RF ENERJİ HASATLAMA DEVRELERİ İÇİN 915 MHz TAŞIYICI FREKANSINDA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

HUSSEIN YOUSEFALTURK

ARALIK 2022
DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RF ENERJİ HASATLAMA DEVRELERİ İÇİN 915 MHz TAŞIYICI FREKANSINDA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

HUSSEIN YOUSEFALTURK

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

ARALIK 2022
DİYARBAKIR

RF ENERJİ HASATLAMA DEVRELERİ İÇİN 915 MHz TAŞIYICI FREKANSINDA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Hussein YOUSEFALTURK tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Dr. Öğr.Üyesi Mustafa CANSIZ _____
Danışman, **Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi**

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. … … **(*)** _____
Kimya Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. … … **(**)** _____
Mimarlık Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. … … _____
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. … … _____
Mimarlık Bölümü, Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi … … _____
Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: … / … / …..

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Hussein YOUSEFALTURK

İmza: …….……

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tez çalışmasının her aşamasında yardımlarını, bilimsel değerli katkılarını ve her anlamda uzmanlığını esirgemeyen kıymetli danışmanım Dr. Öğr.Üyesi Mustafa CANSIZ'a çok teşekkür ederim.

Her türlü yardımını ve teknik desteğini laboratuvarda esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Hüseyin ÖZMEN'e teşekkürlerimi sunarım.

En önemlisi, manevi desteklerini hiç eksik etmeyen başta annem ve babam olmak üzere aileme, değerli arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olan eşim Marwa YOUSEFALTURK'e sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
1. GİRİŞ 1
1.1 Genel Bilgiler 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Tezin Yapısı 3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 5
3. MİKROŞERİT ANTENLER 13
3.1 Anten 13
3.1.1 Tel antenler 13
3.1.2 Açıklık antenler 14
3.1.3 Reflektörlü antenler 15
3.1.4 Lens antenler 15
3.1.5 Dizi antenler 16
3.2 Mikroşerit Antenlerin Temel Yapısı 17
3.3 Mikroşerit Anten Parametreleri 18
3.3.1 Geri dönüş kaybı 19
3.3.2 Bant genişliği 20
3.3.3 Giriş empedans uuygunluğu 21
3.3.4 Işıma örüntüsü 22
3.3.5 Gerilim duran dalga oranı 24

3.3.6 Yönlülük 25
3.3.7 Kazanç 25
3.3.8 Verimlilik 26
3.3.9 Polarizasyon 26
3.3.9.1 Lineer polarizasyon 27
3.3.9.2 Dairesel polarizasyon 27
3.3.9.3 Eliptik polarizasyon 27
3.4 Mikroşerit Antenlerin Besleme Teknikleri 28
3.4.1 Mikroşerit hat besleme 28
3.4.1.1 Çeyrek dalga dönüşümlü besleme 29
3.4.1.2 İçe girintili besleme 30
3.4.2 Koaksiyel besleme 30
3.4.3 Açıklık kuplaj besleme 31
3.4.4 Yakınlık kuplaj besleme 31
3.5 Mikroşerit Antenlerin Analiz Modelleri 33
3.5.1 İletim hattı modeli 33
3.5.1.1 Yamanın genişliği ve uzunluğu 35
3.6 Mikroşerit Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları 36
3.7 Mikroşerit Antenlerin Kullanım Alanları 37
4. MATERYAL VE METOT 38
4.1 Materyaller 38
4.1.1 FR4 epoksi levha 38
4.1.2 SMA konnektör 39
4.2 Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS) 39
4.2.1 HFSS arayüzü 41
4.3 Vektör Network Analizör (VNA) Cihazı 43
4.4 Dikdörtgen Mikroşerit Antenin Tasarım Parametreleri 44

4.4.1 Çalışma frekansı 44
4.4.2 Dielektrik sabiti 44
4.4.3 Dielektrik kalınlığı (h) 44
4.4.4 Anten yamasının boyutları 44
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 47
5.1 Dikdörtgen Mikroşerit Antenin Simülasyonu 48
5.1.1 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımı 48
5.1.2 Dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarımı 51
5.1.3 Önerilen dikdörtgen mikroşerit anteninin özellikleri 52
5.2 Anten ölçümlerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması 57
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 61
KAYNAKLAR 62
ÖZGEÇMİŞ 68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 RF enerji hasatlama sisteminin blok diyagramı 1
Şekil 3.1 Tel antenler konfigürasyonu 14
Şekil 3.2 Açıklıklı antenlerin konfigürasyonları 14
Şekil 3.3 Tipik reflektör konfigürasyonları 15
Şekil 3.4 Tipik lens anten konfigürasyonları 15
Şekil 3.5 Tipik tel, açıklık ve mikroşerit dizi konfigürasyonları 16
Şekil 3.6 Mikroşerit antenin yapısı 17
Şekil 3.7 Mikroşerit antenlerin çeşitli yamaları 18
Şekil 3.8 Dikdörtgen ve dairesel mikroşerit antenler 18
Şekil 3.9 İletim hattı modeli için eşdeğer devresi 22
Şekil 3.10 Üç boyutlu koordinatlarda ışıma örüntüsü 23
Şekil 3.11 Genel yönlü bir antenin ışıma örüntüsü 23
Şekil 3.12 Anten polarizasyon türleri 27
Şekil 3.13 Mikroşerit hat besleme 28
Şekil 3.14 Mikroşerit hat besleme teknikleri 29
Şekil 3.15 Koaksiyel beslemeli mikroşerit anten yapısı 30
Şekil 3.16 Açıklık kuplaj beslemeli mikroşerit anten 31
Şekil 3.17 Yakınlık kuplaj beslemeli mikroşerit anten 32
Şekil 3.18 Mikroşerit hat kesiti 33
Şekil 3.19 Mikroşerit antenin üstten ve yandan görünümü 34
Şekil 3.20 Bir iletim hattındaki elektrik alan çizgileri 35
Şekil 4.1 Çift taraflı FR4 epoksi levha 38
Şekil 4.2 SMA dişi konnektör 39
Şekil 4.3 ANSYS HFSS kullanıcı arayüzü 41
Şekil 4.4 HFSS 3D modelleme penceresi 42
Şekil 4.5 Proje yöneticisi penceresi 43
Şekil 4.6 Anritsu MS2028C VNA cihazı 43
Şekil 5.1 Anten tasarım aşamalarının akış şeması 47
Şekil 5.2 Mikroşerit antenin ilk tasarımları 48
Şekil 5.3 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının geri dönüş kaybı 49
Şekil 5.4 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının empedans grafiği 50

Şekil 5.5 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının VSWR grafiği 50
Şekil 5.6 Mikroşerit antenin son tasarımları 51
Şekil 5.7 Önerilen mikroşerit antenin geri dönüş kaybı 52
Şekil 5.8 Önerilen mikroşerit antenin empedans grafiği 53
Şekil 5.9 Önerilen mikroşerit antenin VSWR grafiği 53
Şekil 5.10 Önerilen mikroşerit antenin son tasarımının üç boyutlu kazanç ve yönlülük grafiği 54
Şekil 5.11 Önerilen mikroşerit antenin son tasarımının kazanç ve yönlülük eğrisi ... 54
Şekil 5.12 Önerilen antenin 2D ışıma örüntüsü 55
Şekil 5.13 Önerilen antenin 2D (E ve H düzleminde) ışıma örüntüsü 55
Şekil 5.14 3D ışıma örüntüsü 56
Şekil 5.15 Önerilen antenin simülasyon yüzey akım dağılımı 56
Şekil 5.16 5.16 Üretilen mikroşerit antenin görünümleri 57
Şekil 5.17 Anritsu MS2028C VNA cihazı 58
Şekil 5.18 Antenin simülasyon ve ölçüm S11 grafiği 58
Şekil 5.19 Antenin simülasyon ve ölçüm empedans grafiği 59
Şekil 5.20 Antenin simülasyon ve ölçüm VSWR grafiği 59

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Mikroşerit antenlerin farklı besleme şekillerinin karşılaştırması 32
Tablo 4.1 Alt tabaka malzeme özellikleri 39
Tablo 5.1 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarım parametreleri..... 48
Tablo 5.2 Dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarım parametreleri 51
Tablo 5.3 Antenin ilk tasarımı ile son tasarımın parametrelerinin karşılaştırılması .. 57
Tablo 5.4 Antenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması 60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
ε_r	Dielektrik Geçirgenliği
ε_{eff}	Yalıtkan Malzemenin Efektif Dielektrik Geçirgenliği
f_r	Çalışma Frekansı
Tanδ	Kayıp Tanjantı
η	Verim
λ_0	Boşluğun Dalga Boyu
Ω	Direnç
h	Yalıtkan Malzemenin Kalınlığı
Γ	Yansıma Katsayısı
E	Elektrik Alan Şiddeti
H	Manyetik Alan Şiddeti
dB	Desibel

Kısaltma	Açıklama
RF	Radyo Frekans
EM	Elektromanyetik
DC	Direct current (Doğru Akım)
HFSS	High Frequency Structural Simulator
VNA	Vektör Network Analizör
BW	Band Width
RL	Return Loss
CST	Computer Simulation Technology
GSM	Global System for Mobile Communications

ÖZET

RF ENERJİ HASATLAMA DEVRELERİ İÇİN 915 MHz TAŞIYICI FREKANSINDA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Yousefalturk, Hussein
Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendislik Bölümü
Danışman: Dr. Öğr.Üyesi Mustafa CANSIZ
Aralık 2022, 83 sayfa

RF enerji hasatlama sistemleri günümüzde alternatif bir enerji kaynağı olarak adlandırılmakta ve ortamda bulunan mevcut elektromanyetik enerjinin kullanılmasını hedeflemektedir. RF enerji hasatlama sistemleri, düşük güç tüketimine sahip cihazlar için etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu enerji hasatlama sistemlerinin amaçlarından biri, düşük güç tüketimine sahip haberleşme sistemleri (ZigBee teknolojileri ve kablosuz sensör ağları) ile birlikte kullanılıp batarya ömrünü uzatmaktır. RF enerji hasatlama sistemi; anten, empedans uyumlandırma, RF doğrultucu devresi, DC filtre devresi ve yükten oluşur. RF enerji hasatlama devresinde kullanılan anten ortamdaki elektrik alan şiddetini gerilim farkına dönüştüren bir elemandır. Doğrultucu bölümü antenden gelen RF sinyali doğrultur ve kondansatör ile regüle eder. Böylece RF sinyalini DC sinyale dönüştürmüş olur. Genellikle RF enerji hasatlama devresinin doğrultucu çıkışındaki DC gerilim seviyesi düşük değerli olmaktadır. Hasatlama devresinin gerilim katlayıcı bölümü bu düşük DC gerilim seviyesini daha yüksek değerli DC gerilim seviyesine çıkarmakta kullanılır. Bu tez çalışmasında; 915 MHz taşıyıcı frekansında ve 200 MHz band genişliğinde elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile çözen program olan ANSYS HFSS yardımıyla bir mikroşerit anten modeli tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan mikroşerit antenin boyutları değiştirilerek en iyi sonuçlar elde edildikten sonra başarılı olarak tasarlanan mikroşerit anten imal edilmiştir. Son adımda vektör network analizör cihazı ile ölçümleri alınarak çıkış karakteristikleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, tasarlamış olduğumuz mikroşerit anten başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mikroşerit antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikroşerit anten, Enerji hasatlama, RF sinyali, Elektromanyetik alan, HFSS, Kazanç

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MICROSTRIP ANTENNA AT 915 MHz CARRIER FREQUENCY FOR RF ENERGY HARVESTING CIRCUITS

Yousefalturk, Hussein
Master of Science in Department of Electrical and Electronics Engineering
Supervisor: Assistant Professor Mustafa CANSIZ
December 2022, 83 pages

Nowadays, the RF energy harvesting systems can be named as one of the novel alternative energy source which aims to use the electromagnetic energy in the ambient environment. RF energy harvesting systems are seen as an effective solution method for low power consumption circuits. These energy harvesting systems can be used with low power consumption communication system (ZigBee and wireless sensors) to extend the battery life. RF energy harvesting system consists of an antenna, impedance matching, RF rectifier circuit, DC filter circuit and load. The antenna used in the RF energy harvesting circuit is a component that converts the electrical field strength in the ambient environment into a voltage difference. The rectifier section rectifies the RF signals obtaining from the antenna and regulates them with a capacitor. Thus, it converts the RF signal to DC signal. Generally, the DC voltage level at the rectifier output of the RF energy harvesting circuit is low. For that reason, the voltage multiplier part of the harvesting circuit is used to increase this low DC voltage level to a higher DC voltage level. In this thesis study; a patch antenna model is designed with the help of ANSYS HFSS, a program that solves electromagnetic structures with the finite element method at 915 MHz carrier frequency and 200 MHz bandwidth. Then, after the best results were obtained by changing the dimensions of the designed microstrip antenna, the successfully designed patch antenna was manufactured. In the last step, the output characteristics were evaluated by taking measurements with a vector network analyzer device. As a result, the microstrip antenna we designed has been successfully fabricated. Furthermore, it has been determined that the simulation and measurement results are compatible.

Keywords: Microstrip antenna, Energy harvesting, RF signal, Electromagnetic field, HFSS, Gain

1. GİRİŞ

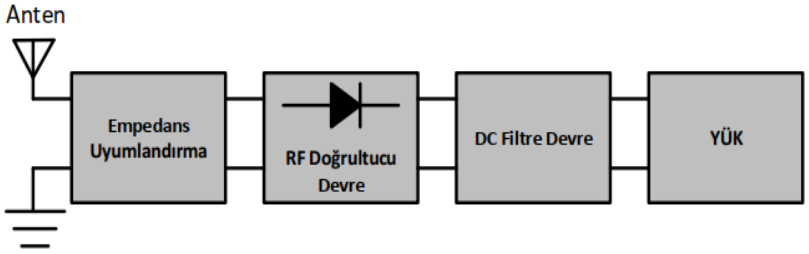
1.1 Genel Bilgiler

Son zamanlarda cep telefonları veya sensör ağları gibi birçok uygulamada kablosuz cihazların kullanımı artmıştır. Kablosuz uygulamalardaki bu artış, pil kullanımının artmasına neden olmuş. Birçok araştırma ekibi, cihaz tüketimini azaltarak pil özerkliği üzerinde çalışıyor. Diğer ekipler, ortam enerjisini geri dönüştürmeyi seçmiştir. Bu nedenle, bu alanda kullanılabilecek en önemli yöntemlerden biri RF enerji hasatlamaktır [1, 2].

Enerji hasat eden, çevremizdeki mevcut ortam kaynaklarından yakıt alır ve bu nedenle kullanıcı için ücretsizdir. Enerji hasatlamak için düşünülen ve kullanılan ortam kaynakları türleri rüzgar, güneş, titreşim, elektromanyetik, sıcaklık gradyanı, termoelektrik, Radyo Frekansı (RF) vb. [3, 4].

Çeşitli RF enerji kaynakları; WiFi, WLAN, Dijital TV, AM, FM, Bluetooth vb.'dir. Her yerde bulunması nedeniyle, kablosuz sensör düğümlerine, ve kablosuz şarj sistemlerine güç sağlamak için kullanılabilir. Son yıllarda RF enerji hasatlama teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir [5, 6]. Bu gelişmeler sayesinde, RF enerji hasadı kablosuz sensör ağları ve nesnelerin interneti gibi birçok uygulama için uygun bir kablosuz güç kaynağı haline gelmiştir.

Çevrede mevcut olan RF enerjiyi hasatlamaya yönelik araştırma çalışmaları 1990'ların sonlarından beri hız kazanmıştır. Bu ivmenin arkasındaki ana neden, RF vericilerinin büyümesi ve düşük güç elektroniğinin yaygınlaşmasıdır [7, 8]. Şekil 1.1 RF enerji hasatlama devrelerinin bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 1.1 RF enerji hasatlama sisteminin blok diyagramı [9]

Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, bir RF enerji hasatlama devresi genellikle bir anten, bir empedans eşleştirme devresi, bir doğrultucu, bir voltaj çarpanı ve bir enerji depolama aygıtı veya yükünden oluşur. Anten, tüm sistem ona bağlı olduğu için sistemin kalbi olarak kabul edilir.

Bir RF enerji hasatlama sisteminde, ilk olarak, kablosuz iletim ortamında yayılan iletilen RF sinyali, uzak alan bölgesinde tek bir anten veya birden fazla anten tarafından yakalanır. Maksimum güç aktarımını sağlamak için empedans eşleştirme devresi kullanılır. Ardından doğrultucu, RF gücünü doğru akıma (DC) dönüştürür. Doğrultucu çıkış voltajı, kablosuz bir cihazı sürmek için genellikle çok düşüktür. Bu nedenle, DC voltaj seviyesini artırmak için bir voltaj çarpanı kullanılır. Son olarak, hasat edilen enerji, şarj edilebilir pil ve süper kapasitör gibi bir enerji depolama cihazında depolanabilir veya doğrudan yüke bağlanabilir.

RF enerji hasatlama sistemlerinin genel güç dönüşüm verimliliğini etkileyen faktörlerden bazıları aşağıdaki gibidir [10, 11]:

- Her bileşenle ilişkili kayıplar.
- İlişkili devrelerin sınırlı hassasiyeti.
- Maksimum yayılan güçte kısıtlama.
- Verici ve alıcı arasındaki mesafe.
- Frekans bandı ve çalışma gerilimi.
- Anten kazancı ve anten sayısı.
- Anten çıkış empedansındaki değişiklikler nedeniyle uyumsuzluk kayıplarına neden olan güç ve frekans.

Son birkaç yılda, RF enerji hasatlama sistemlerinde kullanılması önerilen amaçları karşılamak için antenler üzerinde çeşitli tiplerin tasarımı konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Mikroşerit yama antenlerin bu sistemde yaygın olarak kullanılmasının nedeni, düşük profilli, hafif ve düzlemsel yapısından kaynaklanmaktadır. Bu tez çalışmasında, RF enerji hasatlama devrelerinin en önemli bileşeni olan mikroşerit anten tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasındaki amacımız aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- 915 MHz taşıyıcı frekansında ve 200 MHz band genişliğinde HFSS programı yardımıyla bir mikroşerit anten tasarlamak,

- Tasarlanan mikroşerit antenin boyutlarını değiştirerek en iyi performansı elde etmek,

- Başarılı bir şekilde tasarlanan mikroşerit anteni pratik olarak üretilmek,

- İmal edilen mikroşerit antenin vektör network analizör cihazıyla ölçümleri alınarak çıkış karakteristiklerini değerlendirmek ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırmak.

1.3 Tezin Yapısı

Bu tez; Giriş, Önceki Çalışmalar, Mikroşerit Antenler, Materyal ve Metot, Bulgular ve Tartışma, Sonuç ve Öneriler, Kaynaklar olmak üzere yedi bölümden oluşmaktadır.

- Giriş olarak sunulan birinci bölümde; RF enerji hasatlama hakkında genel bilgiler, tezin amacının ve yapısının konusunda kısaca bilgiler verilmiştir.

- Önceki çalışmalar şeklinde sunulan ikinci bölümde; mikroşerit antenler ile ilgili literatür çalışması yer almaktadır.

- Mikroşerit antenler başlığıyla sunulan üçüncü bölümde; ilk olarak mikroşerit antenler hakkında genel bilgi verilmiştir, daha sonra mikroşerit antenin yapısı fiziksel ve elektriksel olarak incelenmiştir.

- Materyal ve metot dördüncü bölümde; kullanılan materyaller ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Örneğin, vektör network analizör cihazı detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Ayrıca, HFSS programı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

- Bulgular ve tartışma olarak isimlendirilen beşinci bölümde; HFSS üzerinde tasarlan mikroşerit antene ait simülasyon sonuçları ile vektör network analizör cihazı ile ölçülen mikroşerit antenin çıkış karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

- Çalışmanın sonuçları ve önerileri altıncı bölümde sunulmuş olup, bu çalışmadan elde edilen sonuçlara ve gelecekte bu konuda yapılabilecek çalışmalara da değinilmiştir.

- Son olarak kaynaklar olarak adlandırılan yedinci bölümde; tez içinde referans verilen kaynaklar sıralanmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

RF enerji hasatlama sistemin ilk bileşeni olan anten ile ilgili RF enerji hasadının performansını karşılaştıran birçok çalışma bulunmaktadır. Verimli bir RF enerji hasatlama sistemi sağlamak için son yıllarda çeşitli tipte antenler tasarlanmıştır. Bir antenin tasarımı, genellikle empedans uyumu, polarizasyon ve ayrıca daha yüksek dereceli harmonik bastırma ihtiyacı nedeniyle zorlanır. Yalıtkan malzeme kalınlığı ve geçirgenliğindeki değişimin bir mikroşerit yama anteni üzerindeki etkisi araştırma yapılmıştır [12].

Daha önceki RF enerji hasatlama derelerinde yapılan çalışmalarda en sık kullanılan anten mikroşerit antendir. Bu bölümde farklı iletişim uygulamaları için uygun merkez frekansında farklı besleme teknikleri, alt tabaka malzemeleri, giriş ve çıkış parametreleri içeren mikroşerit anten tasarımı ile ilgili sunulmuş çalışmalar incelenmiştir.

İlk mikroşerit anten fikri 1953 yılında Deschamps tarafından önerilmiştir [13]. O zamandan beri nerdeyse 20 yıl boyunca pratik mikroşerit anten üretilmemiştir. 1970'lerde Munson ve Howell tarafından ilk pratik mikroşerit antenler yapılmıştır [14, 15]. Mikroşerit antenlerin bazı dezavantajlarını ortadan kaldırmak için Sullwan & Schauber bazı uygulamalar için sınırlı bant genişliğini artırmaya çalışmışlar ve mikroşerit antenlere açıklık kuplajlı besleme tekniği uygulamışlardır [16]. Buna ek olarak, mikroşerit antenlerin geliştirilmesine ilişkin birçok araştırma yayınlanmıştır [17, 18]. Mikroşerit antenleri analiz etmek için çeşitli modeller bulunmaktadır [19]. Literatüre bakıldığında, 21. yüzyılın başlangıcı ile bu tez kapsamındaki birçok çalışma yayınlanmıştır ve literatür özeti aşağıda verilmiştir.

2001 yılında R. Garg ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, geometrik yapılardaki değişiklikler ve diğer dielektrik malzemelerin seçimi gibi farklı yöntemler kullanılarak sınırlı bant genişliğine ve düşük kazanç değerlerine sahip mikroşerit antenlerin daha iyi performansı elde edilmiştir [20].

2003 yılında, M. Ramesh tarafından içe girintili besleme (inset fed) mikroşerit anten tasarlanmış. Bu çalışmada, mikroşerit hat iç içe beslemeli mikroşerit antenini analiz etmek için iletim hattı modelini sunulmuş ve ayrıca 50 ohm giriş empedansını elde etmek için tam iç uzunluğunu bulmak için bir eğri uydurma formülü sunulmuştur. Formülün doğruluğu, EM simülatöründen elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır [21].

2004 yılında, Z. I. Dafalla ve arkadaşları tarafından 1GHz frekansında bir dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Bu çalışmada, bir iletim hattı modeli kullanarak, mikrodalga ofis yazılımını desteğiyle mikroşerit hat iç beslemeli dikdörtgen yama anteninin nasıl doğru bir şekilde modellenebileceğini ve analiz edilebileceğini gösterilmiştir. Daha sonra, çok ince bir film üzerine basılmış ve toprak düzleminden köpükle ayrılmış bir mikroşerit anten başarıyla imal edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında, antenlerin davranışını incelemek için kullanılan tipik parametreler olan çok düşük geri dönüş kaybı ve VSWR gözlemlenmiştir [22].

2007 yılında E. Hamiti ve arkadaşları tarafından yapılmış çalışmada, 900 MHz sistemde baz istasyonu antenlerinin sektörlü kapsama alanı için U-şekilli dikdörtgen yamalı bir mikroşerit anten elemanı analiz edilmiştir. Kazanç ve bant genişliği açısından anten performansında iyi bir gelişmeyi gözlemlenmiştir. Ek olarak, yamayı çevresel tehlikeye karşı korumak için bir üst tabaka veya dielektrik örtü kullanılmıştır [23].

Diğer bir çalışmada, 2009 yılında E. Çetme tarafından 1800 MHz frekansında bir dikdörtgen mikroşerit antene farklı yarıklar ekleyerek sonuçları incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, yamanın boyutları değiştirilmeden, yama üzerinde oluşturulan yarıkların şekli, boyutu ve konumu optimize edilerek çeşitli parametrik özelliklere sahip anten kullanarak daha iyi performans ve başarılı tasarımlar elde edilmiştir [24].

2010 yılında M. Matin tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, içe girintili beslemeli bir mikroşerit yama anteni tasarlanmış ve rezonans frekansının yarık aralığına ve besleme hattı geometrisine bağımlılığı incelenmiştir. 50 ohm'luk bir mikroşerit besleme hattına mümkün olan en iyi eşleşmeyi (minimum S11) elde etmek

için anten için verilen yarık genişliği oranı içindeki rezonans frekansı değerlerini bulmak için bir formül önerilmiştir. Önerilen formülün simülasyondan maksimum %0,2 sapma ile iyi çalıştığı bulunmuştur. Basit tahminler veya kes ve dene tekniklerinden daha iyi sonuçlar veren anten tasarımcıları için mükemmel bir başlangıç noktası sağlayacak olan tasarım prosedürü de bu çalışmada sunulmuştur. Ayrıca, daha dar bir yarığın daha iyi empedans uyumuna yol açtığını gösterilmiştir [25].

2011 yılında M. Hayouni ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, dikdörtgen şekilli kompakt mikroşerit anten tasarlanmıştır. Çalışmanın sonunda, yama tasarımına bazı geometrik şekiller eklenmesinin bant genişliğinde daha iyi sonuçlara yol açtığı bulunmuştur. Ayrıca, üretilen prototipleri mobil ve kablosuz ağ uygulamaları için uygun hale getiren ultra geniş bant elde edilmiştir [26].

2012 yılında M. Karaaslan ve arkadaşları çalışmasında, 2,4 GHz frekansında çalışan yüksek kazançlı ve sabit ışınımlı bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Antenin modellenme aşamasında HFSS programı kullanılmış ve elde edilen sonuçları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, simülasyondan elde edilen sonuçlar ile laboratuvardaki spektrum analizör cihazı aracılığıyla elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir [27].

2013 yılında, D. Bhalla ve K. Bansal tarafından içe girintili (inset fed) besleme tekniği kullanılarak dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada, (2,4 GHz) rezonans frekansında yeni bir mikroşerit dikdörtgen yama anteni rapor edilmiştir. Anteninin performansını ve kazancını incelemek için IE3D simülasyon aracı kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, radyasyon paternleri (3D) ve diğer önemli kazanç, verimlilik ve geri dönüş kaybı parametreleri incelenerek anten performansında iyi bir gelişmeyi gözlemlenmiştir [28].

2014 yılında F. Küçük ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, dikdörtgen bir mikroşerit anten tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma frekansları sırasıyla GSM (900 MHz) ve GSM (1800 MHz) olan iki mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiş ve geometrik özelliklerin rezonans frekanslarına etkileri analiz edilmiştir [29].

2014 yılnıda diğer bir çalışmada, M. Krakauskas ve arkadaşları RF enerji hasadı için Kesilmiş dikdörtgen yarıklı mikroşerit anten sunmuştur. Bu çalışmanın amacı, ortamdaki mikrodalga kaynaklarından elektromanyetik dalgaları toplayarak kablosuz enerji aktarımı için dikdörtgen yama yarıklarına sahip mikroşerit anteninin potansiyelini araştırılmıştır. Çalışma frekansının hem 3G mobil iletişim bandı olan (2,11-2,17) GHz'i hem de WiFi bandını 2,45 GHz'i kapsaması hedeflenmiş olup, gerekli bant genişliği yaklaşık %15'tir. Önerilen antenin performansını göstermek için simülasyon ve ölçülen sonuçlar sunulmuş ve simülasyonlar ile pratik uygulama arasında yakın bir uyum bulunmuştur. Ayrıca, bant genişliğini %2,5'ten %15'e büyük ölçüde artırdığı doğrulanmıştır [30].

2014 yılında yapılan başka bir çalışmada, T. Suganthi ve arkadaşları tarafından GSM uygulaması için mikroşerit antenlerinin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Anten boyutu 30x50x1,8 mm^3 parametrik analiz kullanılarak optimize edilmiştir. Tasarlanan mikroşerit anten yüksek frekanslı yapı simülatörü (HFSS) yazılımı kullanılarak anten özellikleri analiz edilmiştir. Tasarlanan antendeki yamanın uzunluğu ve genişliği 30 mm, 50 mm'dir. Alt tabakanın uzunluğu ve genişliği ise 100 mm, 90 mm'dir. Alt tabaka malzemesi olarak FR4 epoksi kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarında, geri dönüş kaybı ve VSWR değeri sırasıyla -29,21 dB, 1,07'dir [31].

2015 yılında R. Yuwono ve O. Wijaya tarafından yapılan çalışmada, 900 MHz frekansta çalışan tüm cihazlara uygulanabilecek bir mikroşerit anten tasarımı açıklanmıştır. Bu antenin tasarımı teorik hesaplamalarla başlamış ve CST kullanarak hesaplama sonuçlarına dayalı bir tasarım oluşturulmuş ve daha sonra GWinstek GSP-827 ve IFR Signal Generator (250 kHz -3 GHz) cihazı kullanılarak üretilmiş ve ölçülmüştür. Çalışmada, toprak düzlemindeki bazı şekiller ekleyerek ve çiçek şekilli yama kullanan bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarında 900 MHz'de VSWR < 2, RL < -10, kazanç > 2 dB olduğu görülmüştür [32].

2016 yılında L. C. Paul ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kablosuz uygulamalar için bir içe girintili beslemeli dikdörtgen mikroşerit yama anteni tasarlanmış ve anten parametrelerinin (yönlülük, kazanç, geri dönüş kaybı, bant

genişliği vb.) besleme konumuna bağımlılığı incelenmiştir. Söz konusu antenin değişen besleme konumu ile performans değişiminin çok kesin bir analizi sunulmuştur. Tasarlanan anten, besleme konumunu yama genişliğinin merkez konumu olan yamanın sol kenarından 24.705 mm'ye ayarladıktan sonra -37.131 dB'lik daha iyi geri dönüş kaybı ile nispeten daha iyi performans göstermiştir [33].

2016 yılında bir diğer çalışmada, ultra geniş bant (UGB) haberleşme sistemlerinde kullanılmak için dikdörtgen mikroşerit anteni tasarlanmıştır. Dielektrik sabiti (ε_r = 4,4), kayıp tanjantı (tan δ) 0,02'ye eşit olan FR4 epoksi malzemesi kullanılarak imal edilmiştir. Yama uzunluğu ve genişliği 16,95 mm, 22,26 mm'dir. Alt katmanın uzunluğu ve genişliği 26,55 mm, 31,86 mm'dir. Bu mikroşerit dikdörtgen anteni HFSS programında yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarında, geri dönüş kaybı -30 dB'dir ve VSWR değeri 3 GHz ile 5 GHz arasındaki frekans aralığı boyunca 1,6 ile 1,7 arasında değişir. Ayrıca kazanca bakıldığında ise 3,48 dB elde edilmiştir. Başka bir değişle, iyi kazançlı ve başarılı bir şekilde dikdörtgen mikroşerit anten tasarlanmıştır [34].

2016 yılında, S. Chakravarthy ve arkadaşları tarafından dikdörtgen mikroşerit antenlerin farklı besleme teknikleri üzerine karşılaştırmalı bir çalışma sunulmuştur. Çalışmada, dikdörtgen bir mikroşerit yama anteninin iç besleme, koaksiyel besleme, açıklık beslemesi ve yakınlık beslemesi arasında S11 parametresi, VSWR, yönlülük, bant genişliği ve ışıma modeli temelinde karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Her besleme tekniği için tasarım, CST mikrodalga stüdyo yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve incelenmiştir. İncelenen dört antenin rezonans frekansı 2 GHz'dir. Fabrikasyon iç beslemeli mikroşerit anteni test edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında, simüle edilmiş anteninkiyle kabul edilebilir geri dönüş kaybı ve karşılaştırılabilir radyasyon performansına sahip olduğunu tespit edilmiştir. Ayrıca iç beslemeli anten en yüksek yönlülüğe sahip olma ve koaksiyel beslemeli anten en düşük yönlülüğe sahip olduğunu belirlenmiştir [35].

Mobil uygulamaları şarj etmek için 2017 yılında E. M. Ali ve arkadaşları çalışmasında, bir mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım, iletim hattı modeli kullanılarak geliştirilmiştir. Tasarlanan anten, 900 MHz GSM bant aralığında çalışacak şekilde

yapılmıştır. Farklı dielektrik sabit değerlerine sahip farklı malzemeler için antenin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, dielektrik sabitinin daha küçük değerlerinin daha büyük antenler üreteceği belirlenmiş. Yani, dielektrik sabiti ile anten boyutu arasında ters orantı olduğunu tespit edilmiştir. Önerilen antenin, RF hasatlama kullanılarak şarj etmek için iyi bir seçim olduğunu gösterilmiştir [36].

2018 yılında, W. M. Hashim ve A. H. Sallomi tarafından yapılan çalışmada, önerilen anten GSM (900 MHz) ve GSM (1800 MHz) baz istasyonu uygulamalarında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Mikroşerit antenin yapısı, yamanın üstüne yerleştirilmiş dikdörtgen boşluklu dikdörtgen yamadan oluşur. Bu tasarım için kullanılan dielektrik katmanı (ε_r = 4,4) ve 1,6 mm kalınlığa sahip bir epoksi alt tabakadır. Antenin parametrelerinin değiştirilmesinin ve en iyi değerlerin seçilmesinin etkisi, CST programı kullanılarak incelenmiştir. Önerilen anten, 0,94 GHz'den 1,9 GHz'e kadar çalışmış ve 2,11 dB'den 4 dB'ye kadar kazanç sunmuştur. Bu çalışmanın sonuçlarında, anten performansının, iletim besleme hattının boyutları, toprak düzleminin boyutları ve boşlukların boyutları gibi geometrik ve elektriksel parametrelerden temel olarak etkilendiği gözlemlenmiştir [37].

2019 yılında, İ. Ataş ve arkadaşları tarafından yapılan araştırmada, GSM 1800, WLAN, Wi-MAX ve ISM teknolojilerini destekleyen yüksek kazançlı mikroşerit anten tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan mikroşerit antenler, koaksiyel besleme ve iletim hattı besleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma sonucunda, antenlerin ölçümleri ve simülasyon sonuçlarının uyumlu ve karşılaştırılabilir olduğu gözlemlenmiştir [38].

2019 yılında, J. Endri ve arkadaşları GSM (900 MHz) sistemi için çift elemanlı bir mikroşerit anten önermişlerdir. Önerilen anten, (ε_r = 4,4) ve 1,6 mm kalınlığa sahip bir epoksi alt tabakasından yapılmıştır. Anten tasarımında, CST yazılımı kullanılarak anten simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonun sonuçları, antenin -59,38 dB geri dönüş kaybına, 1,06 VSWR değerine ve dairesel polarizasyon modeline sahip olduğunu gösterilmiştir. Böylece, tasarlan anten çeşitli açılardan bilgi yakalayabildiği için GSM sistemlerinde kullanım için çok uygun olduğunu ifade edilmiştir [39].

2020 yılında, U. Patel and T. K. Upadhyaya çalışmasında, GSM (900 MHz) ve WiMAX (3,3 GHz) uygulamaları için çift bantlı bir mikroşerit anten yapılmıştır. Önerilen anten, bir FR4 epoksi alt tabakası üzerinde geliştirilmiştir. İki rezonans frekansında elde edilen geri dönüş kayıpları sırasıyla 22,26 dB ve 18,97 dB'dir. Ayrıca kazanç ve yönlülük, GSM ve WiMAX uygulamaları için de iyi bir uyum gösterilmiştir. Başka bir değişle, tasarlanan anten her iki uygulama için de iyi performans ve çözüm sunmuştur [40].

2020 yılında diğer bir çalışmada, H. Chemkha ve A. Belkacem tarafından içe girintili beslemeli dikdörtgen mikroşerit anten tasarımı yapılmıştır. Sunulan çalışmada, elektromanyetik simülatör HFSS kullanılarak dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarımına odaklanmıştır. Bu çalışması, 2,45 GHz rezonans frekansı ile giriş empedansını kontrol etmek için mikroşerit hatlı, kuplajlı hatlı ve içe girintili beslemeli üç farklı dikdörtgen yama anteni sunmaktadır. Üç konfigürasyonun karşılaştırmalı çalışması, ana temel parametrelerin iyileştirilmesi dikkate alınarak yapılmıştır. Kullanılan alt tabaka, dielektrik sabiti 4,32 olan FR4 epoksi'dir. Ele alınan analiz yöntemi, Wi-Fi iletimleri için en yaygın kullanılan 2,45 GHz frekansında anten boyutları 68,1 mm × 59,7 mm × 1,6 mm olan iletim hattı modelidir. Geri dönüş kaybı, üç boyutlu kazancı ve bant genişliği ile ilgili sonuçlar; önerilen içe girintili beslemeli dikdörtgen yama anten için daha iyi performans göstermiştir [41].

2021 yılında, D. Y. Gündoğdu ve A. O. Ertay tarafından 5G haberleşme sistemi için mikroşerit anten tasarlanmıştır. Bu çalışmada, kazanç ve bant genişliği artırılmış mikroşerit anten üç aşamalı bir tasarım yöntemi ile sunulmuştur. Yapılan anten 44×44 mm^2 boyutlarında olup merkez frekansı 2,4 GHz'dir. Simülasyon sonuçlarında, anten kazancı 3,69 dBi'ye yükseltilmiş ve 2,4 GHz'deki geri dönüş değeri -52 dB'ye indirilmiştir [42].

2021 yılında başka bir çalışmada, M. R. Talab ve arkadaşları tarafından GSM (890 - 960 MHz) uygulamaları için dielektrik sabiti 4,4 bir FR4 epoksi alt tabakası kullanılarak ve yayılma özelliklerini iyileştiren bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Çalışmada, alt tabakanın kalınlığı değiştirilmiş, sırasıyla 1,4 mm, 1,6 mm ve 3,2 mm kalınlık alınmış, ardından her kalınlık için frekans bant genişliğini değiştirme sonuçları

karşılaştırılmış ve alt tabaka kalınlığındaki artışın frekans bant genişliğinde bir artışa yol açtığı gözlenmiştir [43].

Literatürde mikroşerit antenler üzerine birçok çalışmalar bulunmaktadır. Bu konuda ayrıntılı bilgi için aşağıdaki kaynaklar incelenebilir: [44, 45, 46].

3. MİKROŞERİT ANTENLER

Bu bölümde, anten çeşitleri, mikroşerit antenlerin temel yapısı, parametreleri, besleme teknikleri ve analiz modelleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

3.1 Anten

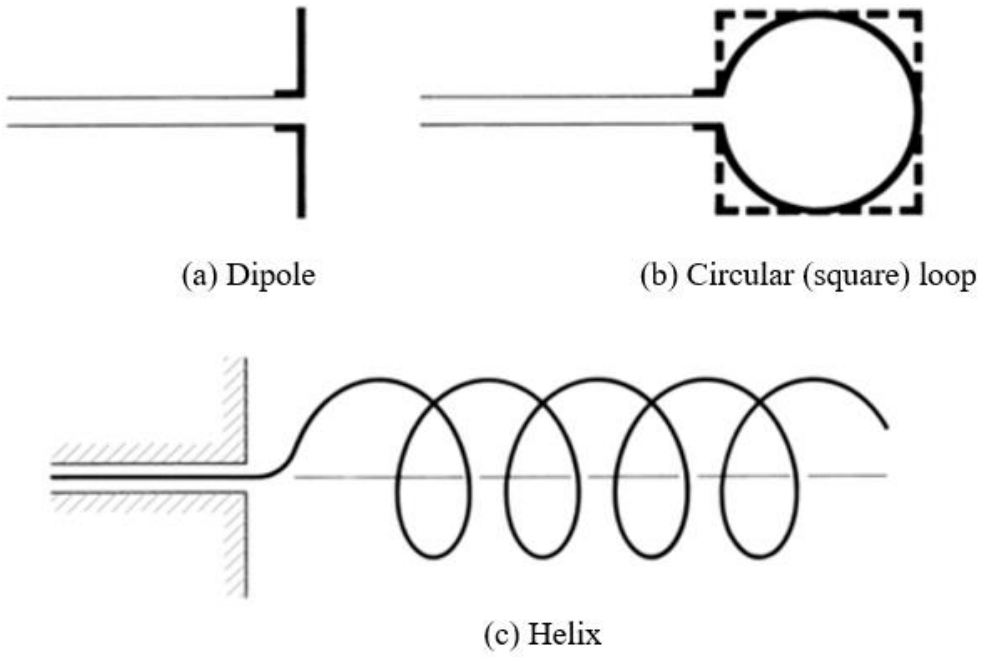
Bir anten (alıcı anten), bir RF enerji hasatlama sisteminin çok önemli bir bileşenidir ve yayılan kaynaklardan (verici anten) RF sinyalinin toplanmasından sorumludur. Ayrıntılı literatür incelemesi, RF enerji hasatlama sistemlerinde farklı tipte alıcı antenlerin kullanıldığını göstermektedir. Alıcı antenler, düşük profilli fiziksel özellikleri ve düşük imalat maliyetleri nedeniyle genellikle mikroşerit tipte tercih edilir [20]. Temel parametreler, bir alıcı antenin performansını belirler; giriş empedansı, etkin alan, ışıma örüntüsü, kazanç, verimlilik ve polarizasyon tipi gibi.

Antenler, fiziksel yapılarının ve işlevlerinin daha net anlaşılması için sınıflandırılmalıdır. Uygulamalara bağlı olarak birçok anten türü vardır.

- Tel Antenler (Wire Antennas)
- Açıklık Antenler (Aperture Antennas)
- Reflektörlü Antenler (Reflector Antennas)
- Lens Antenleri (Lens Antennas)
- Mikroşerit Antenler (Microstrip Antennas)
- Dizi Antenler (Array Antennas)

3.1.1 Tel antenler

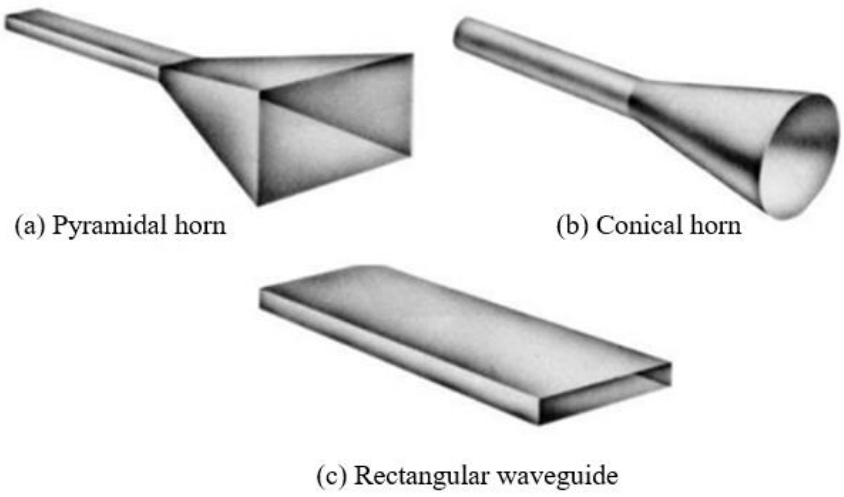
Hemen hemen her yerde (arabalar, binalar, gemiler, televizyonlar, radyolar, bazı cep telefonları vb.) görülebilen en ünlü ve popüler anten türü olan tel antenler. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi düz tel (dipol), halka ve sarmal gibi farklı şekillerde olabilir.



Şekil 3.1 Tel antenler konfigürasyonu [47]

3.1.2 Açıklık antenler

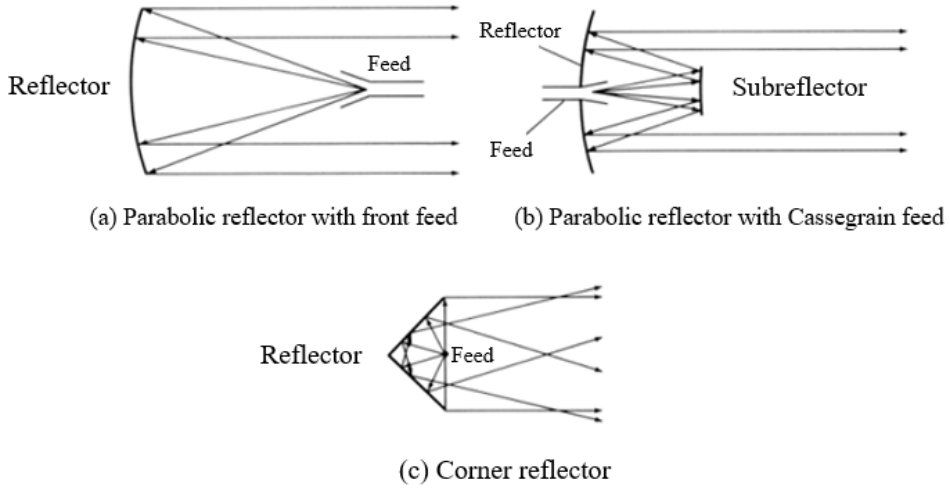
Şekil 3.2'de gösterildiği gibi kablolu antenlerden daha yüksek frekanslar için daha karmaşık biçimler ve kullanım ihtiyacı nedeniyle geliştirilen açıklıklı antenler. Bu antenler, yüksek hızlı ortamlarda tehlikeli koşullardan korunmak için bir dielektrik malzeme ile kaplanabildikleri için uçak ve uzay aracı uygulamalarında çok kullanışlıdır.



Şekil 3.2 Açıklıklı antenlerin konfigürasyonları [47]

3.1.3 Reflektörlü antenler

Reflektör antenler, büyük mesafeler nedeniyle öncelikle uydu iletişimi için kullanılır. Parabolik anten (yansıtıcı), bu tip antenler için en yaygın şekildir. Bu tipte anten çapı ne kadar büyük olursa, gönderme ve alma için o kadar yüksek kazanç elde edilebilir. Şekil 3.3 çeşitli reflektör antenler gösterir.

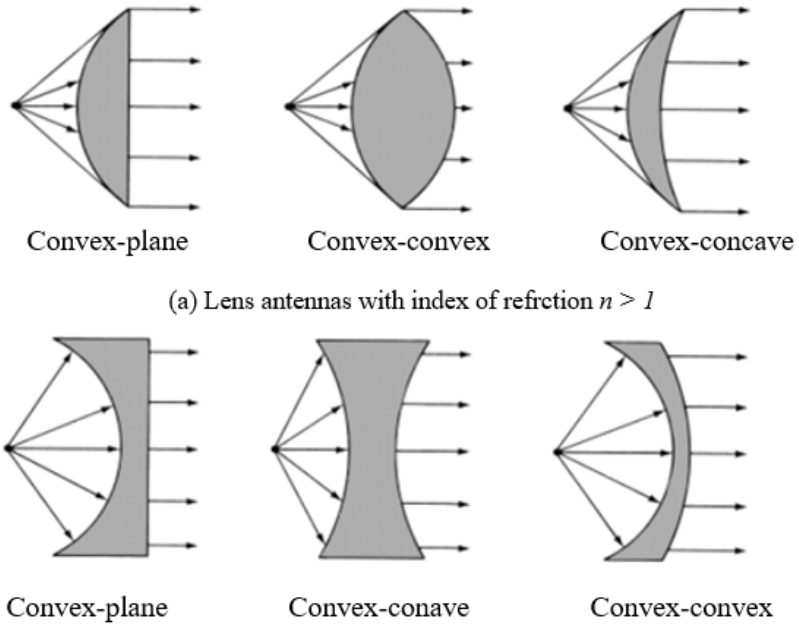


(a) Parabolic reflector with front feed (b) Parabolic reflector with Cassegrain feed

(c) Corner reflector

Şekil 3.3 Tipik reflektör konfigürasyonları [47]

3.1.4 Lens antenler



(a) Lens antennas with index of refrction $n > 1$

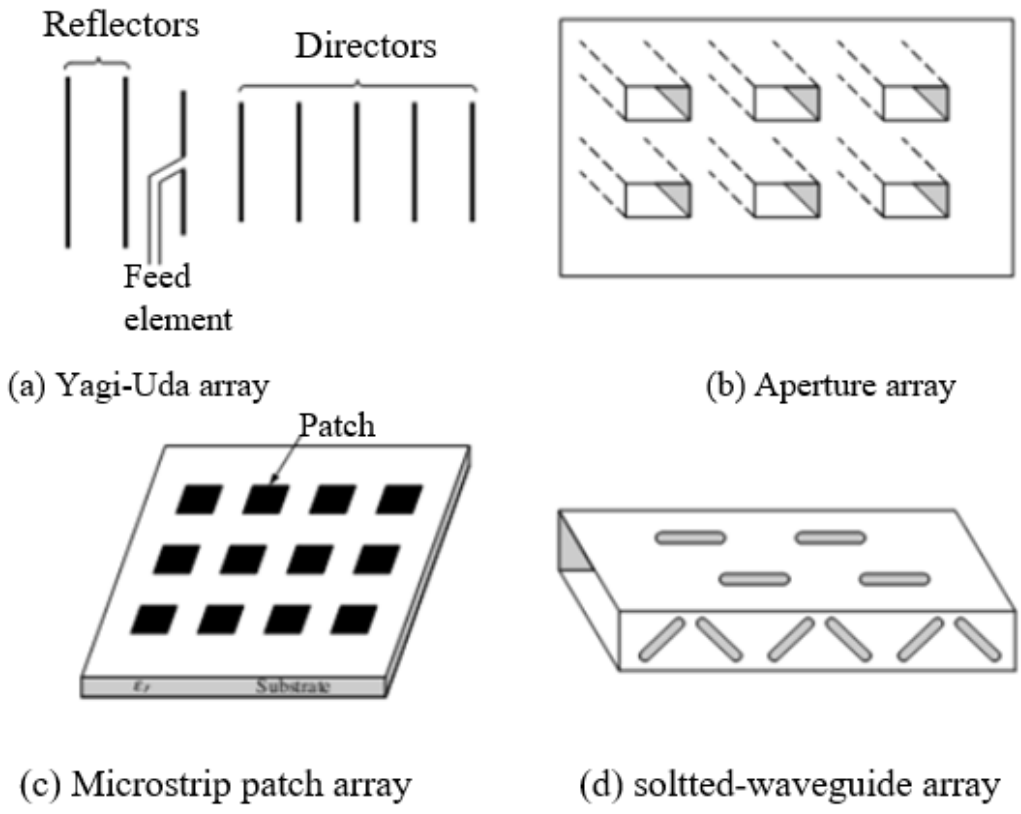
(b) Lens antennas with index of refrction $n < 1$

Şekil 3.4 Tipik lens anten konfigürasyonları [47]

Lens antenleri bir dielektrik malzemeden yapılmıştır ve yayılan enerjiyi belirli bir yönde veya yönlerde yoğunlaştırmak için bir yansıtıcı anten olarak kullanılabilir. İstenilen yönde yönlülüklerini artırmak için horn anten üzerinde bir dipolün önüne yerleştirilebilirler. Malzemelerine veya şekillere göre sınıflandırılabilirler. Yüksek frekanslar için kullanılırlar. Bazı formlar Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

3.1.5 Dizi antenler

Dizi antenler, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi tek bir antenden gelen sinyalleri geliştirmek için birleştirilmiş iki veya daha fazla anten grubudur. Bu dizi aynı zamanda ışıma belirli bir yönde veya yönlerde maksimuma yükseltebilir ve diğerlerinde istendiği gibi azaltılabilir.



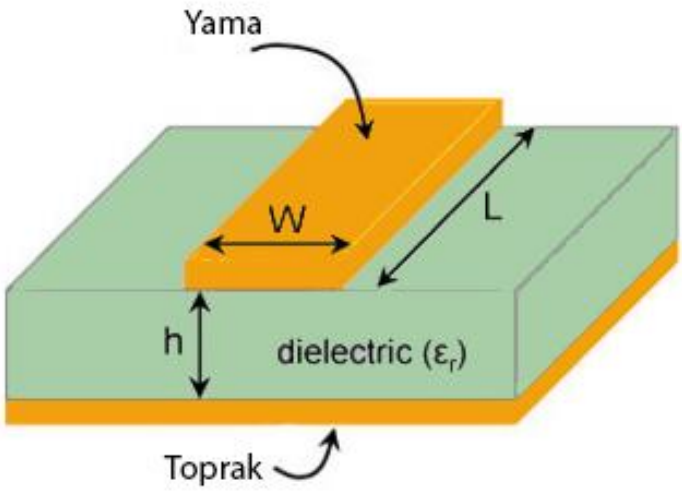
Şekil 3.5 Tipik Tel, açıklık ve mikroşerit dizi konfigürasyonları [47]

Mikroşerit antenler tez konusu olduğu için detaylı olarak ele alınmıştır.

3.2 Mikroşerit Antenlerin Temel Yapısı

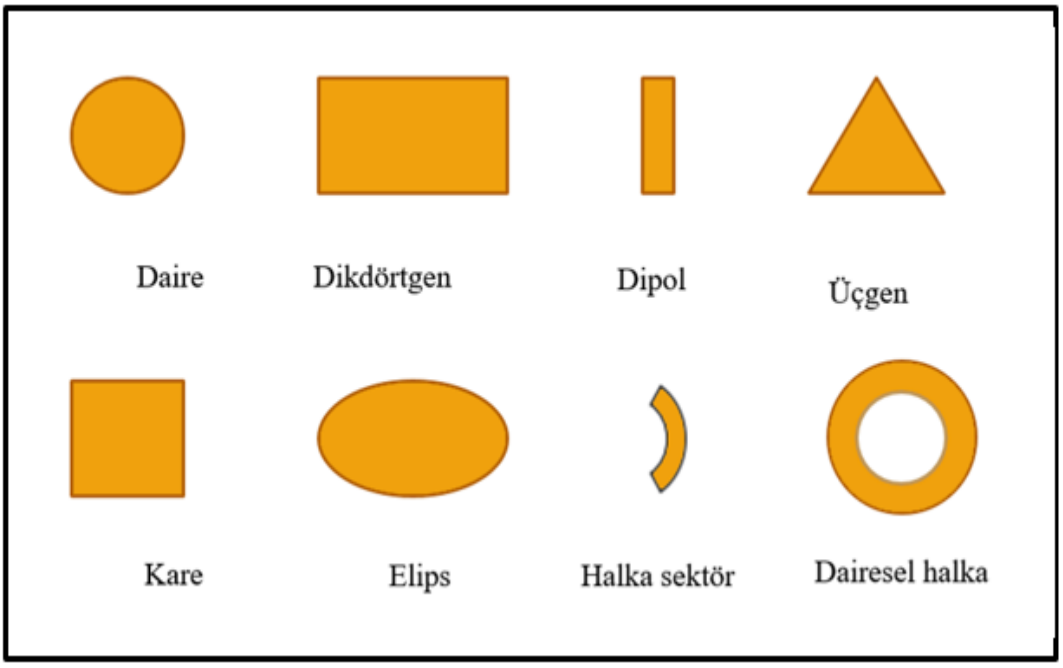
Mikroşerit ya da yama antenler, doğrudan bir devre kartına basılabildiklerinden giderek daha kullanışlı hale gelmiştir. Özellikle, mikroşerit antenlercep telefonu pazarında çok yaygınlaşmıştır. Ayrıca mikroşerit antenler düşük maliyetli, düşük hacimli ve üretimi kolaydır.

Esas olarak, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi mikroşerit anten yama, yalıtkan ve toprak düzeyinden oluşmaktadır. Yama ve toprak düzeyi, yüksek iletkenliğe sahip metalden (tipik olarak bakır veya altın) yapılır. Yama, L uzunluğunda, W genişliğindedir ve dielektrik sabiti ile h kalınlığında bir alt tabaka üzerine yerleştirilir.

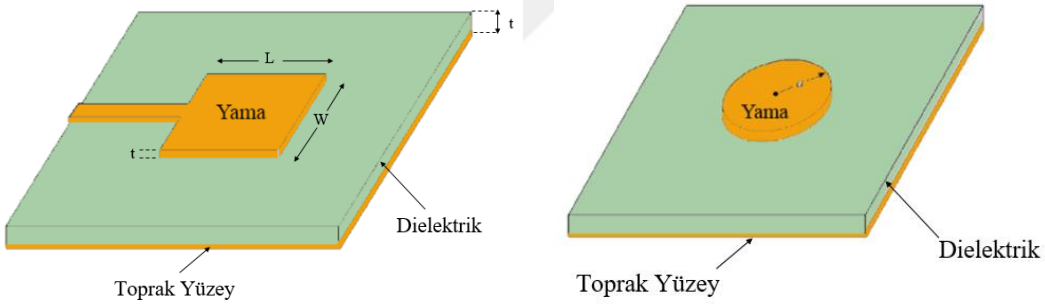


Şekil 3.6 Mikroşerit antenin yapısı

Antenin ışıma elemanı olan yama, dielektrik tabakanın üzerine yerleştirilen ve iletken malzemeden oluşmaktadır. Yamanın genel şekli, çalışma frekansına göre dikdörtgen şeklinde uzunluğu ve genişliği ile tanımlanmaktadır. Bununla birlikte, antenin daha düşük frekanslarda şekli daha büyük hale gelmekte ve uygulama alanı doğrultusunda istenilen boyutta tasarlanabilmesi için başka şekillere ihtiyaç duyulmaktadır. Yayılan yama dikdörtgen, daire veya Şekil 3.7'de görüldüğü gibi herhangi bir konfigürasyonda olabilir [48]. Ancak kare, dikdörtgen ve dairesel, kolay üretilmeleri ve çekici radyasyon özellikleri nedeniyle en çok tercih edilen yamalardır.



Şekil 3.7 Mikroşerit antenlerin çeşitli yamaları



a) Dikdörtgen yamalı b) Dairesel yamalı

Şekil 3.8 Dikdörtgen ve dairesel yamalı mikroşerit antenler

Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla Şekil 3.8'de gösterildiği gibi dikdörtgen ya da dairesel mikroşerit anten yamaları tercih edilmiştir. Dikdörtgen mikroşerit antenlerde, yamanın kalınlığı ($t << \lambda_0$) ve uzunluğu genellikle ($\lambda_0 = 3 < L < \lambda_0 = 2$)'dir. Yalıtkan tabaka ise, kalınlığı genelde ($0{,}003\ \lambda_0 < h < 0{,}05\ \lambda_0$) ve dielektrik sabiti ($2{,}2 \leq \varepsilon_r \leq 12$) değerleri seçilir.

Çalıştırılacak frekansa göre (ε_r) seçimi yapılır. Bununla birlikte, iyi bir anten performansı elde etmek için kalın alt tabakalar istenir. Üstelik dielektrik sabiti, daha iyi verim elde etmek için küçük değerde seçilir, ancak bu koşul daha büyük anten boyutu için geçerlidir [49].

Öte yandan, mikrodalga devrelerinde olduğu gibi istenmeyen ışımayı azaltmak için daha yüksek dielektrik sabitleri olan ince alt tabakalar önerilir. Ancak bu durumda anten verimliliği ve bant genişliği daha küçük hale geldiği için çok fazla kayıp meydana gelir [50, 12].

3.3 Mikroşerit Anten Parametreleri

Bu bölümde, mikroşerit anten tasarım parametrelerine genel bir bakış sunulmuştur. En temel anten parametreleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Geri dönüş kaybı (RL)
- Bant genişliği (BW)
- Giriş empedans uyumluluğu
- Işıma örüntüsü
- Gerilim duran dalga oranı (VSWR)
- Yönlülük ve kazanç
- Verimlilik

Bir anteni tam olarak karakterize etmek ve antenin amacı için optimize edilip edilmediğini belirlemek için yukarıda belirtilen tüm parametreler gereklidir.

3.3.1 Geri dönüş kaybı

Bu parametre, bir anteni test ederken çok önemli bir parametredir. Çünkü empedans uyumu ve maksimum güç aktarımı ile ilgilidir. Aynı zamanda, kaynaktan antene güç iletiminde antenin verimliliğinin bir ölçüsüdür. Geri dönüş kaybı logaritmik bir orandır ve bu oran desibel (dB) cinsinden ölçülür. RL değeri (-10 dB) olduğunda, çıkış gücünün %90'ından fazlası iletileceğinden anten daha iyi bir eşleşmeye sahip olacaktır. Geri dönüş kaybı aşağıdaki ilişki ile verilir [51].

$$RL = -20\ log_{10}|\Gamma|\ (dB) \tag{3.1}$$

Burada;

"Γ" yansıma katsayısını ifade etmektedir.

$$\Gamma = \frac{V_0+}{V_0-} = \frac{Z_L-Z_o}{Z_L+Z_o} \tag{3.2}$$

Burada;

"V_{0+}" yansıyan dalganın genliğini; "V_{0-}" iletilen dalganın genliğini; "Z_L" ve "Z_o" ise temsil etmektedir.

3.3.2 Bant genişliği

Bu parametre antenin önemli özelliklerinden biri olarak sayılır ve bu özellik antenin doğru şekilde çalışabileceği frekans aralığını ifade eder. Bant genişliği aşağıdaki ilişki ile verilir [52].

$$BW = F_H - F_L \tag{3.3}$$

$$BW(\%) = \left[\frac{F_H - F_L}{F_C}\right] X\ 100\% \tag{3.4}$$

Burada;

"F_C" merkez frekansını, "F_H" maksimum frekansını, "F_L" minimum frekansını ifade etmektedir.

Dar bantlı antenlerde bant genişliği, bant genişliğinin merkez frekansı üzerindeki frekans farkının yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin; %20 bant genişliğine sahip bir anten. Diğer tarafından, geniş bantlı antenlerde bant genişliği en yüksek ve en düşük frekansların oranını olarak ifade edilir.

$$BW_{broadband} = \frac{F_H}{F_L} \tag{3.5}$$

3.3.3 Giriş empedans uyumluluğu

Bu parametre, antenin giriş terminalinde sunduğu empedans veya bir çift terminaldeki voltajın akıma oranı veya bir noktadaki elektrik alanının uygun bileşenlerinin manyetik alanlara oranı olarak görülür [53]. Giriş empedansı, yakındaki diğer antenler veya nesnelerden etkilenecektir, ancak antenin izole edildiğini varsayıyoruz. Giriş empedansı gerçek ve sanal kısımlardan oluşmaktadır [54]:

$$Z_{in} = R_A + jX_A \tag{3.6}$$

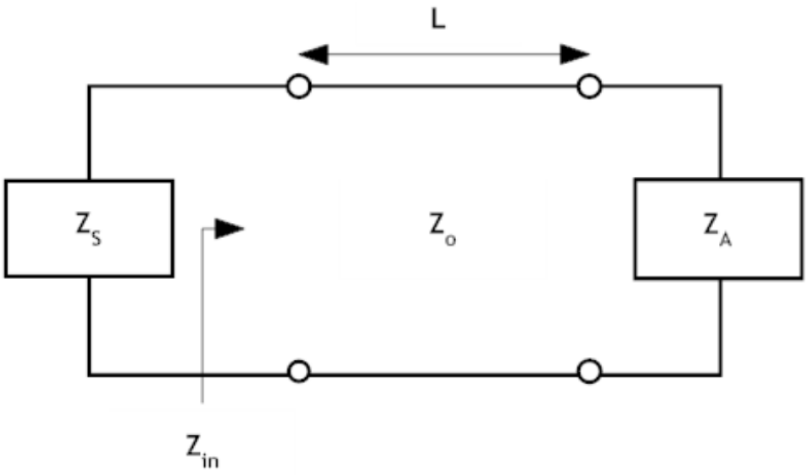
Giriş direnci R_A, iki şekilde meydana gelen dağıtmayı temsil eder. Antenden giden ve asla geri dönmeyen güç, bir dağılma şeklidir. Anten yapısında ısıtma ile ilişkili omik kayıplar da vardır, ancak birçok antende omik kayıplar radyasyon kayıplarına kıyasla küçüktür. Giriş reaktansı X_A, antenin yakın alanında depolanan gücü temsil eder [54].

Bir anten uyumsuzsa, kaynak tarafından üretilen güç geri yansıtılacağı için güç kaybı çok yüksek olabilir. Güçle ilgili bir ölçü olarak giriş empedansı, bir antenin alacağı güç için çok önemli bir miktardır. Bu nedenle, tanım olarak, giriş empedansı, kaynağı tarafından üretilen empedansın eşleniğine eşitse, kaynaktan antene maksimum bir güç iletilecektir [53].

$$Z_{in} = Z_L{}^* \tag{3.7}$$

Burada;
"Z_{in}" kaynağın empedansı, "Z_L" yük empedansı ve (*) karmaşık eşleniği ifade etmektedir. Bu nedenle, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi Z_A, Z_S'den çok daha küçük veya çok daha büyük olduğunda hiçbir güç iletilmez [53].

Genellikle, mikrodalga uygulamalarında 50 Ω giriş empedansı ile anten tasarımı yapılmaktadır, bu yüzden bu tez çalışmasında tasarlanacak anteni 50 Ω ile eşleştirmek amaçlanmıştır.



Şekil 3.9 İletim hattı modeli için eşdeğer devresi [53]

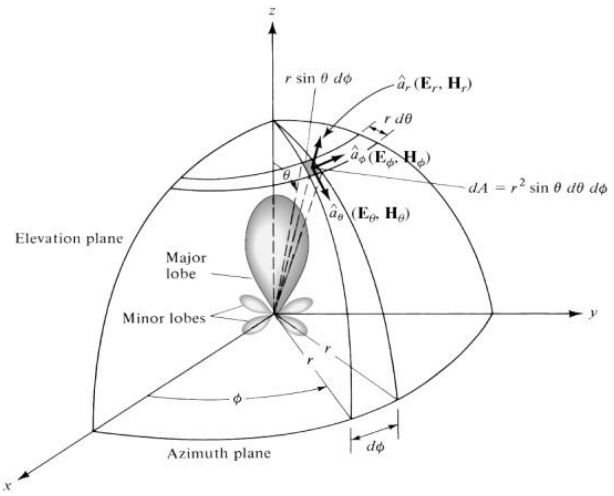
Kısacası, mikroşerit antenlerin giriş empedansı, geometrik şekillerine, boyutlarına, ilgili malzemelerin fiziksel özelliklerine, besleme tipine ve konumuna bağlıdır. Bu nedenle, belirli bir rezonansın eşleşmesi için en iyi geometriyi elde etmek üzere anten parametrelerinin bir alt kümesi ayarlanabilir. İçe girintili beslemeli mikroşerit anten, düzlemsel bir besleme konfigürasyonu ile bir empedans kontrolü yöntemi sağlar.

3.3.4 Işıma örüntüsü

Bu parametre, antenin ışıma özelliklerinin uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olarak matematiksel bir fonksiyonu veya grafiksel bir temsili olarak tanımlanır. Çoğu durumda, ışıma modeli uzak alan bölgesinde belirlenir.

Işıma özellikleri arasında güç akısı yoğunluğu, ışıma yoğunluğu, alan kuvveti, yönlülük, faz veya polarizasyon bulunur [55]. Anten ışıma modeli, "elektrik akımı modeli" (E) ya da "manyetik akım modeli" (H) kullanarak ya iki ya da üç boyutlu olarak çizilebilir [38, 56].

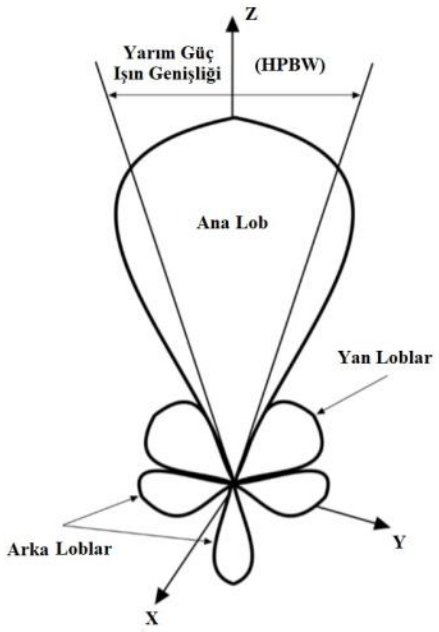
Doğrusal olarak polarize bir anten için performans genellikle ana E-düzlemi (Azimuth plane) ve H-düzlem (Elevation plane) modelleri açısından tanımlanır [57]. Şekil 3.10 üç boyutlu uzaysal koordinatlarda temsil edilen anten ışıma özelliklerinin matematiksel bir temsilini göstermektedir.



Şekil 3.10 Üç boyutlu koordinatlarda ışıma örüntüsü [53]

Bir ışıma modelinin çeşitli kısımlarına loblar denir ve bunlar Şekil 3. 11'de gösterildiği gibi majör veya ana, minör, yan ve arka loblar olarak sınıflandırılabilir.

Ana lob, maksimum ışıma yönünü içeren lobdur. Ayrıca genellikle ana lobdan daha küçük bir dizi lob vardır. Ana lob dışındaki tüm loblara minör lob denir. Minör loblar, yan loblar ve arka loblardan oluşur. Arka lobları ana lobun tam karşısındadır veya bazen ana lobun karşısındaki yarım boşlukta bulunan loblar olarak alınır [58].



Şekil 3.11 Genel yönlü bir antenin ışıma örüntüsü [38]

3.3.5 Gerilim duran dalga oranı

Bu parametre, empedans uyumsuzluğundan dolayı antenden kaynağa yansıyan enerji miktarını belirler. Dolayısıyla, duran dalgalar empedansa uymayan bir antenden yansıyan ve gelen dalgaların girişiminden kaynaklanır. Aşağıdaki bağıntı ile gerilim duran dalga oranının ifadesi verilmiştir.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \tag{3.8}$$

Burada;
"V_{max}" maksimum gerilim değerini ve "V_{min}" minimum gerilim değerini ifade etmektedir. Bu oran fiziksel olarak mümkün olmasa da, empedans eşleşmesi kusursuz durumunda bu oran 1'dir. Aksine, empedansın en uyumsuz olduğu durumda bu oran sonsuza gider. Genel olarak, yansıma katsayısının sıfıra yakın olması arzu edilir [59].

Bir antenin iyi bir şekilde çalışması için VSWR ≤ 2 (RL ≤ - 9,5 dB) değerinin küçük olması gerekmektedir [60].

Bir antenin ışıma özelliğini tanımlamak için kullanılan üç yaygın ışıma modeli vardır:

- **İzotropik**: Tüm yönlerde eşit radyasyona sahip varsayımsal kayıpsız bir anten.

- **Yönlü**: Elektromanyetik dalgaları bazı yönlerde diğerlerinden daha etkili bir şekilde yayma veya alma özelliğine sahip bir anten.

- **Çok Yönlü**: Belirli bir düzlemde büyük ölçüde yönsüz bir desene ve herhangi bir dikey düzlemde yönlü bir desene sahip bir anten.

Pratik uygulamaya bağlı olarak yönlü veya çok yönlü ışıma özelliklerine ihtiyaç vardır. Çok yönlü modeller normalde mobil sistemlerde arzu edilir [53].

3.3.6 Yönlülük

Yönlülük, bir antenin belirli bir yöndeki radyasyon modelinin yoğunluğunun ölçüsüdür. Yönlülük dB cinsinden ifade edilir. Yönlülük ne kadar yüksek olursa, bir anten tarafından yayılan ışın o kadar konsantre veya odaklanmış olur. Daha yüksek yönlülük aynı zamanda ışının daha uzağa gideceği anlamına gelir [61].

Işıma yoğunluğu, birim katı açı başına belirli bir yönde yayılan güçtür ve radyan kare başına watt birimine sahiptir.

$$D = \frac{4\pi U}{P_r} \tag{3.9}$$

Burada;
"D" yönlülük; "U" ışıma yoğunluğu ve "P_r" yayılan toplam güçtür.

Maksimum yönlülük şu şekilde verilir:

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_i} = \frac{4\pi U_{max}}{P_r} \tag{3.10}$$

Burada;
"D_{max}" maksimum yönlülük ve "U_{max}" maksimum ışıma yoğunluğudur.

3.3.7 Kazanç

Bir antenin kazancı hem yönlülüğüne hem de verimliliğine bağlıdır. Verimlilik %100 değilse, kazanç yönlülükten daha azdır [62]. Böylece, kazanç:

$$G = e_0 D \tag{3.11}$$

Burada;
"G" kazanç; "e_0" toplam verimlilik ve "D" yönlülük değerini ifade etmektedir.

Kazanç şu şekilde ifade edilebilir:

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta,\phi)}{P_{in}} \tag{3.12}$$

Burada; "$U(\theta,\phi)$" ışıma şiddetini ve "P_{in}" toplam giriş gücünü ifade etmektedir.

3.3.8 Verimlilik

Anten verimliliği, antenin giriş gücünü ışımaya iletme yeteneğinin ölçüsüdür. Anten verimliliği (e), yayılan gücün (P_r) giriş gücüne (P_{in}) oranıdır [53].

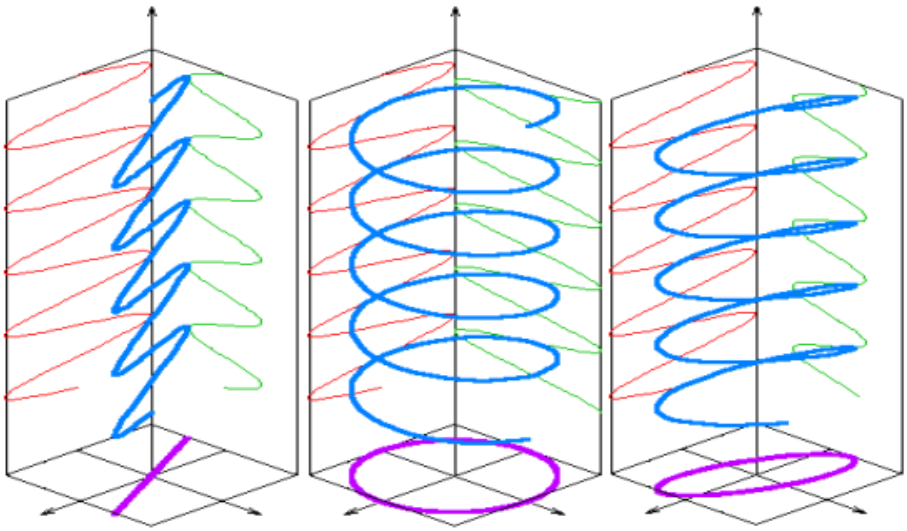
$$e = \frac{P_r}{P_{in}} \tag{3.13}$$

Antende çeşitli verimlilik türleri vardır. Antenin toplam verimi, giriş noktalarındaki ve anten yapısı içindeki kayıpları hesaba katar. Ayrıca, antenin toplam verimliliği, antenin içindeki tüm verimlerin sonucudur. Bu tür kayıplar şunlardan kaynaklanabilir [53]:

- İletim hattı ve anten arasındaki uyumsuzluk nedeniyle kayıplar.
- İletim ve dielektrik kayıpları.

3.3.9 Polarizasyon

Polarizasyon, bir elektromanyetik dalganın elektrik alanının yönü olarak tanımlanır. Bir antenin polarizasyonu, iletim sırasında anten tarafından belirli bir yönde yayılan dalganın polarizasyonudur. Alıcı antenin polarizasyonu, gelen dalganın polarizasyonu ile aynı değilse, güç kaybına neden olan polarizasyon uyumsuzluğu oluşur. Anten polarizasyonunun gerekliliği uygulamalara bağlıdır [54]. Polarizasyon, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi doğrusal, dairesel ve eliptik olarak kategorize edilebilir.



a) Doğrusal b) Dairesel c) Eliptik

Şekil 3.12 Anten polarizasyon türleri [63]

3.3.9.1 Lineer polarizasyon

Elektrik alan vektörü bir hat boyunca ileri geri hareket ederse, lineer polarize olduğu varsayılır. Doğrusal polarize bir dalga, elektrik alanı yeryüzüne paralel ise yatay olarak polarize ve elektrik alanı yeryüzüne dik ise dikey olarak polarize olarak kabul edilir.

3.3.9.2 Dairesel polarizasyon

Elektrik alan vektörünün uzunluğu sabit kalır, ancak dairesel bir yol etrafında dönerse, dairesel polarize olarak kabul edilir. Dairesel polarizasyon için alan bileşenleri aynı büyüklüğe sahiptir ve iki bileşen arasındaki faz 90 derecedir.

3.3.9.3 Eliptik polarizasyon

Eliptik polarizasyon, uzak alandaki elektrik alan vektörü, zamanla sürekli olarak eliptik eğrileri takip edecek şekilde olduğunda bir anteni tanımlar. Ayrıca, hem dairesel hem de eliptik polarizasyonlar, alanın durumuna bağlı olarak sağ (RH) veya sol (LH) polarize olmaları ile karakterize edilir. Elektrik alan saat yönünde ilerliyorsa, alan sağ polarizasyon olacaktır; aksi takdirde sol polarizasyon olacaktır [53].

3.4 Mikroşerit Antenlerin Besleme Teknikleri

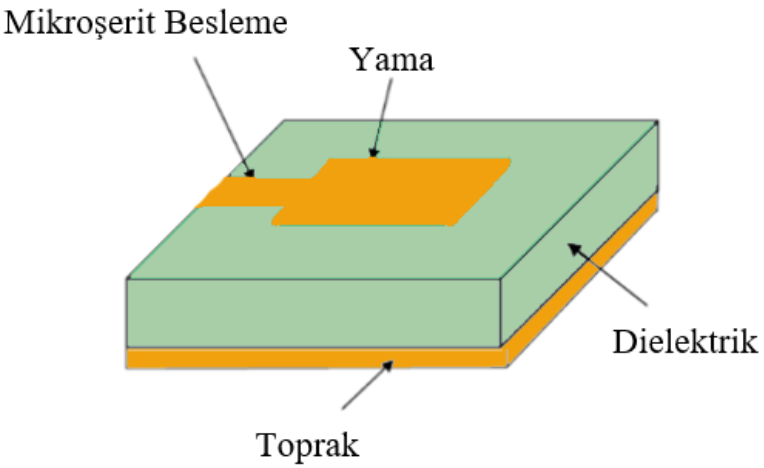
Mikroşerit antenler için kullanılan en yaygın besleme teknikleri; mikroşerit hat, koaksiyel prob (temaslı yöntemler), açıklık kuplaj ve yakınlık kuplajdır (temassız yöntemler) [64].

Besleme tekniği, antenin giriş empedansını ve özelliklerini etkiler ve önemli bir tasarım parametresidir. Anten, alt tabakanın bir tarafından yayıldığından, onu diğer taraftan (toprak düzlemi) beslemek kolaydır [65].

İyi özelliklere ve iyi ışıma parametresine ve yüksek verimliliğe sahip bir anten tasarlanabilir, ancak besleme kötü olduğunda, toplam verim düşük bir seviyeye düşürülebilir ve bu da tüm sistemin reddedilmesine neden olabilir. Tüm besleme yöntemlerinin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

3.4.1 Mikroşerit hat besleme

Mikroşerit hat besleme, ince bir malzeme kullandığı için en kolay yöntemlerden biridir. Başka bir deyişle, bu besleme Şekil 3.13'te gösterildiği gibi sadece yamaya bağlı bir şerittir ve bu nedenle yamanın bir uzantısı olarak sayılır.

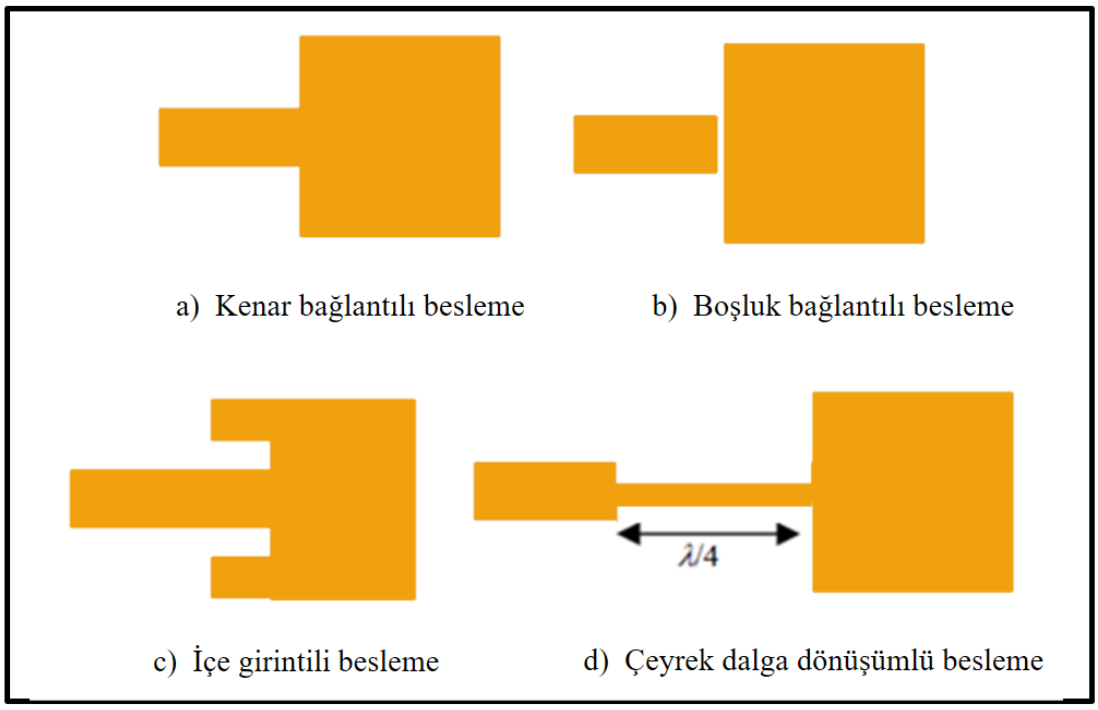


Şekil 3.13 Mikroşerit hat besleme

Bu tür besleme düzenlemesinin avantajı, beslemenin düzlemsel bir yapı sağlamak için aynı alt tabaka üzerine kazınabilmesidir. Herhangi bir ek eşleştirme elemanına ihtiyaç duymadan iyi bir empedans uyumu elde etmek için yamaya bir iç kesim eklenebilir.

Şekil 3.14 mikroşerit hat besleme teknikleri göstermektedir, bunların en çok kullanılanı çeyrek dalga dönüşümlü ve içe girintili besleme teknikleridir [66].

Dielektrik kalınlığı fazla olduğunda besleme hattından yayılan radyasyonda bir artışa sebep olabilir. Dolayısıyla, istenmeyen dalgalar oluşur, bu da antenin bant genişliğini azaltır. Ayrıca, polarizasyon sorunlarına neden olur [67].



Şekil 3.14 Mikroşerit hat besleme teknikleri

3.4.1.1 Çeyrek dalga dönüşümlü besleme

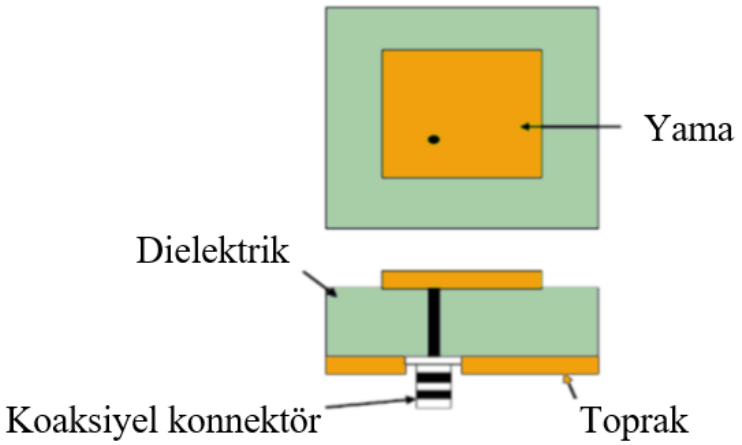
Dikdörtgen mikroşerit anteni, dikdörtgen mikroşerit iletim hattının yaklaşık yarım dalga boyu uzunluğunda bir bölümüdür. Anten, alt tabakası olarak dielektrik bir madde kullandığında, alt tabakanın bağıl dielektrik sabiti arttıkça antenin uzunluğu azalır.

3.4.1.2 İçe girintili besleme

Mikroşerit anten, Şekil 3.14 (c)'de gösterildiği gibi bir mikroşerit içe girintili hat ile beslenmiştir. Bu genellikle yüksek bir giriş empedansı sağlar ve bu nedenle beslemeyi biraz değiştirmesi gerektir. Bir yarım dalga yamasının uçlarında akım düşük olduğundan ve merkeze doğru büyüklük olarak arttığından, yama merkeze daha yakın beslenirse giriş empedansı azaltılabilir. Bunu yapmanın bir yöntemi, Şekil 3.14 (c)'de gösterildiği gibi içe girintili besleme kullanmaktır.

3.4.2 Koaksiyel besleme

Bu tür beslemede, radyo dalgalarını anten yamasına iletmek için bir koaksiyel kablo kullanılır. Koaksiyel beslemeli mikroşerit anten yapısı Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Koaksiyel beslemeli mikroşerit anten yapısı

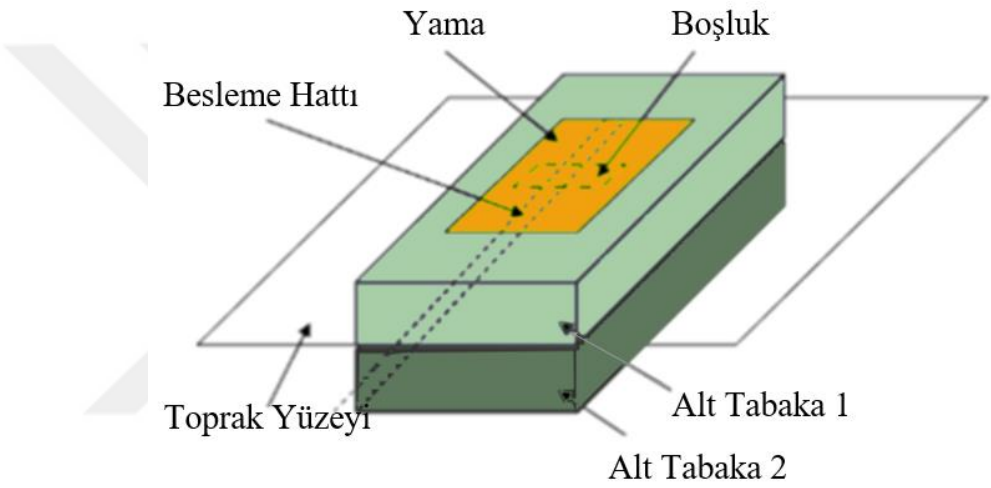
Bu tür bağlantının ana avantajı, giriş empedansına uyması için antendeki besleme iletkeninin yerini istediğiniz gibi seçebilmektedir. Ek olarak, imalatı kolaydır. Diğer taraftan, koaksiyel beslemenin dezavantajı, dar bir bant genişliği sağlamasının yanı sıra besleme konnektörünü yerleştirmek için yalıtkan üzerinde delme nedeniyle ortaya çıkan problemlerdir [65].

Genellikle geniş bir bant genişliği elde etmek için kullanılan kalın alt tabakalar için, mikroşerit anteni doğrudan beslemeye yönelik yukarıdaki her iki yöntemin de sorunları vardır. Mikroşerit hat beslemede ise, alt tabaka kalınlığındaki bir artış

genişliğini artırır dolayısıyla istenmeyen ışımayı artırır. Bu sorunları önlemek için temassız beslemeler kullanılmalıdır.

3.4.3 Açıklık kuplaj besleme

Daha önce de belirttiğimiz gibi, bu tür besleme temassız mikroşerit anten türlerinden biridir, yani doğrudan anten yamasına bağlı değildir. Açıklık kuplajlı besleme, bir toprak yüzeyi ile ayrılmış iki farklı alt tabakadan oluşur. Alt tabakanın alt tarafında, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, iki alt tabakaya ayıran toprak yüzeyindeki bir yarık yoluyla yamaya bağlanan bir mikroşerit besleme hattı vardır.

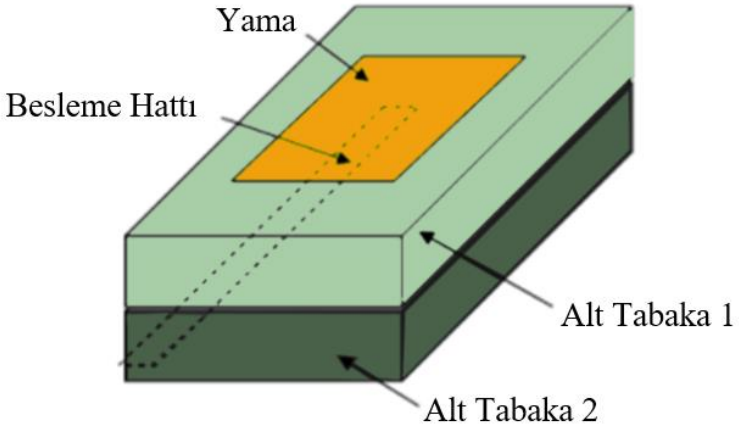


Şekil 3.16 Açıklık kuplaj beslemeli mikroşerit anten

Ortada yer alan toprak düzeyi, beslemeyi ışıma elemanından izole eder ve örüntü oluşumu ve polarizasyon saflığı için sahte ışıma girişimini en aza indirir. Bağlantı açıklığı genellikle yamanın altında ortalanır.

3.4.4 Yakınlık kuplaj besleme

Yakınlık kuplajlı besleme de bir temassız besleme türüdür. Bu tür beslemede Şekil 3.17'de görüldüğü gibi, aralarında bir besleme hattı bulunan iki yalıtkandan oluşur. Anten yaması ise üst yalıtkan (Alt Tabaka 1) üzerinde bulunur. Bu yöntem, mikroşerit anteninin kalınlığındaki genel artış nedeniyle en büyük bant genişliğine sahiptir, ayrıca sahte besleme ışımasını ortadan kaldırır. Başka bir deyişle, bant genişliğini ve yönlülüğü artırmak için çok katmanlı yakınlık bağlantılı anten kullanılmalıdır [68].



Şekil 3.17 Yakınlık kuplaj beslemeli mikroşerit anten

Tüm bu mikroşerit anten besleme tekniklerinin tasarım özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir [69].

Tablo 3.1 Mikroşerit antenlerin farklı besleme şekillerinin karşılaştırması

Karakteristikler	**Mikroşerit Hat Besleme**	**Koaksiyel Prob Besleme**	**Açıklık Kuplajlı Besleme**	**Yakınlık Kuplajlı Besleme**
İstenmeyen besleme ışıması	Çok	Çok	Az	Çok az
Polarizasyon saflığı	İyi	Zayıf	Mükemmel	Zayıf
Üretim kolaylığı	Kolay	Delme ve lehimleme gerekli	Hizalama gerekli	Hizalama gerekli
Dayanıklılık	İyi	Lehimlemeden dolayı zayıf	İyi	İyi
Empedans Uyumlandırma	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant genişliği	% 2-5	% 2-5	% 2-5	% 13

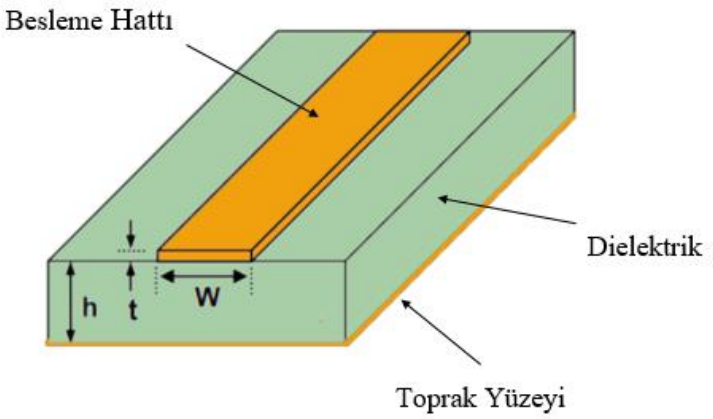
3.5 Mikroşerit Antenlerin Analiz Modelleri

Mikroşerit anten analizinin birçok yöntemi vardır; en yaygın olanları iletim hattı modeli, boşluk modeli ve tam dalga modelidir.

İletim hattı modeli, mikroşerit antenlerini incelemenin en kolay yöntemidir. Ayrıca iyi bir fiziksel kavrayış sağlamaktadır [70, 71]. O yüzden, bu tez çalışmasında, tasarım özelliklerinin belirlenmesinde iletim hattı modeli referans alınmıştır.

3.5.1 İletim hattı modeli

Dikdörtgen bir mikroşerit anten için, iletim hattı modeli, W genişliğinde ve L uzunluğunda düşük empedanslı bir iletim hattı ile ayrılmış iki yarıklı yamayı temsil eder. Dielektrik materyali kalınlığı dışında, üstte ve altta çok ince bir iletken tabaka (bakır ya da altın) vardır ve genellikle hesaplamalarda dikkate alınmaz. Mikroşerit yama, besleme hattı ve toprak yüzeyi, bir verici/alıcı olarak elektromanyetik enerji taşıyan bir iletim hattı görevi görür.

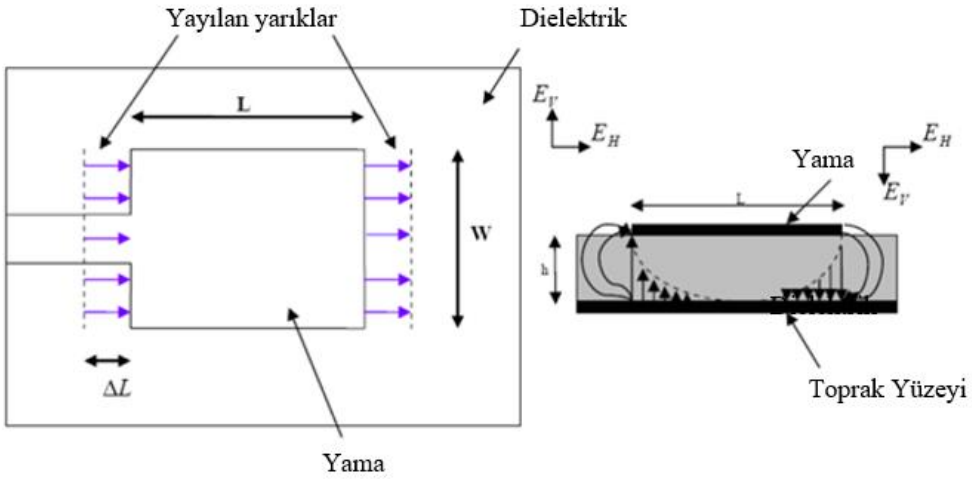


Şekil 3.18 Mikroşerit hat kesiti

3.5.1.1 Yamanın genişliği ve uzunluğu

Şekil 3.19'da görüldüğü gibi, mikroşerit anteni, L uzunluğunda bir iletim hattı ile ayrılmış ve her iki uçta da açık devre olan iki yarık ile temsil edilmektedir. Yamanın

genişliği boyunca, açık uçlar nedeniyle voltaj maksimum ve akım minimumdur.



a) b)

Şekil 3.19 Mikroşerit antenin a) üstten ve b) yandan görünümü

Temel modda çalışmak için, yamanın uzunluğu λ/2 'den biraz daha az olmalıdır, burada λ dielektrik ortamdaki dalga boyudur ve $\lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_{reff}}$'e eşittir, burada λ_0 boşluktaki dalga boyudur. Yamanın genişliği (W) denklem (3.14) kullanılarak hesaplanabilir [47].

$$W = \frac{c}{2\, f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}} \tag{3.14}$$

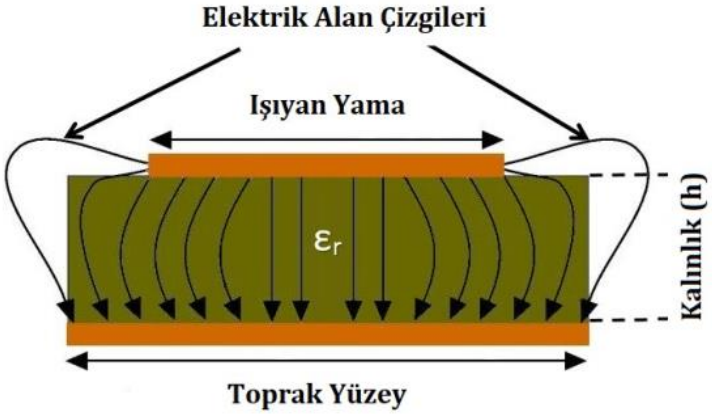
Burada;

c : Işığın boşluktaki hızı.

f_r : Çalışma frekansı.

ε_r : Dielektrik sabiti.

Şekil 3.19 (b)'ye bakıldığında, genişliğin iki kenarındaki elektrik alan çizgileri zıt yönlerdedir (E_V). Bunlar faz dışıdır ve bu nedenle birbirlerini iptal ederler. (E_H) fazında olan iki bileşen, elde edilen alanları birleştirerek maksimum yayılan alanını verir.



Şekil 3.20 Bir iletim hattındaki elektrik alan çizgileri [38]

Şekil 3.20'de gösterildiği gibi yamadan gelen tüm elektrik alanı yalıtkana geri döndüğü için, bu alanın bir kısmı havadan geçtikten sonra yalıtkana geri döner ve bu nedenle dielektrik sabitinde küçük bir fark olacaktır. Efektif dielektrik sabiti (ε_{reff}), hava dielektrik sabitini hesaba katan bir yalıtkandaki dielektrik sabitidir.

ε_{reff} denklemi şu şekilde verilir [66]:

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{W}}}\right] \tag{3.15}$$

Burada;

ε_r: Dielektrik sabiti.

W: Yama genişliği.

h : Yalıtkan malzeme kalınlığı.

Elektrik alan çizgisi havada hareket ettiğinden, yamanın uzunluğu her iki tarafta uzar. Şekil 3.19 (a), yamanın uzunluğu boyunca yayılan iki yarığı göstermektedir. Uzatılmış uzunluk ΔL aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\Delta L = 0.412h\frac{(\varepsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\varepsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \tag{3.16}$$

Efektif uzunluk L_{eff} aşağıdaki denklemle hesaplanabilir [72]:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \tag{3.17}$$

Böylece, yamamın gerçek uzunluğu denklem (3.18) kullanılarak hesaplanabilir [72]:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \tag{3.18}$$

3.6 Mikroşerit Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları

Daha önce de belirttiğimiz gibi, bu tür antenlerin küçük boyutları, üretim kolaylığı ve nispeten ucuz maliyeti nedeniyle özellikle kablosuz uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle bu anten genellikle cep telefonları gibi cihazlarda kullanılmaktadır.

Mikroşerit antenin bu kadar geniş bir alana yayılmasını sağlayan avantajları vardır:

- Hafif ve küçük hacimli olması,
- Kolay ve ucuz imalatı,
- Beslemesi kolaydır (koaksiyel kablo, mikroşerit hat vb.),
- Düşük güç tüketimi,
- Yönsüz ışıma yapabilmesi,
- Yönlülüğü artırmak için bir dizide kolayca kullanılabilmesi,
- Doğrusal ve dairesel kutuplanmış ışıma yapabilmesidir**.**

Mikroşerit antenin bu avantajlara sahip olmasına rağmen, aşağıdaki gibi bazı dezavantajları da vardır:

- Dar bant genişliğine sahip olması,
- Düşük kazançlı olması,
- Yalnızca mikrodalga frekanslarında ve üzerinde kullanılır (alt katman daha düşük frekanslarda çok büyür).
- Kayıplarının fazla olması.

3.7 Mikroşerit antenlerin kullanım alanları

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte mikroşerit antenlerin kullanım alanları artmıştır ve bunlardan en önemlileri aşağıda gibi sıralanmıştır:

- Uydu haberleşmesi,
- Radarlar,
- Uçak ve füzelerin uzaktan kontrolü,
- Sıkışma cihazları,
- Nesnelerin interneti,
- Hücresel haberleşme cihazları.

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde yüksek lisans çalışması sürecinde kullanılan materyaller, simülasyon programı ve ölçüm cihazından da kısaca bahsedilmiştir.

4.1 Materyaller

4.1.1 FR4 epoksi levha

Anten tasarlanırken alt tabaka malzemesinin aşağıdaki parametreleri dikkate alınmalıdır [38]:

- Dielektrik sabiti (ε_r) ve kayıp tanjantı (tanδ)
- Sıcaklık, nem ve yıpranma etkileri
- Mekanik gereksinimleri
- Maliyeti

Bu tez çalışmasında tasarlanan mikroşerit anteni imal etmek için, kolay elde edilebilmesi, ucuz maliyeti nedeniyle dielektrik sabiti (ε_r), kalınlığı (h) olan çift taraflı bakır plaket FR4 (Epoksi) yalıtkan alt tabaka malzemesi olarak kullanılmıştır. Genel olarak, baskı antenlerinin maliyeti alt tabaka malzemesine bağlıdır.



Şekil 4.1 Çift taraflı FR4 epoksi levha

FR4 alt tabakanın özellikleri Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Alt tabaka malzeme özellikleri

Alt tabaka malzeme	Dielektrik Sabiti ε_r	Kayıp Tanjantı Tanδ	Dielektrik Kalınlığı (h)	Bakır Kalınlığı
FR4 epoksi	4,3	0,015	1,6 mm	35µm

4.1.2 SMA konnektör

SMA (Alt Minyatür sürüm A) konnektörleri, günümüzde en yaygın olarak kullanılan koaksiyel RF konektörleridir. Şekil 4.2'de kullanılacak SMA dişi konnektörü gösterilmektedir.



Şekil 4.2 SMA dişi konnektör

4.2 Yüksek Frekans Yapı Simülatörü (HFSS)

HFSS kullanımda sonlu yöntem ile çözen yazılımsal bir simülatördür. Bu yazılım, geometrik modeli otomatik olarak çok sayıda dörtyüzlüye böler, burada tek bir dörtyüzlü dört kenarlı bir piramittir. Bu dörtyüzlü topluluğu, sonlu eleman ağı olarak adlandırılır. Her eleman farklı bir malzeme içerebilir. Bu nedenle, iki farklı malzeme arasındaki arayüz, eleman sınırları ile çakışmalıdır.

HFSS ile mühendisler saçılma matrisi parametrelerini (S, Y, Z parametreleri) çıkarabilir; üç boyutlu elektromanyetik alanları görselleştirebilir. Her HFSS çözücü, yalnızca geometriyi, malzeme özelliklerini ve istenen çıktıyı belirtmeniz gereken güçlü, otomatikleştirilmiş bir çözüm sürecini temel alır. Oradan HFSS, seçilen çözüm teknolojisini kullanarak sorunu çözmek için otomatik olarak uygun, verimli ve doğru

bir ağ oluşturacaktır [73]. Bu tez çalışmasında, mikroşerit anten modeli (ANSYS HFSS, 19 paketi) programı yardımıyla tasarlanmıştır [74].

HFSS uygulamaları şunlardır:

- Paket Modelleme – BGA, QFP, Flip-Chip
- PCB Kartı Modelleme – Güç/Toprak düzlemleri, Arka Planlar
- Silikon/GaAs - Spiral İndüktörler, Transformatörler
- EMC/EMI – Kuplaj, Yakın veya Uzak Alan ışıması
- Antenler/Mobil İletişim – Mikroşeritler, Dipoller, Kornalar, Uyumlu Cep Telefonu Antenler, Dörtlü Helis, Özgül Soğurma Oranı (SAR), Sonsuz Diziler, Radar Kesiti (RCS), Frekans Seçici Yüzeyler (FSS)
- Konektörler – Coax, SFP/XFP, Backplane, Transitions
- Dalga Kılavuzu – Filtreler, Rezonatörler, Geçişler, Bağlayıcılar
- Filtreler – Boşluk Filtreleri, Mikroşerit, Dielektrik

HFSS programı, basit bir monopol antenden karmaşık dizi antenlerin tasarımına kadar çok çeşitli optimizasyon çalışmaları ve performans izleme için tercih edilen yazılımdır. Radyasyon örüntüsü, geri dönüş kayıbı (RL), bant genişliği, VSWR, yönlülük ve kazanç gibi antenlerin birçok elektriksel özelliği bu simülatör kullanılarak görüntülenebilir ve optimize edilebilir.

HFSS'nin özelliklerini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

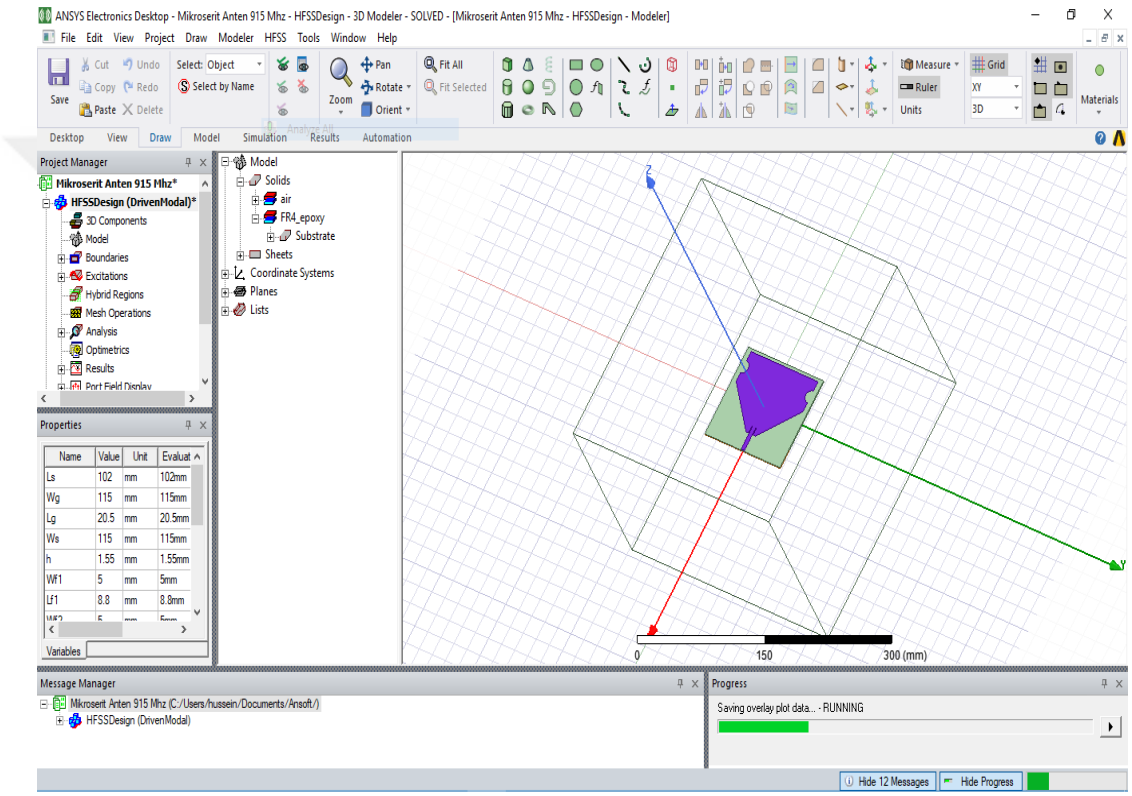
- S parametreleri.
- Giriş empedans hesaplaması.
- Uzak alan hesaplaması.
- Radyasyon kayıpları.
- Maddi kayıplar.
- Optimizasyon, doğruluk ve istatistiksel analiz.

ANSYS HFSS, elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ederek çözümler sunar. ANSYS HFSS, elektromanyetik problemlerin çözümü için en güçlü

sayısal yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanarak analiz gerçekleştirir.

4.2.1 HFSS arayüzü

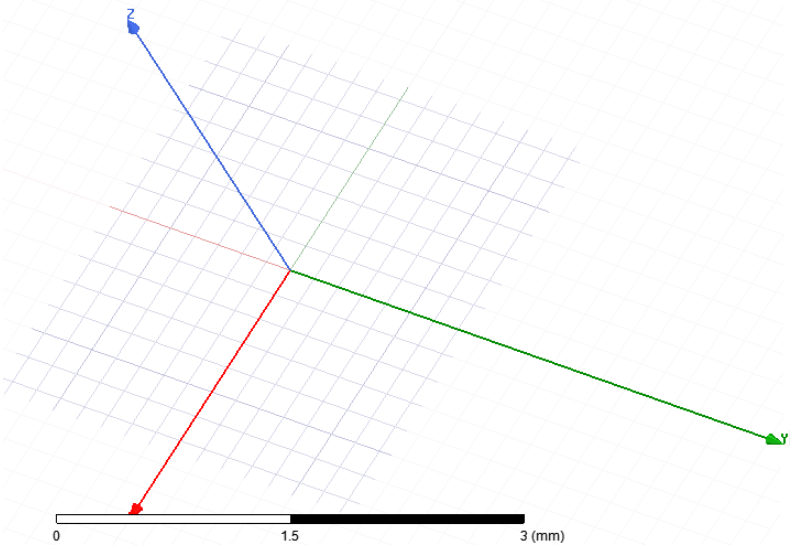
Ana HFSS arayüzü, grafik kullanıcı arayüzünün ana bileşenlerini gösteren Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 ANSYS HFSS kullanıcı arayüzü

- **3D Modelleme penceresi (3D Modeler window):**

Bu pencere, model görünüm alanından ve geçmiş ağacından oluşur. Geçmiş ağacı, model görünüm alanında gerçekleştirilen eylemleri belgeler ve model görünüm alanında nesneleri seçmek için alternatif bir yol sağlar.



Şekil 4.4 HFSS 3D modelleme penceresi

- **Özellikler (Properties):**

Özellikler penceresi, seçilen bir nesnenin malzeme ve görüntü özellikleri hakkındaki bilgileri görüntüler.

- **İlerleme (Progress):**

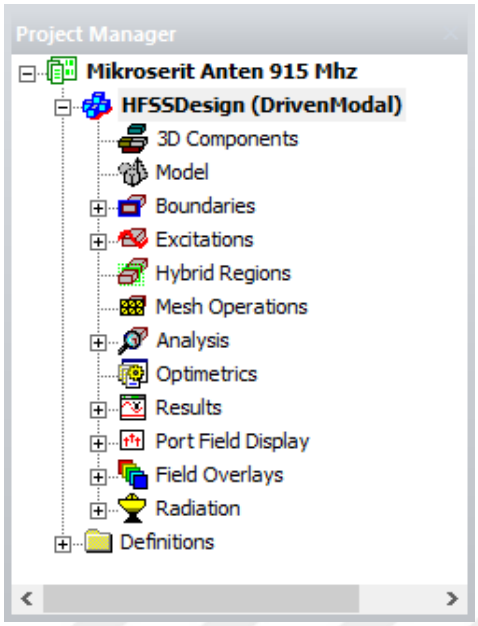
Bu pencere, çözümün ilerlemesini izlemek için bir simülasyon çalışırken kullanılır.

- **Mesaj yöneticisi (Message manager):**

Bu pencere, bir projenin geliştirilmesiyle ilgili mesajları görüntüler (tasarımın kurulumuyla ilgili hata mesajları gibi).

- **Proje yöneticisi (Project manager):**

Proje yöneticisi penceresi, tüm açık HFSS projeleriyle ilgili ayrıntıları görüntüler. Her proje nihai olarak bir geometrik model, sınır koşulları ve malzeme atamaları ile saha çözümü ve işlem sonrası bilgileri içerir. HFSS kullanan bir projenin aşamalarını gösteren proje yöneticisi paneli Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Proje yöneticisi penceresi

4.3 Vektör Network Analizör (VNA) Cihazı

Bu tezde gerçekleştirilen pratik çalışmalar, vektör network analizör cihazı aracılığıyla yapılmıştır. Anritsu MS2028C 2 port 10 KHz - 20 GHz taşınabilir VNA cihazı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Vektör network analizör cihazı, geri dönüş kaybı, giriş empedansı, VSWR ve diğer birçok ağ karakteristiğinin okunması için bir ağdan iletilen ve yansıyan dalgaları işler. Matematiksel bir hata düzeltme / kalibrasyon tekniği kullanır [75]. Ölçümleri almak için cihazın ilk frekansı 500 MHz ve son frekansı 1500 MHz olarak ayarlanmış.



Şekil 4.6 Anritsu MS2028C VNA cihazı [76]

4.4 Dikdörtgen Mikroşerit Antenin Tasarım Parametreleri

Dikdörtgen mikroşerit anten tasarımında, ilk olarak çalışma frekansını (f_r), dielektrik sabitini (ε_r) ve dielektrik kalınlığını (h) belirlenmesi gerekir.

4.4.1 Çalışma frekansı

Bu tez çalışmasında 915 MHz taşıyıcı frekansı tasarlanan mikroşerit antenin rezonans frekansı olarak belirlenmiştir.

4.4.2 Dielektrik sabiti

Mikroşerit antenleri tasarlamak için kullanılabilecek çok sayıda substrat vardır ve bunların dielektrik sabitleri genellikle ($2{,}2 \leq \varepsilon_r \leq 12$) aralığında seçilmektedir. Dielektrik sabiti düşük olan yalıtkan malzemelerden yapılan tasarımlarda boyutların artırılması pahasına daha yüksek verim ve bant genişliği elde edilir [24].

4.4.3 Dielektrik kalınlığı (h)

Dielektrik kalınlığı, genel olarak ($0{,}003\ \lambda_0 \leq h \leq 0{,}05\ \lambda_0$) aralığında seçilmektedir. Yalıtkan kalınlığının arttırılması verimliliği %90'lara, bant genişliğini ise %35'lere kadar çıkarabilmektedir [47].

Kısacası, mikroşerit yama anten tasarımında en iyi sonucu alabilmek için en önemli parametrelerden biri olan çalışma frekansı belirlendikten sonra yalıtkan malzeme kalınlığı ile dielektrik sabiti arasında optimizasyon yapılması gerekmektedir. Buna ek olarak, mikroşerit yama anten tasarımının önemli görevlerinden biri uygun besleme konumunun seçilmesidir.

Bu tez çalışmasında, 915 MHz frekansında çalışacak şekilde bir dikdörtgen mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiş.

4.4.4 Anten yamasının boyutları

Yamanın genişliğini ve uzunluğunu belirlemek için aşağıdaki adımları uygulanır:

Adım 1:

Yamanın genişliğini (W) bulmak için Bağıntı (4.1) kullanılır.

$$W = \frac{c}{2\,f_r}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}} \tag{4.1}$$

$$W = \frac{3*10^{11}}{2*915*10^{6}}\sqrt{\frac{2}{4{,}3+1}} \tag{4.2}$$

Bağıntı (4.2)'den ($W = 100{,}7$ mm) elde edilmiştir.

Adım 2:

ε_{reff} efektif dielektrik sabiti bağıntı (4.3)'tan hesaplanır.

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{W}}}\right] \tag{4.3}$$

$$\varepsilon_{reff} = \frac{4{,}3+1}{2} + \frac{4{,}3-1}{2}\left[\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12*1{,}6}{100{,}7}}}\right] \tag{4.4}$$

Böylece, bağıntı (4.4)'ten $(\varepsilon_{reff} = 4{,}162)$ olarak belirlenmiştir.

Adım 3:

Denklem (4.5)'ten üretilen artırımlı uzunluk (ΔL) hesaplanır.

$$\Delta L = 0.412h\frac{\left(\varepsilon_{reff}+0{,}3\right)\left(\frac{W}{h}+0{,}264\right)}{\left(\varepsilon_{reff}-0{,}258\right)\left(\frac{W}{h}+0{,}8\right)} \tag{4.5}$$

$$\Delta L = 0{,}412 * 1{,}55\,\frac{\left(4{,}162+0{,}3\right)\left(\frac{100{,}7}{1{,}55}+0{,}264\right)}{\left(4{,}162-0{,}258\right)\left(\frac{100{,}7}{1{,}55}+0{,}8\right)} \tag{4.6}$$

Böylece, bağıntı (4.6)'ten $(\Delta L = 0{,}747)$ olarak belirlenmiştir.

Adım 4:

L_{eff} yamanın efektif uzunluğu bağıntı (4.7) kullanılarak hesaplanmış.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \quad (4.7)$$

$$L_{eff} = \frac{3 * 10^{11}}{2 * 915 * 10^6\sqrt{4,162}} = 80,35 \quad (4.8)$$

Adım 5:

Yamanın uzunluğunu (L) bulmak için bağıntı (4.9) kullanılır.

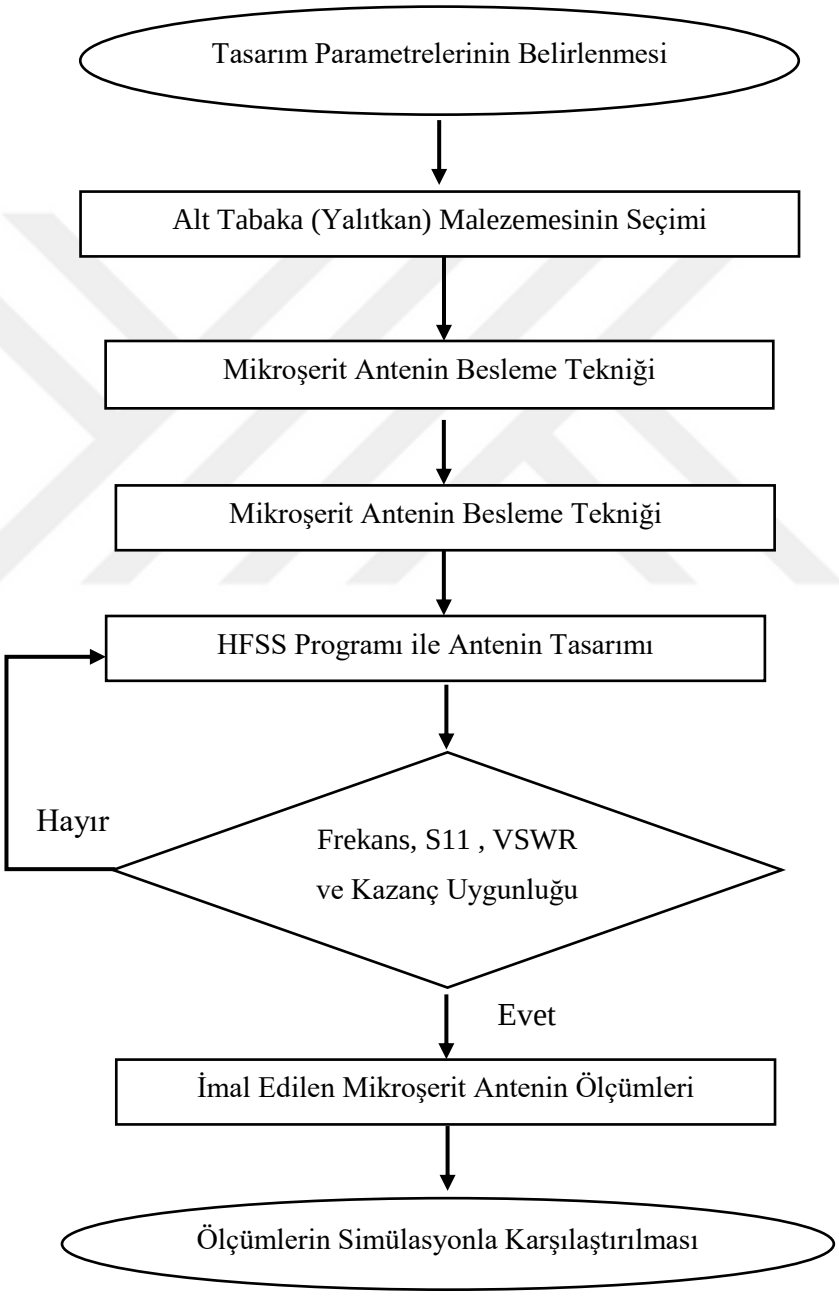
$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (4.9)$$

$$L = 80,35 - 2(0,747) = 78,85 \quad (4.10)$$

Böylece, önerilen anten yamasının boyutları: (W = 100,7 mm ve L = 78,85) elde edilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, HFSS programıyla simüle edilen ve VNA cihazıyla ölçülen mikroşerit antenin analizleri yapılıp parametrik ve karakteristik özellikleri ele alınacaktır. Mikroşerit anten tasarımı yapılırken en iyi parametrelerin seçilebilmesi için Şekil 5.1'de görüldüğü gibi akış şeması izlenmiştir.

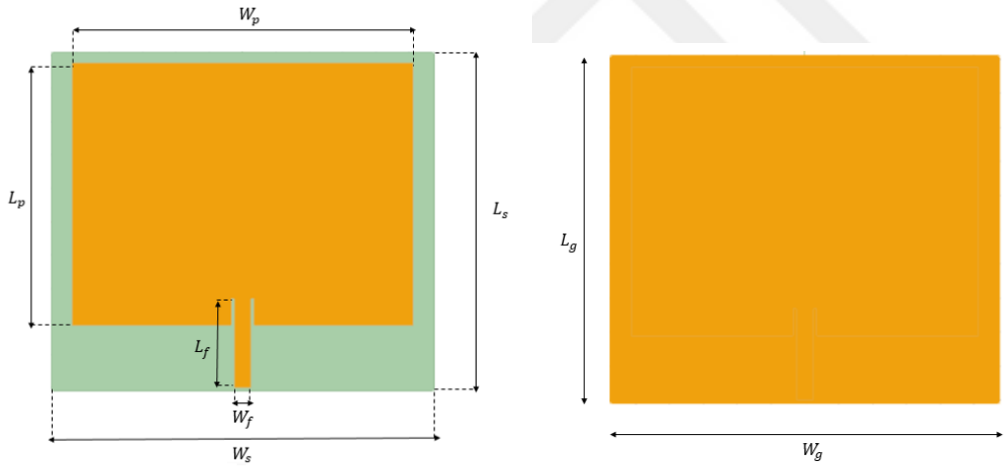


Şekil 5.1 Anten tasarım aşamalarının akış şeması

5.1 Dikdörtgen Mikroşerit Antenin Simülasyonu

5.1.1 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımı

Öncelikle dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımı hesaplamalara göre yapılmıştır. Anten giriş empedansları geleneksel 50 ohm hat empedansından farklı olduğundan, besleme hattı ile anten arasında genellikle eşleştirme gerekir. Besleme hattının konumu uygun şekilde seçilerek eşleştirme sağlanabilir. Tasarımımız için mikroşerit anten geliştirmede içe girintili (inset fed) besleme yöntemini seçtik çünkü birçok uygulamada en popüler yöntemler arasında yer almaktadır. Bu modelde, giriş empedansının yüksek değerinden kaçınarak, yama üzerindeki besleme noktasının konumunu değiştirebiliriz. Aslında giriş empedansının değeri, dikdörtgen yama merkeze yakın beslenirse azalır ve yamanın sınırına yakın artar. Diğer taraftan, içe girintili besleme yöntemi, imalat ve eşleştirmedeki basitliği ve düşük sahte radyasyona sahip olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımı Şekil 5.2'de görüldüğü gibidir.



a) Önden b) Arkadan

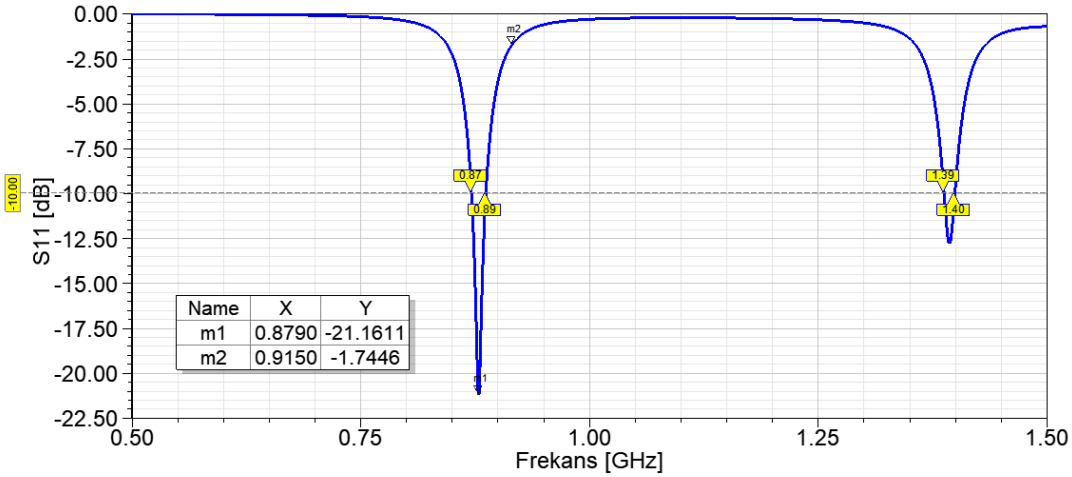
Şekil 5.2 Mikroşerit antenin ilk tasarımları

Tablo 5.1 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarım parametreleri

Parametre	**Değer**
Çalışma Frekansı (f_r)	915 MHz
Dielektrik Sabiti (ε_r)	4,3
Malzememenin Kalınlığı (h)	1,6 mm
Yama Genişliği (W_p)	100,7 mm

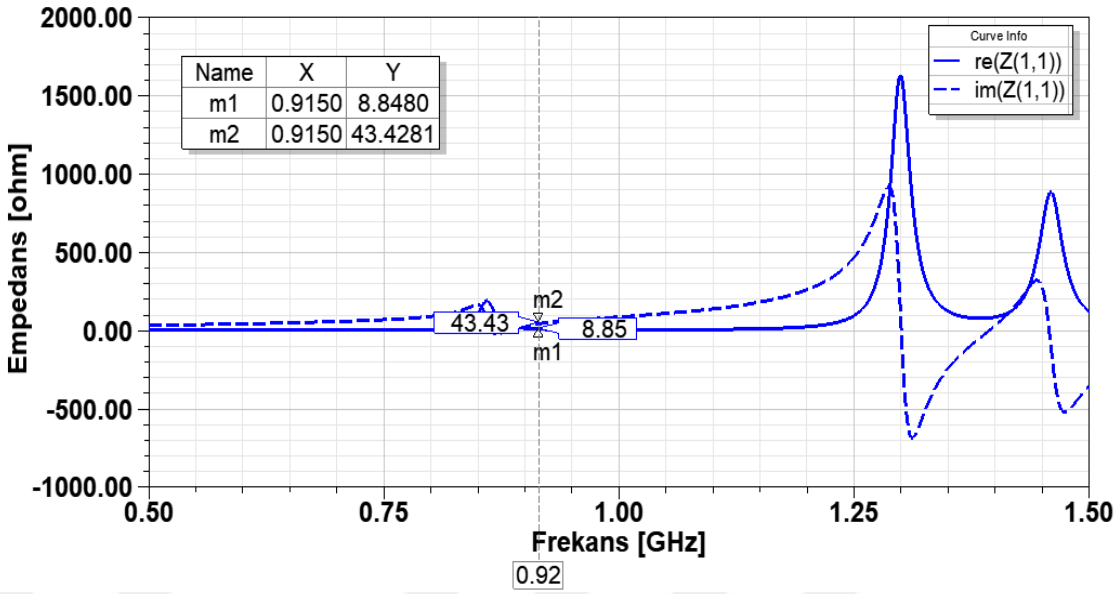
Yama Uzunluğu (L_p)	78,85 mm
Besleme Genişliği (W_f)	2,32 mm
Besleme Uzunluğu (L_f)	26,8 mm
Toprak Genişliği (W_g)	115 mm
Toprak Uzunluğu (L_g)	102 mm
Malzemenin Genişliği (W_s)	115 mm
Malzemenin Uzunluğu (L_s)	102 mm

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının geri dönüş kaybı (S_{11}) gösterilmiştir. Geri dönüş kaybı, iletim hattından antene ulaşan sinyaldeki güç kaybını temsil eder ve aralarındaki uyumsuzluk hakkında fikir verir. Şekildeki m2 değeri S11'in 915 MHz frekansındaki değerinin -1.744 dB olduğunu göstermektedir. Ancak en düşük değeri 879 MHz frekansında -21,16 dB'dir ve bant genişliği 20 MHz civarındadır. Ayrıca şekilde gösterildiği gibi istenen çalışma frekansında yaklaşık 35 MHz'lik bir kayma vardır.



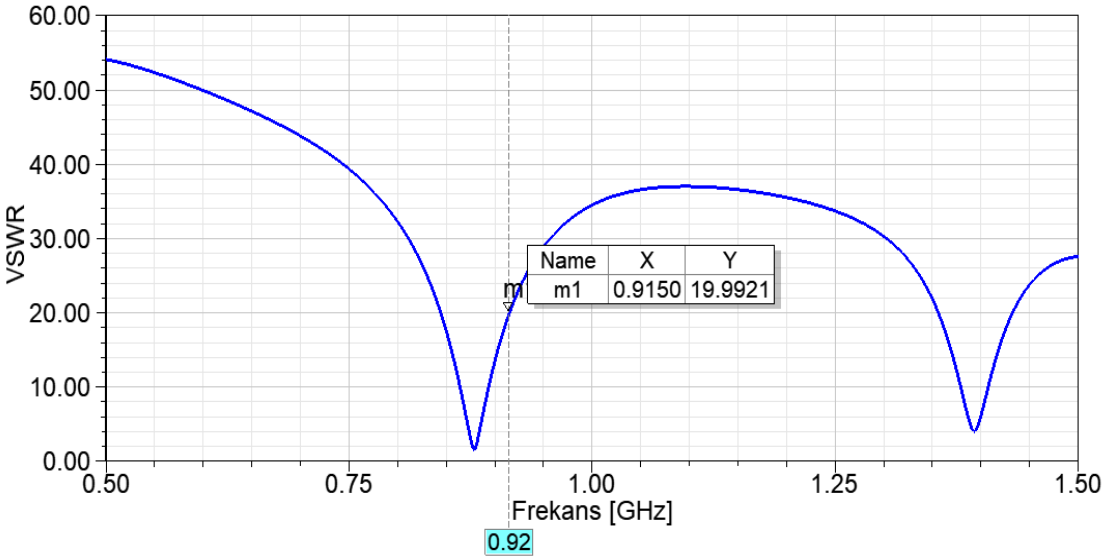
Şekil 5.3 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının geri dönüş kaybı

Şekil 5.4, dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının empedans grafiğini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi m1 ve m2 değerleri baz alındığında antenin 915 MHz frekansında bir giriş empedansı eşleşmesinin olduğunu gösterir. Ancak empedans değeri 43 Ω olup 50'ye çok yakın olmalıdır.



Şekil 5.4 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının empedans grafiği

Şekil 5.5, dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının VSWR grafiğini göstermektedir. Gerilim duran dalga oranı (VSWR), maksimum gerilimin minimum gerilime oranıdır; iyi bir performans için VSWR 1'e yakın olmalıdır. Şekildeki m1 değeri VSWR'in 915 MHz frekansındaki değerinin 19,9 olduğunu göstermektedir. Bu değer oldukça büyüktür ve genellikle VSWR değerinin 2'yi geçmemesi önerilir.

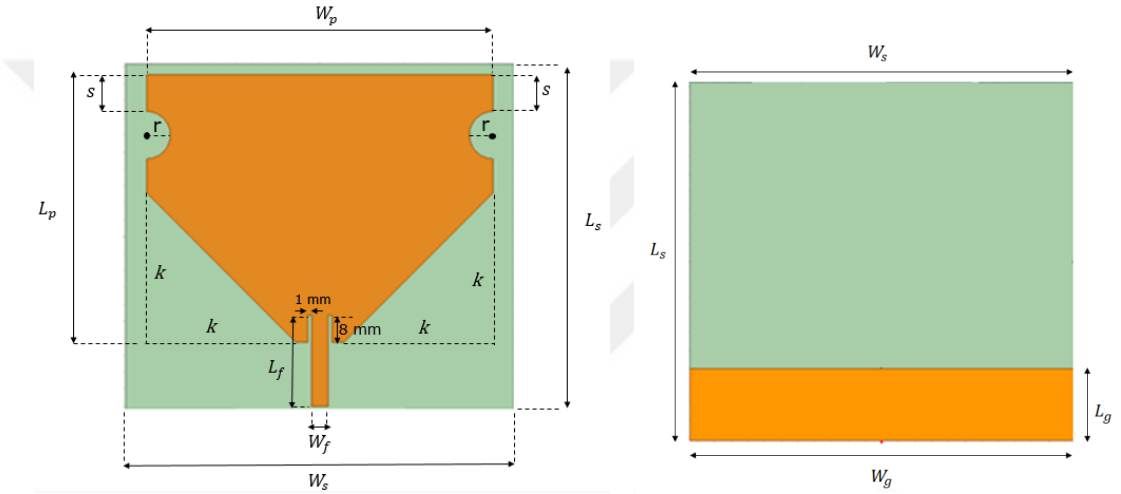


Şekil 5.5 Dikdörtgen mikroşerit antenin ilk tasarımının VSWR grafiği

5.1.2 Dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarımı

Bu tasarımda, mikroşerit antenin en iyi performansı elde edilmek, bant genişliğini artırmak ve istenmeyen frekansları yok etmek için antenin toprak katmanı azaltılmış ve ayrıca yamanın kenarlarından ve alt köşelerinden kesimler yapılarak mikroşerit antenin ışıma özellikleri optimize edilmiştir. Şekil 5.6 HFSS programında tasarlanan mikroşerit antenin son tasarımının görünümleri gösterir. Bu değişiklerin sayesinda tasarlanan anten verimliliği artmıştır.

Dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarım parametreleri ise Tablo 5.2'de verilmiştir.



a) Önden b) Arkadan

Şekil 5.6 Mikroşerit antenin son tasarımları

Tablo 5.2 Dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarım parametreleri

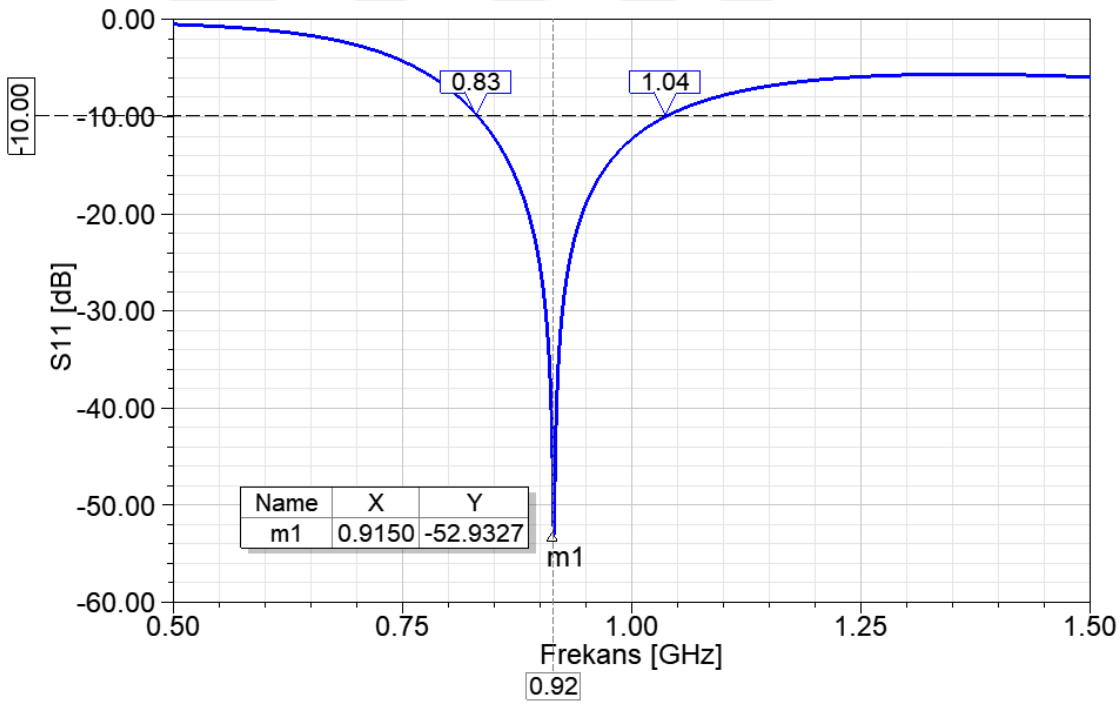
Parametre	**Değer**
Kenardaki Yarım Dairenin Yarıçapı (r)	7 mm
Yamanın Üst Kısmı (s)	10,5 mm
Yamada Alt Köşelerden Kesimler (k)	44 mm
Malzemenin Kalınlığı (h)	1,6 mm
Dielektrik Sabiti (ε_r)	4,3
Çalışma Frekansı (f_r)	915 MHz
Yama Genişliği (W_p)	102,4 mm
Yama Uzunluğu (L_p)	79 mm
Besleme Genişliği (W_f)	5 mm

Besleme Uzunluğu (L_f)	26,8 mm
Toprak Genişliği (W_g)	115 mm
Toprak Uzunluğu (L_g)	20,5 mm
Malzemenin Genişliği (W_s)	115 mm
Malzemenin Uzunluğu (L_s)	102 mm

5.1.3 Önerilen dikdörtgen mikroşerit anteninin özellikleri

Geri Dönüş Kaybı (S_{11}):

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarımının iyi bir geri dönüş kaybı elde edilmiştir. Şekildeki m1 değeri S11'in 915 MHz frekansındaki değerinin -52,9 dB'dir ve bant genişliği 210 MHz civarındadır. Dolayısıyla, bu antenin sinyalleri iletirken çok fazla kayıp yaşamadığını gösterir.

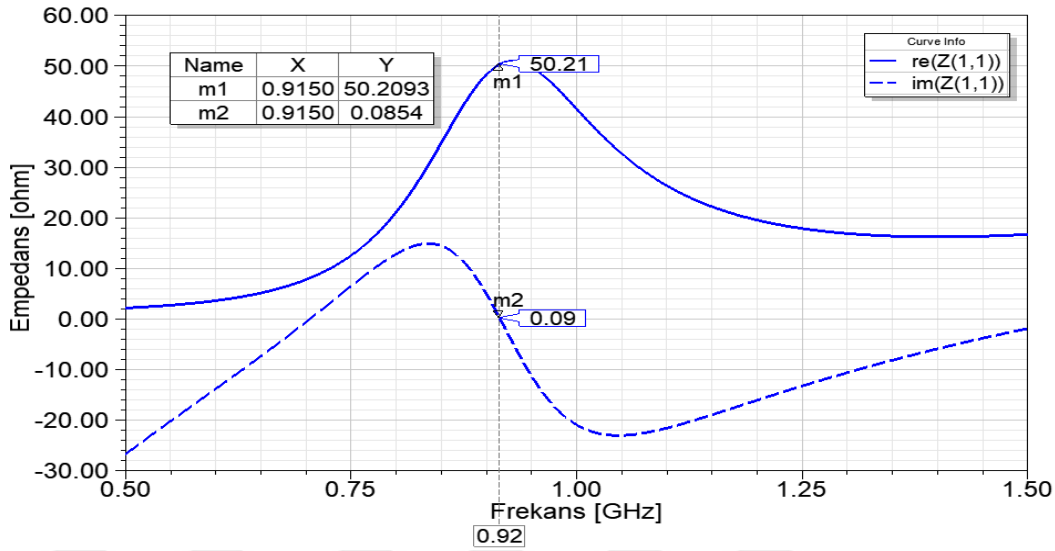


Şekil 5.7 Önerilen mikroşerit antenin geri dönüş kaybı

Empedans:

Şekil 5.8, dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarımının empedans diyagramını göstermektedir. Görüldüğü gibi m1 ve m2 değerleri baz alındığında antenin 915 MHz

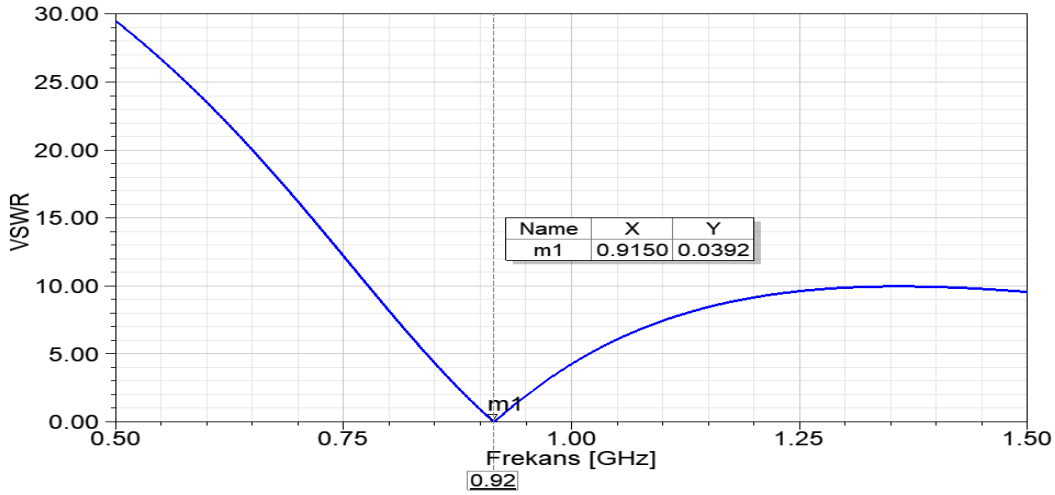
frekansında bir giriş empedansı çok iyi eşleşmesinin olduğunu gösterir çünkü 50 Ω'a yakın bir değeri elde edilmiştir.



Şekil 5.8 Önerilen mikroşerit antenin son tasarımının empedans grafiği

VSWR:

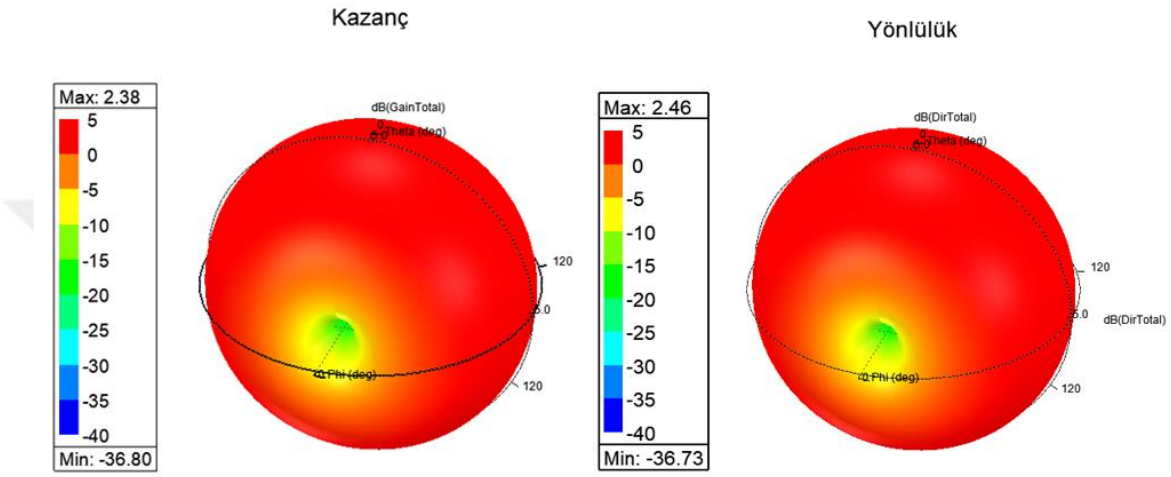
Şekil 5.9, 915 MHz tasarım frekansımızda iç girintili besleme yöntemini kullanan dikdörtgen mikroşerit anten için voltaj duran dalga oranını (VSWR) göstermektedir. Bu tez çalışmasının daha önce VSWR'nin empedans uyumsuzluğunun bir ölçüsü olduğundan bahsetmiştik. Grafikten de görülebileceği gibi, elde edilen VSWR 0,4'dir. Dolayısıyla, uyumsuzluk seviyesi çok yüksek olmadığı için bu iyi bir değer olarak kabul edilir. Yüksek bir VSWR, bağlantı noktasının uygun şekilde eşleşmediği anlamına gelir. Böylece bu değer anten portunun uygun şekilde eşleştiğini kanıtlar.



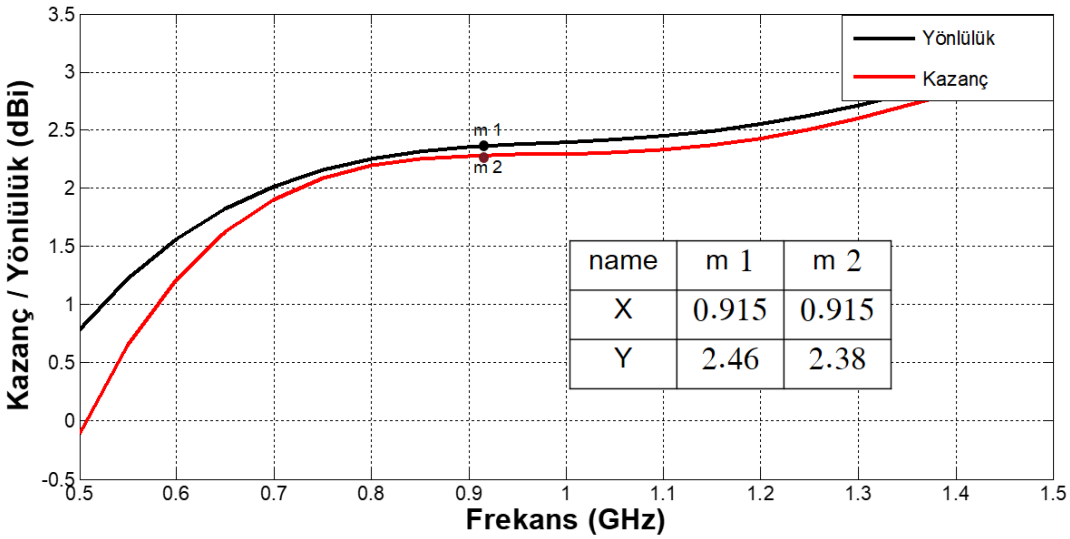
Şekil 5.9 Önerilen mikroşerit antenin VSWR grafiği

Kazanç ve Yönlülük:

Şekil 5.10, dikdörtgen mikroşerit antenin son tasarımının kazanç ve yönlülük üç boyutlu grafiğini göstermektedir. Bir antenin kazancı, toplam giriş gücünün belirli bir yönde nasıl dönüştürüldüğünü temsil eder. Şekilde görüldüğü gibi, elde edilen kazanç 2,38 dB'dir. Şekil 5.11 ise kazanç ve yönlülük eğrisi gösterir.



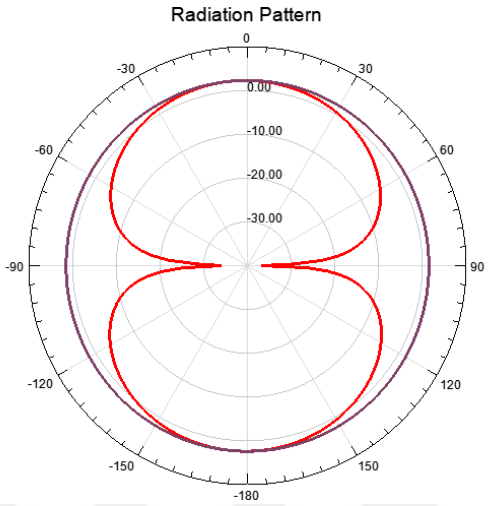
Şekil 5.10 Önerilen mikroşerit antenin son tasarımının üç boyutlu kazanç ve yönlülük grafiği



Şekil 5.11 Önerilen mikroşerit antenin son tasarımının kazanç ve yönlülük eğrisi

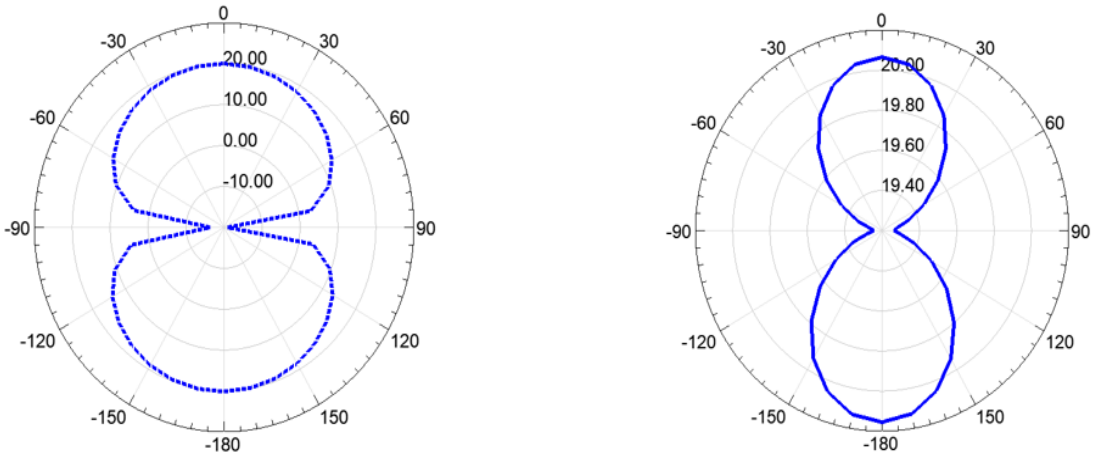
Işıma Örüntüsü:

Önerilen antenin iki boyutlu ışıma örüntüsü şekil 5.12'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, önerilen antenin çok yönlü bir modeli gösterilmektedir.



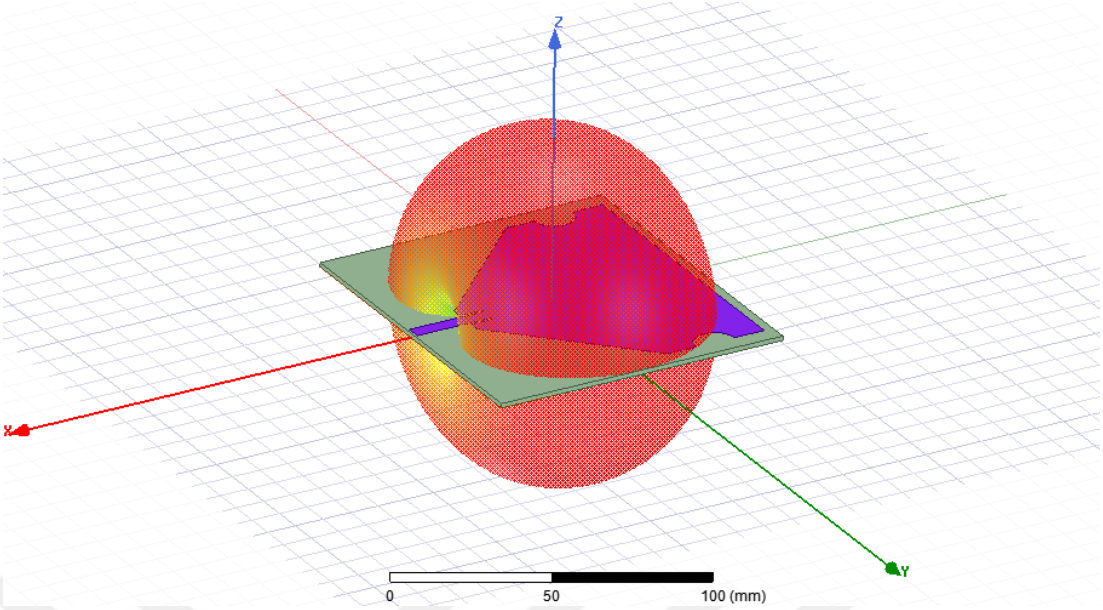
Şekil 5.12 Önerilen antenin 2D ışıma örüntüsü

Önerilen anten için toplam ışıma paternleri, Phi= -180 derece için 915 MHz frekansında ışıma örüntüsü Şekil 5.13 (a)'da (y-z düzlemi) E düzleminde, şekil 5.13 (b)'de ise (x-z düzlemi) H düzleminde gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi E-düzlemi ve H-düzlemi ışıma modelleri, tüm frekans aralığı boyunca kararlıdır. Şekil 5.14'te ise üç boyutlu düzlemde ışıma örüntüsü gösterilmiştir.



a) E- düzlemi b) H- düzlemi

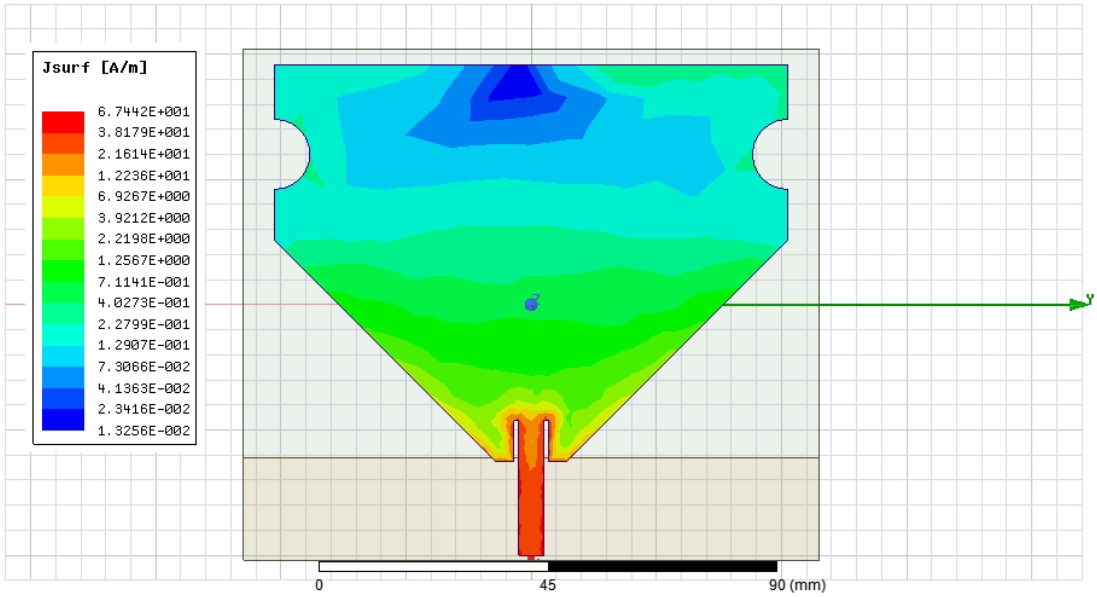
Şekil 5.13 Önerilen antenin 2D (E ve H düzleminde) ışıma örüntüsü



Şekil 5.14 3D ışıma örüntüsü

Akım Dağılımı:

Şekil 5.15, önerilen dikdörtgen mikroşerit antenin 915 MHz'de akım dağılımını göstermektedir. Maximum yüzey akım yoğunluğu 6,7 A/m olarak bulunmuş ve akımın çoğunun yamanın alt kenarında ve ayrıca besleme hattı boyunca yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 5.15 Önerilen antenin simülasyon yüzey akım dağılımı

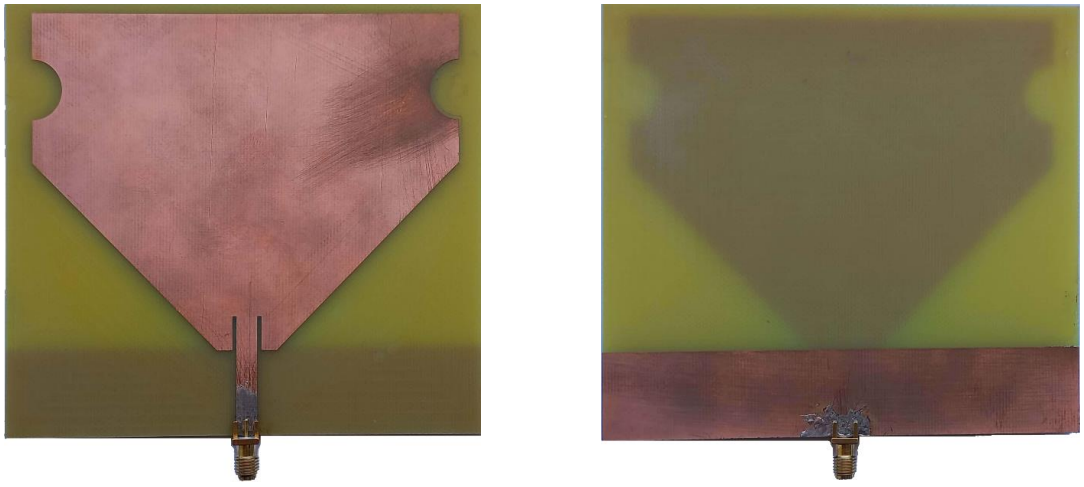
Tablo 5.3, anten simülasyonunun ilk tasarım parametrelerinin son tasarım ile karşılaştırmasını göstermektedir.

Tablo 5.3 Antenin ilk tasarımı ile son tasarımın parametrelerinin karşılaştırılması

Antenin	**S11**	**Bant genişiliği**	**Empedans**	**VSWR**
İlk Tasarmı	880 MHz'de -21,16 dB	20 MHz (870 – 890) MHz	43 Ω	915 MHz'de 19
Son Tasarımı	915 MHz'de -52,92 dB	210 MHz (830 – 1040) MHz	50,2 Ω	915 MHz'de 0,04

5.2 Anten ölçümlerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi, HFSS programıyla tasarlanan mikroşerit anten, FR4 malzemesi kullanılarak üretildi.



a) Önden b) Arkadan

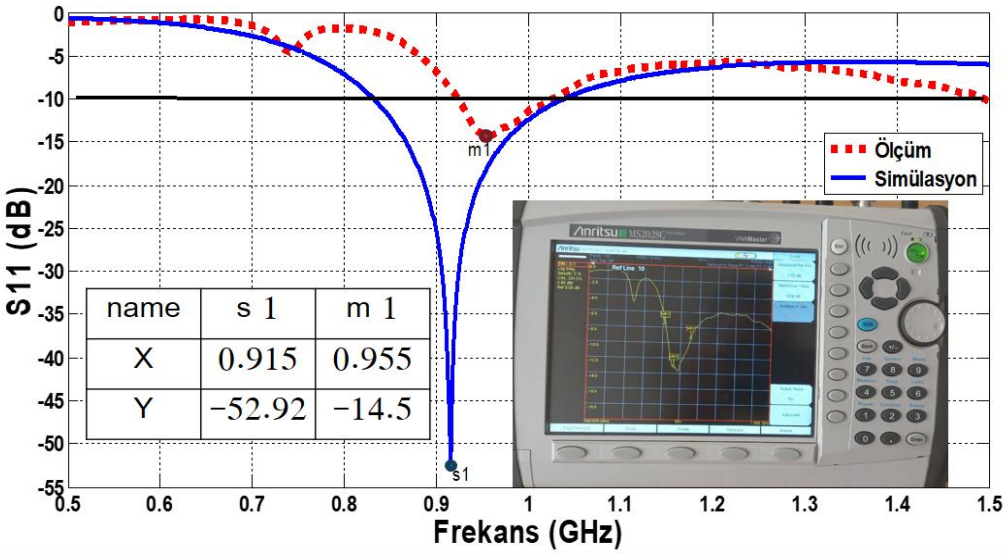
Şekil 5.16 Üretilen mikroşerit antenin görünümleri

Bu tez çalışmasında, Şekil 5.17'de görüldüğü gibi Anritsu MS2028C VNA cihazıyla mikroşerit antenin ölçümleri yapılmıştır.



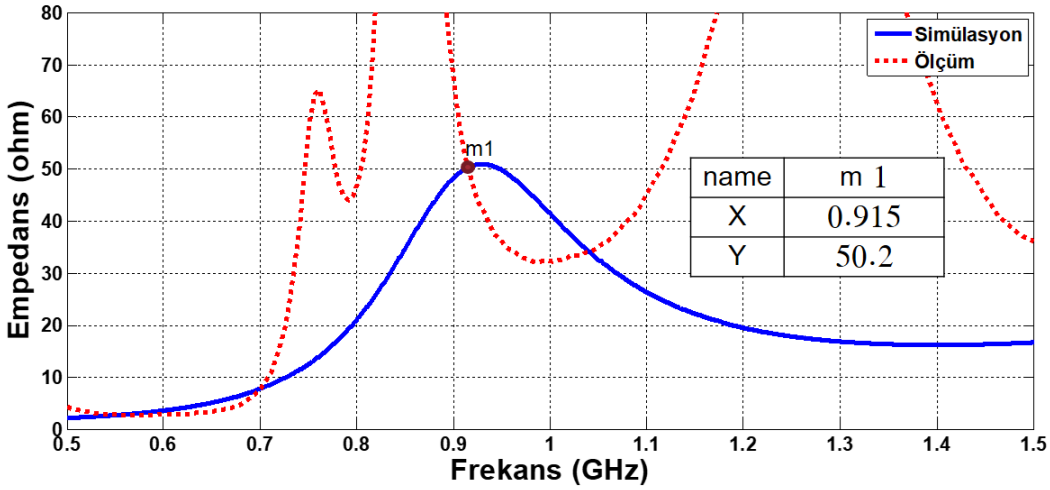
Şekil 5.17 Anritsu MS2028C VNA cihazı

Şekil 5.18, ölçülen geri dönüş kaybının ve simülasyon geri dönüş kaybının grafikleri göstermektedir. Şekilde görüldü gibi, 915 frekansında geri dönüş kaybının ölçülen değeri (m1) ile geri dönüş kaybının simüle edilen değeri (s1) arasında kabul edilebilir bir eşleşme elde edilmiştir. Bu kadar az farklılıkların nedenleri: kullanılan malzemenin dielektrik sabitinin değişmesi, tasarlanan antenin boyutlarındaki hatalar ve en önemlisi imalattaki küçük hatalardır.



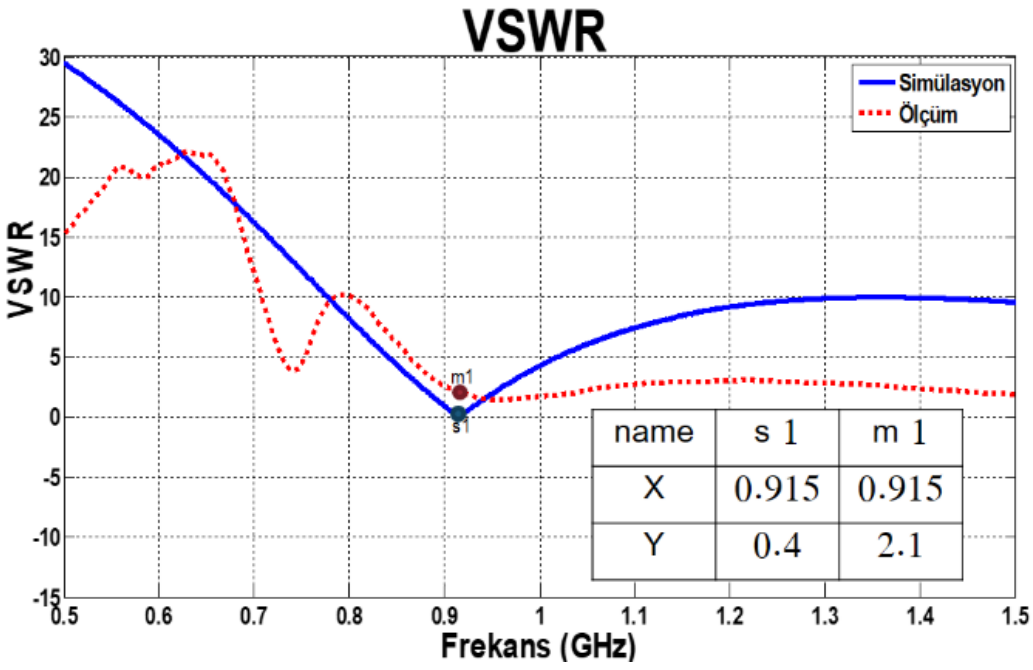
Şekil 5.18 Antenin simülasyon ve ölçüm S11 grafiği

Şekil 5.19, ölçülen empedans ve simüle edilen empedans grafikleri göstermektedir. Şekildeki yer alan m1 görüldü gibi, ölçülen ile simülasyon empedans değerleri arasında çok büyük bir eşleşme elde edilmiştir. Hedeflenen empedans değeri 50 Ω'dur.



Şekil 5.19 Antenin simülasyon ve ölçüm empedans grafiği

Şekil 5.20, 915 MHz taşıyıcı frekansındaki ölçülen (m1) ve simüle edilen (s1) VSWR değerleri göstermektedir. Grafikten de görülebileceği gibi, ölçülen VSWR değeri 2,1'dir. Bu değer biraz 2'den daha büyüktür. Gerçekte, hiçbir anten bağlantı noktası tam olarak eşleşmez. Her zaman hafif bir uyumsuzluk olacaktır.



Şekil 5.20 Antenin simülasyon ve ölçüm VSWR grafiği

Tablo 5.4, simüle edilmiş ve ölçülen sonuçlar için hedeflenen frekansta anten parametrelerinin karşılaştırmalarını göstermektedir.

Tablo 5.4 Antenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Önerilen Anten	**S11**	**Bant genişiliği**	**Empedans**	**VSWR**
Simülasyon	915 MHz'de -52,93 dB	(830 – 1040) MHz 210 MHz = 23%	50,2 Ω	915 MHz'de 0,04
Ölçüm	955 MHz'de -14,5 dB	(915 – 1020) MHz 105 MHz	50,2 Ω	915 MHz'de 2,1

HFSS programında tasarlanan anten daha sonra üretildiğinde, simülasyon ile üretilen antenin birçok parametresi arasında küçük farklılıklar bulunmuştur. Bu farklılıklar genellikle üretim kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi 915 MHz frekansında yapılan mikroşerit anten, Powercast firması tarafından üretilen P1110-EVB, P2110-EVB ve P21XXCSR-EVB RF enerji hasatlama devrelerinde ya da diğer firmaların RF enerji hasatlama devrelerinde başarıyla kullanılabilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, RF enerji hasatlama devrelerinde kullanılmak üzere bir mikroşerit anten tasarlanmış ve daha sonra mikroşerit anten gerçekleştirilmiştir. İlkin yamanın boyutlarının hesaplanması ile başlayan mikroşerit anten tasarımı, daha sonra birçok optimizasyon adımı uygulanarak devam etmiştir. Tüm detayları ile boyutları hesaplanan mikroşerit antenin HFSS programı desteğiyle simülasyonu yapılmıştır.

Bant genişliğini artırmak ve istenmeyen frekansları yok etmek için mikroşerit antenin toprak katmanı azaltılmış ve yamanın kenarlarından ve alt köşelerinden kesimler yapılarak mikroşerit antenin ışıma özellikleri optimize edilmiştir. Daha sonra 915 MHz rezonans frekansında, dielektrik sabiti 4,3 olan mikroşerit anten cam epoksi FR4 malzemesi kullanılarak üretilmiştir.

İlkin tasarlanan ve daha sonra optimize edilen ve nihayet gerçekleştirilen mikroşerit antenin, empedansı, S11 ve VSWR gibi değerleri göz önünde bulundurulduğunda ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, gerçekleştirilen mikroşerit antenin 915 MHz rezonans frekansında çalışan RF enerji hasatlama devreleri için uygun ve kullanışlı bir anten olduğu gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen mikroşerit anten uygulama amaçlı olarak bir RF enerji hasatlama devresine bağlanarak ölçümler alınabilir ve ölçüm sonuçları analiz edilebilir. Yani, anten takılı iken enerji hasatlama devresinin üretmiş olduğu DC çıkış gücü, devrenin ölçülen akım ve gerilim değerleri ile hesaplanabilir. Son olarak RF enerji hasatlama devrelerini test etmek için bu mikroşerit anten kolaylıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] S. Y. Liao, «Measurements and Computations of Electric Field Intensity and Power Density,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* pp. 53 - 57, 1977.

[2] H. J. Visser ve R. Vullers, «RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements,» *Proceedings of the IEEE,* pp. 1410 - 1423, 2013.

[3] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless," *IEEE Pervasive Computing,* vol. 4, no. 1, pp. 18- 27, 2005.

[4] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, S. Cho, J. Goodman, G. Konduri, J. Kulik, W. Rabiner and A. Wang, "Design considerations for distributed microsensor systems," *Proceedings of the IEEE Custom Integrated Circuits,* pp. 279-286, 1999.

[5] A. Takacs, A. Okba, H. Aubert ve S. Charlot, «Recent Advances in Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transfer for IoT and SHM Applications,» *IEEE International Workshop of Electronics,* pp. 1-4, 2017.

[6] H. Reinisch, S. Gruber, H. Unterassinger, W. Pribyl ve G. Holweg, «An Electro-Magnetic Energy Harvesting System With 190 nW Idle Mode Power Consumption for a BAW Based Wireless Sensor Node,» *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS,* cilt 46, no. 7, pp. 1728-1741, 2011.

[7] J. A. Hagerty, F. B. Helmbrecht, W. H. McCalpin, R. Zane ve Z. B. Popovic, «Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays,» *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,* pp. 1014 - 1024, 2004.

[8] W. M. D. R. Gunathilaka, H. G. C. P. Dinesh, G. G. C. M. Gunasekara, K. M. M. W. N. B. Narampanawe ve J. V. Wijayakulasooriya, «Ambient Radio Frequency energy harvesting,» *2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS),* pp. 1-5, 2012.

[9] A. Belen ve M. A. Belen, «GSM Ve ISM Bandı RF Enerji Hasatlama Sistemleri İçin Tek Katlı Doğrultucu Devre Tasarımı,» *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi,* p. 359 – 365, 2021.

[10] N. Saranya ve T. Kesavamurthy, «Design and performance analysis of broadband rectenna for an efficient RF energy harvesting application,» *International Journal of Rf and Microwave Computer-Aided Engineering,* pp. 1-12, 2019.

[11] M. Cansız, D. Altinel ve G. K. Kurt, «Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review,» *Energy,* cilt 174, pp. 292-309, 2019.

[12] D. M. Pozar, «Microstrip Antennas,» *IEEE,* cilt 80, no. 1, pp. 79-91, 1992.

[13] G. A. Deschamps, Microstrip Microwave Antennas, presented at 3rd USAR Symposium on Antennas, 1953.

[14] R. E. Munson.U.S. Patent: 3713162, 1973.

[15] J. Howell, «Microstrip antennas,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* cilt 23, no. 1, pp. 90 - 93, 1975.

[16] P. L. Sullwan ve D. H. Schauber, «Analysis of An Aperture Coupled Microstrip Antenna,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* cilt 34, pp. 977-984, 1986.

[17] J. R. James, P. S. Hall ve C. Wood, Handbook of Microstrip Antennas, London: Peter Peregrinus Ltd, 1989.

[18] R. Q. Lee ve K. F. Lee, «Experimental Study of Two layer Electromagnetically Coupled Rectangular Patch Antenna,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* pp. 1298-1302, 1990.

[19] G. Kumar ve K. P. Ray, Broadband Microstrip Antennas, USA: Artech House, 2003.

[20] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl ve A. Ittipiboon, Microstrip Antenna Design Handbook, Boston and London: Artech House , 2001.

[21] M. Ramesh , "Design Formula for Inset Fed Microstrip Patch Antenna," *Journal of Microwaves and Optoelectronics,* vol. 3, pp. 5-10, 2003.

[22] Z. L. Dafalla, W. Y. Kuan, A. M. Abdel Rahman and S. C. Shudakar, "Design of a Rectangular Microstrip Patch Antenna at 1 GHz," *IEEE,* pp. 145-149, 2004.

[23] E. Hamiti, L. Ahma ve A. R. Sebak, «New Design For Microstrip Antenna Element With U-Shaped Rectangular Patch,» *2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering,* pp. 820-823, 2007.

[24] . E. Çetme, «Yarıklı mikroşerit yama anten dizaynı,» *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı,* pp. 1-63, 2009.

[25] M. Matin, "A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna," *WSEAS TRANSACTIONS on COMMUNICATIONS,* vol. 9, no. 1, pp. 63-72, 2010.

[26] M. Hayouni, F. Choubani, M. Denden, T. H. Vuong ve J. David, «A Novel Compact Ultra-wideband Rectangular Shaped Antenna,» *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings,* pp. 381-385, 2011.

[27] M. Karaaslan, E. Ünal, Z. Özer ve Ş. Yılmaz, «2.45 Ghz De Yüksek Kazançlı Mikroşerit Anten Yama Anten Tasarımı ve Gerçekleştirimi,» *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi,* pp. 28-31, 2012.

[28] D. Bhalla and K. Bansal, "Design of a Rectangular Microstrip Patch Antenna Using Inset Feed Technique," *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE),* vol. 7, no. 4, pp. 08-13, 2013.

[29] F. Küçük, A. Z. Özer, E. Öğüt ve D. Bölükbaş, «Computer aided design and parametric analysis of rectangular microstrip patch antenna,» *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU),* pp. 1587-1590, 2014.

[30] M. Krakauskas, A. Sabaawi and C. Tsimenidis, "Suspended Patch Microstrip Antenna with Cut Rectangular Slots for RF Energy Harvesting," *IEEE*, pp. 304-307, 2014.

[31] T. Suganthi, S. Robinson, G. Kanimolhi ve T. Nagamoorthy, «Design and Analysis of Rectangular Microstrip Patch Antenna for GSM Application,» *IJISET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology,* pp. 245-249, 2014.

[32] R. Yuwono, O. P. Wijaya ve A. , «Design Microstrip Antenna 900 MHz With Customized Flower Shape Patch,» *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* pp. 9320-9324, 2015.

[33] L. C. Paul, M. Morshed and A. K. Sarkar, "Performance enhancement of an inset feed rectangular microstrip patch antenna by adjusting feeding position for wireless applications," *3rd International Conference on Electrical, Electronics, Engineering Trends, Communication, Optimization and Sciences,* p. 5, 2016.

[34] H. Werfelli, K. Tayari, M. Chaoui ve H. Ghariani, «Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna,» *2016 2nd International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP),* pp. 21-24, 2016.

[35] S. Chakravarthy, N. Sarveshwaran and S. Sriharini , "Comparative Study on Different Feeding Techniques of Rectangular Patch Antenna," *IEEE,* 2016.

[36] E. M. Ali, P. Nallagownden, N. Z. Yahaya ve M. A. Zakariya, «Design of microstrip patch antenna at 900 MHz for charging mobile applications,» *Journal of Engineering and Applied Sciences,* pp. 988-993, 2017.

[37] W. M. Hashim ve A. H. Sallomi, «Design Rectangular Microstrip Patch Antenna for GSM 900 and GSM 1800 Base Station,» *2018 8th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT),* pp. 25-28, 2018.

[38] İ. Ataş, «Yüksek Kazançli Mikroşerit Antenlerin HFSS Ile Modellenmesi Ve Tasarimi,» *İnönü Üniversitesi Doktora Tezi,* 2019.

[39] J. Endri, I. Setiawan, A. Taqwa, N. F. Husni ve C. R. Sitompul, «Design a Microstrip Antenna 2 Elements for 900 Mhz GSM System,» *Journal of Physics: Conference Series,* pp. 1-10, 2019.

[40] U. Patel ve T. K. Upadhyaya, «Dual Band Planar Antenna for GSM and WiMAX Applications with Inclusion of Modified Split Ring Resonator Structure,» *Progress In Electromagnetics Research Letters,* cilt 91, pp. 1-7, 2020.

[41] H. Chemkha and A. Belkacem, "Design of New Inset Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna with Improved Fundamental Parameters," *2020 IEEE International Conference on Design & Test of Integrated Micro & Nano-Systems (DTS),* 2020.

[42] D. Y. Gündoğdu ve A. O. Ertay, «Beşinci Nesil Haberleşme Sistemi Uygulamaları için Parazitik Yamalı Dikdörtgen Çerçeveli Mikroşerit Anten Tasarımı,» *URSI-TÜRKİYE 2021 X. Bilimsel Kongresi, Gebze Teknik Üniversitesi,* 2021.

[43] M. R. Talab, F. S. Alatallah ve A. A. Ahmed , «Design of Microstrip Patch Antenna for GSM Applications and Study the Effect of Substrate Thickness on the Bandwidth,» *Rafidain Journal of Science,* cilt 30, no. 2, pp. 42-52, 2021.

[44] F. Saleh, «Design of Microstrip Antenna use Phase Array Method Rectangular Shape 4 Elements Patch Frequency 900 MHz,» *Universitas Jember,* 2014.

[45] Chandan ve B. S. Rai , «Bandwidth Enhancement of Wang Shape Microstrip Patch Antenna for Wireless System,» *2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies,* pp. 11-15, 2014.

[46] M. C. Tang, T. Shi ve R. W. Ziolkowski, «Planar Ultra-Wideband Antennas with Improved Realized Gain Performance,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* cilt 64, no. 1, pp. 61 - 69, 2016.

[47] C. A. Balanis, «Antenna Theory: Analysis and Design,» *3rd ed.,* 2005.

[48] V. S. Yılmaz, Design And Fabrication Of Miniaturized Microstrip Antennas At 900 Mhz For Industrial Remote Controllers, Atilim Üniversitesi Fen Ve Uygulamali Bilimler Enstitüsüne Sunulan Yüksek Lisans Tez, 2019.

[49] R. Q. Lee ve K. F. Lee, «Experimental study of the two-layer electromagnetically coupled rectangular patch antenna,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* cilt 38, no. 8, pp. 1298 - 1302, 1990.

[50] C. A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

[51] J. K. Smith, F. W. Hopwood ve K. A. Leahy, «MEM Switch Technology in Radar,» *IEEE Radar Conference,* pp. 193-198, 2000.

[52] I. Papapolymerou, R. F. Drayton ve L. . P. B. Katehi, «Micromachined patch antennas,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* cilt 46, no. 12, pp. 275 - 283, 1998.

[53] W. L. Stutzman ve G. A. Thiele, Antenna Fundamentals and Definitions, New York: John Wiley &Sons, Inc, 1998.

[54] J. L. Volakis, Fundamentals of Antennas, Arrays, and Mobile Communications, New York: in Antenna engineering handbook, 2007.

[55] T. A. Milligan, Modern Antenna Design, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.

[56] A. Ghafar, «Design of a Compact Microstrip Antenna at 2.4 GHz, M.S. Thesis,» *Department Electrical Engineering, University Teknologi Malaysia, Novembe,* 2005.

[57] C. A. Balanis, Antenna Theory,Analysis and Design, New York, 1997.

[58] I. Hamieh , «A 77 GHz Reconfigurable Micromachined Microstrip Antenna Array,» *M.S. Thesis, University of Windsor Scholarship,* 2012.

[59] S. Erdemir, «Üç Bantlı Modern GPS Anteni Analizi Ve Tasarımı,» *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Lisans Tezi,* p. 64, 2013.

[60] C. T. Chuang ve S. J. Chung, «A New Compact Filtering Antenna Using Defected Ground Resonator,» *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference,* 2010.

[61] S. A. Nahiyan, «Novel design for shifted radiation pattern of rectangular microstrip patch antenna loaded with metamaterial,» *M.Sc. Thesis, Brac University,* p. 97, 2017.

[62] J. D. Kraus, Antennas, New York: McGrow-Hill , 1988.

[63] G. S. N. Raja, Radar Engineering and Fundamentals of Navigational Aids, Wiley, 2008.

[64] D. G. Fang, «Antenna Theory and Microstrip Antennas,» *Taylor & Francis Group,* 2010.

[65] D. Guha and Y. M. Antar, Microstrip and Printed Antennas, A John Wiley and Sons, Ltd, 2011.

[66] Y. Huang ve K. Boyle, «Antennas: From Theory to Practice,» 2008.

[67] G. Sharma, D. Sharm and A. Katariya, "An Approach to Design and Optimization of WLAN Patch Antennas for Wi-Fi Applications," *College of Engg. & Tech., Jaipur (Raj.), India,* vol. 2, no. 2, pp. 18-23, 2011.

[68] K. L. Wong, Compact and Broadband Microstrip Antennas, New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[69] M. E. Biçer, «WLAN/WIMAX Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi,» *Mersin Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,* p. 96, 2011.

[70] A. Derneryd, «A theoretical investigation of the rectangular microstrip antenna element,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation,* cilt 26, no. 4, pp. 532 - 535, 1978.

[71] M. Malkomes, «Mutual coupling between microstrip patch antennas,» *Electronics Letters,* cilt 18, no. 12, pp. 520-522, 1982.

[72] R. Gang, P. Bhartia, I. Bahl ve A. Ittipiboon, «Microstrip Antenna Design Handbook,» 2001.

[73] "Introduction to Optimetrics (ANSYS HFSS for Antenna Design), 2015.0 Release," *Ansoft Corporation,* 2015.

[74] «Ansys HFSS,» Ansys Corporation, USA, 2014.

[75] "https://www.anritsu.com/en-US/test measurement / products / ms 2028c," Anonymous, 01 Feb 2017. [Online].

[76] H. Özmen, «Meme Kanserinin Erken Tespiti için Radar Tabanli Mikrodalga Görüntüleme Sistemi Tasarlanmasi ve Gerçekleştirilmesi,» *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,* p. 132, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad	YOUSEFALTURK, Hussein

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Halep Üniversitesi / Suriye	2014
Lise	Azez Lisesi	2008

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2019 - devam ediyor	Turkcell Global Bilgi	Müşteri Temsilcisi
2018	Yuled Fabrikası	Yardımcı Mühendis

Yabancı Dil

Ana Dili : Arapça

Türkçe : İyi

İngilizce : İyi, YÖKDİL İngilizce Sınavı (72.5/100)

Yayınlar

YOUSEFALTURK, Hussein; CANSIZ, Mustafa. "RF enerji hasatlama için 915 MHz taşıyıcı frekansında mikroşerit anten tasarımı ve uygulaması", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13.3: 531-539. (2022)

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
EĞİTİM BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Hussein YOUSEFALTURK
ÖĞRENCİ NO	19805206
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2022-2023
YARIYIL	☒ Güz ☐ Bahar
ANABİLİM DALI	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	RF ENERJİ HASATLAMA DEVRELERİ İÇİN 915 MHz TAŞIYICI FREKANSINDA MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ
İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	82
BENZERLİK ORANI	%16
RAPORLAMA TARİHİ	25/11/2022

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 82 sayfalık kısmına ilişkin, 25/11/ 2022 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 16'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☐Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esaslarını inceledim ve bu Uygulama Esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Öğrencinin
Adı ve Soyadı: Hussein YOUSEFALTURK
Tarih: 25/11/2022
İmza:

Tez Danışmanı	**Anabilim Dalı Başkanı**
Adı ve Soyadı: Dr. Öğr.Üyesi Mustafa CANSIZ Tarih: 25/11/2022 İmza:	Adı ve Soyadı: Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ Tarih: 25/11/2022 İmza:

Formdaki bilgiler, bilgisayar ortamında doldurulmalıdır. El yazısı ile doldurulan formlar geçersizdir.

KGK-FRM-340/02