$$

Verici antenin bir kazancı ( $G_t$ ) olduğunu varsayarsak, güç yoğunluğu:

$$\rho = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t \quad (1.12)$$

Alıcı antenin etkili bir  $A_e$  açıklığına sahip olduğunu varsayılmaktadır. Ardından, alıcı anten tarafından alınan güç ( $P_r$ ):

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t A_e \quad (1.13)$$

Etkili Anten Açıklığı ( $A_e$ ) şu şekilde de tanımlanabilir:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (1.14)$$

Alıcı antende alınan gücün verici antenden yayılan güce oranını gösteren nihai formülü, Friis İletim Denklemi ile gösterilebilir:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1.15)$$

## 2. ANTENLERDE MİNYATÜRLEŞTİRME TEKNİKLERİ

### 2.1.1 Metamalzeme Anten

Metamalzeme antenler, minyatürleştirilmiş (elektriksel olarak küçük) anten sistemlerinin performansını artırmak için metamalzemeler kullanan bir anten sınıfıdır [17]. Diğer antenlerde olduğu gibi, amaçları üzerinde yayılan enerjiyi boşluğa yaymak ve boşluktaki enerjiyi alıp sisteme iletmektir. Bu anten sınıfı, sıradışı fiziksel özellikler üretmek için yeni, genellikle mikroskobik yapılarla tasarlanmış malzemeler olan metamalzemeleri içerir. Metamalzemeleri içeren anten tasarımları, antenin yayılan gücünü artırabilir.

Dalga boyuna göre çok küçük olan geleneksel antenler, sinyalin çoğunu kaynağa geri yansıtır. Bir metamalzeme anteni, gerçek boyutundan çok daha büyükmüş gibi davranır, çünkü yeni malzeme yapısı ile enerjiyi depolar ve yeniden yayar. Yerleşik litografi teknikleri, metamalzeme elemanlarını bir baskı devre kartına yazdırmak için kullanılabilir.

Metamalzeme antenler, jeofizik özellikleri aramak için uydularla taşınabilir etkileşim, geniş açılı ışın yönlendirmesi, acil durum iletişim cihazları, mikro sensörler ve yere nüfuz eden taşınabilir radar çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

#### 2.1.1.1 Metamalzeme Anten Tasarımı

Metamalzemeleri içeren anten tasarımları, bir antenin yayılan gücünü artırabilmektedir. En yeni metamalzeme antenleri, bir radyo sinyalinin yüzde 95'ini yayabilmektedir [18]. Standart antenlerin verimli bir şekilde çalışması için sinyal dalga boyunun en az yarısı kadar olması gerekir. Örneğin 300 MHz bir monopol antenin uzunluğu dalga boyunun çeyreği olan 25 cm olması gerekir. Buna karşılık, deneysel metamalzeme antenleri bir dalga boyunun ellide birine kadar küçültülmesi söz konusudur.

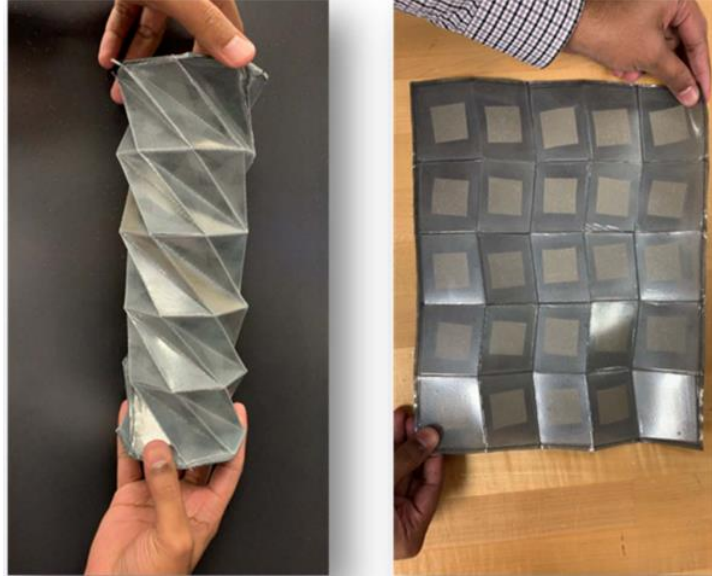
Metamalzemeler, verimli güç ve kabul edilebilir bant genişliği ile mikrodalga antenlerin daha da minyatürleştirilmesi için bir temel oluşturur. Metamalzemeleri kullanan antenler, geleneksel olarak inşa edilmiş minyatür antenler için kısıtlayıcı verimlilik-bant genişliği sınırlamalarının üstesinden gelme imkânı sunmaktadır.

Metamalzemeler, daha geniş bir frekans aralığını kapsayan daha küçük anten tasarımına imkân sağlar. Böylece alan kısıtlı durumlar için mevcut alanı daha verimli şekilde kullanarak ergonomi sağlar [19].



### 2.1.2 Origami Anten

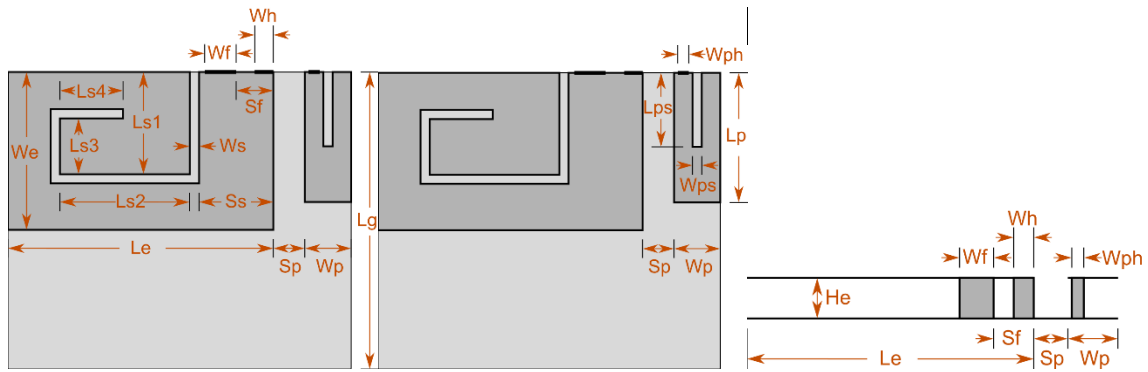
Origami sanatı iki boyutlu nesneyi katlama yöntemi ile istenen belirli özelliklerde belirli biçime getirmek olarak tanımlanabilmektedir. En basit yaklaşımla, belirgin şekil simetrik olarak tek renkli kare parçanın sadece düz çizgide katlanması ile gerçekleştirilebilir; basit olmayan yaklaşımla ise, düz ya da kıvrımlı çizgiler boyunca kesmek ya da yarıklar açmak; çeşitli taslaklar ile (belirli özellikleri elde edebilmek amacıyla) çok renkli ortamları oluşturmak için kullanılır [20]. Özel katlama, yöntem ve paternler ile oluşturulan şekiller anten tasarımında boyut azaltma ve band genişliği artırma gibi performans parametrelerinde iyileştirmeler amacıyla kullanılmaktadır. Origami katlama sanatı tekniklerini yumuşak ve/veya katlanabilir, mikrodalga çalışma frekanslarına uygun malzemelerde kullanılması ile yüksek performanslı düşük boyutlu anten tasarımları gerçekleştirilebilmektedir. Origami tasarımında, origami şeklinin açılmış durumu iki boyutludur, bu nedenle katlama kalıbı ve origami döşemeleri iki boyutlu düşünmeyi gerektirir. Diğer bir ifadeyle origami tasarımı iki boyutlu tasarım vasıtasıyla elde edilen üç boyutlu bir tasarımdır. Üç boyutlu tasarım düşünsel olarak tüm şeklin göz önünde canlandırılması ve şeklin düşünsel olarak tüm yönlerde çevrilmesi yeteneğini ve ayrıca kütlelerin etkisini, farklı malzemelerin tabiatını, uzay ve derinliğin baştan sona akışını keşfetme yeteneğini gerektirir. Bunun yanında hem iki boyutlu hem de üç boyutlu düşüncenin kaçınılmaz gerekliliği ise tasarımcının iki görevi eş zamanlı olarak yerine getirme durumunda olmasıdır; tasarımcılık ve mühendislik. Sadece tamamlanmış modelin görünümü değil, şeklin imâlatına nasıl devam edilebileceği ile ilgili stratejik kararlar da hesaba katılmalıdır. Bu nedenle, şüphesiz ki origami tasarımı oldukça zordur ve fikri mülkiyet gerektirmektedir [21]. Ticari ve askeri uygulamalar için boyutu küçük, mekanik olarak ergonomi kazandırılmış ve elektriksel olarak empedans uyumluluğu sağlanmış geniş bantlı anten tasarımları önem kazanmıştır. Bu sebeple origami antenler son yıllarda haberleşme alanındaki ihtiyaçlardan dolayı üzerine yoğunlaşılan bir model haline gelmektedir [22].



Şekil 2.1: Origami anten örneği [23].

### 2.1.3 Oluklu Düzlemsel Ters-F Anten

Düzlemsel Ters F Antenin (PIFA) oluklar açılarak minyatürize edilmiş hali olarak tanımlanabilmektedir. Oluk işlemi, standart PIFA yapısına göre %25'e varan boyut küçültmeyi mümkün kılmaktadır. Elektriksel olarak katkılarından biri de bant genişliğini arttırmak olarak ifade edilmektedir. Ağırlıklı olarak mobil iletişim cihazları ve giyilebilir haberleşme ekipmanları alanında sıklıkla kullanılmaktadır.



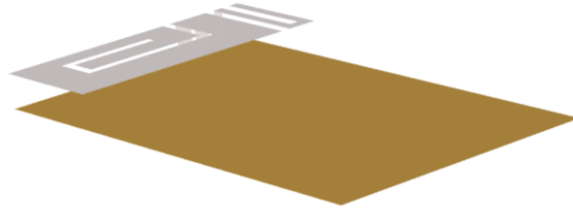
Şekil 2.2: Düzlemsel ters F anten yapısı.

Tablo 2.1: Çift Bant (0.9 – 1.8 GHz) PIFA tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri.

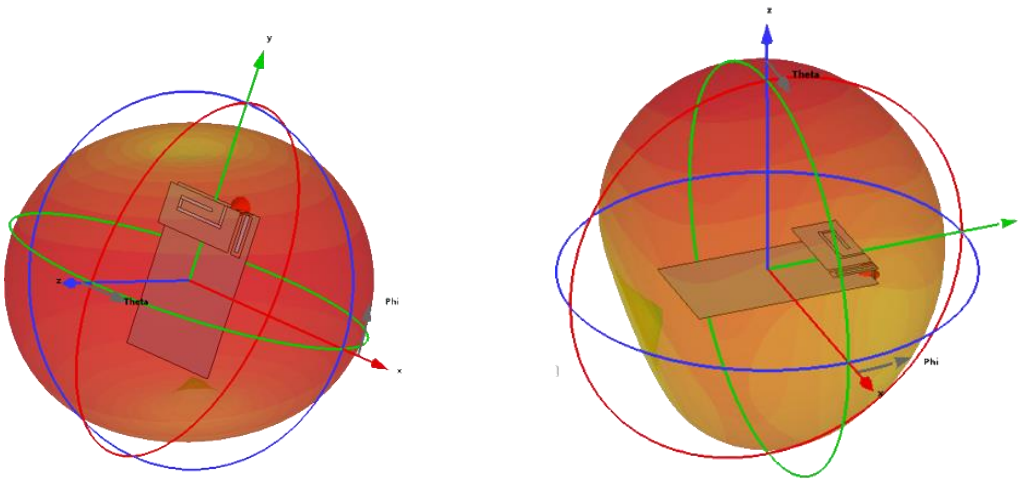
İsim	Değer
Le	39.95 mm
We	20 mm
He	7 mm
Ls1	9.5 mm

Ls2	22 mm
Ls3	4.2 mm
Ls4	16.5 mm
Ws	1.5 mm
Ss	7.5 mm
Sf	3.7 mm
Wf	3.8 mm
Wh	2.7 mm
Sp	1.7 mm
Wp	5.16 mm
Lp	20 mm
Wph	1.6 mm
Wps	2 mm
Lps	18 mm
Lg	80 mm

---



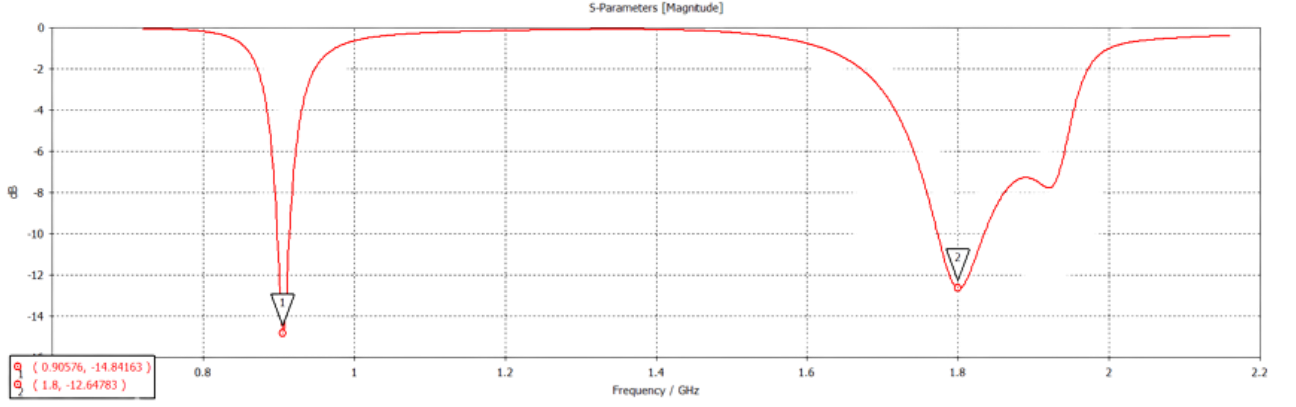
Şekil 2.3: Tasarlanan düzlemzel ters F anten yapısı.



(a) 0.9 GHz / 2.4 dBi

(b) 1.8 GHz / 4.3 dBi

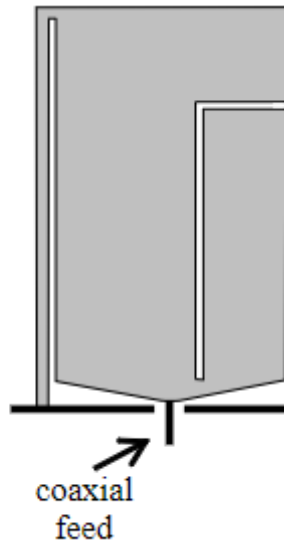
Şekil 2.4: Tasarlanan düzlemzel ters F anten ışınım karakteristiği.



**Şekil 2.5:** Tasarlanan düzlemzel ters F anten S11 grafiği.

### 2.1.4 Katlanmış Monopol Anten

Katlanmış dipol antenin yarıya indirilmesi ve kalan kısmın yer düzlemine bağlanmasıyla bir katlanmış tek kutuplu anten üretilebilmektedir. Katlanmış tek kutuplu antenin giriş empedansı, orijinal katlanmış dipolün giriş empedansının yarısıdır. Anten empedansı, monopol antenin geometrisine müdahale edilerek kolayca değiştirilebilir. İstenilen empedans uyumu, katlanmış monopolün bir kolunun genişliğini artırarak veya azaltılarak elde edilir. Rezonans frekansı, monopolün yüksekliği değiştirilerek ayarlanabilir. Tek bantlı düzlemsel katlanmış monopolün yapısı Şekil 2.6'da gösterilmiştir [24]. Canlı uç ile ground hattı arasındaki kapasitif etkiyi azaltmak için alt kısım konik olarak tasarlanmıştır. Katlanmış monopol antenin geniş yüzeyine bir oluk açılarak dual bant bir sonuç elde etme çalışması yapılabilmektedir. Bu kısımda ölçüler ve geometri değiştirilerek frekans ayarı yapılabilmektedir.



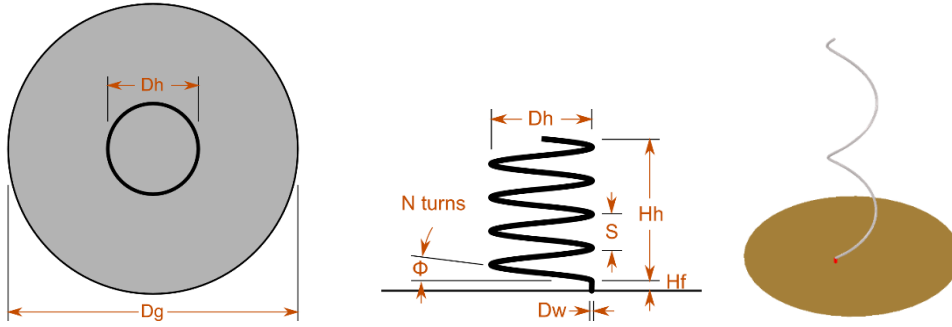
**Şekil 2.6:** Katlanmış monopol anteni yapısı.

### 2.1.5 Sarmal Anten

Sarmal anten tekniği, yönlü ve yönsüz tel anten tasarımında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Canlı (ışayan) kısım ve toprak hattından meydana gelmektedir. Işıyıcı, yer düzlemine dik şekilde yerleştirildiğinde ışımaya örüntüsü, bir yöne doğru artar ve belirlenen frekansın çeyrek dalga boyundan küçük minyatürize bir model ortaya konulmuş olur. Toprak hattının düzlemsel, yarıklı veya konik yapıda olması ile ışımaya örüntüsü ve çalışma frekansına etkileri anten minyatürize tekniklerinde kullanılmaktadır.

Bu tip sarmal yapılarda tekrar edilen simetrik geometriler kullanılarak anten karakteristiğindeki olumlu etkileri sayesinde minyatürize tekniği olarak kullanılmaktadır [25]. Empedans uyumuna ve az da olsa fiziksel avantaj sebebiyle de kazanca olan etkisi önemli bir minyatürize tekniği olarak farklı yapılarda da karşımıza çıkmaktadır. Tel sarmalına göre üretim tekniği zor olduğu için özel uygulamalar haricinde tel sarmal tek kutuplu antenlerde kullanımına az rastlanır ancak farklı geometrilerde üretilmiş tel yapılar veya yama anten tasarımlarında sıklıkla başvuru olan bir yöntemdir.

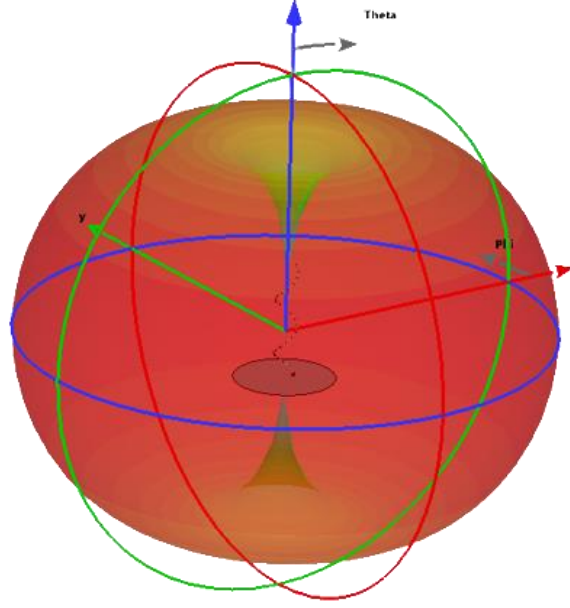
Sarmal anten yapısı sadece tek kutuplu yapılar için değil dipol yapılar içinde kullanılmaktadır. Yarım dalga dipol anten tasarımlarında yapıyı küçültmek için kutupların biri veya ikisi sarmal yapıda tasarlanarak fiziksel olarak daha küçük yapıda bir anten empedans uyumluluğu sağlanması mümkündür.



Şekil 2.7: Monopol sarmal anten yapısı.

Tablo 2.2: 169 MHz Sarmal tek kutuplu anten tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri.

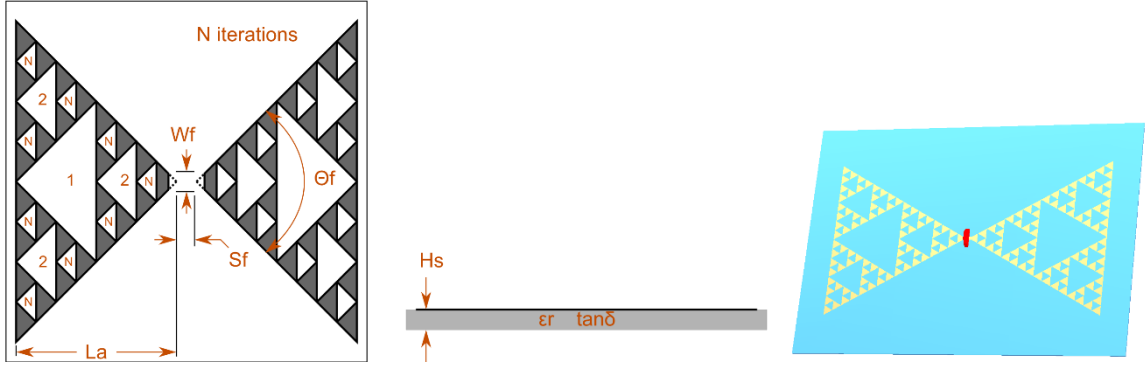
İsim	Değer
Dh	55 mm
Hh	285 mm
Hf	6 mm
N	2
Dw	3 mm
Dg	255 mm



**Şekil 2.8:** Monopol sarmal anten örneği ışınma karakteristiği (1.9 dBi).

### 2.1.6 Fraktal Anten

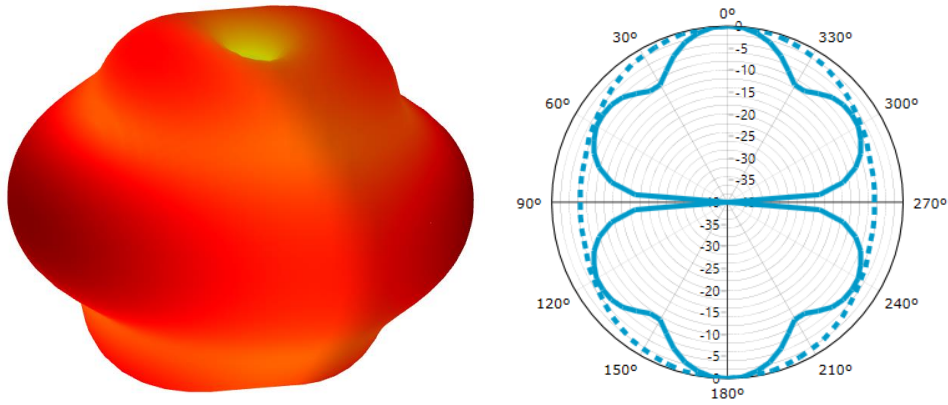
Fraktal tasarımlar, farklı küçültme oranlarında birbirinin aynısı geometrileri içeren şekillerden oluşmaktadır [26]. Öklid geometrisine sahip bir yapıya göre farklı özelliklere sahip olan fraktal yapıların kendilerini sürekli tekrarlaması anten tasarımlarında kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Sierpinski yapısı, çok bandlı anten tasarımlarında kullanılan fraktal yapılar verilebilecek en iyi örneklerden biridir [27]. Ayrıca dipol ve monopol antenler yerine, anten üzerinde küçültme etkisi yaratan fraktal yapıda ağaç antenler de tasarlanmakta ve kullanılmaktadır [28]. Genel olarak bu tip anten yapılarının yüksek iterasyonlarda performansları artmasına rağmen antenlerdeki dallanma miktarının artması giderek karmaşık yapılar oluşmasına sebep olmaktadır. Fraktal yapıların tasarımı gerektiğinde üretim aşaması düşünülerek yaklaşılmasında önemli hususlardan biridir. Genellikle sürdürülebilir tasarımlar pcb tipleri üzerinde modellenmektedir. Fraktal anten tasarımları gerçekleştirilirken basit yapılarla da antenin üzerinde aynı küçültme etkisinin sağlanabileceği görülmektedir [29]. Benzer çalışmalar incelendiğinde, karmaşık yapılarla aynı ışınma karakteristiğine sahip ve empedans uyumu sağlanmış anten tasarımlarına ulaşıldığı görülmüştür.



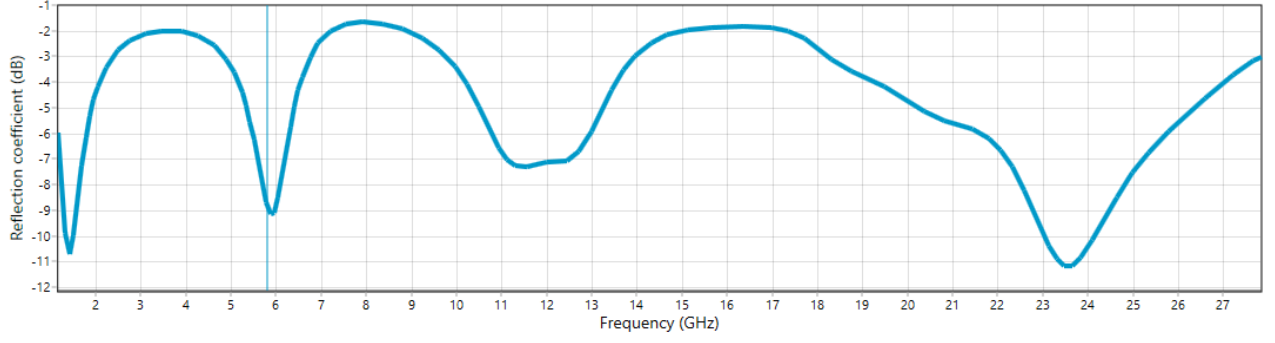
Şekil 2.9: Fraktal anten örneği yapısı.

Tablo 2.3: 5.8 GHz fraktal anten tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri.

İsim	Değer
L	27.8 mm
Sf	59 um
Wf	59 um
$\Theta f$	60
$\epsilon r$	3
Hs	127 um
$\tan\delta$	1.3e-3
N	3



Şekil 2.10: 5.8 GHz Fraktal anten ışıma karakteristiği.



Şekil 2.11: 5.8 GHz Fraktal S11 simülasyon sonucu.

### 3. TEL ANTENLERDE MİNYATÜRLEŞTİRME TEKNİĞİ UYGULAMALARI

#### 3.1 Tek Kutuplu(Monopol) Minyatürize Sarmal Tel Anten Uygulaması

Minyatürleştirme tekniği uygulaması öncesinde, belirlenmiş frekans için öncelikli olarak çeyrek dalga kamçı anten üretilmiştir. Bu elektriksel küçük olmayan bir anten tipi olarak örneklendirmiştir. Daha sonra çeyrek dalga olarak üretilen antene minyatürleştirme tekniği uygulayarak ölçüm sonuçları, mekanik özellikleri ve fiziksel değişimleri karşılaştırılmıştır.

##### 3.1.1 Çeyrek Dalga Monopol Tel Anten Uygulaması

Bu çalışma kapsamında ilk olarak 169 MHz monopol anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Temel monopol anten düzeninde ışıyıcının alt kısmında bir yer düzlemi oluşturulur. Bu yer (toprak) düzleminin çapı anten çalışma frekansına ve karakteristiğine etkisi bulunmaktadır. Yer düzlemi, antenin ışıma karakteristiğini de etkilemektedir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda toprak hattına bağlı yansıtıcı yer düzlemi sebebiyle çok yönlü ışıyıcının ışıma grafiği bir yönde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu neden ile saha ihtiyacına uygun olarak kamçı tipi, doğrudan RF konnektöre montajlanabilir bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarıma konu olan anten 50 ohm RF konnektöre bağlantısı yapılarak ölçüm sonuçları gözlemlenmiştir. Bu sayede uygun frekansta çalışan haberleşme ekipmanlarına doğrudan konnektör ile montajı yapılarak saha mesafe ölçümleri gerçekleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Kamçı anten, düz, esnek bir tel veya çubuktan oluşan bir anten çeşididir. Kamçının alt ucu radyo alıcısına veya vericisine bağlanır. Kamçı anten, bir tek kutuplu anten şeklindedir. Anten, kolay kırılmaması için esnek olacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik



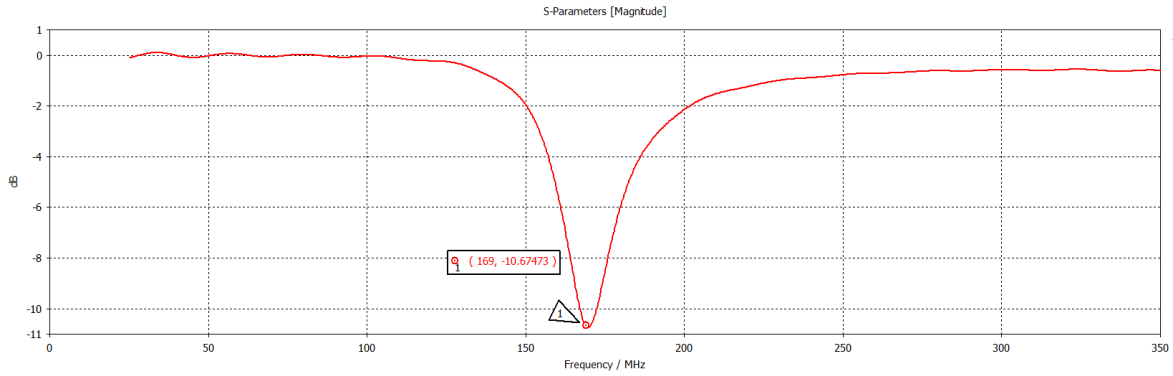
olarak zorlandığında esneyerek dayanım sağlar. Taşınabilir radyolar için kamçı antenler genellikle bir dizi birbirine kenetlenen teleskopik metal borudan yapılır, bu nedenle kullanılmadıklarında geri çekilebilirler. Araçlara ve yapılarla monte edilmek üzere yapılmış daha uzun kamçılar, bir tel çekirdeğin etrafındaki esnek bir fiberglas çubuktan yapılır ve 11 m (35 fit) uzunluğa kadar çıkabilmektedir. Kamçı antenin ideal uzunluğu, birlikte kullanıldığı radyo dalgalarının dalga boyuna göre belirlenir. En yaygın tür, yaklaşık olarak çeyrek dalga kamçıdır. 169 MHz çeyrek dalga monopol anten için çalışma frekansımız belli olduğu için dalga boyunu bulmak için  $f = \frac{c}{\lambda}$  formülü uygulayarak çeyrek dalga anten boy uzunluğu belirlenmiştir.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{169 \times 10^6} \rightarrow \frac{\lambda}{4} \cong 44.38 \text{ cm}$$

(3.1)

Antenin rezonansa gelmesi için giriş empedansının endüktif kısmının sıfıra yaklaşması gereklidir. Bunun için antenin boyunun kısaltılarak endüktif reaktif kısmı sıfırlanmıştır. Optimum uzunluğun 43.2 cm civarında olması gerektiği ortaya çıkmıştır. Bu durum simülasyonda doğrulanmıştır.

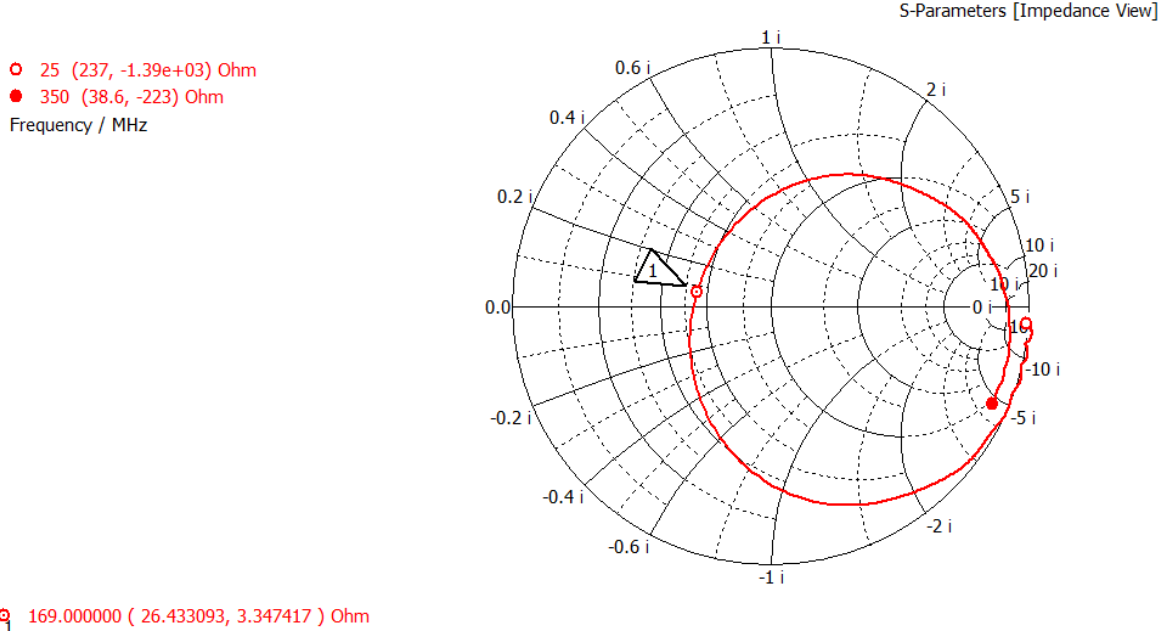
Anten imalatı öncesi anten tasarımı, CST tasarım programının öğrenci sürümü kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında yaklaşık en iyi sonucu görmek için parametrik tarama başlatılarak 432 mm uzunluğunda empedans karakteristiği uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



**Şekil 3.1:** 169 MHz çeyrek dalga monopol anten simülasyonu sonucu

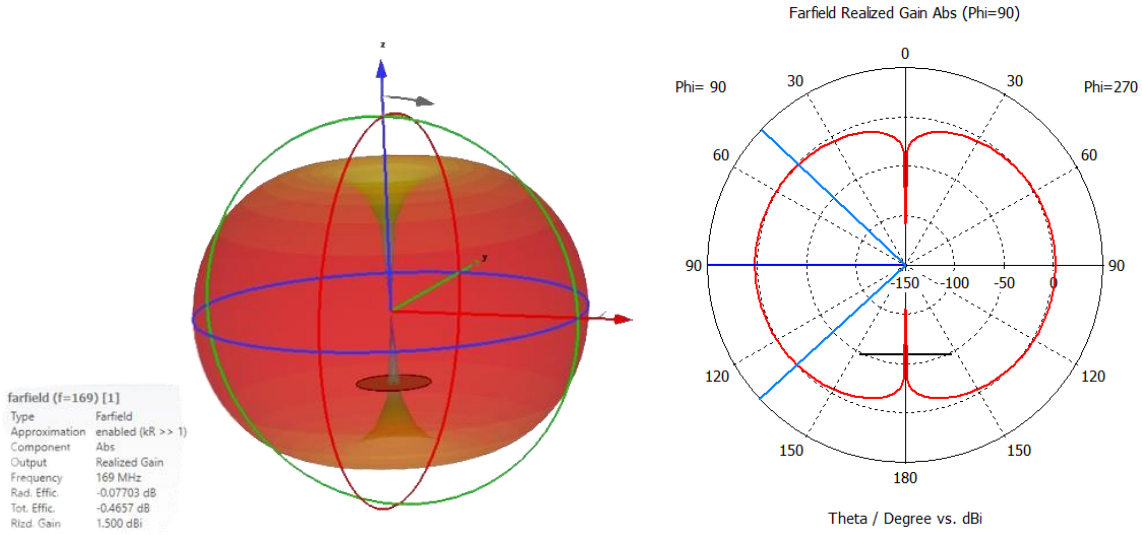
(S11 Geri Dönüş Kaybı).

SMA konektör modellendirilmiş ve port ataması yapılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonda geri dönüş kaybı değeri yaklaşık -10 dB olarak sonuçlanmıştır.



**Şekil 3.2:** 169 MHz çeyrek dalga monopol anten simülasyonu sonucu  
(Smith Diyagramı).

VHF bandı için tasarlanmış antenin merkez frekansı olan 169 MHz’de empedans değeri Smith Diyagramı üzerinden belirlenmiştir.



**Şekil 3.3:** 169 MHz çeyrek dalga monopol anten simülasyonu sonucu  
(anten gerçekleştirilen kazancı).

Analiz sonuçları göz önünde bulundurularak 432mm uzunluğunda 3 mm çelik tel kesilmiştir. Sağlam bir şekilde vektör ağ analizörü (VNA) bağlantısı ve ölçümleri yapılabilmesi için N

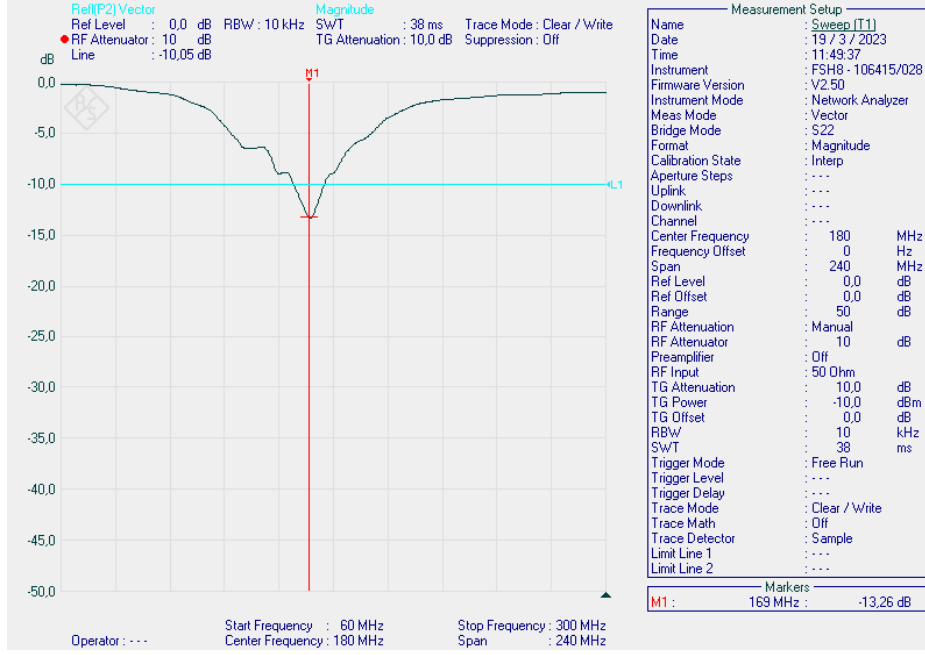
konnektör kullanılmıştır. Çelik çubuğu N konnektör canlı ucu ile irtibatlandırmak için ara aparat tasarlanmış ve üretilmiştir. Ara aparat için canlı uca montajlanabilecek geometride pirinç malzeme ve yalıtım içinde dielektrik sabiti yaklaşık 3.7 olan malzeme torna tezgâhında işlenmiştir.



**Şekil 3.4:** Üretilen çeyrek dalga monopol anten modelleri.

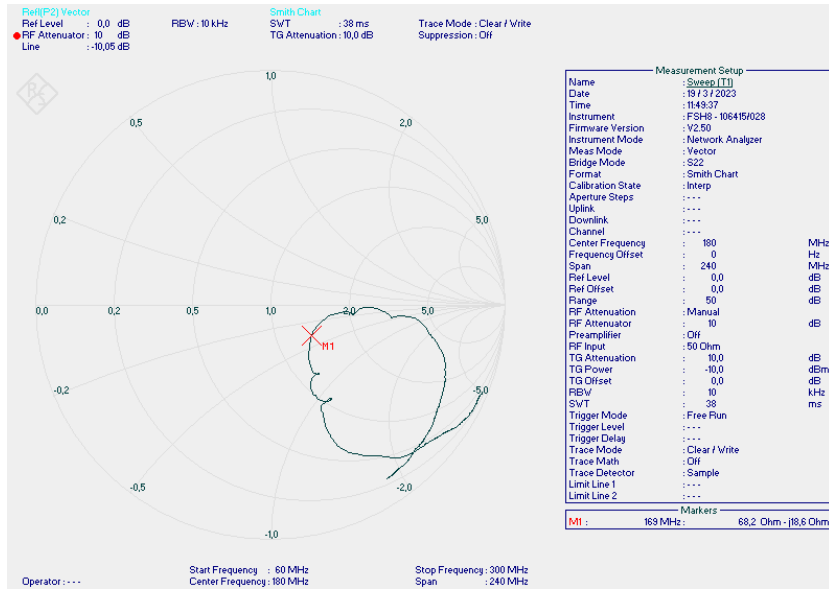
Çelik çubuktan üretilen çeyrek dalga monopol anten plastik kaplanarak ölçüm sonuçları tekrar incelenmiştir. Merkez frekasında ölçüm sonuçları değişmediği görülmüştür.

Ölçüm sonucunda, durağan dalga oranı (SWR), geri dönüş kaybı grafiği (S11 Paramtere Sonucu) ve Smith Chart grafiğine bakıldığında 169 MHz çeyrek dalga monopol anten tasarım ve imalatı başarılı bir biçimde gerçekleştirildiği görülmüştür.



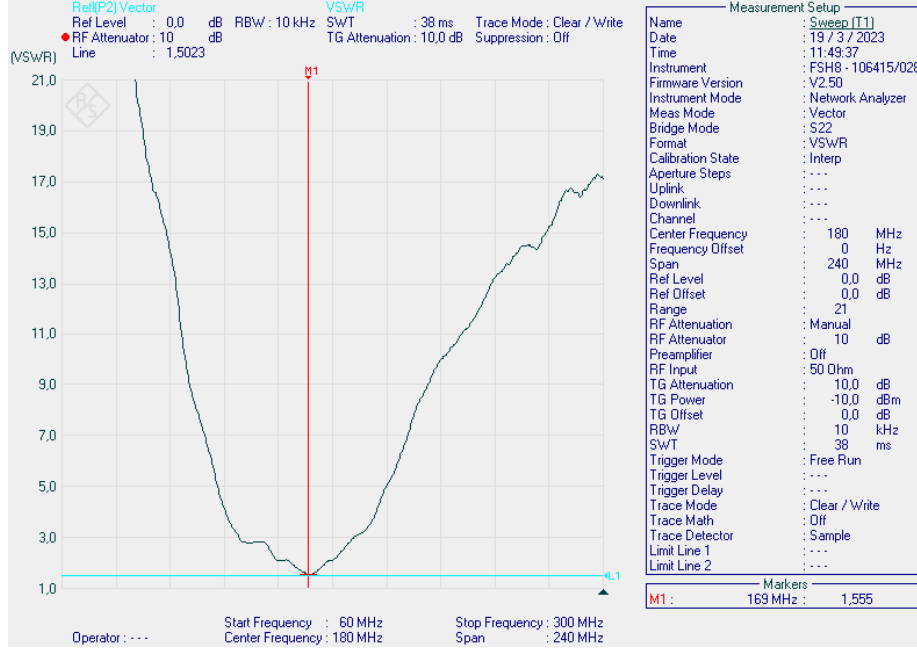
**Şekil 3.5:** Üretilen çeyrek dalga monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu  
(Geri dönüş kaybı değeri).

Tasarımı ve üretimi tamamlanan monopol anten kalibre edilmiş vektör ağ analizörü ile ölçümü gerçekleştirilmiştir. S parametre değeri  $-10$  dB eşik değerinin altında olduğu ölçülmüştür.



**Şekil 3.6:** Üretilen çeyrek dalga monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu  
(Smith diyagramı).

Ölçüm sonuçlarına Smith Diyagramı tekniği ile bakılarak empedans değerleri incelenmiştir. İdeal  $50 \Omega$  değerine yaklaşması hedeflenen değer, antenin tasarlandığı frekans için  $68,2 \Omega - j18,6 \Omega$  empedans değerine sahip olduğu görülmüştür.



**Şekil 3.7:** Üretilen çeyrek dalga monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu (VSWR grafiği).

Anten sistem performansını doğrudan belirleyen en önemli sonuçlardan biri durağan dalga oranıdır (SWR). Bu değer için ideal hedef 1 olmasıdır. Ancak sistemin fiziki sınır ve şartları anten tasarımında belirleyici olduğunda VSWR oranında idealden uzaklaşabilmektedir. Birçok farklı tip anten veri sayfası incelendiğinde genel itibari ile  $1 < \text{VSWR} < 3$  olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 3.1.2 Elektriksel Küçük Monopol Tel Anten Uygulaması

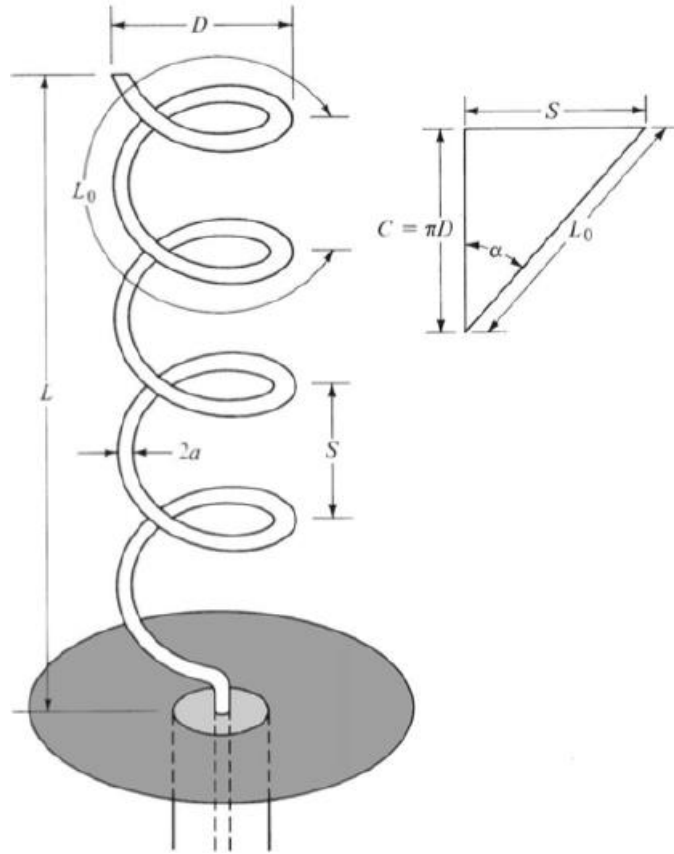
İlk çalışmada 169 MHz anten için çeyrek dalga bir monopul anten imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda, 169 MHz için optimize edilmiş çeyrek dalga antene minyatürize tekniği olarak sarmal tel yapısı uygulanmıştır. Bu sayede sarmaller arasındaki kapasitif etki ve geometrik yapı itibari ile oluşan endüktif etki sayesinde elektriksel küçük anten modeli ortaya konulmuş ve 169 MHz 50 ohm için empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Gerçekleşen minyatürizasyon tekniğinin anlaşılması için sarmal anten teorisine kısaca aşağıda yer verilmiştir.

### 3.1.2.1 Sarmal Anten

Elektromanyetik ışığıncının diğler bir tasarım modeli olan Şekil 3.8’de geometrisi belirtilmiş olan helezon şeklinde oluşturulmuş iletken teldir. Birçok durumda helezon toprak düzlemiyle kullanılır. Toprak düzlemleri, farklı geometri ve yapıda oluşturulanılmaktadır. Ek olarak; genellikle helezon toprak düzlemine eklenen hattın dış iletkenli koaksiyel iletim hattının merkez iletkeninin besleme noktası ile irtibatlandırılır.

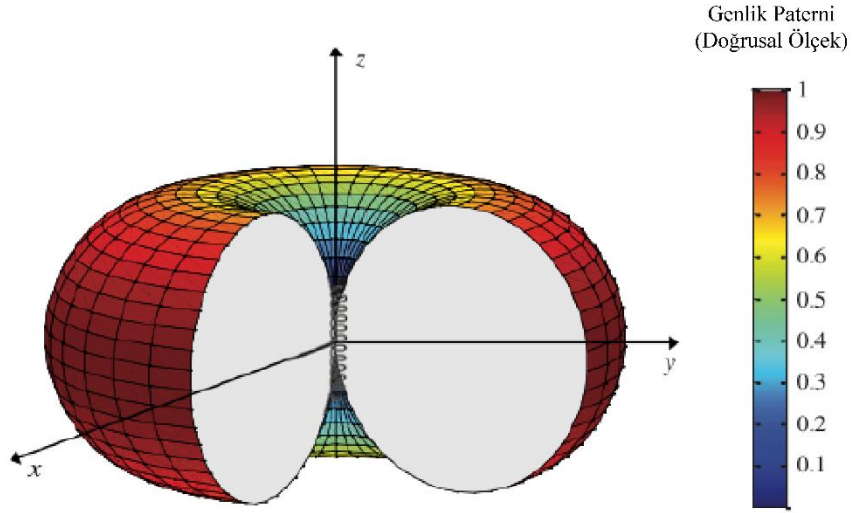
Helezonun yapısı genel olarak  $N$  sargı sayısı,  $D$  çapı ve her sargının arasındaki mesafe olan  $S$  parametresine bağlıdır. Telin toplam uzunluğu  $L_n = NL_0 = N\sqrt{S^2 + C^2}$  ve antenin toplam uzunluğu  $L = NS$  iken  $L_0 = \sqrt{S^2 + C^2}$  her bir sargının tel uzunluğu ve  $C = \pi D$  sarmalın çevresidir. Önemli parametrelerden bir diğleri ise helezon tel ve helezon eksenine dik olan düzlemin çizgisel tanjantından aralık  $a$ ’dır [30].

$$a = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{S}{C}\right) \quad (3.1)$$

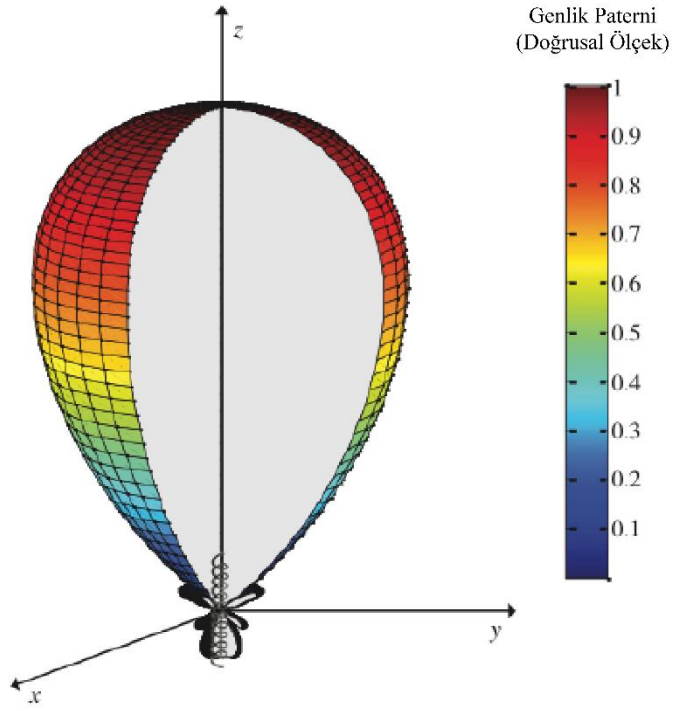


Şekil 3.8: Toprak düzlemi ile sarmal anten geometrisi.

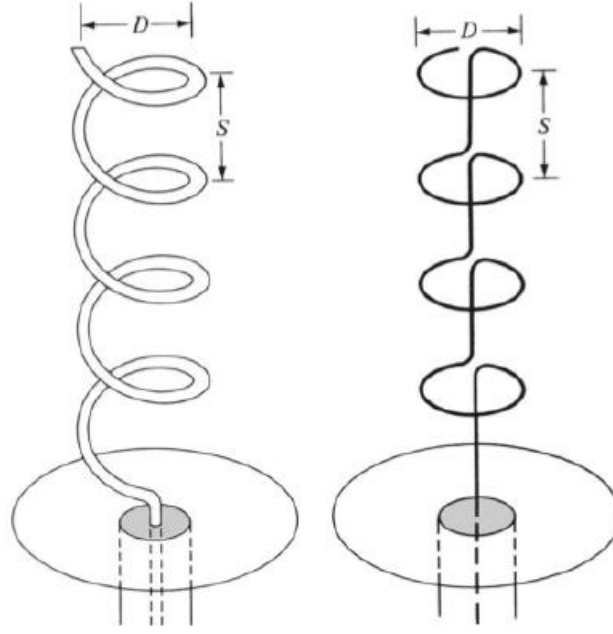
Sarmal anten birçok modda çalışabilmektedir. Bunlardan başlıcaları normal ve aksenel mod olarak ifade edilebilmektedir. Helezon antenin ışımaya örüntüleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Sarmal anten normal mod ışım karakteristiği.



Şekil 3.10: Sarmal anten aksenal mod ışım karakteristiği.



(a) Normal mod. (b) Eşdeğer

**Şekil 3.11:** Sarmal mod ve eşdeğeri için normal mod anten yapısı.

Normal modda çalışmada antenin, alan ışınması Şekil 3.9’da gösterildiği gibi helezon ekseninin normal düzleminde maksimumdur ve eksen boyunca minimumdur. Helezon boyutları küçük olduğuna göre, uzunluğu boyunca akım sabit düşünülebilir ve kısa dipol halka sayısından bağımsız olması için uzak alan örüntüsü ile ilişkilir. Bu sebeple helezonun çalışması, kesin olarak her birinin sabit akım dağılımı aynı ve eksenleri halka düzlemine dik olan  $D$  yarıçaplı bir küçük halka ve  $S$  uzunluklu bir kısa dipolden ışınan alanların toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Bu işlem halka düzlemine dik eksen ve aynı akım dağılımı sabiti ile gerçekleşir [31].

$S$  uzunluklu ve sabit  $I_0$  akımlı kısa dipolden ışınan uzak bölge elektrik alanı  $E_\theta$  ‘dir.

$$E_\theta = jn \frac{kl_0 S e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \quad (3.2)$$

Burada  $l$  yerine  $S$  kullanılmıştır. Ayrıca, bir halkadan ışınan elektrik alan  $E_\theta$  olarak aşağıda ifade edilmiştir.

$$E_\theta = n \frac{k^2 (D/2)^2 I_0 e^{-jkr}}{4r} \sin\theta \quad (3.3)$$

$E_\theta$  ve  $E_\phi$  bileşenlerinin genlik oranları aksenal oran (AR) olarak ifade edilir.



$$AR = \frac{|E_{\theta}|}{|E_{\phi}|} = \frac{4S}{\pi k D^2} = \frac{2\lambda S}{(\pi D)^2} \quad (3.4)$$

D ve/veya S değiştirilerek eksen oran  $0 \leq AR \leq \infty$  aralığında kalır. AR=0 değeri özel bir durumdur ve  $E_{\theta}=0$  olduğunda yatay kutuplanma dalgası bir doğrusal kutuplanmış dalgaya öncülük eder. (Helezon bir halkadır.) AR= $\infty$  iken  $E_{\phi}=0$  ve ışılan dalga yatay kutuplanma ile doğrusal olmaktadır. (Helezon, bir dikey dipoldür.) Diğer bir özel durum AR'nin 1 olmasıdır.

$$\frac{2\lambda_0 S}{(\pi D)^2} = 1 \quad (3.5)$$

$$\tan a = \frac{S}{\pi D} = \frac{\pi D}{2\lambda_0} \quad (3.6)$$

İlk olarak üretilen monopol kamçı anten için 47cm ışılıcı kullanılmıştır. Sarmal yapıda kullanılan ışılıcı tel boyu 43.2 olmasına rağmen daha kısa uzunluklarda elektriksel küçük anten imalatı gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.12:** Üretilen elektriksel küçük monopol anten modelleri.

Çeyrek dalga monopol antenin boyunu kısaltması, saha uygulamalarında ergonomi ve empedans uyumluluğunun sağlanması için 3 farklı tip tasarım ve üretim gerçekleştirilmiştir. 3 farklı üretimin sonucunda spiraller arasındaki mesafe, spiralın çapı, düzenli veya düzensiz oluşunun sonucu doğrudan etkilediği görülmüştür. Bu çalışma sonucunda anten fiziksel boyu 6,5 cm kadar küçültülmüştür. Üretilen 3 anten saha performansları alıcı ve verici çifti ile sabit çevre koşul ve sabit konum olmak üzere karşılaştırılmıştır. 65 mm boyutunda, 95

mm boyutunda ve 153 mm boyutunda 3 farklı özelliğe sahip anten anten için haberleşme çiftinin performans etkisinin dikkate alınmaması için aynı alıcı verici çifti ile art arda test gerçekleştirilmiştir. Anten saha sonuçlarına bakıldığında LOS (Line of Sight) görüş hattında 3 tip ile de aynı mesefade benzer performanslar görülmüştür. NLOS (Non Line of Sight) görüş hattının dışında meskûn mahal ortamında yapılan testlerde, haberleşme kararlılığı en yüksek olan antenin Tip 3 olduğu görülmüştür. Tip 2 ve Tip 1 arasında benzer performans gözlemlenmiştir.

**Tablo 3.1:** 3 farklı anten tasarım için belirlenmiş ölçü değerleri.

Kriter	Tip 1	Tip 2	Tip 3
Sarım Sayısı	60	51	35
Sarımlar Arası Boşluk	0.35 mm	0.6 mm	0.3 mm
Konnektör	SMA	SMA	SMA
Toplam Boy	65 mm	95 mm	153 mm
S11 Değeri	-24.6 dB	-23 dB	-21.18 dB
Tel Kalınlığı	0.7 mm	1.2 mm	1.2 mm

Anten ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, elektriksel küçük antenin durağan dalga oranının 1 değerine daha yakın olduğu görülmektedir. Bu ölçüm sonucuna etki eden en önemli husus elektriksel küçük sarmal tel antenin empedansı daha fazla değişken tarafından belirleniyor olmasına dayanmaktadır. Bu sayede farklı değişkenleri optimize ederek en iyi empedans uyumluluğu sağlanabilmektedir. Kamçı anten ölçüm sonuçları incelendiğinde, tel kalınlığı ve tel uzunluğu değiştirilerek empedans uyumluluğuna etkisi görülmektedir. Ancak sarmal elektriksel küçük anten optimize edilirken, kamçı anten parametrelerine ek olarak sarmal sayısı, sarmaller arasındaki mesafe, sarmal genişliği gibi etkin değişkenler değerlendirilmiştir.

Minyatürize çalışmalarında çok fazla değişken parametre olması her zaman aynı avantajı sağlamamaktadır. Çalışma frekansı büyüdükçe bu tekniğin uygulanmasında zorlaşmaktadır. Bu sebep ile monopol tel anten yapılarında, farklı frekanslarda sarmal minyatürize tekniği ve değişken parametre sayısının artması empedans uyumluluğu açısından her zaman için avantaj sağlamadığı sonucu da ortaya çıkmaktadır.

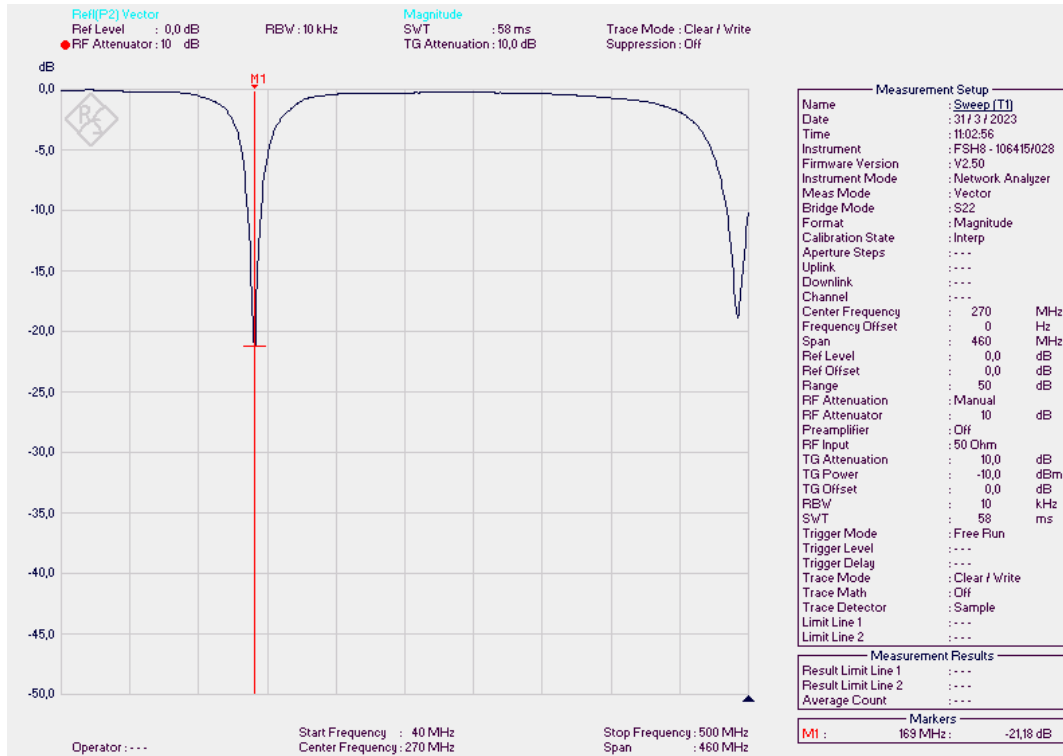


Tip 3



Tip 1

Şekil 3.13: Üretilen elektriksel küçük monopol anten modelleri.

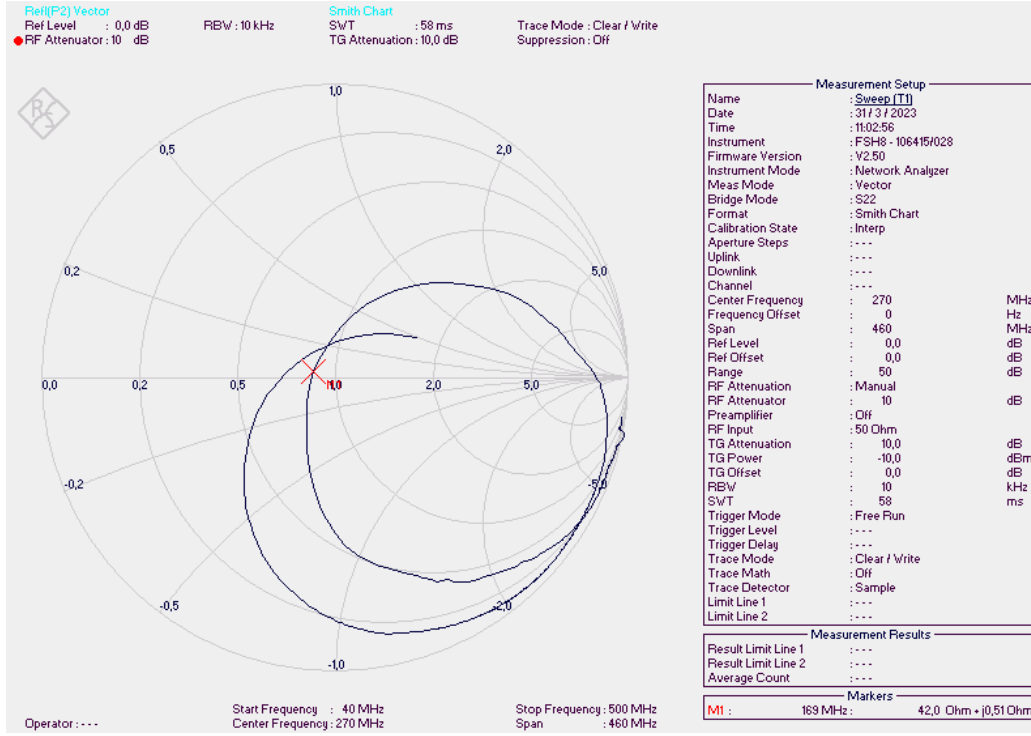


Şekil 3.14: Üretilen minyatürize monopol 169 MHz antenin VNA ölçüm sonucu

(Geri dönüş kaybı S parametre grafiği).

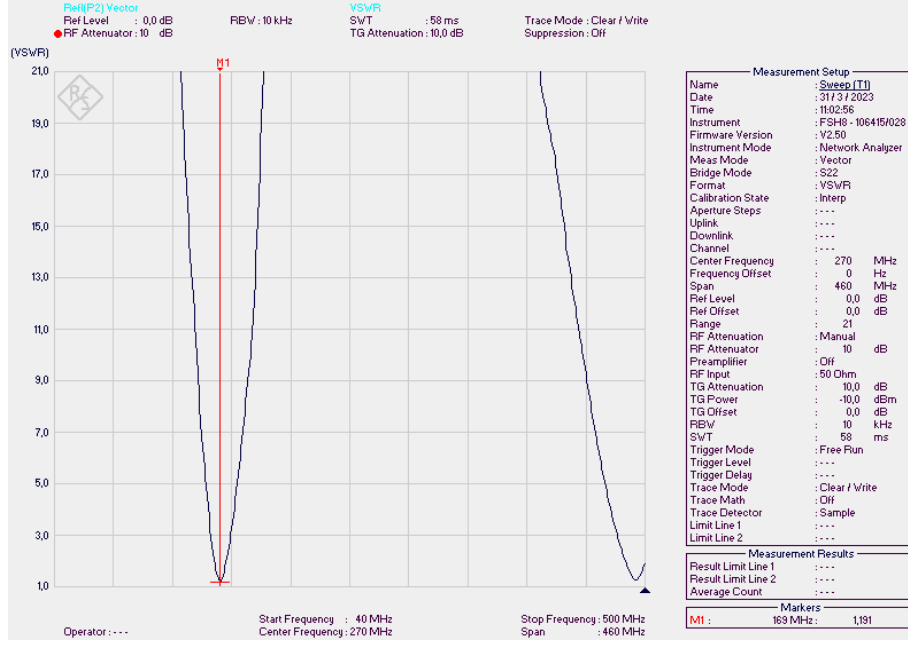
Grafik incelendiğinde, çeyrek dalga monopol tel antene göre empedans cevabının 50 ohm değerine yaklaştığı ve geri dönüş kaybının azaldığı görülmektedir. Anten minyatürize tekniği uygulayarak boyu 43.2 cm olan anten, konnektör ve radom dahil 21 cm ölçülerine

düşürülmüştür. Geri dönüş kaybı azalmış ve durağan dalga oranı 1 değerine yaklaşmıştır. Bu sayede anten fiziksel olarak küçültülmüş ama elektriksel olarak verimliliği arttırılmıştır. Saha uygulamaları için boyunun küçültülmesi ve elektriksel performansının arttırılması hedefi sağlanmıştır.



**Şekil 3.15:** Üretilen minyatürize monopol 169 MHz antenin vna ölçüm sonucu (Smith diyagramı).

Üretilen antenin Smith Diyagramı incelendiğinde sonucun ideal 50 ohm değerine yaklaştığı görülmüştür.



**Şekil 3.16:** Üretilen minyatürize monopol 169 MHz antenin vna ölçüm sonucu  
(Durağan dalga oranı grafiği).

Empedans uyumluluğunun sağlanması ile durağan dalga oranı değeri ideal 1 değerine yaklaşmıştır. Bu sayede anten verimliliği artmıştır.

Elektriksel küçük anten tasarımı ve imalatı gerçekleştirilirken göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardan biri ışıma karakteristiğidir. Sarmal yapısı, ışıyıcının sarmal hat üzerinde, birbirlerine karşılıklı gelen iletkenlerin ışımaya olan etkileri analiz edilmelidir.

Bu hususun dışında, anten operasyonel yetkinlik ve ergonomi kazanabilmesi için minyatürize edilirken monopol antenler için fiziksel küçülmeden dolayı anten kazancının veya saha performansının değişmesi olası bir durumdur. Fiziksel olarak oluşan bu kazanç değişimi durumu anten minyatürize edilirken, empedans uyumluluğu artırılması ile durağan dalga oranının düşmesi sayesinde pozitif değişiklik sağlanabilmektedir. Fiziksel olarak oluşan kayıp, elektriksel tasarım sayesinde süspans edilebilmektedir.

### 3.2 Çift Kutuplu Minyatürize Sarmal Tel Anten Uygulaması

Yarım dalga dipol anten tasarımı gerçekleştirilirken uygulama aşamasında fiziksel dezavantaj oluşturmaması açısından 500 MHz üstü bir çalışma frekansı tercih edilmiştir. Bu uygulama aşamasında ilk olarak standart yarım dalga dipol anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu antenin empedansı, ışıma karakteristiği ve mekanik özellikleri kayıt

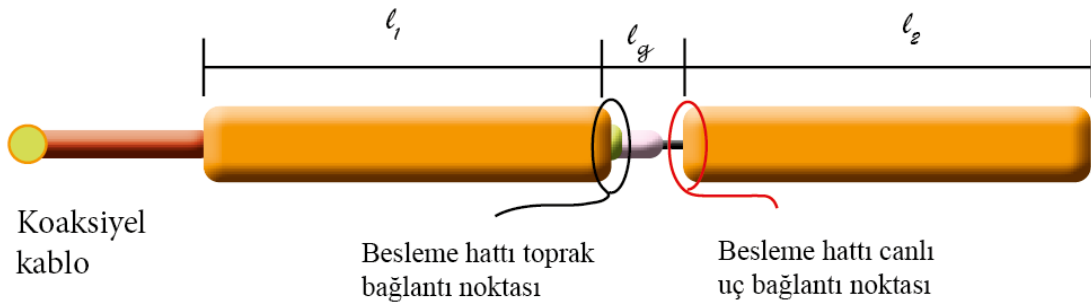
altına alınmıştır. Daha sonra yarım dalga dipol antenin kullanılması gereken özel uygulamalar için minyatürize edilmesi çalışması yürütülmüştür.

### 3.2.1 Yarım Dalga Dipol Tel Anten Uygulaması

Birçok uygulamada ve birçok cihazda sıklıkla tercih edilen frekans olan 868 MHz anten için yarım dalga dipol tasarımı yapılmıştır. Yarım dalga dipol anten yapısı incelendiğinde, elektriksel yarım dalga boyu olan tel veya metal boru olan bir iletken elemandan oluştuğu görülür. Yarım dalga dipol anten, birbirleriyle aynı doğrultuda iki çeyrek dalga boyu elemanına bağlanan besleyiciden oluşur. Yarım dalga dipolünün uzunluğunun, anten iletkenlerinde hareket eden dalga için elektriksel bir yarım dalga boyu olduğu bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında 868 MHz için dalga boyu hesabı yapılmıştır.

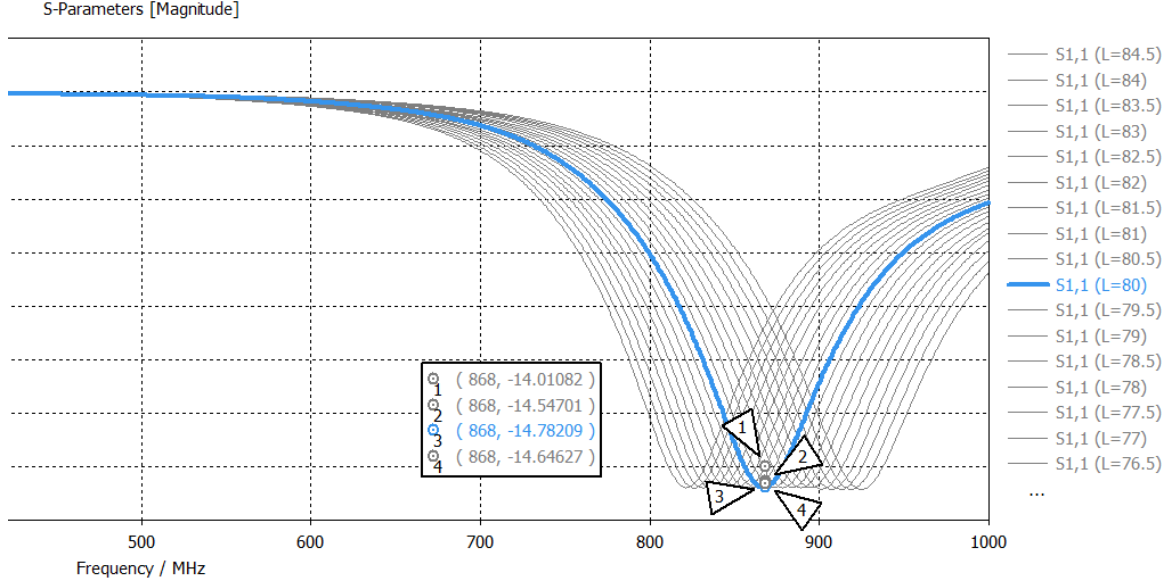
$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{868 \times 10^6} \rightarrow \frac{\lambda}{4} \cong 8,65 \text{ cm} \quad (3.2)$$

Çeyrek dalga uzunluğu yaklaşık 86,5 mm olan bir yarım dalga dipol anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım için simülasyon sonuçları incelendiğinde merkez frekansın 800 MHz civarında olduğu görülmüştür. Bu sebeple 75 mm ile 85 mm arasında parametrik tarama yapılarak simülasyonda en uygun tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarımda iki kutup arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır.



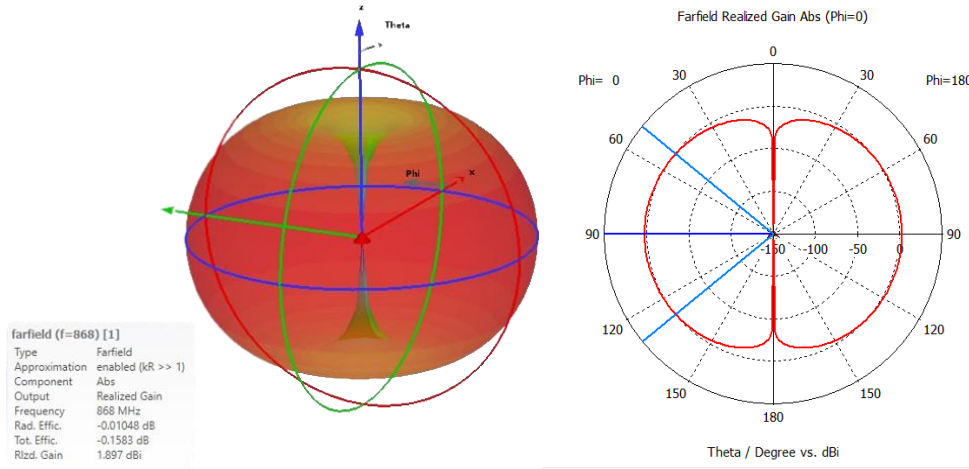
Şekil 3.17: Dipol anten fiziksel geometrisi.

Empedans uyumluluğu sağlanarak anten boyunun kısaltılması için endüktif kısmın sıfıra yaklaştırılması ve reel kısmın ise 50 ohm değerine yaklaştırılması hedeflenmiştir.



**Şekil 3.18:** 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (S11).

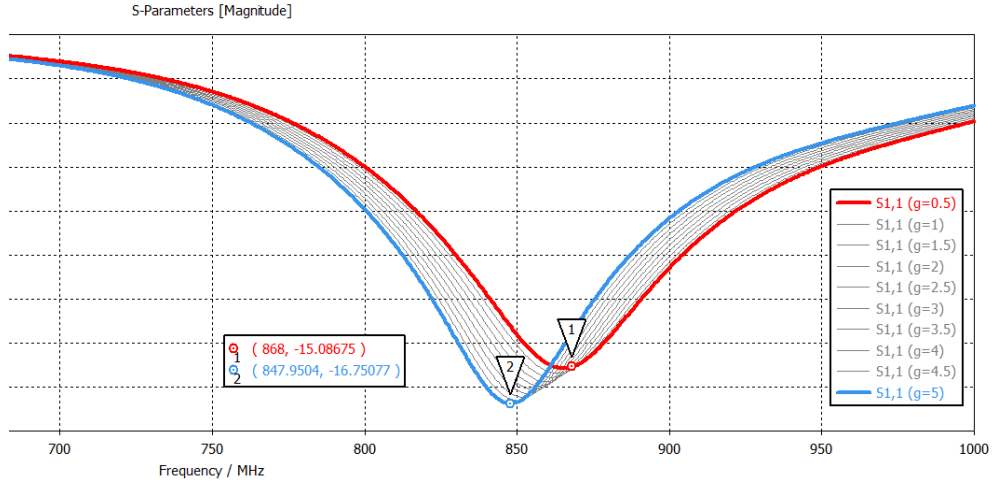
Parametrik tarama sonucunda merkez frekansını 868 MHz için en uygun olan ışıyıcı kutup uzunluğunun 80 mm olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 3.19:** 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (Rlzd. Gain).

Simülasyon sonuçlarına göre en uygun olduğu belirlenen mekanik özelliklere sahip anten ışınım ve anten kazancı sonuçları incelenmiştir. Anten yönlülüğü yaklaşık 2 dBi olarak ölçülürken, anten yönlülüğü ile toplam verimi dikkate alınarak hesaplanan gerçekleşen kazanç değeri yaklaşık 1.9 dBi olarak ölçülmüştür.

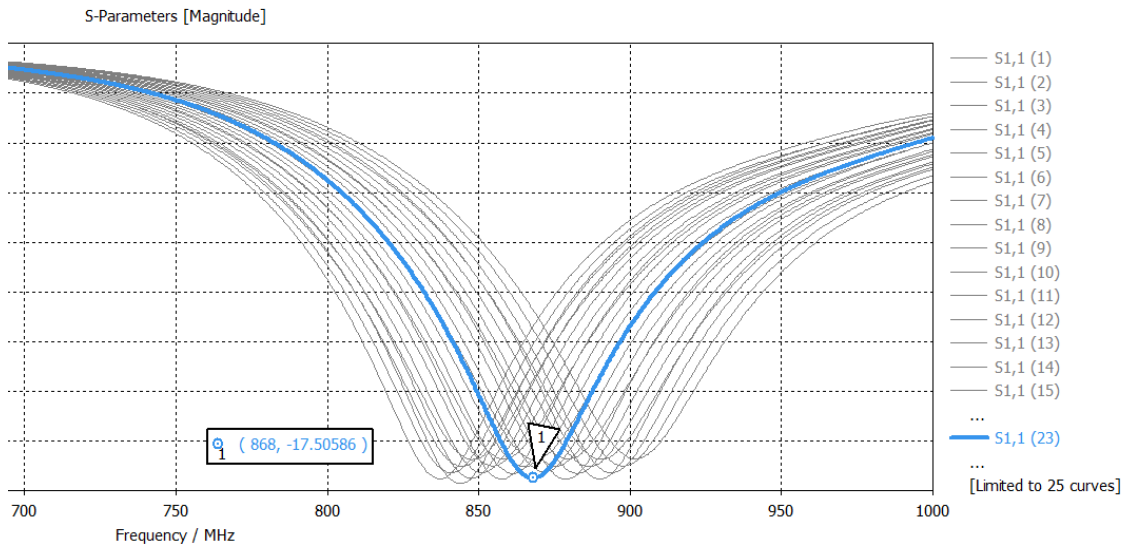
Frekans uyumluluğu için iki kutup arasında bulunan boşluk kısmında etkili olduğu görülmüştür. Etkisinin incelenebilmesi için en uygun boyuttaki anten için kutuplar arasındaki boşluk 0.5 ila 5 arasında 0.5 adımlar ile parametrik tarama yapılmıştır.



**Şekil 3.20:** 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (S11- Boşluk değişimi).

Bu çalışma kapsamında ortaya çıkan sonuç; hem kutup boyu hemde kutuplar arası boşluk değerleri için birlikte parametrik tarama başlatılarak 50 ohm empedans uyumluluğu sağlandığı tasarımın belirlenmesi gerektiğidir. Empedans uyumluluğu için etkili parametrelerin tamamı için uygun kombinasyon elde edilerek en uygun tasarım belirlenebilmektedir.

Burada görüldüğü gibi anten etkin uzunluğunda anten kutup uzunluğuna ilave olarak kollar arasındaki mesafenin ( $l_g$ ) de etkin olacağı görülmektedir.



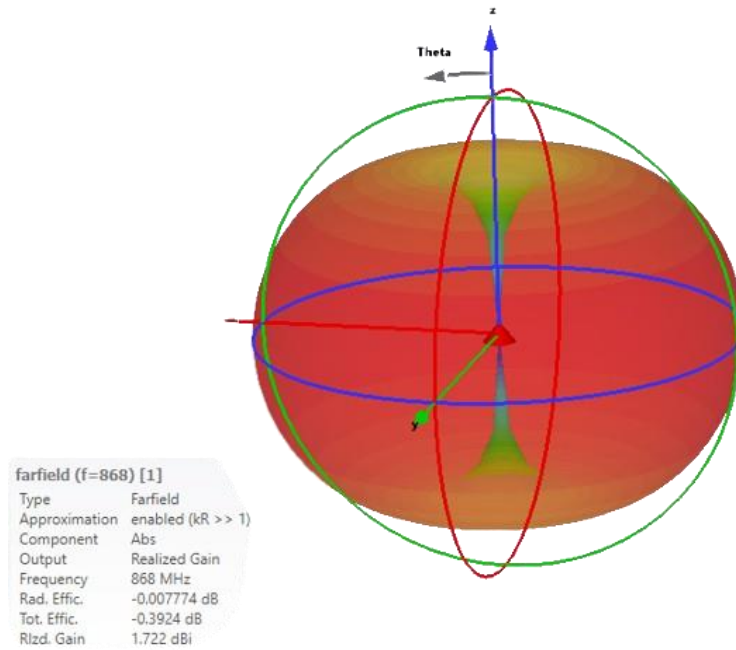
**Şekil 3.21:** 868 MHz anten tasarım kombine simülasyon sonuçları (S11).



**Tablo 3.2:** Farklı mekanik özelliklerde S parametre değerleri karşılaştırma tablosu.

Numara	Işıyıcı Boyu (mm)	Kutuplar Arası Boşluk	S Parametre	$(l_1 + l_2 + l_g)$ (mm)
1	80	9	-10.71	169
2	78	9	-15.42	165
3	77	9	-17.3	163
4	76	9	-17.01	161
5	75	9	-14.27	159
6	75	8	-13.29	158
7	75	7	-12.37	157
8	75	6	-11.58	156
9	75	5	-10.73	155

Dipol anten tasarımı yaparken merkez frekans değerini doğrudan etkileyen, ışığı uzunluğu ve kutuplar arası boşluk için 30 kombinasyonlu bir tarama simülasyonu gerçekleştirilmiş ve 868 MHz için en uygun sonucun kolların 77 mm ve kollar arasındaki boşluğun 8 mm olduğu durumda elde edilmiştir. Boşluk ve uzunluk değerleri optimize edildikten sonra merkez frekans geri dönüş kaybı değeri -14,78 dB değerinden -17,5 dB değerine iyileştiği ölçülmüştür.

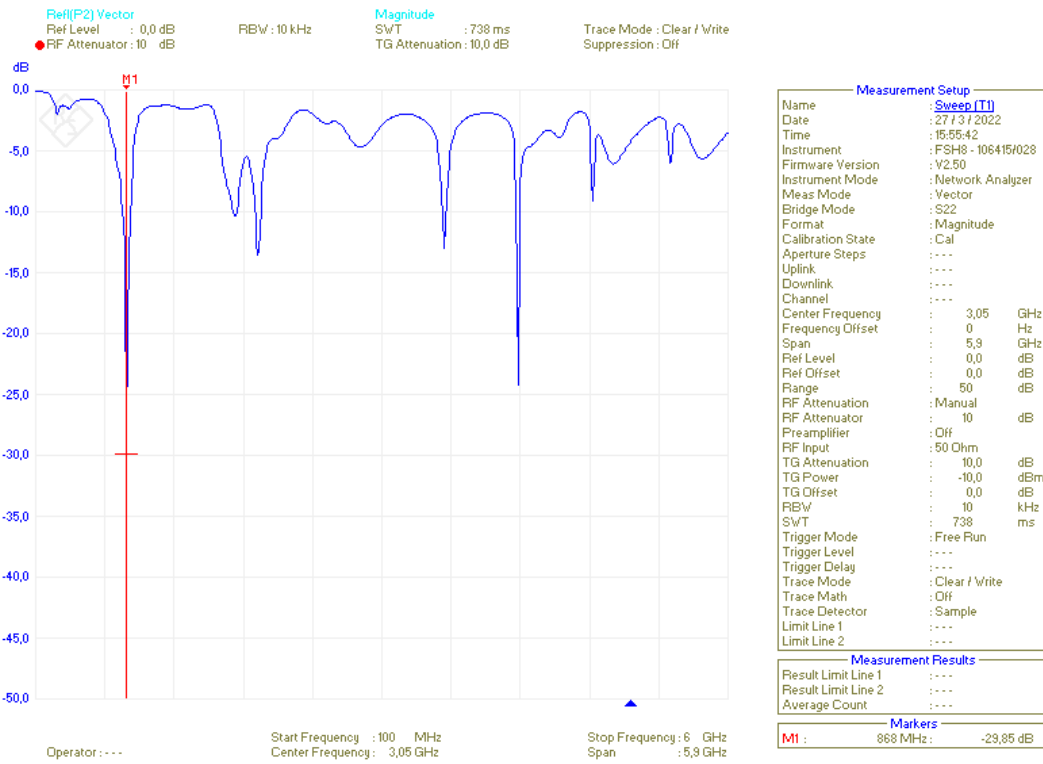


**Şekil 3.22:** 868 MHz anten tasarım simülasyon sonuçları (Rlzd. gain).

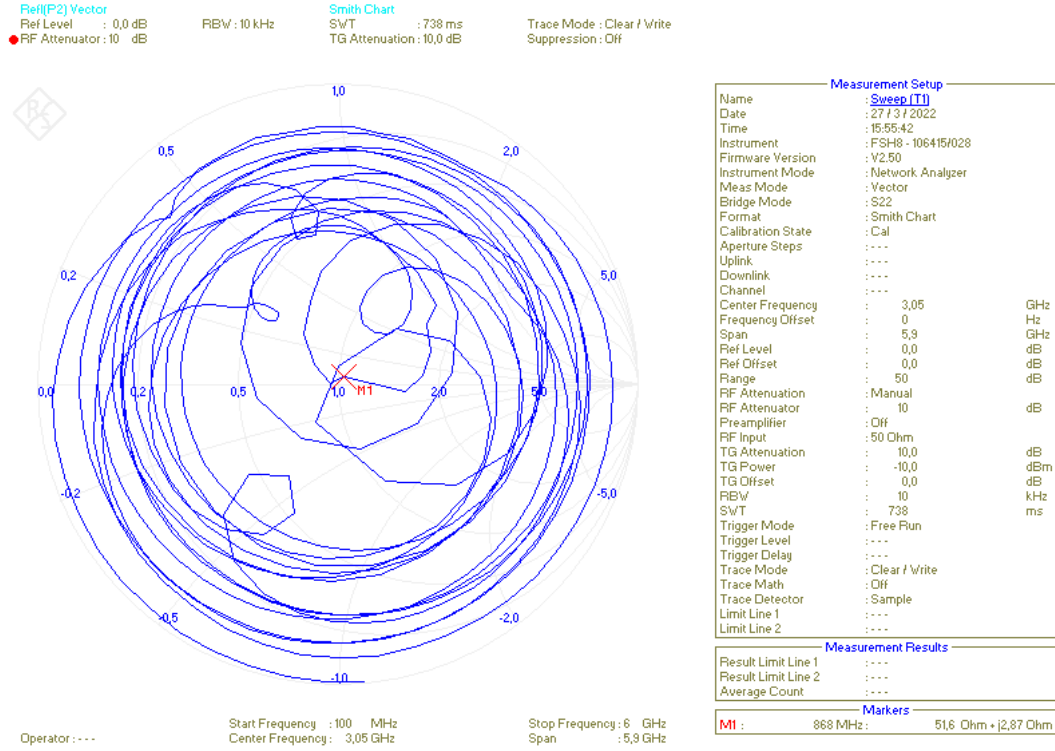
İşiyıcı boyunun kısalması ve kutuplar arası boşluk değerinin artması ile empedans uyumu sağlanmıştır. Bu sayede toplamda 17 mm işiyıcı uzunluğu azalmıştır. Bu değişim sonucunda gerçekleşen anten kazancı değeri 1.89 dBi değerinde 1.722 dBi değerine düştüğü gözlemlenmiştir.



**Şekil 3.23:** Üretilen 868 MHz yarım dalga çift kutuplu anten modeli.



**Şekil 3.24:** Üretilen 868 MHz yarım dalga çift kutuplu anten s parametre ölçüm sonucu.



**Şekil 3.25:** Üretilen 868 MHz yarım dalga çift kutuplu anten empedans ölçüm sonucu.

Ölçüm sahasının yansısız olmaması sebebiyle simülasyona göre frekans kaymaları söz konusu olmuştur. Bu durum, kutupların boy uzunluğunu değiştirerek merkez frekans 868 MHz için ayarlanmıştır. İşlemin son aşamasında mekanik ve elektriksel ölçüm sonuçları Tablo 3.3'e kaydedilmiştir.

**Tablo 3.3:** Simülasyon ve üretilen anten özellikleri karşılaştırma tablosu.

Mekanik		Elektriksel	
Simülasyon Sonucu		Simülasyon Sonucu	
Boy	Kalınlık	S Parametre Değeri	Empedans Değeri
85 mm	4 mm	-17.5 dB	56.2 Ohm + j6.5 Ohm
Üretilen Anten Ölçüm Sonucu		Üretilen Anten Ölçüm Sonucu	
85 mm	4 mm	-29.95 dB	51.6 Ohm+j2.87 Ohm

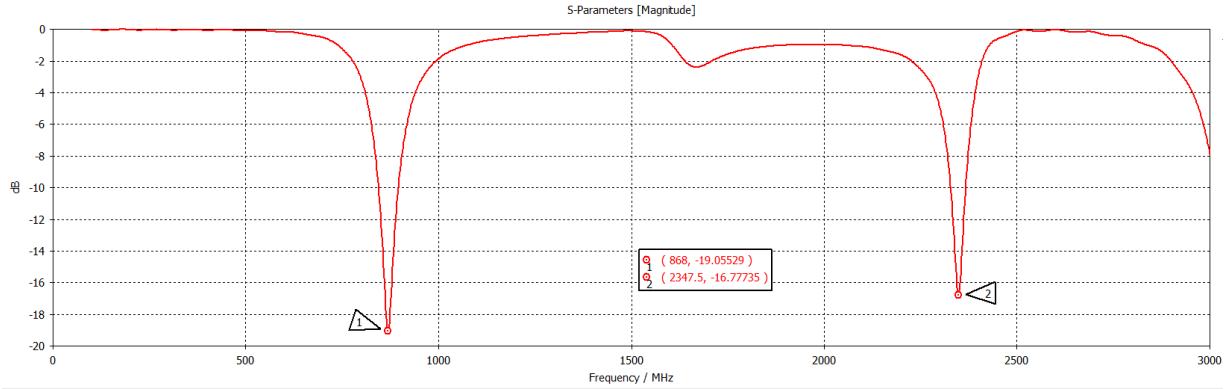
### 3.2.2 Elektriksel Küçük Dipol Tel Anten Uygulaması

Elektriksel küçük dipol anten elde edebilmek için kullanılan materyallere uygun bir minyatürize tekniği seçmek gerekmektedir. Tel antenler için ideal tel burkma veya sarmal yapı kazandırma en yaygın olan minyatürize tekniğidir. Kutuplardan birine sarmal yapı

diğerinin ise geometrisini korumak kaydı ile tasarım ve simülasyon çalışmaları başlatılmıştır.



Şekil 3.26: Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten modeli.



Şekil 3.27: Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten simülasyon sonucu

(S parametre geri yansıma cevabı).

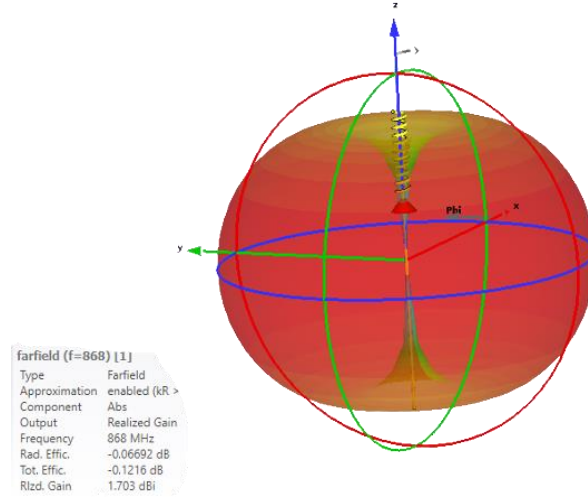
Tasarlanan antenin simülasyon cevabı incelenmiştir. Minyatürize işlemi uygulandıktan sonra geri dönüş kaybı değeri cevabının iyileştiği görülmüş ve merkez frekansı için empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Empedans uyumluluğu sağlanan yapıda toplam uzunluk yaklaşık 100 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.28: Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten simülasyon sonucu

(Smith diyagramı).

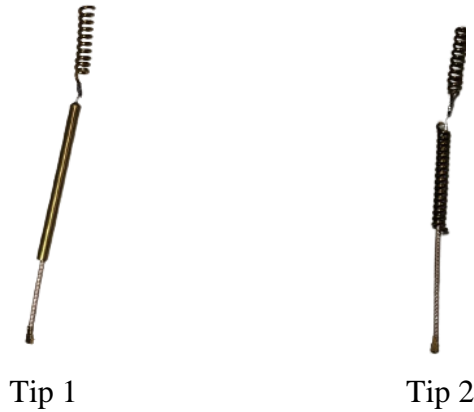
Üretilen anten ile simülasyon değerlerini karşılaştırabilmek için empedans değerleri kaydedilmiştir. Simülasyon sonucuna göre 868 MHz merkez frekansı için yarım dalga çift kutuplu antene göre empedans uyumluluğunun sağlandığı görülmüştür.



**Şekil 3.29:** Tasarlanan minyatürize çift kutuplu anten simülasyon sonucu (gerçekleşmiş kazanç).

Elektriksel küçük dipol tel anten uygulaması kapsamında, 4.2.1 numaralı başlıkta gerçekleştirilen yarım dalga dipol antenin kutuplarına sarmal yapı kazandırılarak 868 MHz elektriksel küçük dipol anten tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

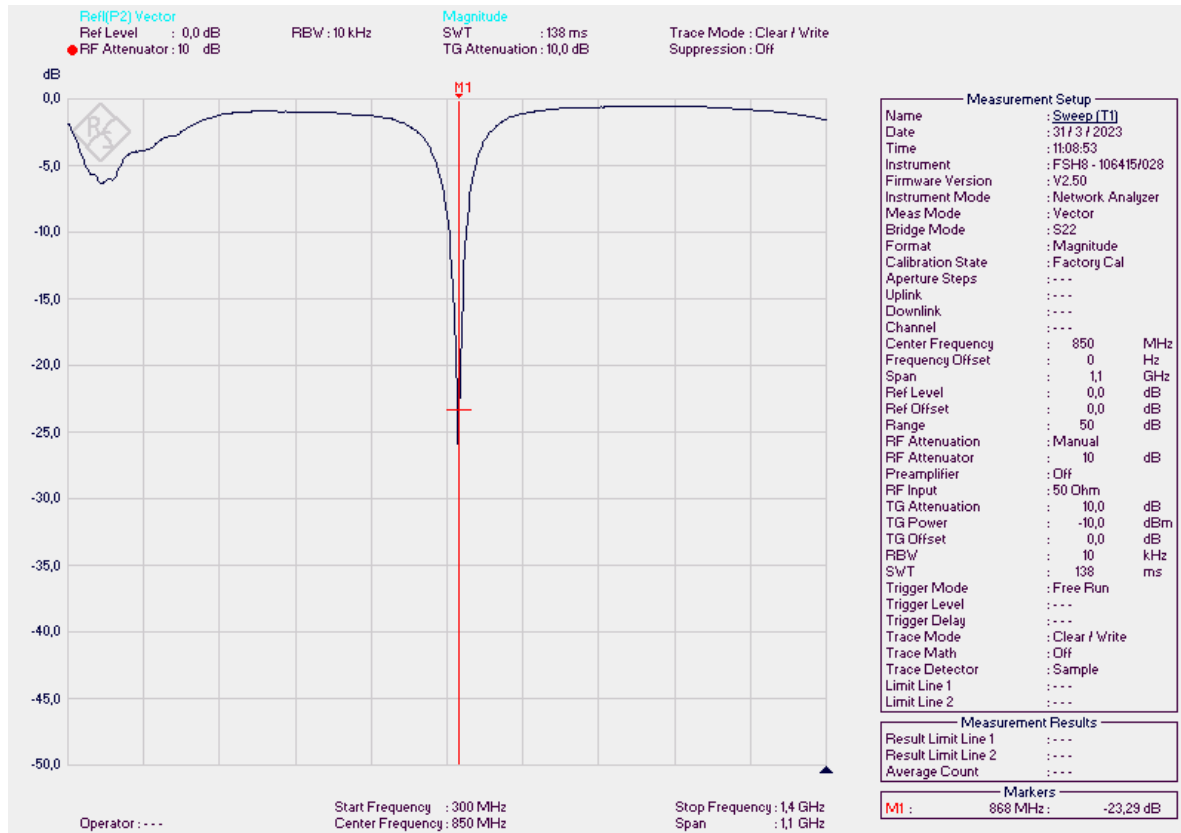
İlk olarak tek kutuba belli bir açıda farklı tur ve sayılarda sarmal yapı kazandırılmış ve tel dipol ile ölçüm sonuçları ve mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Uygulanan küçültme tekniği ile anten boyu yaklaşık %30 oranında küçültülmüştür. Dipol antenin kutuplarından biri iletken boru, diğer kutup ise sarmal tel yapıdan oluşmaktadır. Bu sayede kutuplardan birinin boyu küçültülerek minyatürize edilmiştir.



**Şekil 3.30:** Üretilen elektriksel küçük dipol anten modelleri.

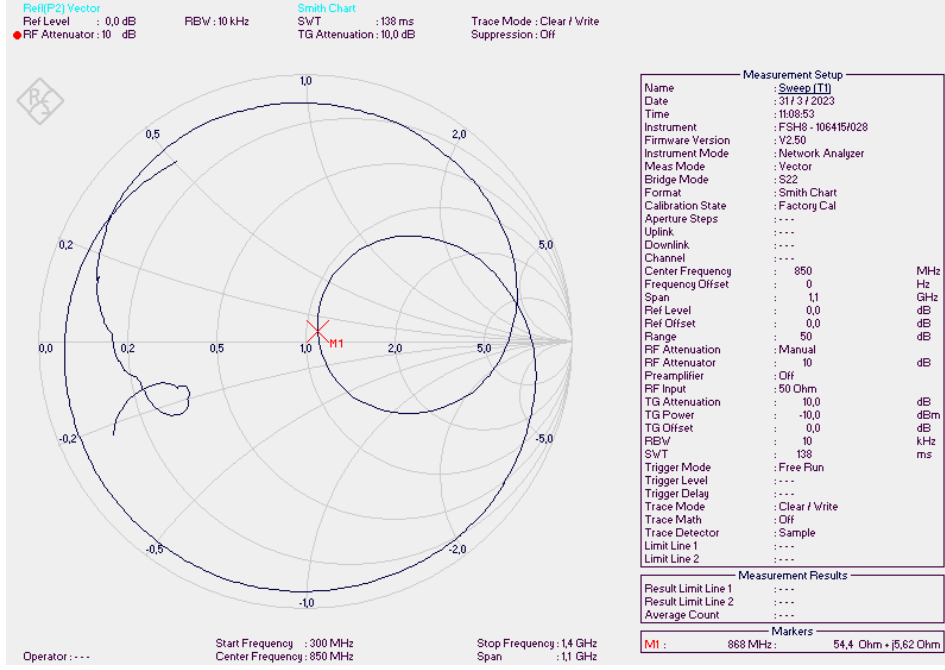
Tasarımı tamamlanan yarım dalga dipol anten için 8 mm açıklığa sahip olacak şekilde 1.2 mm kalınlığında pirinç tel ile uygulaması gerçekleştirilmiştir. Besleme işlemi için ölçümler esnasında IPEX konnektör ile sonlandırılmış RG178 kablo kullanılmıştır.

Yarım dalga dipol anten birebir üretilmeye çalışılmıştır ve ölçüm sonuçlarında simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında farklılıklar görülmüş ve bu farklılıkların sebeplerinin çalışma ortamı ve çevre koşulları olabileceği görülmüştür. Metalden arındırılmış bir ortamda testler yapıldığında, ölçüm sonuçları, simülasyon sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür.



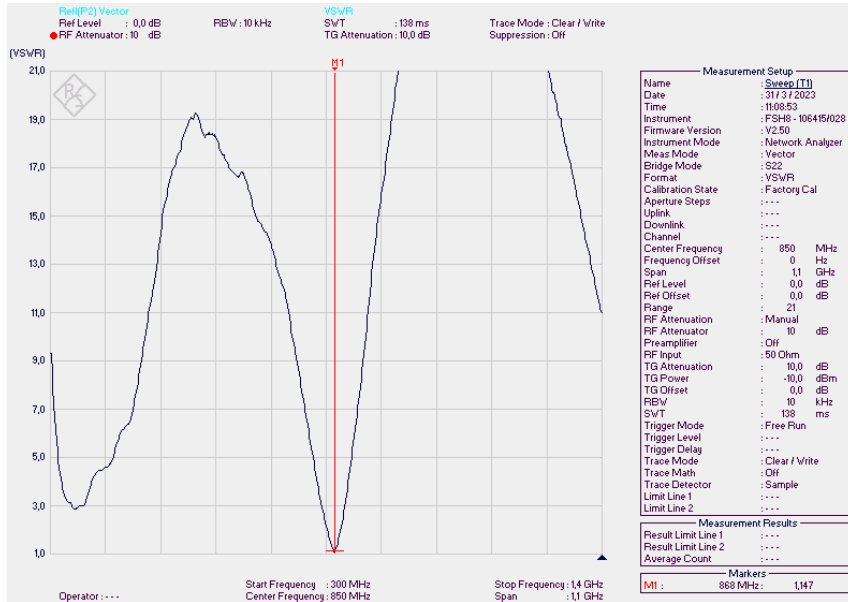
**Şekil 3.31:** Üretilen minyatürize çift kutuplu 868 mhz antenin VNA ölçüm sonucu (Geri dönüş kaybı s parametre grafiği).

Üretilen antenin geri dönüş kaybı değerinin -23,29 dB olduğu ölçülmüştür. Minyatürize tekniği uygulanan antenin, saha performansına doğrudan etkili elektriksel ölçüm sonucunda iyileşmeler olduğu görülmüştür.



Şekil 3.32: Üretilen minyatürize çift kutuplu 868 MHz antenin VNA ölçüm sonucu (Smith diyagramı).

Üretilen anten empedans değerleri Smith Diyagramı aracılığıyla belirlenmiş ve ideal 50 ohm değerine yakın bir sonuç elde edildiği ölçülmüştür.



Şekil 3.33: Üretilen minyatürize çift kutuplu 868 MHz antenin VNA ölçüm sonucu (Smith diyagramı).

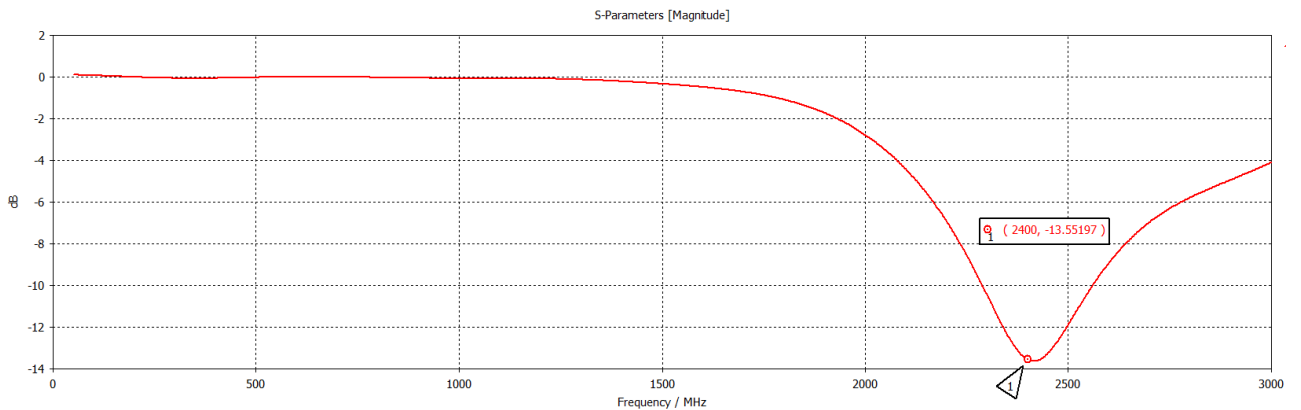
Devam eden çalışmalarda Tip 1 anten modelinde iletken borunun çapları değiştirilerek empedans uyumuna etkisi incelenmiştir. RG178 kablo modeli ile yapılan çalışmada 4 mm ve 5 mm iç çapa sahip et kalınlığı 0.35 mm olan boru ile empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Daha sonra 6 mm ve 8 mm denenmiştir. Bu çaplarda merkez frekansı 20 MHz değiştiği ve 50 ohm değerinden uzaklaştığı görülmüştür. Fiziksel boy değerinin değiştirilmesi ile empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Bu çalışmada boru çapının rastgele seçilmesi ve tasarımın o referans ölçüde yapılması üretim aşamasında zorluk çıkardığı tecrübe edilmiştir. Tüm mekanik parametrelerin empedans uyumluluğuna etkisi olduğu görülmüştür.

Mevcut çalışmalara ek olarak dipol antenin iki kutbuda sarmal yapıda tasarlanarak 868 MHz'de empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Bu sayede ilk olarak tasarlanan dipol antene göre %18 oranında minyatürize edilmiştir.

Bu çalışmalar sonucunda çok geniş uygulama yelpazesi olan 868 MHz dipol anten tipi için çalışan 4 farklı mekanik ve elektriksel özelliğe sahip anten tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Dipol tel anten için elektriksel olarak küçültme teknikleri uygulanırken farklı mekanik özellikler için anten kazancı incelenmiştir.

### 3.3 2.4 GHz Minyatürize Monopol Anten Uygulaması ve Anten Kazancının Artırılması

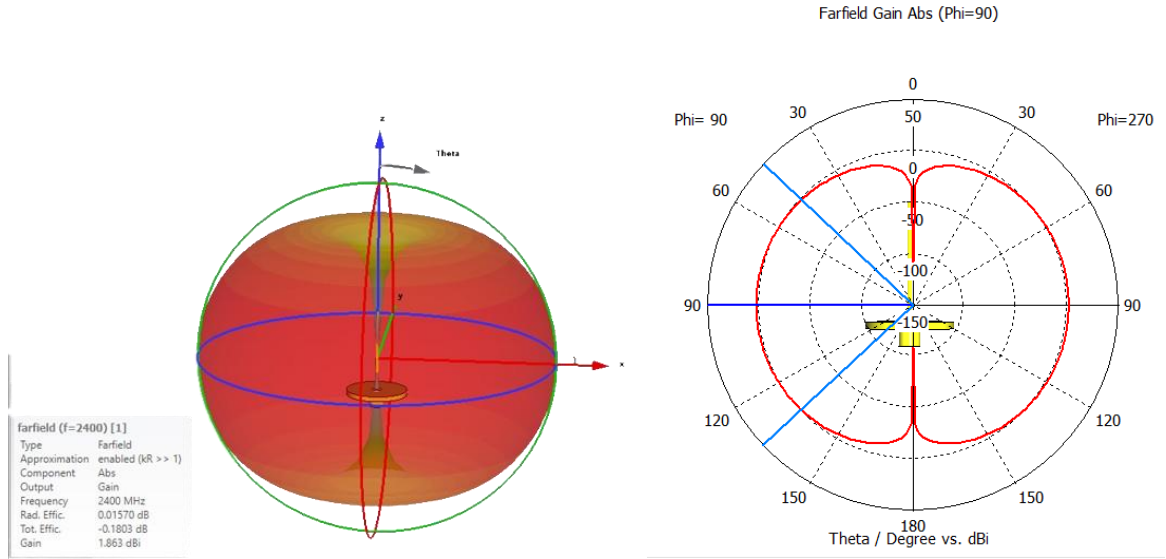
2.4 GHz merkez frekansı için monopol anten simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Hem anten kazancı değerini görebilmek hemde üretim öncesi referans sonuçlar elde edebilmek için monopol çeyrek dalga anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.34:** Tasarlanan 2.4 GHz antenin simülasyon sonuçları anten 1 (S11 geri dönüş kaybı).



2.4 GHz merkez frekansı için çeyrek dalga boyu hesaplanmış ve modellenen SMA konnektör ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuç eşliğinde anten üretim safhasına geçilecektir.



**Şekil 3.35:** Tasarlanan 2.4 GHz antenin simülasyon sonuçları anten 1  
(Anten kazancı).

169 MHz tek kutuplu anten çalışması esnasında uygulanan minyatürize tekniği ile 2.4 GHz çeyrek dalga anten küçültülmüştür. 2.4 GHz monopul çeyrek dalga antenin boyu 32 mm olarak ölçülmüştür. SMA konnektöre doğrudan montajlanmıştır.



Anten 1

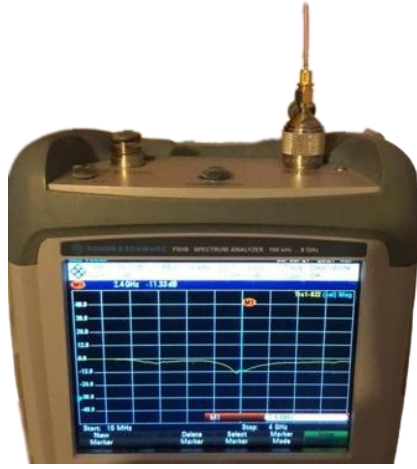


Anten 2

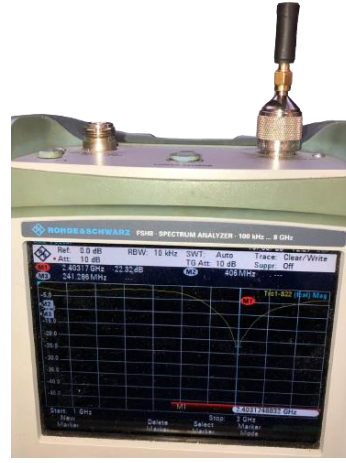
**Şekil 3.36:** Üretilen 2.4 GHz anten modelleri.

“Anten 1” çeyrek dalga tek kutuplu anten olarak üretilmiştir. Sarmal yapı kazandırarak ışığı boyu 19 mm kadar düşürülmüştür. Antenin kullanacağı yer ve uygulamaya göre

küçültme oranı değiştirilebilir. Anten kazancı, fiziksel ölçümlere ve empedans uyumuna bağlı olarak karakterize edilmektedir.

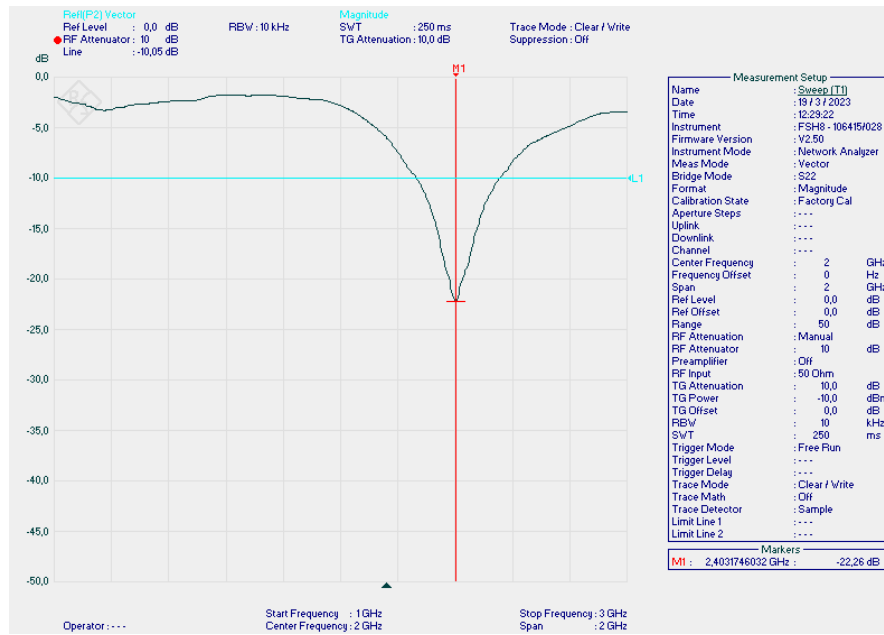


Anten 1



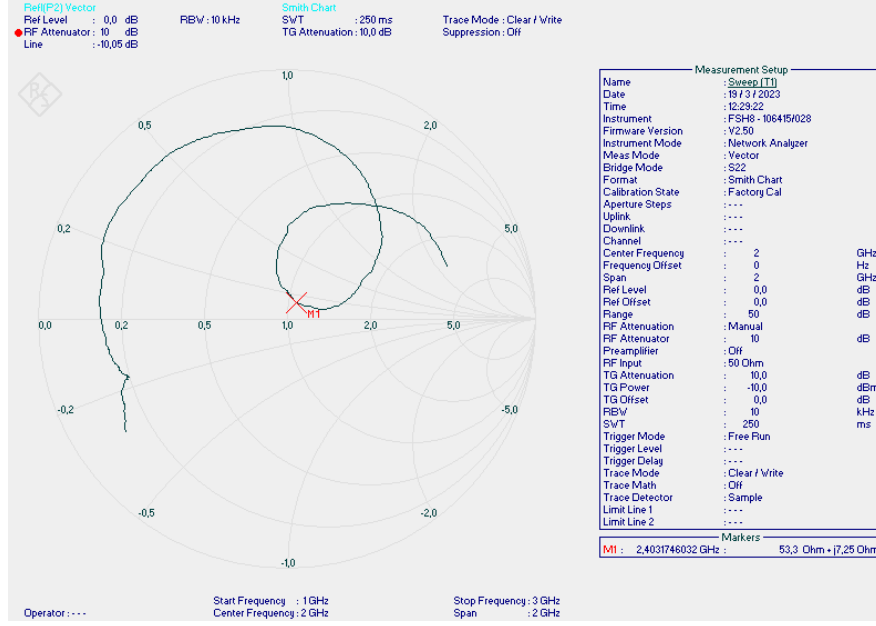
Anten 2

Şekil 3.37: Üretilen 2.4 GHz anten modelleri.



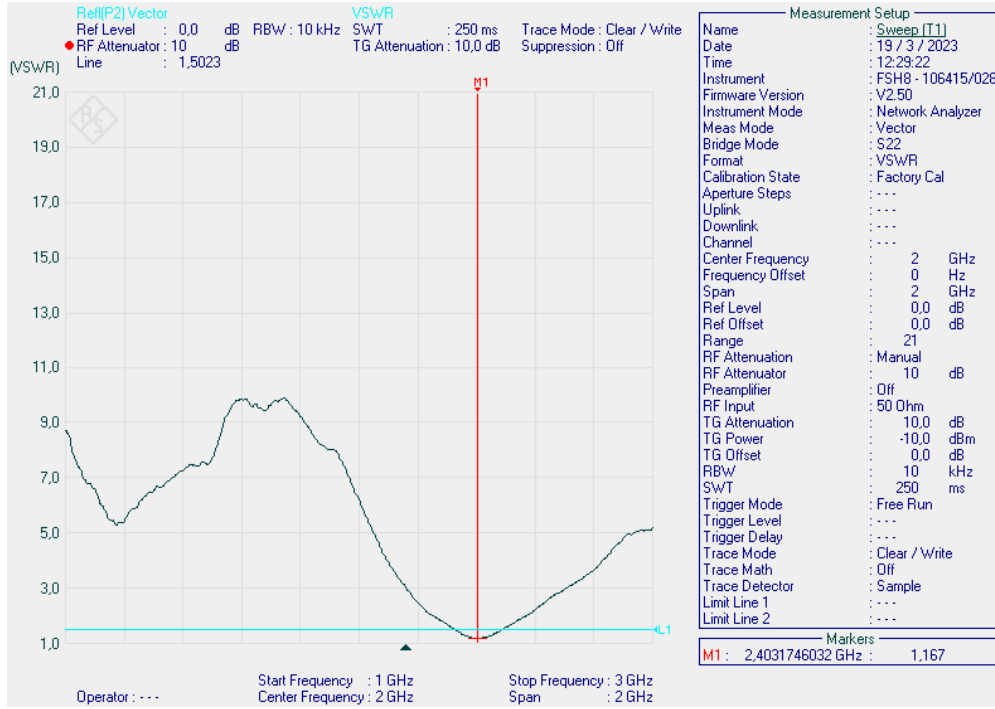
Şekil 3.38: Üretilen çeyrek dalga monopol 2.4 GHz minyatürize antenin (anten2) VNA ölçüm sonucu (S11).

2.4 GHz monopol antenin -14.6 dB civarında olan geri dönüş kaybı değeri, minyatürizasyon tekniği uygulanarak -22,26 dB değeri elde edilmiştir. Empedans uyumluluğu artırılmış ve boyu 13 mm kısaltılmıştır.



Şekil 3.39: Üretilen çeyrek dalga monopol 2.4 GHz minyatürize antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (Smith diyagramı).

2.4 GHz minyatürize anten ölçüm sonuçlarına empedans uyumluluğu açısından baktığımızda, monopol çeyrek dalga antene göre 50  $\Omega$  değerine daha fazla yaklaştığı ve 53,3  $\Omega - j7,25 \Omega$  olduğu ölçülmüştür.



Şekil 3.40: Üretilen çeyrek dalga monopol 2.4 GHz minyatürize antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (VSWR).

Empedans uyumluluğunun sağlanması ile durağan dalga değeri düşerek 1,167 olarak ölçülmüştür.

Empedans uyumluluğu ve S parametre değerine bakıldığı zaman elektriksel küçük anten cevabı daha iyi olduğu görülmektedir. Bu sonuca ulaşmak aslında anten fiziksel parametrelerindeki hassas değişkenlere bağlı olduğu görülmüştür. Çeyrek dalga monopollerde sadece boy ve ışıyıcı kalınlığı değiştirilirken elektriksel küçük sarmal monopollerde, sarım sayısı spinler arası mesafe, ışıyıcı çapı, sarmal çapı gibi bir çok değişken empedans uyumluluğu için değiştirilebilmektedir. 2.4 GHz için üretilen antenlerde S parametre değerleri “Anten 1” için - 11,33 dB ve “Anten 2” için -22,32 dB olarak ölçülmüştür. Bu tasarım ve üretimde daha zor bir model olmasının yanında başarılı bir tasarımın sonucunda da daha iyi empedans cevabı alınmasını sağlamıştır. Bu cevaplar ile görülen sonuç, empedans uyumluluğu ile durağan dalga oranı 1 değerine yaklaşmıştır ve anten saha performansında kaydadeğer bir fark gerçekleşmiştir. Haberleşme kriterlerine empedans uyumluluğu ve durağan dalga oranı gibi değerleri göz önünde bulundurularak baktığımızda saha performansına etkisi, haberleşme şartlarının zorlaştığı zaman; elektromanyetik gürültü, fiziksel engeller gibi etkenler ile karşılaşıldığında bariz bir şekilde görülmektedir.

### **3.3.1 Anten Kazancı Odaklı 2.4 GHz Monopol Tel Anten Tasarım ve Üretim Ölçüm Sonuçları**

Genel itibari ile ticari piyasada 3 GHz üzeri monopollü tel anten tercih edilmemektedir. Bunun temel sebebi; 2.4 GHz değeri referans alındığında yaklaşık 32 mm bir ışıyıcı yapı karşımıza çıkmaktadır. Bu yapı çok yönlü ve kazanç değeri 1.5 dBi civarında olduğu görülmektedir. Çalışma frekansı büyüdükçe dalga boyu küçüldüğü için temelde fiziksel olarak minyatürize edilmiş monopollerin uygulaması zorlaşmaktadır. Bu frekanslarda zaten fiziksel boy küçük olduğu için standart monopollü anten tasarımına göre daha yüksek kazançlı antenler tasarlanmaktadır. Anten kazancı monopollü antenlerde doğrudan fiziksel özelliklere ve boyuta bağlıdır. Buna bağlı olarak yine karşımıza yüksek kazançlı, empedans uyumluluğu sağlanmış bir anten tasarımı ihtiyacı doğmaktadır. Bu sebeple kazancı yüksek monopollü yapısının empedans uyumluluğu ve boyutunu iyileştirmek için minyatürize teknikleri uygulanmaktadır.

Üretilen anten, 2.4 GHz merkez frekansına sahip anten kazancı arttırılmış bir model olarak tasarlanmıştır. Bu tip anten modelleri incelendiğinde 2 yapı karşımıza çıkmaktadır. İlk model

sürekli anten yapısı (Tip1) diğeri ise bakır pcb üzerine işlenmiş empedans uyumlama devresi bulunan(Tip2) anten modelidir.



Tip 1

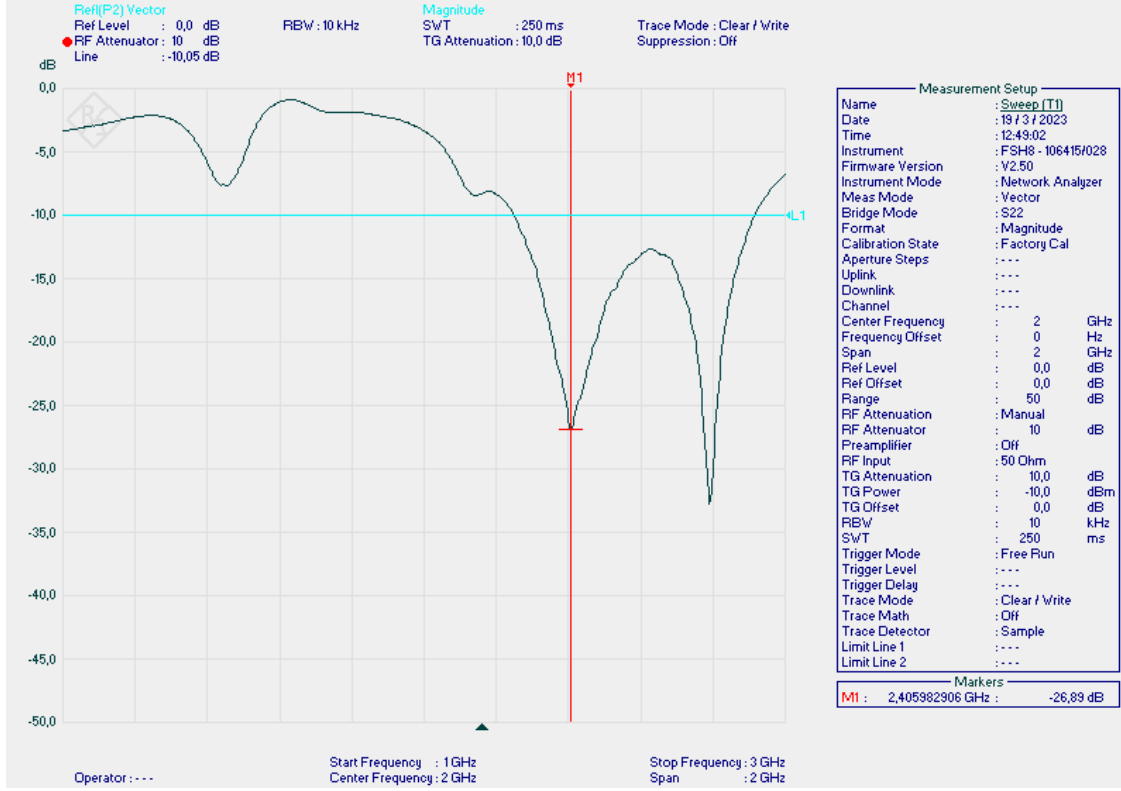


Tip 2

**Şekil 3.41:** Üretilen 2.4 GHz yüksek kazançlı anten modelleri.

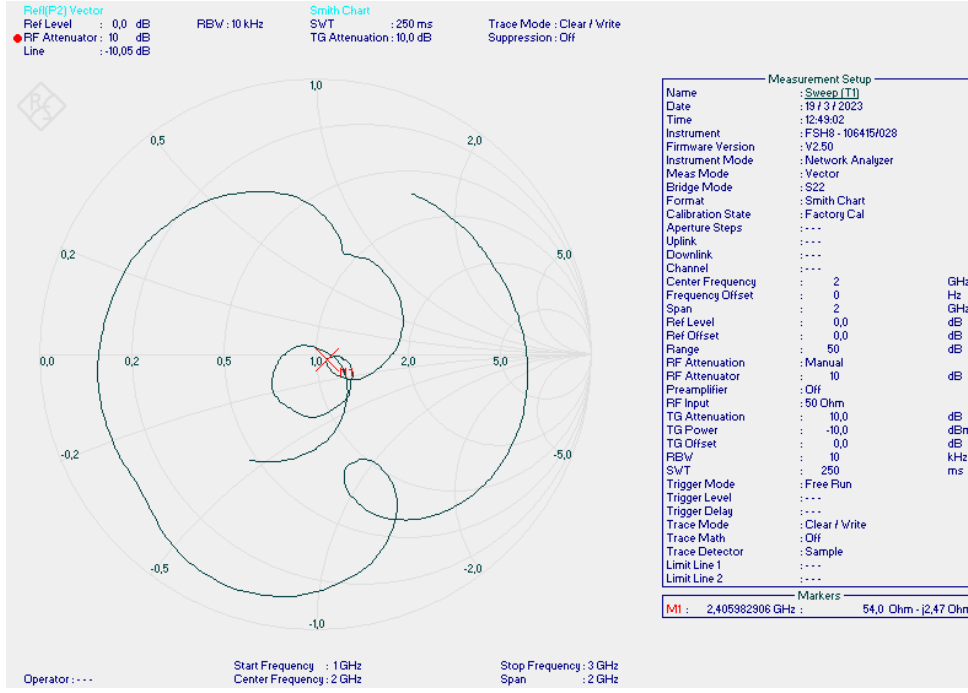


**Şekil 3.42:** Üretilen yüksek kazançlı Monopol 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm görüntüsü.



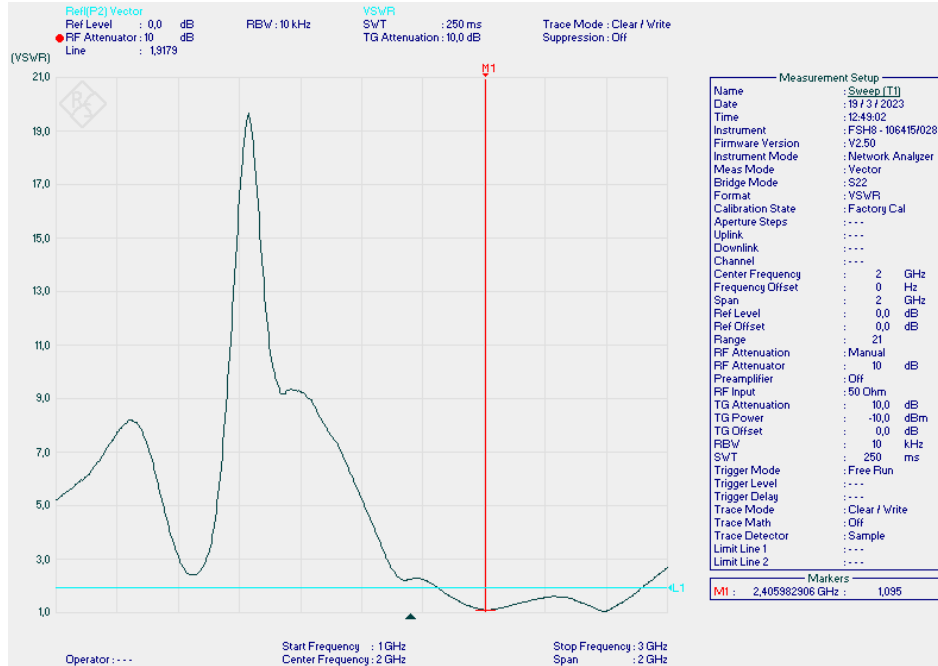
**Şekil 3.43:** Üretilen yüksek kazançlı monopol 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm sonucu (Geri dönüş kaybı grafiği) - Tip 2.

Üretilen yüksek kazançlı 2.4 GHz (Tip 2) anten ölçüm sonuçlarına bakıldığı zaman geri dönüş kaybı değerinin minyatürize tel antene göre de düştüğü görülmüştür. Bu tasarımda çeyrek dalga modelini minyatürize ettiğimiz anten yapısına göre daha fazla fiziksel parametre vardır. Bu sayede empedans uyumlaması için daha hassas değişiklikler yapılabilmektedir.



Şekil 3.44: Üretilen yüksek kazançlı monopol 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm sonucu (Smith diyagramı) - Tip 2.

Empedans uyumluluğu sağlanmış 2.4 GHz yüksek kazançlı antenin empedans değeri ideal 50 ohm değerine yaklaştığı görülmektedir.

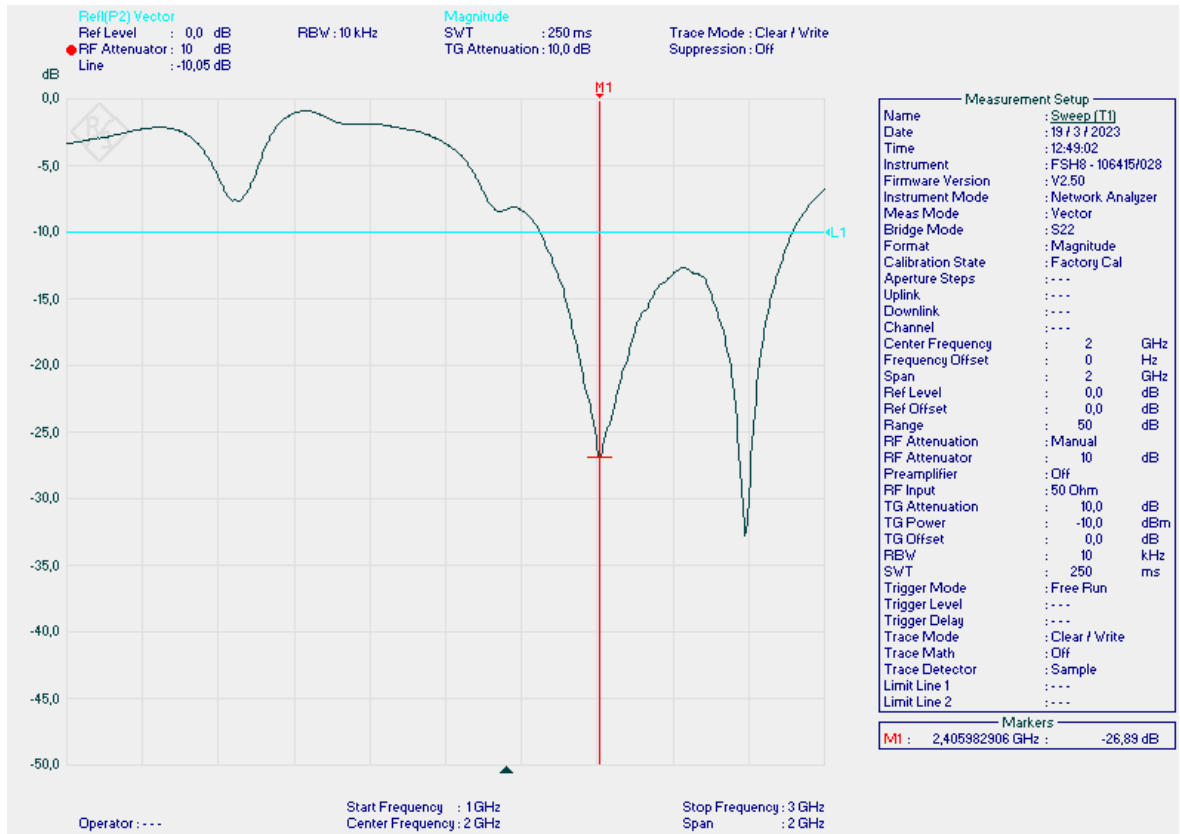


Şekil 3.45: Üretilen yüksek kazançlı monopol 2.4 GHz minyatürize antenin VNA ölçüm sonucu (VSWR grafiği) – Tip 2.

Ölçülen antenin durağan dalga oranı 1 değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda, yüksek kazançlı antenin, anten verimliliği değerinde yüksek olduğu görülmektedir.

### 3.3.2 Anten Kazancı Odaklı 2.4 GHz Monopol Tel Anten Ölçüm Sonuçları

Temel monopol yapısına göre daha yüksek kazançlı bir anten tasarımı durumunda anten kazancı artarken antenin boyunun da arttığı görülür. Bu durumda empedans uyumluluğunun sağlandığı çeyrek dalga boyunun üzerine çıkıldığından, empedans uyumluluğu için minyatürize tekniği olan sarmal yapı uygulanmıştır. Bu sayede; S band bir antende monopol tel tasarımı ile yönsüz yüksek kazançlı anten tasarımı gerçekleştirilmiştir.

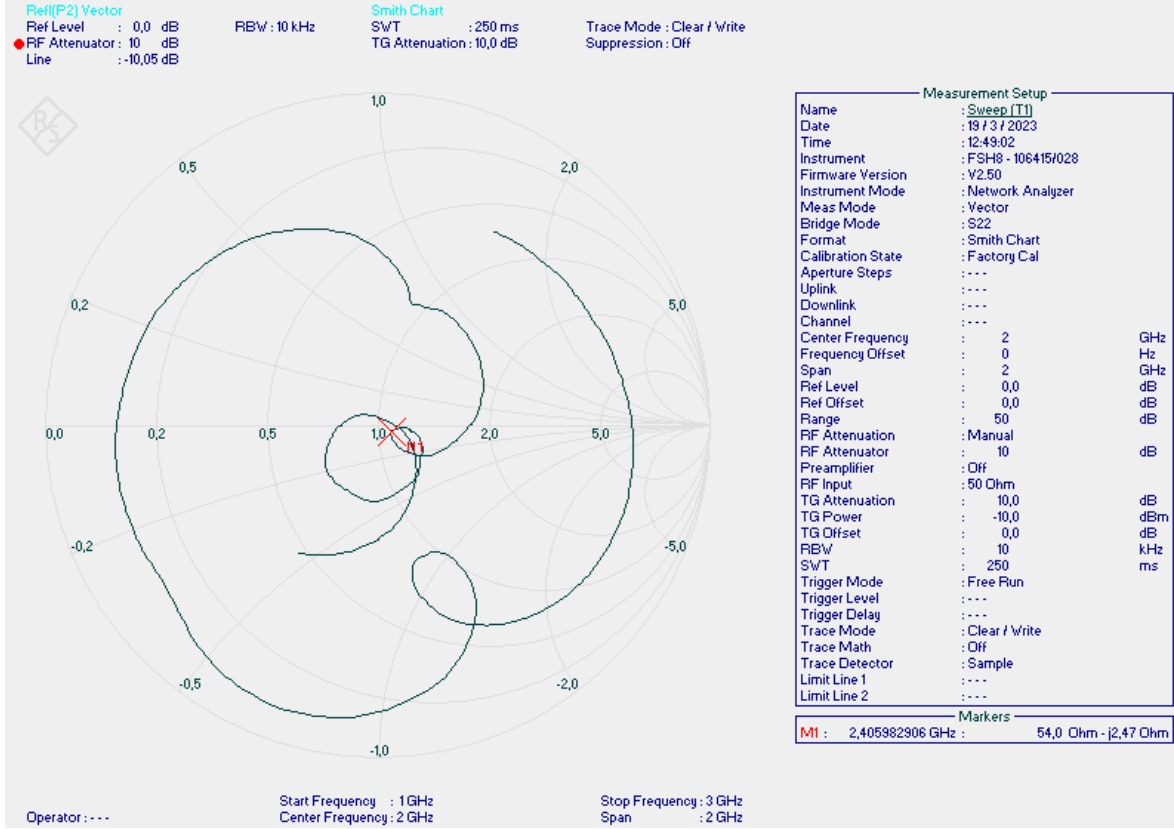


**Şekil 3.46:** Üretilen çeyrek dalga monopol 2.4 GHz minyatürize yüksek kazançlı antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (S Parametre).

2.4 GHz anten için minyatürize işlemi ile fiziksel küçülme ve empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Bu durum, anten boyutunun küçülmesiyle çok küçük bir değerde de olsa anten kazancını etkilediği bilinmektedir. Bu uygulama kapsamında hem anten kazancının artırılması hemde empedans uyumluluğunun korunması sağlanmıştır. Yüksek kazançlı bir

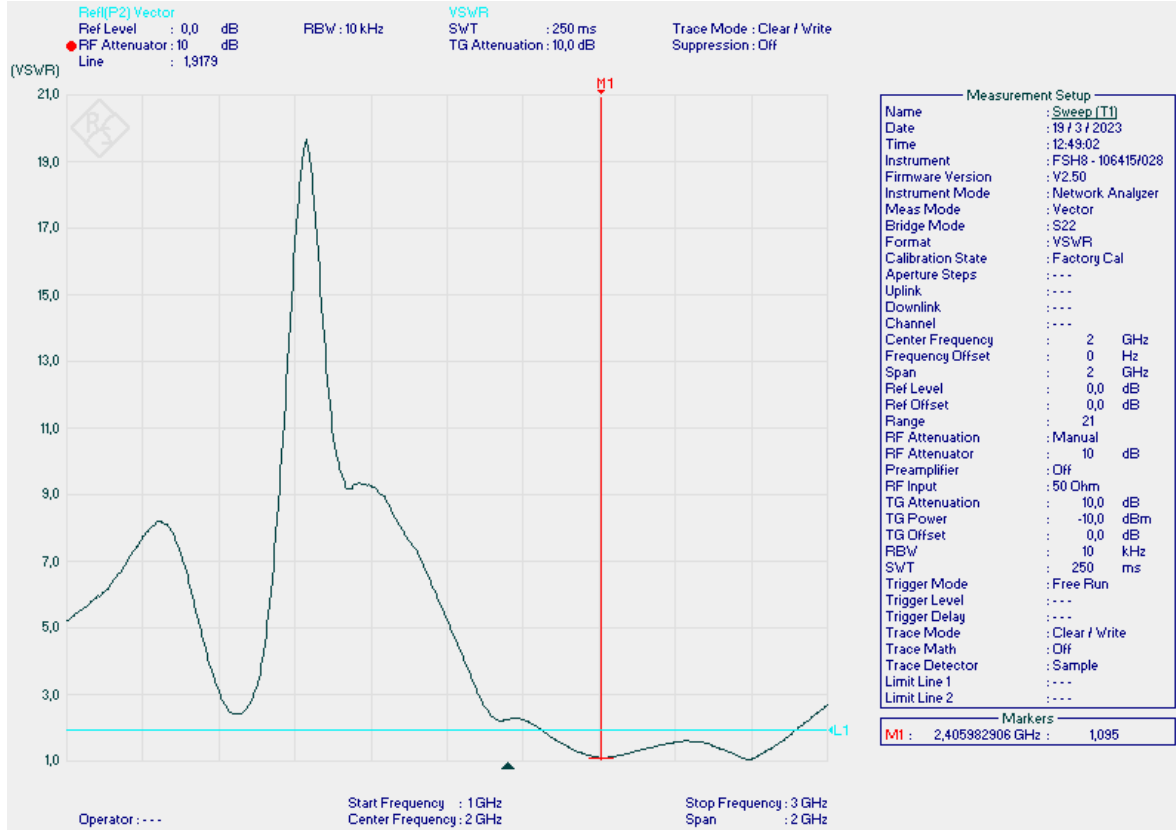


antenin boyutu çeyrek dalga antene göre daha büyüktür. Farklı fiziksel özelliklerde anten empedansı uyumluluğu sağlanarak yüksek kazançlı anten tasarımı ve üretimi mümkündür. Üretilen yüksek kazançlı antenin empedans uyumluluğu artırılarak fiziksel boyu minyatürize edilebilir. Bu teknik ile minyatürize yüksek kazançlı tel anten üretilmiştir.



**Şekil 3.47:** Üretilen çeyrek dalga monopol 2.4 GHz minyatürize yüksek kazançlı antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (Smith grafiği).

Anten boyu küçültülürken spiral anten üretim tekniği kullanılmıştır. Anten empedansı uyumluluğu için tel boyunun dışında farklı parameterler ile daha hassas değerlerde uyumluluk sağlanabilmektedir. Empedans değerleri  $54 \Omega - j2,47 \Omega$  olarak ölçülmüştür.

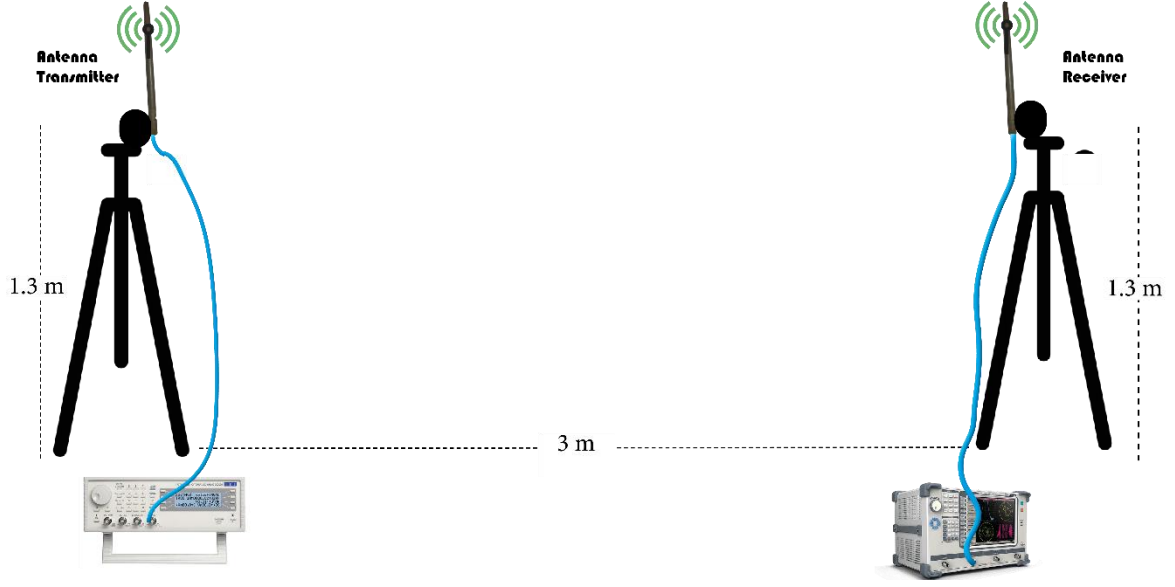


**Şekil 3.48:** Üretilen çeyrek dalga monopol 2.4 GHz minyatürize yüksek kazançlı antenin (Anten2) VNA ölçüm sonucu (VSWR).

Empedans uyumunun sağlanması ile durağan dalga oranı 1 değerine yaklaşarak 1,095 olarak ölçülmüştür.

#### 4. ANTEN EMPEDANS UYUMLULUĞU İLE ANTEN PERFORMANSININ İLİŞKİSİNİN ÖLÇÜLMESİ

Tez araştırmaları sonucunda tasarlanan ve üretilen antenlerin ilk amacı daha küçük anten imalatının gerçekleştirilebilmesi ve mekanik parametrelerin empedans uyumluluğuna pozitif etki etmesi olmuştur. Bu işlemler minyatürize anten çalışmaları çerçevesinde detaylandırılmıştır. Empedans uyumluluğu sağlanmış VSWR değeri 1,5'dan küçük olan anten modelleri performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar esnasında sinyal üretici ve VNA spektrum analizör modunda kullanılmıştır. Üretilen antenlerin frekansında sinyal üreticiden 0 dBm güç basılmış ve analizörde alınan güç değerleri ölçülmüştür. Bu çalışmalar ışığında anten boyu ve empedans uyumu açısından karşılaştırma yapılmıştır.



**Şekil 4.1:** Anten performansı ölçüm platformu yerleşimi.

Verici anten, ahşap bir tripot üzerine yerleştirilmiş ve koaksiyel kablo ile sinyal üreticine bağlanmıştır. Sinyal üretici, irtibatlandırılan anten merkez frekansına ayarlanmış ve 0 dBm gücünde çıkış verecek şekilde çalıştırılmıştır. Alıcı anten yine verici anten gibi ahşap tripot üzerine montajlanmıştır. Koaksiyel kablo ile vektör ağ analizörüne irtibatlandırılarak elektriksel bağlantı tamamlanmıştır. Vektör ağ analizörü spektrum analizör modunda çalıştırılmış ve ölçülecek frekansa göre kalibrasyonu yapılmıştır. İzleyici değeri anten merkez frekansı olarak belirlenmiş ve 1 dakika boyunca ortalama alınan güç değerleri kaydedilmiştir.

**Tablo 4.1:** S parametre - boy cevabına bağlı performans tablosu.

Verici Anten S11	Alıcı Anten S11	Verici Anten Boy	Alıcı Anten Boy	Alıcı Anten Gücü
-19.5 dB	-19.5 dB	94 mm	94 mm	-49.8 dBm
-4.42 dB	-19.5 dB	75 mm	94 mm	-59.5 dBm
-10.59 dB	-19.5 dB	51 mm	94 mm	-51.8 dBm
-10.59 dB	-4.42 dB	51 mm	75 mm	-62.9 dBm
-10.59 dB	-10.5 dB	51 mm	51 mm	-56.2 dBm
-4.8 dB	-10.5 dB	32 mm	51 mm	-65.7 dBm
-4.8 dB	-4.76 dB	32 mm	32 mm	-69.8 dBm



Şekil 4.2: Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi.



Şekil 4.3: Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi (Üretilen anten ölçümü).



**Şekil 4.4:** Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi (2 cm kesilen anten ölçümü).



**Şekil 4.5:** Test ortamı ve ölçümlerin gerçekleştirilmesi (4 cm kesilen anten ölçümü).

Ölçüm sonuçları incelendiğinde anten boyunun rastgele kısaltılması empedans uyumluluğunu bozmaktadır. Bu durumda anten alıcı gücünün düştüğü görülmüştür. Anten empedans uyumunun anten performansında fiziksel boy uzunluğundan daha etkili olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu durumu doğrulamak için çeyrek dalga monopol empedans

uyumluluğu sağlanmış anten ile aynı boyda empedans değeri 50 ohm değerinden daha uzak olan bir ışıyıcı ile aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

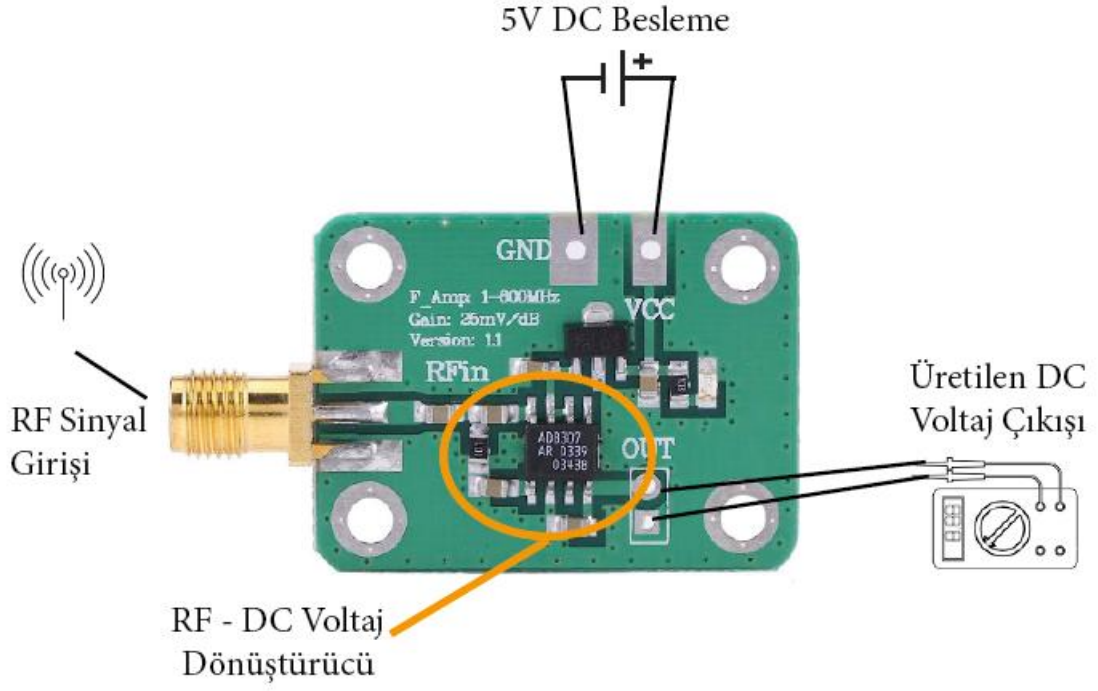
**Tablo 4.2:** S parametre - anten boyu cevabına bağlı performans tablosu 2.

Verici Anten S11	Alıcı Anten S11	Verici Anten Boy	Alıcı Anten Boy	Alıcı Anten Gücü
-19.5 dB	-19.5 dB	94 mm	94 mm	-49.8 dBm
-19.5 dB	-14.61 dB	94 mm	32 mm	-55.3 dBm
-19.5 dB	-4.76 dB	94 mm	32 mm	-60.8 dBm

2.4 GHz çeyrek dalga monopol olarak tasarlanmış anten ile kazancı artırılmış anten çifti ölçülmüş ve sonuçları kaydedilmiştir. Daha sonra çeyrek dalga empedans değeri 50 ohm değerinden uzak anten ile yüksek kazançlı anten çifti ölçülmüştür. Aynı boyda sahip antenlerde, empedans uyumluluğu sağlanmış antenin 5.5 dBm daha yüksek anten gücüne sahip olduğu ölçülmüştür.

#### 4.1.1 Anten Empedans Uyumluluğu ile Anten Performansının İlişkisinin Sinyal Dedektörü ile Ölçülmesi

Bu testler kapsamında 1-600 MHz bant genişliğine sahip bir sinyal seviye dedektörü ve ölçülecek anten merkez frekansında sinyal çıkışı verebilen RF sinyal üretici kullanılmıştır. RF sinyal üreticiden, belirlenmiş frekansta çıkış verilir. Sinyal kalitesi ve anten verimliliği ne kadar yüksek ise alınan sinyal gücü o kadar yüksek olmaktadır. Sinyal dedektörü, alıcı görevi üstlenmektedir. Bu anlamda giriş sinyali dedektör üzerinde işlenerek, sinyal seviyesine göre DC çıkış elde edilmektedir. Bu şekilde, ölçüm çıktısı olan DC voltaj değerine göre iletişim kalitesi ve anten etkisi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında VNA olmadan anten performans ilişkisinin anlaşılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda, daha geniş bantlı sinyal dedektörü kullanılarak bir anten çiftinin ölçüm aralığında empedans uyumluluğuda değerlendirilebilmektedir. RF sinyal üreticide belirtilen frekans aralığında tarama yapılarak anten merkez frekansı çıkış voltajı incelenerek bir fikir verebilmektedir.



Şekil 4.6: Sinyal dedektörü tanıtımı.



Şekil 4.7: Sinyal dedektörü ölçüm ortamı.

Verici anten, ahşap bir tripota yerleştirilerek RF sinyal üretici ile irtibatlandırılmıştır. Masa üzerinde bulunan sinyal dedektörüne DC 5V besleme verilerek enerjilendirilmiştir. Alıcı görevi görebilmesi için verici anten ile eş anten irtibatlandırılmıştır. Sinyal giriş kalitesi anlamlandırılabilmesi için DC çıkış portlarına multimedre bağlantısı gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.8:** Sinyal dedektörü ölçümü esnasında ölçüm görselleri.

**Tablo 4.3:** Sinyal dedektörü ile S parametre değerinin anten performansına etkisi.

Verici Anten S11	Alıcı Anten S11	Ölçülen DC Voltaj
-18.4 dB	-18.7 dB	1.21 V
-18.4 dB	-13.2 dB	1.17 V
-18.4 dB	-9.6 dB	1.08 V
-18.4 dB	-8.5 dB	0.94 V
-18.4 dB	-7.6 dB	0.91 V
-18.4 dB	-5.1 dB	0.85 V
-18.4 dB	-3.8 dB	0.76 V
-18.4 dB	-3 dB	0.67 V

Ölçümler esnasında 169 MHz anten kullanılmıştır. Alıcı ile verici anten arasında 2.8 metre mesafe bulunmaktadır. Tablo incelendiğinde yaklaşık aynı S parametre değerine iki anten ölçümlerinde maksimum çıkış voltajı ölçülürken, S parametre değeri bozuldukça sinyal kalitesinin düştüğü ve üretilen DC çıkış voltajının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumdan çıkarımla, sadece DC çıkış incelenerek S parametre değerindeki bozulma hakkında fikir yürütülebilmesine olanak sağlamaktadır.



**Tablo 4.4:** Sinyal dedektörü ile merkez frekansı dışında bir frekanstaki performans değerlendirilmesi.

Verici Anten Merkez Frekansı	Verici Anten 169 MHz S11	Alıcı Anten Merkez Frekansı	Alıcı Anten 169 MHz S11	Ölçülen DC Voltaj
169 MHz	-18.7 dB	169 MHz	-18.4 dB	1.21 V
2.4 GHz	-5 dB	169 MHz	-18.4 dB	0.80 V
5 GHz	-1.2 dB	169 MHz	-18.4 dB	0.23 V
Anten Yok	-	169 MHz	-18.4 dB	0.21 V

Anten merkez frekansının tayini ve antenlerin belirlenmiş frekanstaki cevabını anlamlandırmak için 169 MHz alıcı anten karşısına, verici anten olarak merkez frekansı 2.4 GHz ve 5 GHz olan 2 farklı anten yerleştirilmiş ve alıcı frekansındaki performansı anlamında ilişki kurulması amaçlanmıştır.

RF sinyal üretici üzerinden alıcı anten merkez frekansında 0 dBm güç basılmaktadır. Verici anten merkez frekansı bilinmektedir. Ancak alıcı anten merkez frekansındaki S parametre değeri VNA ile ölçülmeden sinyal dedektörü ile ölçülmüştür. Sinyal dedektörü tarafından ölçülen DC voltaja göre hangi antenin daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. Daha sonra VNA üzerinden S parametre değerlerine bakılarak karşılaştırılmıştır.

#### 4.1.2 Merkez Frekansı Aynı Mekanik Özellikleri ve Elektriksel Özellikleri Farklı

##### Antenlerin Performans Karşılaştırması

Bu çalışma kapsamında; 169 MHz merkez frekansında üretilmiş, 42 cm çeyrek dalga monopollü anten, 15 cm elektriksel küçük anten ve 8 cm elektriksel küçük anten alıcı ve verici olarak kullanılarak alınan güç değeri kaydedilmiştir. Alınan güç değerine bakılarak arasındaki performans farklılıkları konusunda çıkarımda bulunulması hedeflenmiştir.



**Şekil 4.9:** Ölçülen antenler ve test düzeneği.

**Tablo 4.5:** Sinyal dedektörü ile merkez frekansı dışında bir frekanstaki performans değerlendirilmesi.

Verici Anten	Verici Anten 169 MHz S11	Alıcı Anten	Alıcı Anten 169 MHz S11	Alınan Güç Değeri
42 cm	-13.26 dB	8 cm	-24.6 dB	-32.2 dBm
42 cm	-13.26 dB	15 cm	-21.18 dB	-30.4 dBm
15 cm	-21.18 dB	8 cm	-24.6 dB	-29.8 dBm
8 cm	-24.6 dB	8 cm	-24.6 dB	-30.1 dBm
15 cm	-21.18 dB	15 cm	-21.18 dB	-29.6 dBm

Çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Ölçüm esnasında referans alınan mekanik ve elektriksel parametreler göz önünde bulundurulduğunda anten empedansının, alınan güç değerini en çok etkileyen parametre olduğu görülmüştür. Işıyıcı boyunun da önemli bir parametre olduğu ve anten kazanç değeri ilişkisi gözlemlenmiştir.

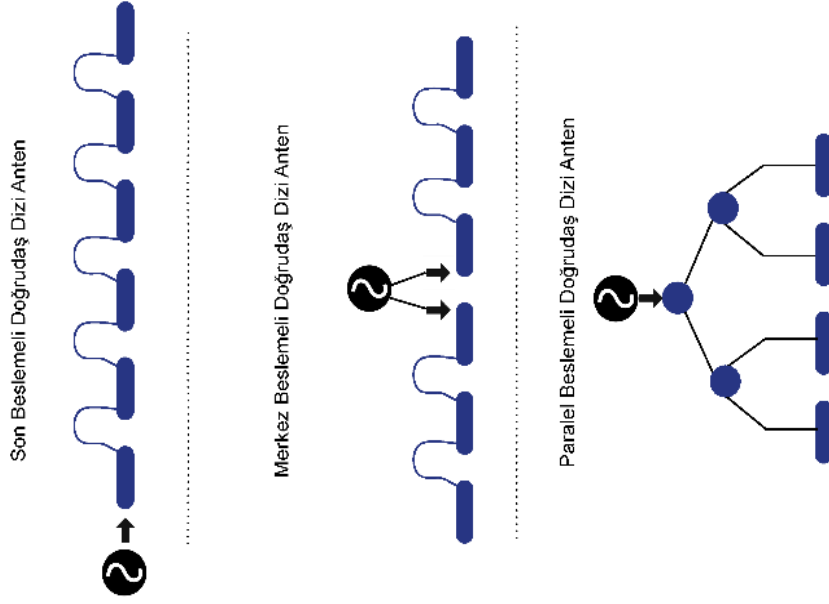
## 5. DOĞRUDAŞ ÇİFT KUTUPLU DİZİ ANTEN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Doğrudaş dizi antenler, empedans uyumluluğunun korunarak, yüksek anten kazancının sağlanmasını mümkün hale getiren bir tasarım tekniğidir. Hem dipoller hem de çeyrek dalga boylu tek kutuplar, dikey olarak yönlendirildiklerinde boş uzayda çok yönlü bir radyasyon modeline sahiptir anten ekseninde sinyal gücü sıfıra düşerek, antene dik tüm azimut yönlerinde eşit radyo gücü yayarlar. Birden fazla anteni dikey bir doğrusal dizilimde istiflemenin amacı, yatay yönlerde yayılan gücü artırmak ve boşa harcanan gökyüzüne veya yeryüzüne doğru yayılan gücü azaltmaktır. Dikey olarak polarize olarak yayılırlar. Teorik olarak, idealleştirilmiş kayıpsız antenleri bu şekilde yerleştirirken, sayılarını iki katına çıkarmak, 3.01 dB'lik bir artışla kazancı iki katına çıkaracaktır. Uygulamada, kusurlu radyasyon yayılımı ve kayıpları nedeniyle gerçekleşen kazanç bunun altında olacaktır [32].

Anten tasarım ve üretiminde belirleyici hususların başında çevresel şartlar ve kullanım alanlarıdır. Maruz kalacağı çevresel şartlara bakılarak farklı materyal ve üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu durum istisnalar dışında tüm antenler için geçerlidir. İncelenen doğrusal çift kutuplu anten modellerinde 3 tip materyal ve üretim tekniği kullanıldığı görülmüştür. Baskı devre üzerinde koaksiyel hat elektriksel modeli ile tasarlanmış dizi anten, farklı iletken ve yalıktan materyallerin işlenmesi ve birleştirilmesi ile oluşturulmuş koaksiyel hat modeli ve doğrudan koaksiyel hatların birbirlerine uygun bir şekilde irtibatlandırıldığı anten modeli olduğu görülmüştür. Elektriksel model olarak aralarında keskin farklar bulunmamaktadır. Empedans uyumluluğu, ışımaya karakteristiği sonuçları benzerdir. Mekanik olarak incelendiğinde fiziksel önemli farklar bulunduğu görülmüştür.

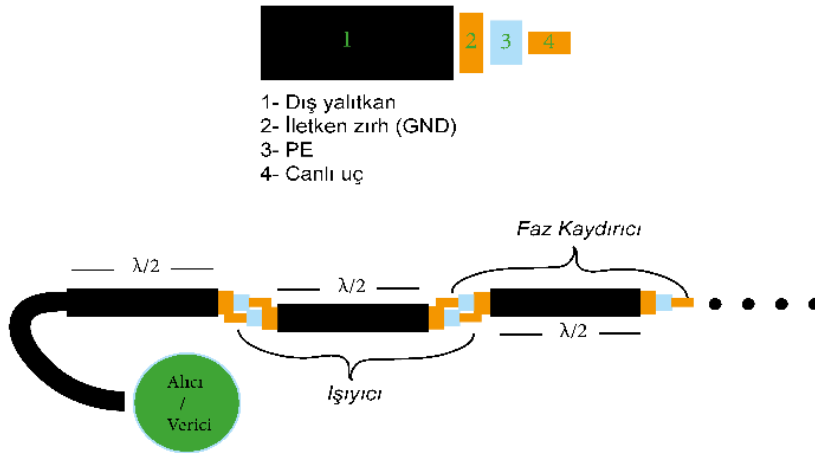
Başlıca fiziksel farklar, ağırlık, montaj tekniği ve uygulama kolaylığı, üretim yöntemleri önemli ölçüde farklıdır. Ağırlığın önemli olduğu mobil platformlarda baskı devre tekniği kullanılmaktadır. Burada mekanik dayanım için ek önlemler alınmaktadır. Baskı devre yapılan PCB tipleri esnek reçine yapılarından imal edilmektedir. Sabit platformlar için üretilen antenlerde ise diğer iki üretim yöntemi görülmektedir. Yaklaşık eşit ağırlığa sahip bu modellerde en temel fark mekanik tasarım, üretim yöntemi ve kullanılan materyallere dayanmaktadır.

Doğrudaş dipol dizisinin çeşitli besleme girişi bağlantı konfigürasyonları verilmektedir.



Şekil 5.1: Doğruduş dizi anten besleme yöntemleri.

Eş eksenli doğruduş antenler aralarında yarım dalga boyu faz farkı bulunan yarım dalga dipol antenlerin aynı doğrultu (doğruduş) üzerinden dizilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu tür antenlerde hem faz kaydırıcı hem de yarım dalga dipol ışınıcı eş eksenli iletim hatları ile gerçekleştirilmektedir. Yarım dalga boyu kadar olan kısımlar hem ışınıcı hem faz kaydırıcı olarak davranmaktadır. Koaksiyel hattın zırh kısmı kullanarak yarım dalga sadece faz kaydırıcı görevi üstlenmektedir. Bu sayede 180 derece ışınan kısımların fazları birbirleri üzerine binerek anten kazancını ve yönlülüğünü arttırmaktadır. Koaksiyel iletim hattı ile oluşturulan son beslemeli doğruduş dizi antenin genel tasarımı, bir ışınıcı bir faz kaydırıcı (ışınması koaksiyel hat üzerinde zırh ile engellendiği için) şeklinde oluşturulmaktadır.



Şekil 5.2: Doğruduş dizi anten genel tasarımı.

### 5.1.1 Son Beslemeli Doğruduş Çift Kutuplu Dizi Anten Hesabı

Yarım dalga boyu elektriksel uzunluğa sahip ışıyıcı ve faz kaydırıcı eş eksenli iletim hattının fiziksel uzunluğu ( $l$ ) aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.1)$$

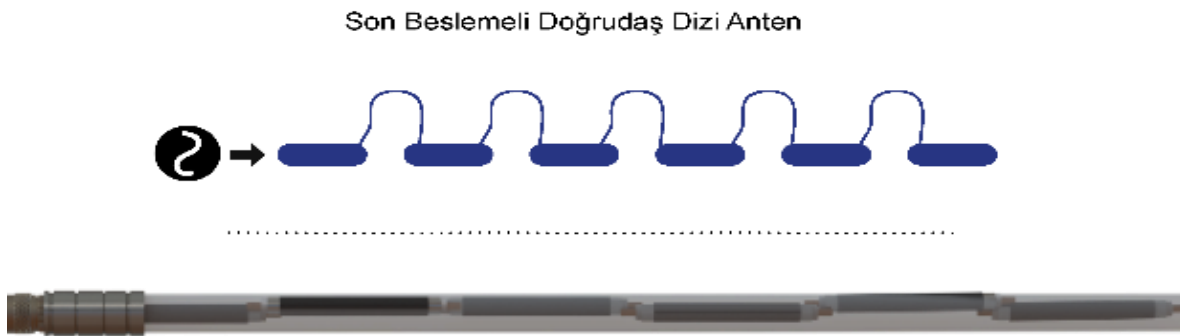
Bu tasarımda kullanılacak olan koaksiyel kablo RG213 olup içerisinde kullanılmış olan dielektrik malzeme PE (polietilen)'dir. PE bağıl dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) tasarlanan doğruduş dizi antende 2.3 kabul edilmektedir.

Tek bir dipol elemanın anten kazancı ( $G_{dipol}$ ) yaklaşık 2 dBi'dır . Bir doğruduş dipol dizi antenin toplam kazancı ışıyıcı eleman sayısı ( $N$ ) ile doğru orantılı olup aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$G_{dizi} = N \cdot G_{dipol} \quad (4.2)$$

Her bir ışıyıcı öncesinde bir yarım dalga faz kaydırıcısı ile birlikte kullanıldığı için doğruduş dizi antendeki toplam yarım dalga eş eksenli iletim hattı  $2N$  kadardır.

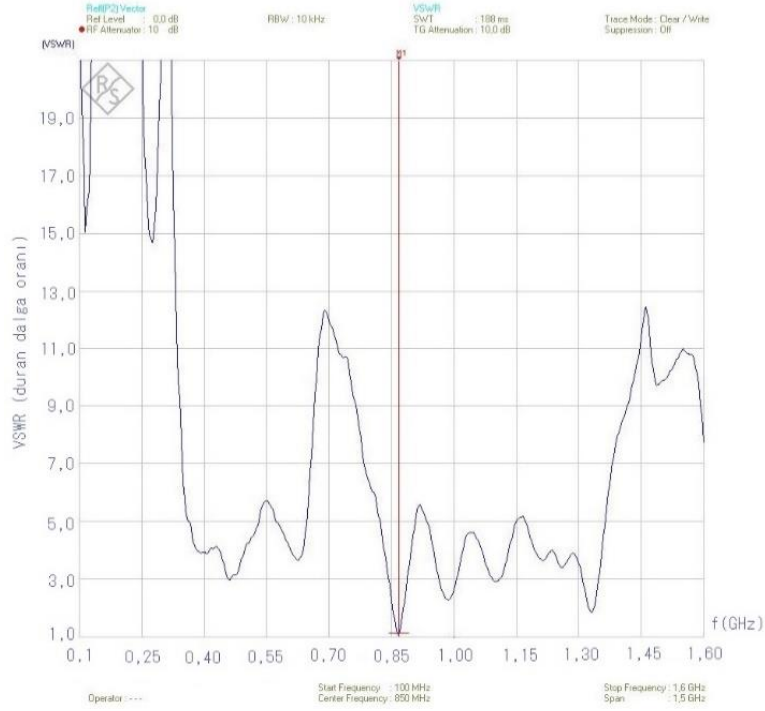
868 MHz dizi antenin 6 dBi için kazanç değerinde doğruduş dipol dizisi tasarımı RG213 eş eksenli iletim hattı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu iletim hattı için dielektrik sabiti 2.3 olup yarım dalga boyu yaklaşık 114 mm'ye denk gelmektedir. Diğer bir ifade ile, doğruduş dizideki her bir ışıyıcı dipol ve faz kaydırıcının boyu yaklaşık 114 mm'dir. 114 mm uzunluktaki altı adet eş eksenli hattın biri diğerinin ters kutbuna bağlanacak şekilde montajlanarak üretim yapılmıştır. Şekilde belirtilen altı hattın üçü ışıyıcı, ikisi faz kaydırıcı ve en sonda konnektöre bağlanan biri de bağlantı hattıdır.



Şekil 5.3: Koaksiyel hat ile oluşturulmuş doğruduş dizi anten mekanik tasarım modeli.

### 5.1.2 Doğruduş Çift Kutuplu Dizi Anten Ölçüm Sonuçları

Üretilen doğruduş dizi antenin empedans cevabı bir el tipi vektör network analizör ile ölçülmüştür. Şekilde 100 MHz - 1.6 GHz arası ölçülen giriş duran dalga oranı (VSWR) grafiği verilmektedir. 868 MHz’de ölçülen dip VSWR değeri 1.128 olup, 1.5’in altında kalan bant genişliği ise 24 MHz’dir.



Şekil 5.4: Üretilen doğruduş dizi anten ölçüm sonucu (VSWR).

100 MHz - 1.6 GHz arası ölçülen giriş geri dönüş kaybı (return loss) grafiği verilmektedir. 868 MHz’de ölçülen dip geri dönüş kaybı değeri – 24 dB olarak ölçülmüştür. -10 dB altında kalan bant genişliği ise 24 MHz’dir.



**Şekil 5.5:** Üretilen doğrudan dizi anten ölçüm sonucu (S11).

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması boyunca anten minyatürleştirme teknikleri üzerine odaklanılmıştır. Birçok farklı minyatürizasyon tekniği incelenmiş bunlar içerisinde tel antenler konusunda uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Anten minyatürleştirme teknikleri uygulanırken ortaya çıkan mekanik ve elektriksel parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir.

Yapılan ilk çalışmada VHF bandında bir anten çeyrek dalga boyuna oranla %55 boyu küçültülmüş ve empedans uyumu artırılmıştır. Bu kısımda en belirleyici olan ve elektriksel sonuçlarda başarımları kazandıran husus, farklı mekanik parametreleride tasarıma dahil ederek daha hassas çalışmalar yapılabilmesidir. Çeyrek dalga monopol yapısı için ışıyıcı boyu, ışıyıcı kalınlığı ve süreksizlik gibi mekanik parametrelerden ibaret olurken elektriksel küçük tel anten üretiminde kullanılan helikal yapı içerisinde; spin sayısı, spin çapı, spinler arasındaki boşluk, değişken sarım teknikleri gibi parametreler de tasarıma dahil edilmiştir. Bu sayede merkez frekansın empedans uyumluluğu, daha etkin bir şekilde sağlanabilmiştir. Bu kısımda uygulanan minyatürizasyon tekniğinin nasıl fayda sağlayacağını anlamak tasarım süreçlerindeki en gerekli konudur. Minyatürizasyon teknikleri içerisinde helikal anten tasarım tekniği kullanılırken, aslında sarılan yayın endüktif etkisi, yay turları arasındaki boşluğun kapasitif etkileri ve ışıyıcı telin açılmış haldeki boyu bu tasarımdaki en etkili parametreler olduğu ve bu parametreler ışığında tasarım süreçlerinin yürütüldüğü anlaşılmalıdır. Bir başka minyatürizasyon tekniğinde de tekniğin getirdiği parametreleri yorumlamak gereklidir.

Helikal yapılar sadece minyatürleştirme amacıyla kullanılmadığı, aynı zamanda yüksek kazançlı tel anten üretimi içinde kullanıldığı görülmüştür. Çeşitli kombinasyonlar ile bir tel parçasının, istenilen frekans değerine uyumlanması amacıyla kullanılabilir. Bu çalışma yapılırken dikkat edilmesi gereken parametre, tasarlandığı ve empedans uyumluluğunun sağlandığı frekansta anten kazanç değeri, ışıma modelidir. Anten empedans uyumluluğu tek başına tasarımın başarılı olduğu anlamına gelmemektedir. Antenin kullanılacağı saha ortamının ve uygulamanın teknik isteklerine uyumlu ışıma karakteristiğine sahip bir anten tasarımı gerekmektedir. Empedans uyumluluğu ve ışıma karakteristiği incelenerek antenin uygun olduğu doğrulanabilmektedir.

Çalışmalar esnasında, tasarlanan antenlerin prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu antenler profesyonel şekilde hazırlanması ve endüstride kullanılacak seviyede olması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda tasarlanan antenlerin bir radom içerisine konulurken



merkez frekansının kaydığı ve elektriksel değerlerinin bozulduğu görülmüstür. Bu konu üzerine yoğunlaşıldığında, farklı materyal ve mekanik özelliklere sahip radom ile gerçekleştirilen ölçümlerin anten ölçüm sonuçlarının birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Bir anten tasarımı yapılırken, kullanılması gereken radom materyali ve geometrisi saha uygulamasına göre seçilmeli ve tasarım parametreleri içerisinde yer almalıdır.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] Graf, Rudolf F., (Ed.). "Antenna". *Modern Dictionary of Electronics*. Newnes.pp. 29. 1999
- [2] CHENG, David Keun, et al. *Fundamentals of engineering electromagnetics*. 1993.
- [3] Hertz, H., "[no title cited]". *Annalen der Physik und Chemie*. 36. 1889.
- [4] MARCONI, Guglielmo. Wireless telegraphic communication. *Nobel Lecture*, 1909, 11: 198-222.
- [5] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, pp. 4. 2016.
- [6] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, pp. 5. 2016.
- [7] Soylu, Y., Yorulmaz, B., Soylu, A., & Sis, S. A. "868 MHz LORAWAN Uygulamaları İçin Doğrudan Dipol Dizi Anten Tasarımı" ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, s.119, Bursa, 24-26 Kasım 2022.
- [8] G. MARCONI. "TRANSMITTING ELECTRICAL SIGNALS." No. 586,193. Patented July 13, 1897.
- [9] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, pp. 4-5. 2016.
- [10] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, pp. 6-7. 2016.
- [11] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, pp. 6. 2016.
- [12] Brinks, Elias (11 July 2016). "China Opens the Aperture to the Cosmos". *The Conversation*. U.S. News & World Report. Archived from the original on 26 August 2016. Retrieved 12 August 2016.
- [13] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, pp.7. 2016.
- [14] Hamish Meikle: "*Modern Radar Systems*" Artech House on Demand, pp. 108, 2008.
- [15] Stutzman, Warren L.; Thiele, Gary A. *Antenna Theory and Design*. John Wiley and Sons. pp. 74–75. 2012.

- [16] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, pp. 64-65. 2016.
- [17] V. I. Slyusar, "60 years of electrically small antennas theory," *2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Sevastopol, Ukraine, 2007, pp. 116-118, doi: 10.1109/ICATT.2007.4425129.
- [18] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, pp. 65-69. 2016.
- [19] O. Siddiqui, M. Mojahedi, S. Erickson and G. V. Eleftheriades, "Periodically loaded transmission line with effective negative refractive index and negative group velocity," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)*, Columbus, OH, USA, 2003, pp. 717-720 vol.1, doi: 10.1109/APS.2003.1217561.
- [20] F. Bilotti, A. Toscano and L. Vegni, "Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, pp. 2258-2267, Aug. 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.901950.
- [21] A. Levi, "How Metamaterials are Transforming Telecommunications," *Metamaterials-The Final Chapter*, Jul, 2021. [Online serial]. Available: <https://medium.com/prime-movers-lab/metamaterials-the-final-chapter-23249b756844>. [Accessed June 2, 2023].
- [22] Demaine, E.D., O'Rourke J. *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*. Cambridge University Press: New York, 2007.
- [23] Felton S., Tolley M., Demaine E., Rus D., Wood R. A method for building self-folding machines. *Science*, 345(6197), 644-646. doi: 10.1126/science.1252610, 2014.
- [24] Georgakopoulos, S. V., Zekios, C. L., Sattar-Kaddour, A., Hamza, M., Biswas, A., Clark, B., ... & Lang, R. J. (2021). Origami antennas. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2, 1020-1043.
- [25] Davor Bonefačič, Juraj Bartolič. *Small Antennas: Miniaturization Techniques and Applications*. pp. 20–30 AUTOMATIKA 2012
- [26] VALERIO, Guido; QUEVEDO-TERUEL, Oscar (ed.). *Higher Symmetries and Its Application in Microwave Technology, Antennas and Metamaterials*. MDPI, 2019.
- [27] Barnsley F. M., *Fractals Everywhere*, Academic Press Inc., Massachusetts, 1993.
- [28] Puente-Baliarda C., Romeu J., Pous R., Cardama A., *On the Behavior of the Sierpinski*

Multiband Fractal Antennas, IEEE Transactions On Antennas And Propagation, Vol. 46, no. 4, s. 517-524, April 1998.

- [29] Özbakış, Başak, “Fibonacci Fractal Tree Antennas”, Master of Science, Electronics and Communication, İzmir Institute of Technology, İzmir, July 20004.
- [30] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design. John wiley & sons*, pp. 550-551. 2016.
- [31] Balanis, Constantine A. *Antenna theory: analysis and design. John wiley & sons*, pp. 552-553. 2016.
- [32] National communications system (us). technology & standards division; united states. General services administration information technology section. *Telecommunications: Glossary of Telecommunications Terms*. Government Inst, 1997.

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Yusuf SOYLU  
Doğum tarihi ve yeri : 02.03.1995 İstanbul  
E-posta : yusufsoylu@outlook.com

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Elektrik – Elektronik Mühendisliği	2018
Lise	Bağcılar İbni Sina Anadolu Lisesi	2013

## Yayın Listesi

868 MHz LORAWAN Uygulamaları İçin Doğrudan Dipol Dizi Anten Tasarımı Yusuf Soylu<sup>1</sup>, Berk Yorulmaz<sup>1,2</sup>, Ayşenur Soylu<sup>2</sup>, Seyit Ahmet Sis<sup>1,2</sup> 1Balıkesir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü 2Kuvayi Technologies Savunma ve Haberleşme Teknoloji. San. ve Tic. A.Ş. ISBN: 978-605-01-1437-9 ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, s.119, Bursa, 24-26 Kasım 2022. [**Tezden türetilmiştir.**]