**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# YARIKLI TOPRAK YAPISI KULLANILARAK MİNYATÜRLEŞTİRİLMİŞ 5G MOBİL ANTEN TASARIMI

**ADRAMANE ASSOUMANA**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# YARIKLI TOPRAK YAPISI KULLANILARAK MİNYATÜRLEŞTİRİLMİŞ 5G MOBİL ANTEN TASARIMI

**ADRAMANE ASSOUMANA**

| | | |
|---|---|---|
| **Prof.Dr. Gonca ÇAKIR** | | |
| **Danışman,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Doç.Dr. Sibel ÇİMEN** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Kocaeli Üniversitesi** | **.....** |
| **Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Yahya TEŞNELİ** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Sakarya Üniversitesi** | **.....** |

**Tezin Savunulduğu Tarih: 17.06.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez kapsamında 5G orta bant spektrumunda çalışan bir dairesel yama mikroşerit anten tasarımı yapılıp yarıklı toprak yapısı kullanılarak minyatürleştirme çalışmasına yer verilmiştir. Mikroşerit antenlerin minyatürleştirme çalışmalarında ve minyatürleştirilmiş anten uygulamalarında faydalı olacağını umarım.

Bu tezde bana çalışma fırsatı veren ve çalışmalarımın her aşamasında yardımcı olan değerli hocam sayın Prof. Dr. Gonca Çakır'a, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan sayın Doç. Dr. Sibel Çimen'e, ölcüm aşamalarında yardımcı olan Arş. Gör. Hande Bodur'a, tez çalışmasının pek çok aşamasında yardımcı olan Kutbetin Eren'e ve yüksek lisans eğitimim süresince her zaman yanımda olan ve beni destekleyen değerli arkadaşım Aminatou Mamoudou Hamadou'ya teşekkür ederim.

Ayrıca, Yurdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı (YTB) ve Direction des Bourses et Stages (DBS) du Togo kurumlarının eğitim olanaklarımı sağladıkları için teşekkür ve şükramlarımı sunarım.

Mayıs-2020 Adramane ASSOUMANA

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... i
İÇİNDEKİLER ..... ii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... v
ÖZET ..... vii
ABSTRACT ..... viii
GİRİŞ ..... 1
1. MOBİL KABLOSUZ TEKNOLOJİSİNİN EVRİMİ ..... 4
1.1. Birinci Nesil (1G) ..... 4
1.2. İkinci Nesil (2G) ..... 5
1.3. Üçüncü Nesil (3G) ..... 6
1.4. Dördüncü Nesil (4G) ..... 6
1.5. 5G Teknolojisi ..... 7
1.5.1. 5G teknolojisinin temel özellikleri ..... 7
1.5.2. 5G frekans spektrumları ..... 8
1.5.3. 5G zorlukları ..... 8
1.5.4. 5G uygulamaları ..... 8
2. MİKROŞERİT ANTENLERE GİRİŞ ..... 9
2.1. Temel Özellikler ve Yapılar ..... 9
2.2. Besleme Teknikleri ..... 10
2.2.1. Mikroşerit hat beslemesi ..... 10
2.2.2. Koaksiyel prob beslemesi ..... 11
2.2.3. Açıklık bağlaşım beslemesi ..... 11
2.2.4. Yakınlık bağlaşım beslemesi ..... 11
2.3. Analiz Yöntemleri ..... 12
2.4. Dikdörtgen Yamada İletim Hat Modeli ..... 12
2.4.1. Saçak etkileri ..... 12
2.4.2. Etkin uzunluk ..... 13
2.4.3. Rezonans frekansı ..... 14
2.5. Dikdörtgen Yamada Kavite Modeli ..... 15
2.5.1. Alan konfigürasyonları (TMx Modları) ..... 16
2.5.2. Rezonans frekansı ..... 17
2.6. Dairesel Yamada Kavite Modeli ..... 17
2.6.1. Elektrik ve manyetik alanlar (TMzmnp) ..... 18
2.6.2. Rezonans frekansları ..... 19
2.7. Temel Parametreler ..... 20
2.7.1. Işıma desenleri ..... 20
2.7.2. Anten yönlülüğü ve kazancı ..... 20
2.7.3. Giriş empedansı ..... 21
2.7.4. Gerilim duran dalga oranı (VSWR) ..... 21
2.7.5. Kalite faktörü, bant genişliği ve verimlilik ..... 22
2.7.6. Polarizasyon ..... 23
3. MİKROŞERİT ANTEN MİNYATÜRLEŞTİRME TEKNİKLERİ ..... 24

3.1. Yüksek Dielektrik Sabitli Malzemeler ..... 25
3.2. Manyeto-Dielektrik Malzemeler ..... 26
3.3. Metamalzeme Yöntemleri ..... 28
3.4. Elektromanyetik Bant Boşluğu - Yarıklı Toprak Yapıları ..... 30
3.5. Kısa Devre Pimleri ..... 31
4. MİKROŞERİT ANTENLERDE YARIKLI TOPRAK YAPILARI ..... 33
4.1. Yarıklı Toprak Yapıları 'nın Temel Yapısı ..... 35
4.2. YTY İletim Özellikleri ..... 36
4.2.1. YTY'lerin bant durdurma karakteristiği ..... 36
4.2.2. Yavaş dalga etkisi ..... 36
4.2.3. Yüksek karakteristik empedans ..... 36
4.3. Yarıklı Toprak Yapılarının Eşdeğer Devre Modelleri ..... 37
4.3.1. LC ve RLC eşdeğer devreleri ..... 37
4.3.2. π şekilli eşdeğer devresi ..... 39
4.3.3. Yarı statik eşdeğer devresi ..... 39
4.4. Uygulamalar ..... 40
4.5. Yarıklı Toprak Yapıları 'nın Mikroşerit Antenlerde Uygulamaları ..... 40
4.5.1. Harmonik azaltma ..... 40
4.5.2. Karşılıklı kuplaj azaltma ..... 41
4.5.3. Çapraz polarizasyon azaltma ..... 41
4.5.4. Anten minyatürleştirme ..... 41
4.5.5. Işıma özelliklerinin geliştirilmesi ..... 41
4.5.6. Dairesel polarizasyon üretimi ..... 41
5. 5G ORTA BANTLARINDA MİNYATÜRLEŞTİRİLMİŞ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI ..... 42
5.1. Konvansiyonel Anten ..... 42
5.2. Minyatürleştirme ..... 43
5.2.1. %75 minyatürleştirilmiş anten ..... 44
5.2.2. %91 minyatürleştirilmiş anten ..... 44
5.3. Minyatürleştirilmiş Antenlerin Gerçekleştirilmesi ..... 45
5.4. Antenlerin Ölçümü ..... 45
6. BULGULAR ..... 46
6.1. Işıma Desenleri ..... 46
6.2. Yansıma Katsayıları ..... 46
6.3. Antenlerin Kazançları ..... 48
6.4. Alan Akım Dağılımları ..... 50
6.5. Antenlerin Verimliliği ..... 50
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 51
KAYNAKLAR ..... 53
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER ..... 59
ÖZGEÇMİŞ ..... 60

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Mikroşerit antenin yapısı ..... 10
Şekil 2.2. Temel yama şekilleri: (a) Dikdörtgen, (b) Dairesel, (c) Eliptik, (d) Üçgen, (e) Dipol, (f) Dairesel halka ..... 10
Şekil 2.3. Besleme teknikleri: (a) Mikroşerit hat, (b) Koaksiyel hat, (c) Açıklık bağlaşım, (d) Yakınlık bağlaşım ..... 11
Şekil 2.4. İletim hat modelinde mikroşerit antenin temsili ..... 12
Şekil 2.5. Saçak etkileri ..... 13
Şekil 2.6. Etkin uzunluğu ..... 14
Şekil 2.7. Kavite modelinde mikroşerit antenin temsili ..... 15
Şekil 2.8. Yama antenin ışıma deseni ..... 20
Şekil 3.1. 3 halkalı SRR'ler: (a) Yapı, (b) Devre modeli ..... 29
Şekil 3.2. 3 yarıklı CSRR'ler: (a) Geometri, (b) Devre modeli ..... 30
Şekil 3.3. Kareli EBB hücrelerin konfigürasyonu ..... 31
Şekil 3.4. Kısa devre pimlerinin konfigürasyonu ..... 32
Şekil 4.1. YTY'nin birim hücreleri: (a) Başsız dikdörtgen yuva, (b) Dikdörtgen başlı, (c) Dairesel başlı, (d) Üçgen başlı ..... 35
Şekil 4.2. Mikroşerit hatta dambıl şekilli YTY: (a) Perspektif görünüş, (b) Arka görünüş ..... 36
Şekil 4.3. LC eşdeğer devresi: (a) Dambıl şekilli YTY, (b) Tek kutuplu Butterworth AGF ..... 38
Şekil 4.4. YTY birim hücresinin RLC Eşdeğer devresi ..... 38
Şekil 4.5. π şekilli devre modeli: (a) YTY birim hücresinin eşdeğer devresi, (b) Geleneksel π şeklinde devre ..... 39
Şekil 4.6. YTY birim hücresinin yarı-statik eşdeğer devresi ..... 40
Şekil 5.1. Referans anteni: (a) Üst görünüş, (b) Arka görünüş ..... 43
Şekil 5.2. %75 minyatürleştirme: (a) YTY, (b) Minyatürleştirilmiş yama ..... 44
Şekil 5.3. %91 minyatürleştirme: (a) YTY, (b) Minyatürleştirilmiş yama ..... 44
Şekil 5.4. Üretilen %75 minyatürleştirilmiş anten: (a) Üst görünüş, (b) Arka görünüş ..... 45
Şekil 5.5. Üretilen %91 minyatürleştirilmiş anten: (a) Üst görünüş, (b) Arka görünüş ..... 45
Şekil 6.1. Işıma desenleri ..... 46
Şekil 6.2. $S_{11}$ çizimleri ..... 47
Şekil 6.3. %75 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon $S_{11}$ ..... 47
Şekil 6.4. %91 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon $S_{11}$ ..... 48
Şekil 6.5. Kazançların 2D çizimleri ..... 49
Şekil 6.6. %75 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon kazançları ..... 49
Şekil 6.7. %91 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon kazançları ..... 49
Şekil 6.8. Akım dağılımı: (a) Referans anten, (b) %75 minyatürleştirilmiş anten, (c) %91 minyatürleştirilmiş anten ..... 50
Şekil 6.9. Verimlilik çizimleri ..... 50

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | | |
|---|---|---|
| $\Gamma$ | : | Yansıma katsayısı, (dB) |
| $\delta$ | : | Kayıp teğet |
| $\varepsilon_0$ | : | Serbest uzay dielektrik sabiti, (F/m) |
| $\varepsilon_r$ | : | Bağıl dielektrik sabiti |
| $\eta$ | : | İç empedansı, (Ω) |
| $\eta_0$ | : | Serbest uzay iç empedansı, (Ω) |
| $\eta_e$ | : | Anten verimliliği, (%) |
| $\lambda$ | : | Dalga boyu, (m) |
| $\lambda_0$ | : | Serbest uzay dalga boyu, (m) |
| $\mu_0$ | : | Serbest uzay geçirgenliği, (H/m) |
| $\sigma$ | : | İletkenlik, (S/m) $\omega_0$ Rezonatörün rezonans açısal frekansı, (rad/s |
| $\omega_0$ | : | Rezonatörün rezonans açısal frekansı, (rad/s) |
| $\omega_c$ | : | Rezonatörün rezonans açısal frekansı, (rad/s) |
| C | : | Etkin Kapasitansı, (F) |
| C | : | Serbest uzay ışık hızı, (m/s) |
| $C_0$ | : | Halkaların arasındaki toplam kapasitans, (F) |
| $C_c$ | : | Diskin kapasitansı, (F) |
| dB | : | Desibel |
| $f_0$ | : | Rezonatörün rezonans frekansı, (Hz) |
| $f_r$ | : | Rezonans frekansı, (Hz) |
| h | : | Dielektrik alt tabakanın kalınlığı, (m) |
| L | : | Etkin induktansı, (H) |
| $L_0$ | : | Disklerin arasındaki toplam endüktans, (H) |
| $L_s$ | : | Tek yüzüğün yaklaşık endüktansı, (H) |
| n | : | Kırılma indisi |
| $P_{dis.}$ | : | Dağılmış güç, (W) |
| Q | : | Kalite factörü |
| $W_e$ | : | Depolanan elektrik enerji, (J) |
| $W_m$ | : | Depolanan manyetik enerji, (J) |
| $Z_w$ | : | Dalga empedansı, (Ω) |

### Kısaltmalar

| | | |
|---|---|---|
| 0G | : | Zero Generation (İlk Nesil) |
| 1G | : | First Generation (Birinci Nesil) |
| 2G | : | Second Generation (İkinci Nesil) |
| 3G | : | Third Generation (Üçüncü Nesil) |
| 4G | : | Fourth Generation (Dördüncü Nesil) |
| 5G | : | Fifth Generation (Beşinci Nesil) |
| AMPS | : | Advanced Mobile Phone System |
| AMTS | : | Advanced Mobile Telephone System |
| CDMA | : | Code-Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim) |

| | | |
|---|---|---|
| CSRR | : | Complementary Split Ring Resonator (Tamamlayıcı Ayrık Halka Rezonatörü) |
| CST | : | Computer Simulation Technology |
| EM | : | Elektromanyetik |
| EBB | : | Elektromanyetik Bant Boşluğu |
| EDGE | : | Enhanced Data Rates for GSM Evolution (GSM Evrimi için Geliştirilmiş Veri Hızları) |
| eMBB | : | Enhanced Mobile Broadband (Gelişmiş Mobil Genişbant) |
| FDMA | : | Frequency-Division Multiple Access (Frekans bölmeli çoklu erişim) |
| GPRS | : | General Packet Radio Services (Radyo Paket Genel Servisi) |
| Gbps | : | Gigabit per Second (Saniyede Gigabit) |
| GSM | : | Global System for Mobile Communications (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem) |
| HSDPA | : | High-Speed Downlink Packet Access (Yüksek Hızlı Paket İndirme Erişimi) |
| HSUPA | : | High-Speed Uplink Packet Access (Yüksek Hızlı Yukarı Bağlantı Paket Erişimi) |
| IMTS | : | Improved Mobile Telephone Service |
| IMT2000 | : | International Mobile Telecommunications- 2000 |
| IoT | : | Internet of Things (Nesnelerin İnterneti) |
| Kbps | : | Kilobit per Second (Saniyede Kilobit) |
| LTE | : | Long Term Evolution (Uzun Vadeli Evrim) |
| Mbps | : | Megabit per Second (Saniyede Megabit) |
| MTS | : | Mobile Telephone System |
| MMS | : | Multimedia Messaging Service (Multimedya Mesajlaşma Servisi) |
| MIMO | : | Multiple Input Multiple Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış) |
| NTT | : | Nippon Telegraph and Telephone |
| NMT | : | Nordic Mobile Telephone |
| PTT | : | Push To Talk |
| QoS | : | Quality of Service (Servis Kalitesi) |
| SMS | : | Short Message Service (Kısa Mesajlaşma Servisi) |
| SRR | : | Split Ring Resonator (Ayrık Halka Rezonatörü) |
| C-Netz | : | The Radio Telephone Network C |
| TDMA | : | Time-Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) |
| TACS | : | Total Access Communications Systems |
| UMTS | : | Universal Mobile Telecommunications System (Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi) |
| VSWR | : | Voltage Standing Waves Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı) |
| W-CDMA | : | Wideband Code Division Multiple Access (Genişbant Kod Bölmeli Çoklu Erişim) |
| WAP | : | Wireless Application Protocol (Kablosuz Uygulama Protokolü) |
| WWWW | : | wireless World Wide Web |
| WWW | : | World Wide Web |
| YTY | : | Yarıklı Toprak Yapısı |

## YARIKLI TOPRAK YAPISI KULLANILARAK MİNYATÜRLEŞTİRİLMİŞ 5G MOBİL ANTEN TASARIMI


## ÖZET

Bu çalışmada, 5G mobil uygulamalar için bir mikroşerit anten tasarlamak ve minyatürleştirmek hedeflenmektedir. Bunu yapmak için, 3,6 GHz'de çalışan dairesel bir yama anten tasarlanmış ve daha sonra Yarıklı Toprak Yapısı (YTY) tekniği kullanılarak minyatürleştirilmiştir. %75 ve %91 alan azaltımı sağlanmıştır.

İlk olarak, önerilen antenler CST Microwave Studio yazılımında tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Simülasyondan elde edilen kazançlar referans anteni için 8.69 dB, sırasıyla %75 ve %91 minyatürleştirilmiş antenler için 5.17 ve 2.41 dB'dir. Elde edilen yansıma katsayıları referans anten için -46,59 dB, sırasıyla %75 ve %91 minyatürleştirilmiş antenler için -42.53 dB ve -26.37 dB'dir. Minyatürleştirilmiş antenlerin bant genişliği, 5G mobil uygulamalar için uygun olan 3.4-3.8GHz'i kapsayan bir frekans bandını içermektedir.

Tasarımı ve analizi yapıldıktan sonra elde edilen minyatürleştirilmiş antenler üretilmiş ve Network Analyzer'da ölçülerek test edilmiştir. Işıma desenleri, yansıma katsayıları ve kazançları gibi anten parametreleri ölçülmüştür. Sonuçlar MATLAB üzerinde çizdirilmiştir. Bu sonuçlar minyatürleştirilmiş antenlerin çalışır durumda olduğunu göstermektedir. MATLAB çizimleri kullanılarak ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre ölçüm sonuçlarında imalat ve kalibrasyon problemlerinden dolayı biraz fark olmuştur. Önerilen antenlerin genel performansı kabul edilebilir düzeydedir.



**Anahtar Kelimeler:** 5G Mobil Uygulamalar, Dairesel Yama Mikroşerit Anten, Minyatürleştirme, Yarıklı Toprak Yapısı (YTY).

**DESIGN OF MINIATURISED 5G MOBILE ANTENNA USING DEFECTED GROUND STRUCTURE**

## ABSTRACT

In this work, the goal is to design a microstrip antenna and miniaturise it for 5G mobile applications. To do this, a circular patch antenna operating at 3.6 GHz is designed and then miniaturised using Defected Ground Structure (DGS) technique. 75% and 91% area reduction are achieved.

Firstly, the proposed antennas are designed and analysed in the CST Microwave Studio software. The achieved gains from the simulation are 8.69 dB for the reference antenna, 5.17 and 2.41 dB for the 75% and 91% miniaturised area antennas respectively. The reflection coefficients obtained from the simulation are -46.59 dB for the reference antenna, -42.53 dB and -26.37 dB for 75% and 91% area miniaturised antennas respectively. The bandwidth of the miniaturised antennas includes a frequency band covering 3.4-3.8 GHz suitable for 5G mobile applications.

After design and analysis using the simulation program, the obtained miniaturised antennas are manufactured and then tested by measurement on Network Analyzer. The antenna parameters such as radiation patterns, reflection coefficients and gains are measured and plotted on MATLAB. These results show that the miniaturised antennas are operational. A comparison between the measurement results and the simulation results is carried out using MATLAB plots. A little offset due to imperfection on fabrication and calibration problems is noticed on the measurement results compared to the simulation results. The overall performance of the proposed antennas is still acceptable.

**Keywords:** 5G Mobile Applications, Circular Patch Microstrip Antenna, Miniaturisation, Defected Ground Structure (DGS).

## GİRİŞ

Mobil kablosuz teknoloji kurulduğundan bu yana teknolojik gelişimler sayesinde hızlı bir evrim geçirmiştir. "0G' olarak bilinen ilk nesil ve birinci nesilden beşinci nesil de dahil olmak üzere mobil teknolojinin birden fazla nesli ortaya çıkmıştır. Bu nesillerin her biri, bir önceki neslin karşılaştığı kusurları ve sınırlamaları aşmak için bazı farklı teknolojik standartlara ve özelliklere dayanmaktadır. Mobil kablosuz iletişimin en son nesli beşinci nesildir. 5G, gelişmiş yeni teknolojik özelliklerinin yanı sıra önceki nesiller tarafından sağlanan tüm hizmetleri de sınırlama olmaksızın desteklemektedir. Yüksek kapasite, daha geniş bant genişliği, daha yüksek veri aktarım hızı, ultra düşük gecikme, daha geniş kapsama alanı, daha iyi bağlantı düzeyleri vb. ile karakterize edilir [1].

Bu yeni özellikleri sağlamak için 5G'nin farklı frekans spektrum türlerini desteklemesi gerekmektedir. Bunlar;  1 GHz civarı frekans bölgesini içeren “Alt Bantlar” ; 1-6 GHz arasında değişen “Orta Bantlar” ve 24 GHz civarı frekansları içeren “Yüksek Bantlar” veya milimetre dalga (mm-Wave) bantlarıdır [2].

Aynı şekilde, bu yeni spektrumlarda çalışan ve yeni hizmetlere ve özelliklere uyarlanmış yeni anten türleri gereklidir. Aslında, bir anten elektrik sinyallerini elektromanyetik dalgalara veya elektromanyetik dalgaları elektriksel sinyallere dönüştüren çift yönlü bir dönüştürücüdür. Elektromanyetik radyo dalgaları iletimi ve alımı için kullanılır. Bu radyo iletim ve alım kavramı tüm anten uygulamalarında geçerlidir; ancak, anten tasarımı ve türleri genellikle bir uygulamadan diğerine farklılık gösterir. Yani, antenler kablosuz iletişimde çok önemlidir ve her verici ve alıcıda sırasıyla radyo dalgalarını yaymak ve almak için gereklidir. Antenler, mobil kablosuz haberleşme teknolojisi ile senkronize olarak gelişmektedir. Mobil kablosuz teknolojinin bu yeni nesli, yani 5G için, temel gereksinimlerini karşılamak için, anten alanında yenilikler gereklidir. Bu nedenle 5G teknolojisi için anten konusunda yoğun araştırmalar yapılmıştır ve halen devam etmektedir. Mikroşerit antenler, kablosuz iletişimde çeşitli avantajlı özellikleri nedeniyle bu araştırmaların çoğunda sıklıkla

kullanılmaktadır. Örneğin, [3]'teki yazarlar 5G akıllı telefonlar için milimetre dalga bantlarında çalışan bir fazlı dizi anten önermişlerdir. Anten desenini yönlendirmek için dizi elemanları arasındaki faz değişimini kullanılmışlardır. [4]'te, 10.15 GHz civarında çalışan düşük profilli bir mikroşerit anten 5G cihazlar için tasarlanmıştır. [5]'teki yazarlar, 5G cep telefon uygulamaları için 28 GHz frekanslarda bir mikroşerit anten tasarlamışlardır. [6]'da, 5G uygulamaları için 28 ve 50 GHz'de yayılan çift bantlı minyatür boyutlu mikroşerit anten önerilmiştir. Milimetre dalga bantlarında yüksek bant genişliği sağlayan başka bir çift bantlı mikroşerit anten [7]'de sunulmuştur. Yarıklı Toprak Yapısı (YTY) ile tasarlanmış milimetre dalga bantlarında çalışan bir MIMO (Multi-input, multi-output) anteni 5G'nin yüksek bant genişliği talebini karşılamak için [8]'deki yazarlar tarafından önerilmiştir. [9]'da 3.4-3.6 GHz bandında çalışan MIMO sistemleri 5G mobil anten olarak incelenmiştir. Milimetre dalga bantlarında çalışan 2x2 MIMO sistemi tarafından oluşturulan dikdörtgen yama dizisi, 5G uygulamalarına daha fazla kazanç sağlamak amacıyla önerilmiştir [10].

5G mobil uygulamalar ve küçük IoT cihazlar için küçük antenlere ihtiyaç duyulduğundan, 5G gereksinimleri arasında minyatür antenler de yer almaktadır.

Bu talebe dayanarak, özellikle 3.6 GHz'de 5G Orta bant spektrumda çalışan bir mikroşerit anten bu çalışmada tasarlanmıştır. Daha sonra, önerilen anten genel performans üzerinde çok bozulma olmadan mümkün olduğunca minyatürleştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen minyatürleştirme tekniği YTY'dır. YTY tekniği kullanışlı ve basittir. Metamalzeme ekleyerek minyatürleştirme tekniği gibi diğer minyatürleştirme teknikleri ile karşılaştırıldığında, ekstra malzeme gerektirmemektedir.

Bu tezin temel amacı öncelikle 5G mobil uygulamalar için dairesel yama mikroşerit anten tasarlamak ve minyatürleştirmektir. Daha sonra minyatürleştirilmiştir antenleri üretip test etmektedir. Minyatürleştirme YTY tekniği ile sağlanmıştır. Önerilen yama anteni ve minyatürleştirilmiş halleri üretimden önce CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Üretilen minyatürleştirilmiştir antenler Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı'nda Network Analyzer kullanılarak test edilmiştir.

Tez 7 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de, mobil kablosuz teknoloji evrimine genel olarak bakılmıştır. Mikroşerit antenlerin giriş çalışması Bölüm 2'de yapılırken, Bölüm

3'te bazı minyatürleştirme teknikleri tartışılmıştır. Bölüm 4'te YTY tekniği ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bölüm 5, önerilen antenlerin tasarımı ve analizi verilmiş, daha sonra minyatürleştirilmiş antenlerin üretimi ve testi hakkında tartışılmaktadır. Bölüm 6'da simülasyon ve ölçüm sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır. Bölüm 7 bu tezi sonuçlandırmakta ve bazı öneriler vermektedir.

# 1. MOBİL KABLOSUZ TEKNOLOJİSİNİN EVRİMİ

Mobil kablosuz teknoloji, kuruluşundan bu yana, büyük bir değişim geçirmiştir. Yenilikler ve iyileştirmeler yoluyla hizmetlerini ve özelliklerini geliştirmeye ve genişletmeye devam etmektedir. Şu ana kadar, 1G'den mevcut nesil 4G'yi de içerecek şekilde 5G'ye kadar birçok nesil ortaya çıkmıştır. Bir nesilden başka nesile geçiş, kapasite, kapsama, spektrum, hizmet kalitesi, güvenilirlik, verimlilik ve kullanılan teknolojinin genel performansı açısından kusur ve sınırlamalardan kaynaklanmaktadır. Aslında, kullanımdaki her nesil genellikle üstel oranda artan kullanıcı sayısı ve daha fazla yardımcı program kullanımını gerektiren gereksinimler sebebiyle bir üst nesili zorunlu hale getirmiştir.

## 1.1. Birinci Nesil (1G)

1G veya birinci nesil, sadece sesli arama yetenekleri olan analog iletime dayalı ilk kablosuz cep telefonlarında kullanılan teknolojidir. 1G teknolojisi, 0G (sıfır nesil) teknolojisini temsil eden Mobil radyo telefon sistemlerinden sonra gelmektedir. 0G döneminde MTS (Mobile Telephone System), AMTS (Advanced Mobile Telephone System), IMTS (Improved Mobile Telephone Service) ve PTT (Push to Talk) kullanılmıştır [11].

Bu ilk nesil mobil ağ teknolojisi 1979 yılında Tokyo'da (Japonya) NTT (Nippon Telegraph and Telephone) tarafından başlatılmıştır. 1984'te tüm ülkeye yayılmıştır. Lansmanından birkaç yıl sonra, bu yeni teknolojiye dayalı farklı standartlar ve farklı frekans bantları ile çeşitli ülkelerde kullanımı yaygınlaşmıştır. İskandinav ülkelerinde, Doğu Avrupa ve Rusya'da NMT (Nordic Mobile Telephone), Kuzey Amerika ve Avustralya'da AMPS (Advanced Mobile Phone System), İngiltere'de TACS (Total Access Communications Systems), Almanya'da C-Netz (The Radio Telephone Network C), vs. kullanılmıştır [12].

Birinci nesil mobil ağ teknolojisinde, baz istasyonları olarak bilinen merkezi olarak kontrol edilen birden fazla birimden oluşan hücresel kavram ortaya çıkmıştır. Her

hücre, küçük bir coğrafi alana hizmet sağlar. Hücreler arası, hücre-kullanıcı arası ve kullanıcılar arası iletişimi mükemmelleştirmek için frekansın yeniden kullanımı, devir gibi süreçler ve FDMA (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) kullanılmıştır [13]. 1G teknolojisi, veri iletimi için devre anahtarlama tekniğini ve 150 MHz frekansı ve üzeri analog radyo sinyallerini kullanabilmektedir. Veri aktarım hızı 2,4 Kbps kadardır [12].

1G teknolojisinin dezavantajları arasında düşük güvenilirlik, daha büyük antenler nedeniyle büyük telefon boyutu, pil ömrü düşük cihazlar, sınırlı sayıda kullanıcı ve hücre kapsama alanı, dolaşım hizmetinin olmaması sayılabilir. Düşük frekanslı bant genişliği ve analog sinyallerin kullanımından kaynaklanan girişimler nedeniyle ses kalitesinin düşük olması. Aramalar şifrelenmediği için daha az güvenilirdi ve telsiz tarayıcısı olan herkes aramaları kesebiliyordu [14]. 1G'nin bazı dezavantajlarını azaltmak için, 2G olarak bilinen ikinci nesil 10 yıl sonra piyasaya sürülmüştür.

### 1.2. İkinci Nesil (2G)

2G, dijital iletime dayalı mobil kablosuz teknolojidir. 1991 yılında Finlandiya'da piyasaya sürülmüştür. 2G döneminde GSM teknolojisi (Mobil İletişim İçin Küresel Sistem) ortaya çıkmıştır. GSM teknolojisi arama ve metin şifreleme, SMS (Kısa Mesajlaşma Servisi) ve MMS (Multimedya Mesajlaşma Servisi) gibi veri hizmetleri sağlamıştır. 2G TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) ve CDMA (Kod Bölmeli Çoklu Erişim) ortaya çıkarmıştır [12].

2G döneminde, verimli ve hızlı veri iletimi, daha iyi ses kalitesi ve şifreleme sayesinde veri güvenliği gibi bazı iyileştirmeler elde edilmiştir. Daha küçük boyutlu cep telefonları, dijital veri iletimi nedeniyle geliştirilmiş pil ömrü elde edilmiştir [12]. 2G dönemindeki diğer gelişmeler arasında 2.5G olarak bilinen GPRS (Radyo Paket Genel Servisi) ve 2.75G olarak bilinen EDGE (GSM Evrim için Geliştirilmiş Veri hızları) yer almaktadır. GPRS, 56 - 115 Kbps arasında veri hızları olan 2G ve 3G teknolojisi arasında geliştirilmiş bir kablosuz nesildir. WAP 'a (Kablosuz Uygulama Protokolü) erişimi, WWW (World Wide Web), MMS ve e-posta gibi hizmetler sağlamıştır [13].

EDGE teknolojisi GPRS'ten sonra GSM'in geliştirilmiş bir sürümüdür. Net ve daha hızlı veri aynı zamanda bilgi iletimi için 384 Kbps hız sağlayarak 2G teknolojisine yeni bir değişiklik getirmiştir [13].

2G'deki bazı dezavantajlar arasında güçlü sinyallerin gerekliliği, ağ kapsamının olmadığı alanlarda zayıflayan sinyaller, videolar gibi karmaşık veri işleme yer almaktadır [12].

### 1.4.1. Üçüncü Nesil (3G)

Üçüncü nesil (3G) mobil teknoloji 2001 yılında Japonya'da NTT DoCoMo tarafından ticari olarak piyasaya sürülmüştür. 3G teknolojisi Avrupa'da 384 kbps - 2 Mbps veri hızı olan UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) olarak piyasaya sürülmüştür. UMTS, W-CDMA (Genişbant-CDMA) olarak adlandırılan GSM tabanlı hava ara yüzü standardını kullanmıştır [12]. 3G Amerika'da CDMA2000 ve Çin'de IMT2000 (International Mobile Telecommunications- 2000) tarafından temsil edilmiştir [1].

3G teknolojisi tarafından sağlanan ana özellikler arasında daha yüksek veri hızı, artan kapasite, görüntülü arama ve konferans, gelişmiş güvenlik, küresel dolaşım, daha fazla kullanıcı sayısı, geniş kapsama alanı, yüksek hızlı internet hizmeti, yer almaktadır. Mobil uygulamalar ve multimedya mesaj desteği, konum izleme ve haritalar, daha iyi web tarama, TV akışı, yüksek kaliteli 3D oyunlar olan akıllı telefonların ortaya çıkması [14]. 3G, web tabanlı uygulamaları, ses ve video dosyalarını sürdürmek için daha fazla bant genişliği ve veri aktarım hızı sunmaktadır [1].

3G teknolojisi, daha yüksek veri aktarım hızları ve kapasitesi sunmak için HSDPA (Yüksek Hızlı Paket İndirme Erişimi) ve HSUPA (Yüksek Hızlı Yukarı Bağlantı Paket Erişimi) gibi daha iyi versiyonlara dönüşmüştür. HSDPA ve HSUPA sırasıyla 3.5G ve 3.75G olarak bilinmektedir [14].

3G dezavantajları pahalı spektrum lisansları, yüksek bant genişliği gereksinimleri, zorlu uygulama, pahalı 3G mobil cihazlar vs. içermektedir [14].

### 1.4. Dördüncü Nesil (4G)

4G, LTE (Uzun Vadeli Evrim) olarak bilinen mobil kablosuz teknoloji evriminde dördüncü nesildir. İlk olarak 2009 yılında Stockholm (İsveç) ve Oslo'da (Norveç) konuşlandırılmıştır [15]. Ek özellikleriyle önceki nesil 3G'nin geliştirilmiş bir sürümüdür.

4G artan bant genişliği, yüksek çözünürlüklü video akışı, yüksek kaliteli 3D oyun, gelişmiş güvenlik ve mobilite, Ses LTE ağ (VoLTE) dahil olmak üzere bazı özellikler sağlamaktadır [14]. Sırasıyla 100 Mbps ve 50 Mbps indirme ve yükleme hızı ile daha hızlı veri aktarım hızına sahiptir [13].

4G teknolojisi, kablosuz geniş bant erişimi, Dijital Video Yayını (DVB), MMS, video akışı, mobil TV gibi uygulamaların gereksinimleri için daha iyi QoS (Hizmet Kalitesi) ve 1Gbps'ye kadar daha yüksek veri oranı ile geliştirilmiştir [1].

4G teknolojisinin dezavantajları uygulama karmaşıklığı, pahalı spektrum, pahalı donanım ve altyapı ihtiyaçları, pahalı 4G mobil cihazlar, daha fazla pil kullanımı vs. içermektedir [14].

### 1.5. 5G Teknolojisi

5G, mobil kablosuz teknolojinin evriminde beşinci nesildir. Yüksek kapasite, daha geniş bant genişliği, yüksek veri aktarım hızı, ultra düşük gecikme, geniş kapsama alanı, daha yüksek bağlantı vs. ile karakterize edilen bir paket anahtarlı kablosuz sistemdir [1].

Bu yeni nesil mobil kablosuz ağa yönelik araştırmalar 2010'ların sonundan itibaren başlamıştır [1]. Bu araştırmalar 2010'dan sonraki yıllarda yeni neslin çok yakın bir gelecekte başlatılması için yoğunlaşmıştır. Son olarak 5G, 2019'un ikinci yarısında ve 2020 başlarında Seul (Güney Kore), Pekin (Çin), Londra (İngiltere), bazı ABD şehirleri gibi dünyanın büyük başkentlerinde konuşlandırılabilmiştir. Diğer büyük şehirleri ve dünyanın geri kalanını kapsayabilmek için yapılabilirliği ile ilgili araştırmalar halen devam etmektedir.

#### 1.5.1. 5G teknolojisinin temel özellikleri

5G teknolojisi tarafından sağlanabilir temel özellikler şunlardır: daha hızlı veri aktarım hızları, yüksek kapasite, daha geniş bant genişliği, ultra düşük gecikme (yaklaşık 1ms), geniş kapsama alanı, daha iyi bağlantı, büyük belleğe ve birçok olanaklara sahip mobil cihazlar, ses ve videolarda netlik, yüksek tanımlı (HD) netliğe sahip TV'ler. 5G interaktif multimedya, WWWW (wireless World Wide Web), ses ve video akışı desteklemektedir.

### 1.5.2. 5G frekans spektrumları

5G teknoloji hizmetleri için önerilen spektrumlar Alt-1 GHz frekanslarında değişen Düşük bantlar, 1-6 GHz arasında değişen Orta bantlar ve 24 GHz ve üstü Yüksek bantlar veya milimetre dalga bantlarıdır [2]. Bu spektrumların her biri 5G teknolojinin birden fazla olan hizmetlerini sağlamaya yardımcı olmaktadır. Düşük bantlarda daha uzun menzil için ve şehirlerde, banliyö ve kırsal alanlarda büyük kapsama alanı sağlamak için kullanılır. Mobil geniş bant ve masif IoT hizmetlerinde de kullanılırlar. Orta bantlar daha geniş bant genişlikleri, daha yüksek kapasite ve geniş kapsama avantajları sağlamak için kullanılır. eMBB (gelişmiş Mobil Genişbant) için de kullanılırlar. Bu spektrum, özellikle 3.3-3.8 GHz aralığı ticari 5G ağları için en imrenilendir. Milimetre-Dalga bantları aşırı bant genişlikleri ve 5G'de gereken ultra yüksek geniş bant hızını (20 Gbps'ye kadar) karşılamaya olanak sağlamak için kullanılır [2].

### 1.5.3. 5G zorlukları

5G, gelişimi halen devam eden ve çeşitli zorluklarla sarsılmış yeni teknolojilere ve özelliklere sahip yeni bir nesildir. 5G'de ele alınması gereken en büyük zorluklar şunlardır: hücreler arası girişim, verimli orta erişim kontrolü, trafik yönetimi, birden fazla hizmet, altyapı, iletişim-navigasyon ve algılama, güvenlik ve gizlilik, siber hukuk mevzuatı olarak sayılabilir [16].

### 1.5.4. 5G uygulamaları

5G teknolojisinin bazı uygulamaları şunlardır: Nesnelerin İnterneti (IoT), otonom araçlar, dronlar, akıllı ev aletleri, teletıp, cerrahi robotlar aracılığıyla uzaktan ameliyatlar ile sağlık hizmetlerinde yenilikleri, artırılmış sanal gerçeklik cihazları, yüksek kaliteli çevrimiçi videolar, bilgisayarlara uzaktan erişim, uzaktan konut güvenliği [1].

# 2. MİKROŞERİT ANTENLERE GİRİŞ

Mikroşerit antenler, mikrodalga frekanslarında (f>1 GHz) düşük profilli uygulamalar için yaygın olarak kullanılan düzlemsel anten tipidir. Bunlar yama antenler olarak da bilinmektedir. Mikroşerit antenlerin teorik fikirleri ve önerilen tasarım modelleri ilk olarak 1950'lerde ortaya çıkmıştır; ancak, bu tür antenin 1970'lerde araştırma ve geliştirmede büyük ilgi çekmiştir [17].

Mikroşerit antenler, dikkat çekici avantajları nedeniyle mobil ve kablosuz iletişim sistemleri gibi modern teknolojide en çok kullanılan anten türlerinden biridir. Bu avantajlar arasında düşük profilli, düşük maliyetli, sistemlere kolay entegre edilebilmesi, imalat ve dizilerde kullanım kolaylığı, mekanik olarak sağlam vb. yer almaktadır. Ancak, mikroşerit antenlerin dar bant genişliği, düşük kazanç, sahte radyasyon, düşük verimlilik vb. olmak üzere bazı dezavantajları vardır [17].

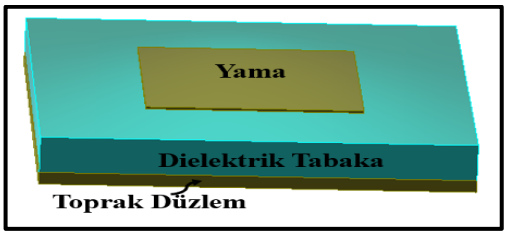
Yama antenlerin uygulamaları uydu ve mikrodalga iletişimi, cep telefon ve GPS antenleri vb. yer almaktadır.

## 2.1. Temel Özellikler ve Yapılar

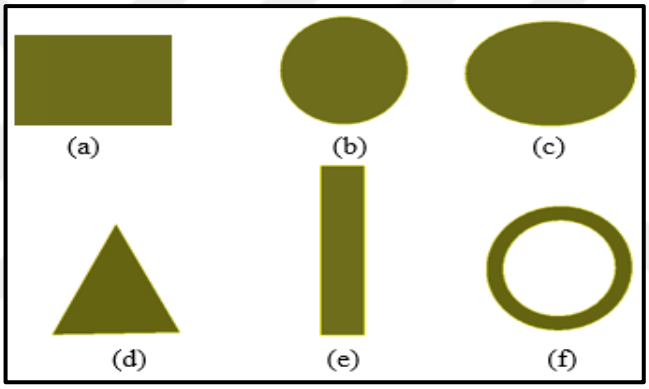
Mikroşerit antenler, metalik bir toprak düzlemi tarafından desteklenen dielektrik bir alt tabakanın üzerine yerleştirilen bir metalik yamadan oluşmaktadır. Yama antenin yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir [17]. Yama, antenin ışıma yapan elemanı olarak kabul edilmekte ve genellikle serbest uzay dalga boyu $\lambda_0$'dan çok daha küçük bir kalınlık h'ye sahiptir ($h<<\lambda_0$). Yamanın çeşitli şekilleri vardır, ancak dikdörtgen ve dairesel şekiller en sık karşılaşılanlardandır. Yama şekilleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir [17].

Mikroşerit anteni, $\varepsilon_r$ dielektrik sabiti olan dielektrik malzemeden oluşan bir alt tabaka tarafından desteklenmektedir. $\varepsilon_r$ bağıl dielektrik sabiti, genellikle $2.2 < \varepsilon_r < 12$ arasındadır. Alt tabaka kalınlığı genellikle $0.003\lambda_0 \leq h \leq .05\lambda_0$ arasında değişmektedir. Alt tabakayı oluşturan dielektrik malzeme antenin elektrik performansını etkilemektedir. İyi bir performans için, daha küçük dielektrik sabiti ve daha yüksek kalınlığı olan alt tabakalar tercih edilmektedir. Ancak, bu da antenin boyutların

büyümesine yol açmakta ve birçok uygulamada arzu edilmemektedir. Daha yüksek dielektrik sabiti olan ince alt tabakası kullanılması, daha küçük anten boyutu elde edilmesi ve istenmeyen radyasyonları ve bağlaşımı en aza indirilmesini sağlar. Ancak, büyük kayıplar nedeniyle antenin performansı bozulur [17].




Şekil 2.1. Mikroşerit antenin yapısı




Şekil 2.2. Temel yama şekilleri: (a) Dikdörtgen, (b) Dairesel, (c) Eliptik, (d) Üçgen, (e) Dipol, (f) Dairesel halka

## 2.2. Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenlerini beslemek için en popüler teknikler mikroşerit hat, koaksiyel prob, açıklık bağlaşım ve yakınlık bağlaşım beslemesidir [17].

### 2.2.1. Mikroşerit hat beslemesi

Anten yaması ile karşılaştırıldığında çok daha küçük genişlikte iletken bir şerittir. Şekil 2.3a'da mikroşerit hat beslemeli bir yama anteni gösterilmiştir. Mikroşerit hat beslemenin avantajları imalat ve eşleştirme kolaylığı, basit modelleme vs. yer almaktadır. Ancak, bu teknikte yüzey dalgaları ve yüksek alt tabaka kalınlığı nedeniyle oluşan sahte radyasyon ile sınırlıdır.

### 2.2.2. Koaksiyel prob beslemesi

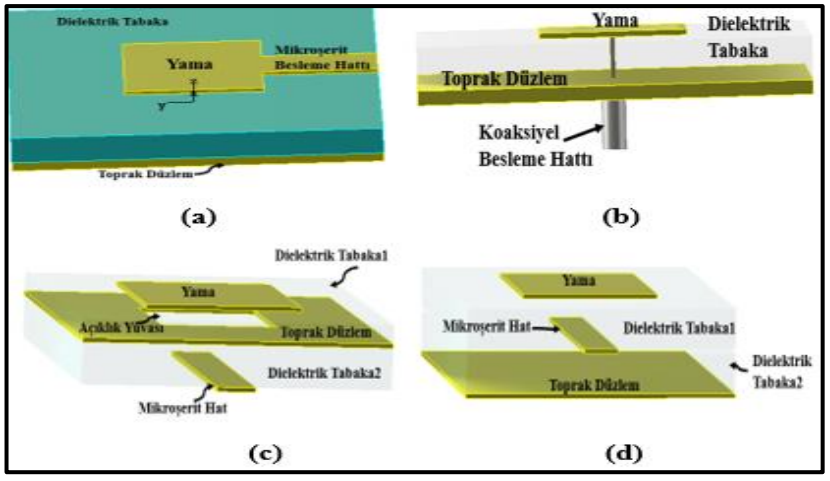
Koaksiyel hat beslemesi olarak da bilinmektedir. Şekil 2.3b'de koaksiyel hat beslemeli bir yama anteni gösterilmiştir. Anteni, koaksiyel hattın iç ve dış iletkenlerini sırasıyla yama ve toprak düzlemine bağlayarak beslenir. İmalatı ve eşleştirmesi kolaydır, düşük sahte radyasyonu vardır. Dar bant genişliği ve modelleme karmaşıklığıyla sınırlıdır.

### 2.2.3. Açıklık bağlaşım beslemesi

Bir toprak düzlemi ile ayrılmış iki alt tabakadan oluşan temassız bir besleme tekniğidir. Şekil 2.3c'de açıklık bağlaşım beslemeli bir yama anteni gösterilmiştir. Bir mikroşerit besleme hattı dielektrik alt tabakanın alt tarafına yerleştirilir. Besleme, mikroşerit hattın enerjisini, iki alt tabakadan ayıran toprak düzlemindeki bir yarık üzerinden yama ile birleştirerek gerçekleştirir. Modellemesi kolaydır ve düşük sahte radyasyonu vardır. Ancak, imalatı zordur ve dar bant genişliği vardır.

### 2.2.4. Yakınlık bağlaşım beslemesi

Doğrudan birbirine yerleştirilmiş ve bir toprak düzlemi tarafından desteklenen iki alt tabakadan oluşan temassız bir besleme tekniğidir. Şekil 2.3d'de yakınlık bağlaşım beslemeli bir yama anteni gösterilmiştir. Bir mikroşerit besleme hattı enerji doğrudan yakınlık ile yama birleşecek şekilde alt tabaka üstüne yerleştirilir. Diğer tekniklere göre daha yüksek bant genişliği sağlar. Modellemesi kolaydır ve düşük sahte radyasyonu vardır, ancak eşleştirme zordur.




Şekil 2.3. Besleme teknikleri [17]: (a) Mikroşerit hat, (b) Koaksiyel hat, (c) Açıklık bağlaşım, (d) Yakınlık bağlaşım

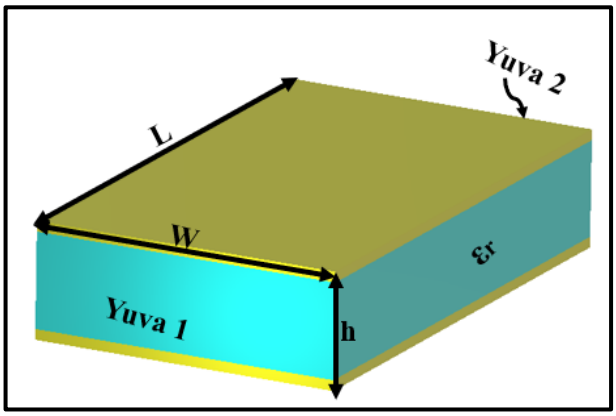
## 2.3. Analiz Yöntemleri

Mikroşerit antenleri analiz etmek için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bunların en popüler olanları iletim hattı modeli, kavite modeli ve öncelikle integral denklemler / moment yöntemini içeren tam dalga modelidir [17]. İletim hattı modeli ve kavite modeli aşağıdaki bölümlerde ele alınacaktır.

## 2.4. Dikdörtgen Yamada İletim Hat Modeli

Dikdörtgen yama, mikroşerit antenin tasarımında en sık kullanılan konfigürasyondur. Bu tür konfigürasyonda, iletim hat modeli kullanılarak kolayca analiz edilebilir.

İletim hat modelinde, yama anteni düşük empedans '$Z_c$' ve uzunluğu 'L' olan bir iletim hattı ile ayrılmış genişlik 'W' ve yükseklik 'h' olan iki yarık ile temsil edilmektedir [17]. Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu modelde, ince dielektrik alt tabakalar kullanıldığında daha fazla doğruluk sağlar [18]. Bu modelin avantajı diğer analiz yöntemlerinden daha kolay olmasıdır. Ancak, doğruluğunun daha az olması ve modelleme zorluğu gibi dezavantajları vardır [19].




Şekil 2.4. İletim hat modelinde mikroşerit antenin temsili

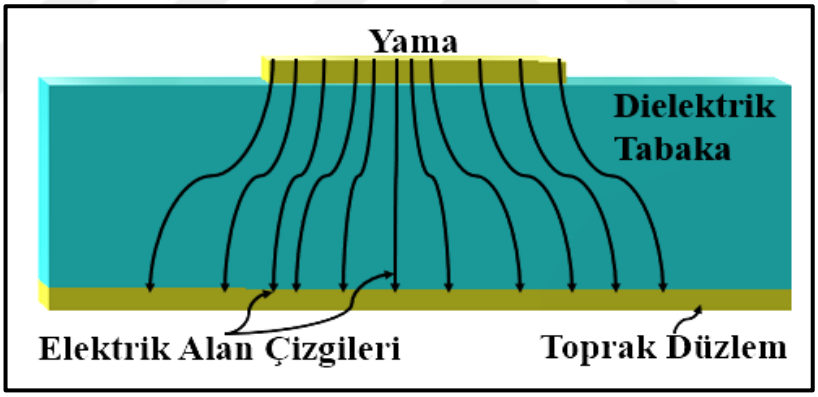
### 2.4.1. Saçak etkileri

Sonlu boyutları (uzunluk ve genişlik) olan bir yamanın kenarlarındaki alanlar nedeniyle saçak etkileri oluşmaktadır. Saçak, yama boyutlarına (uzunluk 'L' ve genişlik 'W'), alt tabaka yüksekliği h ve dielektrik sabitine ($\varepsilon_r$) bağlıdır. Şekil 2.5'te, saçak etkisi, bir yama anteni elektrik alan çizgilerinin gösteren iki yayılan yarık ile

temsil ederek gösterilmiştir. Saçak etkileri nedeniyle, mikroşerit anteninin temsili, anten alt tabakası ve çevredeki hava gibi iki dielektrik olan homojen olmayan bir çizgi olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, elektrik alan çizgilerinin büyük bir kısmı alt tabakada bulunurken, bazı çizgilerin parçaları havada bulunur. Şekil 2.5'te görülmektedir. Dalgalar iki farklı ortamda ilerlediği için, saçak ve çizgideki dalga yayılımı temsil eden eşdeğer etkin bir dielektrik sabit $\varepsilon_{reff}$'in tanıtılması gerekmektedir. Elde edilen etkin dielektrik sabit, tüm alan çizgileri alt tabaka içinde sınırlı olmadığı için alt tabakanın dielektrik sabiti $\varepsilon_r$'den biraz daha küçüktür. Etkin dielektrik sabitin ifadesi Denklem (2.1)'de verilmiştir [17];

$$\varepsilon_{reff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} - \frac{\varepsilon_r-1}{2}\sqrt{1+12\frac{h}{w}} \tag{2.1}$$

Burada, $\varepsilon_{reff}$ etkin dielektrik sabiti, $\varepsilon_r$ bağıl dielektrik sabiti, h substratın yüksekliği ve W yamanın genişliğidir.




Şekil 2.5. Saçak etkileri [17]

### 2.4.2. Etkin uzunluk

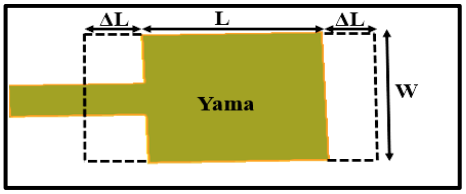
Saçak etkisi, antenin yamasının elektriksel boyutlarının fiziksel boyutlarından daha büyük görünmesini sağlar. Şekil 2.6'dan da görüldüğü gibi, yamanın uzunluğu her iki uçta ΔL mesafe ile uzatılmıştır. ΔL uzunluğu, etkin dielektrik sabit $\varepsilon_{reff}$ ve genişlik-yükseklik oranının (W / h) bir fonksiyonudur. Normalize edilmiş uzunluk uzantısı yaklaşık olarak aşağıdaki denklem (2.2) gibi ifade edilebilir [17];

$$\frac{\Delta L}{h} = 0{,}412\frac{(\varepsilon_{reff}+0{,}3)(\frac{W}{h}+0{,}264)}{(\varepsilon_{reff}+0{,}258)(\frac{W}{h}+0{,}8)} \tag{2.2}$$

Uzatmadan sonra etkin yama uzunluğu denklem (2.3) gibi ifade edilebilir;

$$L_{eff} = L+2\Delta L \tag{2.3}$$

Burada, L $TM_{010}$ olarak kabul edilen baskın modda saçak olmayan yamanın uzunluğudur.




Şekil 2.6. Etkin uzunluğu [17]

Daha iyi radyasyon verimliliğine yol açan mikroşerit antenin genişliği W, denklem (2.4)'deki gibi ifade edilir [17];

$$W=\frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}}=\frac{C}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \tag{2.4}$$

Burada, C serbest uzay ışık hızı ve $f_r$ mikroşerit antenin rezonans frekansıdır.

### 2.4.3. Rezonans frekansı

Bir mikroşerit antenin rezonans frekansı uzunluğu ve alt tabakanın dielektrik sabiti ile ifade edilmektedir. $TM_{010}$ baskın mod olarak göz önünde alındığında, rezonans frekansı aşağıdaki Denklem (2.5) gibi ifade edilebilir [17];

$$(f_r)_{010}=\frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}=\frac{C}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.5}$$

Saçak etkisi göz önünde alındığında, rezonans frekansı Denklem (2.6)'deki gibi ifade edilebilir [17];

$$(f_{rc})_{010}=\frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}=\frac{1}{2(L+2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}=q\frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}=q\frac{C}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.6}$$

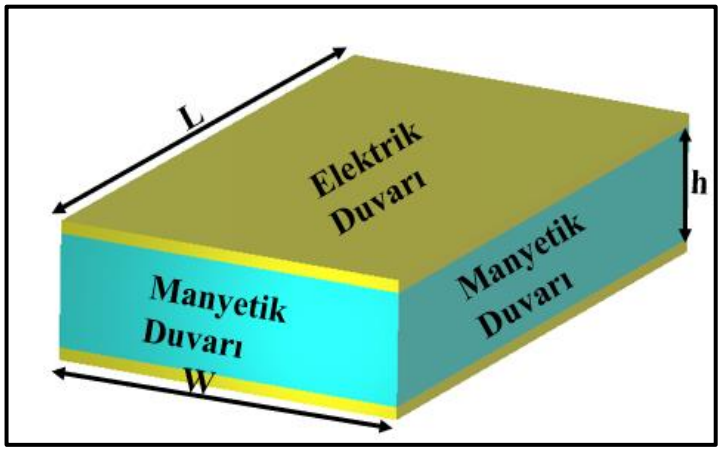
$$q=\frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}} \tag{2.7}$$

q faktörü, saçak faktörü (uzunluk azaltma faktörü) olarak adlandırılmaktadır.

## 2.5. Dikdörtgen Yamada Kavite Modeli

Kavite modelinde, mikroşerit antenler dielektrik yüklü kavite olarak kabul edilir ve daha yüksek sıra rezonansları vardır. Dielektrik alt tabaka bölgesi, sırasıyla yama ve toprak düzlemi ile üst ve alt tabakada temsil edilen elektrikli duvarlar ve yamanın çevresi boyunca manyetik duvarlar olan bir kavite olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.7 bir dikdörtgen mikroşerit antenin kavite temsilini göstermektedir. Mikroşerit antenlerin bir kavite olarak bu gösterimi, tamamen reaktif giriş empedansına ve güç radyasyon olmamasına yol açan, kayıplar olmayan bir yaklaşımdır. Yaklaşık kavitenin bir mikroşerit anteni tam olarak temsil edilebilmesi için kayıplar göz önünde bulundurulmalıdır. Radyasyon & iletim kayıpları ve dielektrik alt tabaka kaybı $\delta_{eff}$ tarafından temsil edilen kayıp mekanizması tanımlanmalıdır. Bu kayıp antenin kalite faktörü Q ile ters orantılıdır ($\delta_{eff} = 1/Q$) [17].

Yama ve toprak düzlemi arasındaki dielektrik alt tabaka genellikle çok incedir. Dielektrik tabakanın kalınlığı h dielektrik içindeki dalga boyu $\lambda$ çok daha küçüktür ($h << \lambda$). Bu, üretilen dalgaların ve alt tabaka içinde yayılan dalgaların yamanın kenarlarında önemli yansımalara maruz kalmalarına neden olur. Sonuç olarak, gelen enerji kısmen küçük bir fraksiyon ile yayılır. Çok ince bir dielektrik alt tabaka içinde, yükseklik boyunca alan varyasyonları sabittir, yama kenarları boyunca saçak etkileri çok küçüktür, dolayısıyla ihmal edilirler. Yama kenarları boyunca elektrik alanı yama yüzeyine neredeyse diktir ve manyetik duvarlara teğet olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, sadece $TM^x$ modları kavite içinde kabul edilmektedir [17].




Şekil 2.7. Kavite modelinde mikroşerit antenin temsili

### 2.5.1. Alan konfigürasyonları ($TM^x$ Modları)

Şekil 2.7'den, elektrik duvarları ile manyetik duvarlar arasındaki hacmin $\varepsilon_r$ dielektrik sabite sahip bir dielektrik malzeme ile dolu dikdörtgen bir kavite gibi olduğu görülmektedir. Alt tabaka çok küçük bir kalınlık olan h'a sahip olduğu ve yama kenarları ötesine geçmez şekilde kavite içinde kesildiği varsayılır. Dikdörtgen kavitesini temsil eden hacim içindeki alan konfigürasyonları vektör potansiyeli yaklaşımı kullanılarak elde edilebilir [17].

Homojen kaynak içermeyen bir ortam göz önüne alındığında, manyetik vektör potansiyeli $A_x$ dalga denklemi aşağıdaki gibi tanımlanır[17];

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \tag{2.8}$$

Dikdörtgen bir kavite için Denklem (2.8)'in genel çözümü değişkenlerin ayrılması kullanılarak elde edilebilir. Çözüm aşağıda verilmiştir [17];

$$A_x = [A_1\cos(k_x x)+B_1\sin(k_x x)][A_2\cos(k_y y)+B_2\sin(k_y y)][A_3\cos(k_z z)+B_3\sin(k_z z)] \tag{2.9}$$

Manyetik vektör potansiyeli $A_x$ açısından dikdörtgen kavite içindeki elektrik ve manyetik alanların ifadeleri Denklem (2.10)'da verilmiştir [17];

$$\begin{aligned} E_x &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+k^2\right)A_x \quad H_x = 0 \\ E_y &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \qquad H_y = \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial z} \\ E_z &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \qquad H_z = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \tag{2.10}$$

Denklem (2.10)'un özel çözümü sınır koşulları uygulanarak genel çözümünden elde edilebilir. x = 0 ve x = h olan elektrik duvarlarında, teğetsel E-alan bileşenleri sıfır olmalıdır, Ey = Ez = 0/x = 0, h. Dalga numaraları Denklem (2.11)'de verilmiştir [17];

$$k_x = \frac{m\pi}{h},\ m = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.11}$$

Manyetik duvarlarda, Hy ve Hz sıfır olmalıdır, dolayısıyla; z = 0'da ve z = W'de, Hx ve Hy sıfır olur, Hy = 0/z = 0, L. Dalga numaraları Denklem (2.12)'de verilmiştir [17];

$$k_z = \frac{p\pi}{W},\ p = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.12}$$

y = 0'da ve y = L'de, Hx ve Hz sıfır olur, Hz = 0/y = 0, W; dalga numaraları aşağıdaki gibi verilmiştir [17];

$$k_y = \frac{n\pi}{L}, \; n = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.13}$$

Dalga sayısı ifadelerindeki m, n, p sırasıyla x, y, z yönleri boyunca yarım döngü alan varyasyonlarının sayısını temsil etmektedir. Kavite içindeki vektör potansiyeli Ax'in son formu Denklem (2.14)'teki gibi ifade edilir [17];

$$A_x = A_{mnp}\cos(k_x x)\cos(k_y y)\cos(k_z z) \tag{2.14}$$

$A_{mnp}$ her mnp modunun genlik katsayılarını temsil etmektedir.

### 2.5.2. Rezonans frekansı

Eigenvalue denklemi Denklem (2.15)'te verilmiştir [17];

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu\epsilon \tag{2.15}$$

Kavite içindeki rezonans frekansları Denklem (2.16)'daki gibi ifade edilir [17];

$$(f_r)_{mnp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \tag{2.16}$$

$TM_{010}$ baskın mod olarak göz önünde alındığında, rezonans frekansı Denklem (2.17)'de verilmiştir [17];

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{C}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.17}$$

## 2.6. Dairesel Yamada Kavite Modeli

Dairesel yama konfigürasyonu mikroşerit antenin tasarımında en sık kullanılan ikinci konfigürasyonudur. Dairesel yama anteninde kullanılan en uygun analiz modeli kavite modelidir.

Bu model, dairesel yama antenlerini dielektrik malzeme ile yüklü dairesel kavite olarak temsil etmektedir. Kavitenin içindeki dielektrik malzemenin yama kenarlarının ötesine uzanmak için kesilmiş olduğu varsayılır. Kavite, sırasıyla dairesel yama ve

toprak düzlemi ile temsil edilen üst ve alt kısımdaki elektrik duvarlarından ve çevrenin etrafındaki manyetik iletkenden oluşmaktadır. Dairesel yama anteninin kavite gösterimi, yama şeklinin dairesel olarak değiştirilmesiyle Şekil 14.13'te gösterilen dikdörtgen yama anten gösterimi gibi benzer şekilde gösterilebilir. Dairesel yama anteninin bu kavite gösterimi, onun desteklediği modları bulmayı sağlar. Çok ince alt tabaka ($h<<\lambda$) olan dairesel bir mikroşerit anten göz önüne alındığında, desteklenen modları $TM^z$, z yamaya diktir [17].

### 2.6.1. Elektrik ve manyetik alanlar ($TM^z_{mnp}$)

Kavitedeki alanlar vektör potansiyeli yaklaşımı kullanılarak türetilir. Homojen kaynak içermeyen bir ortam ve $TM^z$ modları göz önüne alındığında, manyetik vektör potansiyeli $A_z$, silindirik koordinatlarda dalga denklemini aşağıdaki gibi tanımlanır [17];

$$\nabla^2 A_z(\rho, \phi, z)+k^2 A_z(\rho, \phi, z) = 0 \tag{2.18}$$

Denklem (2.18) değişkenlerin ayrılması yöntemi ile çözülebilir. Dairesel kavite içindeki elektrik ve manyetik alanların manyetik vektör potansiyeli $A_z$ açısından ifadeleri Denklem (2.19)'da verilmiştir [17];

$$\begin{aligned} E_\rho &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\frac{\partial^2 A_z}{\partial\rho\partial z} & H_\rho &= \frac{1}{\mu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial A_z}{\partial \emptyset} \\ E_\emptyset &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\frac{1}{\rho}\frac{\partial^2 A_z}{\partial\emptyset\partial z} & H_\emptyset &= -\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial\rho} \\ E_z &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+k^2\right)A_z & H_z &= 0 \end{aligned} \tag{2.19}$$

Sınır koşulları uygulandığında;

$$\begin{aligned} &E_\rho\ (0\le\rho'\le a,\ 0\le\emptyset'\le 2\pi,\ z'=0)=0 \\ &E_\rho\ (0\le\rho'\le a,\ 0\le\emptyset'\le 2\pi,\ z'=h)=0 \\ &H_\emptyset\ (\rho'=a,\ 0\le\emptyset'\le 2\pi,\ 0\le z'\le h)=0 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Kavite içindeki manyetik vektör potansiyeli $A_z$ 'ın ifadesi aşağıdaki Denklem (2.21) gibi azalır [17];

$$A_z = B_{mnp}J_m(k_\rho\rho')\,[A_2\cos(m\phi') + B_2\sin(m\phi')]\cos(k_z z') \tag{2.21}$$

Astarlanmış silindirik koordinatlar ρ', φ', z' kavite içindeki alanları temsil etmek için kullanılırken Jm(x) ilk tür m.'nin Bessel fonksiyonudur.
Eigenvalue denklemi Denklem (2.22)'de verilmiştir [17];

$$k_\rho^2 + k_z^2 = k_r^2 = \omega_r^2 \mu\epsilon \tag{2.22}$$

$$k_\rho = \chi'_{mn}/a,\ m = 0, 1, 2, \ldots \text{ ve } n = 1, 2, 3, \ldots \tag{2.23}$$

$$k_z = \frac{p\pi}{h},\ p = 0, 1, 2, \ldots \tag{2.24}$$

$\chi'_{mn}$, Bessel fonksiyonu $J_m(x)$'in türevinin sıfırlarını temsil eder. $\chi'_{mn}$' in artan sırasına göre ilk dört değer aşağıda verilmiştir;

$$\chi'_{11} = 1.8412,\ \chi'_{21} = 3.0542,\ \chi'_{01} = 3.8318,\ \chi'_{31} = 4.2012 \tag{2.25}$$

### 2.6.2. Rezonans frekansları

Dairesel mikroşerit antenini temsil eden dairesel kavitenin rezonans frekansları denklem (2.22), (2.23) ve (2.24)'den elde edilebilir. Çok ince alt tabaka ($h << 0.05\lambda_0$) olan bir mikroşerit anten göz önüne alındığında, z ekseni boyunca alanlar sabittir ve p = 0 ve $k_z = 0$ ile temsil edilir. Karşılık gelen modları $TM^z_{mn0}$'dir ve rezonans frekansları aşağıdaki Denklem (2.26)'da verilmiştir [17];

$$(f_r)_{mn0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \left(\frac{\chi'_{mn}}{a}\right) \tag{2.26}$$

Bu denklemdeki (Denklem (2.26) ) a yamanın yarıçapıdır.

Baskın mod $TM^z_{110}$ olarak göz önünde alındığında, rezonans frekansı Denklem (2.27)'deki gibi ifade edilir [17];

$$(f_r)_{110} = \frac{1.8412}{2\pi a\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1.8412C}{2\pi a\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.27}$$

Saçak etkileri göz önüne alındığında, $a_e$ 'nin belirtilen etkin yama yarıçapı aşağıdaki Denklem (2.28) gibi ifade edilir [17];

$$a_e = a\sqrt{1 + \frac{2h}{\pi a\epsilon_r}\left[\ln\left(\frac{\pi a}{2h}\right) + 1.7726\right]} \tag{2.28}$$

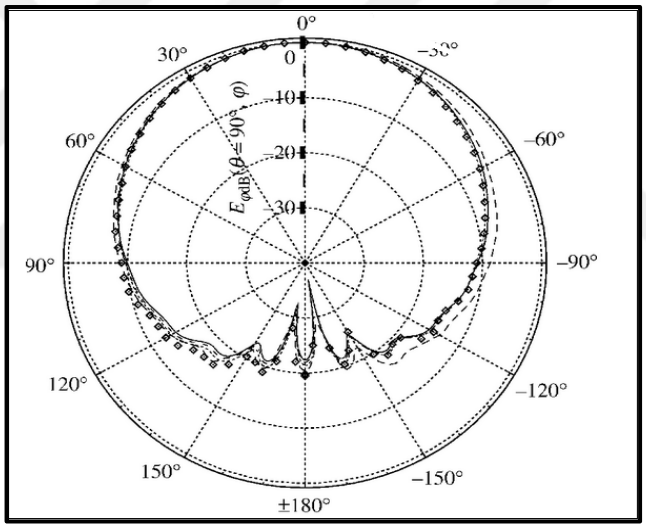
$TM^{z}_{110}$ baskın modunun rezonans frekansı ifadesi Denklem (2.29) gibi değiştirilir [17];

$$(f_{rc})_{110} = \frac{1.8412C}{2\pi ae\sqrt{\epsilon_r}} \tag{2.29}$$

## 2.7. Temel Parametreler

### 2.7.1. Işıma desenleri

Işıma deseni, antenin uzaya olan güç yoğunluğu dağılımının bir yön fonksiyonu olarak grafiksel bir temsili olarak tanımlanmaktadır. Bir mikroşerit anteninin ışıma deseni genellikle daha az yönlülüğüyle geniştir. Düşük ışıma gücü, dar bant genişliği ile karakterize edilmektedir. Bir yama anteninin ışıma deseni Şekil 2.8'de gösterilmiştir [20].




Şekil 2.8. Yama antenin ışıma deseni

### 2.7.2. Anten yönlülüğü ve kazancı

D olarak gösterilen bir anten yönlülüğü, ışıma yoğunluğunun belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun her yöne ortalama ışıma yoğunluğuna oranıdır. Yönlülük matematiksel ifadesi Denklem (2.30)'da verilmiştir [21];

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{avg}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \tag{2.30}$$

Bu deklemdeki (Denklem (2.30)) kullanılan U (ɵ, ϕ) ışıma yoğunluğudur, $U_{avg}$ ortalama ışıma yoğunluğudur. $P_{rad}$ ise yayılan güçtür.

Bir antenin kazancı, güç izotropik olarak yayıldığında ışıma yoğunluğunun belirli bir yöndeki oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir yama anteni genellikle daha az yönlülük ile karakterize edildiği için düşük kazanç sağlar. Aslında, anten kazancı anten yönlülüğü ve anten verimliliği ile temsil edilen bir faktör çarpımıdır. Bu nedenle anten kazancı verimlilik üzerinde odaklanmaktadır, yani meydana gelen kayıpları dikkate almaktadır. Yönlülük terimindeki kazancın matematiksel ifadesi Denklem (2.31)'de verilmiştir;

$$G = \eta_e \times D \tag{2.31}$$

Buradaki kullanılan G antenin kazancı, $\eta_e$ antenin verimliliği. D Deklem (2.30)'daki antenin yönlülüğüdür.

### 2.7.3. Giriş empedansı

Antenin giriş empedansı, gerilimin terminallerindeki akıma oranıdır. Genellikle, yama antenlerinin giriş empedansı karmaşıktır. Gerçel kısmı ışıma direnci ve ohmik kayıpları oluşan bir rezonans parçası ile temsil edilmektedir. Giriş empedansının reaktif kısmı, enerji depolama içeren bir kısımla temsil edilmektedir. Giriş empedansının hem gerçel hem de sanal kısımları frekansa bağlıdır, böylece giriş empedansı antenin boyutuna göre belirlenebilir. Yama anteninin giriş empedansı, besleme konumlarının değiştirilerek veya çeyrek dalga transformatörü gibi bazı empedans eşleştirme teknikleri kullanılarak eşlenebilir [17].

### 2.7.4. Gerilim duran dalga oranı (VSWR)

Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR), yansıyan gerilim dalgalarının gelen gerilim dalgalarına oranını tanımlamaktadır. Bir anten ve bağlı iletim hattı veya yük arasındaki empedansı eşleştirebilmek için kullanılır. Bu durumda yükten antene enerji yansıması olmadığı için 1'in VSWR'si arzu edilir, dolayısıyla kayıp yoktur. VSWR, antenden yansıyan gücü tanımlamak için kullanılan bir parametre olan Γ yansıma katsayısı ile ifade edilir [22];

$$VSWR = (1 + \Gamma) / (1-\Gamma) \tag{2.32}$$

Burada, Γ yansıma katsayısıdır.

### 2.7.5. Kalite faktörü, bant genişliği ve verimlilik

Işıma, iletim (ohmik), dielektrik ve yüzey dalgası kayıpları gibi anten kayıplarını temsil etmek için kullanılan bir terimdir. $Q_t$ olarak gösterilen toplam kalite faktörü aşağıda verilen Denklem (2.33) ile ifade edilir, tüm kayıpları dahildir [17];

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \tag{2.33}$$

Burada, $Q_t$ toplam kalite faktörü, $Q_{rad}$ radyasyon kayıplara bağlı kalite faktörü, $Q_c$ iletim (ohmik) kayıplara bağlı kalite faktörü, $Q_d$ dielektrik kayıplara bağlı kalite faktörü ve $Q_{sw}$ ise yüzey dalgaları kayıplara bağlı kalite faktörüdür.

Çok ince bir alt tabakada ($h<<\lambda 0$) çeşitli kayıpları temsil eden kalite faktörleri, Denklem (2.34), (2.35) ve (2.36)'da verilen yaklaşık formüllerle ifade edilir. Bu tür alt tabakalarda yüzey dalgalarından kaynaklanan kayıplar ihmal edilir [17].

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \tag{2.34}$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \tag{2.35}$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega\epsilon_r}{hG_t/l} K \tag{2.36}$$

Burada, tan δ alt tabaka kaybı teğet, σ iletkenlerin iletkenliği, Gt/l birim uzunluk başına toplam iletkenlik.

$$K = \frac{\iint |E|^2 dA}{\oint |E|^2 dl} \tag{2.37}$$

Antenin bant genişliği, antenin doğru çalıştığı frekans aralığını ifade etmektedir. Bir antenin fraksiyonel bant genişliği çalışma frekansının yüzdesi olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki Denklem (2.38)'de verilmiştir;

$$BW = 100\ \frac{f_h - f_l}{f_c} = 100\ \frac{\Delta f}{f_c} \tag{2.38}$$

Burada, $f_h$, $f_l$ ve $f_c$ sırasıyla banttaki en yüksek, en düşük ve merkez frekansıdır.

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{Q_t} \tag{2.39}$$

Empedans eşleşmesini göz önünde bulundurabilmek için, bir antenin fraksiyonel bant genişliği Denklem (2.40)'ta belirtildiği gibi gerilim duran dalga oranı (VSWR) terimi ile ifade edilebilir [17];

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{VSWR - 1}{Q_t\sqrt{VSWR}} \tag{2.40}$$

Anten verimliliği antenin yayılan gücünün anten tarafından kabul edilen giriş gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir anten verimliliği matematiksel olarak Denklem (2.41)'deki gibi ifade edilir [23];

$$\eta_e = P_{rad}/P_{in} \tag{2.41}$$

Burada, $\eta_e$ anten verimliliği, $P_{rad}$ yayılan güç ve $P_{in}$ anten terminallerinde giriş gücüdür.

Bir anten verimliliği de aşağıdaki gibi kalite faktörü Q açısından ifade edilebilir [17];

$$\eta_e = \frac{1/Q_{rad}}{1/Q_t} = \frac{Q_t}{Q_{rad}} \tag{2.42}$$

### 2.7.6. Polarizasyon

Bir antenin polarizasyonu, antenin yaydığı elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşenleri, özellikle genliği ve fazı tarafından tanımlanmaktadır. Anten polarizasyon tipleri lineer polarizasyon (dikey veya yatay), dairesel polarizasyon ve eliptik polarizasyonu içerir. Her polarizasyon türünün bir avantajı vardır. Uygulamada, aynı polarizasyona sahip antenler en iyi sinyal iletimi veya alımı sağlar. İletim anteni, alma anteni ile aynı polarizasyonda olmalıdır. Ancak, dairesel polarize antenler oryantasyona duyarsızdır, yani yönü ne olursa olsun farklı polarizasyon anteni ile iletişim kurabilirler. Bu nedenle, herhangi bir oryantasyondan gelen dalgayı yakalayabilmek için, dairesel polarize anten kullanılması tavsiye edilmektedir. Birçok mikroşerit anten genellikle yama şekline bakılmaksızın doğrusal polarize edilmekte, ancak uygun teknikler uygulanarak dairesel polarize elde edilebilmektedir [24].

# 3. MİKROŞERİT ANTEN MİNYATÜRLEŞTİRME TEKNİKLERİ

Kablosuz teknolojilerin evrimi, cep telefonları, tabletler, bilgisayarlar ve diğer birçok cihaz gibi minyatür cihazların ortaya çıkmasıyla senkronize olmuştur. Bu minyatür cihazlar nedeniyle, küçük boyutlu antenlere olan gereksinim önemli ölçüde artmıştır. Bu gereksinimi karşılamak için, yaygın olarak kullanılan antenlerin genel performansını düşürmeden minyatürleştirilmesi gerekmektedir. Mikroşerit yama anteni, çok sayıda avantajlı özelliği nedeniyle bu cihazlarda en çok kullanılan anten türlerinden biridir. Ancak, mikroşerit yama antenleri nispeten daha büyük boyuttadır. Bu nedenle, boyut minyatürizasyonu bu soruna en iyi çözümdür.

Anten minyatürleştirme tekniklerine ilişkin çok sayıda çalışma yapılmıştır. Parsons ve diğ. (2016) bir mikroşerit yama anteninin minyatürleştirilmesini incelemiştir [25]. Bir yama anteninin, yama üzerinde iki yuva açarak ve anteni manyetodielektrik malzeme mürekkebiyle manyetik olarak yükleyerek minyatürleştirilebileceğini göstermişlerdir. Aghwariya ve diğ. (2016) [26], yamaya dikdörtgen yarıklar açarak bir dikdörtgen yama anteninin minyatürleştirilmesini önermiştir. Ghahremani ve diğ. (2019) [27], dairesel yama anten minyatürleştirmesinin oluklu Elektromanyetik Bant Boşluğu (EBB) yapısı kullanılarak gerçekleştirilebildiğini göstermiştir. Shen ve diğ. (2019) EBB tabanlı bir toprak kullanarak 5G milimetre-dalga bandında iki elemanlı bir mikroşerit anten dizisini minyatürize etmiştir [28]. [29]'da sunulan çalışmaya göre μ-negatif (MNG) metamalzemelerin kullanılması yama antenlerinin minyatürleştirilmesine izin verir. Yamaya bir arka projeksiyonu yerleştirilerek dairesel yama anteninde önemli boyutta bir azalma elde edilebilir. Bu [30]'da Motevasselian ve Whittow (2017) tarafından önerilen bir eserdir. Ouedraogo ve diğ. (2012) antenin alt tabaka katmanına yatay olarak tamamlayıcı bir ayrık halka rezonatör (CSRR) ekleyerek dairesel bir yama anteninin minyatürleştirilmesini önermiştir. Sonuç olarak, konvansiyonel anten ile ilgili olarak önemli bir boyut küçültme elde edilmiştir [31]. Surendrakumar ve Chandramohan (2019) [32] çalışmalarında dairesel yama anteninde % 74 boyut küçültme elde edilmiştir. Bu, ışıyan yama arasına tamamlayıcı bir ayrık halka rezonatörü yerleştirerek ve düzgün olmayan meta-yüzeyleri yer düzlemine

kısmen yükleyerek yapılmıştır. [33]'deki yazarlar, bir mikroşerit antenin yer düzlemine metal boşluklarla halka şekilli YTY'nin uygulanmasının onu daha kompakt hale getirdiğini göstermiştir. Nataraj ve diğ. (2017) bir mikroşerit antenin rezonans frekansını kontrol etmek için YTY kullanılabileceğini gösterdi, sonuç olarak performans korunurken önemli bir boyut küçültme elde edilebilir [34]. Er-rebyiy ve diğ. (2017) YTY kullanarak boyutlarını etkilemeden 10GHz'de çalışan bir mikroşerit yama anteninin rezonans frekansını 3.5GHz'e kaydırmıştır [35]. [36]'deki yazarlar Sierpinski halı fraktal yuvalarını boyut küçültme amacıyla dikdörtgen bir yama anteninin zemin düzlemine uyguladılar. Wang ve diğ. (2016) interdigital yapı sayesinde daha iyi performansla yaklaşık %76 anten boyutunda küçülme elde etti [37]. [38]'deki yazarlar, üçlü bant mikroşerit anten boyutunun küçültülmesi için H ve ters L-şekilli YTY'nin kombinasyonunu önerdiler. [39]'de Munir ve diğ. (2015) tarafından bir fraktal yama anteni önerilmiştir. Yer düzleminde L ve U şekilli yuvalar ile antenin yaması üzerinde H şekilli yuva aynı anda kesilerek %66,50'ye kadar anten boyutu küçültme elde edilebileceğini gösterdiler. Şimdiye kadar, çeşitli araştırma makalelerinde birçok minyatürleştirme tekniği önerilmiştir. En popüler minyatürleştirme teknikleri aşağıdaki bölümlerde ele alınmaktadır.

### 3.1. Yüksek Dielektrik Sabitli Malzemeler

Mikroşerit antenlerin dielektrik alt tabakası, antenlerin bazı özelliklerini ve parametrelerini izlemek için kullanılabilen dielektrik sabiti, kayıp tanjantı, termal iletkenlik ve kalınlığı ile karakterize edilmektedir. Aslında, bazı anten karakteristikleri dielektrik sabitinin değerinin değiştirilmesiyle uyarlanabilir. Örneğin, anten boyutunun küçültülmesi için yüksek dielektrik sabiti olan malzemeler kullanılabilir. Seramik malzemeler, Rogers 3210 gibi yüksek dielektrik sabitine sahip dielektrik malzemeler vardır. Yüksek dielektrik sabitine sahip olan alt tabaka ayrıca bazı malzemelerin yamanın üzerine yerleştirilmesi veya bir mikroşerit antenin kavite bölgesine yerleştirilmesiyle de oluşturulabilir**.** Kavite modeline göre mikroşerit anten, dielektrik malzeme ile doldurulmuş ve yanlardaki manyetik duvarlar ile üst ve alttaki elektrik duvarları ile sınırlanmış kavite olarak kabul edilebilir [40]. Dolgu malzemesi yüksek dielektrik sabitine sahip olduğunda, kavite içindeki dalga yayılımı yavaşlar. Bu nedenle, baskın modun rezonans frekansı düşer. Aslında, bu rezonans frekansı, mikroşerit antenler için yama olan radyatör boyutlarına ve dolgu malzemesinin

dielektrik sabitine bağlıdır. $TM_{010}$ modunun baskın mod olduğu ve kavite kenarları boyunca saçak etkisi olmadığı göz önüne alındığında, rezonans frekansı Denklem (3.1)'de gibi ifade edilir;

$$f_r = \frac{C}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \tag{3.1}$$

Burada, L yamanın uzunluğudur.

Denklem (3.1) 'den bağıl dielektrik sabitinin arttırılmasının rezonans frekansında bir azalmaya neden olduğu görülebilir. Bu rezonans frekansı aynı zamanda yama uzunluğuyla ters orantılı olduğundan, bağıl dielektrik sabitinin artışını telafi etmek için yama uzunluğunu azaltırken frekans sabit tutulabilir. Sonuç olarak, yüksek dielektrik sabitine sahip alt tabakanın kullanılması anten boyutunu azaltmaya izin verir. Ancak, yüksek dielektrik sabitli alt tabaka kullanıldığında, yama ile toprak düzlemi arasında güçlü bir kapasitif kuplaj oluşturmasına neden olur.

Dielektrik alt tabakanın iç empedansı Denklem (3.2)' de verilmiştir;

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r\mu_0}{\epsilon_r\epsilon_0}} = \eta_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tag{3.2}$$

Burada, $\eta$ dielektrik alt tabakanın iç empedansı ve $\eta_0$ serbest uzayın iç empedansıdır.

Yüksek bağıl dielektrik sabiti göz önüne alındığında, iç empedans, serbest uzayın iç empedansından önemli ölçüde daha küçüktür. Bu nedenle, antenin alt tabakası ve çevresindeki ortam arasında bir empedans uyuşmazlığı oluşur. Sonuç olarak, EM dalgalar büyük miktarda alt tabaka içinde hapsolur ve bu da istenmeyen yüzey dalgaları, bant genişliği ve verimlilik bozulmasına neden olur.

Uygulama olarak, bu tip antenler, yüksek dielektrik sabiti olan bir malzemeyle eşleşmeye ihtiyaç duyulduğunda kullanılır [40].

### 3.2. Manyeto-Dielektrik Malzemeler

Antenlerde yüksek dielektrik sabitine sahip alt tabaka kullanımı, metal katmanlar arasında üretilen kapasitif kuplaj, kayıpların ve istenmeyen yüzey dalgalarının artması, empedans eşleştirme zorluklarını meydana getirmektedir [41]. Bu sınırlamaların

üstesinden gelmek için araştırmacılar, bir antenin alt tabakası olarak manyetodielektrik malzemenin kullanılmasından oluşan başka bir yöntem önermektedir.

Manyeto-dielektrik malzemeler, manyetik parçacıkların mekanik bağlantılar ve manyetik parçacıkların elektrik yalıtkanları olarak işlev gören bir dielektrik malzemede manyetik parçacıkların sıkışmasından oluşan kompozit malzemelerdir. Yüksek dielektrik sabitli dielektrik alt tabakanın aksine, bu manyeto-dielektrik malzemeler hem dielektrik sabiti hem de geçirgenliğe sahiptir. Karşılık gelen bağıl dielektrik sabiti ve bağıl geçirgenliği, birden daha büyüktür (**εr** > 1 ve μr> 1). Bu nedenle, bu tür malzemelerdeki kırılma indisi n sadece bağıl dielektrik sabitine bağlı değil aynı zamanda bağıl geçirgenliğe de bağlıdır. Rezonans frekansı, Denklem (3.3) 'te gösterildiği gibi hem alt tabakanın bağıl dielektrik sabiti hem de bağıl geçirgenliği ile izlenir;

$$f_r = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} = \frac{C}{2L\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} = \frac{C}{2L_n} \tag{3.3}$$

Burada, n alt tabakanın kırılma indisidir.

Baskın mod $TM_{010}$ modu olarak ve kavite kenarları boyunca saçak etkisi olmadığı kabul edilmiştir.

Denklem (3.3) 'den anten boyutunun, alt tabakanın kırılma indisi n ile ters orantılı olduğunu açıktır; dolayısıyla rezonans frekansı sabit tutulduğunda ve kırılma indisi artırıldığında anten boyutu azaltılabilir.

Manyeto-dielektrik malzemenin dalga empedansı Denklem (3.4)'teki gibi ifade edilir;

$$Z_w = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r\mu_0}{\epsilon_r\epsilon_0}} = \eta_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tag{3.4}$$

Burada, $Z_w$ Dalga empedansıdır.

Bu empedans, orta derecede dielektrik sabiti değeri göz önüne alındığında havanın iç empedansına yaklaşabilir. Sonuç olarak, anten alt tabakası ile çevredeki hava bölgesi arasında bir empedans eşleşmesi vardır. Bu, önemli bir yüzey dalgası azalmasına yol

açar; bu nedenle anten bant genişliği ve verimliliği, minyatürleştirmeden olumsuz etkilenmeden oldukça gelişmiştir [41].

Manyeto-dielektrik malzemeler, yüksek dielektrik sabitine sahip olan alt tabakalara kıyasla anten minyatürizasyonu için önemli avantaj sağlar [42].

### 3.3. Metamalzeme Yöntemleri

Metamalzemeler, doğal olarak mevcut olmayan negatif elektriksel geçirgenlik ve negatif geçirgenlik özellikleri sunmak için yapay olarak oluşturulmuş malzeme yapılarıdır. Negatif elektriksel geçirgenlik ve geçirgenlik değerlerine sahip metamalzemelere çift negatif (DNG) veya solak malzemeler denir. Sadece elektriksel negatif geçirgenliği olan metamalzemeler $\epsilon$-negatif malzemeler olarak adlandırılırken, sadece negatif geçirgenliğe sahip olanlar $\mu$-negatif malzemeler olarak adlandırılmaktadır [43].

Mikroşerit teknolojisinde metamalzemeler, ayrık halka rezonatörü (SRR) veya onun ikili karşılığı CSRR olarak adlandırılan rezonans yapılarla temsil edilmektedir.

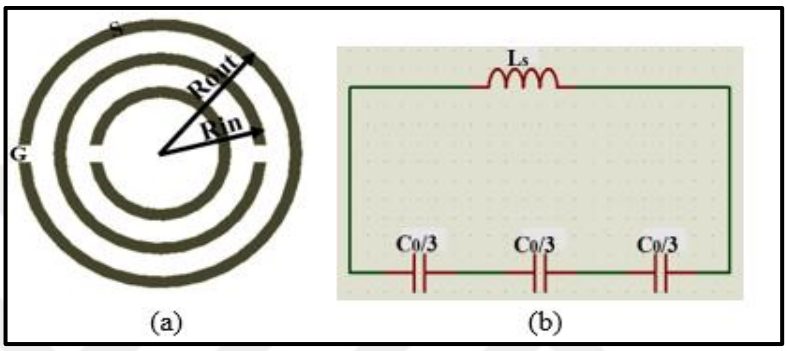
SRR, çoklu konsantrik metalik halkaların bir dielektrik alt tabakasına dağlanmasıyla gerçekleştirilmektedir. SRR, eksenel bir manyetik alan tarafından uyarılan rezonans bir manyetik dipol gibi davranmaktadır [44]. SRR'lerin temel yapısı ve eşdeğer devre modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

SRR'ler, uyarılan manyetik alanın SRR'lerin ekseni boyunca polarize olduğu bir ortama sokulduğunda, ortaya çıkan ortamın etkili geçirgenliği daha düşük bir frekansta yankılanır. Bu rezonans frekansı, SRR'lerin etkin kapasitansı ve endüktansı ile belirlenir. SRR'lerin bu rezonans frekansı, LC eşdeğer parametreleri arttırılarak çok daha düşük bir frekansa indirilebilir. SRR'lerin etkin kapasitansı ve endüktansı ile temsil edilen bu eşdeğer parametreler, çoklu konsantrik halkalar kullanılarak veya boyutları değiştirilerek arttırılabilmektedir [31]. Mikroşerit anten söz konusu olduğunda, SRR yapıları antenin alt tabakasından sokuldukça antenin çalışma frekansı düşürülebilir. Alternatif olarak, rezonans frekansının sabit tutulması ve anten büyüklüğünün ilgili seviyeye düşürülmesi mümkündür. SRR'ler, fiziksel boyutlar ve

onu oluşturan çoklu konsantrik halkaların sayısı değiştirilerek optimize edilir. SRR'in rezonans frekansı Denklem (3.5) 'te verilmiştir;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \tag{3.5}$$

Bu denklemdeki (Denklem (3.5) ), Şekil 3.1'deki devre modeline göre, $C_s = C_0/9$. $C_0$ , halkaların arasındaki toplam kapasitans ve Ls tek bir yüzüğün yaklaşık endüktansıdır.




Şekil 3.1. 3 halkalı SRR [44]: (a) Yapı, (b) Devre modeli

SRR'nin ikili karşılığı, CSRR olarak bilinir. CSRR'ler, herhangi bir şekle sahip bir iletken plakaya kazınmış çoklu konsantrik yarıklardan oluşur [45]. CSRR rezonans frekansı, CSRR boyutlarına göre değişen etkin endüktansı ve kapasitans ile orantılıdır. Bu nedenle, CSRR, onu içeren çoklu konsantrik yarıkların sayısını arttırarak daha düşük bir frekansta rezonansa getirilebilir [46]. CSRR'in rezonans frekansı Denklem (3.6) 'de verilmiştir;

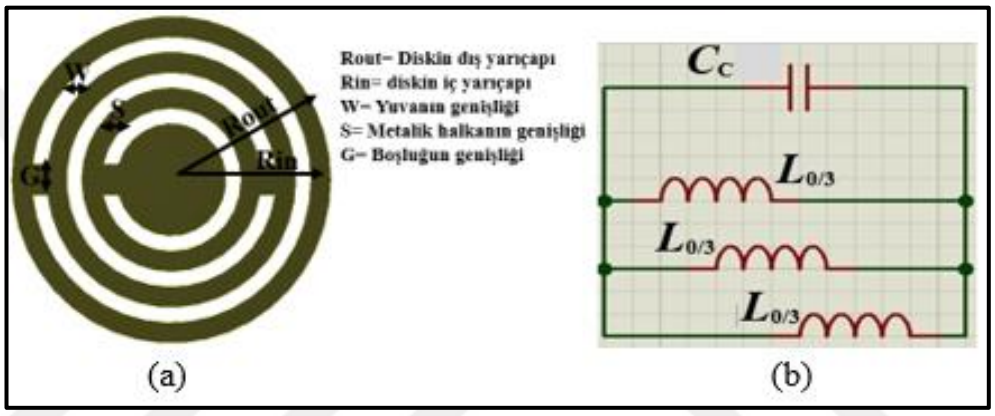
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \tag{3.6}$$

Bu denklemdeki (Denklem (3.5) ), Şekil 3.2'deki devre modeline göre, $Lc = L_0/9$. $L_0$ disklerin arasındaki toplam endüktans ve Cc bir diskin kapasitansıdır.

CSRR'lerin sokulduğu ve uyarma elektrik alanının CSRR'ların ekseni boyunca polarize olduğu bir ortamda, etkili elektriksel geçirgenliğin rezonansı istendiği gibi ayarlanabilir. Başlangıç ortamının rezonans frekansı CSRR'lerinkine düşürülebilir. Yama anteni olması durumunda, CSRR, yama ve toprak arasına, yamanın kavitesi içindeki baskın moddaki elektrik alanı, CSRR'nin ekseni boyunca polarize olacak şekilde yatay olarak sokulur. Böylece, yama çalışma frekansı CSRR'ninkine

düşürülebilir veya rezonans frekansını sabit tutarak antenin boyutunu karşılık gelen seviyeye düşürülebilir. CSRR geometrisi fiziksel boyutları ve onu içeren çoklu konsantrik yarıkların sayısı değiştirilerek optimize edilebilir [31]. CSRR geometrisi ve eşdeğer devre modeli Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

Meta-malzeme tabanlı minyatürleştirme teknikleri son araştırma makalelerinde giderek daha fazla görülmektedir. Meta-malzemeler daha yüksek minyatürleştirme seviyesine ulaşılmasını sağlarlar; ancak performans düşüşü bir sınırlama oluşturmaktadır.



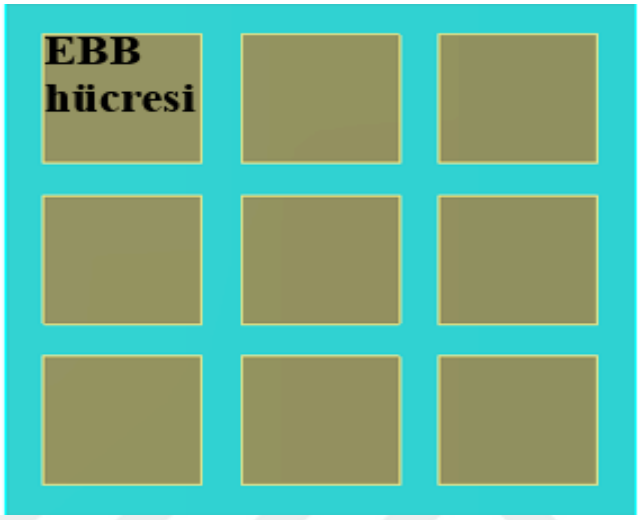

Şekil 3.2. 3 yarıklı CSRR [44]: (a) Geometri, (b) Devre modeli

### 3.4. Elektromanyetik Bant Boşluğu - Yarıklı Toprak Yapıları

Fotonik Bant Boşluğu (FBB) olarak da bilinen EBB elektromanyetik dalgaların yayılmasını izlemek için bazı özellikler sağlayan periyodik yapılardır. Metal veya dielektrik alt tabakalara gravür yapılarak gerçekleştirilmektedir. EBB'nın konfigürasyonu Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

EBB, mikroşerit antende boyut küçültme, yüzey dalgası bastırma, harmonik azaltma, performans iyileştirme vs. için kullanılır. EBB periyodik yapıları, belirli frekans bandının reddedilmesini sağlayan bant boşlukları oluşturur ve sonuç olarak elektromanyetik dalgalar üzerinde etki eder [47]. Aslında, oluşturulan bant boşluğunun belirli frekanslarında, bu periyodik yapılar yavaş faz hızı ve yönlendirilmiş dalga boyuna sahip yavaş dalgalar olarak adlandırılan dalgaları destekler. EBB'nin bu yavaş dalga özelliği anten boyutunun minyatürleştirilmesi için kullanılır [48]. Ancak, EBB minyatürleştirme tekniği modellemede zordur.

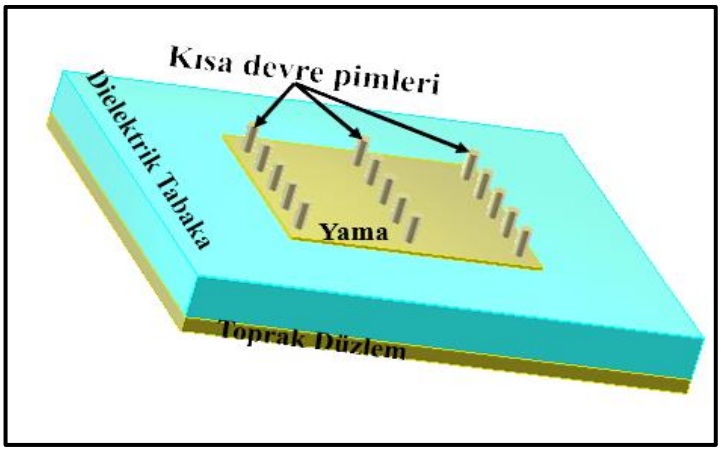
EBB 'den daha fazla avantaj sağlayan bir diğer periyodik yapı, YTY olarak adlandırılmaktadır.YTY tekniği, EBB'ye kıyasla düzenli yarıklı yapılarda daha yüksek hassasiyet gösterir ve tasarlanması ve uygulanması daha kolaydır [47]. YTY 4. bölümde daha ayrıntılı olarak işletilmiştir.




Şekil 3.3. Kareli EBB hücrelerin konfigürasyonu

### 3.5. Kısa Devre Pimleri

Kısa devre pimleri tekniği, rezonans frekans ayarı, anten boyutu küçültme, bant genişliği ve kazanç geliştirme vs. için yama ile mikroşerit anteninin toprak düzlemi arasındaki bölgedeki çeşitli yerlere en az bir metalik pimin sokulmasından oluşur. Bir mikroşerit anten içindeki kısa devre pimlerinin konfigürasyonu Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bu kısa devre pimleri bir anten içine sokulduğunda, yamanın kavitesindeki alan dağılımı aşırı derecede bozulur [49]. Alan bozulması, pimlerin oluşturduğu şant endüktif etkisinden kaynaklanmaktadır. Minyatürleştirme, rezonans frekansındaki azalma ile elde edilir. Kısa devre pimlerinin anten içine sokulmasından kaynaklanan rezonans frekansı üretilen paralel endüktansa bağlıdır [50]. O paralel endüktans, sokulan pimlerin sayısı, konumları, her bir pimin çapı ve anten alt tabakasının kalınlığı tarafından belirlenen pimlerin uzunluğu gibi parametrelere bağlıdır [51]. Dairesel bir yama için kenarda veya dikdörtgen yama için köşelerden birinde bulunan küçük çaplı kısa devre pimleri daha büyük endüktans değerine neden olur. Bu büyük endüktans değeri daha küçük bir rezonans frekansına yol açarak daha fazla minyatürleşmeye neden olur [50].




Şekil 3.4. Kısa devre pimlerinin konfigürasyonu

# 4. MİKROŞERİT ANTENLERDE YARIKLI TOPRAK YAPILARI

Mikrodalga devre elemanlarının minyatürleştirilmesinde ve performanslarının iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri EBB yapılarının kullanılmasıdır [52]. EBB yapıları, elektromanyetik dalgaların yayılım özelliklerini etkilemek için toprak düzlemine kazınmış desenlerden oluşan periyodik yapılardır [47]. Bu periyodik yapıların dezavantajı, modelleme karmaşıklığı ve yarıklı desenden ışıma oluşmasıdır. EBB yapılarının bu sakıncaları nedeniyle, araştırmacılar son zamanlarda mikrodalga bileşenlerini minyatürleştirme ve performans iyileştirme için YTY kullanmaya başlamışlardır.

YTY'ler, mikroşerit devre tasarımlarında bazı karakteristikleri iyileştirmek için toprak tabakasında oluşturulmuş periyodik ya da periyodik olmayan yarıklı desenlerden oluşur.

Literatürde YTY'lerin kullanıldığı mikroşerit devre tasarımları incelendiğinde, farklı amaçlar için kullanılmış periyodik ve periyodik olmayan birçok tasarım göze çarpmaktadır.

Lim ve diğ. (2003) [53] çalışmalarında, Spiral-YTY kullanarak tasarladıkları yükseltecin boyutunda küçültme ve harmoniklerde azalma sağladıklarını göstermişlerdir. Yazarlar hedeflerine ulaşmak için YTY'lerin bant durduran karakteristiklerinden faydalanmışlardır. Giriş ve çıkışta kullanılan yükselteç empedans uydurma ağı devrelerinin uzunlukları, performansı değiştirmeden %39 ve %44'e kadar azaltılabilmiştir. Aynı zamanda devrenin çıkışında kullanılan spiral-YTY sayesinde bant durduran karakteristiğinden dolayı ikinci harmonik bastırılmıştır. Bu sayede güç performansı da orijinal haline göre 10dB'den daha fazla iyileştirilmiştir.

Sung ve diğ. (2003) mikroşerit yama anteninde yüksek dereceli harmoniklerin oluşumunu engellemek için YTY'leri kullanmışlardır [54]. Bant durdurma özellik olan H şeklindeki deseni anten toprak düzlemine yerleştirerek, tasarlanan frekansta harmoniklerde 20 dB'den fazla bastırma ve 4.8 dBi anten kazancı elde etmişlerdir.

[55] 'deki çalışmada, minyatürleştirilmiş YTY'ye sahip toprak tabakası kullanılmıştır. Kompakt bir yapı ile geniş durdurma bandı ve yavaş-dalga özelliklerine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Parui ve Das (2007) [56], YTY'nin farklı mikroşerit devrelerde uygulamalarını gösterdiler. Önerilen YTY U-başlı dambıl şeklindedir. Önerilen YTY'yi mikroşerit toprak düzlemine gravür ederek çok düşük bir kesim frekansı elde etmişlerdir. Bu önerilen YTY paralel hatlı kuplörlerde kuplaj katsayısını artırmak için de kullanılabilir. Ayrıca bant-durduran ve bant-geçiren filtrelerin performanslarını arttırmak için toprak tabakasında kullanılabilir.

Weng ve diğ. (2008) [57] makalelerinde, YTY'ye genel bir bakış yapmışlardır. Yazarlar YTY'lerin temel kavramlarını ve iletim özelliklerini tanıtmışlardır. Çeşitli YTY birimlerinin eşdeğer devre modellerini sunmuşlardır. Son olarak, YTY'lerin değişik mikrodalga elemanlarındaki uygulamaları hakkında bilgi vermişlerdir.

Liu ve diğ. (2009) [58], geniş geçirme bandına sahip yüksek performanslı Bant Geçiren Filtre (BGF) tasarlamak için Tamamlayıcı Split Halka Rezonatörü ile YTY kombinasyonunu incelemişlerdir.

[59]'daki yazarlar periyodik YTY kullanarak bir mikroşerit antenin ışıma parametrelerini incelemişlerdir. Periyodik YTY'ler ile ışıma özelliklerini etkilemeden mikroşerit antenlerin daha kompakt hale getirilebileceğini göstermişlerdir.

[52]'de YTY'nin anten parametresi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yazarlar, YTY'lerin kompakt ve yüksek performanslı mikrodalga bileşenlerinin tasarımındaki rolünü göstermişlerdir.

[60]'ta yazarlar mikroşerit yama antenin bant genişliğini arttırmak için YTY'nin kullanımını sunmuşlardır. Bant genişliği, dönüş kaybı ve duran dalga oranı açısından önerilen anten ve YTY olmayan bir mikroşerit anten arasında karşılaştırma yapılmış, önerilen antenin performansının daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Gupta ve Mishra (2014) tarafından, Dairesel Disk Antenlerin performanslarını geliştirmek için YTY kullanılmıştır [61]. YTY'li olan ve YTY'li olmayan antenlerin performansları, kazanç, dönüş kaybı, duran dalga oranı açısından karşılaştırılmıştır.

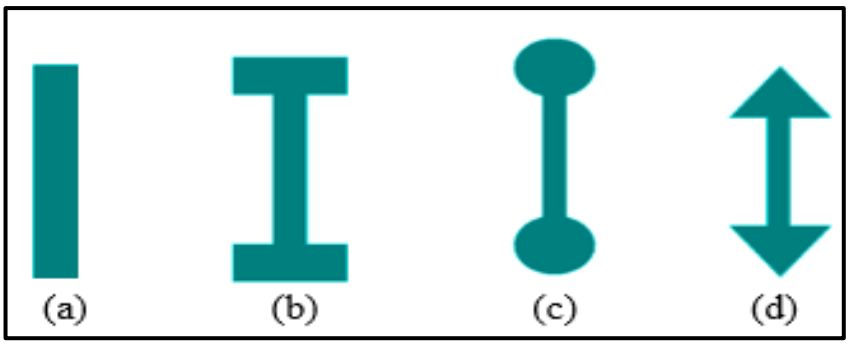
Khan ve diğ. (2014) [62] YTY 'nin tüm yönlerini gözden geçirmiş ve YTY tabanlı bant geçiren filtre önerisinde bulunmuştur. Önerilen filtre yapısının pratiği ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

[63]'de YTY'nin mikrodalga devrelerinin bant genişliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Nirala (2018) makalesinde [64] anten parametresi gelişimi için çeşitli YTY'nin etkisini incelemiştir.

Varshney ve diğ. (2016), [65] YTY kullanarak periyodik bir alçak geçiren filtre tasarlamıştır. İstenilen filtre tasarımını elde etmek için geçiş bandında önerilen YTY tarafından sağlanan kesme ve durdurma frekansı özelliklerini kullanmışlardır.

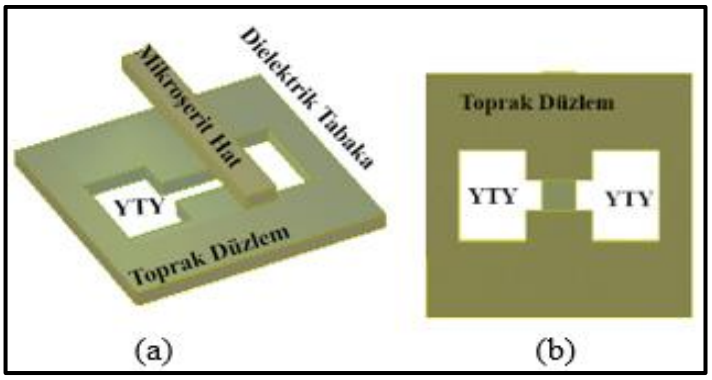
### 4.1. Yarıklı Toprak Yapıları 'nın Temel Yapısı

YTY'lerin birim hücre yapısı, iletken toprak düzlemine kazınmış herhangi bir şekilden oluşabilir. YTY'nin karakteristiğini, şekli ve birim hücrenin boyutu belirler. İstenen karakteristiğe göre optimizasyon çalışmaları neticesinde en uygun şekil ve boyut belirlemesi gerçekleştirilir. Yarık şekli oluşturulurken, dikdörtgen yarık çeşitli şekillerden oluşan baş kısmı yapılarıyla birlikte ve baş kısımları olmaksızın tek olarak kullanılmıştır. Diğer birçok yapı bu temel yapı temel alınarak geliştirilmiştir [57]. İstenen karakteristikleri elde edebilmek için periyodik olarak ya da periyodik olmayan bir şekilde bir araya getirilebilirler. YTY'leri oluşturmak için kullanılan birim hücre şekillerine örnekler Şekil 4.1'de verilmiştir.




Şekil 4.1. YTY'nin birim hücreleri [52]: (a) Başsız dikdörtgen yuva, (b) Dikdörtgen başlı, (c) Dairesel başlı, (d) Üçgen başlı

Dikdörtgen başlı ile dikdörtgen yuva yapılı YTY'ler genelde dambıl şekilli YTY olarak bilinir ve yaygın olarak kullanılır.




Şekil 4.2. Mikroşerit hatta dambıl şekilli YTY [52]: (a) Perspektif görünüş, (b) Arka görünüş

## 4.2. YTY İletim Özellikleri

YTY'lerin, mikrodalga devre elemanlarının tasarımında ve performans iyileştirmede kullanılmalarını sağlayan bazı iletim özelliklerine sahiplerdir. Bunlar; bant durdurma karakteristiği, yavaş dalga etkisi ve yüksek karakteristik empedansıdır.

### 4.2.1. YTY'lerin bant durdurma karakteristiği

YTY'ler, istenen frekans bantlarını bastırma özelliğine sahiptirler. YTY'lerin özelliği üst düzey harmonikleri, yüzey dalgalarını, istenmeyen ışımayı ve sızıntı iletimini bastırmak için kullanılır. Bu nedenle birçok mikrodalga tasarımlarında kullanılabilirler.

### 4.2.2. Yavaş dalga etkisi

YTY'nin eşdeğer LC bileşenleri, YTY'lerin yavaş dalga etkisi özelliğine yol açar. YTY'lerin bu özelliği sayesinde, mikrodalga devrelerin boyutunu küçültme, ışıma parametrelerini geliştirme, karşılıklı kuplajı azaltma, dizi antenlerde hüzme yönlendirme vb. sağlanabilir.

### 4.2.3. Yüksek karakteristik empedans

YTY'ler, bir mikroşerit hattın toprak düzlemine yerleştirildiğinde, eşdeğer endüktans L'yi yüksek oranda artırırken, eşdeğer kapasitans C'yi aynı anda azaltır. Eşdeğer kapasitans C ve endüktans L'nin bu değişimi, mikroşerit hattın karakteristik empedansının 200 Ω'dan fazla yükselmesini sağlar. Aslında, geleneksel bir mikroşerit

hattının kabul edilebilir empedansı yaklaşık 100 ~ 130 Ω ile sınırlıdır. YTY'nin bu yüksek karakteristik empedansı güç bölücülerinde, dijital sistemlerde vs. kullanılır.

### 4.3. Yarıklı Toprak Yapılarının Eşdeğer Devre Modelleri

YTY 'nin mikrodalga bileşenleri tasarımı üzerindeki etkisi eşdeğer devre parametreleri ile gösterilebilir. Pratik devre tasarımında tepkilerini kontrol etmek için bu parametrelerin elde edilmesi gerekir. Eşdeğer devre parametrelerinin elde edilmesinde Tam-Dalga Elektromanyetik Simülatörler kullanılır. Frekansa bağlı S-parametreleri elde edilerek, YTY'lerin kesim frekansları ya da rezonans karakteristikleri gözlenebilir. LC parametreleri YTY birim hücrelerinin fiziksel boyutundan doğrudan elde edilemez. YTY birim hücresi için üç ana eşdeğer devre modeli vardır: LC ve RLC eşdeğer devreleri, π şeklinde eşdeğer devre ve yarı statik eşdeğer devre [57].

#### 4.3.1. LC ve RLC eşdeğer devreleri

İki başlı YTY birim hücresinde, baş-yarık-baş sıralaması ile oluştuğu için iki düzensizlik noktası vardır. YTY'nin bu yapısı paralel bir LC devresine eşdeğerdir, çünkü iki baş eşdeğer bir endüktans L'ye karşılık gelirken, yarık kapasitans C'ye karşılık gelir. Paralel LC devresi belirli bir frekansta bir rezonans oluşturur. Etkili seri endüktans L YTY'nin birim başlarının alanı genişletilerek arttırılabilir. L'nin daha yüksek değeri daha düşük bir kesme frekansına yol açar. Diğer taraftan, yarığın genişliği artırıldığında etkin kapasitans değeri azalır. Bu, rezonansı daha yüksek frekansa kaydırır [47].

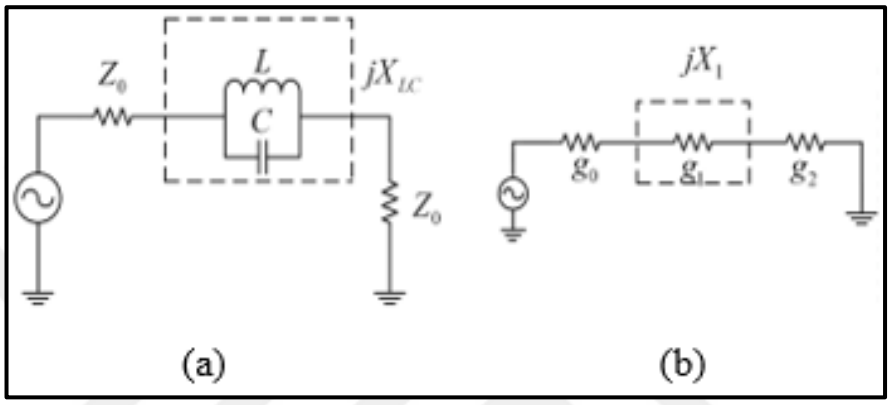
Tam dalga EM simülasyon sonuçlarından elde edilen devre parametreleri tek kutuplu Butterworth Alçak Geçiren Filtre ile eşleşebilir. Eşleştirme, kesim frekansında her iki devrenin reaktans değerleri eşit olduğunda gerçekleşir [57]. L ve C ifadeleri Denklem (4.1)'deki gibidir [47];

$$\begin{cases} C = \dfrac{\omega_c}{Z_0 g_1} \times \dfrac{1}{\omega_0^2 - \omega_c^2} \\ L = \dfrac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \end{cases} \tag{4.1}$$

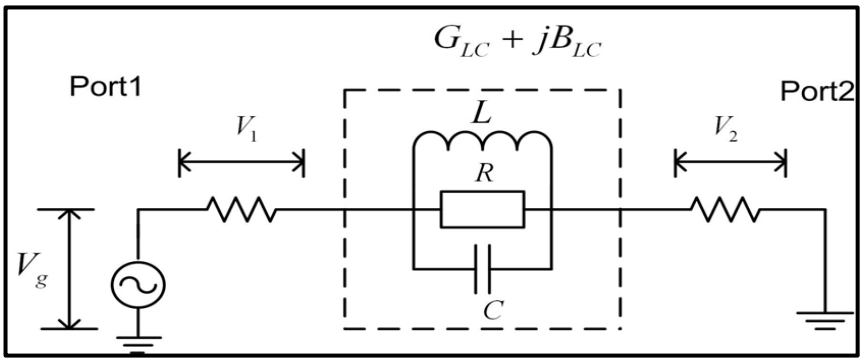
Burada, $\omega_0$ paralel LC rezonatörün rezonans açısal frekansı, $\omega_c$ paralel LC rezonatörün kesim açısal frekansı ve $f_0$ paralel LC rezonatörün rezonans frekansıdır.

Dambıl şekilli YTY birim hücresinin eşdeğer devresi ve tek kutuplu Alçak Geçiren Filtre (AGF) yapısı Şekil 4.3'de verilmiştir. YTY'nin çoğu benzer özelliklere sahip olduğundan Dambıl şekilli YTY örnek olarak verilmiştir [57].

YTY birim hücresi bazen paralel R, L, C eşdeğer devresi ile Şekil 4.4'te tasvir edildiği gibi modellenebilir, burada eşdeğer direnç yapıyı oluşturan desendeki kayıplara bağlıdır [57].




Şekil 4.3. LC eşdeğer devresi [57]: (a) Dambıl şekilli YTY, (b) Tek kutuplu Butterworth AGF




Şekil 4.4. YTY birim hücresinin RLC Eşdeğer devresi [57]

R, L ve C ifadeleri Denklem (4.2)'de verilmiştir [57];

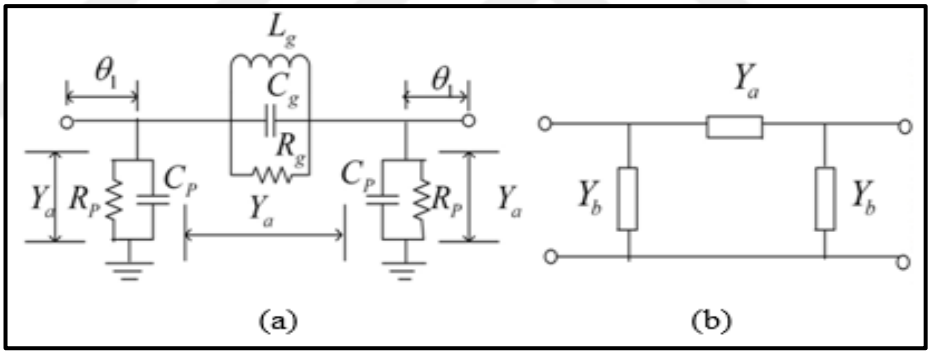
$$\begin{cases} C = \frac{\omega_c}{Z_0 g_1} \times \frac{1}{\omega_0^2 - \omega_c^2} \\ L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \\ R = 2Z_0 \Big/ \sqrt{\frac{1}{|S_{11}|^2} - (2Z_0(\omega C - \frac{1}{\omega L}))^2 - 1} \end{cases} \quad (4.2)$$

### 4.3.2. π şekilli eşdeğer devresi

YTY birim hücresinin LC ve RLC eşdeğer devreleri, harmonik bastırma amacıyla gerekli geçiş bandı ve stop bandı özelliklerini aynı anda yerine getirememektedir. Şekil 4.5 'te gösterilen π şeklindeki eşdeğer devre modeli bu sorunun daha doğru olarak üstesinden gelmek için önerilmiştir. Ancak, bu devre modeli daha karmaşıktır ve türetilecek birçok parametre vardır [57]. YTY birim hücresinin ABCD parametreleri Denklem (4.3)'teki gibi türetilebilir [57];

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+Y_b/Y_a & 1/Y_a \\ 2Y_b+Y_b^2/Y_a & 1+Y_b/Y_a \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

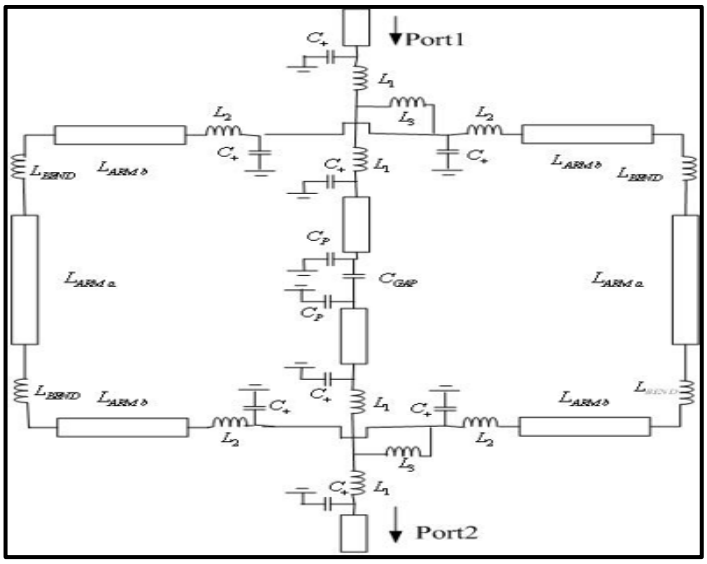
$$\begin{cases} Y_a = 1/R_g + jB_r \\ Y_b = 1/R_p + jB_p \\ C_g = \dfrac{B_r}{\omega_2\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}-\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)},\ L_g = \dfrac{1}{\omega_2^2 C_g},\ C_p = \dfrac{B_p}{\omega_1} \end{cases} \tag{4.4}$$




Şekil 4.5. π şekilli devre modeli [57]: (a) YTY birim hücresinin eşdeğer devresi, (b) Geleneksel π şeklinde devre

### 4.3.3. Yarı statik eşdeğer devresi

Daha önce bahsedilen iki eşdeğer devre türü tam dalga EM analizine dayanmaktadır. Ancak, tam dalga EM analizi YTY'nin fiziksel boyutları hakkında herhangi bir fikir vermez [57]. Yarı statik eşdeğer devre modeli, tam dalga analizinin bu sınırlamasına çözümdür. YTY birim hücresinin eşdeğer devre modeli, eşdeğer LC parametreleri direkt fiziksel boyutlarından türetilerek geliştirilmiştir. YTY'nin bant-durduran ve bant-geçiren özelliklerinin nasıl oluşturulduğunu anlamayı sağlar [66]. Yarı statik eşdeğer devre modeli Şekil 4.6'da gösterilmiştir.




Şekil 4.6. YTY birim hücresinin yarı-statik eşdeğer devresi [57]

### 4.4. Uygulamalar

YTY, özellikle performans geliştirme ve parametre şekillendirme için aktif ve pasif cihazlarda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Mikrodalga filtreler ve osilatörler, iletim hatları, mikroşerit antenler, güç amplifikatörleri ve bölücüler, empedans transformatörleri, kuplörler, birleştiriciler, ışın şekillendirme, empedans eşleştirme ağları vb. gibi çeşitli mikrodalga cihazlarda kullanılırlar [52].

### 4.5. Yarıklı Toprak Yapıları 'nın Mikroşerit Antenlerde Uygulamaları

YTY mikrodalga devre tasarımı alanlarında birçok uygulaması vardır, ama çoğunlukla mikroşerit antenlerde kullanılır. Harmoniklerin azaltılması, karşılıklı kuplaj ve çapraz polarizasyon, anten minyatürizasyonu, ışıma özellikleri (bant genişliği ve kazanç) geliştirme, dairesel polarizasyon üretimi vs. için kullanılır [52].

#### 4.5.1. Harmonik azaltma

Aktif cihazla entegre mikroşerit antenler çoğunlukla harmonik ışımadan muzdariptirler. YTY mikroşerit antenlerde üst düzey harmonik bastırma için en iyi çözümdür. YTY tabanlı bir anten, harmoniklerin ortadan kaldırılmasına yardımcı olan bant bastırma özelliklerine sahiptir. Anten harmonik indirgeme için en çok kullanılan YTY şekilleri, spiral şeklinde, H şeklinde ve dambıl şeklindedir.

### 4.5.2. Karşılıklı kuplaj azaltma

Anten dizilerinin ışıma desenleri ve diğer birçok parametre, dizi elemanları arasındaki karşılıklı kuplajdan etkilenir. Bu nedenle, dizinin iyi performans göstermesi için karşılıklı kuplajın azaltılması gerekir. Bu, YTY tarafından sağlanan yavaş dalga etkileri uygulanarak yapılabilir. YTY karşılıklı kuplaj azaltma için çok etkili bir yöntemdir.

### 4.5.3. Çapraz polarizasyon azaltma

YTY'ler, mikroşerit antenlerde çapraz polarizasyon azaltma için kullanılabilir. Bu teknik, antenin baskın mod giriş empedansını ve eş-polarize ışıma desenlerini etkilemeden çapraz polarize radyasyon alanını azaltmaya olanak sağlar.

### 4.5.4. Anten minyatürleştirme

Anten boyutu küçültme için kullanılan birçok teknikler vardır ancak YTY'ler en çok tercih edilenler arasındadır. Anten boyutu küçültme YTY'lerin daha yüksek yavaş dalga faktörü özelliği kullanılarak sağlanır.

### 4.5.5. Işıma özelliklerinin geliştirilmesi

Mikroşerit antenler, anten ışıma özelliklerini etkileyen istenmeyen yüzey dalgalarından muzdariptirler. Mikroşerit antendeki yüzey dalgaları problemini aşmak için YTY tekniği kullanılır. YTY'lerin bant durdurma özellikleri yüzey dalgalarını bastırmak için kullanılır.

### 4.5.6. Dairesel polarizasyon üretimi

Uydu ve karasal sistemler, RFID okuyucu sistemi vb. kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan antenlerde dairesel polarizasyon gereklidir. Bu nedenle, bu uygulamalar için dairesel polarize antenlerin tasarlanması gerekmektedir. Bir yama anteninin dairesel polarize olabilmesi için, YTY'ler, yama ile birleşen kenarı da ekleyerek besleme hatlarının altına yerleştirilebilirler.

# 5. 5G ORTA BANTLARINDA MİNYATÜRLEŞTİRİLMİŞ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

Bu çalışmada standart ölçülerde bir mikroşerit anten tasarlanmış ve daha sonra YTY teknik yardımıyla minyatürleştirilmiştir.

## 5.1. Konvansiyonel Anten

Referans anten, bakırdan yapılmış kare toprak düzlemi ile desteklenen dielektrik bir alt tabaka üzerine yerleştirilen bakırdan yapılmış dairesel yamadan oluşan bir mikroşerit antendir. Anten, toprak düzlemi genişliğinin merkezinde bulunan bir mikroşerit hat ile beslenmiştir. Önerilen anten Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Tasarım prosedürü şu temel parametrelere dayanmaktadır: resonans frekans, alt tabakanın dielektrik sabiti ve kalınlığı. Anten, 5G orta bant spektrumunda özellikle 3,6 GHz frekansta çalışmaktadır. Antenin alt tabakası Arlon DiClad 880 dielektrik malzemeden yapılmıştır ve 2,2 bağıl dielektrik sabitine ($\varepsilon_r$) sahiptir. Antenin alt tabakası 0.762 mm kalınlığında ve 0,261 W/m-K termal iletkenliğe sahiptir. Yamanın yarıçapı (a) Denklem (2.27) kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplama, Denklem (5.1)'de gerçekleştirilmiştir.

$$a = \frac{1,8412}{2\pi(f_r)_{110}\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1,8412C}{2\pi(f_r)_{110}\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1,8412\times3\times10^8}{2\pi\times3,6\times10^9\sqrt{2,2}} = 16,46 \text{ mm} \quad (5.1)$$

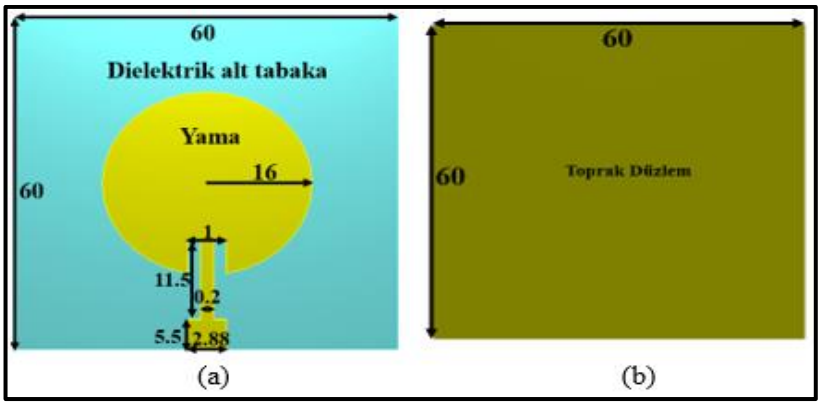
Toprak düzlemin boyutları (Wg, Lg) Denklem (5.2) kullanılarak hesaplanır [67];

$$W_g = W + 30$$
$$L_g = L + 30 \quad (5.2)$$

W ve L sırasıyla yamanın genişliği ve uzunluğudur. Bunlar denklem (2.4) kullanılarak hesaplanabilir;

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{C}{2f_r}\sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{3\times10^8}{2\times3,6\times10^9}\sqrt{\frac{2}{2,2+1}} = 32,94 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Lg = Wg = 30 + 32,94 = 62,94 mm. Lg, bu çalışmada 60 mm olarak alınmıştır.




Şekil 5.1. Referans anteni: (a) Üst görünüş, (b) Arka görünüş

## 5.2. Minyatürleştirme

Minyatürleştirme, önerilen referans anteninin toprak düzlemine farklı YTY şekillerinin gravür edilmesiyle sağlanmıştır. Bu çalışmada, YTY'nın yüzey dalga bastırma özelliği minyatürleştirme için kullanılmaktadır. Aslında, YTY'nin varlığı toprak düzlem üzerinde bir süreksizlik yaratarak, alan akım dağılımında önemli bir bozukluk oluşturulur. Yüzey dalgaları azalır ve antende depolanan EM enerjinin azalmasına neden olur. Dolayısıyla Q faktörü de azalır [2]. Aslında, Q faktörü Deklem (5.4)'te verildiği gibi antende depolanan EM enerji ile ilişkilidir. Q faktörü, rezonans frekansının Denklem (5.7)'de verildiği gibi bant genişliğine oranı olarak da ifade edilebilir;

$$Q = \frac{2\omega_{max}\{W_e\ ,\ W_m\}}{P_{dis.}} \tag{5.4}$$

$$W_e = \frac{C|V|^2}{4} \tag{5.5}$$

$$W_m = \frac{L|I|^2}{4} \tag{5.6}$$

$$Q = f_r/BW \tag{5.7}$$

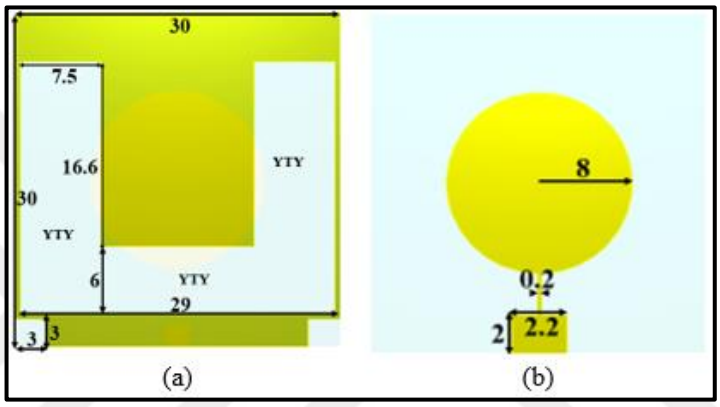
Burada, Q kalite factörü, $W_e$ ve $W_m$ sırasıyla depolanan elektrik ve manyetik enerjilerdir.

Q azaldığında, rezonans frekansı da düşer. Antenin boyutu ve frekansı ile ilişkili olduğundan, antenin boyutu ilgili seviyeye indirilerek rezonans frekansı korunabilir.

Sonuç olarak, referans antende %75 ve %91oranında alan azaltımı sağlanmıştır. YTY'nın son şekil ve boyutları ve buna karşılık gelen minyatürleştirme düzeyi optimizasyon ile elde edilir. DGS ile ilgili detaylar dördüncü bölümde verilmiştir.

### 5.2.1. %75 minyatürleştirilmiş anten

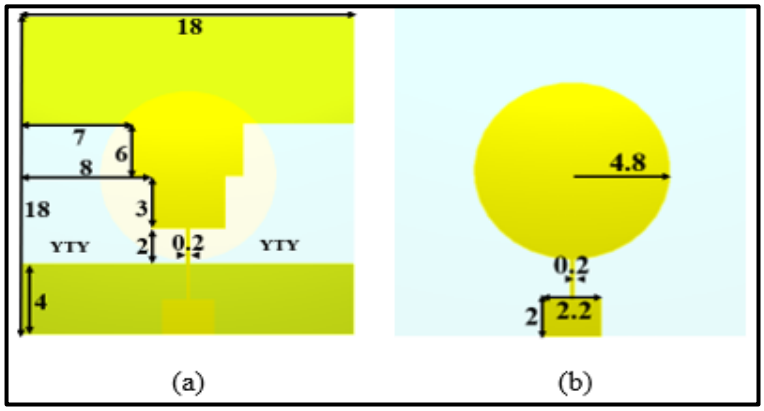
%75 oranında alan azaltımı sağlamak için kullanılan optimize edilmiş YTY ve ortaya çıkan minyatürleştirilmiş yama Şekil 5.2'de gösterilmiştir. YTY'nın boyutları (milimetre cinsinden) şekilde gösterilmiştir.




Şekil 5.2. %75 minyatürleştirme: (a) YTY, (b) Minyatürleştirilmiş yama

### 5.2.2. %91 minyatürleştirilmiş anten

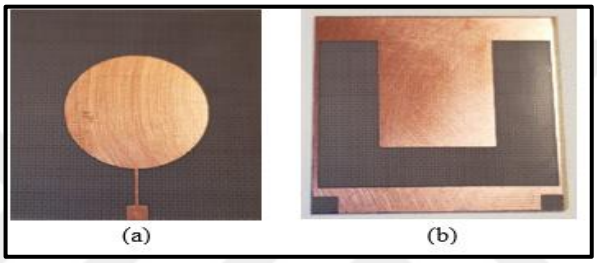
Referans anteninin %91 oranında alan azaltımı, YTY'nın Şekil 5.3'te gösterilen şekle göre optimize edilerek sağlanmıştır.



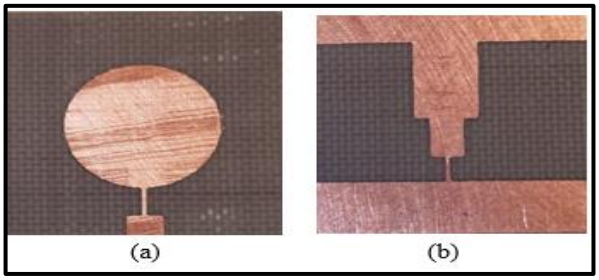

Şekil 5.3. %91 minyatürleştirme: (a) YTY, (b) Minyatürleştirilmiş yama

### 5.3. Minyatürleştirilmiş Antenlerin Gerçekleştirilmesi

Ortaya çıkan minyatürleştirilmiş antenler, belirli adımları takip eden hassas bir prosedür kullanılarak üretilmiştir. CST Microwave Studio'da tasarım ve analizlerden sonra elde edilen minyatürleştirilmiş antenler CST'den CorelDraw yazılımına aktarılarak çizilmiştir. Yazılımdan elde edilen çizimler aydinger kağıdı ile basılmıştır. Aydinger kağıdı baskıları PCB plakası için maske olarak kullanılmış ve ardından antenler PCB yazıcı kullanılarak basılmıştır. Üretimden elde edilen antenler Şekil 5.4 ve 5.5'te gösterilmiştir.




Şekil 5.4. Üretilen %75 minyatürleştirilmiş anten: (a) Üst görünüş, (b) Arka görünüş




Şekil 5.5. Üretilen %91 minyatürleştirilmiş anten: (a) Üst görünüş, (b) Arka görünüş

### 5.4. Antenlerin Ölçümü

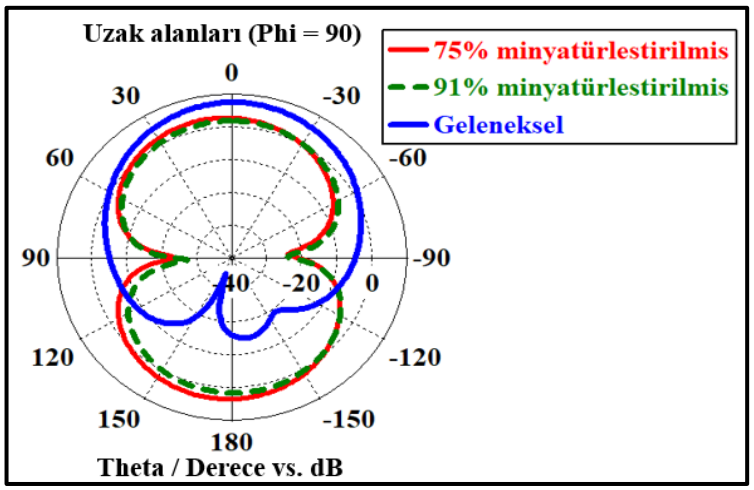
Üretilen antenler Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı'nda Network Analyzer kullanılarak test edilmiştir. Ölçümde kullanılan referans anteni piramidal horn antenidir. Network Analyzer'in frekans aralığı 900 MHz – 20 GHz arasındadır. Işıma desenleri, yansıma katsayıları ve kazanç gibi anten parametreleri ölçüm alınmıştır.

## 6. BULGULAR

Referans anteninin ve minyatürleştirilmiş karşılıklarının simülasyonu CST Microwave Studio kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur. Simülasyon ve ölçüm ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması da sunulmuştur.

### 6.1. Işıma Desenleri

Şekil 6.1, konvansiyonel antenin ve karşılık minyatürleştirilmiş antenlerin ışıma desenlerini göstermektedir. Minyatürleştirilmiş antenlerin arka lobları artarken, ana loblar referans antene göre azalmış. Bir antenin boyutunu küçültmenin radyasyon özelliklerini olumsuz etkilediği iyi bilindiği için bu beklenen bir şeydir. Temel amaç olarak, radyasyon özellikleri hala kabul edilebilir iken, istenildiği kadar küçük boyut olan bir anten elde etmektir.

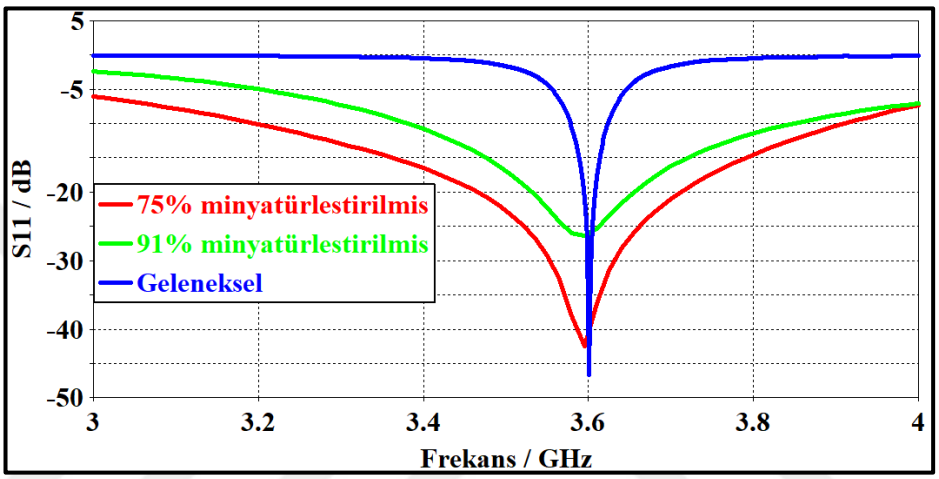



Şekil 6.1. Işıma desenleri

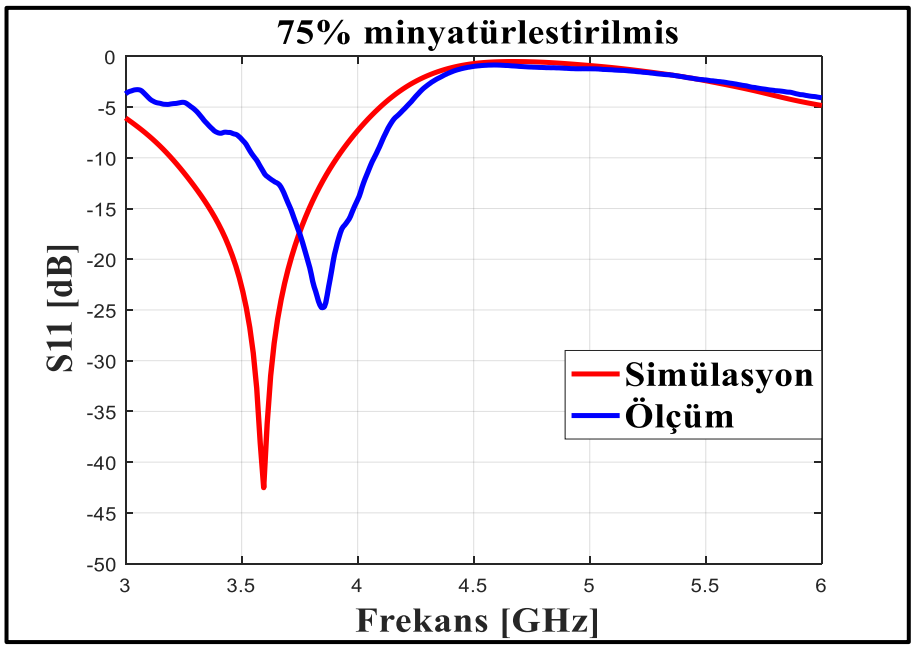
### 6.2. Yansıma Katsayıları

Önerilen antenlerin çalışma frekansındaki yansıma katsayıları Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Şekil'de gösterildiği gibi, yansıma katsayıları çalışma frekansında -10dB'nin altındadır. Elde edilen değerler referans anten için -46.59dB, %75

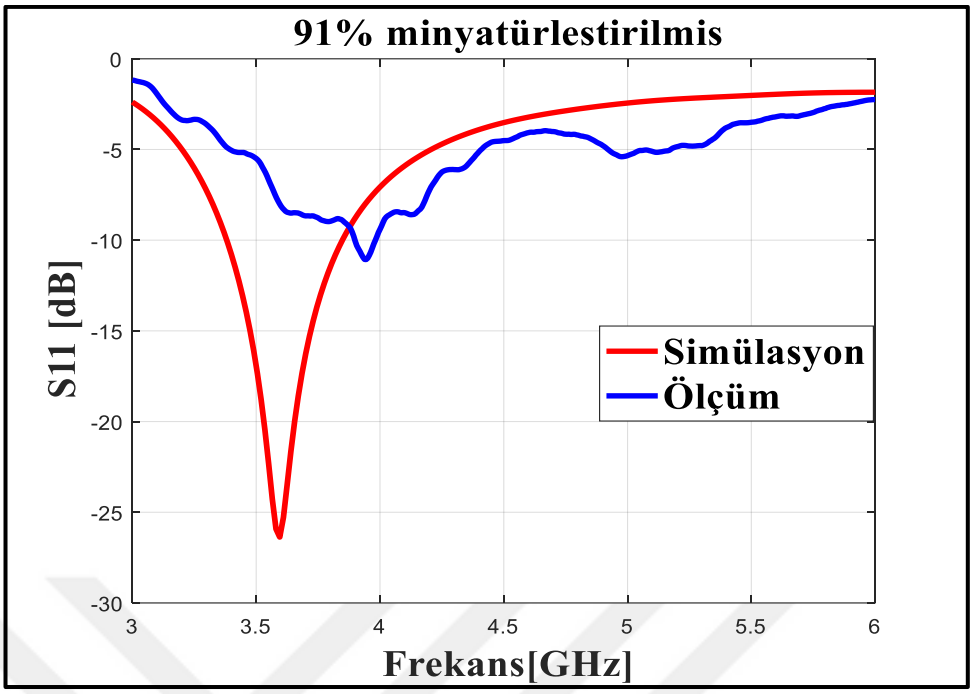
minyatürleştirilmiş anten için -42.53 dB ve %91 minyatürleştirilmiş anten için -26.37 dB'dir. $S_{11}$ grafiklerinden minyatürleştrilmiş antenlerin 5G orta bant spektrumunda mobil uygulamalar için uygun olan 3,4 - 3,8 GHz bandı da dahil olmak üzere bant genişliğini sağladığı görülmektedir. Şekil 6.5 ve 6.6, minyatürleştirilmiş antenlerin ölçüm ve simülasyon ile elde edilen yansıma katsayılarının karşılaştırmasını göstermektedir. Simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında, ölçülen yansıma katsayıları bir frekans kayması vardır; ancak, hala -10dB altındalardır.




Şekil 6.2. $S_{11}$ çizimleri



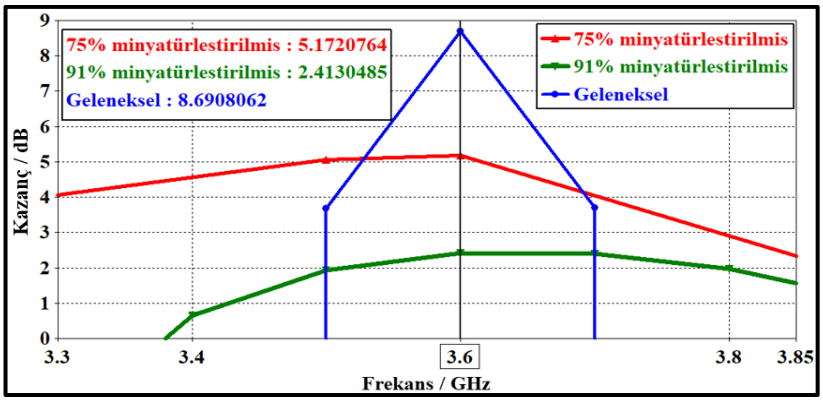

Şekil 6.3. %75 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon $S_{11}$



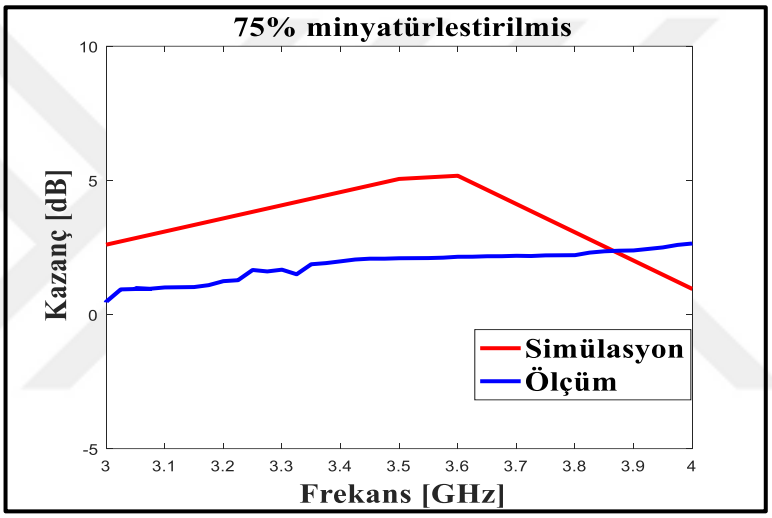

Şekil 6.4. %91 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon $S_{11}$

### 6.3. Antenlerin Kazançları

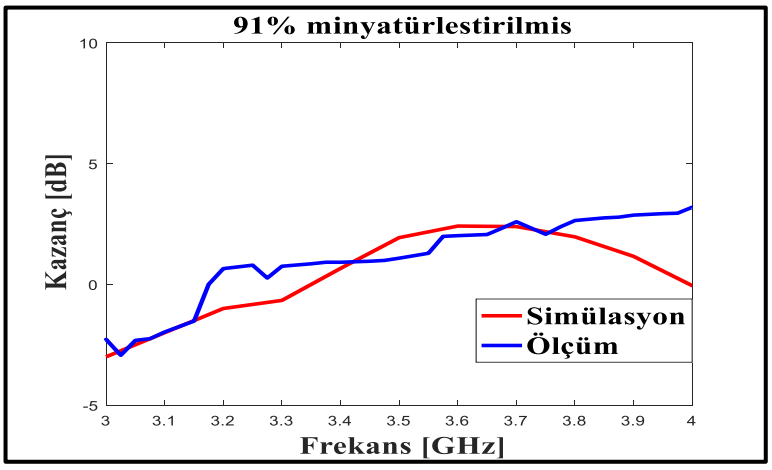
Önerilen antenlerin kazançlarının 2D çizimleri Şekil 6.7'de sunulmuştur. Referans anteni ve minyatürleştirilmiş karşılıkları, rezonans frekansında amaçlanan uygulama için kabul edilebilir kazançlar sunmaktadır. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, simülasyon yoluyla elde edilen kazançların değerleri referans anten için 8,69 dB, 75 ve %91 minyatürleştirilmiş antenleri için sırasıyla 5,17 ve 2,41 dB'dir. Anten minyatürleştirildikçe, antenin kazancında bir düşüş fark edilebilir ve kazanç değeri daha yüksek minyatürleştirme seviyesinde daha da düşer. Aslında, anten kazancı minyatürleştirme etkilerinden etkilenen antenin özelliklerinden biridir. Minyatürleştirilmiş antenlerin simülasyon ve ölçüm ile elde edilen kazançları Şekil 6.8 ve 6.9'da karşılaştırılmıştır. %75 minyatürleştirilmiş anten için, ölçülen kazancın simülasyon sonucuna göre düştüğü Şekil 6.8'den görülebilir. %91 minyatürleştirilmiş anten için ölçülen ve simüle edilen kazançlar Şekil 6.9'dan fark edilebildiği gibi büyük bir fark göstermemektedir.




Şekil 6.5. Kazançların 2D çizimleri



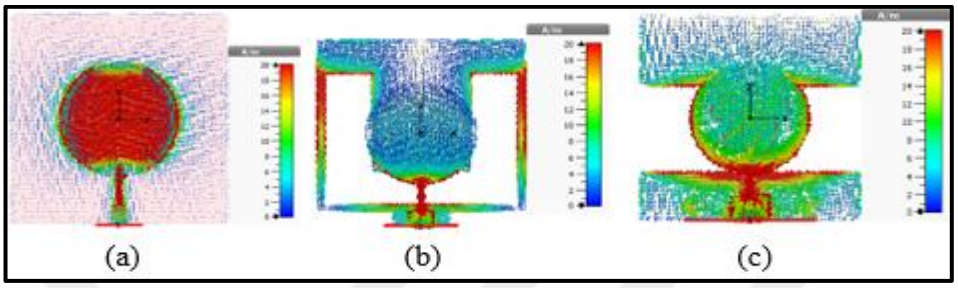

Şekil 6.6. %75 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon kazançları




Şekil 6.7. %91 minyatürleştirilmiş antenin ölçüm ve simülasyon kazançları

### 6.4. Alan Akım Dağılımları

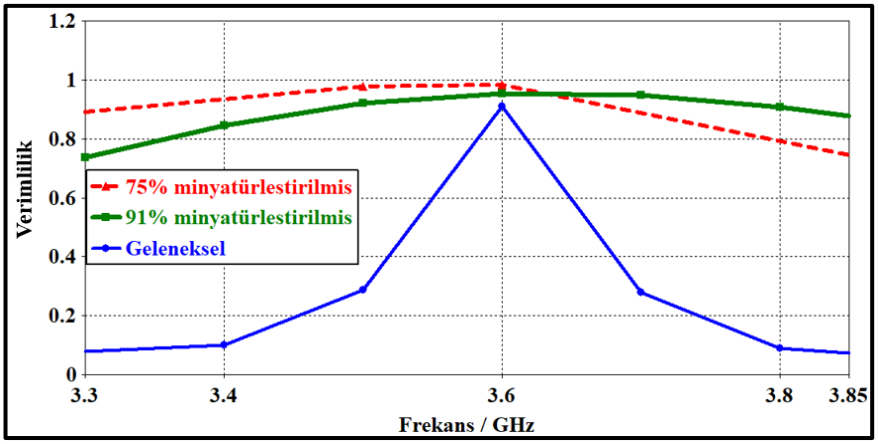
Şekil 6.10 önerilen antenlerin alan akım dağılımlarını göstermektedir. Burada alan akım dağılımına ilişkin bazı varyasyonlar referans anteni ile minyatürleştirilmiş karşılıkları arasında fark edilebilir.




Şekil 6.8. Akım dağılımı: (a) Referans anten, (b) %75 minyatürleştirilmiş anten, (c) %91 minyatürleştirilmiş anten

### 6.5. Antenlerin Verimliliği

Referans antenin ve minyatürleştirilmiş karşılıkları verimlilik çizimleri Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Grafiklerden, önerilen tüm antenlerin uyarılmış gücü %90'ının üzerinde yaydığı görülmektedir.




Şekil 6.9. Verimlilik çizimleri

# 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 5G mobil uygulamalar için dairesel yama mikroşerit anten minyatürleştirilmesi tartışılmıştır. Minyatürleştirmeyi gerçekleştirmek için YTY yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, 16 mm yarıçaplı dairesel yama mikroşerit anten tasarlanmış ve CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Daha sonra bu antenin YTY'ye dayalı minyatürleştirmesi yapılmıştır. Minyatürleştirme işlemi, CST Microwave Studio yazılımı kullanılarak optimizasyon ve analiz yoluyla gerçekleştirilmiştir. Kabul edilebilir anten performansına karşılık gelen minyatürleştirme düzeyi, YTY'nin şekil ve boyut açısından optimizasyonu yoluyla elde edilmiştir. Sonuç olarak, referans anten açısından %75 ve %91 alan azaltması farklı YTY konfigürasyonları kullanılarak sağlanmıştır.

Simülasyondan elde edilen yansıma katsayıları referans anten için -46,59 dB, %75 minyatürleştirilmiş anten için -42,53 dB ve %91 minyatürleştirilmiş anten için -26,37 dB'dir. Minyatürleştirilmiş antenler 3,4-3,8 GHz frekans aralığını kapsayan bant genişlikleri sağlamaktadır. Bu 5G mobil uygulamalar için 5G orta bant spektrum içinde önerilen frekans bantlarından biridir. Simülasyondan elde edilen kazançlar referans anten için 8,69 dB, sırasıyla %75 ve %91 minyatürleştirilmiş antenleri için 5,17 ve 2,41 dB'dir. Önerilen antenlerin %90'dan fazla verimlilikleri vardır.

Simülasyon programı ile analizleri tamamlanan minyatürleştirilmiş antenler üretilmiş ve Network Analyzer kullanılarak test edilmiştir. Üretilen antenlerin ışıma desenleri ve yansıma katsayıları gibi parametreleri Network Analyzer kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümden elde edilen sonuçlar MATLAB'da çizerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında, ölçüm sonuçlarında bir gecikme vardır. Bu, üretim tekniğindeki kusurlara ve ölçüm cihazlarındaki kalibrasyon problemine bağlanabilir. Ancak, Network Analyzer ile ölçülen parametreler antenlerin hala çalışır durumda olduğunu göstermektedir. Yansıma katsayıları -10dB'nin altındadır.

YTY, yama antenlerin minyatürleştirme amacıyla kullanılması için uygun bir

yöntemdir. YTY uygun optimizasyonu ile daha yüksek düzeyde minyatürleştirme sağlanabilir. Bu yöntem, anten performansının bozulması açısından toleranslıdır. Ayrıca, uygulama için ekstra malzeme gerektirmez. Bu tekniğin ana zorluğu optimizasyondadır. YTY şekli ve boyutları ilk olarak tahmin edilir ve istenilen sonuçlar elde edilene kadar tekrarlı süreç ile değiştirilir. Bu YTY tekniğini optimize etme yolu ilkel ve zaman kurnazlığıdır. Bu, ulaşılabilir minyatürleştirme düzeyini ve buna karşılık gelen sonuçları tahmin etmeyi imkansız hale getirir.

Bu çalışmada önerilen antenler IoT, 5G akıllı telefonlar gibi vs. çeşitli 5G uygulamalarda kullanılabilir. Çok düşük profilli ve kompakt anten elemanlarına sahip anten dizileri ile elde edilen hüzme yönlendirme (beam steering) ve masif MIMO sistemleri uygulamalarında kullanılabilirler. Bu nedenle, YTY gibi daha fazla anten minyatürleştirme teknikleri geliştirilmeli ve yenilenmelidir. Anten minyatürleştirmede uygulamayı mükemmelleştirmek için YTY'nin yapısı ve çeşitli elektromanyetik özellikleri hakkında dikkatli çalışmalar yapılmalıdır. YTY'nin optimizasyon tekniği geliştirilmelidir.

## KAYNAKLAR


[1] Vora L. J., Evolution of Mobile Generation Technology: 1G to 5G and Review of Upcoming Wireless Technology 5G, *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)*, 2015, **02**(10), 281-290.

[2] Rahman M. M. ve diğ., Performance Analysis of a Defected Ground Structured Antenna Loaded with Stub-Slot for 5G Communication, *Sensors*, 2019, **19**(11).

[3] Stanley M. ve diğ., A High Gain Steerable Millimetre-Wave Antenna Array for 5G Smartphone Applications, *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, 2017, 1311-1314.

[4] Verma S. ve diğ., A Small Microstrip Patch Antenna for Future 5G Applications, *2016 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, 2016, 460-463.

[5] Priya K. N. L. V. ve diğ., A Microstrip Patch Antenna Design at 28GHz for 5G Mobile Phone Application, *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System (IJEECS)*, 2018, **7**(3), 204-208.

[6] Kiran T. ve diğ., Design of Microstrip Patch Antenna for 5g Applications, *Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 2018, **13**(1), 14-17.

[7] Imran D. ve diğ., Millimetre Wave Microstrip Patch Antenna for 5G Mobile Communication, *2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, Lahore, 2018, 1-6.

[8] Jilani S. F. ve Alomainy A., Millimetre-wave T-shaped MIMO Antenna with Defected Ground Structures for 5G Cellular Networks, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, **12**(5), 672-677.

[9] Sun L., Feng H., Li Y. ve Zhang Z., Compact 5G MIMO Mobile Phone Antennas with Tightly Arranged Orthogonal-Mode Pairs, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, **66**(11), 6364-6369.

[10] Rahayu Y. ve Mustofa I. R., Design of 2×2 MIMO Microstrip Antenna Rectangular Patch Array for 5G Wireless Communication Network, *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Singapore, 2017, 2679-2683.

[11] Soffar H., 1G Mobile Phones Features, Uses, Advantages and Disadvantages, *Sciences Online*, https://www.online-sciences.com/technology/1g-mobile-phones-features-uses-advantages-and-disadvantages/ (Ziyaret tarihi: 17 Nisan 2020).

[12] http://protei.me/blog/telecom-news/the-mobile-wireless-communication-technology-journey (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2020).

[13] https://support.chinavasion.com/index.php?/Knowledgebase/Article/View/284/42/1g-2g-3g-4g---the-evolution-of-wireless-generations (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2020).

[14] Rajiv, Evolution of Wireless Technologies 1G to 5G in Mobile Communication, *RF Page*, https://www.rfpage.com/evolution-of-wireless-technologies-1g-to-5g-in-mobile-communication/ (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2020).

[15] https://www.brainbridge.be/news/from-1g-to-5g-a-brief-history-of-the-evolution-of-mobile-standards (Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2020).

[16] https://www.tutorialspoint.com/5g/5g_challenges.htm (Ziyaret tarihi: 25 Nisan 2020).

[17] Balanis C. A., *Antenna theory, Analysis and design*, 3rd ed., John Wiley & SONS, INC., Hoboken, New Jersey, 2005.

[18] Schaubert D. H., Pozar D. M., ve Adrian A., Effect of Microstrip Antenna Substrate Thickness and Permittivity: Comparison of Theories and Experiment, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1989, **AP-37**(6), 677–682.

[19] Van Lil E. H. ve Van de Capelle A. R., Transmission-Line Model for Mutual Coupling Between Microstrip Antennas, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1984, **AP-32**(8), 816–821.

[20] https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_micro_strip.htm (Ziyaret tarihi: 03 Nisan 2020).

[21] https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_parameters.htm (Ziyaret tarihi: 03 Nisan 2020).

[22] http://www.antenna-theory.com/definitions/vswr.php (Ziyaret tarihi: 03 Nisan 2020).

[23] https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/antenna_theory_parameters.htm (Ziyaret tarihi: 03 Nisan 2020).

[24] Orban D. ve Moernaut G. J. K., The Basics of Patch Antennas, *Updated*, *RF Globalnet Newsletter of September 2009*, https://orbanmicrowave.com/the-basics-of-patch-antennas/ (Ziyaret tarihi: 03 Nisan 2020).

[25] Parsons P. E., Larimore Z. J., Lu A., ve Mirotznik M. S., Miniaturization of an Additively Manufactured Microstrip Patch Antenna Using Magnetodielectric, *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Fajardo, Puerto Rico, 26 June-1 July 2016.

[26] Aghwariya M. K. ve diğ., Miniaturization of L-Band Rectangular Patch Antenna by Using Two Rectangular Slit, *2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, Tehri, India, 23-25 December 2016.

[27] Ghahremani M., ve diğ., Miniaturised UWB antenna with dual-band rejection of WLAN/WiMAX using slitted EBG structure, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, **13**(3), 360-366.

[28] Shen X., ve diğ., A Miniaturized Microstrip Antenna Array at 5G Millimetre-Wave Band, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, **18**(8), 1671-1675.

[29] Jahani S., Mohassel J. R. ve Shahabadi M., Miniaturization of Circular Patch Antennas Using MNG Metamaterials, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, **9**, 1194 - 1196.

[30] Motevasselian A. ve Whittow W. G., Miniaturization of a Circular Patch Microstrip Antenna Using an Arc Projection, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, **16**, 517-520.

[31] Ouedraogo R. O. ve diğ., Miniaturization of patch antennas using a metamaterial inspired technique, *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2012, **60**(5), 2175 – 2182.

[32] Surendrakumar P. ve Chandramohan B., Miniaturizing a microstrip antenna using metamaterials and metasurfaces, *IEEE Antennas and Propagation Magazine 2019*, **61**(1), 91-135.

[33] Ammai L., Anwar R. ve Nurmantris D. A., Analysis on multi rings defected ground structure for microstrip antenna miniaturization, *2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 18-20 September 2017, 1-4.

[34] Nataraj D., Karunakar G. ve Rao B. R., A novel miniaturized microstrip antenna with E and F shape defected ground structure, *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Chennai, India, 21-22 September 2017, 2843-2848.

[35] Er-rebyiy R., ve diğ., A new design of a miniature microstrip patch antenna using defected ground structure DGS, *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, Fez, Morocco, 19-20 April 2017, 1-4.

[36] Prasad R. V. H., Vakula D. ve Chakravarthy M. A novel fractal slot DGS microstrip antenna for Wi-Fi application, *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, Hyderabad, India, 16-19 December 2018, 1-4.

[37] Wang R., ve diğ., A novel miniaturized microstrip antenna using interdigital capacitor based on defected ground structure, *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, China, 8–11 August 2016, 450-453.

[38] Sofi A. M., Muzaffar K., Shafi A. M. ve Dar B. A., Defected ground structure based rectangular microstrip patch antenna with triple band operation, *2017 International Conference on Innovations in Control, Communication and Information Systems (ICICCI)*, Greater Noida, India, 12-13 August 2017, 1-4.

[39] Munir M. E., Altaf A. ve Hasnain M., Miniaturization of microstrip fractal H-shape patch antenna using stack configuration for wireless applications, 2015 *IEEE 2nd International Conference on Recent Trends in Information Systems (ReTIS)*, Kolkata, India, 9-11 July 2015, 44-48.

[40] Fallahpour M. ve Zoughi R. Antenna Miniaturization Techniques: A Review of Topology- and Material-Based Methods, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2018, **60**(1), 38-50.

[41] Mosallaei H. ve Sarabandi K., Magneto-Dielectrics in Electromagnetics: Concept and Applications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **52**(6), 2004, 1558-1567.

[42] Sarabandi K., Azadegan R., Mosallaei H. ve Harvey J., Antenna Miniaturization Techniques for Applications in Compact Wireless Transceivers, *XXVIIth General Assembly of URSI*, Maastricht, The Netherlands, 2002, 17-24.

[43] Rakholiya A. A. ve Langhnoja N. V., A review on miniaturization techniques for microstrip patch antenna, *IJARIIE*, 2017, **3**(2), 4281-4287.

[44] Baena J. D. ve diğ., Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, **53**(4), 1451-1461.

[45] Paul P. M. ve diğ., Miniaturization of Square Patch Antenna using Complementary Split Ring Resonators, *2013 Third International Conference on Advances in Computing and Communications*, 122-125.

[46] Bilotti F., Toscano A. ve Vegni L., Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, **55**(8), 2258-2267.

[47] Garg C. ve Kaur M., A Review of Defected Ground Structure (DGS) in Microwave Design, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, *Instrumentation and Control Engineering*, 2014, **2**(3), 1285-1290.

[48] Feresidis A. P., Apostolopoulos G., Goussetis G. ve Vardaxoglou J. C., Miniaturised Metallodielectric EBG structures, *IEEE International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Torino, Italy, 2003, 671-674.

[49] Zhang X. ve Zhu L., Gain-Enhanced Patch Antennas with Loading of Shorting Pins, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, **64**(8), 3310-3318.

[50] Porath R., Theory of Miniaturized Shorting-Post Microstrip Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, **48**(1), 41-47.

[51] Saravanan S. V. ve Sindhuja S., Miniaturisation Using Shorting Posts in C-Shaped and H-Shaped Microstrip Patch Antennas for GPS Applications, *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2019, **7**(5S2), 4-8.

[52] Arya A. K., Kartikeyan V. M. ve Patnaik A., Defected Ground Structure in the perspective of Microstrip Antennas: A Review, *Frequenz-Berlin*, 2010, **64**(5-6), 79-84.

[53] Lim J. ve diğ., Size-Reduction and Harmonic-Rejection of Microwave Amplifiers using Spiral-Defected Ground Structure, *2003 33rd European Microwave Conference*, Munich, Germany, 2003, 1421-1424.

[54] Sung Y. J., Kim M., ve Kim Y. S., Harmonics Reduction with Defected Ground Structure for a Microstrip Patch Antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2003, **2**, 11-113.

[55] Liu H., Li Z. ve Sun X., Compact defected ground structure in microstrip technology, *in Electronics Letters*, 2005, **41**(3), 132-134.

[56] PARUI S. K. ve DAS S., A New Defected Ground Structure for Different Microstrip Circuit Applications, *Radio engineering*, 2007, **16**(1), 16-22.

[57] Weng H. L., Guo C. Y., Shi W. X., ve Chen Q. X., An Overview on Defected Ground Structure, *Progress in Electromagnetics Research B*, 2008, **7**, 173-189.

[58] Liu C. J. ve Lin C. H., Complementary Split Ring Resonators with Dual Mesh-Shaped Couplings and Defected Ground Structures for Wide Passband and Stopband BPF Design, *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, **10**, 19-28.

[59] Oskouei H. D., Forooraghi K. ve Hakkak M., Radiation Characteristics of a Microstrip Patch Antenna over a Periodic Defected Ground Structure Substrate, *Electromagnetics*, 2009, **29**, 24-30.

[60] Singh G., Rajni ve Momi R. S., Microstrip Patch Antenna with Defected Ground Structure for Bandwidth Enhancement, *International Journal of Computer Applications*, 2013, **73**(9), 14-17.

[61] Gupta B. K. ve Mishra S., Analysis of Circular Disc Antenna Using Defective Ground Plane, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, **3**(10), 133-135.

[62] Khan M. T. ve diğ., An Overview of Defected Ground Structure with Practical Application of Defected Ground Structure Bandpass Filter in Energy Harvester Circuit, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2014, **8**(7), 837-843.

[63] Polater A. M. ve Nesimoglu T., Impact of defected ground structures on the bandwidth of branch line hybrids, *2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Lecce, 2015, 1-4.

[64] Nirala K. R., An Overview on Defected Ground Structure in Aspect of Microstrip Patch Antenna, *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2018, **6**(1), 31-34.

[65] Varshney S., Barahdiya U. ve Khare S. S., Microstrip Circuit Design Using Defected Ground, *International Journal of Recent Research Aspects*, 2016, **3**(2), 174-178.

[66] Roy M. S., Karmakar C. N. ve Balbin I., Quasi-Static Modeling of Defected Ground Structure, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique*, **54**(5), 2006, 2160-2168.

[67] Joler M. ve Kucan J., Impact of Slot Parameters on The Three Resonant Frequencies of a Rectangular Microstrip Antenna, *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, **57**(4), 2015, 48-63.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **ASSOUMANA A.** ve Çakir G., Complementary Split Ring Resonators (CSRRs) based Miniaturised and Defected Ground Structure (DGS) based Extended Bandwidth Circular Patch Antenna for 5G Terminals, *International Congress of Academic Research (icar congress 2)*, Bolu, Turkey, 17-18-19 February 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Togo'nun Dapaong şehrinde doğdu. Lise öğrenimini Lycée Nassablé Dapaong'da tamamladı. 2012-2017, Lisans öğrenimini, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2017 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.