

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GENİŞ BANTLI SİSTEMLER İÇİN**  
**DAİRESEL MİKROŞERİT YAMA ANTEN**  
**TASARIMI**

**NURCAN YILDIRIM**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**  
**2020**

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GENİŞ BANTLI SİSTEMLER İÇİN**  
**DAİRESEL MİKROŞERİT YAMA ANTEN**  
**TASARIMI**

**NURCAN YILDIRIM**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**DOÇ. DR. HÜSEYİN ARDA ÜLKÜ**

**GEBZE**  
**2020**

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

**CIRCULAR MICROSTRIP PATCH**  
**ANTENNA DESIGN FOR WIDE BAND**  
**SYSTEMS**

**NURCAN YILDIRIM**  
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF**  
**MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR**  
**ASSOC. PROF.DR. HÜSEYİN ARDA ÜLKÜ**

**GEBZE**  
**2020**

GTÜ Fen Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23/01/2020 tarih ve 2020/05 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/05/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Nurcan YILDIRIM'ın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : DOÇ. DR. HÜSEYİN ARDA ÜLKÜ

ÜYE

: PROF. DR. ALİ ALKUMRU

ÜYE

: DR. ÖĞR. ÜYESİ ERKUL BAŞARAN

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

## ÖZET

Bu çalışmada, mikroşerit yama antenler (microstrip patch antenna, MPA) ile ilgili olarak farklı geometrik özelliklere sahip tasarımlara yer verilmiştir. Anten parametreleri MPA kullanımı için detaylandırılmış ve birbirleriyle kıyaslanarak uygun tasarım oluşturulmaya çalışılmıştır.

Tezin ilk aşamasında MPA yapısı, özellikleri incelenmiş olup, avantajları/dezavantajları detaylandırılmış ve geometrik özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci aşamada CST Microwave Studio yazılımı aracılığıyla dairesel şekilli MPA uygulamaları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Basit geometrili dairesel ve dikdörtgen MPA üzerinde analizler yapıp alınan değerler neticesinde geometrileri üzerinde tasarım değişiklikleri yapılmış, girinti beslemeli ve ayırık halka rezonatör (split ring resonator, SRR) ilaveli yeni tasarım geometrileri gerçekleştirilmiştir. Dairesel ve dikdörtgen MPA yapıları bant genişliği, kazanç ve verimlilik gibi özellikleri ile kıyaslanmış ve tasarım çalışmalarına dairesel MPA ile devam edilmiştir. Son yıllarda literatüre metamateryaller olarak giren ayırık halka rezonatörleri hakkında detay verilip uygulamada ne gibi sonuçlar verdiği farklı geometri denemeleri ile sonucunda simülasyon çalışmaları vasıtasıyla gösterilmiştir. Tasarım çalışmaları CST Microwave Studio yazılımı aracılığıyla simüle edilmiş, saçılma parametreleri (S11), kazanç, toplam verimlilik, ışıma örüntüsü ve yüzey akım yoğunluğu çıktıları gösterilmiş ve sonuçların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler: CST Microwave Studio, Mikroşerit Yama Anten (MPA), Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR), Ayırık Halka Rezonatörü.**

## SUMMARY

In this study, various implementations on the microstrip patch antennas (MPA) with different geometric properties are simulated. Antenna parameters have been detailed and these parameters have been compared with each other in order to meet suitable design conditions.

In the first part of the thesis, MPA structure and its properties are examined, its advantages, disadvantages and geometric features are elaborated. In the second part, circular MPA applications are analyzed by CST Microwave Studio software. As a result of the analysis, which have been run on basic geometries such as circular and rectangular MPAs, new design geometries with inset fed and split ring resonator (SRR) are introduced. Circular and rectangular MPA structures are compared with their characteristics such as bandwidth, gain and efficiency and as a result design studies are continued with circular MPA. The circular antennas that have lower voltage standing wave ratio (VSWR) and reflection coefficient than square antennas are examined. Detailed information about SRRs, which have been widely used into the literature as metamaterials, by different simulation studies are provided. The scattering parameters graph (S11), gain graphs, voltage standing wave ratio and current density graphs of the designed antennas are shown and the consistent results are observed.

**Key Words: CST Microwave Studio Software, Microstrip Patch Antenna (MPA), Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), Split Ring Resonator (SRR).**

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve bu çalışmanın oluşmasında hiçbir desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Hüseyin Arda ÜLKÜ'ye,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Araş. Gör. Ahmet Furkan YILMAZ ve Sezgi YIKILMAZÇINAR'a,

Tüm destek ve anlayışlarıyla her zaman yanımda olan değerli aileme ve sevgili arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                          | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                                                     | v                   |
| SUMMARY                                                                                  | vi                  |
| TEŞEKKÜR                                                                                 | vii                 |
| İÇİNDEKİLER                                                                              | viii                |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ                                                           | ix                  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                                                          | xi                  |
| TABLolar DİZİNİ                                                                          | xv                  |
| <br>                                                                                     |                     |
| 1. GİRİŞ                                                                                 | 1                   |
| 2. MİKROŞERİT YAMA ANTENLER (MPA)                                                        | 5                   |
| 2.1. MPA'ların Avantaj ve Dezavantajları                                                 | 6                   |
| 2.2. MPA'ların Uygulama Alanları                                                         | 7                   |
| 2.3. MPA'ları Besleme Teknikleri                                                         | 7                   |
| 2.4. MPA Geometrilere                                                                    | 8                   |
| 2.5. MPA Formülasyonu                                                                    | 11                  |
| 3. DAİRESEL ŞEKİLLİ MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI<br>VE ANALİZİ                         | 16                  |
| 3.1. CST Studio Paket Programı                                                           | 16                  |
| 3.2. MPA Tasarımı                                                                        | 16                  |
| 3.2.1. Mikroşerit Hat Beslemeli MPA Tasarımı                                             | 17                  |
| 3.2.2. Girinti Beslemeli MPA Tasarımı                                                    | 23                  |
| 3.2.3. Girinti Beslemeli Dairesel Şekilli Çoklu Yarık Halka Rezer<br>(MSRR) MPA Tasarımı | 28                  |
| 4. SONUÇLAR                                                                              | 46                  |
| <br>                                                                                     |                     |
| KAYNAKLAR                                                                                | 48                  |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                                 | 51                  |
| EKLER                                                                                    | 52                  |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler ve</u></b> | <b><u>Açıklamalar</u></b>                              |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b><u>Kısaltmalar</u></b> |                                                        |
| $f_{\max}$                | : Maksimum frekans değeri                              |
| $f_{\min}$                | : Minimum frekans değeri                               |
| $f_0$                     | : Merkez frekans değeri                                |
| $\epsilon_r$              | : Bağlı dielektrik sabiti                              |
| $\epsilon_{\text{reff}}$  | : Etkin dielektrik sabiti                              |
| $\lambda$                 | : Serbest uzay dalga boyu                              |
| $\lambda_d$               | : Dielektrik dalga katsayısı                           |
| $t$                       | : Dielektrik taban kalınlığı                           |
| $c$                       | : Işık hızı ( $3 \times 10^8$ m/s)                     |
| $W_{gs}$                  | : Dielektrik taban genişliği                           |
| $L_{gs}$                  | : Dielektrik taban uzunluğu                            |
| $\Delta l$                | : Yama anten üzerindeki ilave uzunluk (saçak uzunluğu) |
| $F_i$                     | : Girinti besleme uzunluğu                             |
| $F$                       | : Besleme uzunluğu                                     |
| $G_{pf}$                  | : Girinti besleme ile MPA arasındaki uzunluk           |
| $W_f$                     | : Mikroşerit hat besleme genişliği                     |
| $L_{\text{eff}}$          | : Etkin yama uzunluğu                                  |
| $L$                       | : Dikdörtgen MPA uzunluğu                              |
| $W$                       | : Dikdörtgen MPA genişliği                             |
| $Z_c$                     | : Giriş empedansı                                      |
| $a$                       | : Dairesel MPA yarıçapı                                |
| BW                        | : Bant genişliği (bandwidth)                           |
| EMC                       | : Elektromanyetik uyumluluk                            |
| EMI                       | : Elektromanyetik girişim                              |

|               |                                                                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IEEE          | : Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronical Engineers) |
| MPA           | : Mikroşerit yama anten (microstrip patch antenna)                                                   |
| MSRR          | : Çoklu ayırık halka rezenatör (multi split ring resonator)                                          |
| RL            | : Geri dönüş kaybı (return loss)                                                                     |
| SRR           | : Ayırık halka rezenatör (split ring resonator)                                                      |
| $\tan \delta$ | : Dielektrik tanjant kaybı                                                                           |
| WLAN          | : Kablosuz yerel alan ağı (Wireless local area network)                                              |
| WMAN          | : Kablosuz metropol alan ağı (Wireless metropolitan area network)                                    |
| WPAN          | : Kablosuz kişisel alan ağı (Wireless personal area network)                                         |
| WWAN          | : Kablosuz geniş alan ağı (Wireless wide area network)                                               |
| VSWR          | : Gerilim duran dalga oranı (voltage standing wave ratio)                                            |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil No:</u></b>                                                           | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: MPA genel geometrisi.                                                        | 6                   |
| 2.2: MPA için saçaklanan elektrik alan dağılımları: a) Dikdörtgen ve b) Dairesel. | 9                   |
| 2.3: Mikroşerit dikdörtgen yama anten geometrisi.                                 | 10                  |
| 2.4: Mikroşerit dairesele yama anten geometrisi.                                  | 10                  |
| 2.5: Dikdörtgen MPA parametreleri.                                                | 11                  |
| 2.6: Anten saçak uzunluğu geometrik gösterimi.                                    | 12                  |
| 2.7: Mikroşerit dairesele yama anten parametreleri.                               | 14                  |
| 3.1: Mikroşerit hat beslemeli MPA yapısı: a) Dairesel ve b) Dikdörtgen.           | 18                  |
| 3.2: Mikroşerit hat beslemeli dairesele MPA'nın S11 grafiğı.                      | 19                  |
| 3.3: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA'nın S11 grafiğı.                     | 19                  |
| 3.4: Mikroşerit hat beslemeli dairesele MPA 2D kazanç grafiğı.                    | 20                  |
| 3.5: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA 2D kazanç grafiğı.                   | 20                  |
| 3.6: Mikroşerit hat beslemeli dairesele MPA'nın yönlendiricilik grafiğı.          | 21                  |
| 3.7: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA'nın yönlendiricilik grafiğı.         | 21                  |
| 3.8: Mikroşerit hat beslemeli dairesele MPA'nın yüzey akımları grafiğı.           | 22                  |
| 3.9: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA'nın yüzey akımları grafiğı.          | 22                  |
| 3.10: Girinti beslemeli dairesele MPA'nın S11 grafiğı.                            | 24                  |
| 3.11: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA'nın S11 grafiğı.                           | 24                  |
| 3.12: Girinti beslemeli dairesele MPA'nın 2D kazanç grafiğı.                      | 25                  |
| 3.13: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA'nın 2D kazanç grafiğı.                     | 25                  |
| 3.14: Girinti beslemeli dairesele MPA'nın yönlendiricilik grafiğı.                | 26                  |
| 3.15: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA'nın yönlendiricilik grafiğı.               | 26                  |
| 3.16: Girinti beslemeli dairesele MPA'nın yüzey akımları grafiğı.                 | 27                  |
| 3.17: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA'nın yüzey akımları grafiğı.                | 27                  |
| 3.18: SRR parça geometrisi.                                                       | 29                  |
| 3.19: Yay biçimli MSRR parça geometrisi.                                          | 30                  |
| 3.20: MSRR iki yay arası açıklık uzunluğu.                                        | 30                  |

|       |                                                                                                                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.21: | Girinti beslemeli dairesel MPA geometrileri: a) İki, b) Üç ve c) Dört halkalı tek MSRR ilaveli.                                                                                   | 31 |
| 3.22: | Girinti beslemeli dairesel MPA geometrileri: a) İki, b) Üç ve c) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.                                                                                   | 31 |
| 3.23: | Girinti beslemeli dairesel MPA geometrileri: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli ve c) Üç halkalı altı MSRR ilaveli. | 32 |
| 3.24: | Girinti beslemeli iki halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                               | 32 |
| 3.25: | Girinti beslemeli üç halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                                | 32 |
| 3.26: | Girinti beslemeli dört halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                              | 33 |
| 3.27: | Girinti beslemeli iki halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                               | 33 |
| 3.28: | Girinti beslemeli üç halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                                | 33 |
| 3.29: | Girinti beslemeli dört halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                              | 34 |
| 3.30: | Girinti beslemeli üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                     | 34 |
| 3.31: | Girinti beslemeli üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                         | 34 |
| 3.32: | Girinti beslemeli üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.                                                                                                               | 35 |
| 3.33: | Girinti beslemeli iki halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                            | 36 |
| 3.34: | Girinti beslemeli üç halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                             | 37 |
| 3.35: | Girinti beslemeli dört halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                           | 37 |
| 3.36: | Girinti beslemeli iki halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                            | 37 |
| 3.37: | Girinti beslemeli üç halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                             | 38 |
| 3.38: | Girinti beslemeli dört halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                           | 38 |
| 3.39: | Girinti beslemeli üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                                  | 38 |

|       |                                                                                                                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.40: | Girinti beslemeli üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                           | 39 |
| 3.41: | Girinti beslemeli üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.                                                                                 | 39 |
| 3.42: | Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) İki halkalı tek MSRR ilaveli, b) Üç halkalı tek MSRR ilaveli.                                  | 39 |
| 3.43: | Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) Dört halkalı tek MSRR ilaveli, b) İki halkalı iki MSRR ilaveli.                                | 40 |
| 3.44: | Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) Üç halkalı iki MSRR ilaveli, b) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.                                 | 40 |
| 3.45: | Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli. | 40 |
| 3.46: | Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: üç halkalı altı MSRR ilaveli.                                                                     | 41 |
| 3.47: | Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) İki halkalı tek MSRR ilaveli, b) Üç halkalı tek MSRR ilaveli.                                     | 41 |
| 3.48: | Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) Dört halkalı tek MSRR ilaveli, b) İki halkalı iki MSRR ilaveli.                                   | 42 |
| 3.49: | Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) Üç halkalı iki MSRR ilaveli, b) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.                                    | 42 |
| 3.50: | Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli.    | 42 |
| 3.51: | Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği üç halkalı altı MSRR ilaveli.                                                                         | 43 |
| 3.52: | Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) İki halkalı tek MSRR ilaveli, b) Üç halkalı tek MSRR ilaveli.                                     | 43 |
| 3.53: | Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) Dört halkalı tek MSRR ilaveli, b) İki halkalı iki MSRR ilaveli.                                   | 43 |
| 3.54: | Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) Üç halkalı iki MSRR ilaveli, b) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.                                    | 44 |

- 3.55: Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli. 44
- 3.56: Girinti beslemeli üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA'nın yüzey akımları grafiği. 44

## TABLÖLAR DİZİNİ

| <b><u>Tablo No:</u></b>                                                           | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1: MPA'ların avantaj ve dezavantajları.                                         | 7                   |
| 2.2: MPA besleme teknikleri kıyaslaması.                                          | 8                   |
| 3.1: Mikroşerit hat beslemeli dairesel ve dikdörtgen MPA parametreleri.           | 18                  |
| 3.2: Mikroşerit girinti beslemeli dikdörtgen ve dairesel MPA ilave parametreleri. | 23                  |
| 3.3: MSRR ilaveli girinti beslemeli dairesel MPA parametreleri.                   | 29                  |

# 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar çeşitli teknolojik çalışmaların başında insanların birbiri ile kolay iletişim sağlayabileceği çalışmalar yer almıştır. Uzak mesafeler arasında iletişimi sağlamak zorunlu bir ihtiyaç haline geldikten sonra telgraf, telefon gibi iletişim araçları geliştirilmiş ve insan sesi elektrik telleri üzerinden birbirine iletilmiştir. Elektrik tellerinden bağımsız olarak haberleşebilmek adına kablosuz sistemler geliştirilmiştir. Kablosuz haberleşmeyle birlikte, kablosuz haberleşmenin temellerini oluşturan antenler önem kazanmıştır. Anten geometrilerinin küçük boyutlu, dayanıklı, kolay üretilebilir olmaları kablosuz haberleşmenin yaygın olarak kullanımı üzerinde etkili olmuştur. Antenlerin yapısı, iletim hattı içinde boşlukta yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak ileten veya boşluğa elektromanyetik dalgalar yayan dönüştürücülerden oluşmaktadır. Kısaca anten haberleşme sistemleri içinde yer alan elektromanyetik dalgalarla elektriksel işaretler arasındaki dönüşümü sağlayan devre elemanları olarak da tanımlanabilir. Antenleri iletim hattına yönlendirilmiş dalgayı serbest bir elektromanyetik dalgaya (verici) veya tersi biçimde (alıcı) dönüştüren bir dönüştürücü olarak da tanımlayabiliriz [1]. Bir antende ideal şartlar altında kaynak tarafından üretilen enerjinin tamamının elektromanyetik enerjiye dönüştürülmesi beklenmektedir. Ancak uygulamada, iletim hattı ve antenin yapısından dolayı iletim ve dielektrik kayıpları meydana gelmektedir. Empedans uyumu sağlandığında, hat ve yansıma kayıpları ihmal edilir ve antene maksimum güç iletimi aktarılır [2]. İletim hatları düşük frekanslar ve kısa mesafeler için uygun iken antenler bant genişliğinin fazla olması sebebiyle yüksek frekans iletişim uygulamalarında kullanılır. Mesafe ve frekans arttıkça sinyal hatları ve iletim hatları maliyetli olacağı için uzun mesafelerde anten kullanımı daha uygun olacaktır.

Antenleri kullanırken karşımıza çeşitli parametreler çıkmaktadır ve bu parametrelerin çoğu birbiri ile ilişki halindedir. Herhangi bir parametrede yapılacak değişiklik veya iyileştirme başka bir parametrenin bozulmasına sebep olabilir ve anten karakteristiği bozulabilir. Anten performans karakteristiklerinin en önemlileri ise şunlardır: Anten polarizasyonu, bant genişliği (bandwidth, BW), anten ışıma şiddeti, anten direnci, kazanç, ışıma paterni, giriş empedansı, gerilim duran dalga oranı (voltage standing wave ratio, VSWR), anten verimliliği, geri dönüş kaybı (return loss, RL), açısız huzme genişliği, yönlendiricilik. Bu parametreleri şu şekilde

açıklayabiliriz. Işıma paterni; antenin ışıma yaptığı gücün veya alan büyüklüğünün uzay koordinatları ile verilen yönler göre değişiminin grafiksel olarak gösterimidir. Grafiksel gösterimde, grafik üzerinde bulunan ana lob ışıma yönünü gösterirken yan loblar anten ışıması sırasında meydana çıkan ve boşa harcanan enerji sonucunda oluşan elektromanyetik dalgaları temsil eder. Yan lobların seviyesi genelde ana lobun güç yoğunluğuna oranı olarak ifade edilir. Uygulamalarda bu oranın -20 dB ya da daha küçük olması istenir [3]. Polarizasyon elektrik alan vektörünün zamanla değişimidir. Doğrusal, eliptik, dairesel gibi çeşitleri bulunmaktadır. Elektrik alan yeryüzüne paralel ise doğrusal, dik ise düşey polarizasyon denir, her iki polarizasyon aynı anda var ve birbirleri ile 90 derecelik faz farkı ile kesişiyorlarsa dairesel polarizasyondan bahsedilir [1]. Bant genişliğini antenin en düzgün şekilde çalışacağı frekans aralığı olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda bant genişliği merkez frekansının yüzdesi olarak da tanımlanmaktadır. Yansıma katsayısının -10 dB'den daha küçük olduğu değerlerde frekans ekseninde bant genişliği bulunur.  $f_{\max}$  ve  $f_{\min}$ , antenin çalıştığı maksimum ve minimum frekans değerleri olmak üzere bant genişliği  $BW = f_{\max} - f_{\min}$  şeklinde ifade edilebilir.  $f_0 = (f_{\max} + f_{\min}) / 2$  merkez frekansını da kullanırsak bant genişliğinin yüzdelik olarak gösterimi;  $BW (\%) = ((f_{\max} - f_{\min}) / f_0) \times 100$  şeklindedir. Bant genişliği ne kadar artarsa belli bir sürede iletilen veri hacmi de o kadar artacaktır. Yeni teknolojilerle birlikte bant genişliğinin arttırılmasına yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir [4]. Anten kazancı, antenin aldığı giriş gücünü belirli yönde ışımaya dönüştürmesidir ve kayıpsız bir antenin kazancı antenin ne kadar yönlü olduğunu belirtir [2]. Açısal huzme genişliği, anten maksimum ışıma yaparken gücün yarıya (3 dB) düştüğü açısal genişliktir [5]. Bir antenin açısal ışıma açıklığı ne kadar yüksekse, o kadar çok yöne işaret gönderebileceği veya o kadar çok yönden işaret yakalayabileceği söylenebilir. Yönlendiricilik (directivity), antenin girişine gelen sinyalin anten tarafından ne kadar yönlendirildiği ile ilgilidir. Yönlendiricilik değeri kayıpsız antenlerde anten kazancına eşit olur. Işıma şiddeti, belirlenen bir yöndeki açının her bir değeri için anten tarafından yayılan güç şeklinde ifade edilir. Işıma direnci, antenin yaydığı toplam gücün, antenin çektiği akım ile oranlanması sonucu ortaya çıkan değerdir. Geri dönüş kaybı (return loss, RL), antene gönderilen gücün ne kadarının geri döndüğünü ifade eden bir kavramdır. Anten çalışma frekans aralığında bu değer -10 dB'in altında bir değer olmalıdır [1], [4]. Yansımanın hiç olmadığı durumda geri dönüş kaybı mükemmeldir ve 0 kabul edilir. Gerilim duran dalga oranı (VSWR), gerilim hattı boyunca oluşan maksimum

gerilimin minimum gerilime oranıdır. Anten beslemesi ile anten arasında uyum oluşabilmesi için yansıma katsayısı sıfır olmalı, geri dönüş kaybı sonsuz olmalı, yani bu durum anten terminaline gelen bütün gücün antene aktarıldığı durumdur. Yansıma katsayısının 1 veya -1 olduğu durumlarda duran dalga oranı sonsuza gider, bu durum tercih edilen bir durum değildir. Duran dalga oranının pratikte istenen değeri 1'dir. Giriş empedansı, antenin bir terminalinde bulunan gerilimin o noktadaki akımına oranı ya da iletimde belirli bir noktada uygun elektrik alan ve manyetik alanların birbirine oranı şeklinde tanımlanabilir [2]. İletim hattı ile anten arasındaki maksimum enerji transferi için anten giriş empedansı ile iletim hattı karakteristik empedansı birbiri ile uyumlu olmalıdır. Eğer bu empedanslar birbiri ile uyumlu olmazlarsa antende kaynak yönünde yansıyan dalgalar meydana gelir ve bu da istenen bir durum değildir. Örneğin giriş direnci  $75 \Omega$  olan antene yapılacak besleme  $75 \Omega$  'luk bir kablo ile yapıldığı zaman empedans uyumu sağlanmış olur. Anten verimliliği, ışıma verimliliği (radiation efficiency) olarak da bilinir, antenin yaydığı ışıma gücünün antene uygulanan elektriksel güce oranıdır [6].

Kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan antenlerin, artan ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitleri de artmıştır. Antenlerin boyutları, polarizasyon yeteneği, çalışma frekans aralıkları gibi özellikler kullanım alanını belirlemekte ve yapılan çalışmalar uygun olan antene yönelmeyi sağlamaktadır. Antenlerin elektriksel özelliklerine göre dört türü bulunmaktadır ve bu dört tip antenin de çalışma frekans aralığı birbirinden farklıdır. Elektriksel olarak küçük bir frekans aralığında çalışan antenler bir dalga boyundan daha küçüktürler. Bu tip antenlere verilebilecek en iyi örnek araçlarda kullanılan yüksek frekans bandında çalışan (HF) dikey tel antenlerdir [1]. Düşük giriş dirençli ve yüksek giriş reaktansa sahip olmaları dezavantajıdır ancak yatay düzlemde çok yönlü yayılımına sahip oldukları için tercih edilirler. Rezonans antenler, dar bantlı frekans aralıklarında iyi bir giriş empedansına sahip antenlerdir. Yarım dalga dipol antenler ve mikroşerit yama antenler (MPA) bu anten tipinin en bilinen örnekleridir. Geniş bantlı antenler düşük çalışma frekansında çalışan anten türüdür. Düşük kazanç ve gerçek değerli giriş empedansına sahiptirler [1]. Açıklık antenleri, elektromanyetik dalgaların ışıma yönünde bir açıklıktan akan anten türüdür. Genellikle çok boyutlu, dar ve uzun bir huzmeye sahip olan bu antenler yüksek kazançlı anten türleridir. Açıklık antenleri yönlülük gerektiren uygulamalarda yüksek performans sağladıkları için uzay ve havacılık endüstrisinde tercih edilirler. Kablosuz haberleşme uygulamalarında bu dört anten türü içerisinde en çok tercih edileni küçük geometrili ve kolay üretilebilir olmaları nedeniyle MPA'lardır. MPA'lar çift frekans

bant özelliğinde kullanılırlar ve düşük güç tüketimi nedeniyle de diğer anten türlerinden daha avantajlıdırlar. Bu nedenle de birçok uygulamada tercih edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, MPA'lar incelenmiş olup, farklı geometrilerde tasarımlar yapılmış, bant genişliği açısından sonuçlar incelenmiş ve karşılaştırma yapılmıştır.

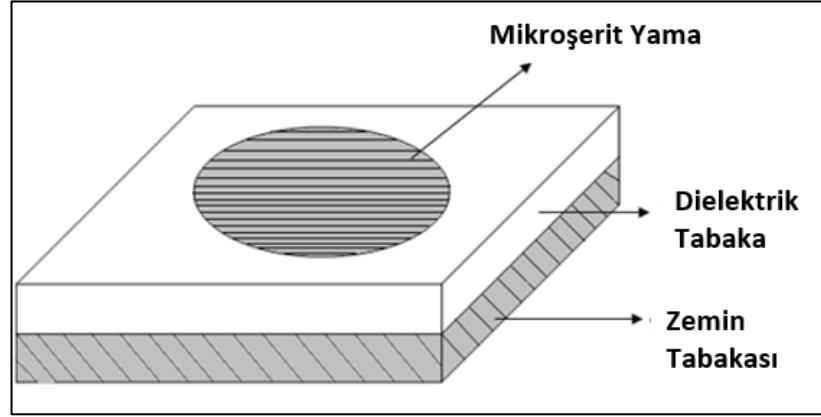
Bu tezin akışı şu şekildedir: İkinci bölümde MPA'ların tarihçesi, çeşitleri, besleme yöntemleri, uygulamaları ve geometrisi anlatılmıştır. MPA tasarımında kullanılan yama boyutlarının belirlendiği denklem formülasyonu verilmiştir. Üçüncü bölümde MPA tasarımı, farklı uygulamalarla yapılan tasarımlar gösterilmiş olup, kullanım alanları gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların grafikler ve ışıma örüntüsü üzerinde değerleri incelenmiş, farklı uygulamalardaki anten parametreleri kıyaslanmıştır. Dördüncü bölümde elde edilen sonuçlar ve hatalar karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması sonucunda elde edilmiş tüm karşılaştırma çıktıları analiz edilerek yorumlanmış ve gelecekte yapılması planlananlar sunulmuştur.

## 2. MİKROŞERİT YAMA ANTENLER (MPA)

Son yüzyılda elektronik ve yarı iletken teknolojilerindeki gelişmeler ciddi oranda artış göstermiş ve bu durum haberleşme sistemlerinin gelişmesine de olanak sağlamıştır. Haberleşme sistemlerinin teknik olarak hızlı gelişimi sonucunda ortaya kablosuz iletişim kanalları çıkmıştır ve farklı iletişim yöntemleri geliştirilmiştir. Kablosuz iletişimin en önemli parçalarından biri de antenlerdir. Anten yapılarında da geçmişten günümüze kadar birçok teknik gelişmeler olmuş olup, anten boyutları küçülmüş, düşük ağırlıklı, kolay üretilebilir, dayanıklı antenler geliştirilmiştir. Bu özellikleri en iyi karşılayan anten tipi de mikroşerit yama antenler (MPA) olmuştur. MPA fikri ilk olarak 1953 yılında Deschamps tarafından ortaya atılmıştır. Ancak iyi dielektrik tabanların (substrate) mevcut olmaması nedeniyle pratikte kullanılabilecek MPA üretimi için 20 yıl kadar araştırmalar devam etmiştir. 1970'lerin başında ilk pratik antenler Howel ve Munson tarafından geliştirilmiş ve patentleri alınmıştır [7], [8]. 1980'lerin başında temel MPA elemanları ve dizileri, tasarım ve modelleme açısından oldukça geliştirilmiştir. Artan teknolojik gelişmelerle birlikte anten performans özellikleri (bant genişliği vb.) MPA'ların ilgi odağı haline gelmesini sağlamıştır. MPA'ların düşük maliyetli ve yüksek yoğunluklu entegrasyon kabiliyetinin olması entegre devre sistemlerinde kullanılmasını sağlamıştır. Haberleşme sistemlerinden daha önce uzay araçlarında, uçaklarda, radarlarda, adaptif anten dizilerinde ve biyomedikal gibi geniş alanlarda kullanılmıştır [9]. Boyutları küçük olduğundan ve yüksek frekanslarda çalışabildiklerinden, elektronik devrelerde bilgi aktarımı konularında kullanımı daha da yaygınlaşmıştır [10].

MPA'lar, düşük kayıplı, kolay üretilebilen ve kırılkan olmayan bir yalıtkan malzemeden (substrate) oluşur. Bağlı dielektrik sabiti  $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$  aralıkta olan malzemelerden seçilirler. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi ince yapılı dielektrik tabanın, bir tarafında iletken ışıma yüzeyi, diğer tarafında ise iletken toprak tabakası olacak şekilde bir yapı bulunmaktadır [11]. Genelde antende kullanılan yama ve toprak malzemesi bakırdır. Yüksek frekanslarda entegre devrelerle birleştirilme kolaylığı sağlamak adına dielektrik (yalıtkan) malzeme olarak FR-4 malzeme tercih edilir [12]. Bu tezde yapılan her tasarımda da FR-4 malzeme kullanılmıştır. Dielektrik tabanın elektriksel özelliğini dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı belirler. Kayıp tanjantı ne kadar büyükse anten verimi o kadar küçük olacaktır. Bundan ötürü düşük tanjantlı malzeme kullanımına da

dikkat edilir [13]. Aynı zamanda dielektrik tabanın kalın olması ve düşük dielektrik sabitine sahip olması yüksek verim ve bant genişliği sağlar ancak bu durumda anten boyutları büyüyeceği için bunun yerine daha kompakt malzemeler tercih edilir [14]. Düşük frekans aralıklarında MPA'nın boyutları büyüdüğünden bu tip antenler genellikle 100 MHz - 50 GHz aralığında kullanılırlar [15].



Şekil 2.1: MPA genel geometrisi.

Antende kullanılan iletkenin geometrik şekli tasarımın özelliklerine göre değişebilir. Mikroşerit yamanın şekli kare, dikdörtgen, daire, eliptik, E-şekilli [16], U-şekilli [17], H-şekilli [18] veya başka bir geometride olabilir. Farklı geometrilerdeki yamanın boyutları ve şekli, antenin sonuçları hakkında en belirleyici özellikler arasında yer almaktadırlar. MPA'larda genel olarak yarım güç huzme genişliği 70-90 derece arasında, anten kazancı ise maksimum 5-6 dB hesaplanmaktadır [2].

## 2.1. MPA'ların Avantaj ve Dezavantajları

MPA'ları anten çeşitleri içinde özel bir yere konumlandıran, elektriksel özelliklerinden çok yapısal özellikleridir. Bu anten tipi bilindik mikrodalga antenlere göre daha avantajlı yapıdadır. Ağırlıklı olarak anten yapıları ile kıyaslandığında avantaj ve dezavantajları ise Tablo 2.1'de verilmiştir [2].

MPA'ların en temel dezavantajı düşük bant genişliğine sahip olmalarıdır. Ancak Tablo 2.1'deki detaylar incelendiğinde avantajlar dezavantajlardan daha ağır bastığı görülmekte olup, MPA'lar farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Tablo 2.1: MPA'ların Avantaj ve Dezavantajları.

| Avantajlar                                                                                                                                                  | Dezavantajlar                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Düşük profilli yüzey görünümü vardır ve hafif yapıdırlar. Bu nedenle mikrodalga tümleşik devreleri ile uyumlu bir şekilde çalışırlar.                       | Düşük bant genişliğine sahiptirler.           |
| Küçük geometri ve ince yapıdırlar. Bu nedenle taşınabilir cihazlarda daha çok bu tip antenler tercih edilirler. Entegre devrelerle uyumlu halde çalışırlar. | Yüksek besleme devre kayıpları bulunmaktadır. |
| Kolay üretilebilen antenlerdir.                                                                                                                             | Düşük çapraz polarizasyon yapmaktadırlar.     |
| Ucuz üretim koşullarına sahiptir.                                                                                                                           | Düşük güç kontrol kapasitesi vardır.          |

## 2.2. MPA'ların Uygulama Alanları

MPA'lar doğrusal polarizasyon, dairesel polarizasyon, çift veya üç bantlı uygulamalar için tasarlanabilirler. Bu uygulamalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir [19]:

- Kablosuz haberleşme sistemleri
- Uydu sistemleri
- Biyomedikal sistemler
- Havacılık, uzay ve roket sistemleri
- Uzaktan algılama sistemleri
- Cep telefonu, laptop gibi entegre devre sistemleri

## 2.3. MPA'ları Besleme Teknikleri

MPA'ların beslenmesi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler; mikroşerit hat ile besleme, koaksiyel hat ile besleme, açıklık kuplajlı ve yakınlık kuplajlı besleme olarak dört sınıfa ayrılmaktadır [9]. Genellikle bu tekniklerden kolay üretilebilenler tercih edilmektedir ve bunlar da mikroşerit hat ile ve koaksiyel hat ile beslemelerdir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.2'de verilmiştir.

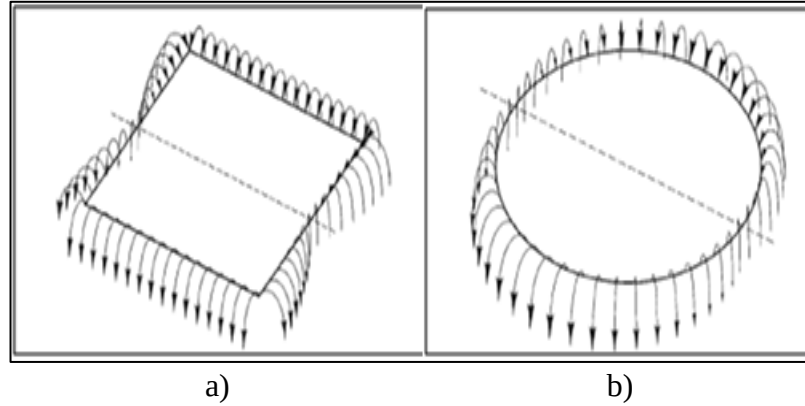
Tablo 2.2: MPA Besleme Teknikleri Kıyaslaması.

| Besleme Yöntemi           | Avantajlar                                                                                | Dezavantajlar                                                  |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Mikroşerit Hat Beslemesi  | Kolay üretilebilir, Kolay modellenenebilir, Giriş empedansı ile uyumludur.                | Bant genişliği sınırlıdır.                                     |
| Koaksiyel Hat Beslemesi   | Kolay üretilebilir, Giriş empedansı ile uyumludur.                                        | Dielektrik tabanın kalın olması halinde zor modelleme yapılır. |
| Açıklık Kuplajlı Besleme  | Kolay modellenenebilir, Düşük parazitik ısıma sağlar.                                     | Dar bant genişliği bulunmaktadır, Üretimi zordur.              |
| Yakınlık Kuplajlı Besleme | Kolay modellenenebilir, Düşük parazitik ısıma sağlar, Geniş bant genişliği bulunmaktadır. | Üretimi zordur.                                                |

## 2.4. MPA Geometrileri

MPA’larda yama geometrisi yayılımı etkileyen faktörlerdendir. En yaygın olarak kullanılan yama geometrileri ise dikdörtgen ve dairesel şekilli geometrileridir. Anten yamasının boyutları geometrik olarak sınırlı olduğu için yamanın kenarlarındaki alanlar toprağa doğru saçaklanır. Dikdörtgen ve dairesel yama anten etrafında oluşan elektrik alan saçaklanması Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Saçaklanan okların boyutları alan büyüklüğünü belirtir. Dikdörtgen yama neredeyse genişlik olarak ifade edilen iki kenar boyunca da aynı alana sahiptir, diğer iki kenar boyunca da sinüzoidal bir varyasyon görülmektedir. Dairesel yama da ise kosinüs açısı ile ifade edilebilen açısal bir varyasyon bulunmaktadır [20]. Saçaklanmanın rezonans frekanslarına etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Dalgaların bir kısmı alt katmanda, bir kısmı da havada yayılır ve saçaklanma etkisini ve hattaki dalga yayılımını karşılamak için etkin dielektrik sabiti  $\epsilon_{reff}$  tanımlanır. Etkin dielektrik sabiti, iletim hattının gerçek karakteristiğine sahip düzgün dağılımlı bir dielektrik malzemenin dielektrik sabiti olarak tanımlanır ve  $1 < \epsilon_{reff} < \epsilon_r$  arasında değerler alır. Etkin dielektrik sabiti aynı zamanda frekansın da bir fonksiyonudur. Çalışma frekansı arttığı zaman elektrik alan

bileşenlerinin çoğu dielektrik tabanda yoğunlaşır ve mikroşerit hat homojen bir yapıda davranır.



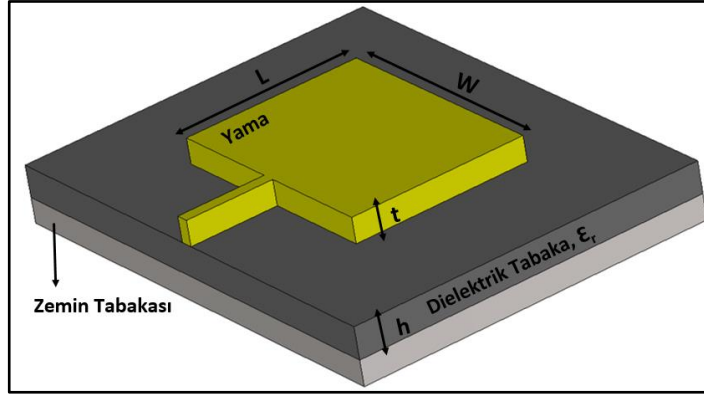
Şekil 2.2: MPA için saçaklanan elektrik alan dağılımları: a) Dikdörtgen ve b) Dairesel.

Şekil 2.3’de verilen dikdörtgen şekilli MPA’lar en basit geometriye sahip yama anten türüdür. Yama anten uzunluğu dielektrik dalga boyu açısından yarım dalga boyuna denk geldiğinde yama rezonansa girer (giriş reaktansı sıfırdır). Yarım dalga dikdörtgen yama anteni (veya yarım dalga yama) olarak adlandırılır [20]. Bu antenin elektrik alan dağılımını gösteren saçaklanmalar (Şekil 2.2.a)) yamayı etkin bir şekilde fiziksel uzunluğundan daha uzun gösterir ve bunun sonucu olarak da rezonans uzunluğu yarım dalga boyundan daha az olur.

Uygulamada rezonansı istenen frekansa kaydırabilmek için yama anten boyutlarında değişiklikler yapılır ve simülasyon sonuçlarıyla test edilebilir. Belirli koşullar altında yama uzunluğu arttıkça rezonanstaki empedans seviyesi ve bant genişliği etkilenir, bant genişliği arttıkça da antenin giriş empedansı azalır. Yama antenin şekli ve boyutlarının yanında kullanılan malzemenin dielektrik özellikleri de önemlidir. Kullanılacak malzeme homojen, düşük kayıplı olmalıdır. Frekans arttırıldıkça bu özellikler daha da belirgin olarak önem arz edecektir. Amaç ışıınımı oluşturmaktır. Daha iyi bir ışıınım içinse düşük dielektrik sabiti olan bir dielektrik alt taban kullanılmalıdır. Alt taban geometrisi, malzeme çeşidi gibi özellikleri değiştirilerek bant genişliği değiştirilmeye çalışılabilir.

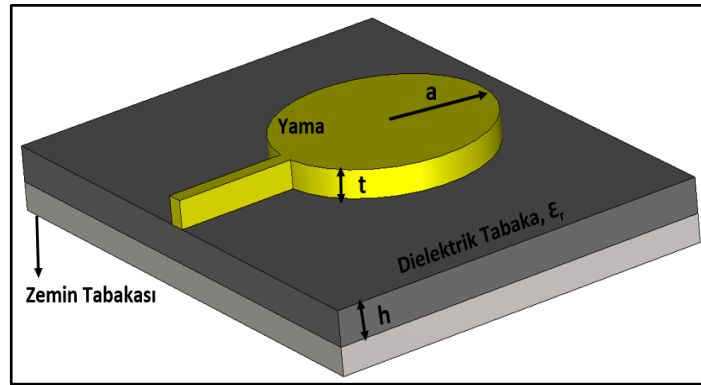
Dikdörtgen yamadan sonra en çok kullanılan MPA geometrisi dairesel MPA’lardır. Şekil 2.4’de gösterilen dairesel MPA’lar uygulamalarda daha az yer kaplarlar ve devre geometrisine daha uygun olurlar. Dairesel MPA’nın yarıçapını değiştirmek rezonans frekansı üzerinde etkide bulunur. Dikdörtgen MPA’da bu,  $L$

uzunluğu ile kontrol edilmektedir. Besleme pozisyonu seçilen mevcut rezonans frekansındaki antenin empedansını etkileyecektir.



Şekil 2.3: Mikroşerit dikdörtgen yama anten geometrisi.

Geçmişte dairesel MPA'lar geometrik özelliklerinden dolayı dikdörtgen MPA'lara oranla daha maliyetli çalışmalara neden olmaktaydı. Ancak dairesel MPA spektral alan tekniği kullanan tam dalga analiz araçlarıyla dikdörtgen MPA'lardan daha verimli bir şekilde analiz edilebilmektedir. Bu durum yama anten tasarımının geliştirildiği ilk zamanlarda, daha karmaşık yapıların performans trendlerini verimli bir şekilde keşfedilmesini ve optimize edilmesini sağlamıştır [21].

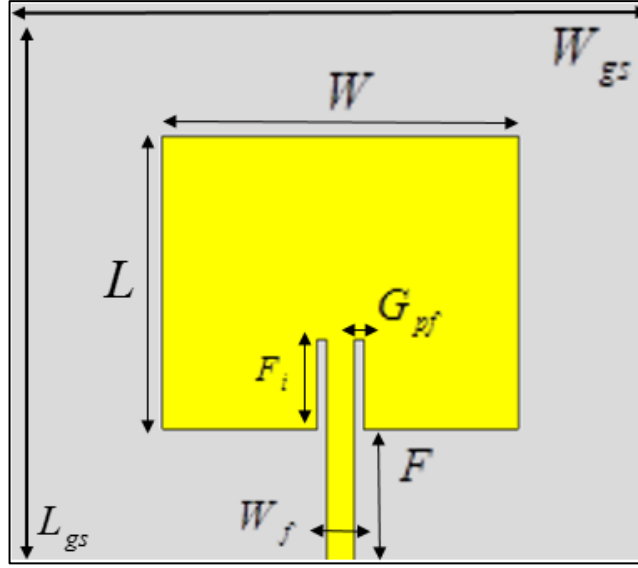


Şekil 2.4: Mikroşerit dairesel yama anten geometrisi.

Dikdörtgen MPA'lar geri dönüş kaybı ve kazanç açısından iyi performanslar sergilerken, dairesel MPA'lar radyasyon paterni, yan lob seviyeleri konularında daha iyi sonuç vermektedirler.

## 2.5. MPA Formülasyonu

MPA tasarımında yama boyutlarını belirlerken ve matematiksel ölçümlere ulaşırken bazı parametreler dikkate alınır. Bu parametreler; çalışma merkez frekansı  $f_0$ , dielektrik malzeme bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r$  ve dielektrik taban kalınlığı  $h$  'dır. Dikdörtgen şekilli MPA tasarımında  $W$  yamanın eni,  $L$  yamanın boyudur.



Şekil 2.5: Dikdörtgen MPA parametreleri.

Şekil 2.5’de gösterilen MPA parametreleri aşağıda verilen formüller vasıtasıyla hesaplanır. Anten genişliği,

$$W = \frac{c}{2f_0} \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

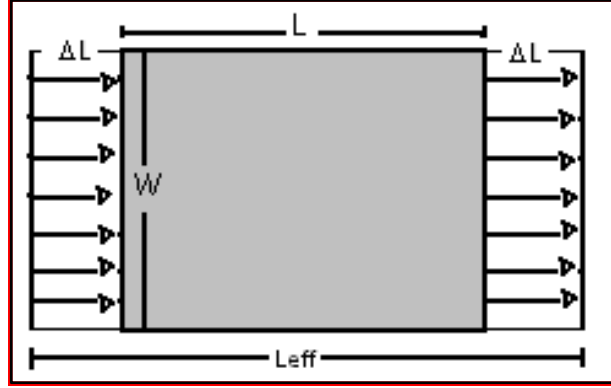
dielektrik katsayısının etkin değeri,

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + \frac{12h}{W} \right], \quad (2.2)$$

anten etkin uzunluğu,

$$L_{eff} = \frac{c}{2 f_0 \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.3)$$

ile belirlenir. Yama etrafında saçaklanan elektrik alan, MPA'yı daha büyük bir elektriksel boyuta taşır ve bu boyut Şekil 2.6'da gösterildiği gibi  $\Delta l$  saçak uzunluğu ile ifade edilir [22].



Şekil 2.6: Anten saçak uzunluğu geometrik gösterimi.

Yama anten üzerindeki ilave uzunluk (saçak uzunluğu),

$$\Delta l = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)}, \quad (2.4)$$

anten uzunluğu,

$$L = L_{eff} - 2\Delta l, \quad (2.5)$$

zemin tabakası uzunluğu ve genişliği sırasıyla,

$$L_{gs} = 2 \times L, \quad (2.6)$$

$$W_{gs} = 2 \times W, \quad (2.7)$$

olarak hesaplanabilir [2].

Yukarıdaki formüllerde kullanılan  $\varepsilon_{reff}$  etkin dielektrik katsayısı,  $\Delta l$  yama anten üzerindeki ilave uzunluk (saçak uzunluğu),  $L_{eff}$  etkin uzunluk,  $W_{gs}$  zemin genişliği,  $L_{gs}$  zemin uzunluğu ve  $c = 3 \times 10^8$  m/s boş uzaydaki ışık hızıdır [2].

Mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılan antende besleyici hat ve anten arasında giriş empedansını ( $50 \Omega$ ) uyumlaştırmak amacıyla girinti besleme (inset) yöntemi uygulanmıştır [23]. Giriş besleme yönteminde, besleme hattının yanında bulunan yarıklar aracılığıyla giriş kapasitansı oluşur ve bu kapasitans rezonans frekansını etkiler. İstenilen rezonans frekansında anten tasarlamak için uygun bir yöntem olarak tercih edilir. Şekil 2.5’de verilen girinti beslemeli dikdörtgen şekilli yama anten tasarımında kullanılan geometri parametreleri aşağıdaki formüller aracılığıyla bulunur. Yama ve besleme arasında kalan boşluk  $G_{pf}$  olarak belirtilir ve genellikle 1 mm alınır. Aşağıda verilen formüllerde yer alan  $Z_c$  giriş empedansı,  $F_i$  ise girinti besleme uzunluğudur [24].  $W_f$  mikroşerit hat genişliğini hesaplamak için  $Z_c$  empedans hesaplama formülünden yararlanılır.

Giriş empedansı,

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{reff}}} \ln \left[ \frac{8h}{W_f} + \frac{W_f}{4h} \right], & \frac{W_f}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{reff}} \left[ \frac{W_f}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_f}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_f}{h} > 1 \end{cases}, \quad (2.8)$$

şeklinde formülize edilir. Girinti besleme uzunluğu,

$$F_i = 10^{-4} \times \frac{L}{2} \times \left( 0.001699\varepsilon_r^7 + 0.13761\varepsilon_r^6 - 6.1783\varepsilon_r^5 + 93.187\varepsilon_r^4 - 682.69\varepsilon_r^3 + 2561.9\varepsilon_r^2 - 4043\varepsilon_r + 6697 \right) \quad (2.9)$$

olarak hesaplanır.

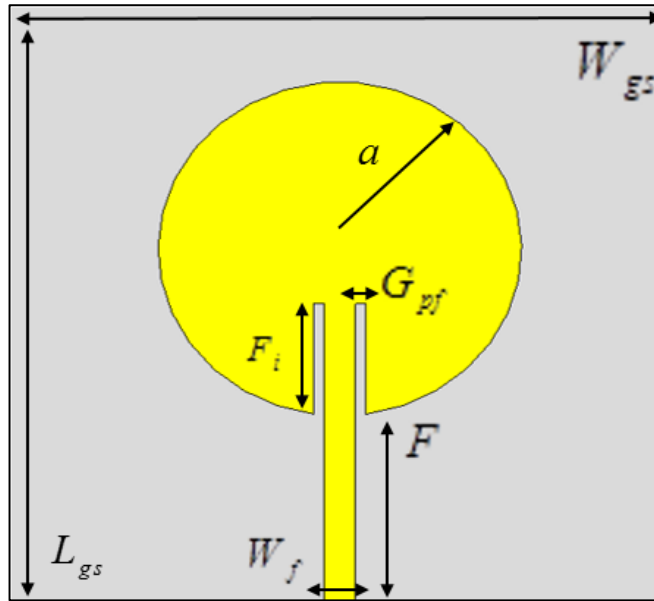
Dairesel şekilli MPA tasarımında, Şekil 2.6’da gösterildiği gibi  $a$  yamanın yarıçapıdır [2] ve diğer geometrik parametreler ise dikdörtgen MPA ile ortak kullanılmıştır. Dairesel yamanın yarıçap hesabının yapılırken [13]

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) \right] + 1.7726 \right\}^{1/2}} \quad (2.10)$$

formülü kullanılabilir. Burada  $F$ ,

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 2.7: Mikroşerit dairesel yama anten parametreleri.

Denklem (2.10) elektriksel saçaklanmayı dikkate almaz, bu sebeple etkin yarıçap değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a_e = a \left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \varepsilon_r F} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2h} \right) \right] + 1.7726 \right\}^{1/2} \quad (2.12)$$

Burada  $f_r$ ,

$$f_r = \frac{1.8412 v_0}{2\pi a_e \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.13)$$

olarak tanımlanır.

Yukarıda verilen formüller vasıtasıyla MPA'nın geometrik hesaplamaları yapılır ve simülasyon programında kullanılmak üzere tasarımın ilk adımı gerçekleştirilmiş olur.

### **3. DAİRESEL ŞEKLİ MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ**

#### **3.1. CST Studio Paket Programı**

Anten tasarımı istenilen bir rezonans frekansında, bant genişliğinde, çeşitli karakteristiklerde MPA tasarımı esnasında ölçüm sonuçlarını istenilen parametrelere uydurmak için anten geometrisinde yapılacak her bir değişiklik için yeni bir anten üretilip, üretilen anten için ölçümlerinin yapılması maliyet ve zaman kaybına neden olacaktır. Bütün bunları simüle edebilecek ve ancak istenilen sonuçlara erişildiğinde üretilen bir anten tasarımı için kullanılan yazılımlar maliyet ve zaman kaybının önüne geçerler. CST Microwave Studio [25] yazılımı ise bu görevleri yerine getirebilecek kapasitedeki yazılım uygulamalarından bir tanesidir.

CST Microwave Studio paket programı kullanımı kolay, ara yüzü basit elektromanyetik alan simülasyonu yazılımıdır [25], [26]. Geniş bant analizine olanak tanıyan bir çözücü olup simülasyonun her adımında görsel geri beslemeleri ile yapılan çalışmaları destekler. EMC, EMI, yüklü parçacık uygulamaları, mikrodalga, RF statik, düşük performans elektromanyetik uygulamaları gibi geniş bir yelpazede kullanım alanı mevcuttur. Ara yüzünün basit olması ve programın hızlı olması sayesinde gerçeğe yakın sonuçlar alınmaktadır.

Bu tez çalışmasında CST Microwave Studio yazılımı kullanılmış olup farklı geometrilerde MPA tasarımı çalışmaları için simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

#### **3.2. MPA Tasarımı**

Günümüzde kablosuz sistemlerinde, radar sistemlerinde, savunma ve havacılık sistemleri gibi alanlarda kullanılmak üzere yüksek bant genişliğine sahip, yüksek kazançlı anten tasarımları ön plana çıkmış ve bu amaçlar doğrultusunda yeni tasarımlar geliştirilmiştir. Kablosuz haberleşme sistemlerine olan talep artarken, dünyanın her yerinde uyumluluğu sağlamak amacıyla uluslararası bilimsel ve teknik standartlaştırma kurumları tarafından bu sistemler bazı standartlara oturtulmuştur. Dünya çapında geçerliliği olan kurum IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) kablosuz haberleşme sistemlerini kapladığı alana göre kendi içinde

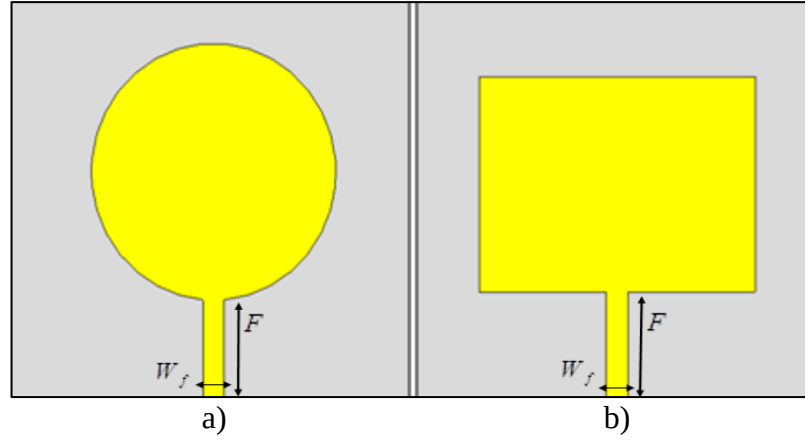
sınıflandırmıştır. Bunlar alanların adları, IEEE standartları ve örnek kullanım alanları olacak şekilde aşağıdaki gibi sıralanmıştır [27].

- WPAN (Wireless Personal Area Network / Kablosuz Kişisel Alan Ağı – IEEE 802.15 – Bluetooth sistemleri) [28].
- WLAN (Wireless Local Area Network / Kablosuz Yerel Alan Ağı – IEEE 802.11 - Wi-Fi (Wireless Fidelity) sistemleri) [29].
- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network/Kablosuz Metropol Alan Ağı – IEEE 802.16 – WIMAX sistemleri) [30].
- WWAN (Wireless Wide Area Network / Kablosuz Geniş Alan Ağı – IEEE 802.20 - Hücresel sistemler, Nomadic, Handoff sistemleri) [31].

Kablosuz yerel alan ağ (WLAN) sistemleri, entegre devre teknolojileri ile uyumlu bir şekilde ve ucuz koşullarda üretilebilmektedirler. Kısa mesafe, hızlı veri alışverişine uygun kablosuz haberleşme protokolü 2.4 - 2.5 GHz frekans bandında çalışır. Bu sayede kullanım alanları çok geniştir. IEEE'nin sınıflandırmış olduğu bant aralıklarına baktığımızda ise; L-Bant (1-2 GHz, IEEE), UHF (300 MHz -3 GHz) ve C-Bant (4-8 GHz, IEEE) frekansları gösterilir. 2.4 – 2.5 GHz rezonans frekansı geniş bantlı anten tasarım sistemlerinde ihtiyaçlara cevap verebilecek kapasiteye sahip ve haberleşme sistemlerindeki ihtiyaçlara cevap verecek niteliktedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında tasarlanan antenlerin 1-5 GHz bant aralığında 2.4 GHz rezonans frekansında çalışması hedeflenmiş ve farklı geometri ve yapılarda MPA tasarımları gerçekleştirilmiştir.

### **3.2.1. Mikroşerit Hat Beslemeli MPA Tasarımı**

Mikroşerit hat beslemeli antenlerde, besleme probu mikroşerit hattın başlangıç noktasına yerleştirilir ve güç akışı besleme probundan, mikroşerit hat boyunca ilerleyerek yamaya yayılır. Maksimum verimle güç akışını sağlamak ve geri yansıma kayıplarını küçültmek için empedans uygunlaştırılmalıdır. Bu işlemi yaparken probun besleme direnci, mikroşerit hattın karakteristik empedansı ve yamanın giriş empedansı birbirine eşitlenmelidir. Yama genişliği ve dielektrik taban kalınlığı antenin giriş empedansını etkileyecektir.

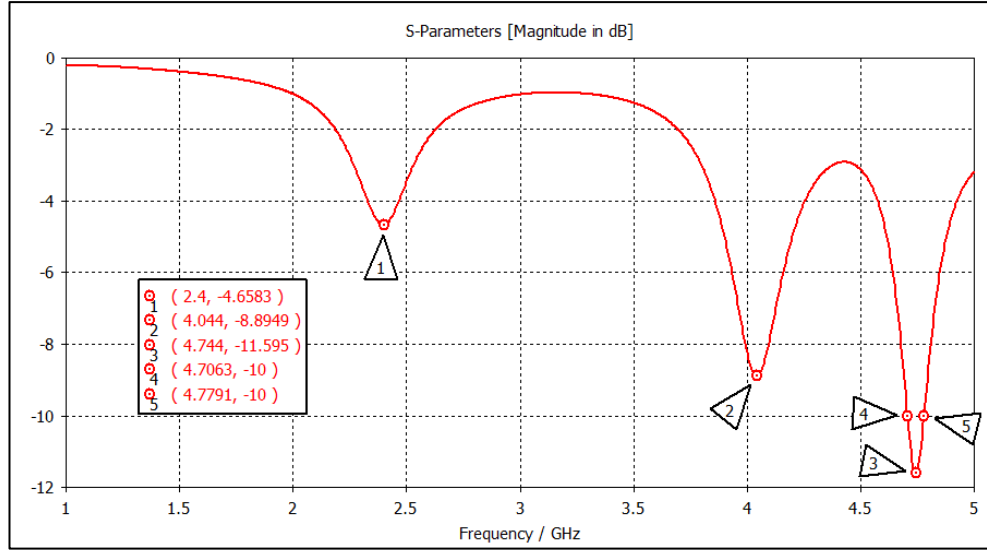


Şekil 3.1: Mikroşerit hat beslemeli MPA yapısı: a) Dairesel ve b) Dikdörtgen.

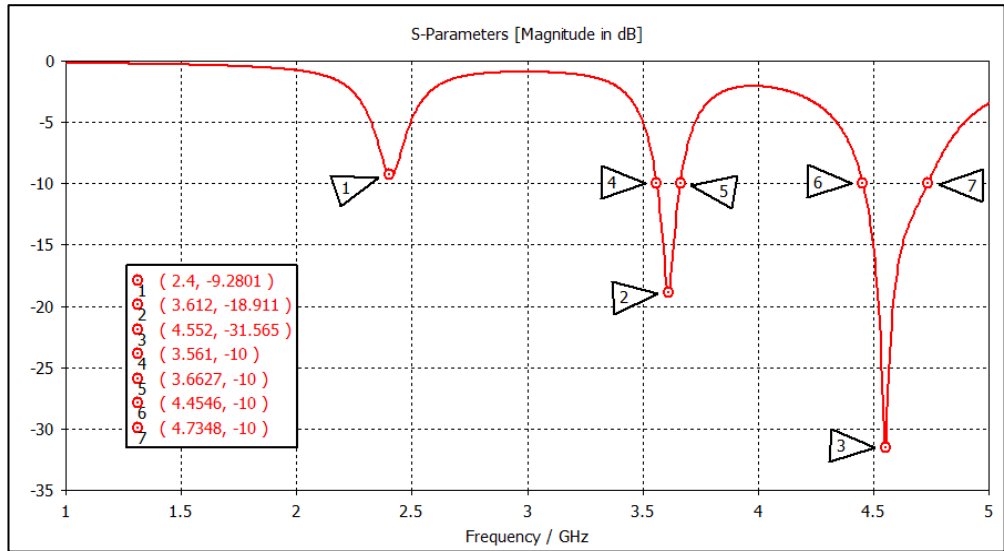
Şekil 3.1’de gösterilen ve Tablo 3.1’de parametre değerleri verilen benzer geometrik özelliklere sahip aynı dielektrik alt taban ve kalınlıkta dikdörtgen ve dairesel şekilli mikroşerit hat beslemeli basit yapı MPA uygulaması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Her iki anten türünün de performansı büyük ölçüde dielektrik alt taban parametrelerine bağlıdır.

Tablo 3.1: Mikroşerit Hat Beslemeli Dairesel ve Dikdörtgen MPA Parametreleri.

| MPA Parametreleri                          | Dairesel Şekilli MPA    | Dikdörtgen Şekilli MPA                     |
|--------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| Rezonans Frekansı                          | $f_0 = 2.4 \text{ GHz}$ | $f_0 = 2.4 \text{ GHz}$                    |
| Yama Boyutları                             | $a = 17.85 \text{ mm}$  | $W = 39 \text{ mm}$<br>$L = 29 \text{ mm}$ |
| Dielektrik Taban Kalınlığı                 | $h = 1.6 \text{ mm}$    | $h = 1.6 \text{ mm}$                       |
| Bağlı Dielektrik Sabiti                    | $\epsilon_r = 4.3$      | $\epsilon_r = 4.3$                         |
| Mikroşerit Yama Kalınlığı                  | $t = 0.035 \text{ mm}$  | $t = 0.035 \text{ mm}$                     |
| Besleme Uzunluğu ( $F$ )                   | $23.35 \text{ mm}$      | $23.35 \text{ mm}$                         |
| Besleme Genişliği ( $W_f$ )                | $3.1 \text{ mm}$        | $3.1 \text{ mm}$                           |
| Dielektrik Tanjant Kaybı ( $\tan \delta$ ) | $0.019 \cong 0.02$      | $0.019 \cong 0.02$                         |
| Dielektrik Alt Taban Malzeme Türü          | FR-4                    | FR-4                                       |

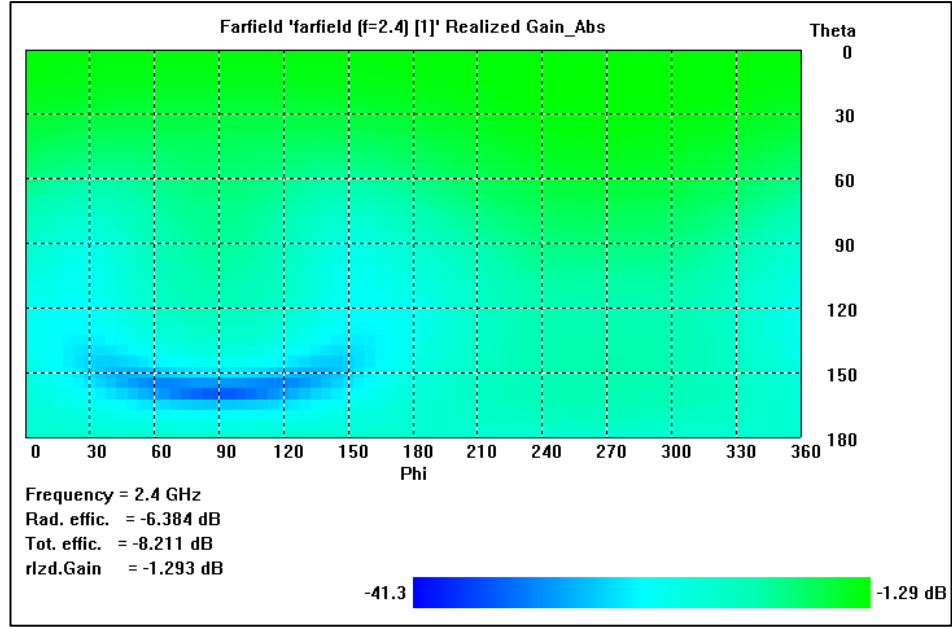


Şekil 3.2: Mikroşerit hat beslemeli dairesel MPA'nın S11 grafiği.

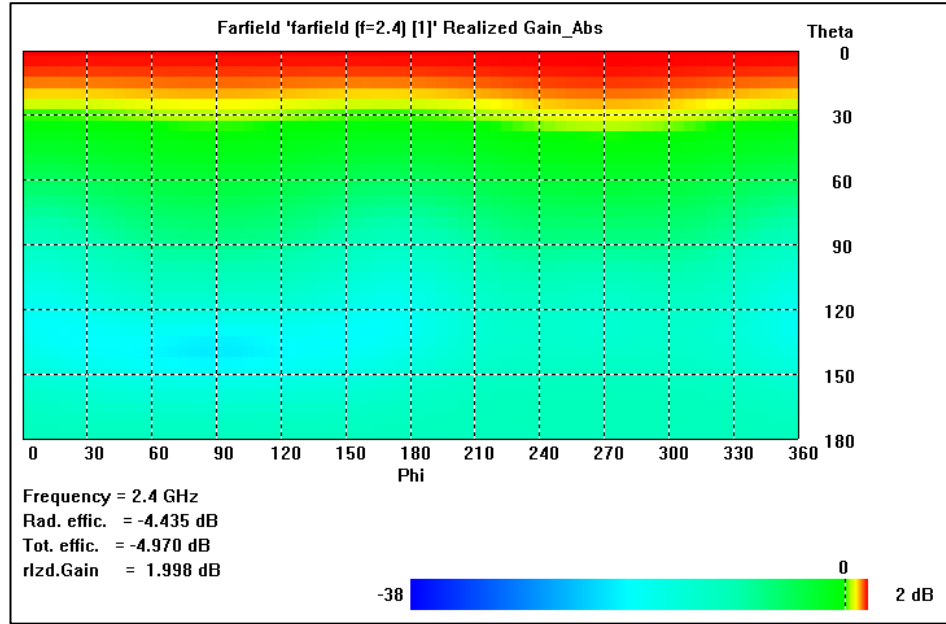


Şekil 3.3: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA'nın S11 grafiği.

Mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılarak oluşturulan basit yapılı, benzer geometrik özelliklere sahip dairesel ve dikdörtgen MPA'lara ilişkin Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verilen S11 parametreleri grafikleri incelendiğinde 2.4 GHz rezonans frekansında -10 dB altında değere ulaşmadıkları ve her ikisinin de bu frekansta ısıma karakteristiği sergilemediği gözlemlenmiştir. Ancak her iki MPA örneği de 1- 5 GHz aralığında çoklu bant özelliği göstermişler ve bu frekanslardan en az bir tanesinde ısıma karakteristiği sergilemişlerdir.

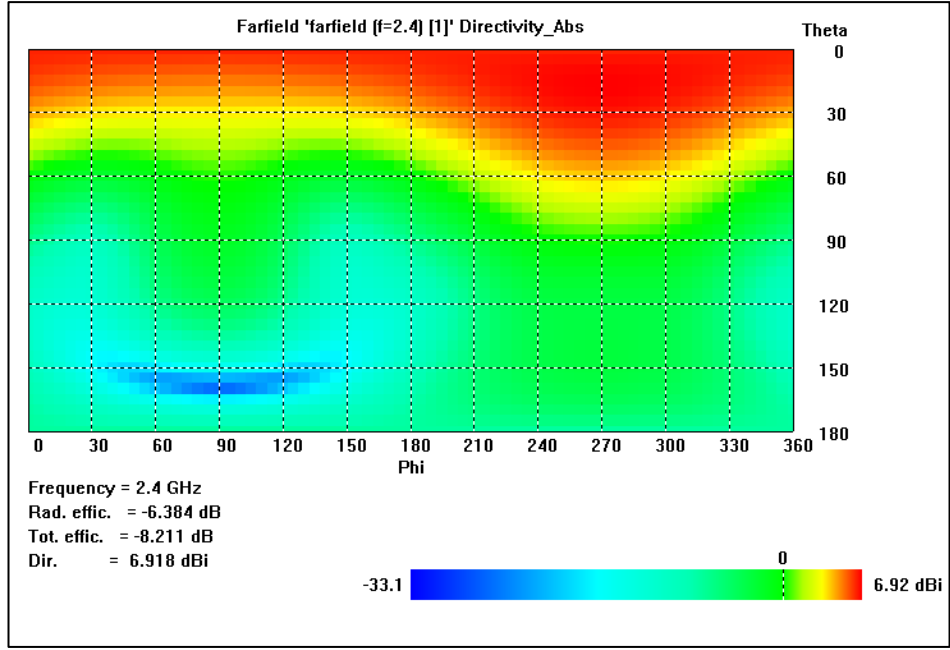


Şekil 3.4: Mikroşerit hat beslemeli dairesel MPA 2D kazanç grafiği.

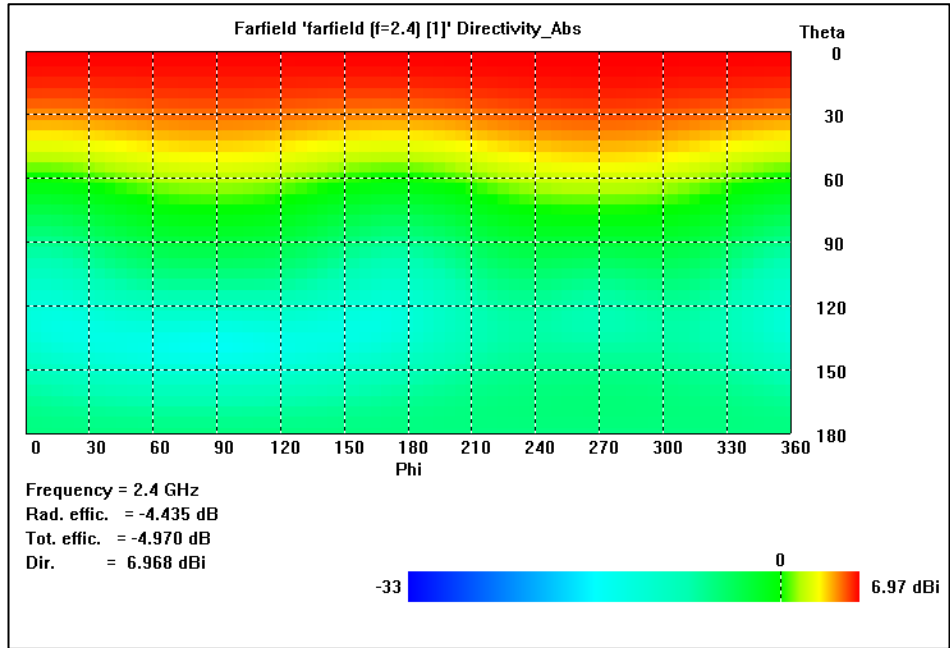


Şekil 3.5: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA 2D kazanç grafiği.

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de verilen mikroşerit hat beslemeli dairesel ve dikdörtgen MPA’lar için kazanç grafiği incelendiğinde 2.4 GHz rezonans frekansında ışıma yapamadıkları için kazanç değerleri de 2 dB’in altında gelmiştir. Tasarlanan antenlerin her yöne ışıma yapması beklenmektedir ancak her iki anten de bu karakteristiği sergilememiştir.



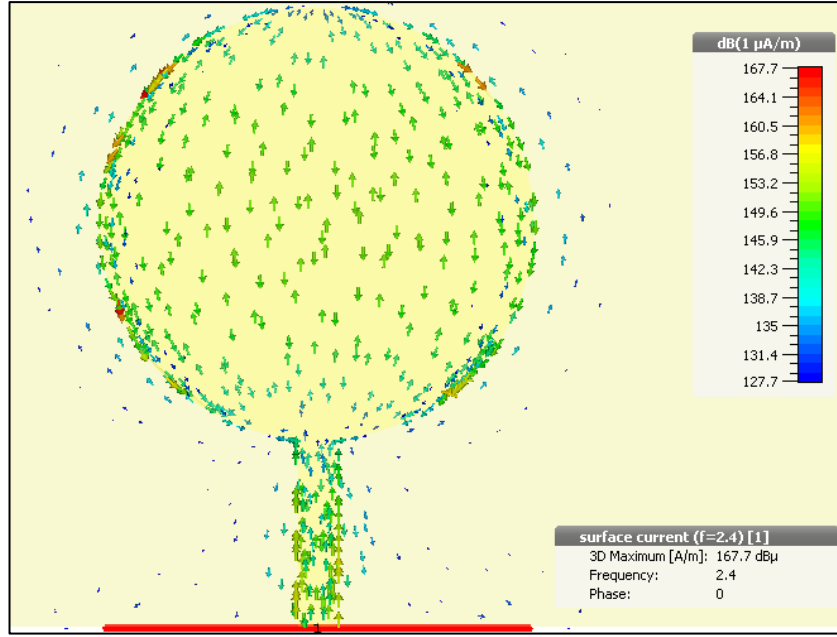
Şekil 3.6: Mikroşerit hat beslemeli dairesel MPA'nın yönlendiricilik grafiği.



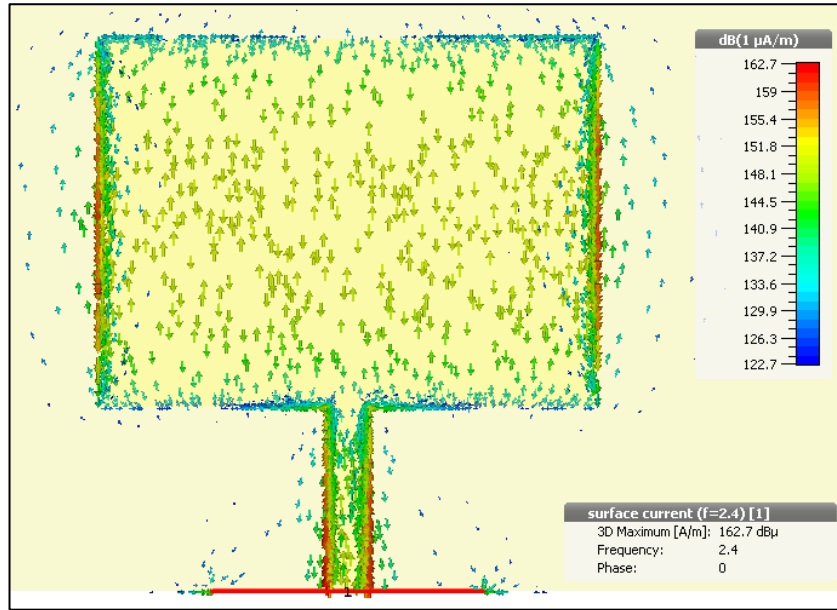
Şekil 3.7: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA'nın yönlendiricilik grafiği.

Şekil 3.6 ve 3.7'de yönlendiricilik grafikleri verilmiştir. MPA'lar 2.4 GHz rezonans frekansında maksimum 6.9 dB yönlendiriciliğe sahiptirler.

Şekil 3.8'de dairesel MPA tasarımına ilişkin yüzey akım dağılımı verilmiş ve maksimum yüzey akım genliği  $167.7 \mu A/m$  olarak bulunmuştur.



Şekil 3.8: Mikroşerit hat beslemeli dairesel MPA'nın yüzey akımları grafiği.



Şekil 3.9: Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen MPA'nın yüzey akımları grafiği.

Şekil 3.9'da dikdörtgen MPA için maksimum yüzey akım genliği  $162.7 \mu A/m$  olarak bulunmuştur. Her iki tasarımda da akım yoğunluğu antenlerin kenarlarına ve besleme kısmına toplanmıştır.

Mikroşerit hat beslemeli dairesel ve dikdörtgen yapıdaki basit iki MPA için düzgün ışıma karakteristiği, iyi bir kazanç eğrisi ve VSWR değerleri elde etmedikleri

gözlemlenmiş olup daha iyi sonuçlar elde edebilmek için bundan sonra yapılacak tasarımlarda 2.4 GHz rezonans frekansında girinti (inset) besleme yöntemi tercih edilmiştir [32].

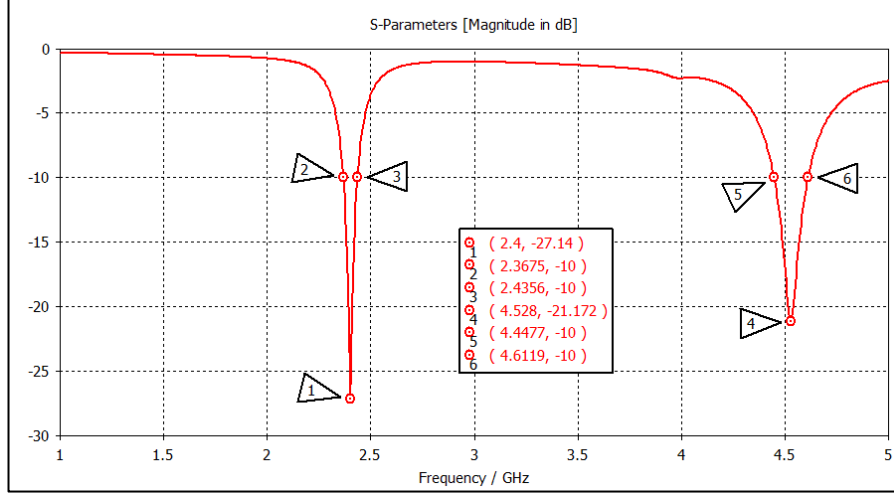
### 3.2.2. Girinti Beslemeli MPA Tasarımı

MPA'lar beslenirken farklı yöntemler kullanılabilir ve MPA'nın giriş empedansı ile ışıma özellikleri besleme yöntemlerinden etkilenmektedir [32]. Farklı besleme yöntemleri nedeniyle farklı tasarımlar ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.1'de mikroşerit hat besleme yapısı gösterilmiş olup besleme hattı yama ile temas halindedir. Şekil 2.5 ve Şekil 2.7'de tasarımı yapılan MPA'ların besleme şekli yama ile temas etmeyecek şekildedir ve bu besleme girinti besleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Girinti besleme yöntemi sayesinde yama kenardan beslenir ve bu yarıklar giriş kapasitansı oluştururlar. Girinti ile yama arasındaki mesafe her iki tarafta da eşittir. Girinti besleme yarıklarının yama ile temasının başladığı noktadan yama merkezine doğru gidildiğinde giriş empedansında varyasyonlar oluşmaya başlar ve merkezde sıfırlanır [1]. Bu tezde bundan sonra yapılacak bütün MPA tasarımlarında modellemesi kolay ve empedans dönüştürücü olarak kullanılabilen girinti besleme yöntemi kullanılacaktır [33]. Tablo 3.1'de kullanılan parametreler, girinti beslemeli dairesel ve dikdörtgen MPA tasarımı için de ortak olarak kullanılmaktadır. Ortak parametrelere ilave parametreler Tablo 3.2'de verilmiştir.

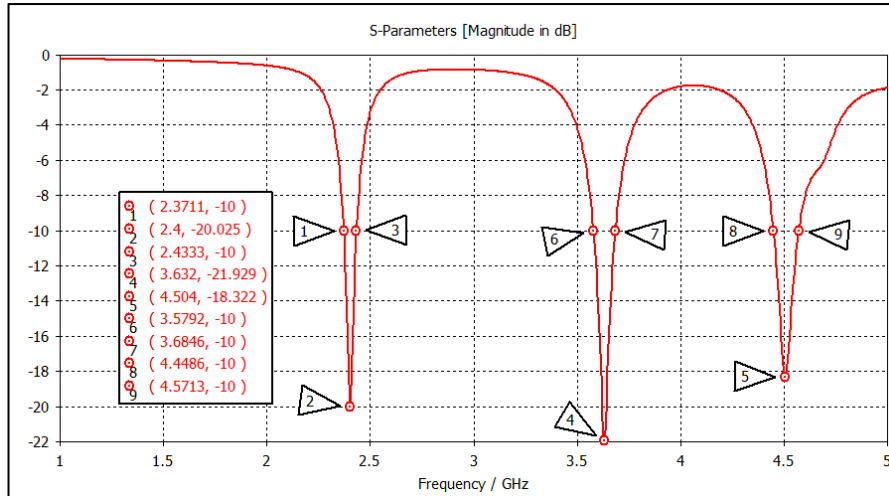
Tablo 3.2: Mikroşerit Girinti Beslemeli Dikdörtgen ve Dairesel MPA İlave Parametreleri.

| MPA Parametreleri                                       | Dairesel Şekilli MPA | Dikdörtgen Şekilli MPA |
|---------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Girinti Besleme Uzunluğu ( $F_i$ )                      | 8.85 mm              | 12 mm                  |
| Girinti Besleme Genişliği ( $W_f$ )                     | 3.1 mm               | 3.1 mm                 |
| Girinti Besleme ile Yama Arasındaki Mesafe ( $G_{pf}$ ) | 1 mm                 | 1 mm                   |
| Besleme Uzunluğu ( $F$ )                                | 20 mm                | 20 mm                  |

Şekil 2.5 ve Şekil 2.7’de verilen girinti beslemeli MPA modelleri için Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’deki değerler kullanılarak dairesel ve dikdörtgen MPA tasarımları yapılmıştır.



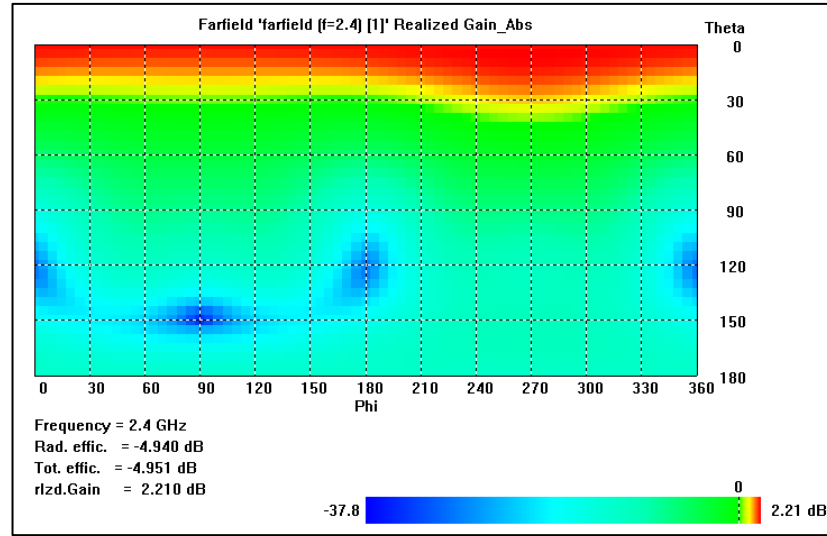
Şekil 3.10: Girinti beslemeli dairesel MPA’nın S11 grafiği.



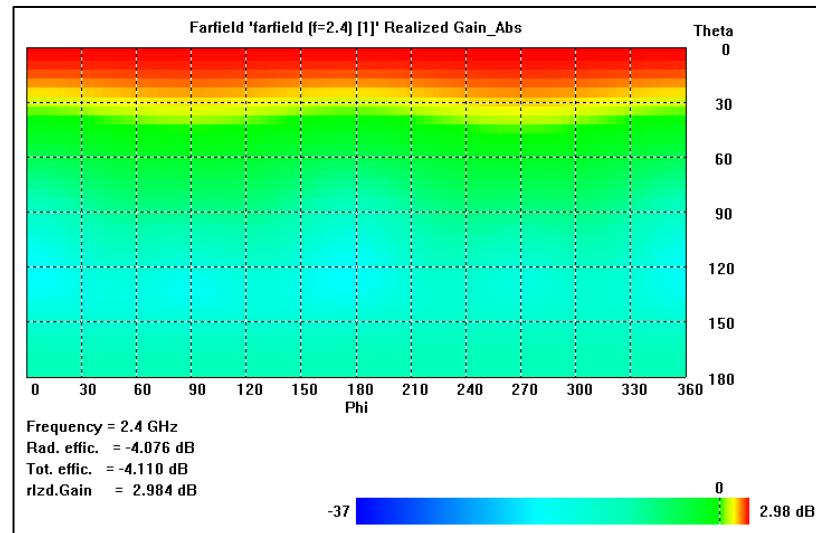
Şekil 3.11: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA’nın S11 grafiği.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de, sırasıyla girinti beslemeli dairesel ve girinti beslemeli dikdörtgen MPA’lara ilişkin S11 parametrelerini gösteren grafikler verilmiştir. Tasarlanan antenlerin ışıma yapabilmesi için  $S_{11} \leq -10$  dB koşulunun sağlanması gerekir [34]. Yama antenlerin 2.4 GHz rezonans frekansında bant genişliği hesaplandığında dairesel anten için 2.4356 – 2.3675 GHz aralığında 68 MHz ve yüzde olarak %2.83 iken aynı rezonans frekansında dikdörtgen yama anten için 2.4333 –

2.3711 GHz aralığında 62 MHz yüzde olarak %2.5 olarak bulunmuştur. MPA’larda genel olarak bant genişliği %2-5 arasında bir değerde geliyorsa eğer besleme yönteminin iyi olduğu bulgusu elde edilebilir [35]. Girinti besleme yöntemi ile bir önceki yöntem olan mikroşerit hat besleme yöntemi karşılaştırıldığında 2.4 GHz rezonans frekansında mikroşerit hat besleme yöntemine göre bariz bir iyileşme gözlemlendiği ve bu aynı rezonans frekansında girinti beslemenin ışıma yaptığı gözlemlenmiştir.

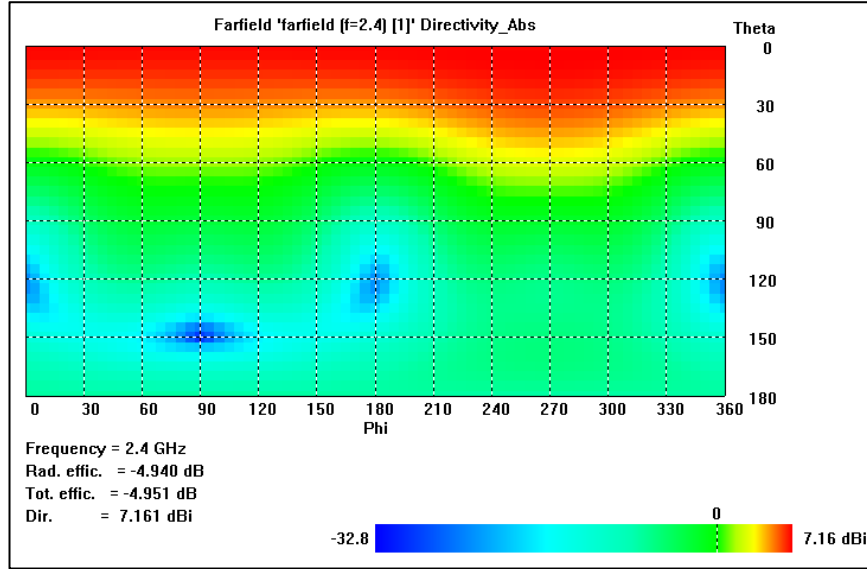


Şekil 3.12: Girinti beslemeli dairesel MPA’nın 2D kazanç grafiği.

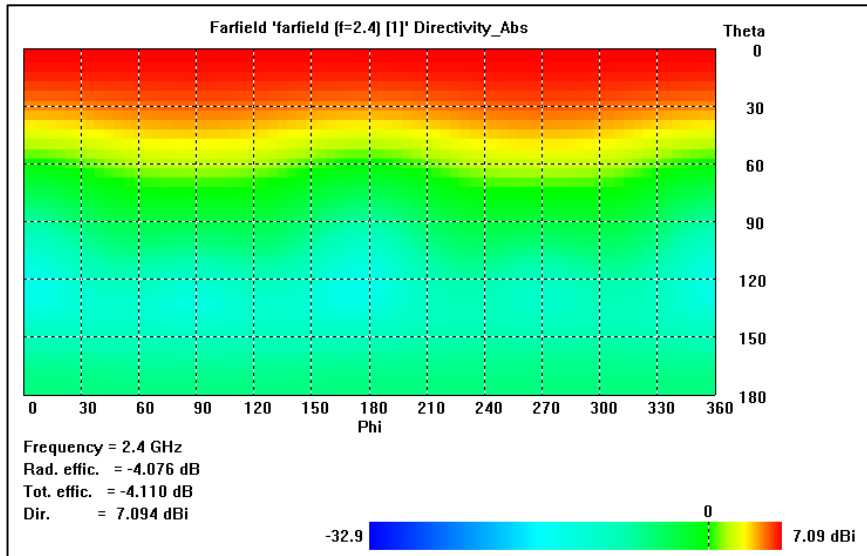


Şekil 3.13: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA’nın 2D kazanç grafiği.

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de her iki anten için kazanç grafikleri gösterilmektedir. Kazanç grafikleri kıyaslandığında dairesel şekilli MPA’nın 2.4 GHz frekans bandındaki kazancı 2.2 dB, dikdörtgen şekilli MPA’nın 2.4 GHz frekans bandındaki kazancı 2.9 dB değerindedir.

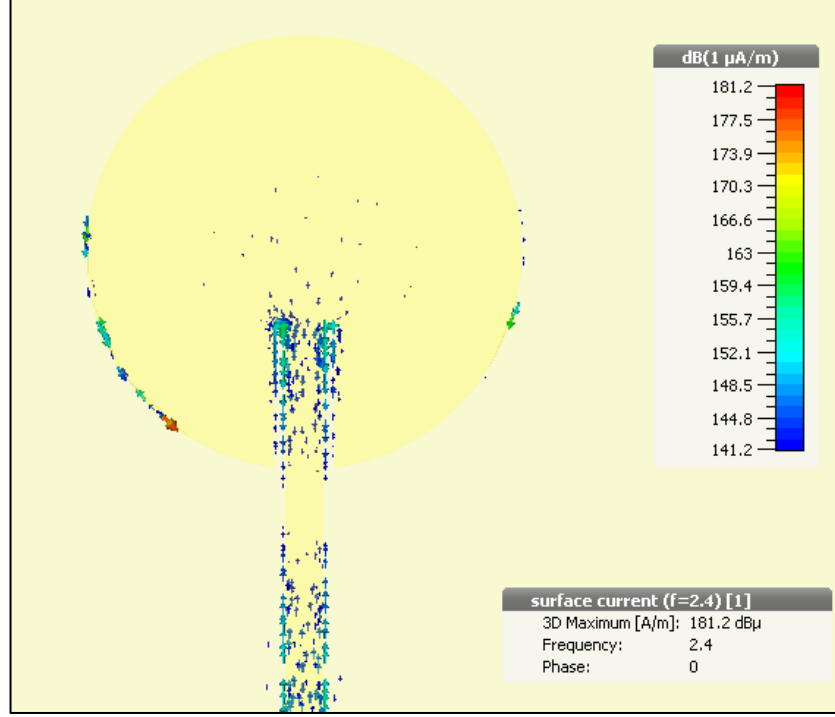


Şekil 3.14: Girinti beslemeli dairesel MPA’nın yönlendiricilik grafiği.

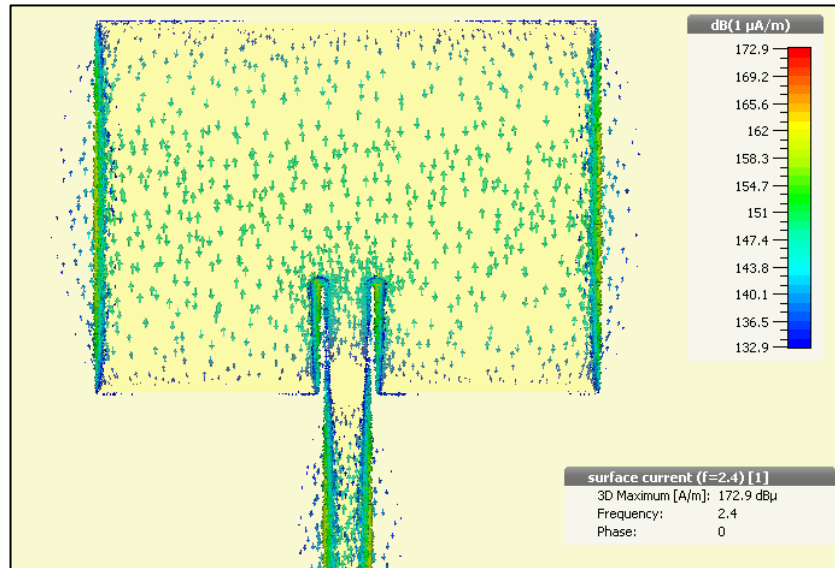


Şekil 3.15: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA’nın yönlendiricilik grafiği.

Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de MPA’lar için yönlendiricilik grafikleri verilmiştir. Dairesel MPA için maksimum yönlendiriciliği 7.1 dB değeri almış olup dikdörtgen MPA için bu değer 7 dB’dir.



Şekil 3.16: Girinti beslemeli dairese MPA’nın yüzey akımları grafiği.



Şekil 3.17: Girinti beslemeli dikdörtgen MPA’nın yüzey akımları grafiği.

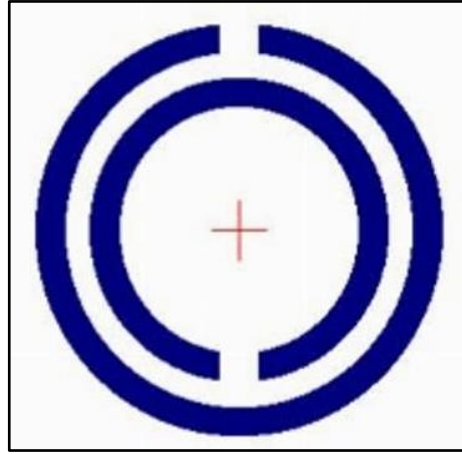
Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'yi incelediğimizde her iki antene ait yüzey akımları grafiği verilmiştir. Aynı rezonans frekansında dairesel MPA maksimum yüzey akımı  $181.2 \mu A / m$  iken dikdörtgen MPA maksimum yüzey akımı  $172.9 \mu A / m$ 'dir. Akım dağılımının MPA çevresinde ve girinti besleme bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir.

Yüzey alanları yaklaşık olarak kıyaslandığında dairesel MPA boyutlarının dikdörtgen MPA boyutlarından küçük olduğu avantajının yanında bant genişliğinin de dikdörtgen şekilli MPA'dan daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Ancak kazanç değeri göz önüne alındığı durumda ise dikdörtgen şekilli MPA daha avantajlıdır. Tez çalışmasında daha geniş bantta çalışabilmek maksadıyla yapılacak diğer tasarımlar için girinti beslemeli dairesel şekilli MPA geometrisi üzerinde uygulama çalışmaları yapılacaktır.

### **3.2.3. Girinti Beslemeli Dairesel Şekilli Çoklu Yarık Halka Rezenatör (MSRR) MPA Tasarımı**

Son yıllarda yapılan çalışmalarda düşük maliyetli anten tasarımı ihtiyacı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle farklı geometrilerde, iyi kazanç değerleri verebilen MPA'lar tasarlanmıştır. İyi empedans uyumu, stabil radyasyon düzeni ve geniş bant sistemleri uygulamalarında kullanım için uygun farklı konfigürasyona sahip düzlemsel geniş bant antenlere genel bir bakış açısı kazandırılmış ve yeni tasarımlar geliştirilmiştir [36]. MPA etrafına, yama veya toprak yüzeyine yarıklar oluşturmak, değiştirilmiş boyutlarda geometriler kullanmak, çok katmanlı alt tabakalar kullanmak gibi yöntemlerle anten boyutu küçültülüp, uzak alan kazancı iyileştirmesi yapılmakta, bant genişliği arttırılmakta ve düşük rezonans frekansında antenler elde edilmeye çalışılmaktadır. Oluşturulan yarıklar veya girintilerin etkisiyle antenin etkin uzunluğu arttırılabilir ve bu sayede rezonans frekansı düşürülebilir. Bu kapsamda metamalzemeler kullanılmaktadır. Metamalzemeler doğadaki malzemelerde bulunmayan özelliklere sahip şekilde tasarlanan yapay malzemelerdir. Metamalzemelerin iki önemli parametresi manyetik geçirgenlik ve dielektrik geçirgenliktir. Bu iki parametre sıradan malzemelerde pozitif iken metamalzemelerde negatiftirler [37]. Negatif geçirgenlik değerleri yeterince düşük frekanslarda serbest elektron plazmasına benzer şekilde davrandığı bilinen bir dizi ince paralel iletken tel ile sağlanır. Başlangıçta metamalzemeler meta bloklarda kullanılmak için tasarlanmış

ancak fiziksel olarak gerçekleştirilmesi zor, hacim olarak büyük ve pahalı olduğu için MPA tasarımlarında farklı varyantlar şeklinde kullanılmaktadırlar [38]. Literatürde kare, spiral gibi çok sayıda metamalzeme yapısı vardır [39]. Bu varyantlardan en yaygın olarak kullanılanı yarık halka rezonatörleridir (split ring resonator- SRR) [40]. Negatif geçirgenlik özelliği sergileyen metamalzemeler SRR kullanılarak elde edilebilir. SRR yapısında manyetik rezonans oluşturulan halka veya farklı geometrideki yarıklar arasından ve halkaların birbiri arasındaki boşluğundan yayılır. İkili yapı bir SRR geometrisi Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Bu yapıda elektromanyetik etki her iki halkanın zıt pozisyonlarına açılan yarık sayesinde tek bir halkaya kıyasla daha azaltılmıştır [40]. Geometrilere halka sayısı 4’e çıktığı zaman çoklu yarık halka rezonatör (multi split resonator-MSRR) olarak adlandırılır.

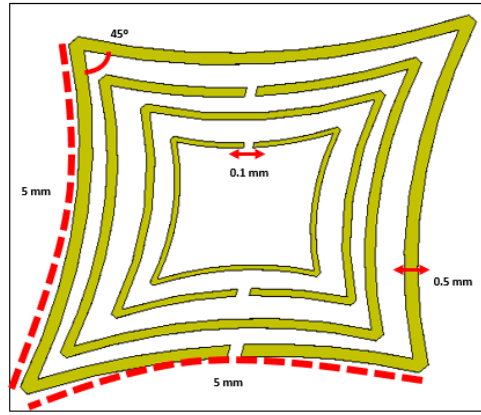


Şekil 3.18: SRR parça geometrisi.

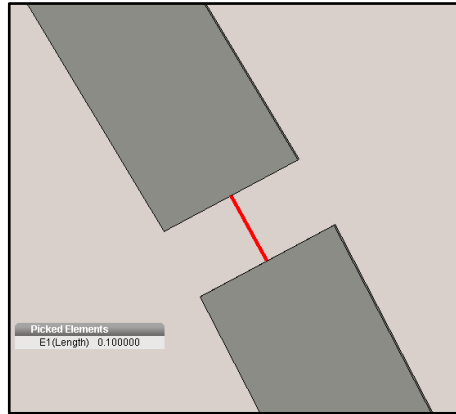
Tablo 3.3: MSRR İlaveli Girinti Beslemeli Dairesel MPA Parametreleri.

| MSRR Parametreleri                   | Değerler |
|--------------------------------------|----------|
| MSRR Genişliği ( $W_{msrr}$ )        | 0.5 mm   |
| MSRR Uzunluğu ( $L_{msrr}$ )         | 5 mm     |
| MSRR Yay Açısı                       | 45°      |
| MSRR Yay Arası Mesafe ( $d$ )        | 0.5 mm   |
| MSRR Yay Arası Açıklık ( $d_{gap}$ ) | 0.1 mm   |

Bu tezde yapılan çalışmalarda girinti beslemeli dairesel MPA yapısı yanında kompakt uygulamalar geliştirilmiş olup klasik halka, spiral veya kare MSRR yerine Şekil 3.19’da gösterildiği gibi yay şeklinde MSRR ilavesi yapılmıştır. Kullanılan dairesel MPA geometrisi daha önce kullanmış olduğumuz ölçülerin aynısı olacak şekilde belirlenmiş ve Tablo 3.3’de MSRR ilavesi sonrasında eklenen parametreler verilmiştir. Tasarlanan MPA CST Microwave Studio programı aracılığıyla simüle edilmiş ve bant genişliği, kazanç, toplam verimlilikleri incelenmiştir.



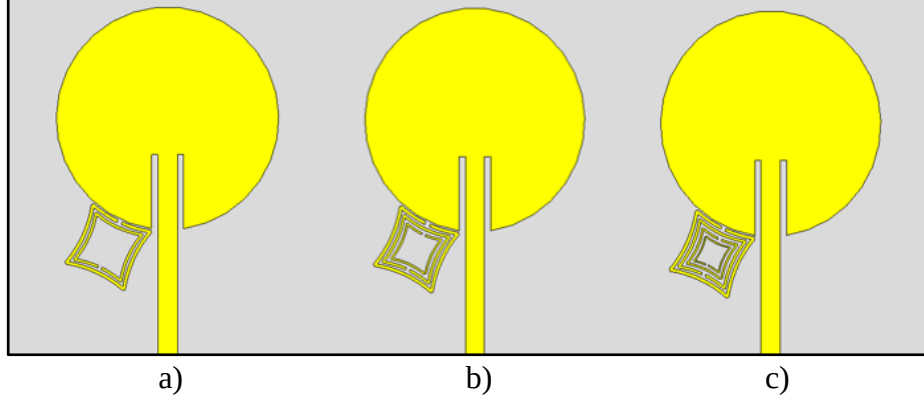
Şekil 3.19: Yay biçimli MSRR parça geometrisi.



Şekil 3.20: MSRR iki yay arası açıklık uzunluğu.

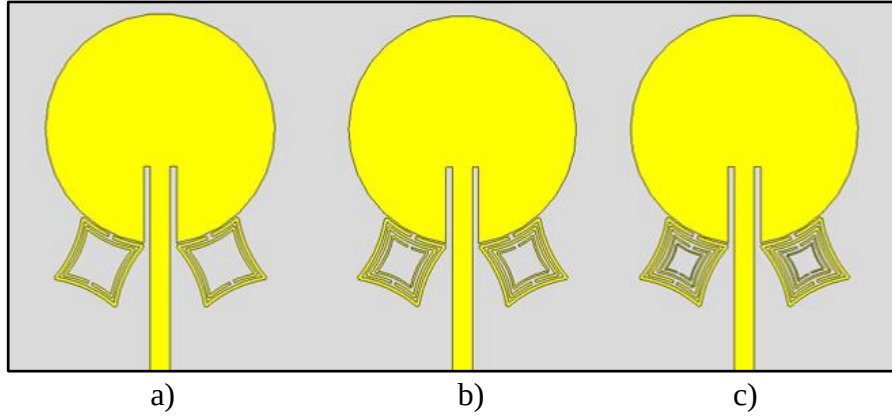
MSRR yapısı oluşturulurken her bir yay formu daire dilimin dörtte biri olacak şekilde ve 45 derecelik açılarla bükülmüş olup uzunluk ve genişlikleri Tablo 3.3’de verilmiştir. İki yay arası mesafe 0.5 mm’dir. Her bir yay üzerinde açılmış olan yarık genişliği 0.1 mm’dir ve Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Bu tezde iki, üç ve dört adet iç içe geçmiş yaylarla oluşturulmuş tasarım çalışmalarında her bir içe geçen yay CST Microwave Studio programında 0.8’lik küçültme oranları ile oluşturulmuştur.

Şekil 3.21.a)'da tek bir yama anten yapısı yanında iki halkalı tek bir MSRR ilavesi, Şekil 3.21.b)'de MPA yanında üç halkalı tek bir MSRR ilavesi ve Şekil 3.21.c)'de MPA yanında dört halkalı tek bir MSRR ilaveli MPA yapıları gösterilmiştir.



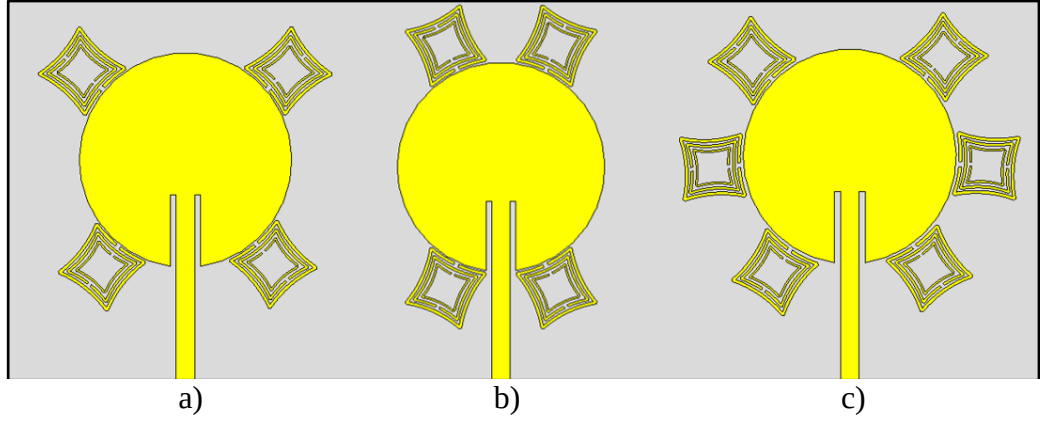
Şekil 3.21: Girinti beslemeli dairesel MPA geometrileri: a) İki, b) Üç ve c) Dört halkalı tek MSRR ilaveli.

Şekil 3.22.a)'da MPA etrafında birbirleri ile aynı boyutlarda iki halkalı iki adet MSRR ilavesi, Şekil 3.22.b)'de MPA etrafında birbirleri ile aynı boyutlarda üç halkalı iki adet MSRR ilavesi ve Şekil 3.22.c)'de birbirleri ile aynı boyutlarda dört halkalı iki adet MSRR ilaveli MPA yapıları gösterilmiştir.

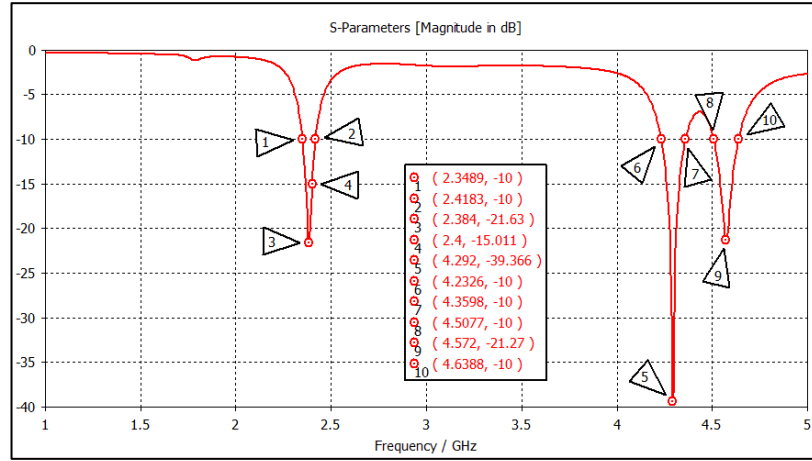


Şekil 3.22: Girinti beslemeli dairesel MPA geometrileri: a) İki, b) Üç ve c) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.

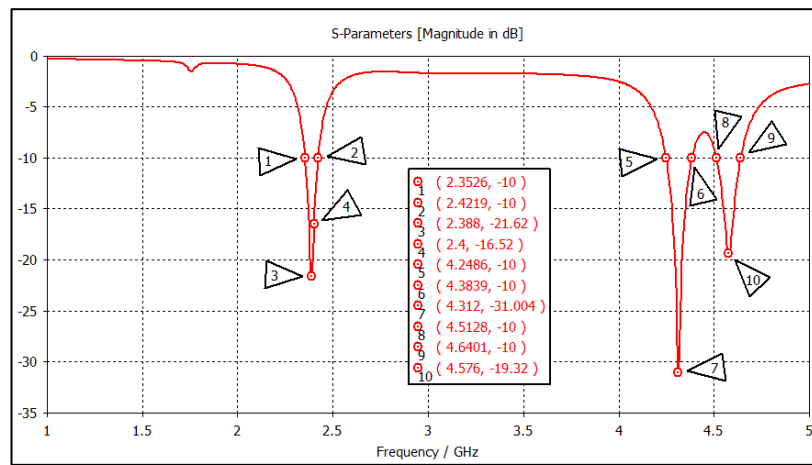
Şekil 3.23.a)'da MPA etrafında birbirleri ile aynı boyutlarda üç halkalı köşelerde dört adet MSRR ilavesi, Şekil 3.23.b)'de MPA etrafında birbirleri ile aynı boyutlarda üç halkalı besleme hattına yakın dört adet MSRR ilavesi ve Şekil 3.23.c)'de birbirleri ile aynı boyutlarda üç halkalı altı adet MSRR ilaveli MPA yapıları gösterilmiştir.



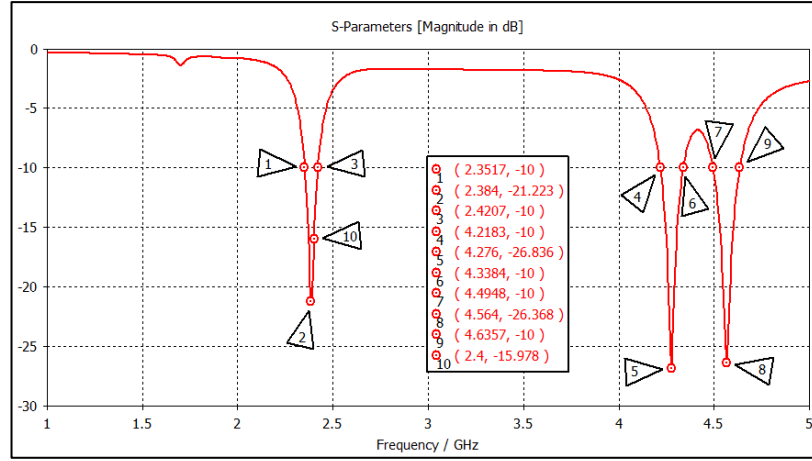
Şekil 3.23: Girinti beslemeli dairesel MPA geometrileri: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli ve c) Üç halkalı altı MSRR ilaveli.



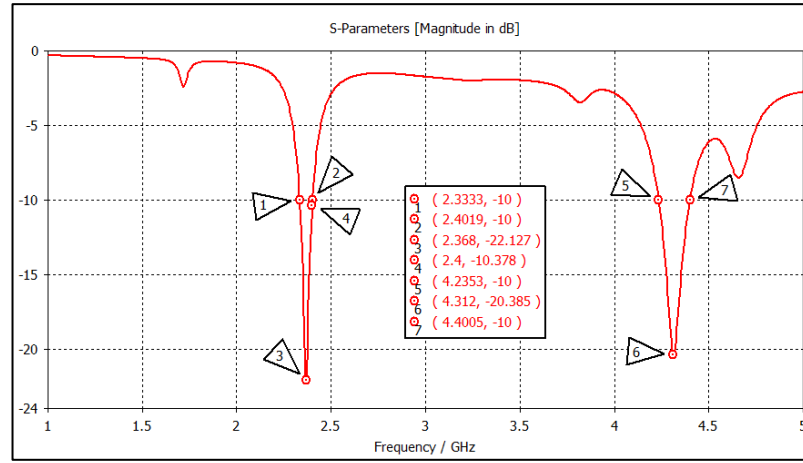
Şekil 3.24: Girinti beslemeli iki halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



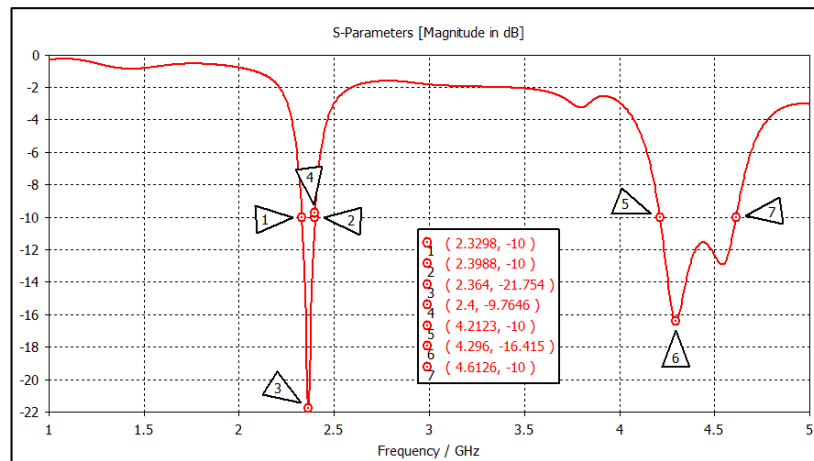
Şekil 3.25: Girinti beslemeli üç halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



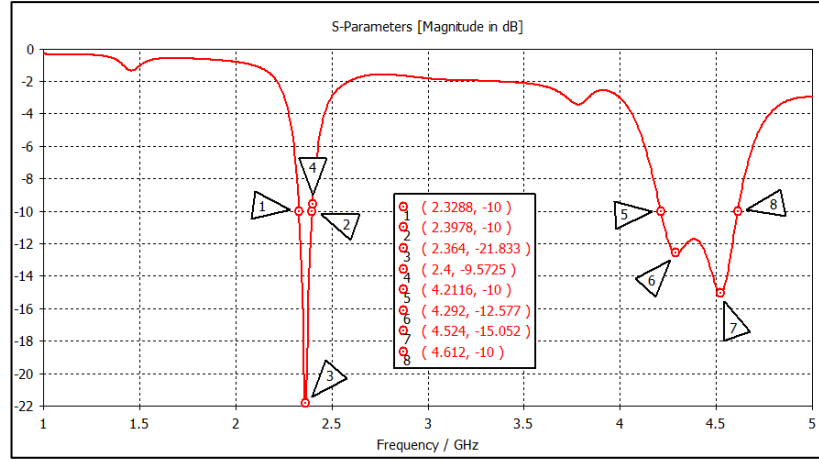
Şekil 3.26: Girinti beslemeli dört halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



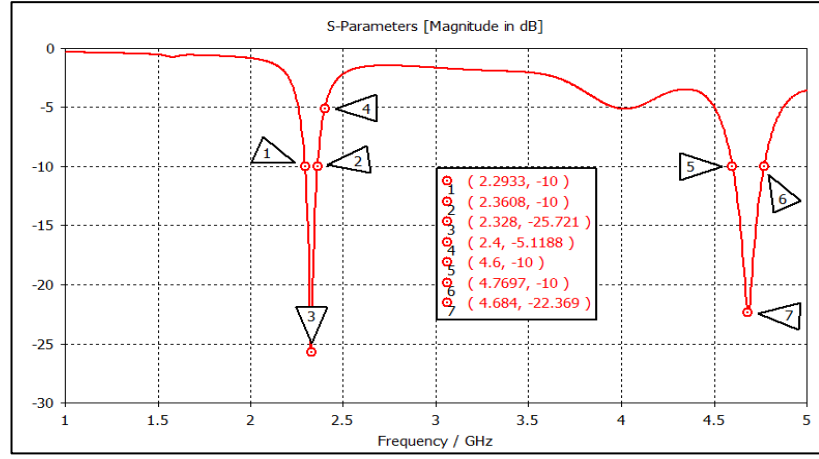
Şekil 3.27: Girinti beslemeli iki halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



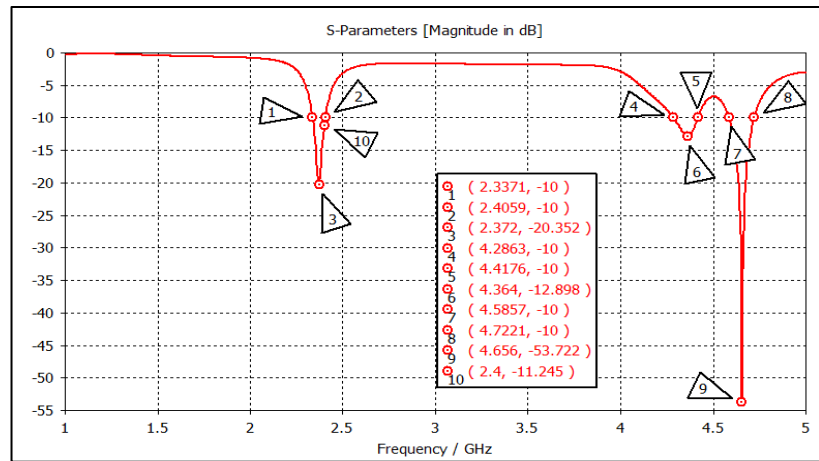
Şekil 3.28: Girinti beslemeli üç halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



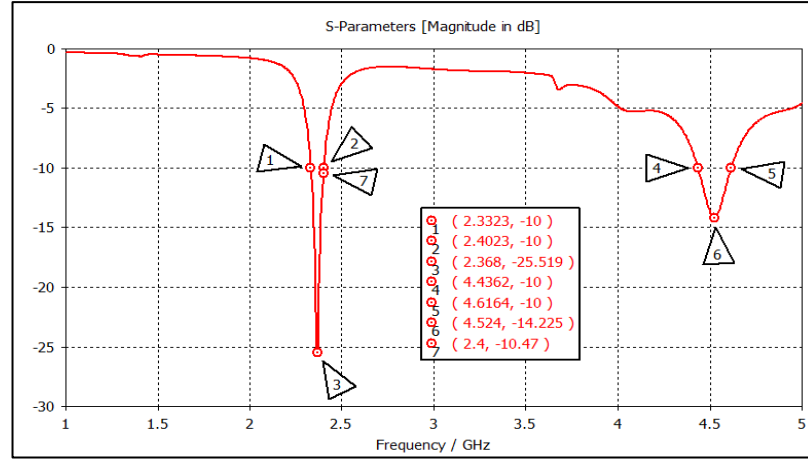
Şekil 3.29: Girinti beslemeli dört halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



Şekil 3.30: Girinti beslemeli üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.



Şekil 3.31: Girinti beslemeli üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.

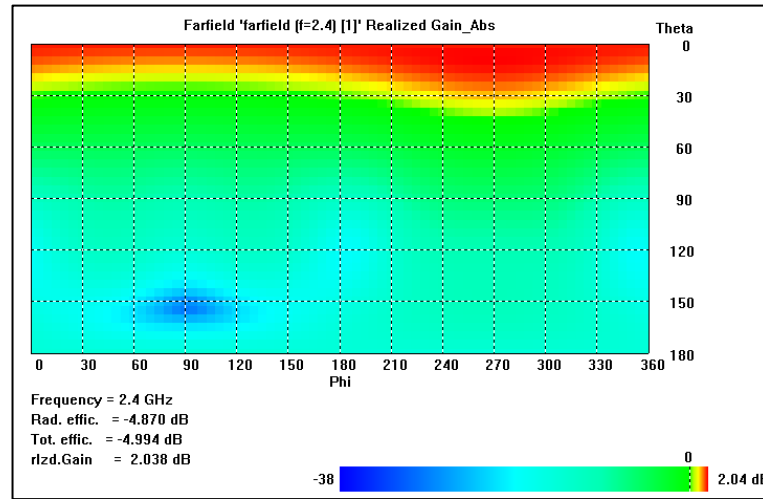


Şekil 3.32: Girinti beslemeli üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA'nın S11 grafiği.

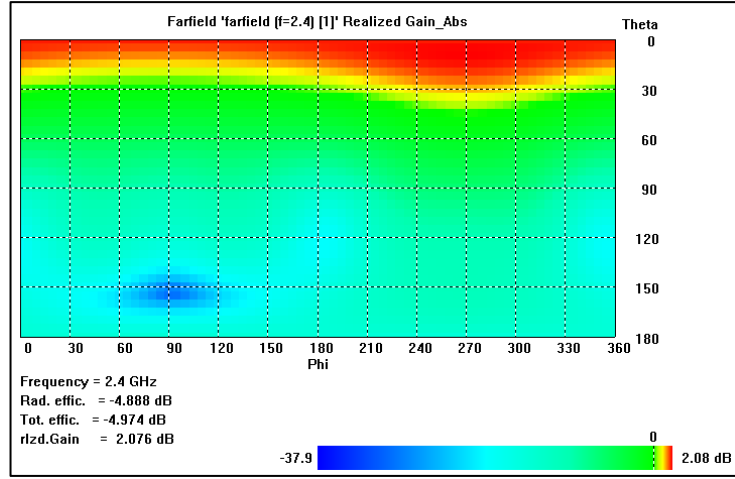
Şekiller 3.24-3.32'de MSRR ilaveli dairesel MPA'lar için S11 grafikleri verilmiştir. 2.4 GHz rezonans frekansında Şekil 3.24'de verilen iki halkalı tek MSRR ilaveli MPA için bant genişliği 69 MHz ve yüzde olarak %2.9 hesaplanmıştır. Aynı anten çoklu bant özelliği gösteriyor olup 4.3 ve 4.5 GHz frekanslarında, sırasıyla, 127 MHz ve 131 MHz bant genişliğine sahiptir ve yüzdelik değerleri yaklaşık olarak %2.9 ve %2.8'dir. Anten her üç bantta da ışıma karakteristiğine sahip olup 4.5 GHz bandında daha geniş bant genişliğine sahiptir. Şekil 3.25'de verilen S11 grafiği incelendiğinde üç halkalı tek MSRR ilaveli MPA için 2.4 GHz'de bulunan bant genişliği 69 MHz ve yüzde değeri %2.9'dur. Bu MPA çoklu bant özelliği göstermiş olup 4.3 GHz'de 135 MHz ve 4.5 GHz'de de 127 MHz bant genişliğine sahiptir. Şekil 3.26'da verilen dört halkalı tek MSRR ilaveli MPA için S11 grafiği incelendiğinde 2.4 GHz'deki bant genişliği 69 MHz ve yüzde değeri %2.8 olarak hesaplanmıştır. Aynı MPA yapısı 4.2 GHz ve 4.5 GHz'de de ışıma karakteristiği göstermiştir ve bant genişliği 120 MHz ile 140 MHz olarak hesaplanmıştır. Yüzde değerleri %2.8 ve %3'tür. Şekil 3.27'de verilen iki halkalı iki MSRR ilaveli MPA için S11 grafiği incelendiğinde 2.4 GHz'deki bant genişliği 68 MHz ve yüzde değeri %2.8 olarak hesaplanmıştır. Aynı MPA yapısı 4.3 GHz'de de ışıma karakteristiği göstermiştir ve bant genişliği 165 MHz olarak hesaplanmıştır. Yüzde değerleri %3.8'dir. Şekil 3.28'de verilen üç halkalı iki MSRR ilaveli MPA için S11 grafiği incelendiğinde 2.4 GHz'de -10 dB'in altında değer almadığı için ışıma karakteristiği sergilememiş olup 3.36 GHz'deki bant genişliği 69 MHz ve yüzde değeri %2.9'dur. Aynı MPA 4.3 GHz'de de ışıma karakteristiği sergilemiş olup bant genişliği 400 MHz olarak hesaplanmıştır ve yüzde değeri %9.3'tür. Şekil 3.29'da verilen dört halkalı iki MSRR ilaveli MPA

için S11 grafiği incelendiğinde 2.4 GHz’de -10 dB’in altında değeri olmadığı için ışıma karakteristiği sergilememiş olup 3.36 GHz’deki bant genişliği 69 MHz ve yüzde değeri %2.9’dur. Aynı MPA 4.3 GHz ve 4.5 GHz’de 400 MHz bant genişliği değerlerine sahip ve yüzde değerleri %9.3 ve %8.8’dir. Şekil 3.30’da üç halkalı köşelere yerleştirilmiş dört MSRR ilaveli MPA yapısı için bant genişliği 2.4 GHz’de 67 MHz ve yüzde değeri %2.9 olarak hesaplanmıştır. Bu antenin 4.6 GHz frekansındaki bant genişliği 169 MHz ve yüzde değeri %3.6’dır. Şekil 3.31’de verilen üç halkalı beslemeye yakın olacak şekilde yerleştirilmiş dört MSRR ilaveli MPA tasarımında 2.4 GHz frekansında bant genişliği 68 MHz ve %2.8 olarak hesaplanmıştır. Çoklu bant özelliği gösteren bu tasarımda 4.3 GHz frekansında bant genişliği 131 MHz ve %3’tür. 4.6 GHz frekansında bant genişliği 136 MHz ve %2.9’dur. Şekil 3.32’de verilen üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA yapısı için 2.4 GHz frekansında bant genişliği 70 MHz ve %2.9 olarak hesaplanmıştır. Bu anten yapısı 4.5 GHz frekansında da ışıma karakteristiği sergilemiş ve bant genişliği 180 MHz ve %3.9 olarak hesaplanmıştır.

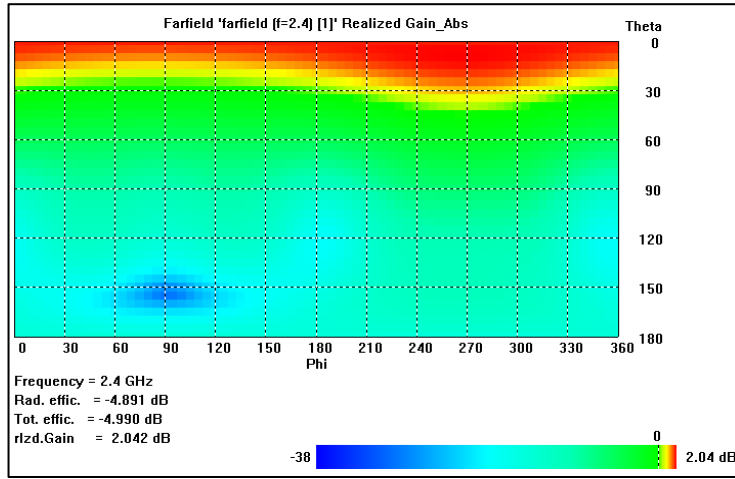
Şekiller 3.33 -3.41’de MSRR ilave MPA’lar için kazanç grafikleri verilmiştir. 2.4 GHz rezonans frekansı için Şekiller 3.33-3.41’de verilen grafikte kazanç değerleri, sırasıyla, 2.03 dB, 2.07 dB, 2.04 dB, 1.87 dB, 1.73 dB, 1.7 dB, 0.65 dB, 1.89 dB ve 1.87 dB olarak hesaplanmıştır. 2.4 GHz rezonans frekansında en iyi kazanç Şekil 3.34’deki tasarımdan elde edilmektedir.



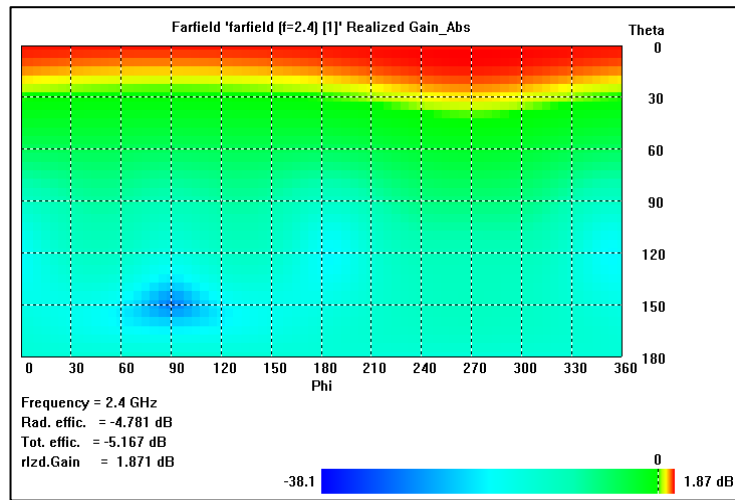
Şekil 3.33: Girinti beslemeli iki halkalı tek MSRR ilaveli MPA’nın kazanç grafiği.



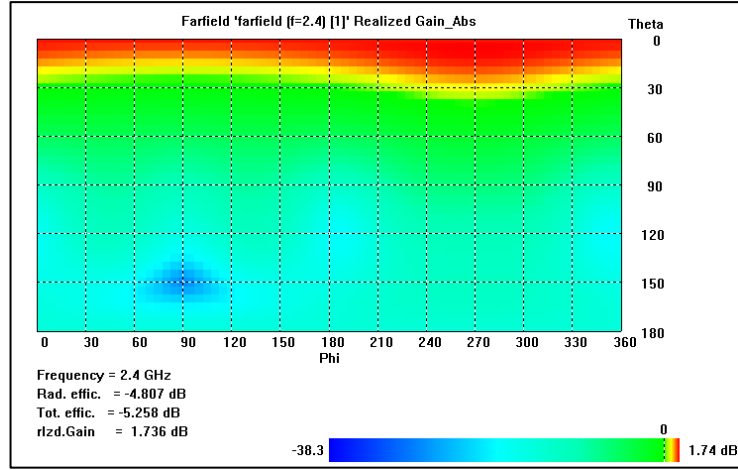
Şekil 3.34: Girinti beslemeli üç halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



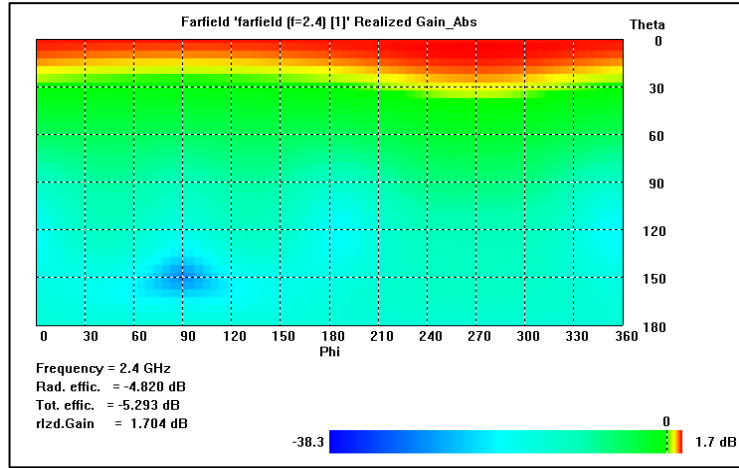
Şekil 3.35: Girinti beslemeli dört halkalı tek MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



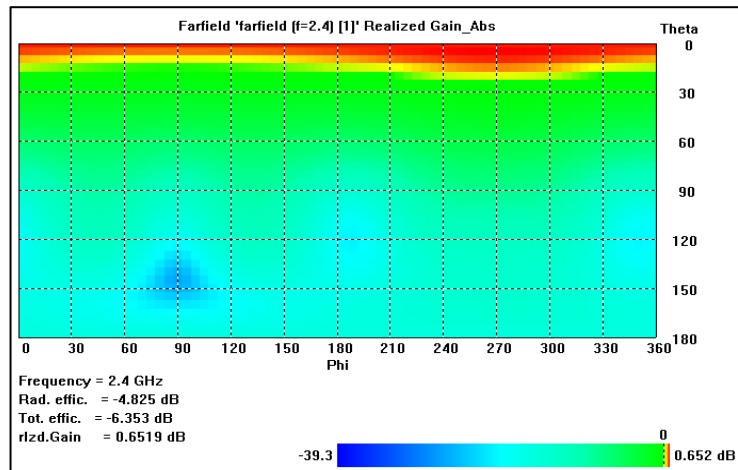
Şekil 3.36: Girinti beslemeli iki halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



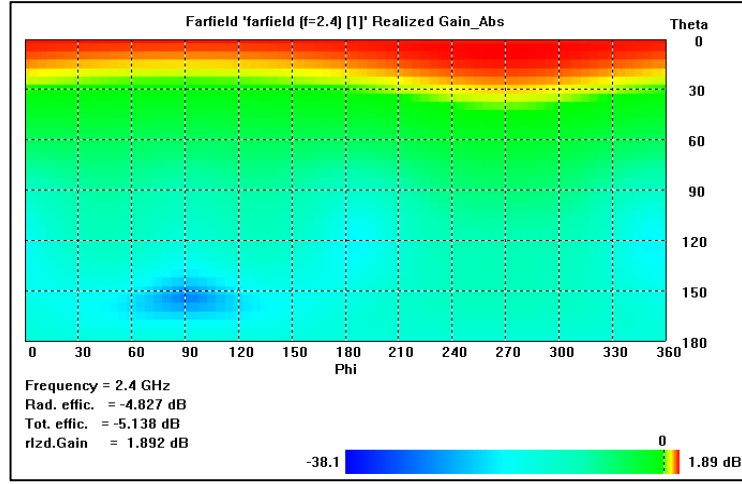
Şekil 3.37: Girinti beslemeli üç halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



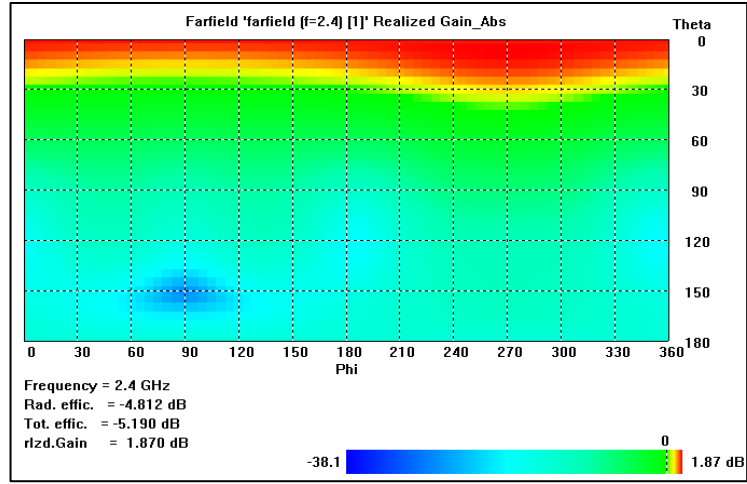
Şekil 3.38: Girinti beslemeli dört halkalı iki MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



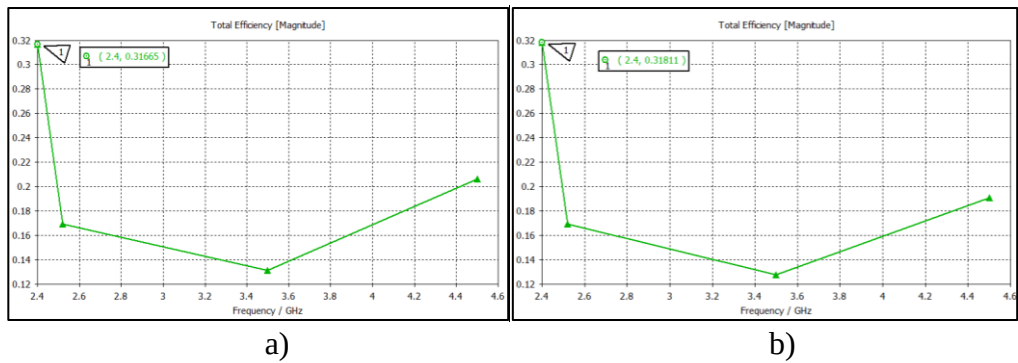
Şekil 3.39: Girinti beslemeli üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



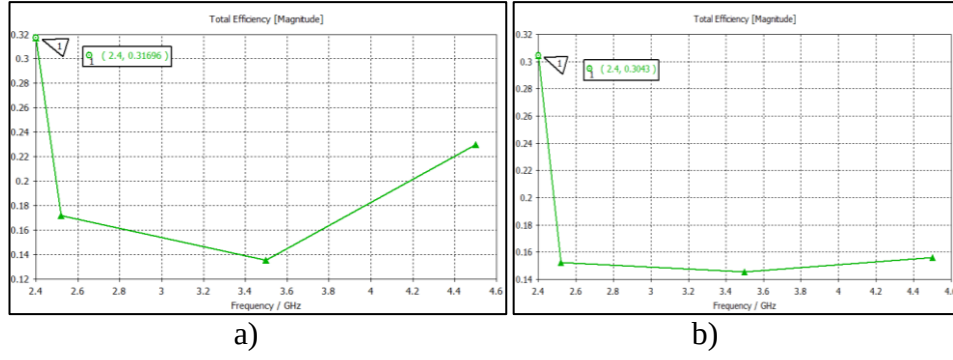
Şekil 3.40: Girinti beslemeli üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



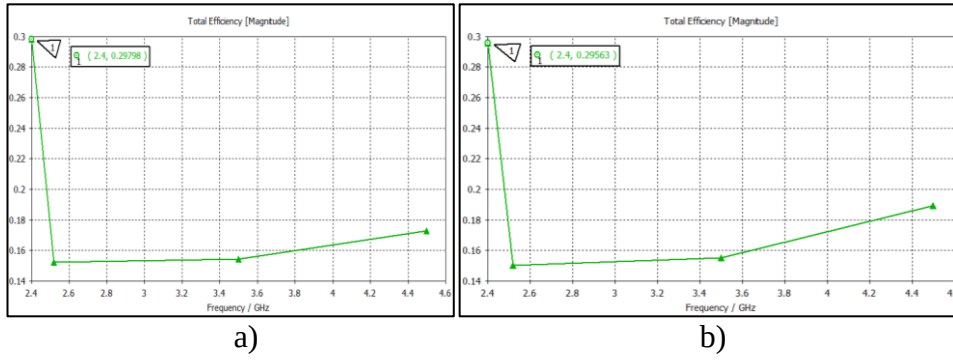
Şekil 3.41: Girinti beslemeli üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA'nın kazanç grafiği.



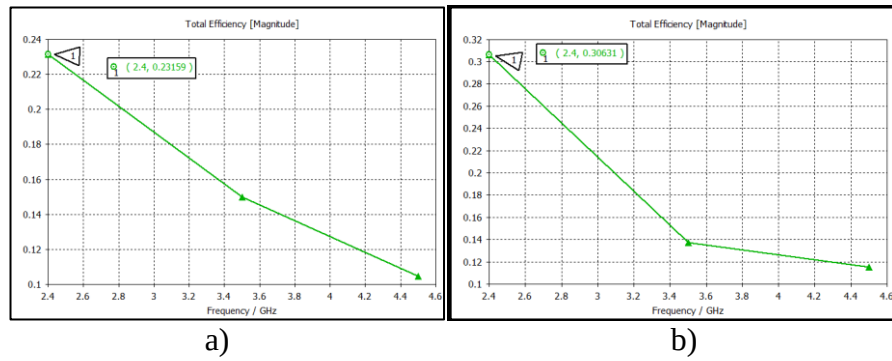
Şekil 3.42: Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) İki halkalı tek MSRR ilaveli, b) Üç halkalı tek MSRR ilaveli.



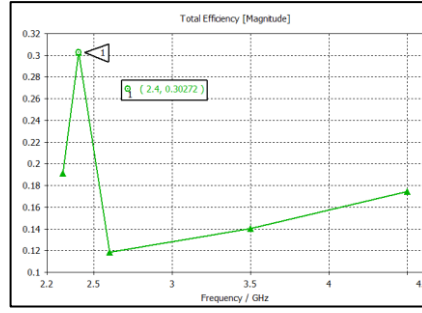
Şekil 3.43: Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) Dört halkalı tek MSRR ilaveli, b) İki halkalı iki MSRR ilaveli.



Şekil 3.44: Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) Üç halkalı iki MSRR ilaveli, b) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.



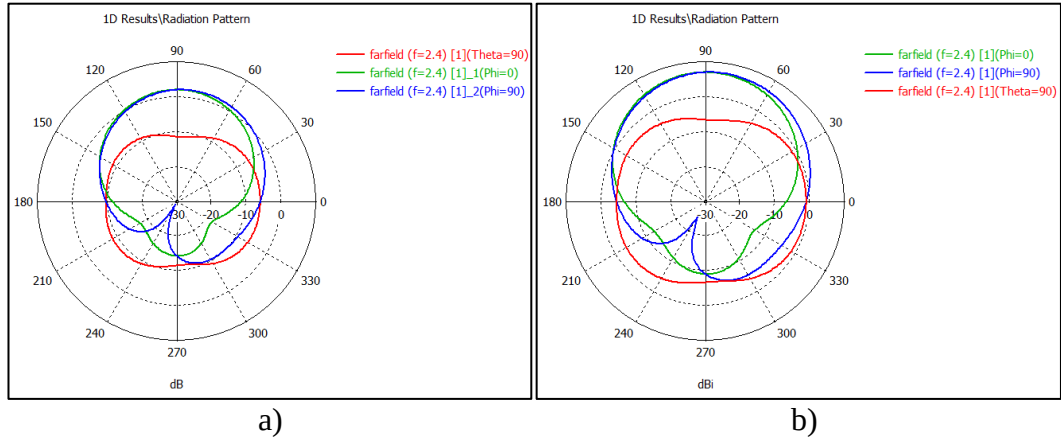
Şekil 3.45: Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli.



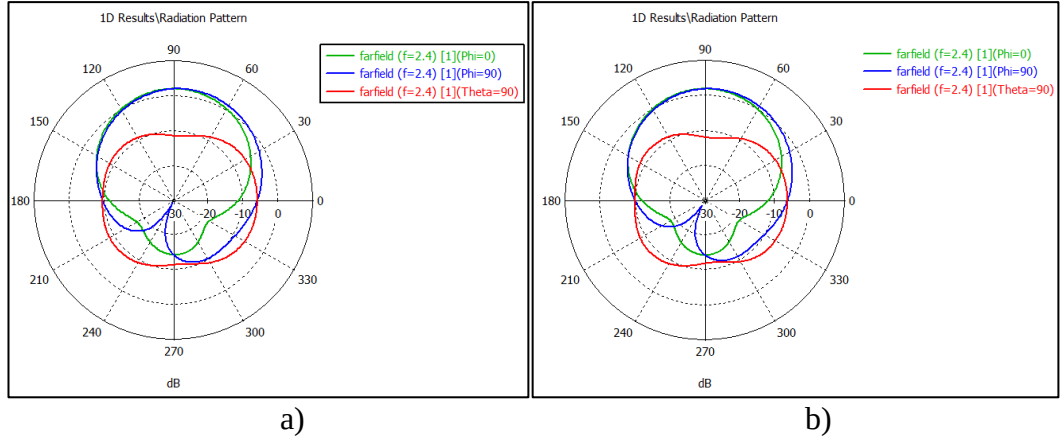
Şekil 3.46: Girinti beslemeli MPA'nın toplam verimlilik grafiği: üç halkalı altı MSRR ilaveli.

Şekiller 3.42-3.46'da MSRR ilaveli MPA'lar için toplam verimlilik grafikleri verilmiştir. 2.4 GHz rezonans frekansı için Şekil 3.42.a)'da verilen grafikte toplam verimlilik %31.6, Şekil 3.42.b)'de verilen grafikte %31.8, Şekil 3.43.a)'da verilen grafikte %31.6, Şekil 3.43.b)'de verilen grafikte %30, Şekil 3.44.a)'da verilen grafikte %29.7 ve Şekil 3.44.b)'de verilen grafikte %29.5, Şekil 3.45.a)'da verilen grafikte %23, Şekil 3.45.b)'de verilen grafikte %30,6 ve Şekil 3.46'da %30 olarak hesaplanmıştır.

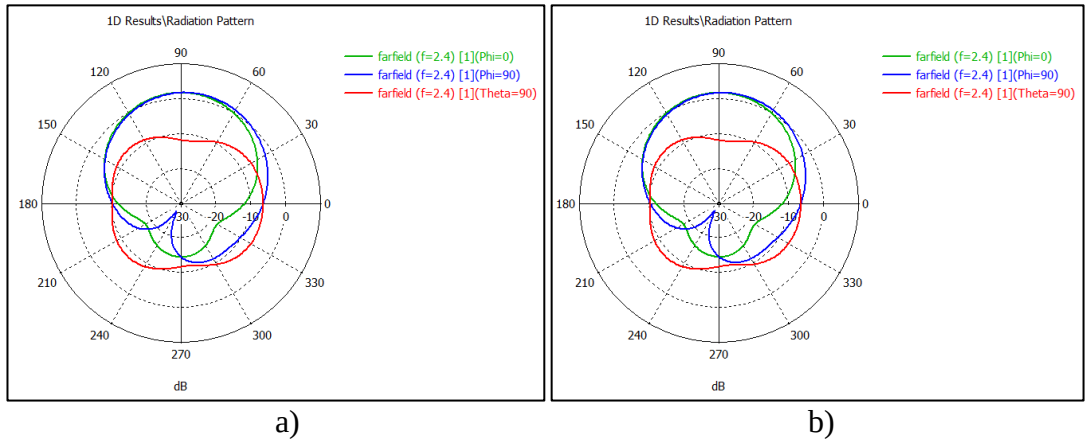
Şekiller 3.47-3.51'de MSRR ilaveli MPA'lar için ışıma örüntüsü grafikleri verilmiştir. 2.4 GHz'de Theta = 90, phi = 0 ve phi = 90 için xy, xz, yz grafikleri tek bir grafik üzerinden ifade edilmiştir.



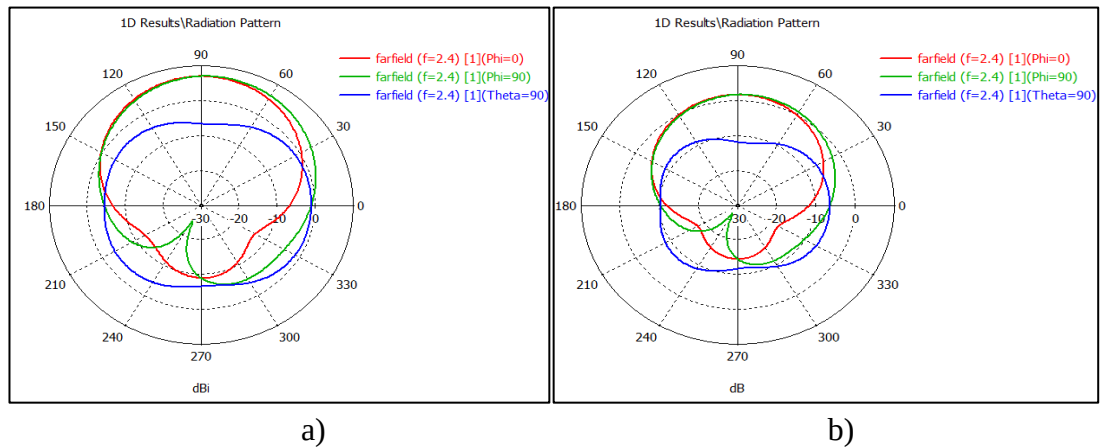
Şekil 3.47: Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) İki halkalı tek MSRR ilaveli, b) Üç halkalı tek MSRR ilaveli.



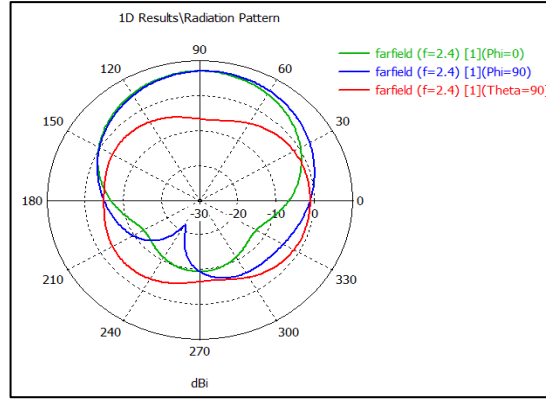
Şekil 3.48: Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) Dört halkalı tek MSRR ilaveli, b) İki halkalı iki MSRR ilaveli.



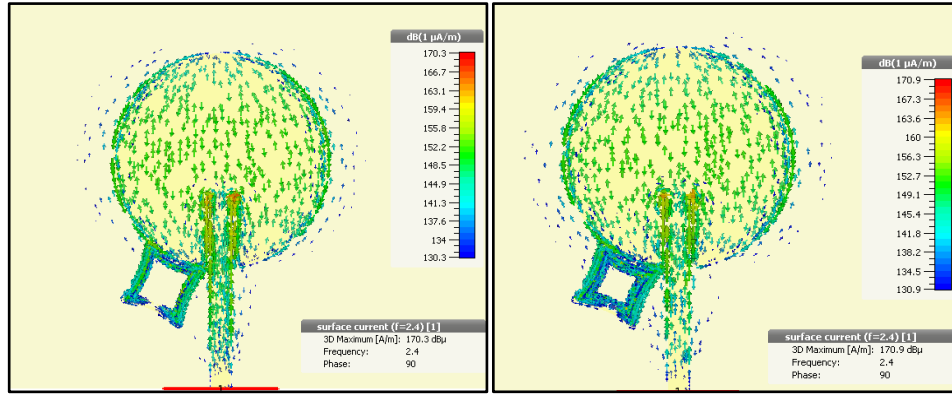
Şekil 3.49: Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) Üç halkalı iki MSRR ilaveli, b) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.



Şekil 3.50: Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli.



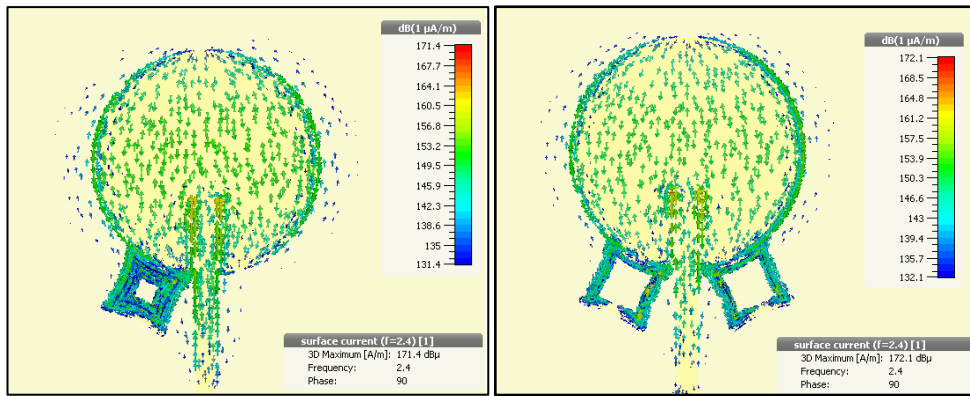
Şekil 3.51: Girinti beslemeli MPA'nın ışıma örüntüsü grafiği üç halkalı altı MSRR ilaveli.



a)

b)

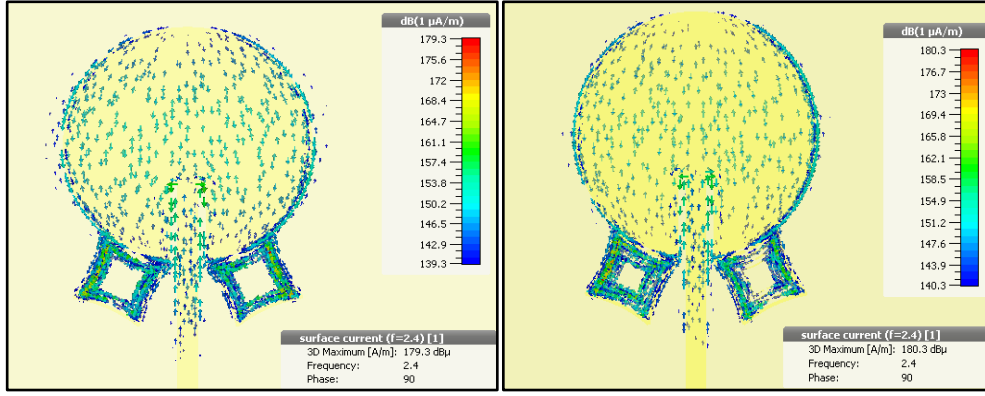
Şekil 3.52: Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) İki halkalı tek MSRR ilaveli, b) Üç halkalı tek MSRR ilaveli.



a)

b)

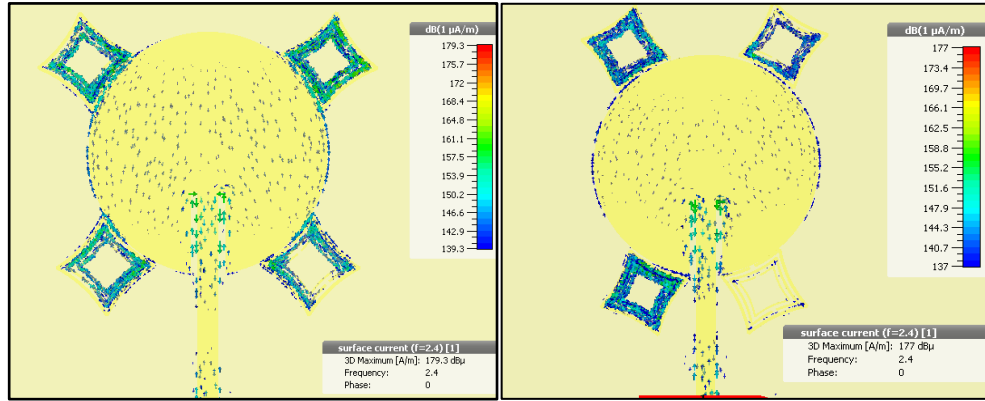
Şekil 3.53: Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) Dört halkalı tek MSRR ilaveli, b) İki halkalı iki MSRR ilaveli.



a)

b)

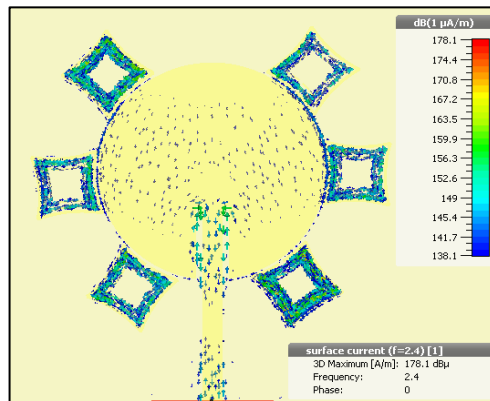
Şekil 3.54: Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) Üç halkalı iki MSRR ilaveli, b) Dört halkalı iki MSRR ilaveli.



a)

b)

Şekil 3.55: Girinti beslemeli MPA'nın yüzey akımları grafiği: a) Üç halkalı köşelerde dört MSRR ilaveli, b) Üç halkalı besleme hattına yakın dört MSRR ilaveli.



Şekil 3.56: Girinti beslemeli üç halkalı altı MSRR ilaveli MPA'nın yüzey akımları grafiği.

Şekiller 3.52-3.56'da MSRR ilaveli MPA'lar için yüzey akımları dağılımlarının yer aldığı grafikler verilmiştir. 2.4 GHz'de maksimum yüzey akımı genliği Şekil 3.52

a) için  $170.3 \mu A/m$ , b) için  $170.9 \mu A/m$ , Şekil 3.53 a) için  $171.4 \mu A/m$ , b) için  $172.1 \mu A/m$ , Şekil 3.54 a) için  $179.3 \mu A/m$ , b) için  $180.3 \mu A/m$ , Şekil 3.55 a) için  $179.3 \mu A/m$ , b) için  $177 \mu A/m$  ve Şekil 3.56 için  $178.1 \mu A/m$  olarak bulunmuştur.

## 4. SONUÇLAR

Mikroşerit yama antenler, baskı devre teknolojisi kullanılarak tasarlanan, üretimi kolay, düşük maliyetli, hafif yapılı anten yapıları olup genellikle haberleşme sistemlerinde tercih edilmektedir. Yeni nesil teknolojilerle birlikte haberleşme sistemlerinde sadece ses iletimi değil çoklu ortam özellikleri de desteklenmeye başlandı ve bu sistemlere entegre edilebilecek geniş bantlı anten yapılarına ihtiyaçlar arttı. Tasarımı yapılacak antenler haberleşme sistemi uygulamalarına boyutsal anlamda kolay entegre olabilecek yapılarda olmalı ve bu maksatla MPA'lar ön plana çıkmaktadır. Ancak MPA'lar genel itibariyle dar bant genişliğine sahip anten yapılarıdır. Bu tez çalışması kapsamında IEEE 802.11 standardında WLAN ağı içinde yer alan 2.4 GHz frekans bandında çalışan dairesel MPA tasarımı çalışmaları yapılmış, bant genişliğini arttırmaya yönelik farklı geometriler üzerinden tasarımlar geliştirilmiş ve CST microwave stüdyo yazılımı sayesinde simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Tasarımın ilk aşamasında mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılarak dairesel ve dikdörtgen yapılı iki MPA tasarlanmış ve her ikisinin de 2.4 GHz frekans bandında ışıma karakteristiği sergilemediği belirlenmiştir. Bu nedenle besleme yöntemi değiştirilmiş ve girinti besleme metodu dairesel ve dikdörtgen MPA'lara uygulanmıştır. Her iki MPA için de girinti besleme yöntemi uygulandığında 2.4 GHz'de bant genişlikleri bir önceki uygulamaya göre arttırılmış ve antenler ışıma karakteristiği sergilemişlerdir. Tezin devamında yapılacak olan tasarım çalışmalarında girinti besleme metodu kullanılmaya devam edilmiştir. Tasarımın son aşamasında MSRR yapıları açıklanmış, matemateryal malzemelerden bahsedilmiş, MSRR yöntemi uygulanmış MPA yüzeyinde farklı adetlerde ilave edilmiş, bu tasarımlar dokuz farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlarda MPA çoklu bant özelliği sergilemiş olup, 2.4 GHz bandı dışında da ışıma karakteristikleri sergilemişlerdir. 2.4 GHz'de en yüksek bant genişliği değeri altı MSRR ilaveli MPA için 70 MHz olarak hesaplanırken diğer tasarımlarda genel olarak 69 MHz olarak hesaplanmıştır. Tasarımlar arasında içinde üç ve dört halkalı iki MSRR ilaveli tasarım çalışmalarında çoklu bant yapısı gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan MSRR ilaveli anten tasarımlarının WLAN çalışma bandında tasarlanabileceği gösterilmiştir.

Genel geometrileri aynı ancak farklı yöntemlerle oluşturulan on farklı MPA tasarımı çalışmalarında, antenlerin çoklu bant özellikleri sergiledikleri, bant

genişliklerinin sınırlı olduğu bulguları elde edilmiştir. MSRR yapısı kullanılarak yapılan tasarım çalışmaları istenilen haberleşme teknolojilerini destekler niteliktedir. Yapılan ilaveler neticesinde sınırlı bant genişliği gerektiren uygulamalarda daha küçük boyutlarda ve daha iyi ışıma yapması beklenen tasarımlarda bu tip anten kullanılabilir. Gelecekte farklı yapılarda yapay manyetik iletkenler, farklı dielektrik malzemeler farklı anten tasarımlarında kullanılarak daha iyi özelliklerde anten tasarımları yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Warren L. S., Gary A. T., (2013), “Antenna Theory and Design”, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Constantine B., (2005), “Antenna Theory: Analysis and Design”, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [3] Fang D. G., (2010), “Antenna Theory and Microstrip Antennas”, 978-1-4398-0727-9, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida.
- [4] Schantz H. G., (2005), “The Art and Science of Ultrawideband Antennas”, 2nd Edition, MA, Reading: Artech House.
- [5] Sevgi L., (2005), “EMC ve Antenler”, Endüstri & Otomasyon, 101, 71-79.
- [6] Öner B. D., (2015), “Antenler ve Yayılma” Maltepe Üniversitesi Ders Notları Bölüm-2.
- [7] Munson R. E., (1973), “Single Slot Cavity Antennas Assembly”, U.S. Patent No.3713162.
- [8] Howell J. Q., (1975), “Microstrip Antennas”, IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 23, 1, 1975, 90-93.
- [9] Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A., (2001), “Microstrip Antenna Design Handbook”, 0-89006-513-6, Artech House, Canton, MA.
- [10] Constantine B., (1997), “Antenna Theory Analysis and Design”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Arizona State University.
- [11] Akkaya I., (1997), “Antenler ve Propogasyon”, 1.Baskı, Sistem Yayıncılık.
- [12] Niroojazi M., Azarmanesh M. N., (2004), “Practical Design of Single Feed Truncated Corner Microstrip Antenna”, Proceedings of Second Annual Conference on Communication Networks & Services Research, 25-29, 0-7695-2096-0, Fredericton, NB, Canada.
- [13] Constantine B., (1982), “Antenna Theory Analysis and Design”, 1st Edition, John Wiley & Sons, Arizona State University.
- [14] Pozar D. M., (1992), “Microstrip Antennas”, Proceedings of IEEE, 80, 1, 79-91.
- [15] Yazgan E., (1987), “Mikroşerit Antenler”, Elektrik Mühendisliği Dergisi, 348, 262-268.
- [16] Ang B. K., Chung B. K., (2007), “A Wideband E-Shaped Microstrip Patch

Antenna For 5–6 GHz Wireless Communicaions”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 75, 397–407.

- [17] Lee K. F., Yang S. L. S., Kishk A. A., Manluk K., (2010), “The Versatile U-Slot Patch Antenna”, IEEE Antennas & Propagation Magazine, 52, 1.
- [18] Kala P., (2009), “ Investigation of an H-Shaped Microstrip Patch Antenna with Inductive Loading”, International Journal of Microwave & Optical Technology, 4,,2.
- [19] Akman H., (2012), “Hücresel Otomata ve Tabu Arama Algoritması ile Mikroşerit Yama Anten Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [20] Milligan T. A., (2005), “Modern Antenna Design”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Waterhouse R. B., (2003), “Microstrip Patch Antennas – A Designer’s Guide”, Kluwer Academic Publishers, 1-4020-7373-9.
- [22] Asan A., (2008), “GPS Amaçlı 1.5805 GHz Parça Tipi Mikroşerit Anten Tasarımı ve Gerçeklenmesi”, Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi.
- [23] Carver K.R., Mink J.V., (1981), “Microstrip Antenna Technology”, IEEE Trans. Antennas & Propag., 29(1), 2-24.
- [24] Fatthi A. A., (2011), “Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays”, Master Thesis, University College of Boras.
- [25] Web 1, (2020), <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (Erişim Tarihi: 12/01/2020).
- [26] Web 2, (2020), [https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm\\_source=cst.com&utm\\_medium=301&utm\\_campaign=cst](https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst) (Erişim Tarihi: 12/01/2020).
- [27] Öztürk E., (2004), “WLAN Kablosuz Yerel Alan Ağları (Wireless Local Area Networks) Teknolojisinin İncelenmesi, Mevcut Düzenlemelerin Değerlendirilmesi ve Ülkemize Yönelik Düzenleme Önerisi”, Telekomünikasyon Kurumu, Uzmanlık Tezi, 144s, Ankara.
- [28] IEEE, (2010), IEEE 802.15: Working Group for Wireless Specialty Networks, Institute of Electrical & Electronics Engineers.
- [29] IEEE, (2016), IEEE 802.11: TM Wireless Local Area Networks, Institute of Electrical & Electronics Engineers.
- [30] IEEE, (2001), IEEE 802.16: Working Group on Broadband Wireless Access Standarts, Institute of Electrical & Electronics Engineers.

- [31] IEEE, (2008), IEEE 802.20: Mobile Broadband Wireless Access, Institute of Electrical & Electronics Engineers.
- [32] James J. R., Hall P. S., (1998), "Handbook of Microstrip Antennas", 1st Edition, Short Run Press Ltd. London, England.
- [33] Matin M. A., Sayeed A. I., (2010), "A Design Rule for Inset Fed Rectangular Microstrip Patch Antenna", WSEAS Transaction on Communications, 9, 1.
- [34] Taniguchi T., Kobayashi T., (2003), "An Omnidirectional and Low VSWR Antenna for the FCC-Approved UWB Frequency Band", Antennas & Propagation Society International Symposium, IEEE, 3, 845-848.
- [35] Azeri A., Rowan J., (2008), "Ultra Wideband Fractal Microstrip Antenna Design", Progress In Electromagnetic Research C, 2, 7-12.
- [36] Chen Z. N., Amman M. J., Qing M. G., Wu X. H., See T. S. P., Cai A., (2006), "Planar Antennas", IEEE Microwave Magazine, 7 (5), 63-73.
- [37] Veseago V. G., (1968), "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", Soviet Physics Uspekhi, 10, 4.
- [38] Özbay E., Aydın K., Çubukçu E., Bayındır M., (2003), "Transmission and Reflection Properties of Composite Double Negative Metamaterials in Free Space", IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 51, 10, 2592-2595.
- [39] Bilotti F., Toscano A., Vegni L., Aydın K., Alice K. B., Özbay E., (2007), "Equivalent Circuit Models For The Design of Metamaterials Based on Artificial Magnetic Inclusions", IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 55, 2865-2872.
- [40] Pendry J. B., Holden A. J., Robbins D. J., Stewart W. J., (1999), "Magnetism From Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena", IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 47, 11, 2075, 2084.

## ÖZGEÇMİŞ

Nurcan Yıldırım 1990 yılında Gaziantep’te doğdu. İlk, orta öğrenim ve lise öğrenimini Gaziantep’te tamamlayıp, lisans eğitimini Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliği’nde tamamladı. 2016 yılı içerisinde lisansüstü eğitimini almak üzere Gebze Teknik Üniversitesi Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2014 yılından bu yana özel sektörde aktif olarak iş hayatını sürdürmekte ve 2017 yılından bu yana Farba Otomotiv A.Ş. firmasında kalite mühendisi olarak çalışmaktadır.

## **EKLER**

### **Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar**

[1] Yıldırım N., Yılmaz A. F., Yıkılmazçınar S., Ülkü H. A., “Geniş Bantlı Dairesel Disk Mikroserit Anten Tasarımı”, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, 17-18 Haziran 2019.