

**WLAN/WiMAX UYGULAMALARI İÇİN  
KOMPAKT MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI  
VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**MUSTAFA BERKAN BİÇER**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MERSİN  
KASIM – 2011**

**WLAN/WiMAX UYGULAMALARI İÇİN  
KOMPAKT MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI  
VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**MUSTAFA BERKAN BİÇER**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

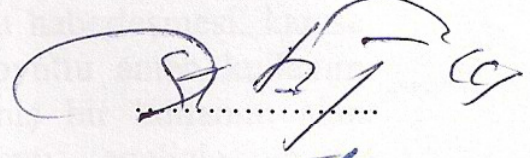
**Danışman  
Doç. Dr. Ali AKDAĞLI**

**MERSİN  
KASIM – 2011**

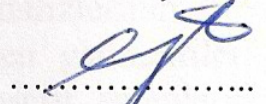
Mustafa Berkan BİÇER tarafından Doç. Dr. Ali AKDAĞLI danışmanlığında hazırlanan “WLAN/WiMAX Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

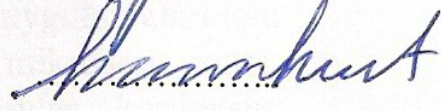
Doç. Dr. Ali AKDAĞLI (Danışman)



Prof. Dr. Caner ÖZDEMİR



Doç. Dr. Kasım KURT



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 20/01/2012 tarih ve 2012.2/67 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. ~~A. Murat GİZİR~~  
Enstitü Müdürü



## **WLAN/WiMAX UYGULAMALARI İÇİN KOMPAKT MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Mustafa Berkan BİÇER**

### **ÖZ**

Mikroşerit antenler küçük boyut, düzlemsel konfigürasyon, düşük maliyet, uyarlanabilir yapı, kolay üretim ve katıhal aygıtları ile bütünleşebilme gibi avantajlarından dolayı kişisel iletişim sistemleri, mobil uydu haberleşmesi, karasal televizyon yayını, kablosuz yerel alan ağları ve küçük boyutlu anten kullanımı gerektiren diğer minyatürize mikrodalga sistemlerinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Literatürde sunulan çalışmaların büyük kısmı, analizlerinin ve tasarımlarının kolay olmasından dolayı dikkörtgen, daire ve üçgen geometrileri üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak, düzgün geometrilere sahip mikroşerit antenlerin boyutları, ultra yüksek frekans (Ultra High Frequency, UHF) bandı uygulamaları için göreceli olarak büyüktürler. Bundan dolayı, yukarıda verilen mikroşerit anten şekilleri, bu frekanslar için modifiye edilmelidir. Mobil telefonlar, kordonsuz telefonlar, kablosuz yerel alan ağları (Wireless Local Area Network, WLAN), global konumlandırma sistemleri (Global Positioning Systems, GPS) ve diğer yeni jenerasyon kablosuz cihaz uygulamalarında anten boyutu büyük bir öneme sahiptir. Bu yüzden anten boyutunun küçültülmesi için kompakt mikroşerit antenler (KMA) önerilmiştir. KMA'lar, bilinen mikroşerit antenlere göre, aynı boyutlar için daha küçük rezonans frekansı veya aynı rezonans frekansı için daha küçük anten boyutu sağlayabilmektedir. Teknolojinin büyük bir hızla gelişmesi ile haberleşme cihazlarının küçülmesi, o cihazların sahip oldukları antenlerin de küçülmesini gerektirmiştir. Ayrıca, birden çok uygulamayı (GPS, GSM, WLAN) tek bir cihaz ile sağlama isteği, farklı frekanslarda çalışan bu tür uygulamalara cevap verecek tek bir anten ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Söz gelimi, cep telefonları ile görüşme yapılırken internete girilebilmekte, GPS aracılığı ile konum belirlenebilmektedir. Ancak bu işlemler, 3 farklı anten ile gerçekleştirilebilmektedir. Günlük hayatta kullanılan cihazlar, birden fazla işlemi gerçekleştirirken aynı zamanda birden fazla antene ihtiyaç duymaktadır. Bu tez çalışmasında, WLAN ve WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) uygulamaları için tek bir KMA tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen antenin ölçümleri yapılarak benzetim sonuçları ile karşılaştırılmış, gerçekleştirilen antenin WLAN ve WiMAX uygulamalarında iyi bir performans ile çalıştığı gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikroşerit Anten, Kompakt Mikroşerit Anten, WLAN, WiMAX, Mikroşerit Anten Tasarımı

**Danışman:** Doç. Dr. Ali AKDAĞLI, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Mersin Üniversitesi

## **COMPACT MICROSTRIP ANTENNA DESIGN AND FABRICATION FOR WLAN/WiMAX APPLICATIONS**

**Mustafa Berkan BİÇER**

### **ABSTRACT**

Due to attractive features such as small size, planar configuration, low cost, conformal shaping, simplicity of manufacturing and easy integration to solid state devices, microstrip antennas have been widely implemented in many applications such as personal communication systems (PCS), mobile satellite communications (MSC), direct broadcast satellite (DBS), wireless local area networks (WLANs) and other miniaturized systems that demand small sized antennas. Most of the studies for patch antenna presented in the literature have concentrated on rectangular, triangular and circular microstrip antennas because of easy in analysis and design. However, the size of regularly shaped microstrip antennas is relatively large for ultra-high frequency (UHF) band applications. Hence, microstrip antenna shapes given above need to be modified at these frequencies. Size of the antenna has a great importance for the applications such as mobile cellular handsets, cordless phones, WLANs, global positioning systems (GPS) and other next generation wireless systems. Therefore, compact microstrip antennas (CMAs) are proposed for a reduction in antenna size. As compared to conventional microstrip antennas, CMAs are able to provide a decrease in frequency for the same antenna size or reduction in size operate at same frequency. With the rapid development in technology, the size reduction in communication devices results in a size reduction in their antennas as well. Besides, demand for providing a lot of application (GPS, GSM, WLAN) with a single device causes a single antenna which meets these kinds of applications operating at different frequencies. For example, internet can be used during interviews with mobile phones, and also location can be determined with the use of GPS. However, these processes can be performed with 3 different antennas. Devices used in daily life require more than one antenna when performing multiple operations. In this thesis, a single CMA for WLAN and WiMAX applications has designed and fabricated. The fabricated antenna has measured and the measurement results compared with simulation results. It is shown that the designed and fabricated antenna works with a good performance in WLAN and WiMAX applications.

**Keywords:** Microstrip Antenna, Compact Microstrip Antenna, WLAN, WiMAX, Microstrip Antenna Design

**Advisor:** Assoc. Prof. Dr. Ali AKDAGLI, Department of Electrical and Electronics Engineering, Mersin University

## **TEŞEKKÜR**

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini eksik etmeyen aileme ve yüksek lisans eğitimim süresince, çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, desteğini esirgemeyen danışmanım sayın Doç. Dr. Ali AKDAĞLI'ya teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZ</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>EKLER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
2.1. KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİ .....	5
2.1.1. Kablosuz Yerel Alan Ağı (Wireless Local Area Network, WLAN) .....	5
2.1.2. Mikrodalga Erişim ile Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX).....	7
2.2. ANTENLER .....	9
2.3. MİKROŞERİT ANTENLER.....	11
2.3.1. Mikroşerit Antenlerin Genel Yapısı.....	12
2.3.2. Mikroşerit Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	12
2.3.3. Mikroşerit Anten Çeşitleri .....	13
2.3.3.1. Mikroşerit yama antenler .....	13
2.3.3.2. Mikroşerit slot (yarık) antenler .....	15
2.3.3.3. Mikroşerit dipol antenler .....	15
2.3.3.4. Mikroşerit yürüyen dalga antenler .....	16
2.3.4. Mikroşerit Anten Besleme Çeşitleri.....	17
2.3.4.1. Mikroşerit besleme .....	18
2.3.4.2. Koaksiyel besleme.....	20
2.3.4.3. Açıklık kuplajlı besleme .....	22
2.3.4.4. Yakınlık (elektromanyetik) kuplajlı besleme .....	24
2.3.4.5. Eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemesi.....	25
2.3.5. Mikroşerit Antenlerin Önemli Parametreleri.....	27
2.3.5.1. Geri dönüş kaybı .....	27
2.3.5.2. Gerilim duran dalga oranı (voltage standing wave ratio, VSWR).....	28
2.3.5.3. Yönlülük ve kazanç .....	28
2.3.5.4. Verim ve kalite faktörü.....	29
2.3.5.5. Bant genişliği .....	31
2.3.6. Mikroşerit Anten Analiz Yöntemleri .....	31
2.3.6.1. İletim hattı modeli (transmission line model, TLM).....	31
2.3.6.2. Boşluk modeli (cavity model).....	35

2.4. KOMPAKT MİKROŞERİT ANTENLER.....	39
2.4.1. C Şekilli KMA (CKMA) .....	39
2.4.2. H Şekilli KMA (HKMA).....	44
<b>3. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>48</b>
3.1. CST .....	48
3.2. IE3D .....	48
3.3. MATLAB .....	49
3.4. ANTEN TASARIMI.....	49
3.4.1. Yama Parametrelerinin Seçilmesi .....	49
3.4.2. WLAN/WiMAX Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı .....	50
3.4.2.1. Tasarlanan antenin benzetim sonuçları .....	56
<i>Geri dönüş kaybı grafiği</i> .....	56
<i>VSWR grafiği</i> .....	57
<i>Akım dağılımı grafikleri</i> .....	57
<i>Işıma diyagramları</i> .....	58
3.5. WLAN/WiMAX UYGULAMALARI İÇİN ANTEN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ .....	62
3.5.1. Antenin Ölçülmesi .....	62
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>64</b>
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>65</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>67</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>71</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ.....</b>	<b>96</b>



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Mikroşerit antenlerin karşılaştırılması.....	17
Çizelge 2.2. Çeşitli türlerdeki besleme yapılarının karşılaştırılması .....	27
Çizelge 2.3. Benzetimi yapılan CKMA'ya ait fiziksel ve elektriksel parametreler.....	41
Çizelge 2.4. C şekilli KMA için benzetim ve hesaplama sonucu elde edilen rezonans frekansı sonuçlarının karşılaştırması.....	41
Çizelge 2.5. C şekilli KMA için benzetim ve hesaplama sonucu elde edilen rezonans frekansı sonuçlarının karşılaştırması.....	42
Çizelge 2.6. Gerçekleştirilen CKMA'nın ölçüm sonuçları ile benzetim ve hesaplama sonuçlarının karşılaştırması.....	44
Çizelge 2.7. Benzetimi yapılan HKMA'ların fiziksel ve elektriksel parametreleri.....	45
Çizelge 2.8. HKMA için benzetim ve hesaplama sonucu elde edilen rezonans frekansı sonuçlarının karşılaştırması .....	46
Çizelge 3.1. Tasarlanan antenin ölçüleri (mm) .....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Işıma yapan bir sistem.....	9
Şekil 2.2. İletim modundaki bir antenin iletim hattının Thevenin eşdeğer modeli .....	10
Şekil 2.3. Tel anten konfigürasyonları.....	10
Şekil 2.4. Mikroşerit anten konfigürasyonları.....	11
Şekil 2.5. Bir DMA'nın genel yapısı .....	12
Şekil 2.6. Bazı mikroşerit yama anten geometrileri .....	14
Şekil 2.7. Bir dikdörtgen mikroşerit yama antenin ışırma mekanizması .....	14
Şekil 2.8. Bazı mikroşerit slot anten geometrileri .....	15
Şekil 2.9. Mikroşerit dipol anten .....	16
Şekil 2.10. Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri .....	16
Şekil 2.11. Yama anten ile mikroşerit besleme hattı ara yüzündeki $H_{teğel}$ 'in, eşdeğer akım yoğunluğu $J_z$ ile gösterimi .....	18
Şekil 2.12. (a) Işıma yapan kenardan mikroşerit besleme ve (b) eşdeğer devresi .....	18
Şekil 2.13. (a) Boşluk kuplajlı mikroşerit besleme ve (b) eşdeğer devresi.....	19
Şekil 2.14. (a) Işıma yapan kenardan mikroşerit inset besleme ve (b) eşdeğer devresi .....	19
Şekil 2.15. (a) Işıma yapmayan kenardan mikroşerit besleme ve (b) eşdeğer devresi .....	20
Şekil 2.16. Koaksiyel besleme yapılmış mikroşerit anten .....	21
Şekil 2.17. Prop indüktansının kompanze edilmesi için iletken yamada slot açılmış anten.....	22
Şekil 2.18. Yama empedansının elektromanyetik kuplaj yoluyla dönüştürülmesi .....	22
Şekil 2.19. Açıklık kuplajlı mikroşerit anten katmanları.....	23
Şekil 2.20. (a) Açıklık kuplajlı mikroşerit beslemeli anten ve (b) eşdeğer devresi .....	23
Şekil 2.21. Yakınlık kuplajlı mikroşerit anten katmanları .....	24
Şekil 2.22. Yakınlık kuplajlı mikroşerit besleme .....	25
Şekil 2.23. Eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemeli mikroşerit anten.....	26
Şekil 2.24. İletim hattı.....	32
Şekil 2.25. İletim hattı modeli .....	32
Şekil 2.26. İletim hattı modeline göre bir mikroşerit antende elektrik alan çizgileri.....	33
Şekil 2.27. Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen mikroşerit anten .....	33
Şekil 2.28. (a) Mikroşerit antenin kenar uzaması ve (b) elektrik alan çizgileri .....	34
Şekil 2.29. Mikroşerit yama antenin manyetik duvar modeli .....	36
Şekil 2.30. Mikroşerit antende yük dağılımı ve akım yoğunluğu .....	36
Şekil 2.31. (a) Harf benzeri şekilli KMA geometrileri (b) slot KMA geometrileri .....	39
Şekil 2.32. C şekilli KMA (CKMA).....	40
Şekil 2.33. Gerçekleştirilen CKMA'nın fotoğrafı .....	43

Şekil 2.34. Gerçekleştirilen CKMA'nın benzetim ve ölçüm geri dönüş kaybı grafiği .....	43
Şekil 2.35. H şekilli KMA (HKMA) .....	44
Şekil 2.36. Gerçekleştirilen HKMA fotoğrafı .....	45
Şekil 3.1. Tasarlanan anten .....	51
Şekil 3.2. 5.2 GHz – 6 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı .....	52
Şekil 3.3. 5.2 GHz – 6 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu .....	52
Şekil 3.4. 3.5 – 3.7 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı .....	53
Şekil 3.5. 3.5 – 3.7 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu .....	53
Şekil 3.6. 2.4 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı .....	54
Şekil 3.7. 2.4 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu .....	54
Şekil 3.8. 2.5 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı .....	55
Şekil 3.9. 2.5 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu .....	55
Şekil 3.10. Tasarlanan antenin benzetim sonucu .....	56
Şekil 3.11. Tasarlanan antenin VSWR grafiği .....	57
Şekil 3.12. Tasarlanan antenin akım yoğunluğu grafikleri .....	58
Şekil 3.13. $\theta=90^\circ$ için $E_\phi$ .....	59
Şekil 3.14. $\phi=0^\circ$ için $E_\theta$ .....	60
Şekil 3.15. $\phi=90^\circ$ için $E_\theta$ .....	61
Şekil 3.16. Gerçekleştirilen antenin fotoğrafı .....	62
Şekil 3.17. Anten ölçüm düzeneği .....	63
Şekil 4.1. Gerçekleştirilen antenin benzetim ve ölçüm sonuçları .....	64
Şekil 4.2. Işıma elemanı ile toprak düzlemi arasındaki boşluğun, antenin performansına etkisi .....	65
Şekil E1.1. Temel parametrelerin ayarlanması .....	71
Şekil E1.2. Sonsuz toprak düzlemi bilgileri .....	72
Şekil E1.3. Sonlu toprak düzlemi bilgileri .....	73
Şekil E1.4. Sonlu altaş bilgileri .....	73
Şekil E1.5. Sonlu altaş düzleminin tanımlanmasından sonra görülen temel parametreler .....	74
Şekil E1.6. IE3D elektromanyetik benzetim programının ana penceresi .....	75
Şekil E1.7. Tasarlanan antenin iki boyutlu görünümü .....	75
Şekil E1.8. Antende beslemenin oluşturulması .....	76
Şekil E1.9. Izgaralama ayarları .....	77
Şekil E1.10. Izgaralama işlemi sonrası bilgi ekranı .....	78
Şekil E1.11. Izgaralama işlemi sonrası antenin iki boyutlu görünümü .....	78
Şekil E1.12. Benzetim ayarlarının yapılması .....	79
Şekil E1.13. Hesaplamaların yapılacağı frekans aralığı bilgileri .....	80
Şekil E1.14. Simülasyon ayarları penceresi .....	81
Şekil E1.15. Grafik tanımlama penceresi .....	81
Şekil E1.16. Geri dönüş kaybı parametresinin seçimi .....	82
Şekil E1.17. Geri dönüş kaybı parametresi grafiği için bilgi seçimi .....	82
Şekil E1.18. Grafiğin tanımlanmasından sonraki ekran görüntüsü .....	83
Şekil E1.19. Benzetim işlemi ile ilgili bilgilerin görülmesi .....	84

Şekil E1.20. Benzetim işlemi sonrası geri dönüş kaybı grafiği.....	84
Şekil E2.1. CST programı ile yeni proje oluşturulması .....	85
Şekil E2.2. Proje şablonu seçimi .....	86
Şekil E2.3. 3 boyutlu tasarım ekranı.....	87
Şekil E2.4. Tasarımı yapılan anten görüntüsü.....	87
Şekil E2.5. Anten beslemesini sağlayan dalga portu görünümü .....	88
Şekil E2.6. Dalga portu ile beslenmiş anten.....	89
Şekil E2.7. Benzetim ayarları.....	89
Şekil E2.8. Benzetimi yapılacak anten için belirlenen frekans aralığında nokta sayısı seçimi.....	90
Şekil E2.9. Benzetim sonrası ekran görüntüsü.....	91
Şekil E2.10. Benzetim sonucu elde edilen geri dönüş kaybı grafiği .....	91
Şekil E2.11. Benzetimi yapılan anten için E-Alanı gösterimi.....	92
Şekil E2.12. Benzetimi yapılan anten için yüzey akımları gösterimi.....	92
Şekil E2.13. Benzetimi yapılan anten için üç boyutlu ışın diyagramı gösterimi.....	93
Şekil E2.14. Benzetimi yapılan anten için iki boyutlu ışın diyagramı.....	93
Şekil E3.1. Ölçüm ortamı ve düzeni .....	94
Şekil E3.2. Ölçüm sırasındaki network analizör ekranı.....	94
Şekil E3.3. Network analizörü ekranında geri dönüş kaybı sonucu .....	95

## **EKLER DİZİNİ**

	<b><u>Sayfa</u></b>
EK 1. IE3D Programı ile Anten Tasarımı ve Benzetimi .....	71
EK 2. CST Programı ile Anten Tasarımı ve Benzetimi.....	85
EK 3. Antende Ölçüm İşlemi .....	94

## **SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ**

WLAN	: Wireless Local Area Network, Kablosuz Yerel Alan Ağı
WiMAX	: Worldwide Interoperability for Microwave Access, Mikrodalga Erişimi ile Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik
MA	: Mikroşerit anten
DMA	: Dikdörtgen mikroşerit anten
KMA	: Kompakt mikroşerit anten
CKMA	: C şekilli kompakt mikroşerit anten
HKMA	: H şekilli kompakt mikroşerit anten
$L$	: Mikroşerit antenin ışıma iletkeninin uzunluğu
$W$	: Mikroşerit antenin ışıma iletkeninin genişliği
$l_s$	: CKMA'nın ışıma iletkeninin slot uzunluğu
$w_s$	: CKMA'nın ışıma iletkeninin slot genişliği
$d$	: HKMA'nın ışıma iletkeninin slot uzunluğu
$s$	: HKMA'nın ışıma iletkeninin slot genişliği
$t$	: Işıma iletkeninin kalınlığı
$h$	: Alttaş kalınlığı
$\epsilon, \epsilon_r, \epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$	: Alttaşın dielektrik sabiti
$\epsilon_{eff}, \epsilon_{reff}$	: Etkin dielektrik sabiti
$L_{eff}$	: Etkin uzunluk
$\lambda$	: Dalga boyu
$\lambda_d$	: Alttaş içerisinde yayılan dalganın dalga boyu
$\lambda_0$	: Serbest uzay dalga boyu
$f$	: Frekans
$\Delta L$	: Antende elektriksel uzama
$f_r$	: Rezonans frekansı
$f_s$	: Benzetim sonucunda bulunan rezonans frekansı
$f_c$	: Hesaplama sonucunda bulunan rezonans frekansı
$D$	: Anten yönlülüğü
$e$	: Anten verimliliği
$\tan\delta$	: Alttaşın kayıp tanjantı

E	: Elektrik alan şiddeti
H	: Manyetik alan şiddeti
FDTD	: Zaman domeninde sonlu farklar metodu
MoM	: Moment metodu
XFDTD	: FDTD yöntemini kullanan benzetim programı
IE3D	: MoM yöntemini kullanan benzetim programı
CST	: Hibrid yöntemler kullanan benzetim programı

## **1. GİRİŞ**

Teknolojinin büyük bir ivme ile gelişmesi, kişisel iletişim sistemleri (Personal Communication Systems, PCS), mobil uydu iletişimi (Mobile Satellite Communications, MSC), kablosuz yerel ağlar (Wireless Local Area Network, WLAN) ve diğer birçok kablosuz ve taşınabilir iletişim sistemlerinin boyutlarının küçülmesini sağlamıştır. Ayrıca, birden fazla cihaz ile yapılabilecek işlerin tek bir cihazla yapılabilmesi gibi gereksinimleri ortaya çıkarmıştır. Bu durum, küçük boyutlara sahip ve birkaç farklı uygulamada çalışabilecek bir anten ihtiyacını gerekli kılmaktadır.

Mikroşerit antenler küçük boyut, düzlemsel konfigürasyon, düşük maliyet, uyarlanabilir yapı, kolay üretim ve katıhal aygıtları ile bütünleşebilme gibi birçok avantajlarından dolayı kişisel iletişim sistemleri, mobil uydu haberleşmesi, karasal televizyon yayını, kablosuz yerel alan ağları ve küçük boyutlu anten kullanımı gerektiren diğer minyatür mikrodalga sistemlerinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [1-4]. Bu avantajlarının yanında dar bant genişliği ve düşük güçlerde kullanılabilme gibi bazı dezavantajları da mevcuttur. Mikroşerit anten alanında literatürde mevcut çalışmaların çoğu daire, üçgen ve dikdörtgen gibi bilinen geometriler üzerinde yoğunlaşmıştır. Ultra yüksek frekans (Ultra High Frequency, UHF) bandında çalışan uygulamalar için bilinen geometrilere sahip mikroşerit antenlerin boyutları nispeten büyüktür. Bu frekanslarda çalışan mikroşerit antenlere göre daha küçük boyutlara sahip antenlere olan ihtiyaçtan dolayı, bilinen geometrilere sahip mikroşerit antenlerin iletken (yama ve toprak) kısımlarında modifikasyonlar yapılarak kompakt mikroşerit anten (KMA) önerilmiştir [1-22]. Bu yöntem ile aynı rezonans frekansı için KMA'nın iletken yama boyutu, mikroşerit antenin iletken yama boyutuna göre önemli oranda küçülmektedir. Anten boyutundaki bu küçülme ile birlikte verim ve bant genişliği performanslarında da düşüş olabilmektedir [1-4]. Daire, üçgen ve dikdörtgen gibi bilinen geometrilere sahip mikroşerit antenler, boşluk modeli (Cavity Model) [1-4] ve transmisyon hattı modeli (Transmission Line Model, TLM) [23] gibi yöntemlerle analitik olarak analiz edilebilmektedir. Mikroşerit antenlerin analizinde kullanılabilen bu analitik yöntemler, geometrilerinin düzgün olmamasından dolayı KMA'ların analizinde kullanılamamaktadır. Bu nedenle KMA'ların analiz ve tasarımında, genellikle, MoM



(Method of Moment) [24] ve FDTD (Finite Difference Time Domain) [25] gibi nümerik hesaplama yöntemlerine dayalı elektromanyetik benzetim programları kullanılmaktadır.

Literatürde C, E, H, L gibi çeşitli geometrilere sahip KMA tasarımları yer almaktadır [17-22]. Bu KMA'lar, baskın modda ( $TM_{10}$ ) ışınımı sağlayan iletken yamanın ışınım yapmayan kenarlarında C, E, H, L gibi harflere benzeyecek şekilde slotlar (yarık) açılması ile yapılmaktadır. KMA'lar, aynı boyutlar için daha küçük rezonans frekansı veya aynı rezonans frekansı için daha küçük bir anten elde edilmesini sağlamaktadır.

WLAN teknolojisi, standartları IEEE 802.11 ile belirlenmiş bir kablosuz ağ teknolojisidir. Kablosuz olmasının yanı sıra yüksek hızlarda haberleşmeye imkan vermesi, bilgisayardan cep telefonuna, fotoğraf makinelerinden yazıcılara birçok alanda gündelik hayattaki yerini almasını sağlamıştır. Kablo karmaşasını ortadan kaldırması, evlerde ve iş yerlerinde, WLAN kullanımını artıran nedenlerin başında gelmektedir. WLAN için 2.4 GHz, 3.7 GHz ve 5 GHz frekansları, IEEE 802.11 ile standartlaşmıştır ve birçok ülke tarafından lisanslanarak kullanılmaktadır. Ancak 3.7 GHz frekansı, 2009 yılı itibariyle sadece Amerika tarafından lisanslanmıştır [26].

Belirli mesafelerde (10 – 100 m) iletişime olanak sağlayan WLAN yerine daha geniş alanlarda, örneğin bir şehir merkezinde, kablosuz iletişim sağlama düşüncesi, mikrodalga erişim ile dünya çapında birlikte çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) teknolojisinin temelini oluşturmuştur. Bu düşünce, standartları IEEE 802.16 ile belirlenmiş olan WiMAX teknolojisinin ortaya atılmasını sağlamıştır. WiMAX, WLAN teknolojisine göre daha yavaş olmakla birlikte daha geniş alanlarda kablosuz iletişime olanak sağlayan ve dünyada birçok ülkede kullanılmaya başlanan, gün geçtikçe kullanımı yaygınlaşan bir teknolojidir [27]. Geniş bir frekans aralığına sahiptir ve WLAN'da olduğu gibi kesin frekanslara sahip değildir. Ancak ülkeler 2.5 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekanslarını benimseyerek kullanmaktadırlar. Bu frekanslar dışında farklı frekans aralıklarını kullanan ülkeler de mevcuttur [28].

Literatürde, WLAN ve WiMAX uygulamalarında çalışabilecek tek bir KMA tasarımı konusunda yapılan çalışma sayısı, bu uygulamalar için ayrı ayrı yapılan çalışmalara oranla çok daha azdır [5-14]. Bu tez çalışmasında, WLAN ve

WiMAX uygulamalarında çalışabilecek tek bir KMA tasarlanması ve gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Birinci bölümde, WLAN/WiMAX uygulamaları için literatürde yer alan çalışmalar ile ilgili özet bilgiler verilecektir. İkinci bölümde kablosuz iletişim teknolojileri, mikroşerit antenler ve KMA'lar ile ilgili bilgiler anlatılacaktır. Üçüncü bölümde, bu çalışmanın konusunu oluşturan, WLAN için 2.4 GHz, 3.7 GHz ve 5.2 GHz frekanslarında ve WiMAX için 2.5 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekanslarında çalışan bir KMA tasarımının ve benzetiminin yapılmasından ve bu KMA'nın gerçekleştirilerek ölçülmesinden bahsedilecektir. Dördüncü bölümde bulgulara yer verilerek elde edilen veriler yorumlanacaktır. Son bölümde ise, tez çalışması ile ilgili genel değerlendirmeler yapılacaktır.

## **2. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

Literatürde, WLAN/WiMAX uygulamaları için farklı geometrik şekillere ve birbirilerine göre avantaj ve dezavantajlara sahip çok sayıda KMA tasarımı mevcuttur [5-14]. Dikdörtgen halka monopol ve dikdörtgen monopol yapı kullanılarak, WLAN ve WiMAX bantlarında çalışmak üzere tasarlanmış olan kompakt dual-geniş bant anten çalışması sunulmuştur [5]. Düzlemsel dalga kılavuzu beslemesi kullanılarak tasarlanan bu antenin -10 dB bant genişlikleri, 2.36 – 3.78 GHz arası %46.3 ve 5.1 – 7 GHz arası %31.4 olmaktadır.

WLAN/WiMAX uygulamaları için tasarlanan bir diğer anten, 3 şeritli yapı kullanarak oluşturulmuş kompakt monopol anten tasarımıdır [6]. Şerit boyutlarının uygun seçilmesiyle 2.46/3.6/5.3 GHz frekanslarında -10 dB'den daha düşük frekans cevabı elde edilmektedir.

Işıma düzlemi beşgen geometriye sahip, eş düzlemlili dalga kılavuzu beslemeli yapı temel alınarak oluşturulan slotlu üç bantlı anten tasarımı literatürde yer almaktadır [7]. Slotların oluşturulması, antenin üç bantlı karakteristik göstermesini sağlamaktadır.

WLAN/WiMAX uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan antenlerden biri, kısa devre edilmiş metal düzlemsel dipol yapı kullanan geniş bantlı anten tasarımıdır [8]. Anten geometrisi, L harfine benzer şekildedir.

Bir diğer çalışma, 2.14-2.85, 3.29-4.08 ve 5.02-6.09 GHz frekanslarında çalışan 3 bantlı düzlemsel dalga kılavuzu beslemeli, temelde beşgen bir anten geometrisi üzerinde slot açılarak tasarlanan düzlemsel monopol anten tasarımıdır [9]. Açılan slotların pozisyonlarının ve boyutlarının dikkatli seçilmesi, antenin iyi bir bant durdurma performansı sergilemesini sağlamaktadır.

Ultra geniş bant (Ultra Wide Band, UWB) ve WLAN bantları için modifiye edilmiş mikroşerit beslemeli iki adımlı konik monopol anten tasarımı literatürde mevcuttur [10]. Bu anten tasarımı, konik geometrinin ve toprak düzleminin modifiye edilmesi ile oluşturulmuştur. Geniş bant performansı göstermektedir. 5.2/5.8 GHz WLAN ve 5.5 GHz WiMAX bandı, antenin çalıştığı frekans aralığında yer almaktadır.

Literatürde, eşkenar dörtgen biçiminde Minkowski fraktal geometrisinde oluşturulan ve 1.85-1.99 GHz (PCS), 1.92-2.17 GHz (Universal Mobile

Telecommunications System, UMTS), 2.4-2.484 GHz (WLAN) ve 5.15-5.35/5.725-5.825 GHz (WiMAX) frekanslarında çalışabilen mikroşerit yama monopol anten yer almaktadır [11]. Toprak düzlemi, yüksek frekans ışımaya performansı ve giriş empedansı bant genişliğini iyileştirmek için modifiye edilmiştir.

Bir diğer çalışma, WLAN, WiMAX ve Bluetooth uygulamalarında kullanılmak üzere yapılan KMA tasarımıdır [12]. Koaksiyel hat ile beslenen bu anten, kompakt bir döngü tipi tasarıma sahiptir. 2.26 – 2.76 GHz frekans bandında %19.9 ve 4.03 – 6.4 GHz frekans bandında %45.6 bant genişliğine sahiptir. Ölçülen en yüksek kazanç, 5.35 GHz frekansında 6.41 dBi'dir.

Bu çalışmalara ek olarak 3G/WLAN/WiMAX ve UWB uygulamalarında kullanılmak üzere düşük maliyetli MA tasarımı [13], LTE (Long Term Evolution) / GSM850 / GSM900 / PCS1900 / WiMAX / WLAN uygulamaları için dahili mobil anten tasarımı [14] mevcuttur.

Literatürde mikroşerit antenler konusunda yer alan çalışmalar incelendiğinde, WLAN ve WiMAX uygulamaları için kullanılacak tek bir anten üzerinde yapılan çalışma sayısı, diğer çalışmalara oranla oldukça azdır. Bu konuda ülkemizde yapılan çalışmalar ise dünyada yapılmış olan çalışmalara oranla daha azdır.

## **2.1. KABLOSUZ İLETİŞİM TEKNOLOJİLERİ**

### **2.1.1. Kablosuz Yerel Alan Ağı (Wireless Local Area Network, WLAN)**

WLAN, standartları IEEE 802.11 ile belirlenmiş olan ve 30 – 300 metre aralığındaki mesafelerde yerel alan ağı kurarak, iki yönlü kablosuz haberleşme sağlayan bir teknolojidir [26]. Yüksek veri aktarım hızı, dünya çapında yaygın olma ve ağ yapılarına kolayca uygulanabilme ve kablosuz iletişim kurma gibi avantajlara sahiptir. Kablosuz olmasının getirdiği avantaj, günümüzde cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar, bazı fotoğraf makineleri ve yazıcılar gibi WLAN teknolojisini kullanan cihazların hayatın her alanında yer almasını sağlamıştır. Üçüncü nesil (3G) iletişim sistemlerine göre daha yüksek haberleşme hızına sahip olan WLAN, ayrıca daha iyi servis kalitesi sağlamaktadır. WLAN, taşıyıcı dinleyen çoklu erişim (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) tekniğini kullanmaktadır. Bu teknik, veri aktarımına ciddi bir yük getirmekle birlikte güvenilir veri aktarımını sağlamaktadır.

WLAN teknolojisinin standartlarını belirleyen IEEE 802.11 standardı, 1990 yılında Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) tarafından çalışmalarına başlanan ve ilk sürümü 1997 yılında yayınlanan uluslararası bir standarttır. 2.4 GHz frekans bandını kullanan standart, yaklaşık 75 metre mesafede en fazla 2 Mbps hızında haberleşmeyi desteklemektedir. Aynı frekans bandını bluetooth ve mikrodalga fırınlar gibi aygıtlar da kullandığı için, çeşitli sorunlarla karşılaşmak mümkündür. 1999 yılında 3.7 GHz ve 5 GHz frekans bantlarında, daha geniş bir alanda haberleşmeyi sağlayabilen IEEE 802.11a geliştirilmiştir. Aynı yıl, 2.4 GHz frekans bandında daha yüksek hızlarda ve IEEE 802.11'e göre biraz daha geniş bir alanda haberleşmeyi sağlayan IEEE 802.11b sürümü de yayınlanmıştır. 2003 yılında, IEEE 802.11b sürümünde geliştirmeler yapılarak standardın 54 Mbps'e kadar olan hızları desteklemesi sağlanmıştır ve bu sürüm, IEEE 802.11g olarak adlandırılmıştır. Son düzenleme 2009 yılında yapılarak, standardın, çok daha geniş alanlarda, 150 Mbps'e kadar olan hızlarda kullanabilmesini sağlamıştır. Bu sürüm ise IEEE 802.11n olarak adlandırılmıştır.

IEEE 802.11 standardının getirdiği yüksek hızlar, beraberinde, iyi bir gürültünün sinyale oranına (Signal to Noise Ratio, SNR) ihtiyaç duymaktadır. Standartların gelişmesi ve hızların yükselmesi ile birlikte etkilenme hassasiyetinin artması, bir dezavantaj olarak diğer sistemlere oranla haberleşme yapılabilecek alanı daraltmaktadır. Bu hassasiyeti azaltmak için IEEE 802.11 standardı, iki teknik kullanılmaktadır. Bunlardan birisi, asıl sinyali, belli bir sıraya göre sürekli olarak frekans değiştiren bir taşıyıcı sinyal üzerine modüle eden frekans atlamalı yayılı spektrum (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS) tekniğidir. Diğeri, bütün bant genişliğini zaman aralıklarını parçalara bölerek kullanan doğrudan sıralı yayılı spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) tekniğidir.

Yüksek bant genişliği gereken yerel alan ağlarında, daha geniş kapsama alanı ve güvenlik gerektiren uygulamalarda, dosya paylaşımı gibi uygulamalarda IEEE 802.11b standardına uygun WLAN teknolojisinin kullanımı daha uygundur. Bu teknoloji ile bir bina içerisindeki kablolu yerel alan ağı, kablosuz olarak yeniden düzenlenerek, kablo karmaşası ve maliyeti ortadan kaldırılmaktadır.

### **2.1.2. Mikrodalga Erişim ile Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)**

WLAN'a göre daha geniş bir alanda, örneğin bir şehirde, kullanılmak üzere tasarlanan mikrodalga erişim ile dünya çapında birlikte çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) teknolojisi, gezgin ve sabit kullanıcılar için geniş bantlı, gerçek zamanlı veya gerçek zamanlı olmayan haberleşmeleri destekleyerek son yıllarda ön plana çıkan ve diğer haberleşme sistemlerine alternatif oluşturacağı düşünülen bir teknolojidir [29]. WiMAX teknolojisinin standartları, IEEE 802.16 ile belirlenmiştir. 10 – 50 km çapında geniş bir alanda, 40 – 70 Mbps gibi yüksek hızlar ve büyük bant genişliği ile haberleşme olanağı sağlamaktadır.

1999 yılında IEEE tarafından, kentsel alanda kullanılacak, 10 – 60 GHz frekansları arasında, fiber optik haberleşmenin yerini alacak yüksek hızlı kablosuz iletişim için IEEE 802.16 standartları oluşturulmuştur. Yayınlanan ilk standart, tek taşıyıcılı modülasyon tekniğini kullanan fiziksel katmana ek olarak zaman bölmeli ikilemeyi (Time Division Duplexing, TDD) veya frekans bölmeli ikilemeyi (Frequency Division Duplexing, FDD) destekleyen, ayrıca zaman bölmeli çoklu erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) yapısını da barındıran medya erişim kontrolü (Media Access Control, MAC) katmanlı bir yapıya sahiptir. İlk standardın yayımlanmasından sonra mevcut standardın iyileştirilme ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır [29].

IEEE 802.16'nın, özellikleri oldukça geniş bir alana yayılmış standartlar topluluğuna dönüşmesi, aynı zamanda, tek bir standart isteyen sanayi için bir takım sorunlara yol açmıştır. Sertifikalaştırma ve standart fazlalığı sorununu çözmek, bunlara ek olarak standart tabanlı çözümler geliştirmek amacıyla, 2001 yılının haziran ayında, ticari olmayan bir organizasyon olan WiMAX Forum kurulmuştur. WiMAX Forum tarafından oluşturulan çözümler ve cihaz üreticilerinin birlikte çalışmaları sayesinde 2.5 GHz, 3.5 GHz ve 5.8 GHz frekans bantları, farklı devletler tarafından lisanslanarak kullanılmaktadır [29]. 2.5 GHz frekansı Amerika, Filipinler, Libya, Lübnan, Peru, Rusya, Sri Lanka ve Yunanistan; 3.5 GHz frekansı Amerika, İzlanda, Kanada, Mısır, Peru, Rusya ve Şili; 5.8 GHz Gürcistan, İngiltere, İtalya ve Rusya gibi devletler tarafından lisanslanmıştır [28].

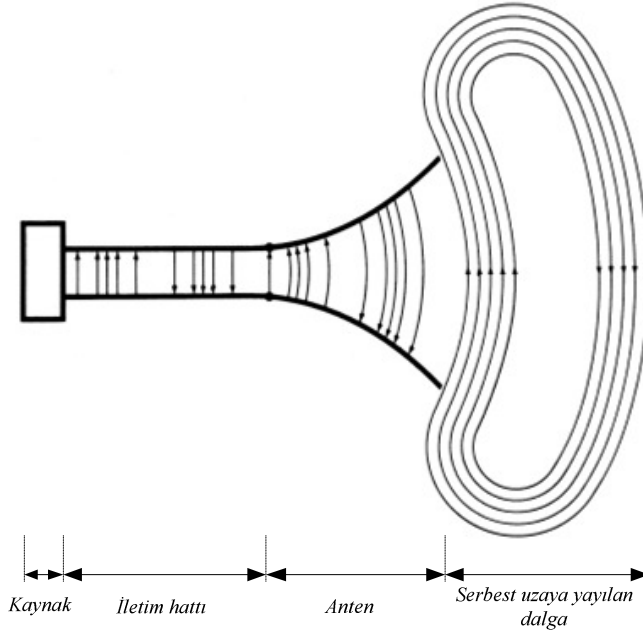
WiMAX, dik frekans bölmeli çoklama (Ortogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) tekniğini kullanan bir teknolojidir. WiMAX'ın başarımı, kullanılan kanal bant genişliğine bağlıdır. WiMAX, oldukça esnek gelişmelere izin veren ve 1.25 MHz'den 20 MHz'e kadar seçilebilen bir bant genişliği sunmaktadır. WiMAX teknolojisi, fiziksel katmanında OFDM kullandığından, kod bölmeli çoklu erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) kullanan 3G teknolojisine göre daha yüksek hızlara ulaşılmasını sağlar. CDMA kullanan sistemlere göre daha iyi verimliliğe sahip olan WiMAX'ın bir avantajı da, çok girişli çok çıkışlı (Multiple Input and Multiple Output, MIMO) uygulamalara olan yatkınlığıdır. Daha fazla kanal kapasitesine, daha yüksek veri aktarım hızına ve daha çok uygulama seçeneğine sahip olması, WiMAX'ın diğer avantajlarından [29].

WiMAX ile WLAN arasındaki en temel fark, WiMAX'ın, WLAN'a göre çok daha geniş alanlarda, daha verimli haberleşmeye imkân vermesidir. Farklardan bir diğeri, WLAN'ın CSMA tekniğini kullanırken WiMAX'ın dik frekans bölmeli çoklu erişim (Ortogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) tekniğini kullanmasıdır. OFDMA, OFDM ile uyumlu olup, taşıyıcı atama işleminden önce çizelgeleme işlemine izin veren bir yapıdır. Çizelgeleme, bir kullanıcının hangi sırada haberleşeceği, ne kadarlık bir bant genişliğinde hangi miktarda güç atanacağı gibi, kaynakların atanmasını sağlayan bir işlemdir ve WiMAX sisteminin performansında oldukça etkilidir [29].

## 2.2. ANTENLER

Antenler, herhangi bir kablosuz iletişim sisteminin anahtar bileşenleridir. Anten, elektromanyetik dalgaları yayabilen ve alabilen bir dönüştürücüdür. Antenlerin çoğu, diğer antenlere göre yaklaşık olarak dar bir frekans bandında verimli çalışabilmektedirler. Bir antenin istenen elektromanyetik dalgayı alabilmesi için, verici sistemle alıcı sistemin aynı frekansta çalışması gerekmektedir [1].

Kaynak, iletim hattı ve antenden oluşan bir sistemi Şekil 2.1.'de verilmiştir. Kaynaktan iletim hattı aracılığı ile antene gelen sinyal, anten tarafından elektromanyetik dalgaya dönüştürülerek serbest uzaya yayılmaktadır [1].

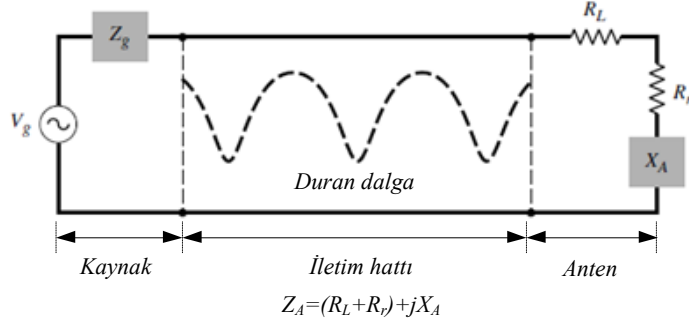


Şekil 2.1. Işıma yapan bir sistem

Şekil 2.1.'de verilen sistemin Thevenin eşdeğer Şekil 2.2.'de verilmiştir. Verilen eşdeğer devrede kaynak, ideal bir üreteç ile; iletim hattı, karakteristik empedansı  $Z_c$  olan bir hat ile; anten ise iletim hattına bağlı ve empedansı  $Z_A$  [ $Z_A=(R_L+R_r)+jX_A$ ] olan bir yük ile temsil edilmiştir. Anten empedansının modellenmesinde yük direnci  $R_L$ , antene ilişkin iletim ve dielektrik kayıplarını;  $R_r$ , ışıma rezistansını ve  $X_A$  ise ışıma reaktansını temsil etmektedir. İdeal şartlarda kaynak tarafından üretilen enerji tamamen  $R_r$  ışıma direncine aktarılmalıdır. Ancak pratik sistemlerde, iletim hattı ve antenin yapısından dolayı iletim ve dielektrik



kayıpları oluşmaktadır. Empedans uyumu sağlandığında, hat ve yansıma kayıpları ihmal edilir ve antene maksimum güç iletimi gerçekleştirilir [1].

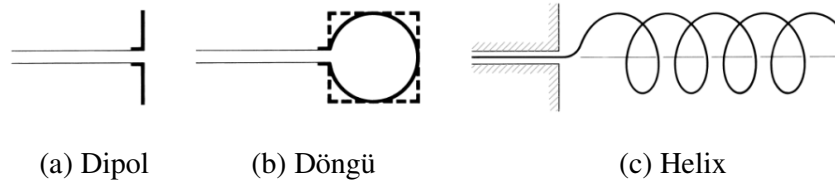


Şekil 2.2. İletim modundaki bir antenin iletim hattının Thevenin eşdeğer modeli

Thevenin eşdeğerinde verildiği gibi arayüzden yansıyan dalgalar, iletim hattı içerisinde, kaynaktan antene doğru giden dalgalarla yapıcı ve yapıcı olmayan girişim oluşturmaktadır. Bundan dolayı, duran dalgalar meydana gelmektedir. Eğer anten sistemi uygun şekilde tasarlanmazsa, iletim hattı, dalgaya kılavuzluk etmek ya da iletim görevini yapmak yerine bir enerji depolama elemanı olarak görev yapar. Eğer duran dalganın maksimum alan yoğunluğu büyükse iletim hattı içerisinde arklar oluşabilir.

İletim hattı ve anten kayıpları ile duran dalgalar istenmezler. İletim hattı kayıpları, düşük kayıplı hatlar kullanılarak minimize edilebilirken anten kayıpları, antenin kayıp direnci olan  $R_L$ 'nin azaltılması ile küçültülebilir. Duran dalgalar ise anten empedansı ile iletim hattı empedansı arasında uyum sağlanarak azaltılabilir.

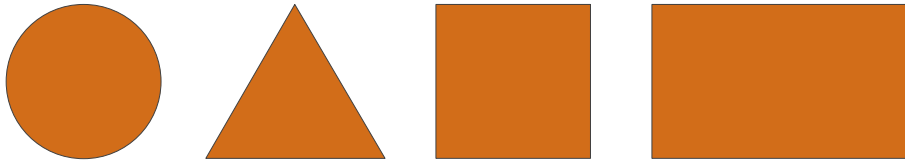
Enerjinin alınabilmesine veya transfer edilebilmesine ek olarak, gelişmiş kablosuz sistemlerde kullanılan antenler genellikle enerjinin belli yönlerde ışınmasını sağlayıp diğer yönlerde ışınma yapmaması için optimize edilmelidirler. Bunun için anten yönlü bir aygıt olarak çalışmalıdır. Antenler, gereksinimlere göre, tel, açıklık, yama gibi çeşitli geometrilere ve yapılaraya sahip olabilirler. Şekil 2.3.'te birkaç anten konfigürasyonu görülmektedir [1].



Şekil 2.3. Tel anten konfigürasyonları

### 2.3. MİKROŞERİT ANTENLER

Mikroşerit antenler, genellikle yama, toprak düzlemi, alttaş ve besleme kısmı olmak üzere 4 ana kısımdan oluşan tek katmanlı antenlerdir. Mikroşerit antenin yama düzlemi, tek elemanlı bir anten olarak kabul edilebilir. Tek bir frekansta giriş empedansı ve ışın diyagramı gibi karakteristik özellikler sabittir. Yama anten, iletken olmayan ince bir alttaşın bir tarafında, yüksekliği ( $t$ ), serbest uzay dalga boyundan ( $\lambda_0$ ) çok küçük olan ( $t \ll \lambda_0$ ) ışın yapan çok ince bir şerit düzlem ve alttaşın diğer tarafında yer alan, ışın yapan düzlem ile aynı metalden oluşan toprak düzleminden meydana gelmektedir. Metalik yama, genelde, altın, kalay, nikel gibi korozyona karşı dirençli metallere kaplanmış ince bakır folyodan oluşmaktadır. Öncelikli amacı yama ile toprak düzlemi arasında mekanik destek ve düzgün aralık sağlaması amacıyla kullanılan alttaşın kalınlığı, genellikle, serbest uzay dalga boyunun ( $\lambda_0$ ) %1 – 5'i olarak alınmaktadır. Genellikle, yüksek dielektrik sabitine ( $\epsilon_r$ ) sahip materyallerden seçilmektedir. Kayıp tanjantı 0.005'ten daha az olan alttaş malzemeler tercih edilmektedir. Mikroşerit anten ile ilgili literatürde yer alan çalışmaların büyük bir kısmı, dikdörtgen, daire ve üçgen gibi, düzgün geometriler üzerinde yoğunlaşmıştır [1-4]. Bu geometriler Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Mikroşerit anten konfigürasyonları

Alttaş malzemeler, dielektrik sabitine ( $\epsilon_r$ ) göre genellikle 3 kategoriye ayrılırlar:

1. Dielektrik sabiti 1.0 ile 2.0 arasında olan malzemeler.  
Bu tür malzemeler hava, polistren köpük ya da dielektrik bal peteği olabilir.
2. Dielektrik sabiti 2.0 ile 4.0 arasında olan ve teflon takviyeli fiberglastan yapılan malzemeler.
3. Dielektrik sabiti 4.0 ile 10.0 arasında olan malzemeler.  
Malzeme seramik, kuartz veya alümin içerebilir.

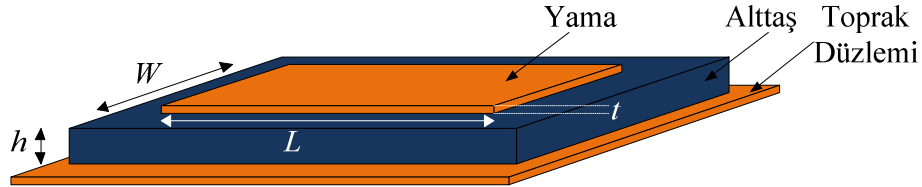
Mikroşerit anten için alttaş seçimi büyük önem taşımaktadır. Alttaşın yüksekliği anten verimini etkilerken dielektrik sabiti ise bant genişliğini ve frekansı

önemli ölçüde etkilemektedir. Diğer yandan yüksekliğin artması, istenmeyen yüzey dalgalarını oluşturmaktadır.

Mikroşerit antenler, yama düzlemi kenarı ile toprak düzlemi arasındaki kaçak alanlar sayesinde ışınım yaparlar. İyi bir anten performansı için düşük dielektrik sabitine sahip kalın bir alttaş kullanılmalıdır. Böylece verim daha yüksek olacak, aynı zamanda daha yüksek bant genişliği ve daha iyi ışınım sağlanacaktır. Ancak böyle bir tasarım ise anten boyutlarının büyümesine sebep olacaktır. Kompakt bir mikroşerit anten elde etmek için yüksek dielektrik sabitine sahip olan bir alttaş tercih edilmektedir. Bu, dar bant genişliği ve daha düşük verime sebep olsa da boyutlarda küçülmeyi sağlamaktadır [3].

### 2.3.1. Mikroşerit Antenlerin Genel Yapısı

Mikroşerit antenler, bir dielektrik alttaş ve bu alttaşın iki yüzeyinde yer alan iletkenlerden oluşmaktadır. Yapıyı anlamak için dikdörtgen mikroşerit anten (DMA) örneği verilebilir. DMA'lar, Şekil 2.5.'te görüldüğü gibi,  $L$  uzunluğu,  $W$  genişliği ve  $h$  yüksekliğinde,  $\epsilon_r$  dielektrik sabitine sahip bir alttaş ve bunun iki yanında yer alan yama ve toprak düzlemlerinden oluşmaktadır [3].



Şekil 2.5. Bir DMA'nın genel yapısı

### 2.3.2. Mikroşerit Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları

Mikroşerit antenler küçük boyut, düşük profil, düşük maliyet, hafiflik, düzlemsel olan ve düzlemsel olmayan yüzeylere uygulama kolaylığı, modern baskı devre teknolojisi ile kolay üretim ve mikrodalga entegre devrelere kolaylıkla entegre edilebilme gibi avantajlara sahiptir. Uygulandığı yüzeylerde oldukça küçük hacim kaplarlar. Bu avantajlarının yanında düşük verim, düşük kazanç, besleme ve birleşim yerlerinden ekstra ışınım yapma, yüzey dalgası ile uyartım oluşması, dar bant genişliği (<5%), ışınımı sağlayan yama kısmı ile toprak düzlemi arasındaki aralığın

küçük olmasından dolayı düşük RF gücü kullanma zorunluluğu gibi dezavantajlara da sahiptir.

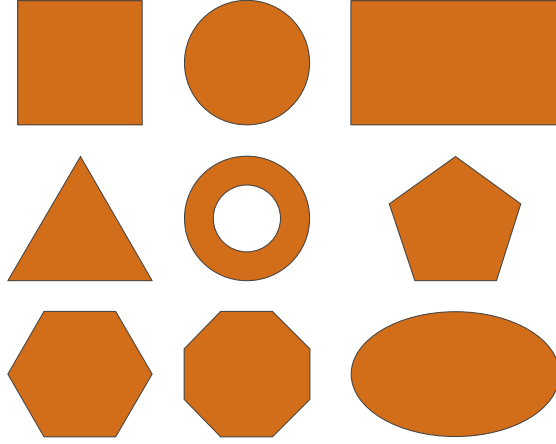
Mikroşerit antenler çok yüksek anten kalite faktörüne ( $Q$ ) sahiplerdir.  $Q$ , anten ile ilgili kayıpları temsil eder ve yüksek  $Q$  değeri, dar bant genişliği ve düşük verim anlamına gelmektedir.  $Q$ , alttaş kalınlığının artırılması ile azaltılabilir. Ancak kalınlık artırılırsa, kaynaktan gönderilen toplam güç yüzey dalgasına dönüşür. Bu yüzey dalgaları, istenmeyen güç kayıplarına ve bazı anten karakteristiklerinde bozulmaya sebep olur. Yüzey dalgalarının azaltılması ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur. Diğer iki problem, düşük güçte kullanılma zorunluluğu ve düşük kazanç özellikleridir ki anten elemanları için dizi konfigürasyonu kullanılarak aşılabilmektedir [3].

### **2.3.3. Mikroşerit Anten Çeşitleri**

Mikroşerit antenlerin üretimlerinin kolay olması, mikroşerit anten tasarımlarının çok çeşitli şekillere sahip olmasına imkân tanımaktadır. Anten çeşitliliğinin yüksek olması, antenlerin belirli ortak özelliklerine göre kategorize edilmelerini gerektirmektedir. Mikroşerit antenler, geometrilerine göre sınıflandırılacakları gibi besleme çeşitlerine göre de sınıflandırılabilirler [3].

#### **2.3.3.1. Mikroşerit yama antenler**

Mikroşerit yama antenler, ışımayı sağlayan düzlemin, alttaş üzerine istenilen geometride yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Yama ve toprak düzlemi, genellikle, düzgün geometrilere sahiptirler. Işımayı sağlayan yama geometrisi genellikle düzlemsel olmakla birlikte, düzlemsel olmayan geometriler de kullanılmaktadır. Çok sayıda yama anten için ışımaya karakteristikleri hesaplanmıştır. Boyutları, çalıştıkları frekans ile ters orantılıdır ve göreceli olarak büyüktürler. Literatürde yer alan bazı mikroşerit yama anten geometrileri Şekil 2.6.'da verilmiştir [3].

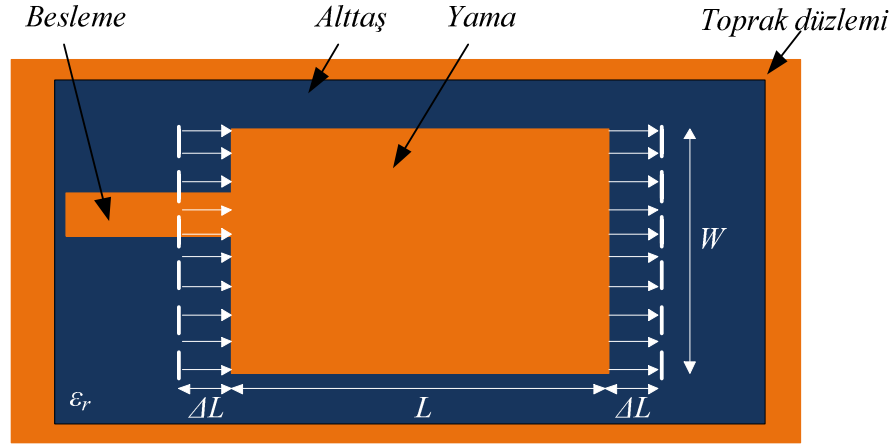


Şekil 2.6. Bazı mikroşerit yama anten geometrileri

Literatürde yer alan çalışmaların çoğu, geometrilerinin ve analizlerinin kolaylığından dolayı, dikdörtgen ve dairesel mikroşerit antenler üzerinde yoğunlaşmıştır [3].

Tipik olarak kazançları 5-6 dB seviyesinde olan mikroşerit yama antenler,  $70^{\circ}$ - $90^{\circ}$  arasında 3 dB hüzme genişliğine sahiptirler [3].

Bir dikdörtgen mikroşerit yama antenin ışıma mekanizması Şekil 2.7.'de verilmiştir.



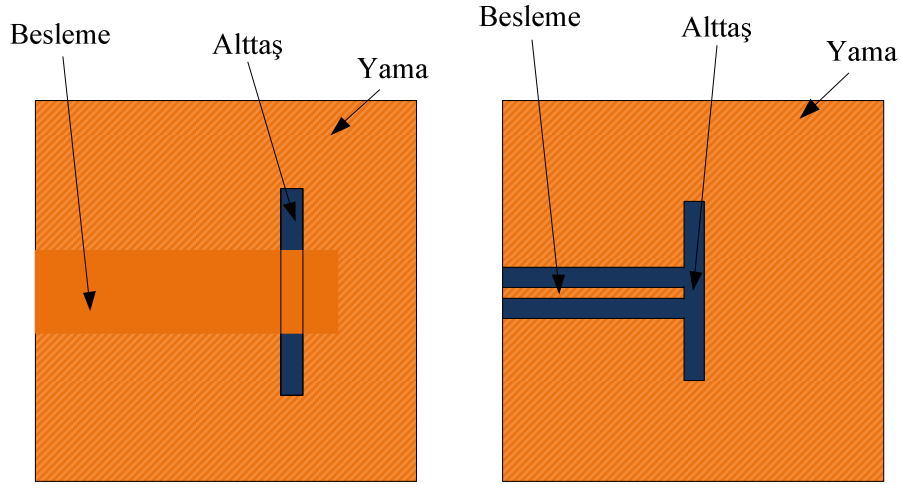
Şekil 2.7. Bir dikdörtgen mikroşerit yama antenin ışıma mekanizması

Bir mikroşerit anten, baskın modda ( $TM_{10}$ )  $W$  genişliğindeki kenar boyunca ışıma yapmaktadır. Antenin ışıma yapmasını sağlayan kenar kaçak alanları, yama boyutunda elektriksel olarak bir uzamaya sebep olmaktadır. Bu uzama,  $\Delta l$  olarak

gösterilir. Elektriksel uzamayı hesaplamak için literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur [3].

### 2.3.3.2. Mikroşerit slot (yarık) antenler

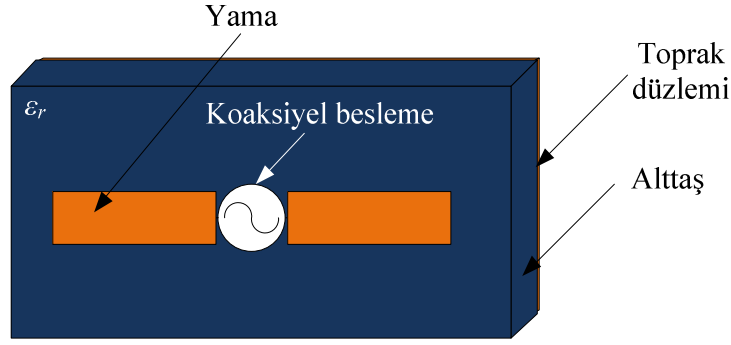
Mikroşerit slot antenler, altaş üzerine yerleştirilen, ışına yapan yama üzerinde boşluklar açılması ile elde edilirler. Yama ve toprak düzlemi, genellikle, düzgün geometrilere sahiptir. Literatürde yer alan bazı mikroşerit slot anten geometrileri Şekil 2.8.'de verilmiştir [3]. Genellikle mikroşerit hat veya eşdüzlemsel dalga kılavuzu ile beslenmektedirler.



Şekil 2.8. Bazı mikroşerit slot anten geometrileri

### 2.3.3.3. Mikroşerit dipol antenler

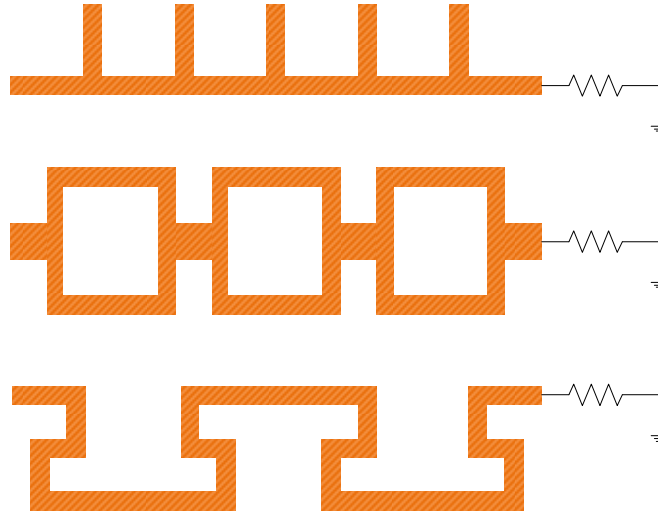
Mikroşerit dipol antenler, kenarlarının oranları nedeniyle dikdörtgen mikroşerit yama antenlerden farklıdır. Bir mikroşerit dipol antenin genişliği, genelde serbest uzay dalga boyunun 0.05 katından daha az olarak alınmaktadır. Mikroşerit dipol anten ile yama antenlerin ışına diyagramları, benzer akım dağılımları nedeniyle benzerlik göstermektedir. Ancak ısınma dirençleri ve çapraz polarizasyon ısınmaları birbirlerinden farklıdır. Dipol antenler, küçük boyutları ve lineer polarizasyona sahip olmaları nedeniyle tercih edilirler. Bir mikroşerit dipol anten konfigürasyonu Şekil 2.9.'da verilmiştir [3].



Şekil 2.9. Mikroşerit dipol anten

#### 2.3.3.4. Mikroşerit yürüyen dalga antenler

TE modunu sağlamak için, zincir şeklinde sıralanmış, yeterli genişliğe sahip uzun bir mikroşerit hattın meydana gelen antenler, mikroşerit yürüyen dalga antenler olarak adlandırılırlar. Antenin bir tarafı, duran dalga oluşumunu engellemek için rezistif bir yük ile sonlandırılmaktadır. Zincir anten, kare döngü anten gibi mikroşerit yürüyen dalga antenler, dairesel polarizasyon için kullanılmaktadır. Mikroşerit yürüyen dalga antenlere örnekler Şekil 2.10.'da verilmiştir [3].



Şekil 2.10. Mikroşerit yürüyen dalga anten örnekleri

Mikroşerit antenlerin çeşitli özelliklerinin karşılaştırması Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Mikroşerit antenlerin karşılaştırılması

<b>Karakteristik</b>	<b>Mikroşerit Yama Antenler</b>	<b>Mikroşerit Slot Antenler</b>	<b>Mikroşerit Dipol Antenler</b>
<b>Profil</b>	İnce	İnce	İnce
<b>Üretim</b>	Çok Kolay	Kolay	Kolay
<b>Polarizasyon</b>	Lineer ve dairesel	Lineer ve dairesel	Lineer
<b>Çift Frekansta Kullanım</b>	Mümkün	Mümkün	Mümkün
<b>Şekil Uyumluluğu</b>	Herhangi bir şekil	Çoğunlukla dikdörtgen ve dairesel	Dikdörtgen ve üçgen
<b>İstenmeyen Işıma</b>	Mevcut	Mevcut	Mevcut
<b>Bant Genişliği</b>	2-50%	5-30%	≈30%

#### 2.3.4. Mikroşerit Anten Besleme Çeşitleri

Mikroşerit antenler, önceleri mikroşerit hat veya koaksiyel kablo kullanılarak beslenmekteydi. Teknolojinin gelişmesi ile ortaya çıkan ihtiyaçlar, araştırmacıları, besleme teknikleri üzerinde çalışma ve geliştirme yapmaya yöneltmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu yeni besleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler, başlıca 5 başlık altında toplanabilir:

1. Koaksiyel besleme,
2. Mikroşerit (düzlemsel) besleme,
3. Yakınlık kuplajlı mikroşerit besleme,
4. Aralık kuplajlı mikroşerit besleme,
5. Düzlemsel dalga kılavuzu beslemesi.

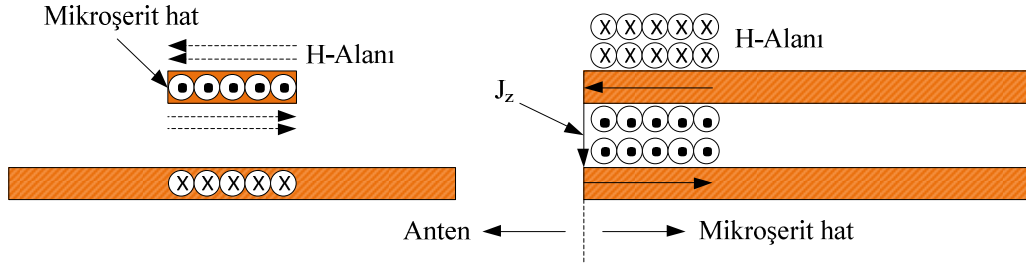
Besleme tekniğinin seçimi, bir takım faktörlere bağlıdır. Dikkat edilecek en önemli konu, gücün, besleme ile ışıma yapısı arasında verimli bir şekilde transfer edilebilmesidir. Bunu sağlayan, iki yapı arasındaki empedans uyumudur. Empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan istenmeyen ışımlar, ışıma diyagramındaki yan lob seviyesinde ve çapraz polarizasyon genliğinde artışa sebep olabilir. İstenmeyen ışımının en aza indirilmesi ve bunun ışıma diyagramındaki etkileri, beslemenin seçimindeki önemli faktörlerden biridir. Dikkate alınması gereken bir diğer husus, beslemenin, uygulamaya uygunluğudur. Bazı besleme yapıları, çok sayıda parametreye sahip olduğu için, bu parametrelerin uygun biçimde seçilmesi ile iyi bir performans sağlayabilir.



### 2.3.4.1. Mikroşerit besleme

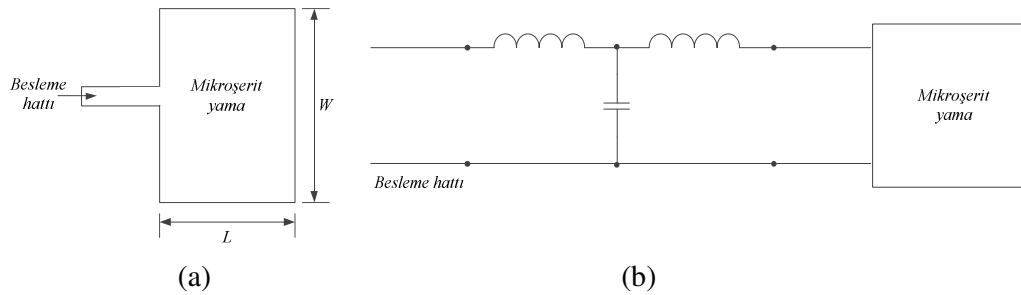
Mikroşerit antenin, aynı alttaş üzerinde mikroşerit besleme kullanılarak beslenmesi, yamanın, mikroşerit beslemenin uzantısı gibi görünmesinden dolayı, doğal bir seçenek olarak görünmektedir. Mikroşerit besleme kullanılarak beslenen mikroşerit anten, besleme ile aynı anda üretilebilmektedir. Fakat bu tekniğin bazı kısıtlamaları mevcuttur [3].

Yamanın kenar bağlantılı mikroşerit hat ile uyarılması, Şekil 2.11.'de görüldüğü gibi, mikroşerit hattın birleşim düzlemindeki manyetik alanı  $H_y$  ile ilişkili olan eşdeğer elektrik akım yoğunluğu  $J_z$  cinsinden tanımlanabilir. Bu akım şeridinin genişliği, mikroşerit hattın efektif genişliği olarak alınmaktadır [3].

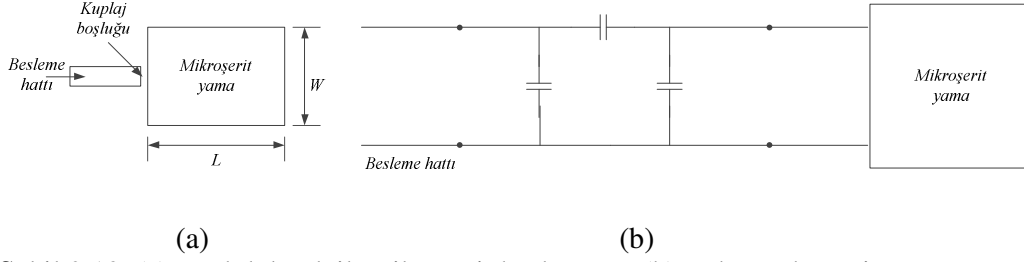


Şekil 2.11. Yama anten ile mikroşerit besleme hattı ara yüzündeki  $H_{teğet}$ 'in, eşdeğer akım yoğunluğu  $J_z$  ile gösterimi

Kenar bağlantılı mikroşerit besleme Şekil 2.12.'de verilen eşdeğer devre ile modellenebilir. Benzer şekilde, boşluk kuplajlı mikroşerit besleme, Şekil 2.13.'te verildiği gibi, boşluğa eşdeğer bir devre ile temsil edilebilir. Kenar bağlantılı beslemeyi ve FDTD yaklaşımını temel alan besleme analizleri literatürde mevcuttur [3].



Şekil 2.12. (a) Işıma yapan kenardan mikroşerit besleme ve (b) eşdeğer devresi

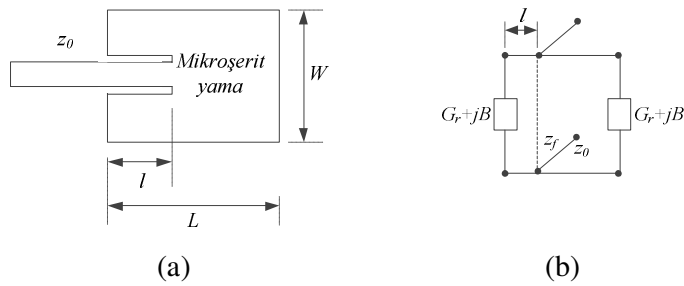


Şekil 2.13. (a) Boşluk kuplajlı mikroşerit besleme ve (b) eşdeğer devresi

Kenar bağlantılı besleme, empedans uyumsuzluğu kısıtlamasından dolayı olumsuz yönde etkilenmektedir. Çünkü yamanın ışına yapan kenarının giriş empedansı,  $50 \Omega$ 'luk besleme hattına göre oldukça yüksektir. Bundan dolayı,  $50 \Omega$ 'luk mikroşerit hat ile yama kenarı arasında harici empedans uyumlandırma devresi kullanılmalıdır. Mikroşerit hat, yama ile birleşim yapılan kısımdaki ışınları engeller. Bu, milimetre-dalga frekanslarındaki, mikroşerit hat genişliği ile yama genişliğinin karşılaştırılabilir olduğu beslemelerde ciddi kısıtlama anlamına gelmektedir.

Boşluk kuplajlı besleme, güç kuplajının verimli olması için, boşluk genişliğinin dar olmasını zorunlu kılar. Ancak dar boşluk boyutu, antenin güç kullanma kabiliyetini kısıtlar. Diğer taraftan, açık uçlu mikroşerit besleme, istenmeyen ışınlarla sebebiyet verir [3].

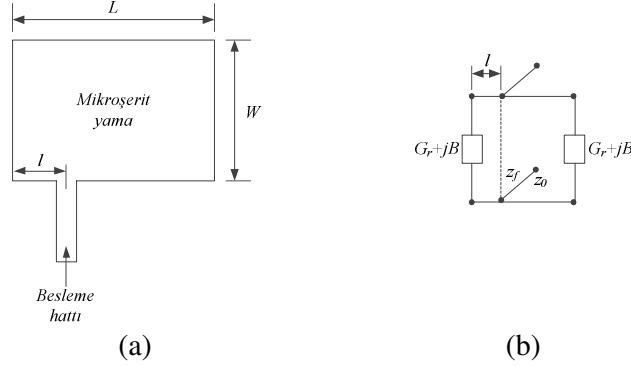
Düzlemsel beslemedeki bahsedilen bazı eksiklikleri gideren iyileştirme Şekil 2.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. (a) Işıma yapan kenardan mikroşerit inset besleme ve (b) eşdeğer devresi

Burada mikroşerit besleme, yamanın içine eklenmiştir. Besleme pozisyonu, giriş empedansı  $50 \Omega$  olacak şekilde seçilmiştir. Inset mikroşerit besleme için yaklaşık eşdeğer devre, yine aynı şekilde verilmiştir. Eşdeğer devre, iletim hattı modeline göre oluşturulmaktadır ve  $G_r$  ve  $B$ , iletim hattı modeline göre antenin

empedanslarıdır. İletim hattının  $l$  uzunluğundaki inset kısmı, sonlu boyutlu toprak düzlemlili ve iletken destekli düzlemsel dalga kılavuzu olarak modellenmelidir. Direkt mikroşerit besleme için bir diğer konfigürasyon, Şekil 2.15.'te gösterildiği gibi, besleme noktasının, yamanın ışımaya yapmayan kenarında seçilmesi ile elde edilir [3].



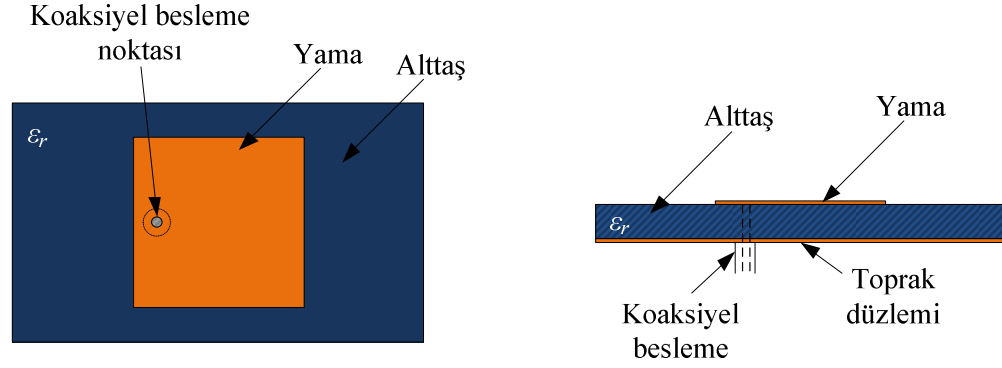
Şekil 2.15. (a) Işıma yapmayan kenardan mikroşerit besleme ve (b) eşdeğer devresi

Çapraz polarizasyonlu ışımaya bu durumda yüksektir fakat yamanın  $W/L$  oranının yaklaşık 1.5 civarında optimize edilmesiyle en aza indirilebilir. Bu besleme tekniği için eşdeğer devre, yine aynı şekilde verilmiştir.

Düzlemsel mikroşerit beslemenin tasarımı ve üretimi kolaydır. Ancak besleme hattı istenmeyen ışımaya sebep olur. Bundan dolayı, bu tür besleme, performans ihtiyacının çok zorlayıcı olmadığı ve beslemenin, yama ile aynı düzlemde olmasını gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Elde edilebilen bant genişliği %3 – 5 civarındadır [3].

#### 2.3.4.2. Koaksiyel besleme

Gücü bir prop vasıtasıyla iletmek, mikrodalga gücünü transfer etmek için en basit mekanizmalardan biridir. N tipi koaksiyel konnektörlü tipik mikroşerit anten Şekil 2.16.'da verilmiştir.



(a) Üst görünüş  
Şekil 2.16. Koaksiyel besleme yapılmış mikroşerit anten

(b) Yan görünüş

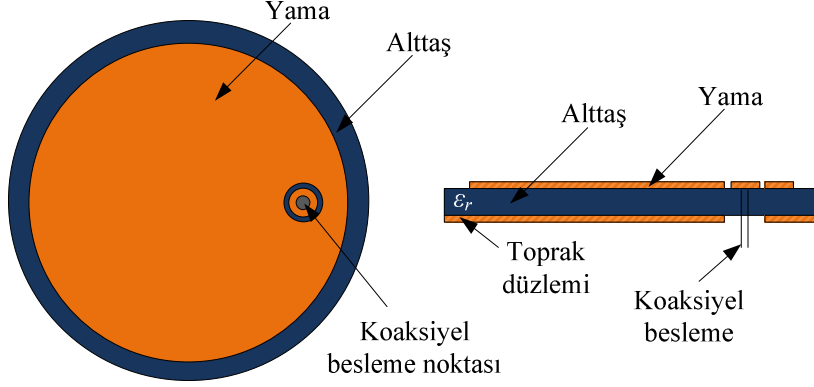
Koaksiyel konnektör baskı devre kartının arka tarafına sabitlenir ve besleme noktasında açılan delikten geçirilen koaksiyel kablonun merkez iletkeni, yama düzlemine lehimlenir. Besleme noktasının pozisyonu, verilen modda en iyi empedans uyumunun sağlandığı pozisyon olarak tespit edilir. Yamanın uyarımı besleme akımı  $J_z$ 'nin, yamanın  $E_z$  alanı ile kuplajlanması sayesinde oluşmaktadır. Kuplajlama sabiti:

$$Kuplaj Sabiti = \cos\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) \quad (2.1)$$

ile verilir. Eşitlik 2.1.'de yer alan  $L$ , yamanın rezonans uzunluğunu,  $x_0$  ise besleme noktasının yama kenarından olan uzaklığını temsil etmektedir. Eşitlik, koaksiyel beslemenin yamanın ışına yaptığı noktada olmasının ( $x_0=0$  veya  $x_0=L$ ), kuplajlamayı maksimum yapacağını göstermektedir [3].

Koaksiyel beslemenin avantajlarından biri, giriş empedansı seviyesini besleme noktası aracılığı ile ayarlamaya imkânı sağlamasıdır. Bunun yanında çok sayıda kısıtlamaya sahiptir. Bunlardan ilki, koaksiyel besleme kullanılacak bir anten dizisinin çok sayıda lehimleme noktasına ihtiyaç duyması ve bundan dolayı üretimin zorlaşmasıdır. İkincisi, yama antenin bant genişliğini artırmak için kalın alttaşın kullanılması, daha uzun prop kullanılmasını gerektirmektedir. Bu durum, proptan dolayı oluşacak istenmeyen ışımada, yüzey dalga gücünde ve besleme indüktansında artmaya sebep olur. Ancak, besleme indüktansı, seri bağlanacak kapasitörler ile kompanze edilebilir. Bir yaklaşıma göre seri kapasitör bağlamanın bir yolu,

Şekil 2.17.'de gösterildiği gibi, koaksiyel kablonun merkez iletkeninin, yama iletkeninde lehimlendiği noktanın çevresinde dairesel bir slot açmaktır [3].

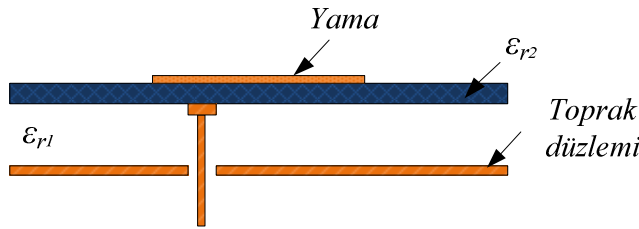


(a) Üst görünüş

(b) Yan görünüş

Şekil 2.17. Prop indüktansının kompanse edilmesi için iletken yamada slot açılmış anten

Ancak, dairesel alandaki elektrik alan, ışınım diyagramında çapraz polarize bileşenlere sebep olacaktır. Bu yaklaşımın bir başka çeşidi Şekil 2.18.'de görülmektedir. Anten empedansı, yama ile prop arasında elektromanyetik kuplaj yapılarak istenen değere dönüştürülebilir. Kuplaj bölgesi, yamanın altında konumlandırılan bir disk ile sonlanan prop vasıtasıyla artırılabilir. Giriş empedansı disk boyutuna, disk ile yama arasındaki mesafeye ve prop pozisyonuna bağlıdır. Bu modifikasyon Şekil 2.18.'de verilmiştir [3].

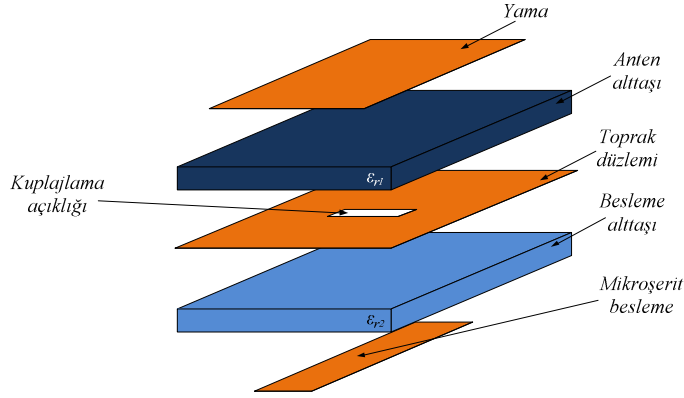


Şekil 2.18. Yama empedansının elektromanyetik kuplaj yoluyla dönüştürülmesi

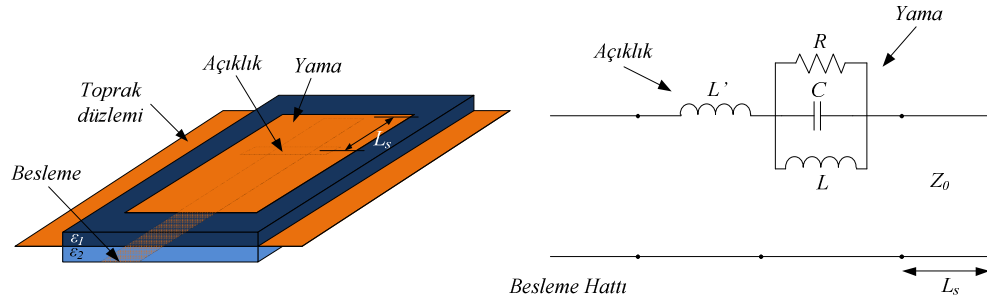
### 2.3.4.3. Açıklık kuplajlı besleme

Açıklık kuplajlı besleme konfigürasyonunun dikkate değer özellikleri bant genişliğinin yüksek olması ve besleme yapısından sızan ışımadan ışınım yüzeyini

korumasıdır [3]. Bu beslemenin kullanıldığı anten yapısı katmanlar halinde Şekil 2.19.'da, birleşik haldeki konfigürasyon ise Şekil 2.20.'de görülmektedir.



Şekil 2.19. Açıklık kuplajlı mikroşerit anten katmanları



(a) Açıklık kuplajlı mikroşerit beslemeli anten (b) Eşdeğer devre  
Şekil 2.20. (a) Açıklık kuplajlı mikroşerit beslemeli anten ve (b) eşdeğer devresi

Bu besleme türünde anten, şekilde görüldüğü gibi, ortak bir toprak düzlemi ile ayrılan iki alttaş kullanmaktadır. Alt alttaştaki mikroşerit besleme hattı yamaya, toprak düzlemindeki bir slot açıklığı boyunca elektromanyetik kuplajlıdır. Slot herhangi bir şekle ya da boyuta sahip olabilir ve slotun boyutları ve konumu, bant genişliğini artırmak için geliştirilebilir. İki katman için alttaş parametreleri, bir anlamda, besleme ve ışıma fonksiyonlarını bağımsız olarak optimize edecek şekilde seçilir. Örneğin, besleme hattı için alttaşın ince ve büyük değerli dielektrik sabitine sahip olması gerekirken yama için alttaşın kalın ve küçük değerli dielektrik sabitine sahip olması gerekir. Bundan başka, besleme hattının açık sonundaki ışıma, toprak düzleminin koruyucu etkisinden dolayı, yamanın ışıma diyagramına girişmemektedir. Bu özellik ayrıca polarizasyon saflığını geliştirir.

Kuplajlama slotu, yamaya göre, yamanın manyetik alanının maksimum olduğu yere yakın bir şekilde merkezlenmiştir. Bu, yamanın manyetik alanı ve slot kenarındaki eşdeğer manyetik akım arasındaki manyetik kuplajı artırmak için yapılmaktadır. Kuplajlama sabiti Eşitlik 2.2. aracılığı ile hesaplanabilmektedir.

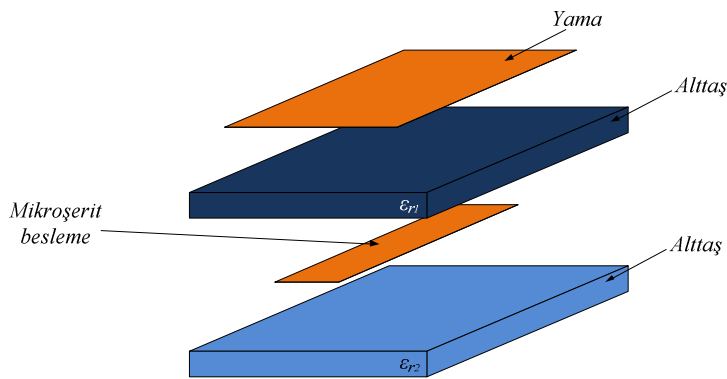
$$Kuplaj\ Sabiti \approx \sin\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2.'de yer alan  $x_0$ , slot ile yama kenarı arasındaki mesafedir. Bu besleme konfigürasyonunda, yama anten, slot kuplajından dolayı beslemeye seri olmaktadır. Işıma yapmayan slot, yamanın RLC ağına seri bir indüktör ile temsil edilmektedir.

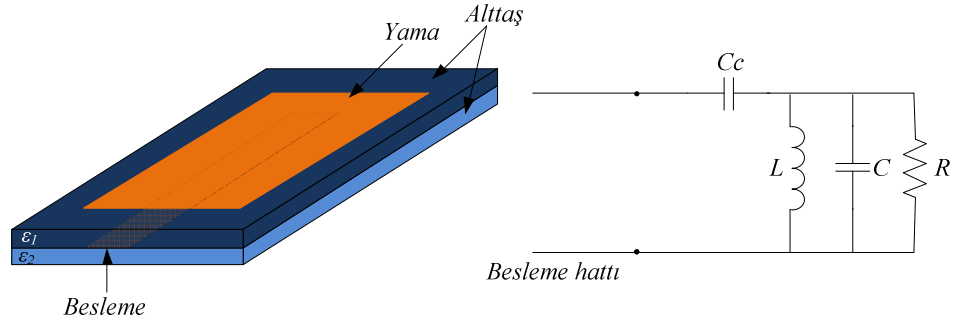
Açıklık kuplajlı besleme tekniğinin yararlarına ek olarak, bu besleme tekniği ile yapılan tasarımda kuplaj slotunun şekli ve uzunluğu, besleme hattının genişliği değiştirilerek bant genişliği artırılabilir.

#### 2.3.4.4. Yakınlık (elektromanyetik) kuplajlı besleme

Temas etmeyen ve eşdüzlemlı olmayan mikroşerit besleme konfigürasyonu kullanılan anten yapısı katmanlar halinde Şekil 2.21'de, birleşik halde Şekil 2.22.'de verilmiştir.



Şekil 2.21. Yakınlık kuplajlı mikroşerit anten katmanları



(a) Yakınlık kuplajlı mikroşerit beslemeli anten (b) Eşdeğer devre  
Şekil 2.22. Yakınlık kuplajlı mikroşerit besleme

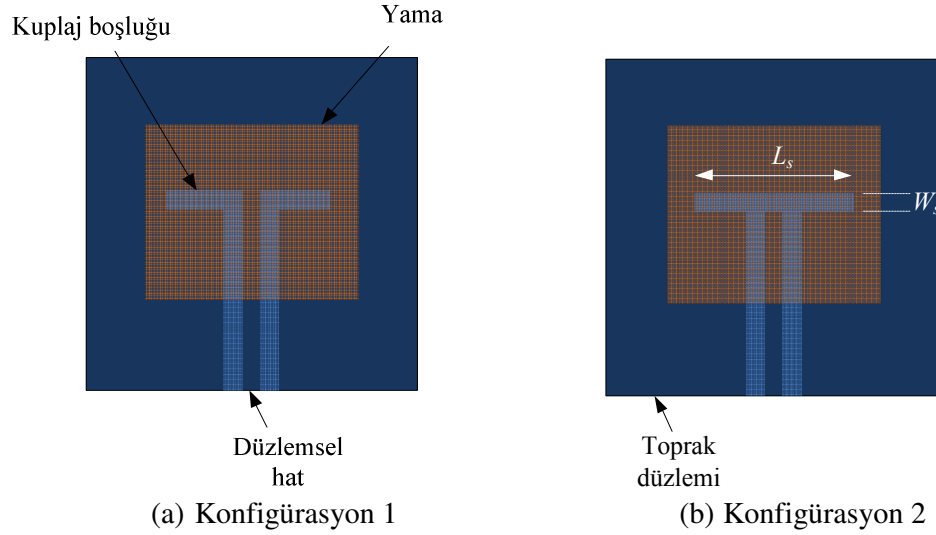
İki katmanlı alttaş kullanan yakınlık kuplajlı beslemede, üstteki alttaşa yama ve alttaki alttaşa mikroşerit hat yer almaktadır. Besleme hattı, yamanın altında açık sonludur. Bu besleme türü, elektromanyetik kuplajlı mikroşerit besleme olarak bilinmektedir. Yama ile mikroşerit besleme arasındaki kuplaj kapasitiftir. Yakınlık kuplajlı besleme için eşdeğer devre, Şekil 2.22.'de mevcuttur. Eşdeğer devrede yer alan  $C_c$ , kuplaj kapasitörünü temsil etmektedir ve yama anteni tanımlayan RLC rezonans devresine seri olarak gösterilmektedir. Bu kapasitör, antenin empedans uyumunu sağlamak, aynı zamanda antenin bant genişliğini ayarlamak için tasarlanabilir. Bu besleme tekniği kullanılarak %13 bant genişliği elde edilebilmiştir. İki katmanın alttaş parametreleri, yamanın bant genişliğini artırmak ve mikroşerit beslemenin açık sonundan sızan istenmeyen ışınları azaltmak için uygun bir biçimde seçilebilmektedir. Bu beslemenin üretimi, yama ile besleme hattının tam olarak hizalanabilme zorunluluğundan dolayı biraz zordur. Ancak bu beslemede lehimleme işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır [3].

#### 2.3.4.5. Eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemesi

Bir eşdüzlemsel dalga kılavuzu (Coplanar Waveguide, CPW) beslemesi, mikrodalga monolitik entegre devreler (Microwave Monolithic Integrated Circuits, MMICs) için iletim hattı olarak tercih edilmektedir [3]. Mikroşerit yama anten ve eşdüzlemsel dalga kılavuzu, düzlemsel geometriye sahiptir. Bu nedenle, mikroşerit antenleri MMIC'ler ile entegre ederken mikroşerit antenlerin, eşdüzlemsel dalga kılavuzu ile beslenmesi tercih edilir. Bu besleme tekniği örneği, Şekil 2.18.'de görülmektedir. Burada eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemesi, mikroşerit antenin



toprak düzleminde oluşturulmuştur. Kuplajlama, slot vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu besleme uyarımı ile ilgili çeşitli konfigürasyonlar Şekil 2.23.(a) ve (b)'de görülmektedir. Şekil 2.23.(a)'da eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemesinin merkez iletkeni, kuplajlama slotunu ikiye bölmektedir. Şekil 2.23.(b)'de eşdüzlemsel dalga kılavuzu,  $L_s$  uzunluğunda bir slota dönüştürülmüştür. Şekil 2.23.(a)'da görülen eşdüzlemsel dalga kılavuzu ile yama arasındaki kuplaj indüktif, Şekil 2.23.(b)'de görülen eşdüzlemsel dalga kılavuzu ile yama arasındaki kuplaj kapasitifdir [3].



Şekil 2.23. Eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemeli mikroşerit anten

Bu kuplajlama düzenlemesi, açıklık kuplajlamasına benzemektedir. Bu iki kuplajlama arasındaki tek fark, açıklık kuplajlı mikroşerit antende toprak düzlemindeki slot, bir mikroşerit hat ile beslenmektedir. Eşdüzlemsel dalga kılavuzu beslemesinin bir avantajı, besleme yapısından kaynaklanan ısımanın ihmal edilebilir düzeyde olmasıdır [3].

Mikroşerit antenlerin çeşitli türlerdeki besleme yapılarının karşılaştırılması Çizelge 2.2.'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Çeşitli türlerdeki besleme yapılarının karşılaştırılması

Karakteristikler	Koaksiyel Prop Besleme	İşima Yapan Kenar Kuplajlı	İşima Yapmayan Kenar Kuplajlı	Boşluk Kuplajlı Mikroşerit Besleme	İnset Mikroşerit Besleme	Yakınlık Kuplajlı Besleme	Açıklık Kuplajlı Besleme	Eşdüzlensel Dalga Kılavuzu
Konfigürasyon	Eşdüzlensel Olmayan	Eşdüzlensel	Eşdüzlensel	Eşdüzlensel	Eşdüzlensel	Düzlensel	Düzlensel	Düzlensel
İstenmeyen besleme ışması	Çok	Az	Az	Çok	Çok	Çok	Çok	Az
Polarizasyon saflığı	Zayıf	İyi	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Zayıf	Mükemmel	İyi
Üretim kolaylığı	Delme ve lehimleme gerekli	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay	Hizalama gerekli	Hizalama gerekli	Hizalama gerekli
Dayanıklılık	Lehimlemeden dolayı zayıf	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	İyi	İyi	İyi
Empedans uyumlandırma	Kolay	Zayıf	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant genişliği (empedans uyumlandırma ile erişilmiş)	%2-5	%9-12	%2-5	%2-5	%2-5	13% [kitap.ref30]	%21 [kitap.ref33]	%3 [kitap.ref39,40]

### 2.3.5. Mikroşerit Antenlerin Önemli Parametreleri

#### 2.3.5.1. Geri dönüş kaybı

Geri dönüş kaybı (Return Loss,  $S_{11}$  parametresi), bir antenin en önemli parametresidir. Bu parametre, empedans uyumu ve gücün maksimum transferi ile ilişkilidir ve kaynaktan antene gelen gücün ( $P_{giriş}$ ) yansıyan güce oranını ( $P_{yansıyan}$ ) göstermektedir. Bu ifade, Eşitlik 2.3.'te verilmiştir.

$$RL = 10 \log_{10} \frac{P_{yansıyan}}{P_{giriş}} \quad (2.3)$$

İyi bir güç güc transferi için  $\frac{P_{yansıyan}}{P_{giriş}}$  oranının düşük olması gerekmektedir.

Geri dönüş kaybının farklı matematiksel ifadeleri, Eşitlik 2.4.-2.6. arasında verilmiştir.

$$RL = -20 \log_{10} |\Gamma| \quad (2.4)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right| \quad (2.5)$$

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{z_L - z_0}{z_L + z_0} \right| \quad (2.6)$$

Burada  $\Gamma$ , yansıma katsayısını;  $VSWR$ , gerilim duran dalga oranını (Voltage Standing Wave Ratio);  $z_L$  yük empedansını ve  $z_0$ , antene bağlanan iletim hattının karakteristik empedansı temsil etmektedir.

### **2.3.5.2. Gerilim duran dalga oranı (voltage standing wave ratio, VSWR)**

Antenin verimli bir şekilde çalışabilmesi için verici sistem ile anten arasında maksimum güç transferi gerçekleşmelidir. Bu, sadece giriş empedansı ile vericinin empedansı arasında uyum sağlandığı zaman mümkündür. Antenin verimli bir şekilde performans gösterebilmesi için çeşitli konfigürasyonlar hazırlansa dahi, gücün bir kısmı duran dalga olarak bulunacaktır. Bu, gerilim duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) ile karakterize edilir.

VSWR'nin matematiksel ifadesi:

$$VSWR = \frac{V_{maksimum}}{V_{minimum}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.7)$$

olarak verilmiştir. Yansıma katsayısı 0 ile 1 arasında olduğuna göre VSWR değeri 1 ile  $\infty$  arasında değişmektedir. Pratik tasarımlar için anten ile besleme arasında empedans uyumunun yüksek olması, VWSR değerinin 2'den küçük olması yeterli olarak kabul edilmiştir.

### **2.3.5.3. Yönlülük ve kazanç**

Yönlülük, bir antenin verilen bir yöndeki yönlülüğü, o yöndeki ışıma güç yoğunluğunun, antenin bütün yönlerdeki ışıma güç yoğunluğunun ortalamasına oranıdır. Burada ışıma güç yoğunluğunun, anten tarafından yayılan toplam gücün  $4\pi$ 'ye bölümü olduğuna dikkat edilmelidir. Yönlülük her zaman 1'den büyüktür.

Bir antenin kazancı, verimlilik ile yönlülüğün çarpımı ile belirlenmektedir. Antenin kazancı ifadesi:

$$G = eD \quad (2.8)$$

olarak verilmektedir. Burada  $e$ , antenin verimini ve  $D$ , antenin yönlülüğünü temsil etmektedir. Verim, 0 ile 1 arasında değiştiğinden dolayı kazanç en fazla yönlülüğe eşit olabilmektedir.

#### **2.3.5.4. Verim ve kalite faktörü**

Bir yama anten için verim, antenin elektromanyetik dalgaya dönüştürdüğü enerjinin, antene verilen enerjiye oranı olarak tanımlanabilir. Dielektrik kaybı, iletim kaybı, yansıma kaybı, polarizasyon kaybı ve herhangi bir yükte dağılan güç antenin verimini etkileyen faktörlerdir.

Işıma veriminin genel ifadesi:

$$e = \frac{P_{ışma}}{P_{giriş}} \quad (2.9)$$

olarak verilmiştir. Burada  $P_{ışma}$ , antenden ışıyan gücü ve  $P_{giriş}$ , antene verilen gücü temsil etmektedir. Verim, ayrıca, kalite faktörü  $Q$  cinsinden aşağıdaki şekilde verilebilir [1].

$$e = \frac{1/Q_{ışma}}{1/Q_{toplaml}} = \frac{Q_{toplaml}}{Q_{ışma}} \quad (2.10)$$

Buraya  $Q_{toplaml}$ , toplam kalite faktörünü ve  $Q_{ışma}$ , ışıma kayıplarından dolayı oluşan kalite faktörünü temsil etmektedir. Toplam kalite faktörü ifadesi:

$$\frac{1}{Q_{toplam}} = \frac{1}{Q_{ışıma}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} \quad (2.11)$$

Burada  $Q_c$ , iletken kayıplarından kaynaklanan kalite faktörünü;  $Q_d$ , dielektrik kayıplarından kaynaklanan kalite faktörünü ve  $Q_{sw}$ , yüzey dalgalarından kaynaklanan kalite faktörünü temsil etmektedir. Mikroşerit antenlerin büyük kısmının verimi, %80 – 90 arasındadır.

Kalite faktörünün yaklaşık hesaplanması için kullanılan formüller [1]:

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (2.12)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.13)$$

$$Q_{ışıma} = \frac{2\omega \epsilon_r K}{hG_t/l} \quad (2.14)$$

olarak verilmişlerdir. Burada  $h$ , alttaşın yüksekliğini;  $f$ , rezonans frekansını;  $\omega$ , açısal frekans;  $\tan \delta$ , alttaşın kayıp tanjantını;  $\sigma$ , iletkenlerin iletkenliğini ve  $G_t/l$ , birim uzunluk başına toplam iletkenliği ifade etmektedir.  $TM_{010}$  baskın modunda çalışan bir dikdörtgen mikroşerit açıklık anten için [1],

$$K = \frac{L}{4} \quad (2.15)$$

$$\frac{G_t}{l} = \frac{G_{ışıma}}{W} \quad (2.16)$$

olmaktadır. Antenin toplam verimi, yansıma verimi,

$$e = e_r e_c e_d \quad (2.17)$$

olarak yazılabilir [1]. Burada  $e$ , toplam anten verimini;  $e_r$ , yansıma verimini;  $e_c$  iletim verimini ve  $e_d$  dielektrik verimini temsil etmektedir. Yansıma verimi,

$$e_r = 1 - |\Gamma|^2 \quad (2.18)$$

olarak ifade edilmektedir.

### **2.3.5.5. Bant genişliği**

Bant genişliği, anten performansının en iyi olduğu üst ve alt frekanslar arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır [1]. Geniş bant antenler için bant genişliği, üst frekansın alt frekansa oranı olarak elde edilirken dar bantlı antenler için bant genişliği, yüzde olarak üst frekans ile alt frekans arasındaki farkın merkez frekansa oranı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$BW_{geniş\ bant} = \frac{f_{üst}}{f_{alt}} \quad (2.19)$$

$$BW_{dar\ bant} (\%) = 100x \left[ \frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_{merkez}} \right] \quad (2.20)$$

### **2.3.6. Mikroşerit Anten Analiz Yöntemleri**

Mikroşerit antenlerin analizi için birkaç metot mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanlar, mikroşerit antenin bir iletim hattı ya da iletim hattının parçası olarak kabul edilerek analizinin yapılmasına imkân tanıyan iletim hattı modeli (Transmission Line Model, TLM) [23] ile yamanın dielektrik yüklü boşluk olarak kabul edilerek analizinin yapılmasına imkan tanıyan boşluk (Cavity Model) modelidir [1-4].

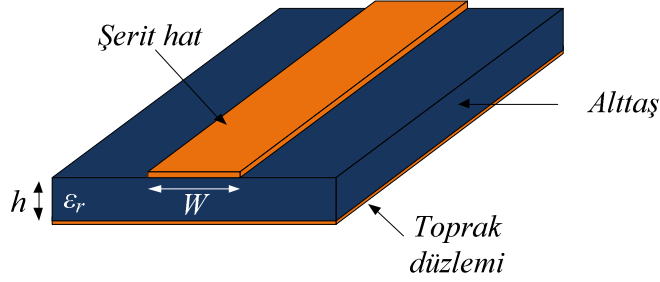
İletim hattı modeli, kullanımı kolay olan bir modeldir. Bu model aracılığı ile fiziksel açıklama iyi yapılabilir ancak model, daha az doğruluğa sahiptir. Kuplajlamayı modellemek oldukça zordur. Eğer iletim hattı modelini boşluk modeli ile karşılaştırıldığında iletim hattı modeli, boşluk modeline göre, daha doğru fakat daha karmaşıktır.

#### **2.3.6.1. İletim hattı modeli (transmission line model, TLM)**

İletim hattı modeli, mikroşerit anten çalışmaları için en kolay yoldur. Bu metotta mikroşerit anten,  $L$  uzunluğundaki düşük empedanslı iletim hattı tarafından

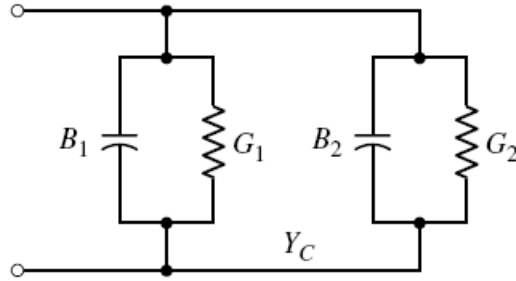
iki slotlu olacak şekilde ayrılmış olarak temsil edilmektedir. Bu model kullanılarak elde edilen sonuçlar, diğer metotlarla karşılaştırıldığında, en iyi sonuçlar değildir ancak model, anten tasarımında kullanılabilir yeterliliktedir [3].

İletim hattı modelinin açıklamasında kullanılacak olan anten, Şekil 2.24.'te verilmiştir.



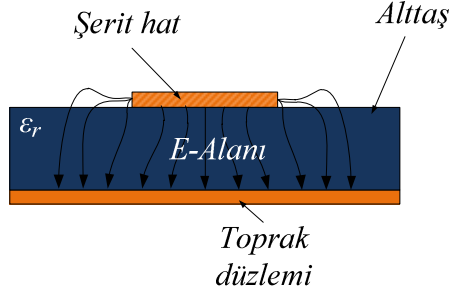
Şekil 2.24. İletim hattı

Verilen anten için iletim hattı modeli Şekil 2.25.'te görülmektedir. Işıma boşlukları, düşük empedanslı iletim hattı olarak modellenmektedir [23].



Şekil 2.25. İletim hattı modeli

Antendeki elektrik alan çizgilerinin çoğu alttaş içerisinde oluşurken çok az bir kısmı alttaştan havaya çıkmaktadır. Alttaşdaki çizgiler ile havadaki çizgilerin faz hızlarının farklı olmasından dolayı iletim hatları, TEM modunda iletimi desteklememektedir [3]. Elektrik alan çizgilerinin bir kısmının alttaş içerisinde, bir kısmının da havada yayılmasından dolayı dielektrik sabitinden farklı olarak etkin dielektrik sabiti ( $\epsilon_{reff}$ ) hesaplanmalıdır. Etkin dielektrik sabiti, alttaşın dielektrik sabitinden biraz daha küçük bir değere sahiptir.

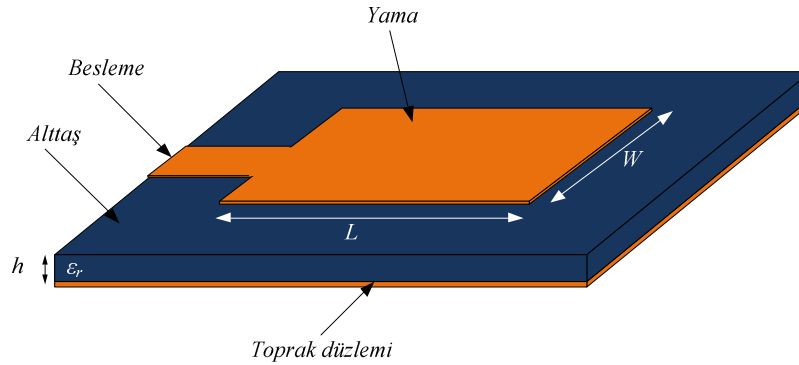


Şekil 2.26. İletim hattı modeline göre bir mikroşerit antende elektrik alan çizgileri

Etkin dielektrik sabiti [30],

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}} \quad (2.21)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada  $\epsilon_r$ , etkin dielektrik sabitini;  $h$ , dielektrik alttaşın yüksekliğini ve  $W$ , yamanın genişliğini temsil etmektedir.  $L$  uzunluğunda,  $W$  genişliğinde yamaya ve  $h$  yüksekliğinde alttaşa sahip bir dikdörtgen mikroşerit anteni göz önüne alalım.

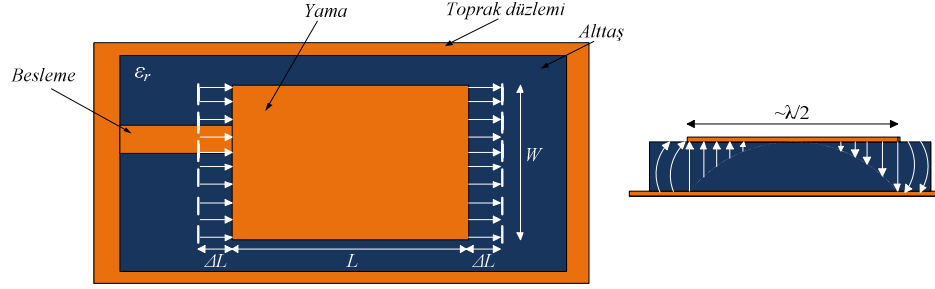


Şekil 2.27. Mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen mikroşerit anten

Antenin analizi için anten,  $TM_{10}$  gibi temel modda çalışıyor kabul edilirse, yama uzunluğu, dielektrik ortamdaki dalga boyunun ( $\lambda_d$ ) yarısından az olacak şekilde seçilmelidir. Aynı zamanda uzunluk,  $\lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$  değerine eşit olmalıdır. Burada  $\lambda_0$ , serbest uzay dalga boyunu temsil etmektedir.



Mikroşerit yama anten, daha önce söylendiği gibi,  $L$  uzunluğunda bir iletim hattı ile ayrılmış iki slota sahiptir ve her iki ucu da açık devredir. Bu yüzden slotlarda gerilim en yüksek ve akım en düşük değerdedir. Kenarlardaki alanların teğet ve normal bileşenleri toprak düzlemine göre çözülmemektedir.



(a)

(b)

Şekil 2.28. (a) Mikroşerit antenin kenar uzaması ve (b) elektrik alan çizgileri

Şekilden görüldüğü gibi, alan çizgilerinin bir kısmı altta içerisinde kalırken bir kısmı havaya yayılmaktadır. Normal bileşenler birbirini yok ederken teğet bileşenler birbirlerini destekleyerek yapı yüzeyinde maksimum ışımaya sağlamaktadır. Yama genişliği boyunca saçak alanlar, ışımaya yapan boşluklar olarak alınmaktadır ve anten yaması, elektriksel olarak, tasarımdan biraz daha uzun görünmektedir. Bundan dolayı anten uzunluğu değişmektedir. Yama boyundaki uzama  $\Delta L$  ile gösterilmektedir. Yama boyundaki uzamanın ve bunun yama boyuna etkisini gösteren  $L_{etkin}$  değerinin matematiksel ifadeleri [31]:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.22)$$

$$L_{eff} = L + 2\Delta L \quad (2.23)$$

yaklaşık olarak verilmiştir. Belirli bir rezonans frekansına göre yama uzunluğunun hesabı,

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.24)$$

olarak verilmiştir. Mikroşerit yama anten göz önüne alınır,  $TM_{mn}$  modu için antenin rezonans frekansı [1],

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_{reff}}} \sqrt{\left[\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{W}\right)^2\right]} \quad (2.25)$$

olarak verilmiştir. Burada,  $m$  ve  $n$ , mikroşerit yama antenin çalışma modunu temsil etmektedir.  $TM_{10}$  modunda rezonans frekansı denklemi [1],

$$f_0 = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.26)$$

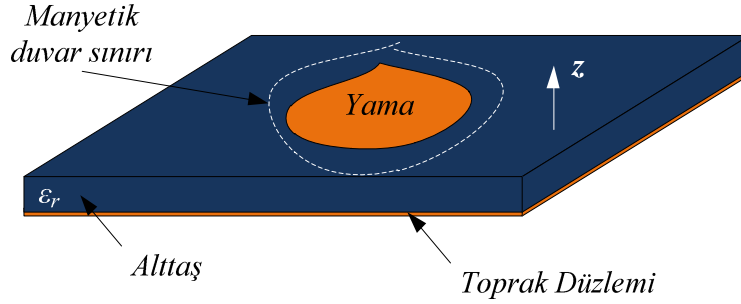
olmaktadır. Kenar uzamasını hesaba katmak için  $L$  yerine  $L_{eff}$  yerleştirildiğinde denklem,

$$f_0 = \frac{c}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.27)$$

olur.

### **2.3.6.2. Boşluk modeli (cavity model)**

Mikroşerit antenlerin analizinin yapılmasında boşluk modeli, mikroşerit yama ile toprak düzlemi arasındaki bölgenin, elektrik iletkenlerinin tavan ile tabanları ve Şekil 2.29.'da görüldüğü gibi iletkenin kenarları boyunca manyetik duvarlarla sınırlandırılmış rezonans boşluğu varsayımı temeline dayanmaktadır [3].

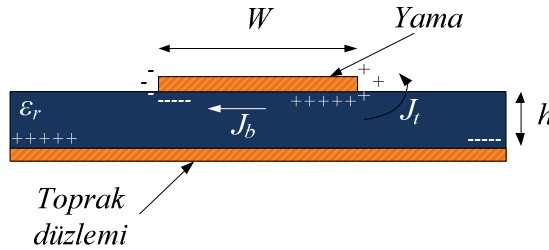


Şekil 2.29. Mikroşerit yama antenin manyetik duvar modeli

Yukarıdaki varsayım, aşağıdaki gözlemleri temel almaktadır:

1. Boşluk ile ilişkili bölgede,  $E$ 'nin  $z$  yönündeki bileşeni ( $E_z$ ) ve  $H$ 'ın  $x$  ve  $y$  yönlerindeki bileşenleri ( $H_x$ ,  $H_y$ ) olmak üzere sadece üç alan bileşen mevcuttur.
2. Alttaş yüksekliğinin ( $h$ ) çok küçük olmasından dolayı ( $h \ll \lambda$ ), iç bölgedeki alan, bütün frekanslar için,  $z$  eksenini boyunca değişmemektedir.
3. Mikroşerit yamadaki elektrik akımı, yamanın kenarının herhangi bir noktasında dik bileşene sahip değildir.

Boşluktaki alanların hesaplamalarına geçmeden önce boşluk modelinin mekanizmasının incelenmesi faydalı olacaktır. Mikroşerit antenin Şekil 2.30.'daki gibi olduğu varsayalım [3].



Şekil 2.30. Mikroşerit antende yük dağılımı ve akım yoğunluğu

Mikroşerit anten bir mikrodalga kaynağına bağlandığında, yük dağılımı, şekilde görüldüğü gibi, antenin üst ve alt düzlemlerine yerleşecektir. Yük dağılımı itici ve çekici olmak üzere iki mekanizma ile kontrol edilmektedir. Çekici kuvvet, yama ve toprak düzlemindeki zıt işaretli yükler arasındadır. Bu kuvvet, yamanın altında, dielektrik içinde  $J_b$  akım yoğunluğu oluşturur. İtici kuvvet, aynı işaretli

yüklerin, yamanın altından yama kenarları boyunca yamanın üstüne doğru birbirini itmesiyle oluşur ve  $J_t$  akım yoğunluğunu oluşturur.

Mikroşerit antende  $W \gg h$  olduğu durumda çekici mekanizma baskın hale gelir ve yükler yamanın altında dielektrik alttaşı içerisinde toplanır. Bu durumda, yüksekliğin genişliğe oranının azalmasından dolayı akım akışı da azalacağından, kenar boyunca akım akışı ihmal edilebilir. Bu, kenarlardaki dört duvarın, idealde elektrik alanı ve manyetik alanı bozmayan mükemmel manyetik iletken yüzeyler olarak modellenmesine izin verir.

Daha önce, boşluk içindeki alanın,  $E_z$ ,  $H_x$  ve  $H_y$  olmak üzere üç bileşene sahip olduğundan bahsedilmişti. Bunlara göre dalga denklemi,

$$\nabla_x \nabla_x \vec{E} - k^2 \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{J} \quad (2.28)$$

$$\nabla^2 E_z + k^2 E_z = j\omega\mu_0 \hat{z} \cdot \vec{J} \quad (2.29)$$

olarak yazılabilir. Burada  $k^2 (= \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r)$  dalga numarasını;  $\vec{J}$ , elektrik akım yoğunluğunu;  $\hat{z}$  yama düzlemine dik olan birim vektörü temsil etmektedir.

Eşitlik 2.28.'in karşılanması yanı sıra Eşitlik 2.30. ve Eşitlik 2.31. ile verilen sınır koşullarının da sağlanması zorunludur.

Üst ve alt iletkenler için ifade:

$$\hat{n}_x \vec{E} = 0 \quad (2.30)$$

ve duvarlar için ifade:

$$\hat{n}_x \vec{H} = 0 \quad (2.31)$$

olmaktadır. Bu tanımlamalardan sonra iç alanların hesaplanması kolaydır. Ancak bu alanlar, iç alanların belirlenmesinde dış alanlar tarafından üretilen yükleme etkisinin dâhil edilmemesinden dolayı, sadece birinci derecede doğrudur. İç elektrik alan dağılımı, boşluğun öz fonksiyonları ( $\psi$ ) cinsinden elde edilebilir. Yama boşluğundaki elektrik alan,

$$E_z(x, y) = \sum_m \sum_n A_{mn} \psi_{mn}(x, y) \quad (2.32)$$

olmaktadır. Burada  $A_{mn}$ , elektrik alan mod vektörlerine veya öz fonksiyonlara karşılık gelen genlik katsayısıdır. Öz fonksiyonlar, Eşitlik 2.33. ve Eşitlik 2.34.'ün çözümüdür.

$$(\nabla^2 + k_{mn}^2) \psi_{mn} = 0 \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \psi_{mn}}{\partial n} = 0 \text{ (manyetik duvarlarda)} \quad (2.34)$$

Öz fonksiyonlar sadece yama iletkeninin şekline ve boyutlarına bağlıdır, alttaş parametrelerine bağlı değildir.

Eşitlik 2.32., Eşitlik 2.29.'da yerine yazılıp, eşitliğin iki tarafı  $\psi_{mn}^*$  ile çarpılırsa ve yama alanı üzerinden integrali alınırsa, genlik katsayıları Eşitlik 2.35.'de verildiği gibi elde edilir.

$$A_{mn} = \frac{j\omega\mu_0}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{\iint J_s \psi_{mn}^* ds}{\iint \psi_{mn} \psi_{mn}^* ds} \quad (2.35)$$

Buna göre alanlar,

$$E_z = j\omega\mu_0 \sum_m \sum_n \frac{1}{k^2 - k_{mn}^2} \frac{\iint J_s \psi_{mn}^* ds}{\iint \psi_{mn} \psi_{mn}^* ds} \psi_{mn} \quad (2.36)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{j\omega\mu_0} \hat{z} \times \nabla E_z \quad (2.37)$$

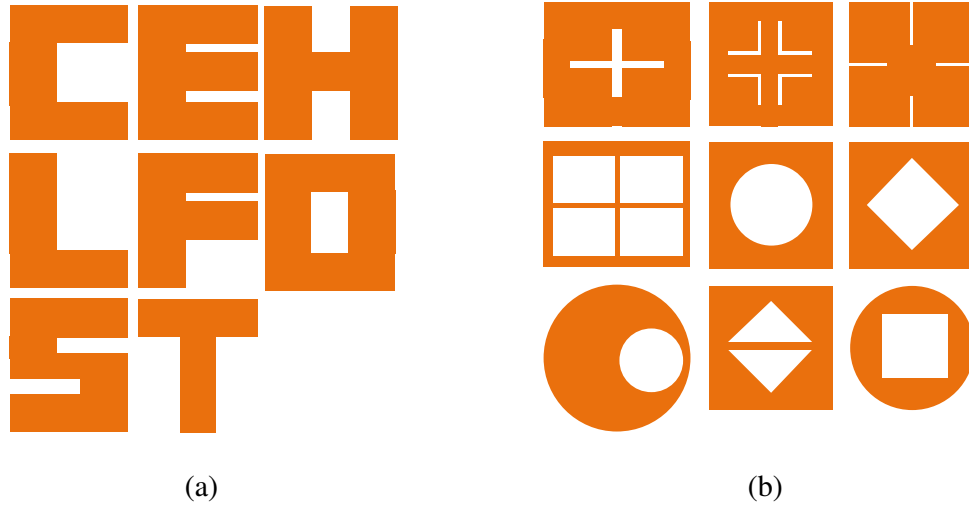
olmaktadır [3].

## 2.4. KOMPAKT MİKROŞERİT ANTENLER

Kompakt mikroşerit antenler (KMA), dikdörtgen, daire, üçgen gibi düzgün geometrilere sahip mikroşerit yama antenlerin ışına yapan düzlemlerinde çeşitli modifikasyonlar yapılması ile elde edilen, aynı frekans için mikroşerit yama antene oranla daha küçük boyutlara sahip olan mikroşerit antenlerdir. Genellikle düzgün geometrilere çeşitli slotlar açılması veya ekleme yapılması ile elde edilirler. Aynı boyutlara sahip antenlerden KMA, mikroşerit yama antene göre daha düşük frekansta çalışabilmektedir. Düşük frekans ve düşük boyut gerektiren uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ayrıca literatürde yer alan KMA çalışmaları gün geçtikçe artmaktadır [1-22].

Antende açılan boşlukların etkisiyle bant genişliği ve verim gibi anten performansını belirleyen parametreler de etkilenmektedir.

Literatürde yer alan çeşitli KMA geometrileri Şekil 2.31.'de verilmiştir.



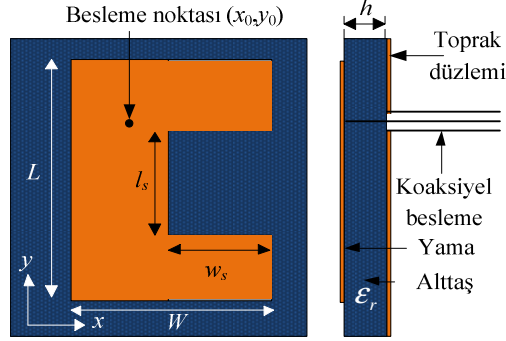
Şekil 2.31. (a) Harf benzeri şekilli KMA geometrileri (b) slot KMA geometrileri

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında ön çalışma olarak C ve H şekilli KMA'lar ile ilgili benzetimler ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde C ve H şekilli KMA'lar ile yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

### 2.4.1. C Şekilli KMA (CKMA)

C şekilli KMA (CKMA), Şekil 2.32.'de görüldüğü gibi, dikdörtgen mikroşerit yama antenin ışına yapan düzleminin, ışına yapmayan bir kenarında

$TM_{10}$  moduna göre  $l_s$  uzunluğu ve  $w_s$  genişliğinde boşluk açılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 2.32. C şekilli KMA (CKMA)

Literatürde, C şekilli KMA'lar için rezonans uzunluğu ifadesi elde eden çeşitli çalışmalar mevcuttur [17-20]. Deshmukh ve Kumar tarafından yapılan bu çalışmada [17] rezonans uzunluğunun hesaplanması için çeşitli aralıklar ve bu aralıklar için farklı formüller önerilmiştir. Belirlenmiş aralıklar için rezonans frekansı değerleri, simülasyonlar sonucu elde edilen değerlere yakın çıkmakla beraber üç farklı aralık için farklı denklemler kullanma zorunluluğu, hesaplama açısından zorluklar ortaya çıkarmaktadır. C şekilli KMA'nın rezonans uzunluğunun hesaplanması ile ilgili yaptığımız çalışmalar [18, 19], bu çalışma [17] ile karşılaştırılmıştır.

Önceki çalışmamızdan birinde [18], UHF bandında çalışan uygulamalar için C şekilli KMA (CKMA)'nın rezonans frekansının hesabında kullanılmak üzere yeni bir rezonans uzunluğu ifadesi elde edilmiştir. Farklı fiziksel ölçülere ve elektriksel parametreye sahip antenlerin benzetimleri, FDTD yöntemini [25] kullanan XFDTD [32] elektromanyetik benzetim programı ile yapılmıştır. Fiziksel ölçülere dayanan bir rezonans uzunluğu ifadesi, yapay arı koloni (Artificial Bee Colony, ABC) [33-37] algoritması yardımı ile elde edilmiştir. Elde edilen ifade, benzetimi yapılan 144 anten için %1.6'dan daha küçük hataya sahiptir.

Benzetimi yapılan antene ait parametreler Çizelge 2.3.'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Benzetimi yapılan CKMA'ya ait fiziksel ve elektriksel parametreler

	Yama boyutları (mm)					$\epsilon_r$	Benzetim sayısı
	$L$	$W$	$l_s$	$w_s$	$h$		
1. Anten grubu	30	20	7, 12, 15, 20	5, 7, 12, 15	1.6	2.33, 4.28, 9.8	48
2. Anten grubu	60	40	13, 20, 30, 40	9, 13, 20, 30	3	2.33, 4.28, 9.8	48
3. Anten grubu	90	60	20, 30, 40, 60	13, 20, 30, 40	6	2.33, 4.28, 9.8	48

$\tan\delta=0.001$ , Rogers/Doruid™ 5870

Benzetim sonucu elde edilen veriler kullanılarak, fiziksel ölçülere dayanan bir rezonans uzunluğu modeli oluşturulmuş ve parametreleri, ABC algoritması yardımı ile belirlenmiştir. Elde edilen ifade Eşitlik 2.38.'de verilmiştir [18].

$$L_C = 0.9(L + l_s) - 0.94l_s \left( \frac{l_s}{L} \right)^{0.74} + 2w_s \left( \frac{w_s}{W} \right) \quad (2.38)$$

Elde edilen rezonans uzunluğu ifadesi kullanılarak hesaplanan rezonans frekanslarının literatürde yer alan benzetim sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 2.4.'te verilmiştir [18].

Çizelge 2.4. C şekilli KMA için benzetim ve hesaplama sonucu elde edilen rezonans frekansı sonuçlarının karşılaştırması

Slot ölçüleri (mm)		Rezonans frekansları (GHz)					Yüzde hatalar (%)			
$l_s$	$w_s$	Benzetim		Hesaplama			[18]	[17]		
		[17]	[18]	#1	#2	#3		#1	#2	#3
5	5	1.562	1.657	1.502	1.630	—	6.090	3.841	4.353	—
10	10	1.445	1.497	1.398	1.408	—	3.577	3.253	2.561	—
15	15	1.286	1.334	1.309	1.241	—	3.729	1.788	3.499	—
20	20	1.130	1.178	1.231	1.111	1.002	4.258	8.938	1.681	11.327
25	25	0.991	1.035	1.164	1.008	0.928	4.442	17.457	1.715	6.357
40	30	0.899	0.924	—	0.893	0.856	2.759	—	0.667	4.783
5	30	0.929	0.963	—	1.029	0.904	3.625	—	10.764	2.691
10	30	0.887	0.938	—	—	0.896	5.746	—	—	1.015
2	30	0.964	0.982	—	—	0.910	1.917	—	—	5.602

( $L=60\text{mm}$ ,  $W=40\text{mm}$ ,  $h=1.59\text{mm}$ ,  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\tan\delta=0.001$ )

#1: [17] çalışmasındaki, C şekilli KMA için (1) numaralı denklem

#2: [17] çalışmasındaki, C şekilli KMA için (5) numaralı denklem

#3: [17] çalışmasındaki, C şekilli KMA için (7) numaralı denklem



Çizelge 2.4.'e bakıldığında, [17] için 3 farklı grupta 3 farklı rezonans frekansı hesaplamak gerekirken, bizim çalışmamızda tek bir rezonans frekansı hesabı yeterli olmaktadır. [17] için yüzde hata değerleri, grup sonlarına doğru yükselmektedir. Ancak bizim çalışmamızda, her grup için ortalama bir yüzde hata değeri mevcuttur.

Rezonans frekansının hesaplanmasında kullanılacak formül elde ettiğimiz çalışmada [18], elde edilen ifade ile hesaplanan rezonans uzunluğuna, yama uzaması denklemleri ile hesaplanan uzama miktarının da eklenmektedir. Ayrıca malzemenin dielektrik sabiti yerine etkin dielektrik sabitinin hesaplanması, rezonans frekansının hesaplanmasında birden fazla formülle işlem yapmayı gerektirmektedir. Birden fazla formül kullanılarak yapılması gereken karmaşık hesaplamalar, yaptığımız çalışma [19] ile tek formüle indirilerek kolaylaştırılmıştır. Tek formül ile yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen rezonans frekansı, gerçeğe oldukça yakındır ve literatürdeki çalışmalara [17] göre daha az hata değerine sahiptir.

Önceki çalışmadaki [18] aynı 144 CKMA benzetimi verileri kullanılarak elde edilen rezonans uzunluğu ifadesi, Eşitlik 2.39.'da verilmiştir [19].

$$L_{Ceff} = 0.351L + 0.5 \left( \frac{L + l_s}{\epsilon_r^{0.033}} \right) \left( \frac{W}{h} \right)^{0.08} + 2.922 w_s \left( \frac{w_s}{L} \right) - 0.436 l_s \left( \frac{l_s}{W} \right) \quad (2.39)$$

Elde edilen rezonans uzunluğu ifadesi kullanılarak hesaplanan rezonans frekanslarının, literatürde yer alan benzetim sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 2.5.'te verilmiştir [19].

**Çizelge 2.5. C şekilli KMA için benzetim ve hesaplama sonucu elde edilen rezonans frekansı sonuçlarının karşılaştırması**

Slot boyutları (mm)		Rezonans frekansları (GHz)							Yüzde hatalar (%)				
		Benzetim		Hesaplama					[19]		[17]		
$l_s$	$w_s$	[17]	[19]	[18]	[17]			[19]	[18]	[17]			
					#1	#2	#3			#1	#2	#3	
5	5	1.562	1.562	1.657	1.502	1.630	—	0.000	6.082	3.841	4.353	—	
10	10	1.445	1.426	1.497	1.398	1.408	—	1.315	3.599	3.253	2.561	—	
15	15	1.286	1.280	1.334	1.309	1.241	—	0.467	3.732	1.788	3.499	—	
20	20	1.130	1.136	1.178	1.231	1.111	1.002	0.531	4.248	8.938	1.681	11.33	
25	25	0.991	1.000	1.035	1.164	1.008	0.928	0.908	4.440	17.46	1.715	6.357	
40	30	0.899	0.890	0.924	—	0.893	0.856	1.001	2.781	—	0.667	4.783	
5	30	0.929	0.931	0.963	—	1.029	0.904	0.215	3.660	—	10.764	2.691	

10	30	0.887	0.911	0.938	—	—	0.896	2.706	5.750	—	—	1.015
2	30	0.964	0.946	0.982	—	—	0.910	1.867	1.867	—	—	5.602
Ortalama yüzde hata								1.001	4.018	7.055	3.605	5.296

$L=60$  mm,  $W=40$  mm,  $h=1.59$  mm,  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\tan\delta=0.001$

(—): Mevcut değil [desh]

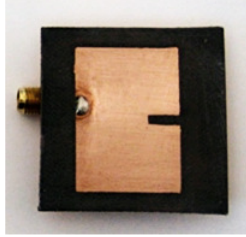
#1: [17] çalışmasındaki, C şekilli KMA için (1) numaralı denklem

#2: [17] çalışmasındaki, C şekilli KMA için (5) numaralı denklem

#3: [17] çalışmasındaki, C şekilli KMA için (7) numaralı denklem

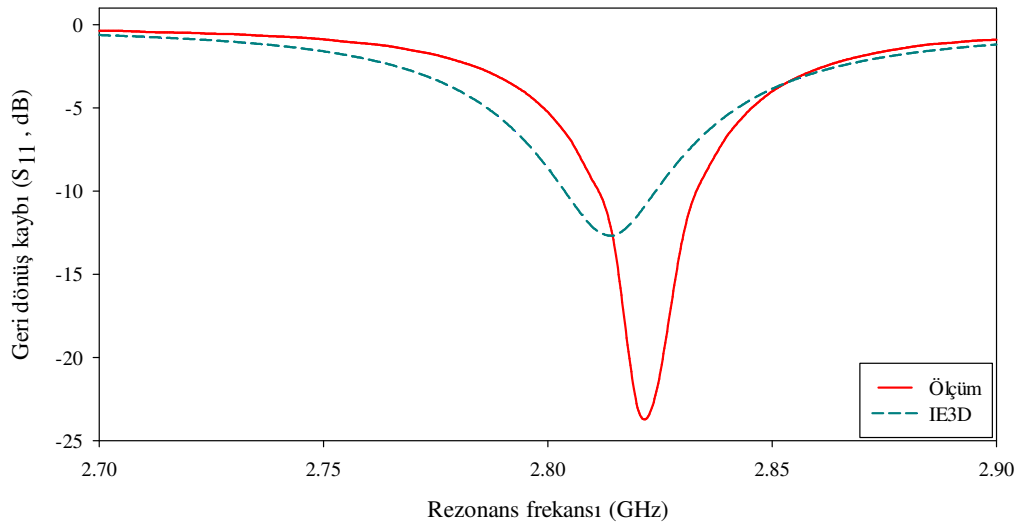
Çizelge 2.5. incelendiğinde, C şekilli KMA için elde edilen tek bir rezonans uzunluğu ifadesinin, gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tezin ön çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmaların birinde [19], elde edilen rezonans uzunluğu denklemi ile hesaplanarak tasarlanan CKMA'ya ait fotoğraf Şekil 2.33.'te verilmiştir.



Şekil 2.33. Gerçekleştirilen CKMA'nın fotoğrafı

Tasarlanan ve gerçekleştirilen bu anten için benzetim ve ölçüm sonucu geri dönüş kaybı grafiği Şekil 2.34.'te verilmiştir [19].



Şekil 2.34. Gerçekleştirilen CKMA'nın benzetim ve ölçüm geri dönüş kaybı grafiği

Gerçekleştirilen CKMA'nın ölçüm sonuçları ile benzetim ve hesaplama sonuçlarının karşılaştırması Çizelge 2.6.'da verilmiştir. Ayrıca, aynı dış boyutlara sahip bir dikdörtgen mikroşerit antenin benzetim sonucu da, slotun rezonans frekansına etkisini göstermek için elde edilerek tabloda verilmiştir [19].

Çizelge 2.6. Gerçekleştirilen CKMA'nın ölçüm sonuçları ile benzetim ve hesaplama sonuçlarının karşılaştırması

Yama ölçüleri (mm)				Rezonans frekansları (GHz)					Yüzde hatalar (%)			
				Ben.		Hesaplama						
$L$	$W$	$l_s$	$w_s$	[19]	[19]	[19]	[18]	[17]	[19]	[18]	[17]	
CCMA	30	20	3	7	2.81	2.822	2.828	2.857	2.642	0.19	1.24	6.4
RMA	30	20	—	—	3.27	—	—	—	—	—	—	—

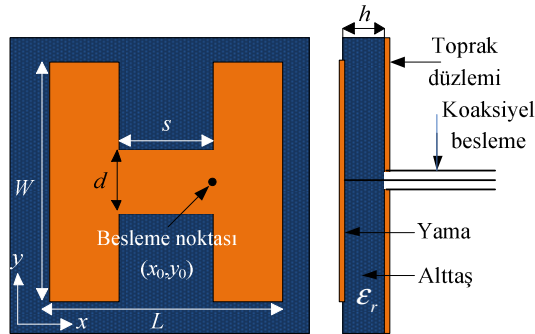
$h=1.57$  mm,  $\epsilon_r=2.33$ ,  $\tan\delta=0.0012$

(—): Mevcut değil

Çizelge 2.6.'da görüldüğü gibi kaynak [19]'da elde edilen rezonans uzunluğu ifadeleri, %0.193 hata ile ölçüme en yakın sonucu vermektedir. Aynı anten için, kaynak [17]'deki ifadeler kullanılarak hesaplanan rezonans frekansı ise %6.380 hataya sahiptir.

#### 2.4.2. H Şekilli KMA (HKMA)

H şekilli KMA, Şekil 2.35.'te görüldüğü gibi, dikdörtgen mikroşerit yama antenin ışıma yapan düzleminin,  $TM_{10}$  modunda ışıma yapmayan her iki kenarında  $s$  uzunluğu ve  $d$  genişliğinde birer boşluk açılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 2.35. H şekilli KMA (HKMA)

Önceki çalışmamızda [19], UHF bandında çalışan uygulamalar için H şekilli KMA (HKMA)'nın rezonans frekansının hesabında kullanılmak üzere yeni bir rezonans uzunluğu ifadesi elde edilmiştir. Farklı fiziksel ölçülere ve elektriksel parametreye sahip antenlerin benzetimleri, FDTD yöntemini [25] kullanan XFDTD [32] elektromanyetik benzetim programı ile yapılmıştır. Fiziksel ölçülere ve elektriksel parametreye dayanan bir rezonans uzunluğu ifadesi, yapay arı koloni (Artificial Bee Colony, ABC) [33-37] algoritması yardımı ile elde edilmiştir.

Benzetimi yapılan antenin parametreleri Çizelge 2.7.'de verilmiştir.

**Çizelge 2.7. Benzetimi yapılan HKMA'ların fiziksel ve elektriksel parametreleri**

	Yama boyutları (mm)					$\epsilon_r$	Benzetim sayısı
	$L$	$W$	$d$	$s$	$h$		
1. Anten grubu	3	2	6, 14, 22	6, 14, 22	1.59, 2.12	2.5, 4.5, 10.2	54
2. Anten grubu	6	4	10, 20, 30	6, 14, 22	1.59, 2.12	2.5, 4.5, 10.2	54
3. Anten grubu	9	6	10, 20, 30	10, 20, 30	1.59, 2.12	2.5, 4.5, 10.2	54
4. Anten grubu	9	6	12.5, 25, 37.5	12.5, 25, 37.5	1.59, 2.12	2.5, 4.5, 10.2	54

$\tan\delta=0.001$

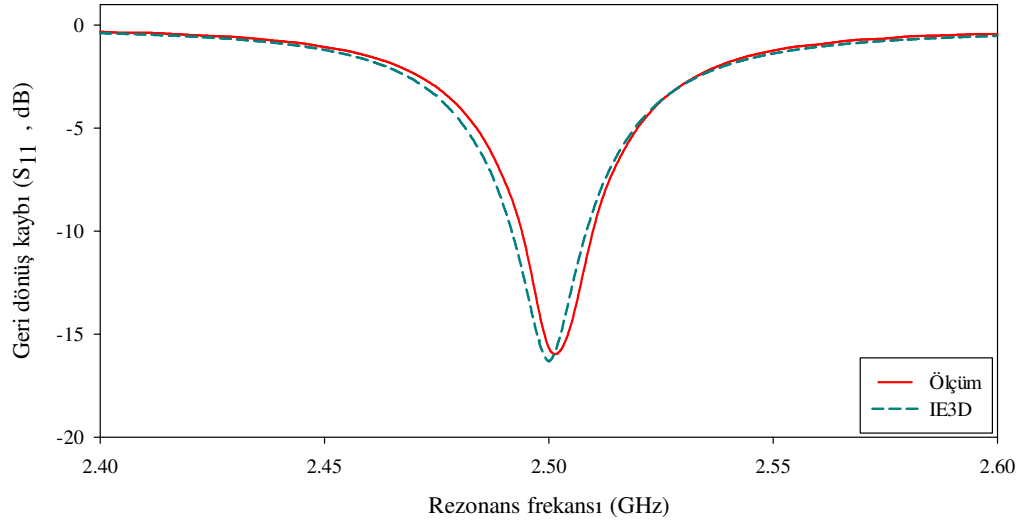
Benzetim sonucu elde edilen veriler kullanılarak parametreleri hesaplanan model, parametreler yerine yerleştirilerek Eşitlik 2.40.'ta verilmiştir [19].

$$L_{H_{eff}} = (0.912L - 0.643s) \left( \frac{s}{d} \right)^{0.437} + W \left( \frac{L}{d} \right)^{0.726} + \frac{h}{\epsilon_r} - 0.445L \left( \frac{W}{d} \right) \quad (2.40)$$

Elde edilen rezonans uzunluğu denklemi ile hesaplanarak tasarlanan HKMA'ya ait fotoğraf Şekil 2.36.'da ve geri dönüş kaybı grafiği Şekil 2.37.'de verilmiştir [19].



**Şekil 2.36. Gerçekleştirilen HKMA fotoğrafı**



Şekil 2.37. Gerçekleştirilen HKMA'nın benzetim ve ölçüm geri dönüş kaybı grafiği

Elde edilen rezonans uzunluğu ifadesi, antendeki elektriksel uzamayı ve etkin dielektrik sabiti değerini içinde bulundurduğundan, tek başına rezonans frekansının hesaplanmasında kullanılabilir. Bu ifade kullanılarak hesaplanan rezonans frekanslarının, literatürde mevcut olan benzetim sonuçları ile karşılaştırılması Çizelge 2.8.'de verilmiştir [19].

Çizelge 2.8. HKMA için benzetim ve hesaplama sonucu elde edilen rezonans frekansları sonuçlarının karşılaştırması

Yama boyutları (mm)				Rezonans frekansları (GHz)				Yüzde hatalar (%)		
				Benzetim		Hesaplama				
$L$	$W$	$d$	$s$	[15]	[19]	[20]	[17]	[19]	[20]	[17]
54.60	33	33	26.00	1.74	1.766	1.774	1.735	1.494	1.954	0.287
54.60	33	10	26.00	1.14	1.132	1.107	1.415	0.702	2.895	24.123
32.69	33	15	4.09	2.17	2.252	2.27	2.254	3.779	4.608	3.871
43.59	33	15	14.99	1.59	1.590	1.613	1.803	0.000	1.447	13.396
49.04	33	15	20.44	1.41	1.421	1.436	1.639	0.780	1.844	16.241
54.60	33	15	26.00	1.29	1.290	1.298	1.500	0.000	0.620	16.279
35.54	33	15	26.00	1.97	1.996	2.022	2.124	1.320	2.640	7.817
45.08	33	15	26.00	1.55	1.558	1.574	1.758	0.516	1.548	13.419
64.16	33	15	26.00	1.13	1.106	1.109	1.307	2.124	1.858	15.664
75.00	33	15	26.00	0.96	0.957	0.955	1.141	0.313	0.521	18.854
54.60	23	15	26.00	1.51	1.478	1.498	1.637	2.119	0.795	8.411
54.60	28	15	26.00	1.39	1.377	1.390	1.565	0.935	0.000	12.590
Ortalama yüzde hata								1.174	1.727	12.579

$h=1.59$  mm,  $\epsilon_r=2.5$ ,  $\tan\delta=0.001$

Çizelge 2.8.'den görüldüğü gibi, literatürde yer alan formüller ile hesaplanan rezonans frekansı değerlerinin ortalama yüzde hatası %12.579 gibi büyük bir değere sahipken, bu çalışmada elde edilen formül ile hesaplanan değerlerin ortalama yüzde hatası %1.174 olmaktadır. Bu hata değerlerine bakılarak, elde edilen ifadenin, UHF bandında çalışan HKMA'ların rezonans frekanslarının hesaplanmasında kullanılabileceği görülmektedir.

### **3. MATERYAL VE METOT**

Bu çalışmada, WLAN/WiMAX frekans bandında çalışan uygulamalarda kullanılmak üzere CST [38] ve IE3D [39] programları yardımı ile bu bantlarda çalışacak tek bir antenin tasarlanması, benzetimlerinin yapılması ve elde edilen en uygun tasarımın gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için WLAN ve WiMAX uygulamalarına yönelik literatürde yer alan mikroşerit anten tasarımları [1-14] incelenmiş ve bu bilgiler ışığında yeni bir anten tasarlanmıştır.

Bu tasarımın elde edilmesi için çok çeşitli anten geometrileri ve besleme şekilleri kullanılarak IE3D [39] yazılımı ile benzetimler yapılmıştır. İstenen özelliklere en yakın anten tasarımı üzerinde detaylı optimizasyon işlemleri yapılarak en uygun tasarım elde edilmiştir.

#### **3.1. CST**

Literatürde, yer alan çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılan programlardan biri CST Computer Simulation Technology firması tarafından üretilen CST Microwave Studio (CST)'dur. CST programı, 3 boyutlu çizim yapmaya olanak tanıyan bir arabirime sahiptir. Parametre kullanımına imkan tanınması, geometrilerin çizimi, düzenlemesi ve optimizasyonu konularında oldukça kolaylık sağlamaktadır. CST de, antenin geri dönüş kaybı, gerilim duran dalga oranı, Smith grafiği, ışınma örüntüsü, akım yoğunluğu gibi birçok hesaplamayı hızlı bir şekilde yapabilmektedir. Işınma örüntüsü ve akım yoğunluğu hesaplaması konusunda IE3D programının sıkıntı çıkarması, tez çalışmasında, IE3D'ye ek olarak CST programının da kullanılmasını gerekli kılmıştır.

#### **3.2. IE3D**

Mikroşerit antenlerin benzetimi konusunda yapılan birçok çalışmada [1-22], moment metodunu (MoM) [24] kullanan bir elektromanyetik benzetim programı olan IE3D paket programı kullanılmaktadır. IE3D yazılımı, antenin iki boyutlu bir tasarım arabiriminde tasarımının yapılmasına, anten elemanlarının özelliklerinin hızlı ve pratik bir şekilde belirlenmesine, beslemelerin kolaylıkla yapılmasına olanak sağlayan, çok çekirdekli sunucularda bütün çekirdekleri kullanarak daha etkin ve hızlı çözümleme yapabilen, antenin geri dönüş kaybı, gerilim duran dalga oranı,

Smith grafiği, ışınma örüntüsü, akım yoğunluğu gibi birçok hesaplamayı yapabilen bir programdır. Tasarlanan bir antenin istenilen frekanslarda çalışabilmesi için çeşitli optimizasyon yöntemleri uygulayabilmekte, MATLAB [40] gibi bir hesaplama programında yazılan herhangi bir optimizasyon algoritması ile antenin simülasyonunu yapabilmektedir. Üstün özelliklerinin ve avantajlarının yanında, sonlu toprağa sahip antenlerin ışınma örüntüsü ve akım yoğunluğu hesaplamasında elverişli olmamaktadır.

Bu çalışmada benzetim ve optimizasyon çalışmaları IE3D yazılımı aracılığı ile yapılmıştır. Işınma örüntüsü ve akım yoğunluğu hesaplamalarında sorun çıkarmasından ve hesaplama yapmamasından dolayı, bu hesaplamalarda CST programının kullanılmasını gerekli kılmıştır.

### **3.3. MATLAB**

Anten ölçümleri Agilent E5071B ENA Series RF Network Analyzer aracılığı ile yapılmıştır. Bu cihaz bilgisayara USB aracılığı ile bağlanabilmektedir. Ölçüm sonuçlarını almak için cihaza çeşitli komutların gönderilmesi gerekmektedir. Visual Basic [41], Delphi [42], Microsoft Excel [43] gibi çeşitli programlar aracılığı ile bu işlem yapılabilir. Bu tez çalışması sırasında, anten ölçümlerinin bilgisayara aktarılması için komutlar, MATLAB'da yazılan kodlar aracılığı ile gönderilmiştir. Gelen veriler işlenerek, grafik çizim programına aktarılmıştır.

MATLAB programı, her türlü amaca yönelik araç kutularına sahip bir hesaplama programıdır. Kod yazıp çalıştırabilecek bir arabirime sahiptir. Bu çalışmada MATLAB kullanımının amacı, Instrument Control Toolbox araç kutusu aracılığı ile network cihazına kolaylıkla bağlantı yapılabilmesi olmasıdır. Alınan verilerin bir hesaplama işleminden geçirilmesi gerektiğinden, MATLAB bu konuda büyük kolaylıklar sağlamıştır.

### **3.4. ANTEN TASARIMI**

#### **3.4.1. Yama Parametrelerinin Seçilmesi**

Antenin tasarımı aşamasında parametrelerin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Antenin çalışacağı frekanslar, dielektrik alttaş özellikleri, besleme çeşidi, bu anten için önemli parametrelerdir.



Antenin çalışma frekansları, WLAN (2.4 GHz, 3.7 GHz, 5.15-5.25/5.25-5.35/5.49-5.71/5.745-5.825 GHz) ve WiMAX (2.5 GHz, 3.5 GHz, 5.8 GHz) standartlarına uygun olarak belirlenmiştir.

Kullanılacak alttaş olarak, Rogers firmasından üniversite programı çerçevesinde ücretsiz olarak temin edilen, dielektrik sabiti 2.33, kayıp tanjantı 0.0012 ve kalınlığı 1.575 mm olan Rogers RT/Duroid® 5870 ürünü tercih edilmiştir.

Besleme çeşidi olarak mikroşerit hat besleme; yapı olarak, yapılan benzetim çalışmaları neticesinde, monopollu olmayan yapılara göre daha yüksek bant genişliğine ve ışınım yapan kısmın toprak düzlemi ile arasındaki mesafenin değişmesiyle antenin performansının iyileştirilebilmesine olanak sağlayan monopollu yapı tercih edilmiştir.

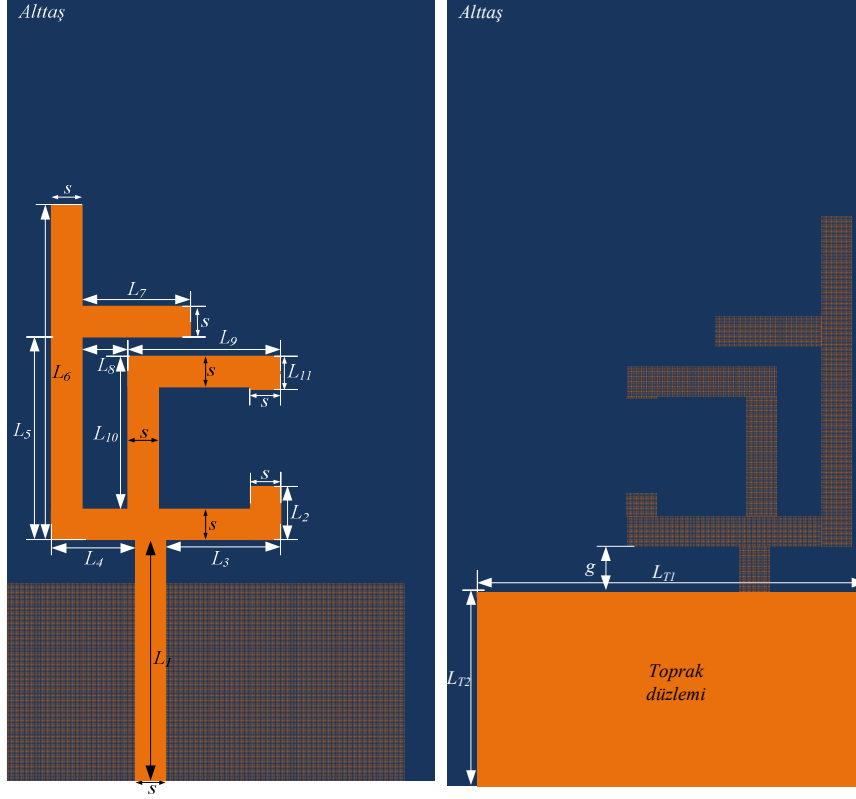
### **3.4.2. WLAN/WiMAX Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı**

Anten tasarımının ilk aşamasında tasarım parametreleri ve antenin istenen frekansları sağlayabilmesi için sahip olması gereken geometri, çeşitli literatür taramaları sonucu belirlenmiştir. Antenin, ilgili frekansları sağlaması için 3 koldan oluşmasına karar verilmiş ve bu kolların uzunlukları, farklı uzunluklar için yapılan benzetimler sonucuna göre elde edilen Eşitlik 3.1. yardımı ile belirlenmiştir.

$$L_{r1} = \frac{1}{3.86} \frac{c}{f} \quad (a)$$
$$L_{r2} = \frac{1}{5.41} \frac{c}{f} \quad (b)$$
(3.1)

Eşitlik 3.1.'de  $L_{r1}$  ile verilen ifade, 2.4 GHz, 2.5 GHz ve 3.5/3.7 GHz frekansında ışınım yapacak elemanlara ilişkin;  $L_{r2}$  ile verilen ifade ise 5.2 GHz, 5.5 GHz ve 5.8 GHz frekansında ışınım yapacak elemana ilişkin rezonans uzunluğu değerini yaklaşık olarak hesaplamayı sağlamaktadır.

IE3D programında tasarlanan anten ve tasarım aşamaları Ek-1'de verilen antenin geometrisi Şekil 3.1.'de, Eşitlik 3.1. yardımı ile hesaplanan anten ölçüleri ise Çizelge 3.1'da verilmiştir.



(a) Üst görünüş

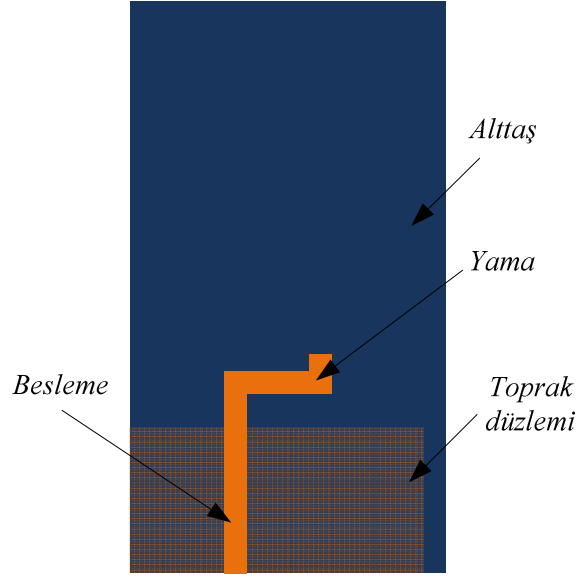
(b) Alt görünüş

Şekil 3.1. Tasarlanan anten

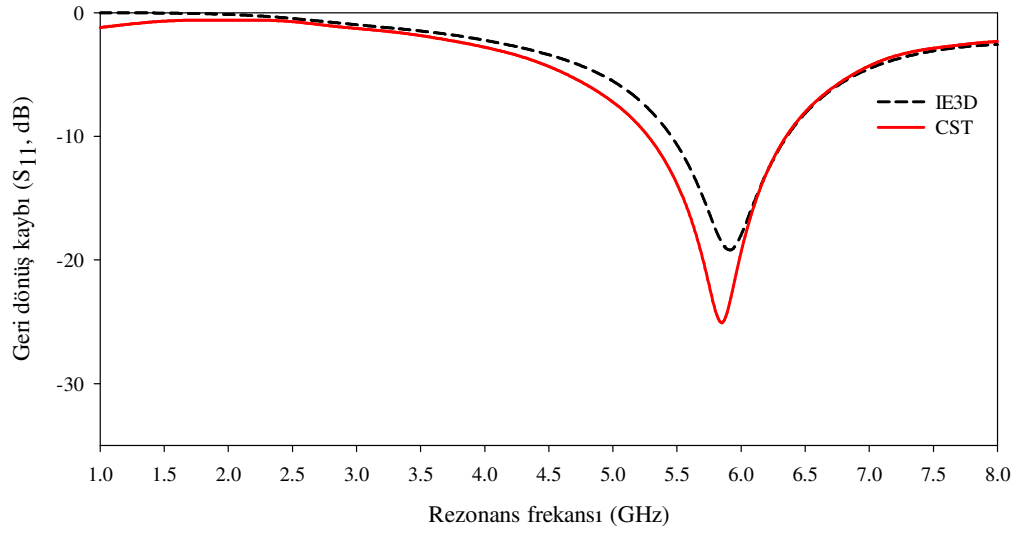
Çizelge 3.1. Tasarlanan antenin ölçüleri (mm)

$s$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$	$L_7$	$L_8$	$L_9$
2	16	3.5	7.5	5.5	13.925	22	7.1	3	10
$L_{10}$	$L_{11}$	$L_{T1}$	$L_{T2}$	$g$					
10	2.25	26	13	3					

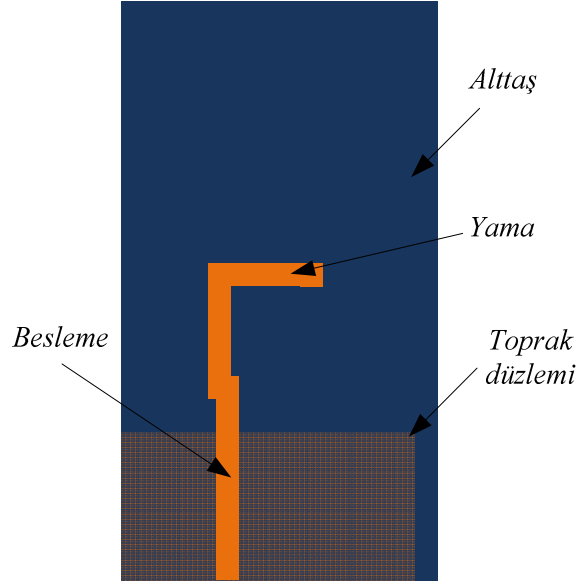
Antenin kolların ayrı ayrı geometrileri ve benzetim sonucu elde edilen geri dönüş grafikleri Şekil 3.2.-3.9.'da verilmiştir.



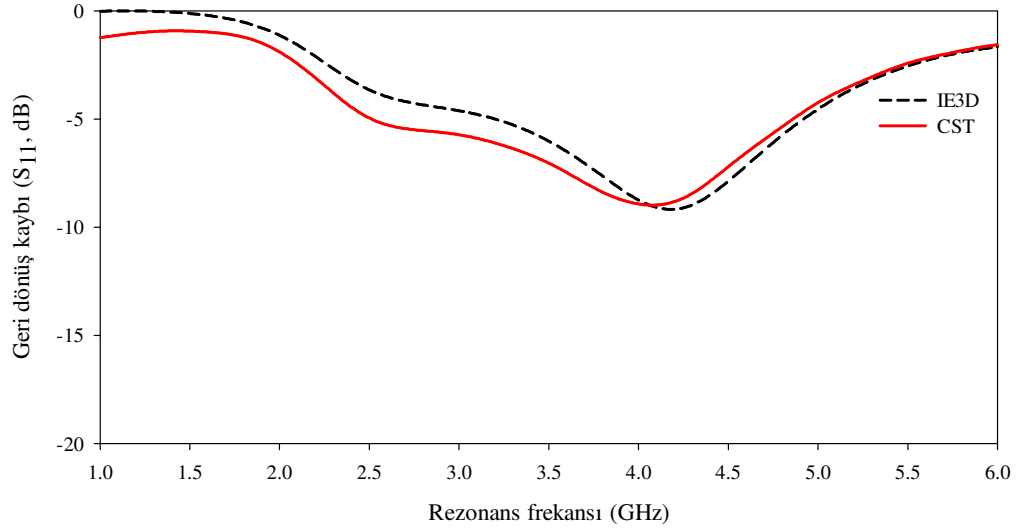
Şekil 3.2. 5.2 GHz – 6 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı



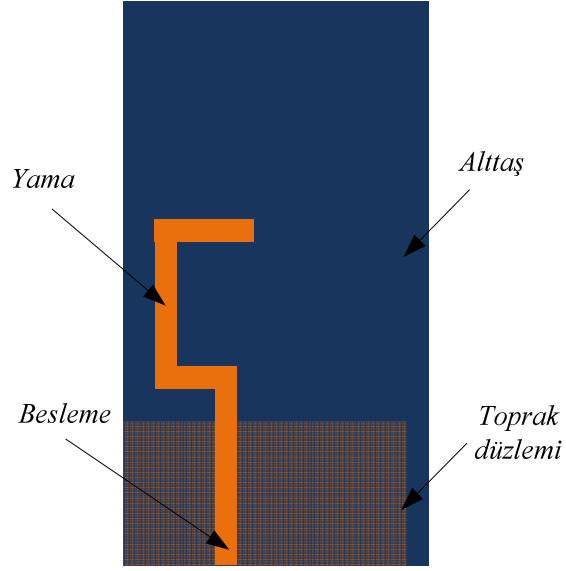
Şekil 3.3. 5.2 GHz – 6 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu



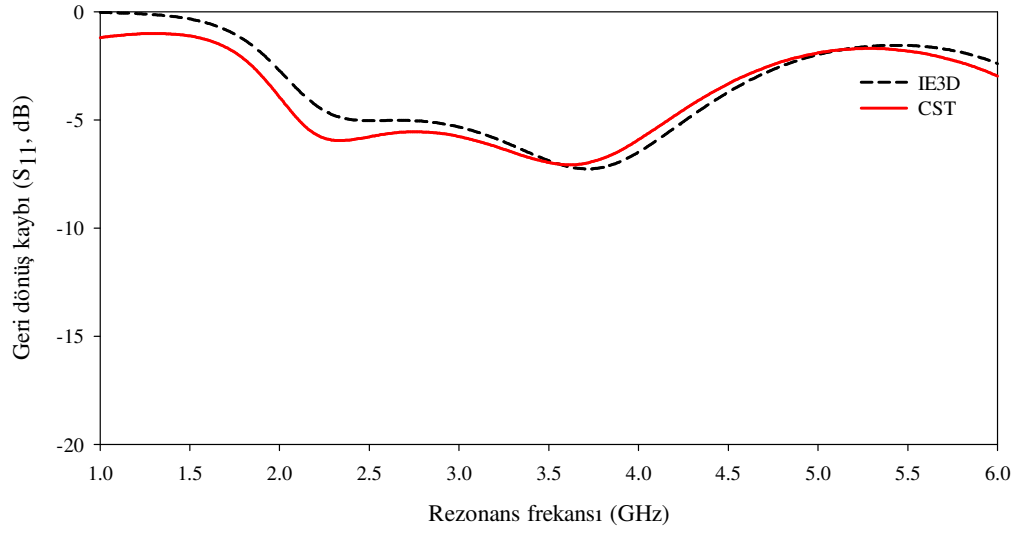
Şekil 3.4. 3.5 – 3.7 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı



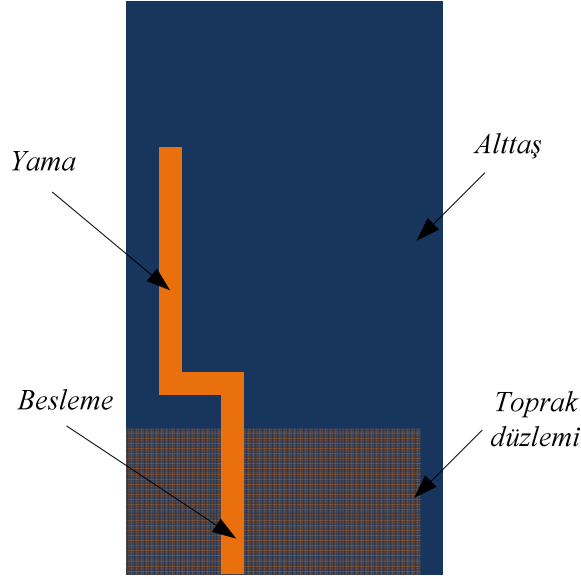
Şekil 3.5. 3.5 – 3.7 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu



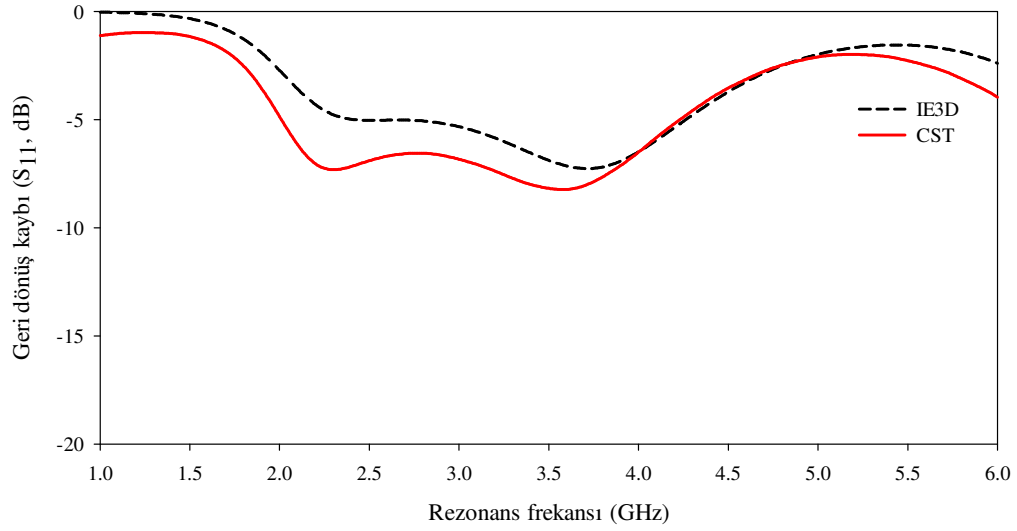
Şekil 3.6. 2.4 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı



Şekil 3.7. 2.4 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu



Şekil 3.8. 2.5 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanı



Şekil 3.9. 2.5 GHz frekans bandını sağlayan anten elemanının benzetim sonucu

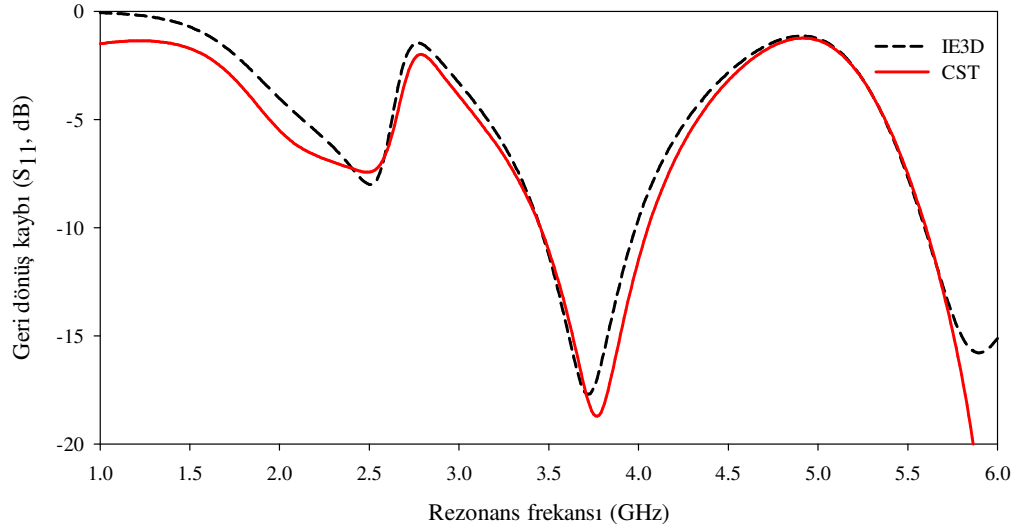
Antende yer alan kolların çalıştıkları frekanslar, ayrı ayrı benzetimler sonucunda şekillerde görülmektedir. Her kol, uzunluğuna göre ilgili frekanslarda rezonansa girmektedir. Bütün ışıma elemanları birleştirilerek oluşturulan antenin geri dönüş grafiği, kolların birbirlerini etkilemelerinden dolayı, ayrı ayrı grafiklerin toplamından farklıdır. Oluşturulan antenin geri dönüş grafiği, hedeflenen frekansları yaklaşık olarak sağlamaktadır.

### 3.4.2.1. Tasarlanan antenin benzetim sonuçları

#### *Geri dönüş kaybı grafiği*

Anten tasarımı ve benzetimler, IE3D ve CST programlarında yapılmıştır. CST programında uyartım kaynağı olarak Gauss sinyali seçilmiştir. Benzetim ile ilgili diğer ayarlar, varsayılan ayarlarda bırakılmış, herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Tasarlanan antenin IE3D ve CST programları ile benzetimleri sonucu elde edilen geri dönüş kaybı grafikleri Şekil 3.10.'da verilmiştir. Bir antenin, istenen frekans bantlarında verimli çalışıp çalışmayacağı, o frekans bandında, yansıyan dalganın iletilen dalgaya oranı olan geri dönüş kaybı değerinin -10'dan daha küçük olması ile anlaşılabilir. Şekil 3.10'da, rezonansın başladığı (iletilen gücün %50 olduğu) -3 dB ve antenin iyi ışınım yaptığı (iletilen gücün %90'dan fazla olduğu) -10 dB referansı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, anten elemanı istenen frekans bantlarında rezonansa girmiştir ancak verimli olarak çalışmamaktadır.

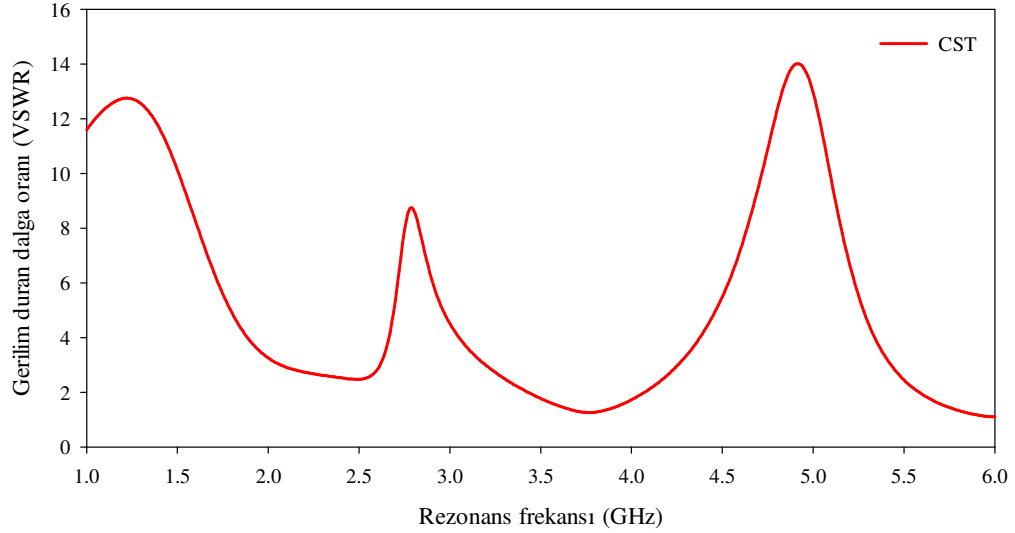


Şekil 3.10. Tasarlanan antenin benzetim sonucu

Antenin gerçekleştirildikten sonra benzetim ve ölçüm verileri, sonraki başlıklar altında tartışılacaktır.

### *VSWR grafiği*

Tasarlanan antenin benzetimi sonucunda elde edilen grafiklerden birisi de VSWR grafiğidir. VSWR grafiğinde değerin 2'den küçük olması, antenin o bantta verimli çalıştığını göstermektedir.

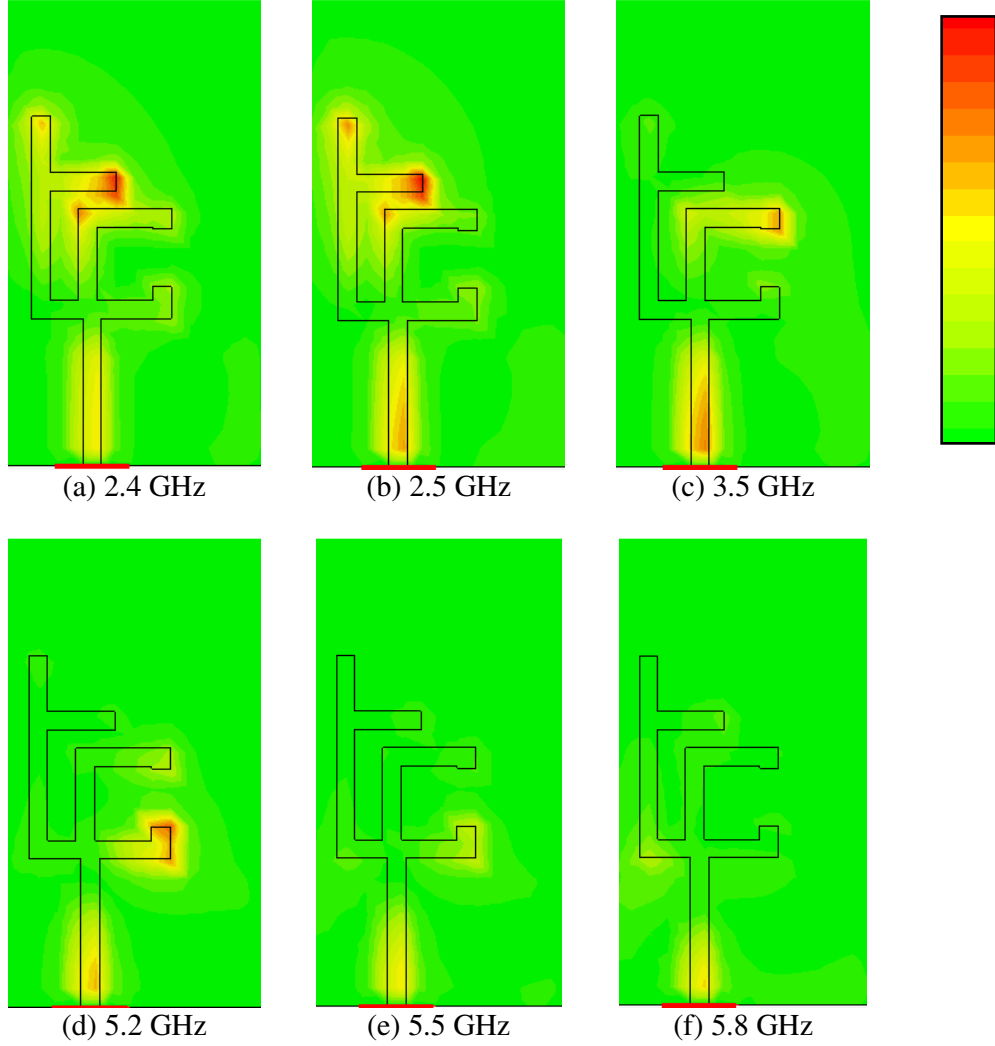


Şekil 3.11. Tasarlanan antenin VSWR grafiği

### *Akım dağılımı grafikleri*

Anten, çeşitli frekans bantlarını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Hangi frekans bandında hangi ışınım elemanının rol oynadığı, akım yoğunluğu grafikleri aracılığı ile anlaşılacaktır. Şekil 3.12.'de, antenin, ışınım yapılması istenen frekanslardaki akım yoğunlukları görülmektedir. Grafikte yeşil renk sıfır  $A/m^2$  değerini gösterirken, renklerin yeşilden kırmızıya doğru gitmesi, akım yoğunluğunun arttığını göstermektedir.



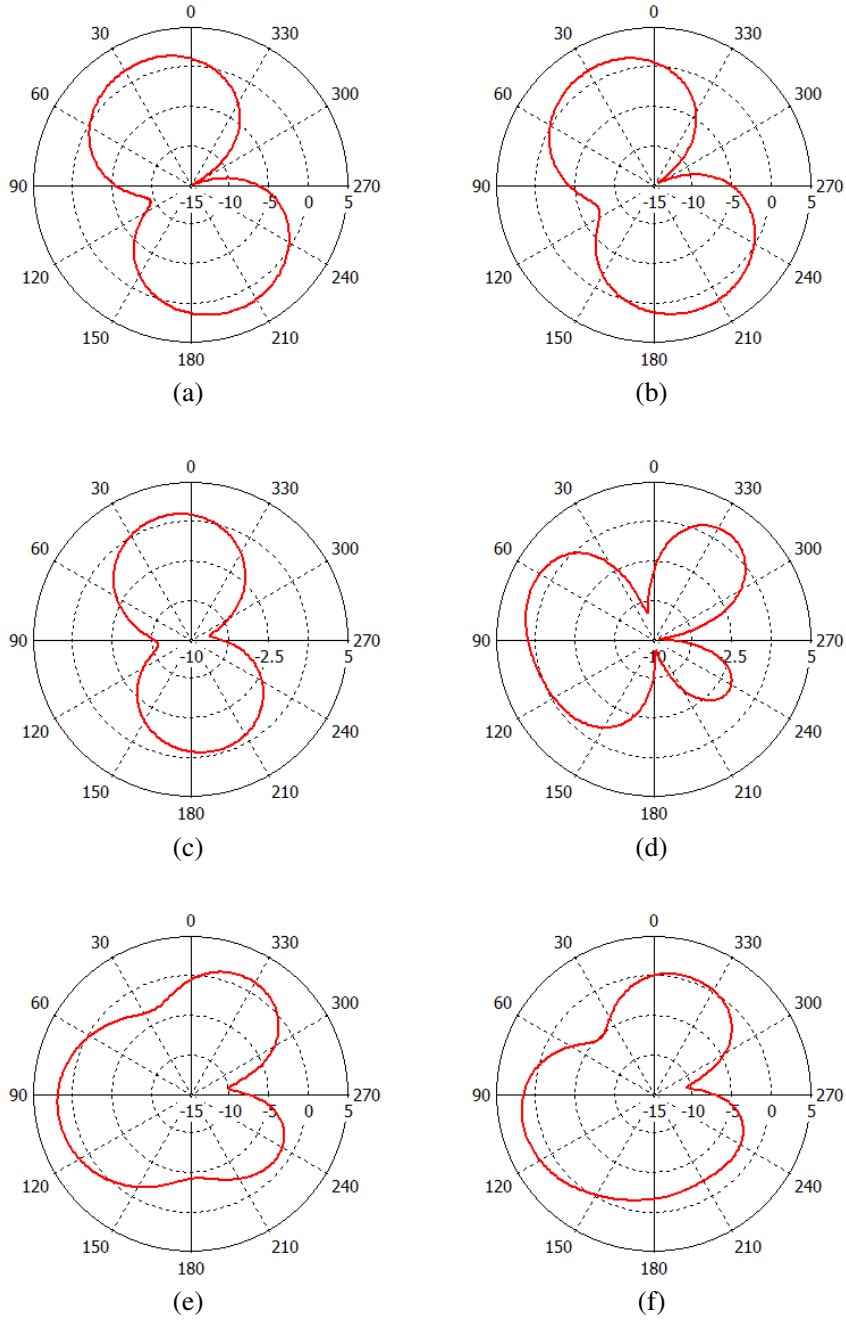


Şekil 3.12. Tasarlanan antenin akım yoğunluğu grafikleri  
(a) 2.4 GHz, (b) 2.5 GHz, (c) 3.5 GHz, (d) 5.2 GHz, (e) 5.5 GHz, (f) 5.8 GHz

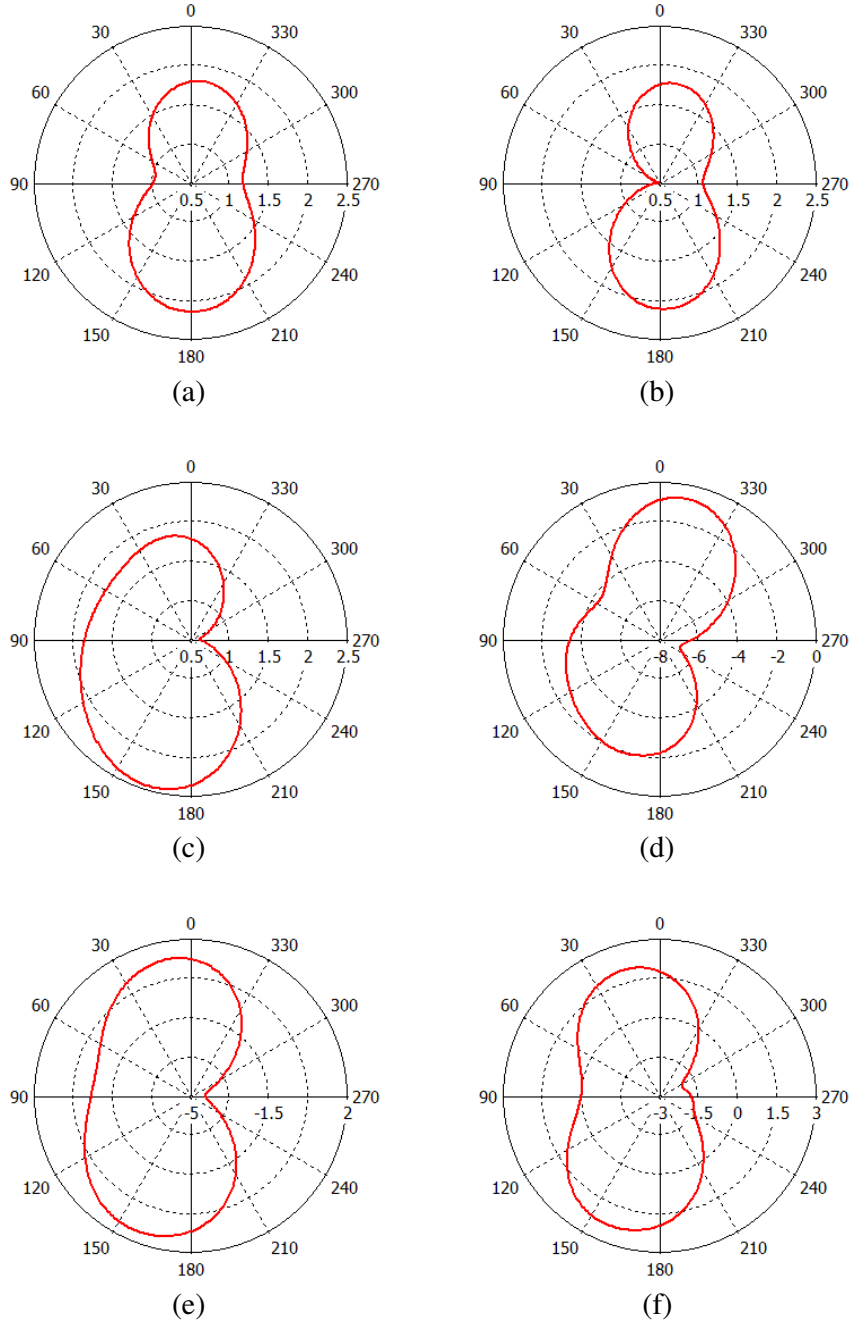
#### *Işıma diyagramları*

Işıma diyagramları, antenin hangi yönde ne kadarlık kazançta veya yönlülüğe sahip olduğunu gösteren grafiklerdir. Antenler her frekansta farklı şekillerde ışımaya yapacakları için, ışımaya diyagramları da her frekans için farklı olacaktır. Mikroşerit antenler, yama yüzeyine dik olarak ışımaya yaptıkları için  $\phi = 0^\circ$  ve  $\phi = 90^\circ$  'deki ışımaya diyagramları önemlidir.

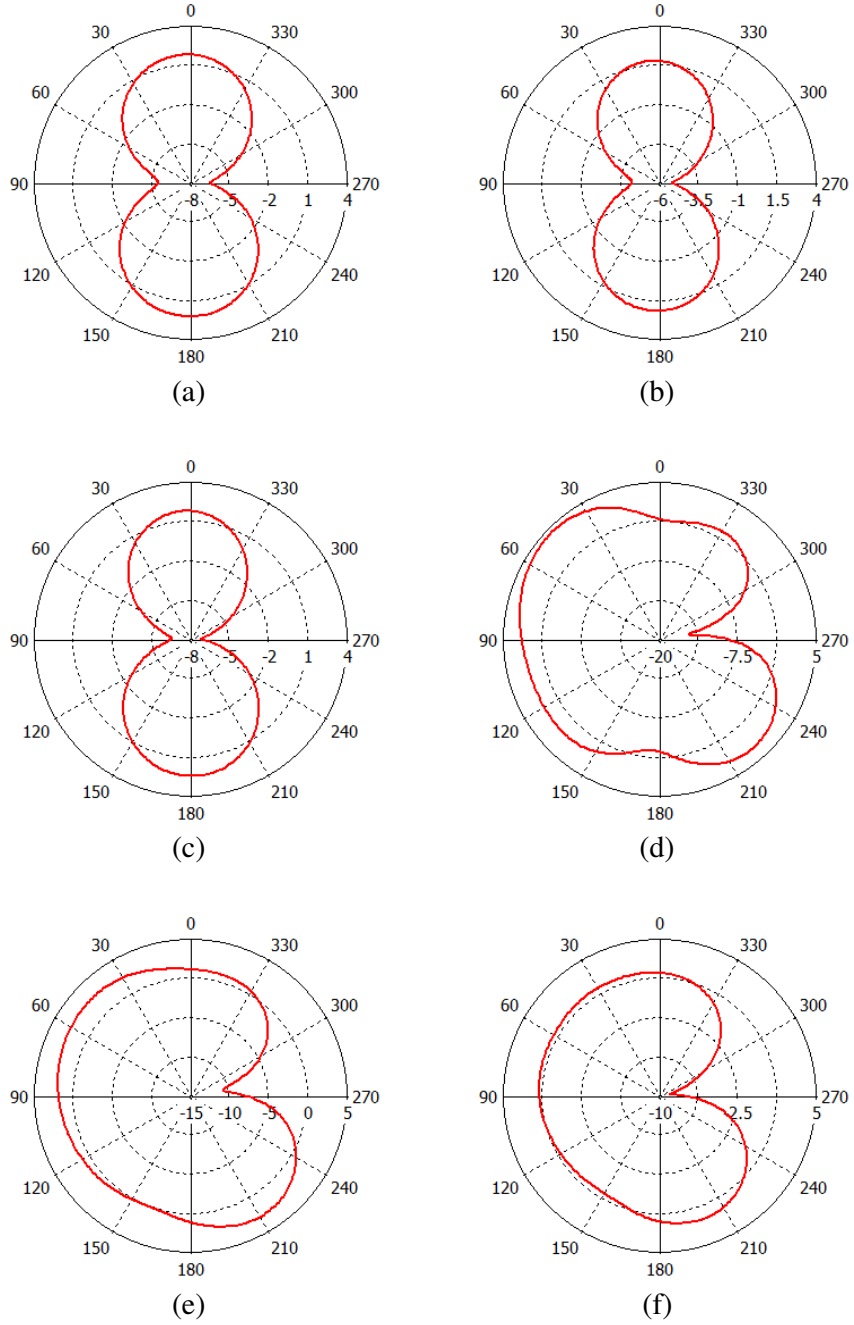
Tasarımı yapılan antenin CST programı ile benzetimi sonucu oluşturulan ışımaya diyagramları Şekil 3.13., Şekil 3.14. ve Şekil 3.15.'te verilmiştir.



Şekil 3.13.  $\theta=90^\circ$  için  $E_\phi$   
(a) 2.4 GHz, (b) 2.5 GHz, (c) 3.5 GHz, (d) 5.2 GHz, (e) 5.5 GHz, (f) 5.8 GHz



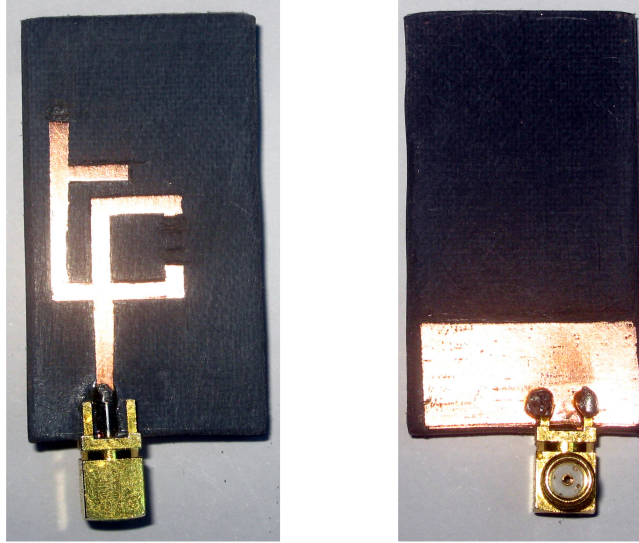
Şekil 3.14.  $\phi=0^\circ$  için  $E_\theta$   
(a) 2.4 GHz, (b) 2.5 GHz, (c) 3.5 GHz, (d) 5.2 GHz, (e) 5.5 GHz, (f) 5.8 GHz



Şekil 3.15.  $\phi=90^\circ$  için  $E_\theta$   
(a) 2.4 GHz, (b) 2.5 GHz, (c) 3.5 GHz, (d) 5.2 GHz, (e) 5.5 GHz, (f) 5.8 GHz

### **3.5. WLAN/WiMAX UYGULAMALARI İÇİN ANTEN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Benzetimi yapılan antenin gerçekleştirilmesine, Rogers RT/Duroid® 5870 malzemesinin, benzetimde belirtilen alttaş boyutlarında kesilmesiyle başlanmıştır. İki yüzeyi bakır ile kaplı malzemenin toprak olarak belirlenen düzlemi, bir CD kalemi aracılığı ile boyanmıştır. Işıma yapacak olan yüzeye ise cetvel ve CD kalemi yardımı ile yama kısmın şekli çizilip boyanarak, boyama sırasında oluşan taşmalar, ince uçlu bir araç yardımıyla temizlenmiştir. Çizimin ardından, boyalı olmayan kısımların eritilmesi için belirli ölçüde perhidrol ile tuz ruhu karıştırılarak bir karışım oluşturulmuş ve malzeme, bu karışıma konmuştur. Boyalı olmayan bakır kısımların tamamen eritilmesi işlemi bitirildikten sonra anten, karışımdan çıkarılarak yıkanmış ve boyalar temizlenmiştir. Yüzeyleri ince sünger zımpara ile zımparalanan antenin beslemesi, 90° SMA konnektörün lehimleme işlemi ile tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen antenin fotoğrafı Şekil 3.16.'da verilmiştir.



(a) Üst görünüş

(b) Alt görünüş

Şekil 3.16. Gerçekleştirilen antenin fotoğrafı

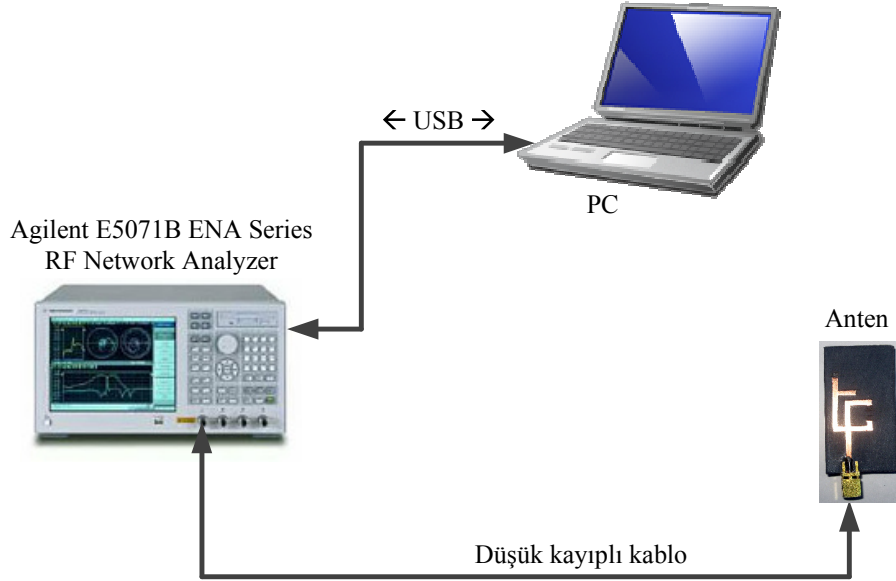
#### **3.5.1. Antenin Ölçülmesi**

Gerçekleştirilen antenin ölçümü, Agilent E5071B ENA Series RF Network Analyzer cihazı aracılığı ile yapılmıştır. Bu cihaz, iki porta sahiptir ve 300 kHz'den 8.5 GHz'e kadar geniş bir frekans aralığında ölçüm yapabilmektedir. Anten ile ilgili

geri dönüş kaybı, Smith grafiği gibi ölçümleri yaparak, üzerinde yer alan ekranda gösterebilmekte, USB bağlantısı aracılığı ile bilgisayara aktarabilmektedir. Ölçüm işlemi sırasında öncelikle cihaz,  $S_{11}$  değerini logaritmik ölçekte ölçecek şekilde ayarlanmıştır. Ardından, ölçülmek istenen frekans aralıkları belirlenmiş ve bu aralıkta kaç adet frekans için ölçüm yapılacağı ayarlanmıştır. Bundan sonra kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Bütün ayarlamalar ve kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra anten, düşük kayıplı bir kablo ile cihazın PORT1 girişine bağlanmıştır. Cihazın ekranında ölçüm sonucu anlık olarak görülmektedir. Doğru bir ölçüm yapılabilmesi için antenin çevresinde, antenden kaynaklı olmayan, harici geri yansımalara sebebiyet vermemesi için, geniş bir boş alan bulunmalıdır.

Ölçüm sonucu, bilgisayar ile cihaz arasında USB bağlantısı yapılarak, MATLAB’da yazılan bir kod aracılığı ile bilgisayara aktarılmıştır.

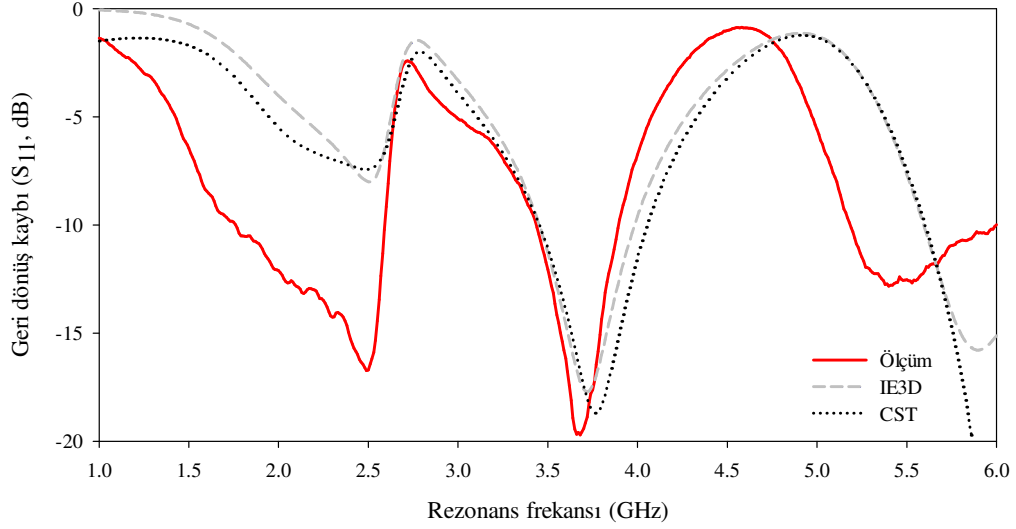
Anten ölçümü ile ilgili şema, aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.17. Anten ölçüm düzeneği

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

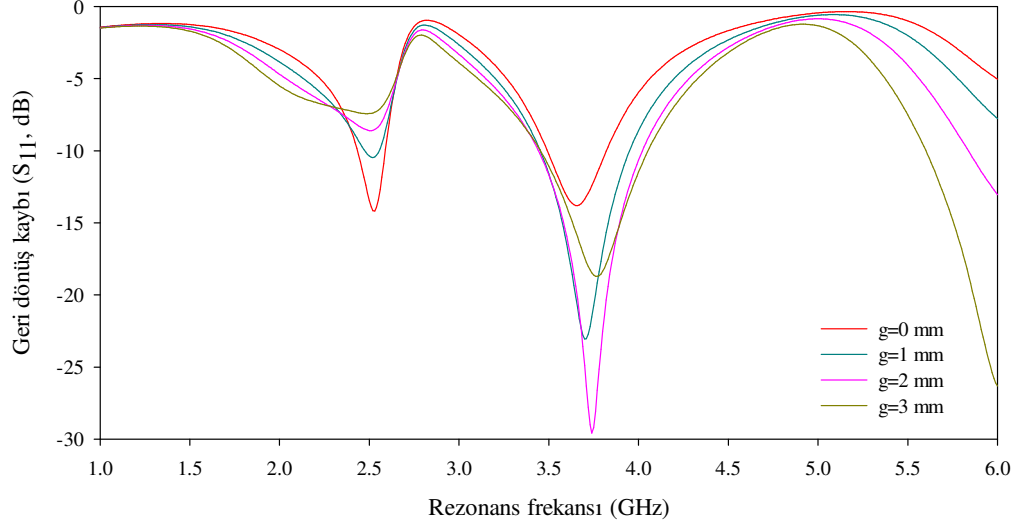
Gerçekleştirilen antenin geri dönüş kaybı ( $S_{11}$ ), Agilent E5071B ENA Series RF Network Analyzer cihazı aracılığı ile ölçülmüştür. Benzetim ve ölçüm sonuçları, Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Gerçekleştirilen antenin benzetim ve ölçüm sonuçları

Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi gerçekleştirilen anten, 1.26 GHz frekansında -3 dB frekansının altına düşmüş yani rezonansa girmeye başlamıştır. Anten, 1.76 GHz frekansında -10 dB değerine sahiptir ve bu frekanstan 2.59 GHz frekansına kadar yüksek verimle çalışmaktadır. Bu aradaki bant genişliği (%38.16) 0.83 GHz değerine sahiptir. 2.59 GHz ile 2.79 GHz arasında ışına yapmayan anten, 2.79 GHz frekansında rezonansa girmeye başlayıp, 3.44 GHz frekansından başlayarak 3.89 GHz frekansına kadar verimli olarak çalışmaktadır. Bu aradaki bant genişliği (%12.278) 0.45 GHz değerine sahiptir. 3.89 GHz ile 4.88 GHz arasında ışına yapmayan anten, 4.88 GHz frekansında rezonansa girmeye başlayıp, 5.18 GHz frekansından başlayarak 5.99 GHz frekansına kadar verimli olarak çalışmaktadır. Bu aradaki bant genişliği (%14.503) 0.81 GHz değerine sahiptir. antenin ölçüm sonuçları, 2.5 GHz ile 4.5 GHz frekansları arasında benzetim sonuçlarına oldukça yakın olmakla birlikte, genel olarak benzetim sonuçlarından daha iyi bir performans elde edilmiştir.

Şekil 3.1.(b)'de verilen  $g$  parametresi, yama kısım ile toprak düzlemi arasındaki boşluğun değişiminin, antenin geri dönüş kaybına etkisi Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Işıma elemanı ile toprak düzlemi arasındaki boşluğun, antenin performansına etkisi

Yama ile toprak düzlemi arasındaki boşluğun artması, 2.4 GHz bandında antenin geri dönüş kaybını olumsuz etkilerken 5 GHz bandında olumlu yönde etki etmektedir. Bu boşluğun 0 – 2 mm aralığında değişimi, 3.5 GHz frekans bandında antenin geri dönüş kaybını olumlu yönde etkilerken, boşluğun 3 mm olması, performansı olumsuz yönde etkilemektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gelişen teknoloji, günlük hayatın her alanında kullanılan ve hayatın vazgeçilmez parçaları haline gelen mobil cihazların büyük bir hızlı gelişmesine ve tek bir cihazla onlarca işlem yapılabilmesine, buna paralel olarak bu cihazların boyutlarının küçülmesine neden olmaktadır. Boyutları küçülen cihazlardan yüksek performans beklentisi, birden fazla işi yapan cihazlarda kullanılacak antenlerin de boyutlarının küçülmesini gerektirmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, istenen performansların tek bir anten aracılığı ile gerçekleştirilmesi yönünde gelişmektedir. Bu bağlamda, iletişimde önemli yer kapladığı ve geniş bir kullanım alanı olduğu için



WLAN ve WiMAX uygulamalarında çalışabilecek bir anten tasarımı yapılması amaçlanmıştır.

Anten tasarımı için literatür araştırmaları yapılarak, sunulan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan çalışmalardan farklı ve özgün bir çalışma oluşturabilmek için yüzlerce geometriler çizilmiş, benzetimleri yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Bu çalışmalar arasında, sadece WLAN ya da sadece WiMAX uygulamalarının çalışabileceği çeşitli anten tasarımları da elde edilmiştir. Ancak, bu iki uygulamayı içerecek bir performans sergileyen tek bir anten elde edebilmek için benzetim çalışmalarına ek olarak optimizasyon çalışmaları da yapılmıştır.

Elde edilen anten, tezin başlangıcında belirlenen hedeflere yakın bir performans sergilemektedir ve WLAN/WiMAX uygulamaları için IEEE tarafından oluşturulmuş standartlarda yer alan frekans ve bant genişliği kriterlerini sağlamaktadır.

## **KAYNAKLAR**

- [1] Balanis, C.A., “Antenna Theory: Analysis and Design”, Wiley Interscience, 1136 s., (2005)
- [2] James, J.R. and Hall, P.S., “Handbook of Microstrip Antennas”, Peter Peregrinus Ltd., London, 1312 s., (1989).
- [3] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. and Ittipiboon, A., “Microstrip Antenna Design Handbook”, Artech House, London, 875 s., (2001).
- [4] Kumar, G. and Ray, K.P., “Broadband Microstrip Antennas”, Artech House, London, 409 s., (2003).
- [5] Ye, L.-H. and Chu, Q.-X., “Compact dual-wideband antenna for wlan/wimax applications”, Microwave and Optical Technology Letters, 52(6): 1228-1231, (2010).
- [6] Ku, C.-H., Li, L.-K. and Mao, W.-L., “Compact monopole antenna with branch strips for wlan/wimax operation”, Microwave and Optical Technology Letters, 52(8): 1858-1861, (2010).
- [7] Huang, J.-X., Zhang, F.-S., Zhang, F., Wang, Y., Yang, Y.-B. and Dong, K., “Compact groove-loaded triband antenna for wlan/wimax applications”, Microwave and Optical Technology Letters, 52(11): 2588-2592, (2010).
- [8] Chou, J.-H. and Su, S.-W., “Cost-effective metal-plate shorted dipole antenna with wide bandwidth for wlan/wimax applications”, Microwave and Optical Technology Letters, 49(12): 3044-3046, (2007).
- [9] Liu, H.-W. and Ku, C.-H., “Novel planar triple band monopole antenna for wimax/wlan applications”, Microwave and Optical Technology Letters, 52(11): 2405-2408, (2010).
- [10] Zaker, R., Ghobadi, C. and Nourinia, J., “A modified microstrip-fed two-step tapered monopole antenna for uwb and wlan applications”, Progress In Electromagnetics Research, 77: 137-148, (2007).
- [11] Mahatthanajatuphat, C., Saleekaw, S., Akkaraekthalin, P. and Krairiksh, M., “A rhombic patch monopole antenna with modified minkowski fractal geometry for umts, wlan, and mobile wimax application”, Progress In Electromagnetics Research, 89: 57-74, (2009).

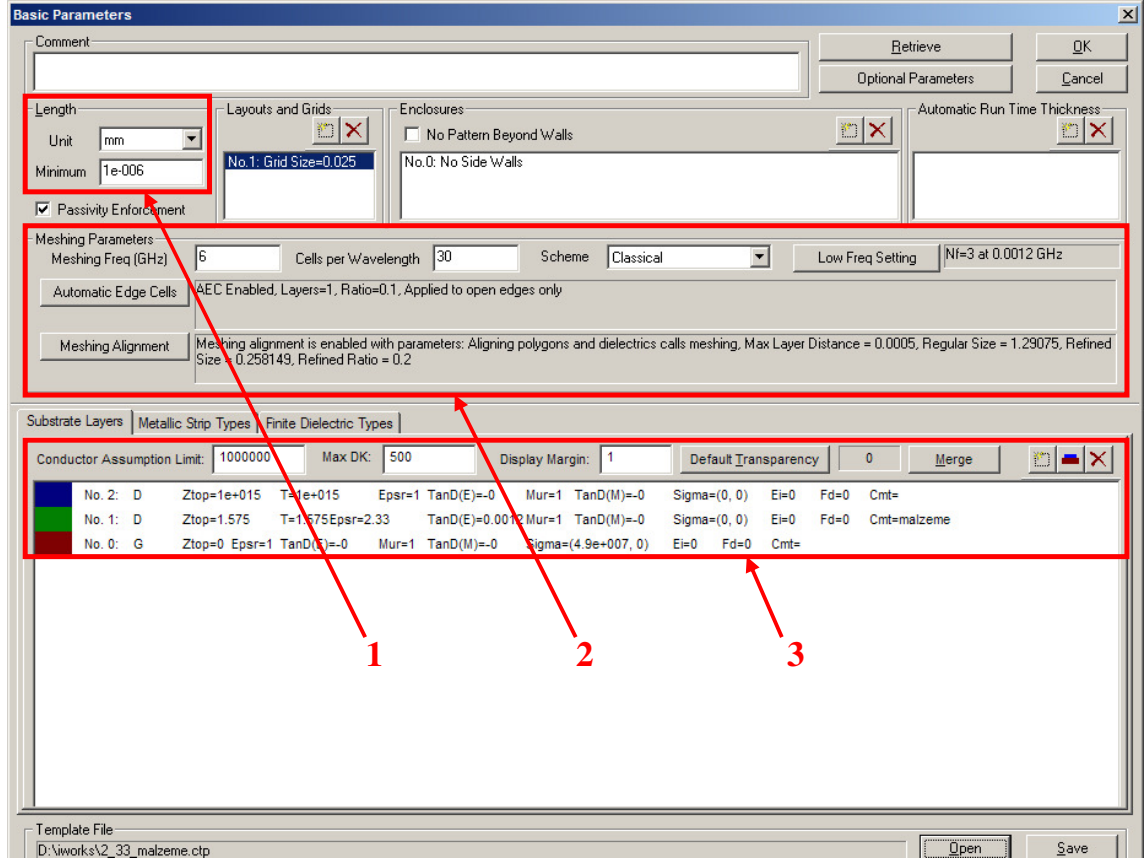
- [12] Shin, Y.-S. and Park, S.-O., “A compact loop type antenna for bluetooth, s-dmb, wibro, wimax, and wlan applications”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 6: 320-323, (2007).
- [13] Al-Husseini, M. Tawk, Y. El-Hajj, A. and Kabalan, K.Y., “A low-cost microstrip antenna for 3g/wlan/wimax and uwb applications”, *Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA) '09, Lebanon*, 68-70, (2009).
- [14] Jeong, Y.S., Lee, S.H., Yoon, J.H., Lee, W.Y., Choi, W.Y. and Yoon, Y.J., “Internal mobile antenna for lte / gsm850 / gsm900 / pcs1900 / wimax / wlan”, *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), New Orleans*, 559-562, (2010).
- [15] Gao, S.C., Li, L. W., Leong, M. S. and Yeo, T. S., “Analysis of an H-Shaped patch antenna by using FDTD method”, *Progress in Electromagnetics Research*, 34: 165-187, (2001).
- [16] Sheta, A.F., Mohra, A. and Mahmoud, S. F., “Multi-band operation of a compact H-shaped microstrip antenna”, *Microwave Opt Technol Lett*, 35:363–367, (2002).
- [17] Deshmukh, A. and Kumar, G., “Formulation of resonant frequency for compact rectangular microstrip antennas”, *Microwave Opt Technol Lett.*, 49:498-501, (2007).
- [18] Akdagli, A., Bicer, M. B. and Ermis, S., “A novel expression for resonant length obtained by using artificial bee colony algorithm in calculating resonant frequency of C-shaped compact microstrip antennas”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 19(4): 597-606, (2011).
- [19] Toktas, A., Bicer, M.B., Akdagli, A. and Kayabasi, A., “Simple formulas for calculating resonant frequencies of C and H shaped compact microstrip antennas obtained by using artificial bee colony algorithm”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 25(12): 1718-1729, (2011).
- [20] Akdagli, A. and Toktas, A., “A novel expression in calculating resonant frequency of H-shaped compact microstrip antennas obtained by using artificial bee colony algorithm”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 24:2049-4061, (2010).

- [21] Chen, Y., Yang, S. and Nie, Z., “Bandwidth Enhancement Method for Low Profile E-Shaped Microstrip Patch Antennas”, *Antennas and Prop. - IEEE Trans*, 54(7):2442-2447, (2010).
- [22] Ma, J., Yin, Y., Li, Z. and Shi, S., “Broadband Microstrip Patch Antenna with a Novel L-Shaped CPW-Fed for Wibro/Bluetooth/S-DMB Operation”, *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 1-4, (2010).
- [23] Bhattacharyya, A.K. and Garg, R., “Generalized transmission line model for microstrip patches”, *IEEE Proc. Microwave Antennas Propagation*, 132(2): 93-98, (1985).
- [24] Harrington, R.F., “Field Computation by Moment Methods”, Wiley-IEEE Press, NJ, 240 s., (1993).
- [25] Taflove, A., “Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time Domain Method”, Artech House, London, 1038 s., (2005).
- [26] Wikipedia, “IEEE 802.11”, [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11) (17.11.2011).
- [27] Wikipedia, “WiMAX”, <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX> (17.11.2011).
- [28] WiMAX Maps, <http://wimaxmaps.org/> (17.11.2011).
- [29] Andrews, J.G., Ghosh, A. and Muhamed, R., “Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking”, Prentice Hall, America, 449 s., (2007).
- [30] Schneider, M.V., “Microstrip lines for microwave integrated circuits”, *Bell Syst. Tech.*, 48:1421-1444, (1969).
- [31] Hammerstad, E.O., “Equations for microstrip circuits design”, *Proc. Fifth European Microwave Conf.*, 268-272, (1975).
- [32] XFDTD, Remcom Inc., State College, PA, ver. 6.0, (2008).
- [33] Karaboga, D., “An idea based on honey bee swarm for numerical optimization”, *Technical Report-TR06*, Erciyes University, Kayseri, Turkey, (2005).
- [34] Karaboga, D. And Basturk, B., “A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm”, *J. Glob. Optim.*, Vol. 39, pp. 459-471, (2007).

- [35] Karaboga, D. And Basturk, B., “Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems”, IFSA LNAI, Vol. 4529, pp. 789-798, (2007).
- [36] Karaboga, D. and Basturk., B., “On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm”, Applied Soft Computing, Vol. 8, pp. 687-697, (2008).
- [37] Akay, B. and Karaboga, D., “Parameter tuning for the artificial bee colony algorithm”, ICCCI LNAI, Vol. 5796, pp. 608-619, (2009).
- [38] CST Studio Suite™, CST, ver. 2011, (2011).
- [39] IE3D, Zeland Software Inc., ver 14.1.
- [40] MATLAB, MathWorks, ver. 2010a.
- [41] Microsoft Visual Basic, Microsoft, ver. 6.0.
- [42] Borland Delphi, Borland, ver. 7.0.
- [43] Microsoft Excel, Microsoft, ver. 2010.

## EK 1. IE3D Programı ile Anten Tasarımı ve Benzetimi

IE3D programı ile anten tasarımı ve benzetimi yapmak için, IE3D'nin editörü açılarak yeni bir proje oluşturulmalıdır. Yeni proje oluşturulması sırasında öncelikle ölçü birimi, ızgaralama seçenekleri ve altta katmanları gibi temel bilgileri isteyen bir pencere açılmaktadır. Açılan pencere Şekil E1.1.'de verilmiştir.



Şekil E1.1. Temel parametrelerin ayarlanması

Şekil E1.1. ile verilen pencerede 1 numara ile belirtilmiş alan, anten geometrisinin çizimi sırasında kullanılacak fiziksel ölçülerin birimini belirtmektedir. Varsayılan olarak mm boyutu kullanılmıştır. 2 numara ile belirtilmiş alan, ızgaralama ayarlarının yapılması ile ilgili ayarları göstermektedir. Benzetimin yapılacağı maksimum frekans ve dalga boyu başına hücre sayısı özelliklerinin belirtilmesi yeterlidir. Tasarlanacak anten için maksimum frekans 6 GHz ve dalga boyu başına hücre sayısı 30 olarak girilmiştir. 3 numara ile belirtilmiş alan, katmanları

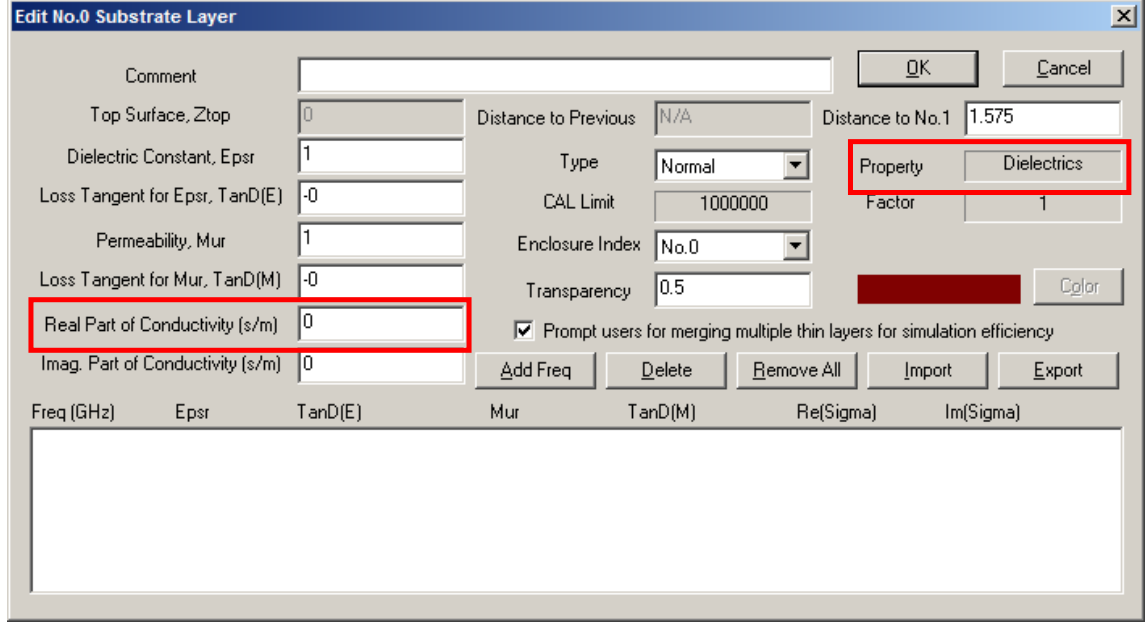
göstermektedir. Antenin her düzlemi, birer katman olarak belirtilmektedir. Toprak düzlemi, alttaş düzlemi ve alttaş üzerindeki boşluk alan, birer katman olarak kabul edilmektedir. No. 0 ile belirtilen katman toprak düzlemini temsil etmektedir. Sigma değerine bakıldığı zaman bu toprak düzleminin belli boyutlara sahip olmadığı, sonsuz bir toprak düzlemi olarak kabul edildiği görülmektedir. Tasarımda, anten monopol bir yapıya sahip olduğundan dolayı toprak düzlemi sonlu olmalıdır. Bunun için toprak düzlemini gösteren katmanın iletkenliğinin reel kısmı (Real Part of Conductivity (s/m)) değeri 0 olarak değiştirilmelidir. No. 1 ile belirtilen katman, anten tasarımında kullanılacak olan alttaş temsil etmektedir. Alttaş ile ilgili özellikler, yeni katman eklenirken girilmekte ve sonuç olarak burada görülmektedir. No. 2 ile belirtilen katman, alttaşın üzerinde yer alan boşluğu temsil etmektedir.

Field	Value
Comment	
Top Surface, Ztop	0
Dielectric Constant, Epsr	1
Loss Tangent for Epsr, TanD(E)	-0
Permeability, Mur	1
Loss Tangent for Mur, TanD(M)	-0
Real Part of Conductivity (s/m)	49000000
Imag. Part of Conductivity (s/m)	0
Distance to Previous	N/A
Distance to No.1	1.575
Type	Normal
CAL Limit	1000000
Enclosure Index	No.0
Transparency	0.5
Property	Ground
Factor	880798758.9

Şekil E1.2. Sonsuz toprak düzlemi bilgileri

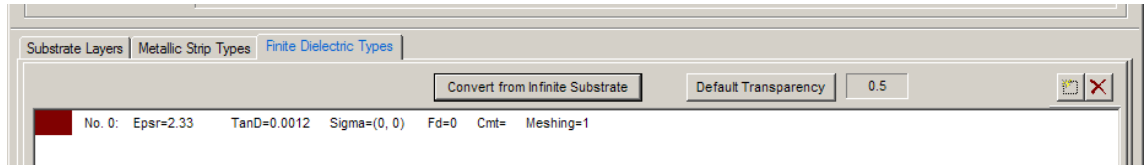
Toprak düzleminin ayarlarının görüldüğü ekran Şekil E1.2.'de verilmiştir. Burada kırmızı kutu ile gösterilen bilgi, toprak düzleminin toprak özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Toprak özelliğine sahip olması, bu düzlemin sonsuz bir toprak düzlemi olduğunu göstermektedir. İletkenliğin reel kısmı özelliği 0 olarak değiştirildiğinde bu katmanın özelliği, Şekil E1.3.'te verildiği gibi, dielektrik olarak değişecektir. Toprak düzleminin sonlu yapıya sahip olmasından dolayı, anten

beslemesinin yapılması sırasında toprak düzleminin geometrisinin çizilmesi ve toprak olarak belirtilmesi gerekmektedir.



Şekil E1.3. Sonlu toprak düzlemi bilgileri

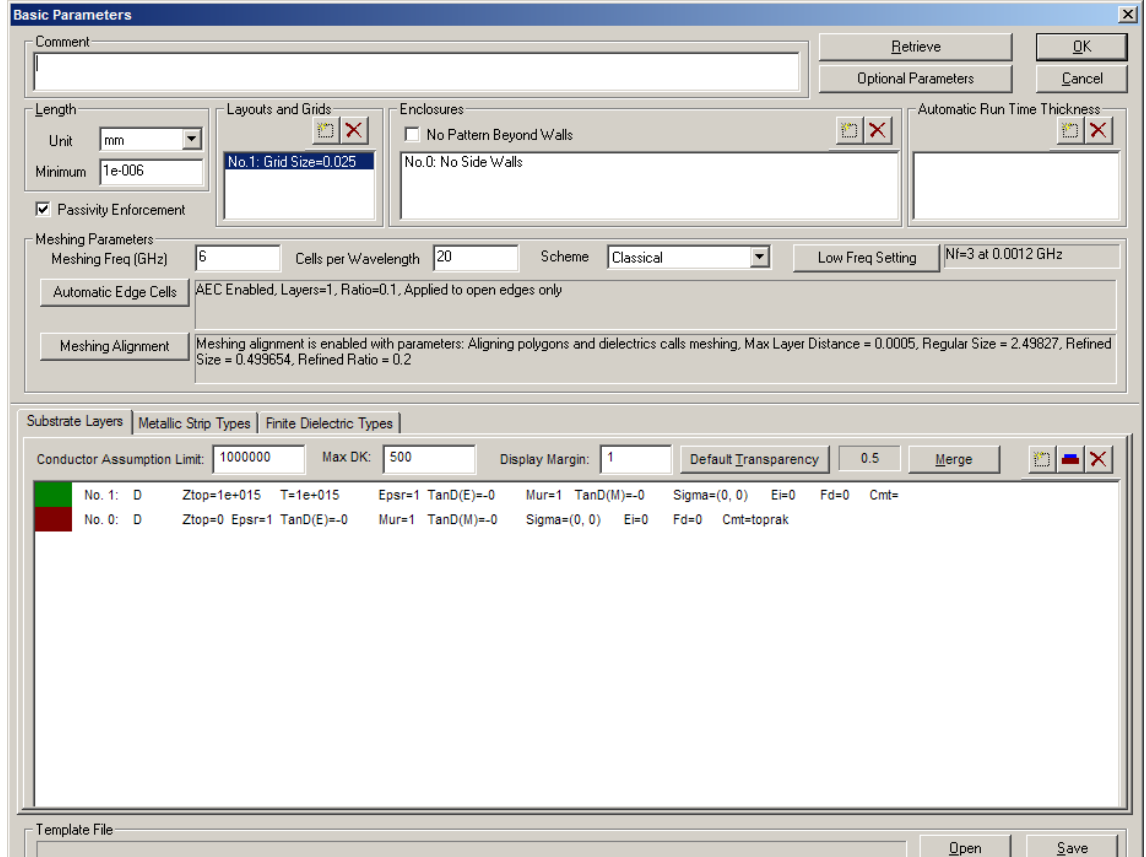
Yapılan çalışmalara göre, hesaplamaların daha doğru sonuçlar vermesi için alttaş düzlemi, boyutları gerçeğe yakın olacak şekilde sınırlandırılmalıdır. Alttaş özellikleri girildikten sonra sınırlandırma işlemi yapılmazsa katman, sonsuz bir alttaş katmanı olarak kabul edilmektedir. Sınırlandırma işlemi, sonlu dielektrik türleri sekmesinden yapılmaktadır. Bu sekmede sonsuz alttaştan dönüştür (Convert from Infinite Substrate) butonu tıklanıp alttaş koordinatları girilerek sınırlandırma gerçekleştirilmiş olur. Sınırlandırma işlemi sonrası pencere, Şekil E1.4.'de görülmektedir.



Şekil E1.4. Sonlu alttaş bilgileri



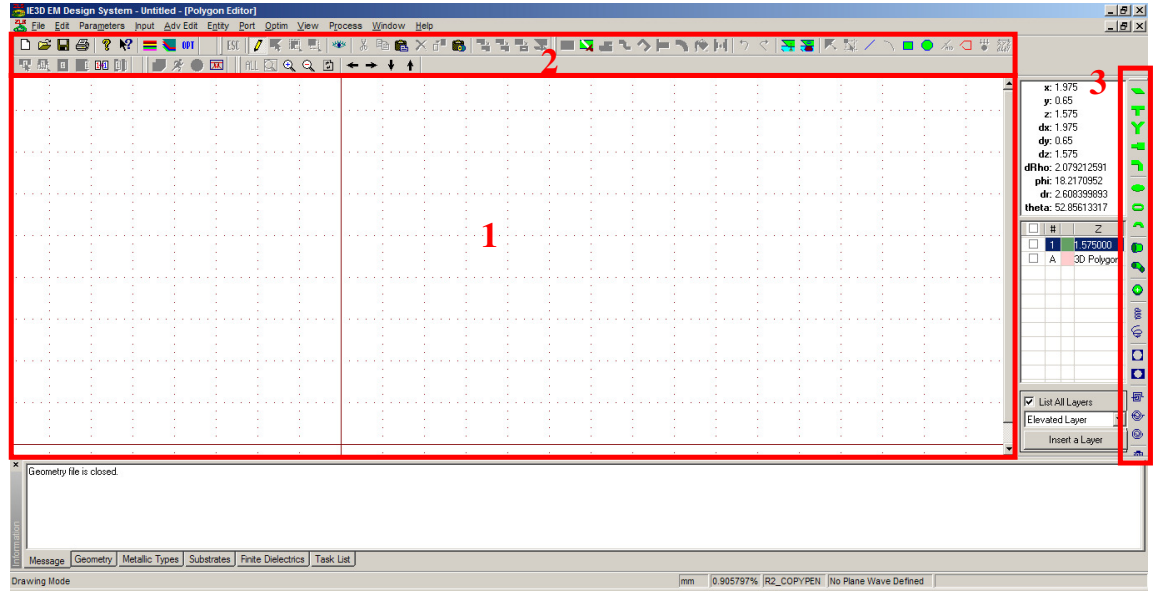
Altaş katmanının sonlu altaş katmanına dönüştürme işleminden sonra, katmanlar listesinde katman sayısı ikiye düşecektir. Bundan sonra “OK” butonuna tıklanarak ayar sayfasından çıkılır ve anten tasarımının yapılacağı iki boyutlu tasarım ekranına geçilir. Sonlu altaş katmanı tanımlamasından sonraki ekran görüntüsü Şekil E1.5.’te verilmiştir.



Şekil E1.5. Sonlu altaş düzleminin tanımlanmasından sonra görülen temel parametreler

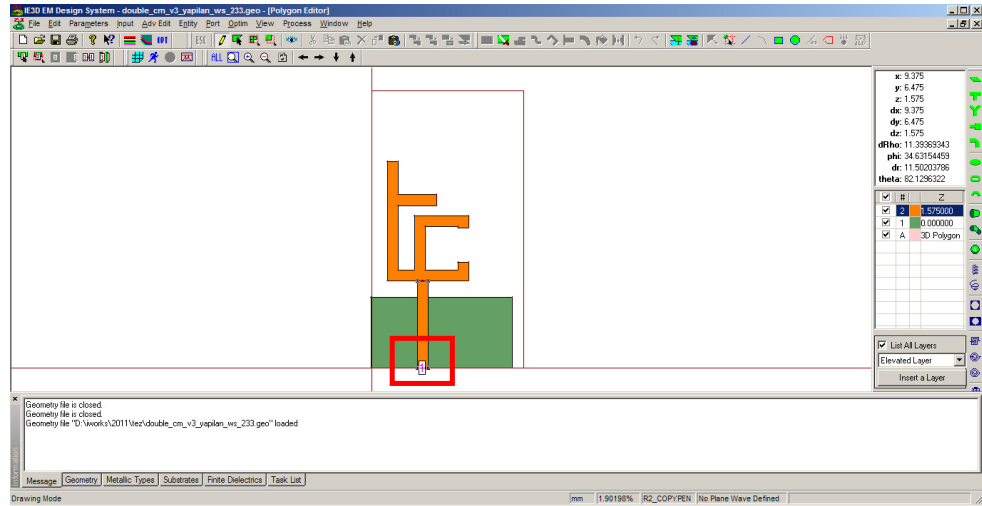
Temel ayarların yapılmasından sonra iki boyutlu anten tasarım ekranı açılmaktadır. Şekil E1.6.’da görülen anten tasarımı ekranında 1 numara ile belirtilen alan, tasarımın yapıldığı ve yapılan tasarımın görüldüğü bölümü göstermektedir. 2 numara ile belirtilen alan, kaydetme, kesme, kopyalama, yapıştırma, poligon birleştirme, poligon taşıma, besleme yapma gibi işlemlerin yapılması için araçların bulunduğu araç kutularını göstermektedir. 3 numara ile belirtilen alan, anten

geometrisinin çizilmesi için çeşitli geometrik şekillerin bulunduğu araç kutusunu göstermektedir.



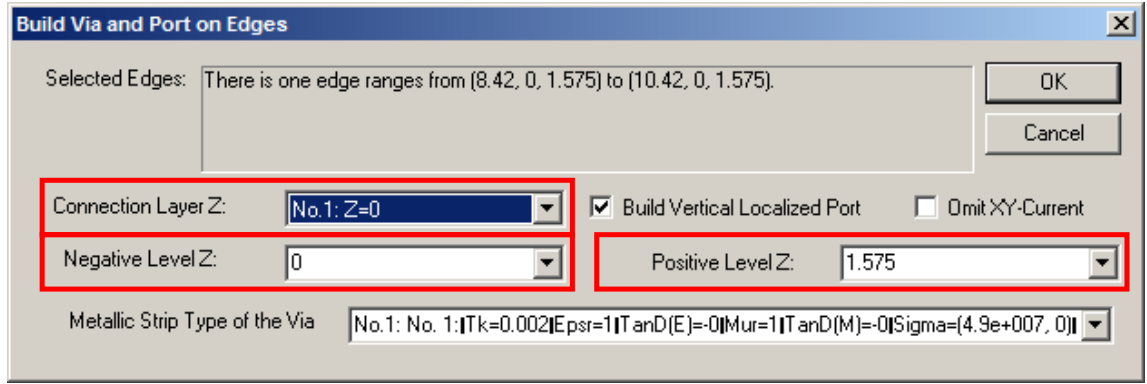
Şekil E1.6. IE3D elektromanyetik benzetim programının ana penceresi

Gerekli araçlar kullanılarak tasarlanan anten, Şekil E1.7.'de görülmektedir. Turuncu renk ile gösterilen kısım, antenin ışımaya yapan iletkeni; yeşil renk ile gösterilen kısım ise antenin toprak iletkenini temsil etmektedir. Tasarımda görülen dikdörtgen şeklindeki çizgi ise alttaşın sınırlarını belirtmektedir.



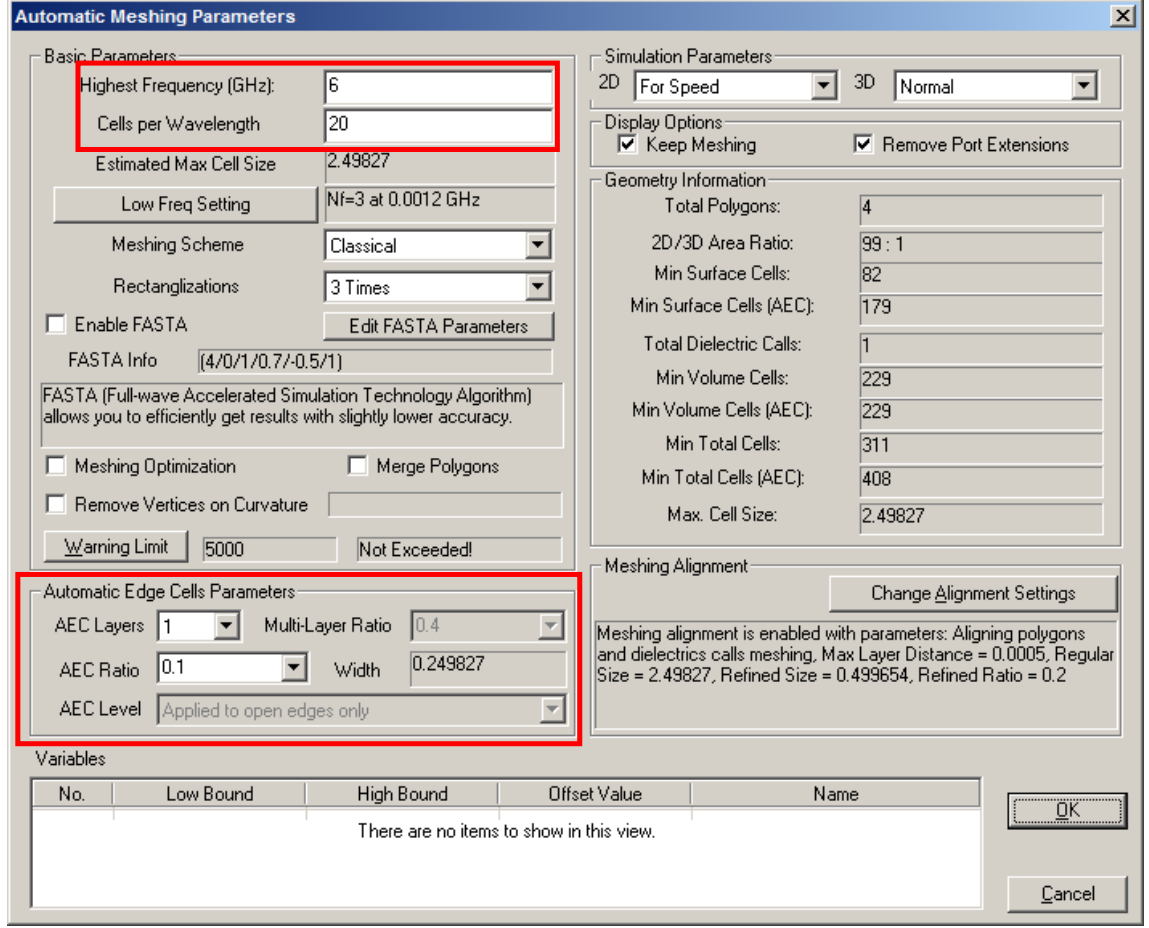
Şekil E1.7. Tasarlanan antenin iki boyutlu görünümü

Şekil E1.7.'de, antenin alt kısmında kırmızı kutu ile belirtilen ve içerisinde 1 yazan beyaz kutu, antenin o kısmında yer alan beslemeyi temsil etmektedir. Beslemenin yapılması için anten tasarımı yapıldıktan sonra bütün katmanlar seçilerek, antenin en altında besleme yapılacak noktalar işaretlenmeli ve menüden kenarlardan dikey bağlantı ve port oluştur (Build Via and Port on Edges) tıklanmalıdır. Böylece Şekil E1.8.'de görülen ekran açılmaktadır. Bağlantı katmanı (Connection Layer Z), No. 1: Z=0 seçilmelidir. Toprak düzlemi (Negative Level Z) 0 mm ve besleme düzlemi (Positive Level Z) 1.575 mm olarak seçilmelidir.



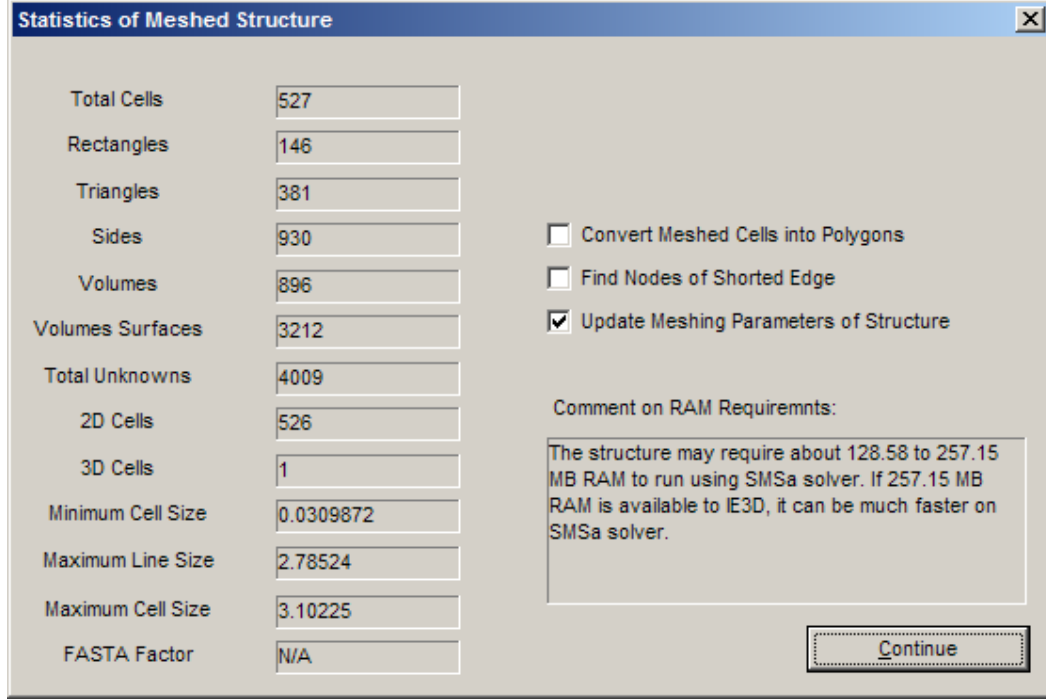
Şekil E1.8. Antende beslemenin oluşturulması

Bu ekrandan “OK” butonuna tıklanarak besleme işlemi oluşturulmaktadır. Anten geometrisinin çizimi ve beslemenin oluşturulmasından sonra antenin benzetimi yapılabilmektedir. Anten benzetimini yapabilmek için öncelikle ızgaralama (mesh) işlemi yapılmalıdır. Izgaralama işlemi için araç çubuğundan ilgili araca tıklanmalıdır. Böylece Şekil E1.9.'da görülen ızgaralama özellikleri ile ilgili ekran açılabilir. Bu proje için ızgaralama frekansı 6 GHz ve dalga boyu başına hücre sayısı ise 30 olarak seçilmiştir. Ayrıca anten kenarlarının daha hassas hesaplanması için otomatik kenar hücre parametresi (Automatic Edge Cell Parameter) 1 olarak seçilmiştir. Bu pencerede “OK” butonuna tıklanarak ızgaralama ile ilgili bilgi penceresi görülebilir.



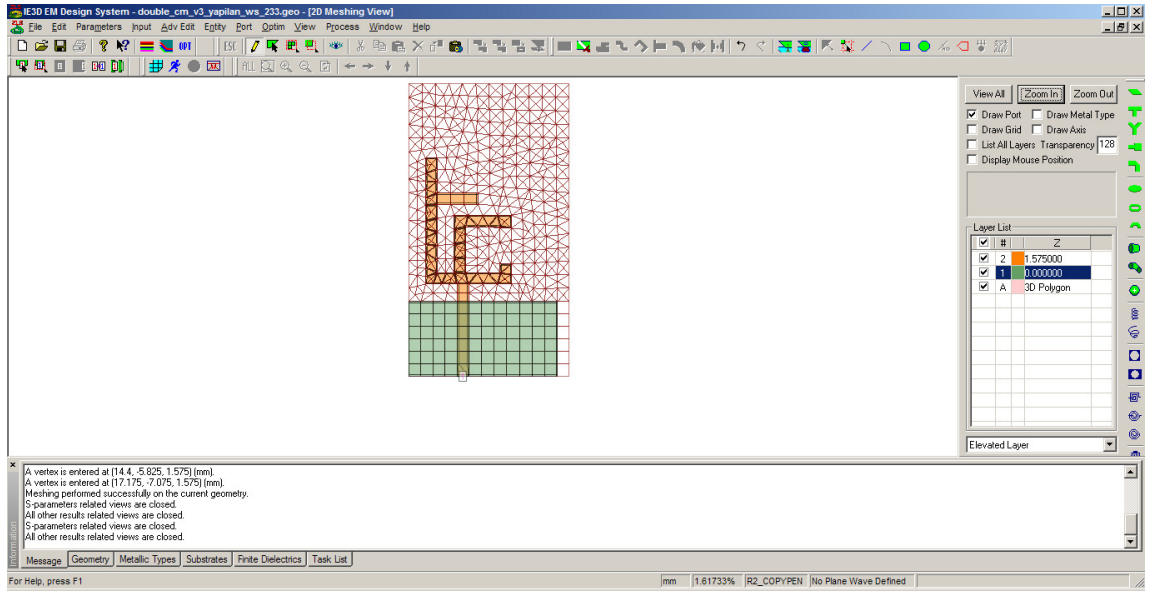
Şekil E1.9. Izgaralama ayarları

Izgaralama işlemi sonrası bilgi penceresi Şekil E1.10.'da görülmektedir. Bilgi penceresinde üçgen ve daire geometrilerine sahip hücre sayıları, toplam hücre sayısı, en küçük ve en büyük hücre boyutları gibi bilgiler ile benzetim işlemi için gerekli bellek miktarı görülmektedir.



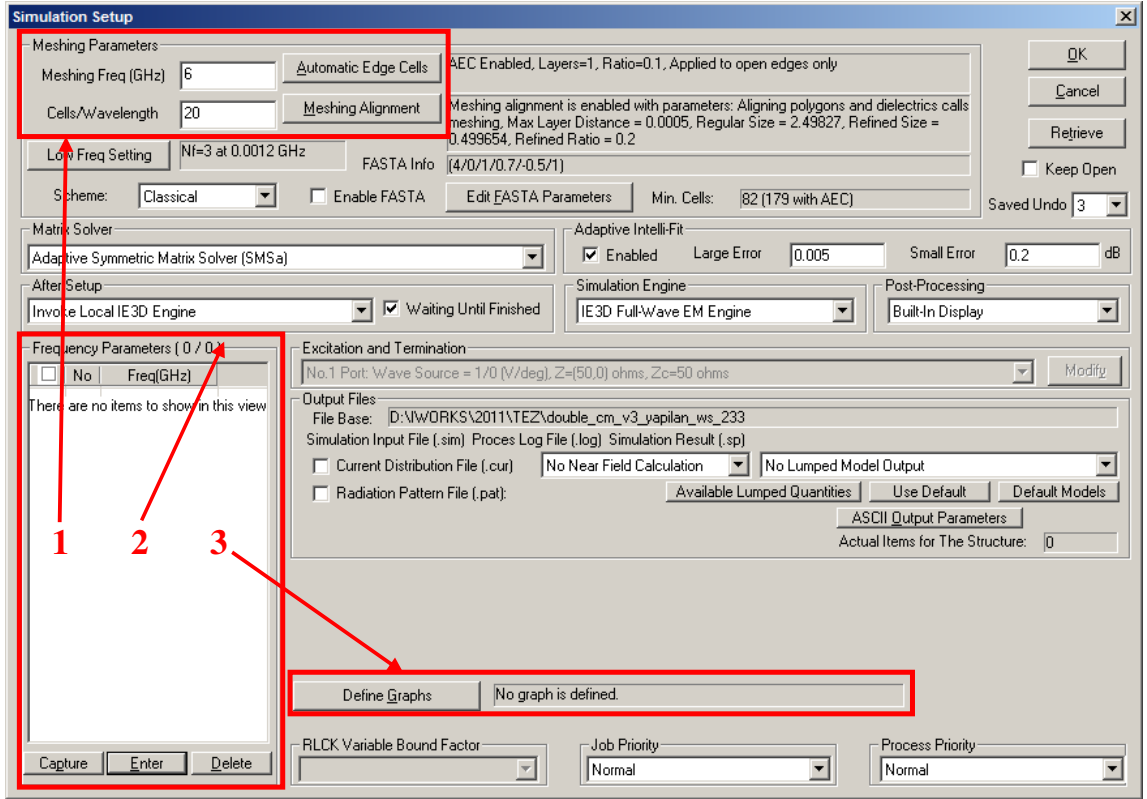
Şekil E1.10. Izgaralama işlemi sonrası bilgi ekranı

Bilgi ekranında devam (Continue) butonuna tıklanmasıyla ızgaralanmış anten tasarımı, Şekil E1.11.'de görüldüğü gibi açılacaktır.



Şekil E1.11. Izgaralama işlemi sonrası antenin iki boyutlu görünümü

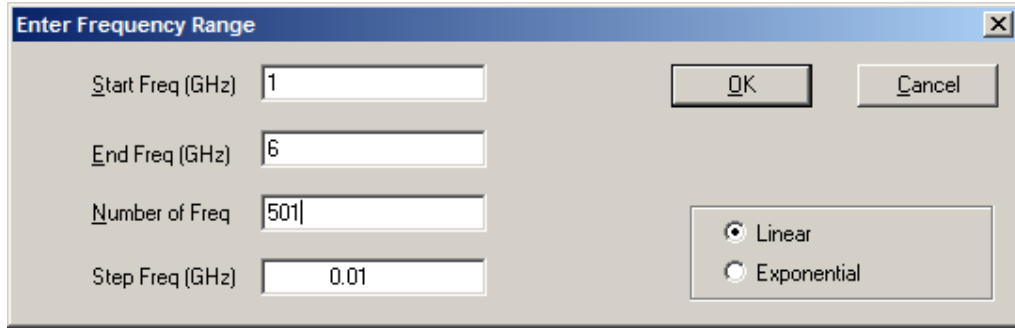
Izgaralama işleminden sonra benzetim işlemi yapılmaktadır. Bunun için araç menüleri kullanılarak benzetim (Simulate) işlemi seçilerek benzetim ayarlarının yapılmasına olanak sağlayan ekran açılmalıdır. Ekran görüntüsü Şekil E1.12.'de verilmiştir. Benzetim ayarlarının yapıldığı ekranda bazı ayarlar varsayılan olarak gelmektedir. Bu ekranda, eğer başlangıçta girilmemişse benzetimin yapılacağı maksimum frekans ve dalga boyu başına hücre sayısı bilgileri girilmelidir. Aksi halde, sadece benzetimin yapılacağı frekans aralığı girilmeli ve benzetim sonucunda görüntülenmesi istenen grafikler seçilmelidir. Bu işlemler, Şekil E1.12.'de görülen kırmızı kutuların belirttiği yerlerden yapılmaktadır.



Şekil E1.12. Benzetim ayarlarının yapılması

Şekil E1.12.'de 1 numara ile belirtilen alan, benzetimin yapılacağı maksimum frekansı ve dalga boyu başına hücre sayısının ayarlanmasını sağlamaktadır. Başlangıçta bu ayarlamalar yapıldıysa bu kutularda değişiklik yapılmasına gerek bulunmamaktadır. 2 numara ile belirtilen alan, simülasyonun yapılacağı frekans

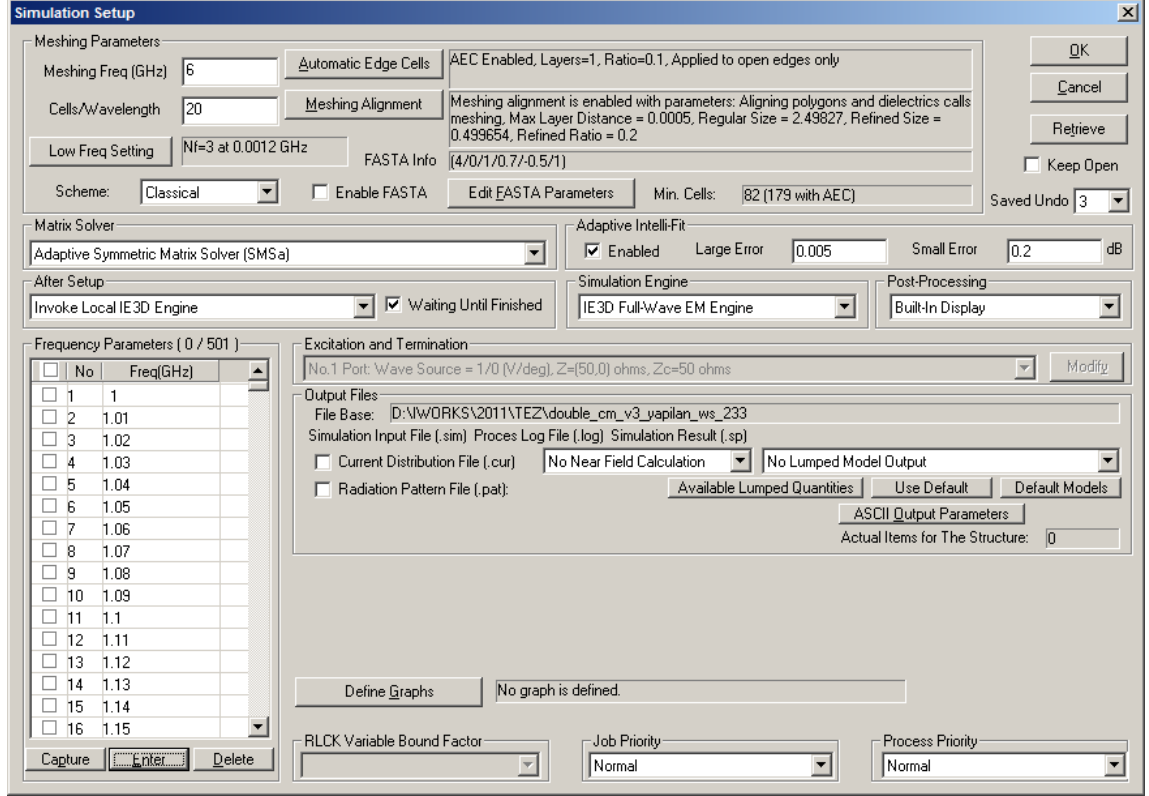
aralığını barındıran bir listedir. Benzetimin yapılması istenen frekans aralığı ve bu aralıktaki frekans adedi, giriş (Enter) butonuna tıklanarak gelecek ekrandan girilmektedir. Bu ekran görüntüsü Şekil E1.13.'te verilmiştir. 3 numara ile belirtilen alan, benzetim sonucu görüntülenmesi istenen grafiklerin belirtilmesini sağlamaktadır. Bu kutunun gösterdiği grafik tanımla (Define Graph) butonu yardımı ile istenen grafikler seçilerek, benzetim sonrasında hızlı bir şekilde bu grafiklerin açılması sağlanmaktadır.



The image shows a software dialog box titled "Enter Frequency Range". It has a standard Windows-style title bar with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains four input fields with labels and values: "Start Freq (GHz)" with "1", "End Freq (GHz)" with "6", "Number of Freq" with "501", and "Step Freq (GHz)" with "0.01". To the right of these fields are two buttons: "OK" and "Cancel". Below the input fields, there is a group box containing two radio buttons: "Linear" (which is selected) and "Exponential".

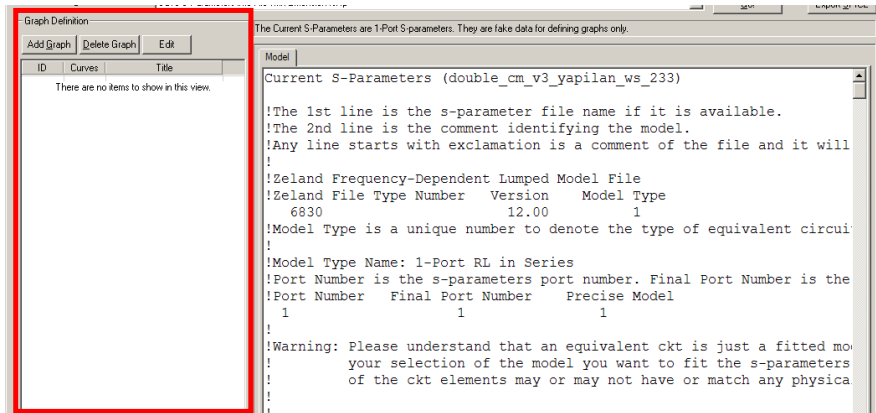
Şekil E1.13. Hesaplamaların yapılacağı frekans aralığı bilgileri

Benzetimin yapılacağı frekans aralığı ve bu aralıktaki frekans sayısı, Şekil E1.13.'te görülen ekrandan girilmektedir. Bu frekans aralığında ve belirtilen sayıdaki frekans, varsayılan olarak lineer artan şekilde seçilmektedir. Frekans aralığı ve frekans sayısının girilmesinden sonra tamam (OK) butonuna tıklanarak, frekans listesinin dolması sağlanmaktadır. Bu listenin doldurulduğu benzetim ayarları ekranı, Şekil E1.14.'te görülmektedir.



Şekil E1.14. Simülasyon ayarları penceresi

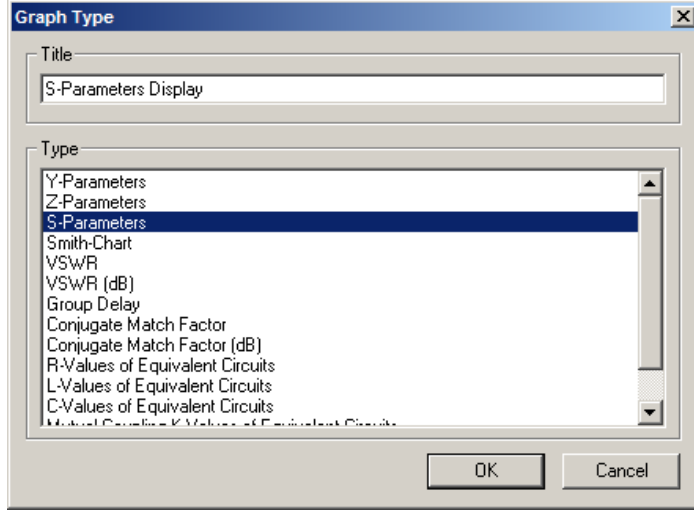
Benzetim için gerekli olan son ayar, benzetim işlemi sonucu hangi grafiklerin görüntülenmesinin gerektiği ile ilgili ayardır. Görüntülenmek istenen grafikler, grafik tanımlama (Define Graph) butonuna tıklanarak gelecek ekrandan seçilmektedir. Bu ekranın görüntüsü Şekil E1.15.'te verilmiştir.



Şekil E1.15. Grafik tanımlama penceresi

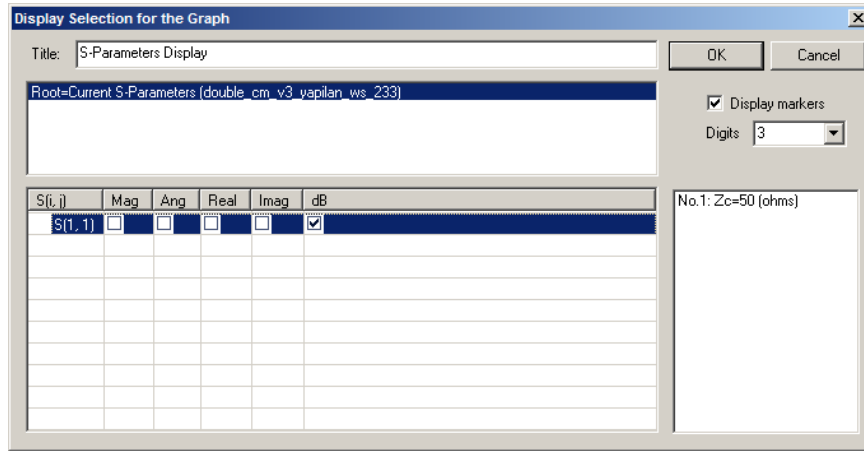


Grafik tanımlaması, bu ekranda kırmızı kutu ile belirtilen bölümde yer alan grafik ekle (Add Graph) butonuna tıklanarak yapılmaktadır. Bu butona tıklandıktan sonra Şekil E1.16.'da görülen ekran açılmaktadır.



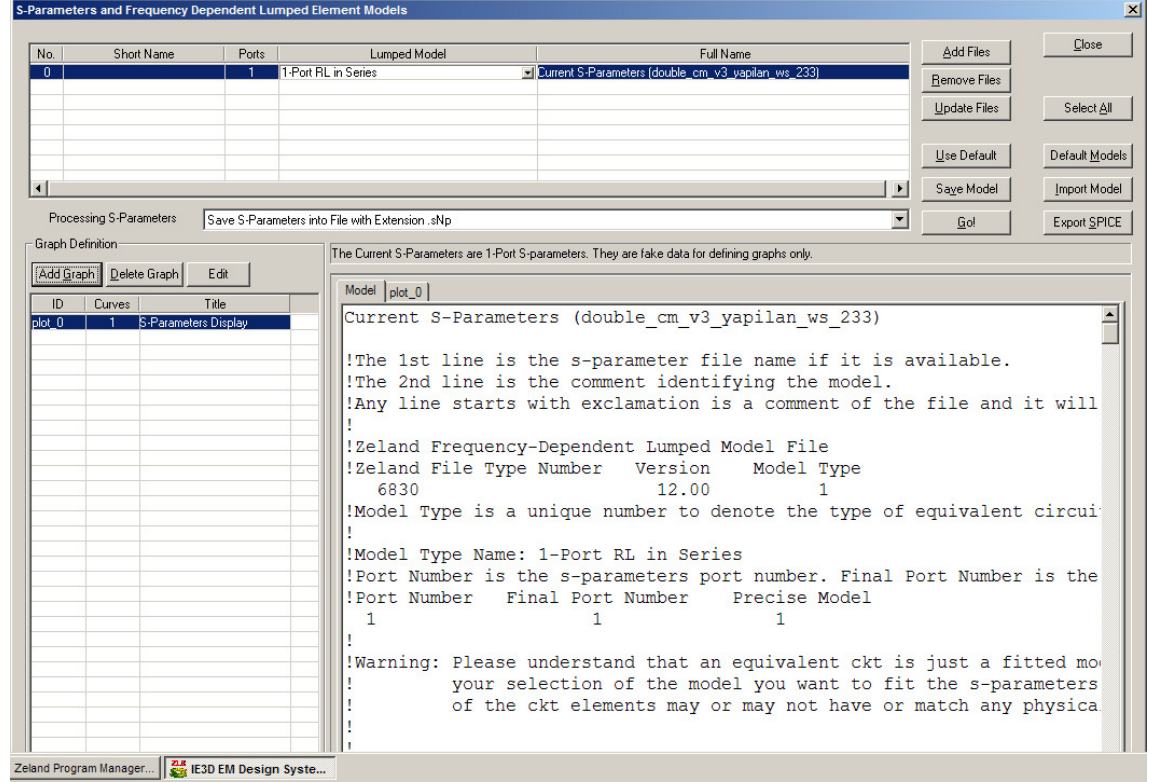
Şekil E1.16. Geri dönüş kaybı parametresinin seçimi

Bu ekranda istenen grafikler, tek tek seçilerek “OK” butonuna tıklanmalıdır. Bazı grafiklerin kendilerine özel ayarları bulunmaktadır. Bu ayarlar ile ilgili ayar ekranı, tamam butonuna tıkladıktan sonra açılmaktadır. Şekil E1.16.'da geri dönüş kaybı (S-parameter) grafiği seçilerek tamam butonuna tıklanmıştır. Geri dönüş kaybı grafiği ile ilgili ayarlar, Şekil E1.17.'de görülmektedir.



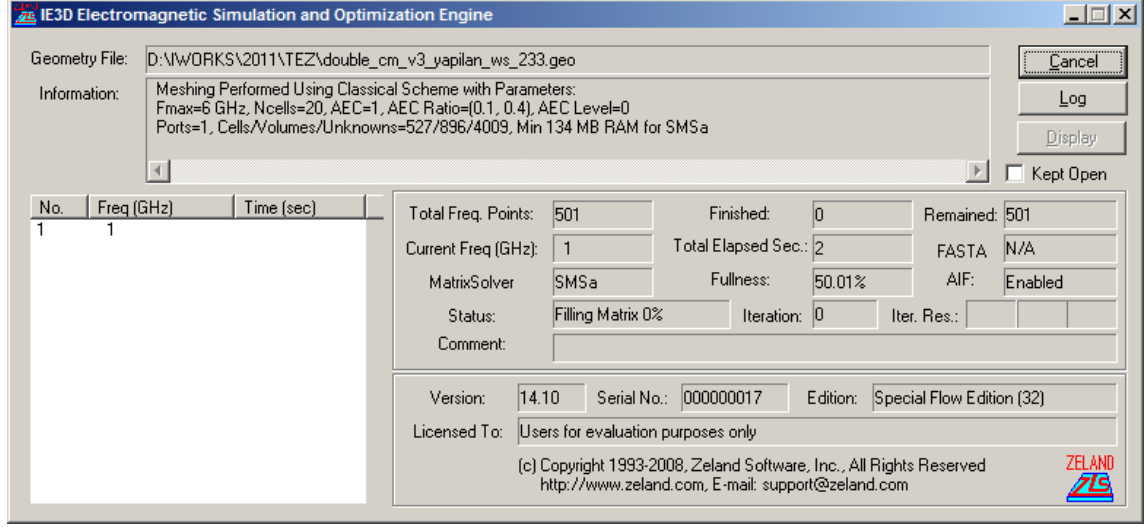
Şekil E1.17. Geri dönüş kaybı parametresi grafiği için bilgi seçimi

Ayar ekranında, görüntülenmesi istenen bilgiler seçilerek “OK” butonuna tıklanmalıdır.



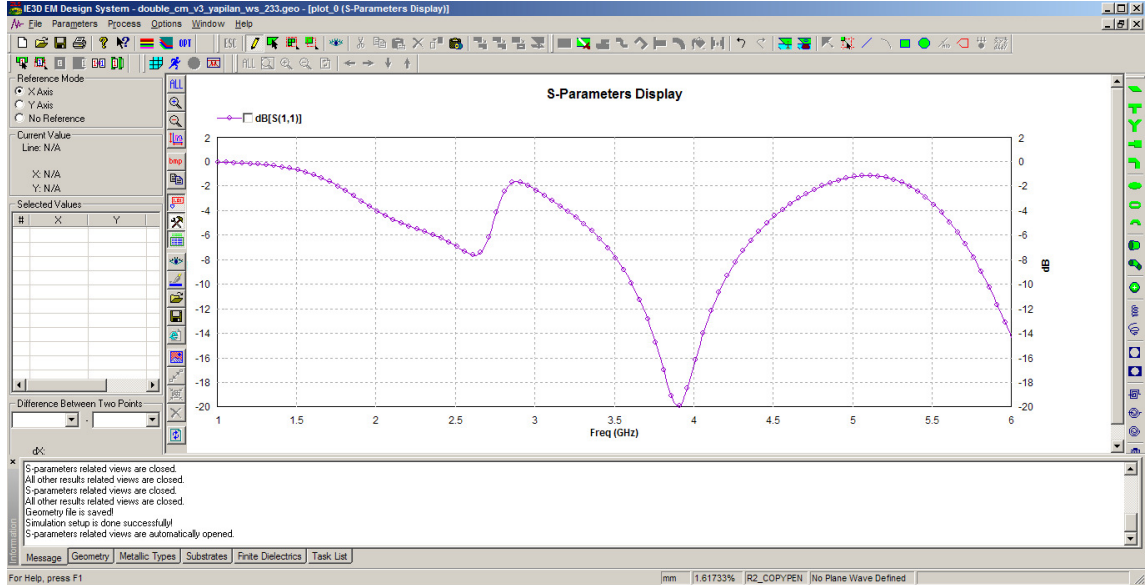
Şekil E1.18. Grafiğin tanımlanmasından sonraki ekran görüntüsü

Grafik eklendikten sonra, Şekil E1.18.'de görülen ekran “Close” butonuna tıklanarak kapatılmalıdır. Bütün ayarlamalar yapıldığından dolayı benzetim işlemine geçilebilir. Benzetim işleminin yapılması için benzetim ayarları ekranından “OK” butonuna tıklanmalıdır. Bu işlemden sonra IE3D benzetim uygulaması çalışarak hesaplamalar yapılmaya başlanacak ve benzetim işlemi bittikten sonra, ayarlarda seçilen grafikler otomatik olarak açılacaktır. Benzetim işleminin devam ettiğini gösteren ekran Şekil E1.19.'da verilmiştir.



Şekil E1.19. Benzetim işlemi ile ilgili bilgilerin görülmesi

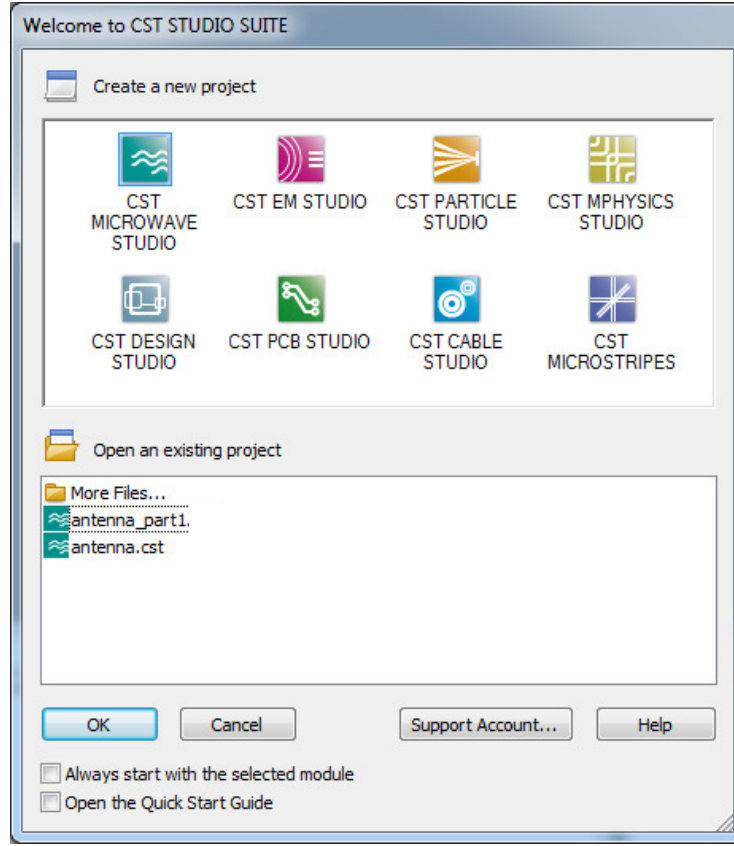
Benzetim işleminden sonra, ayarlamalar sırasında seçilen geri dönüş parametresi grafiği otomatik olarak açılacaktır. Geri dönüş parametresi grafiği, Şekil E1.20.'de görülmektedir.



Şekil E1.20. Benzetim işlemi sonrası geri dönüş kaybı grafiği

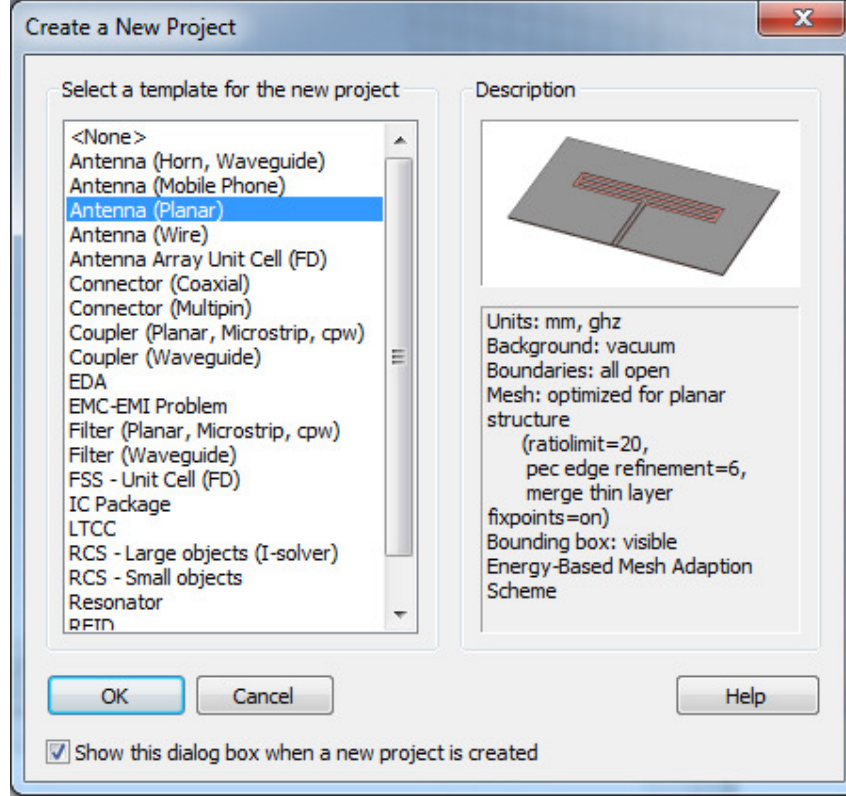
## **EK 2. CST Programı ile Anten Tasarımı ve Benzetimi**

CST programı ile anten tasarımı ve benzetimi yapmak için, program açılarak yeni proje oluşturulmalıdır. Benzetim programı çalıştırıldığında öncelikle hangi tasarım programının çalıştırılacağı seçilmelidir. Çalıştırılabilecek program seçenekleri Şekil E2.1.'de görülmektedir. Bu tez çalışması için CST MicroWave Studio seçilmektedir.



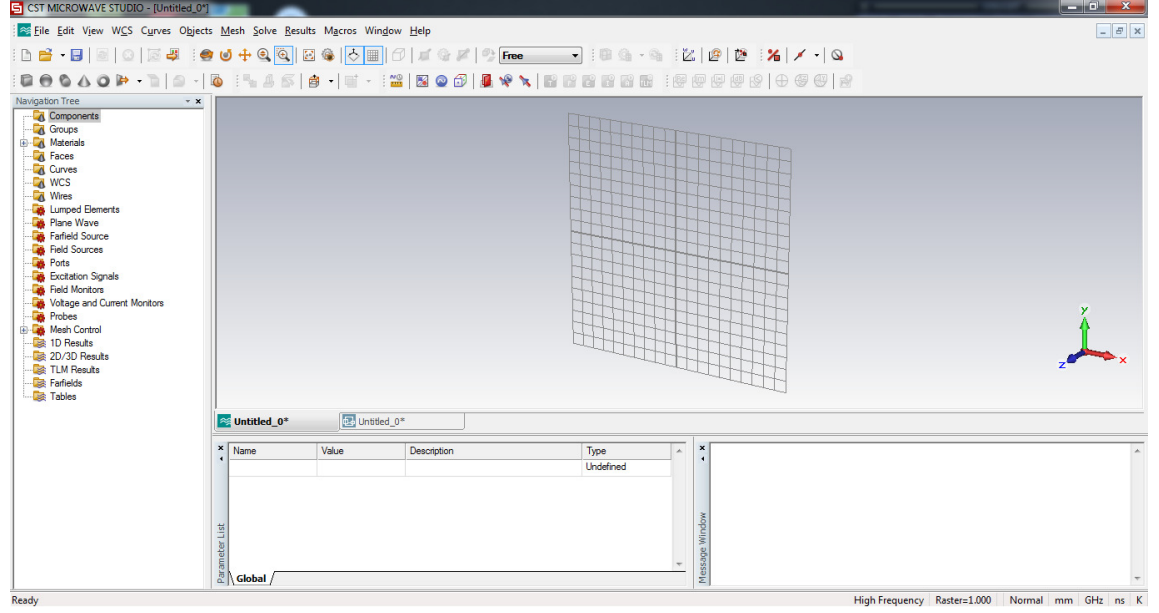
Şekil E2.1. CST programı ile yeni proje oluşturulması

CST MicroWave Studio seçildikten sonra tamam (OK) butonuna tıklanmalıdır. Bu işlemden sonra, hazırlanacak proje için, Şekil E2.2.'de görüldüğü gibi bir şablon seçimi ekranı gelmektedir. Bu ekrandan, amaca uygun bir şablon seçilerek, benzetim işlemi için gerekli bazı ayarlamaların otomatik olarak yapılması sağlanabilir. Bu çalışma için Antenna (Planar) şablonu seçilmiştir.



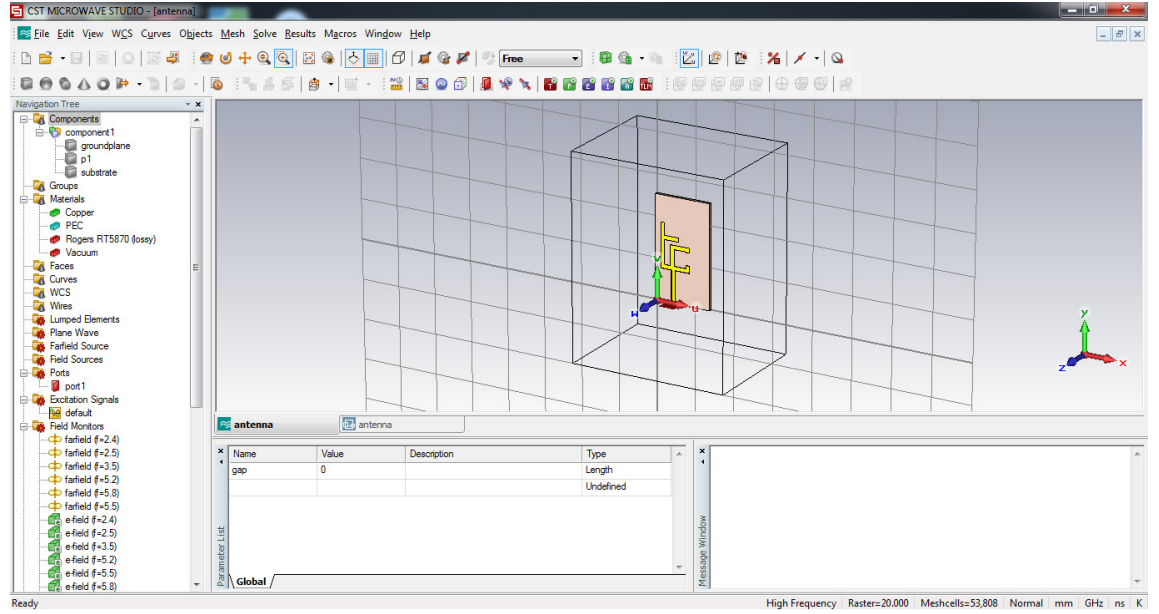
Şekil E2.2. Proje şablonu seçimi

Şablon seçiminden sonra Şekil E2.3.'te görülen ekran gelmektedir. Bu ekran, tasarım işleminin üç boyutlu olarak yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca ekranın sol kenarında yer alan bölme, tasarım ile ilgili ayarlara ve benzetim işlemi sonrası sonuçlara erişimi sağlamaktadır. Ekranın alt orta bölümünde bulunan alan, tasarımın değişkenler kullanılarak parametrik olarak hazırlanmasına imkan sağlayan değişken tanımlama bölümüdür. Anten geometrisine ilişkin çeşitli özelliklerin değişken tanımlama bölümünden tanımlanması, ölçülerin kolaylıkla değiştirilmesine, optimizasyon sırasında işlemlerin daha kolay ve hızlı yapılmasına imkan tanımaktadır. Ekranın alt sağ bölümünde ise benzetim işlemine ilişkin bildirim mesajları yer almaktadır.



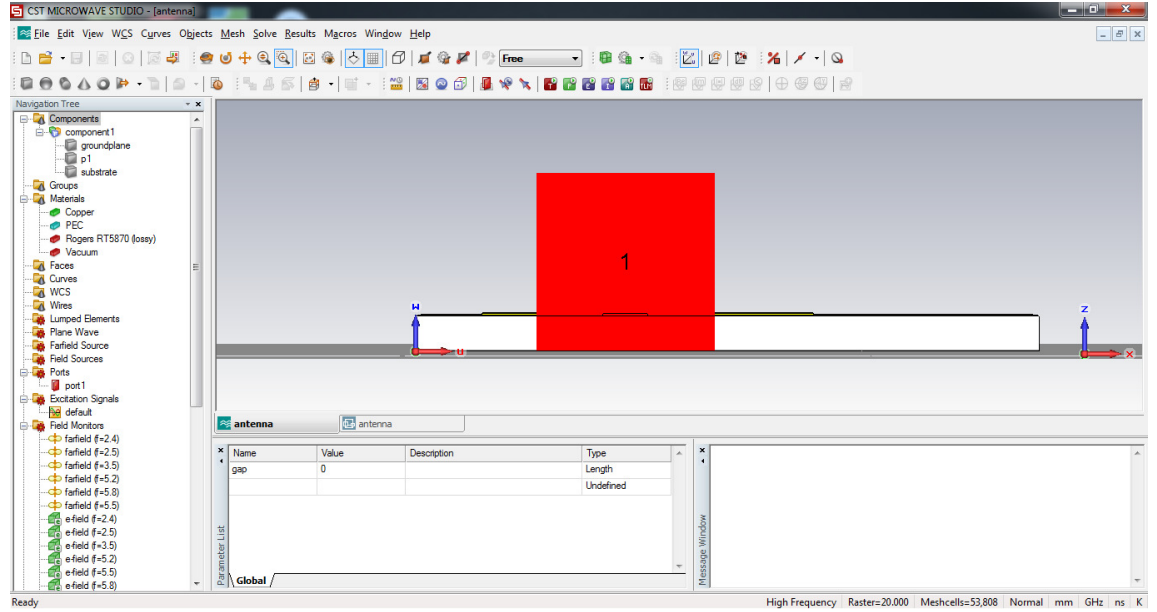
Şekil E2.3. 3 boyutlu tasarım ekranı

Programın araç çubuğunda yer alan tasarım araçları kullanılarak anten tasarımı kolaylıkla yapılabilmektedir. Tasarımı yapılan antenin CST programında görüntüsü Şekil E2.4.'te görülmektedir.



Şekil E2.4. Tasarımı yapılan anten görüntüsü

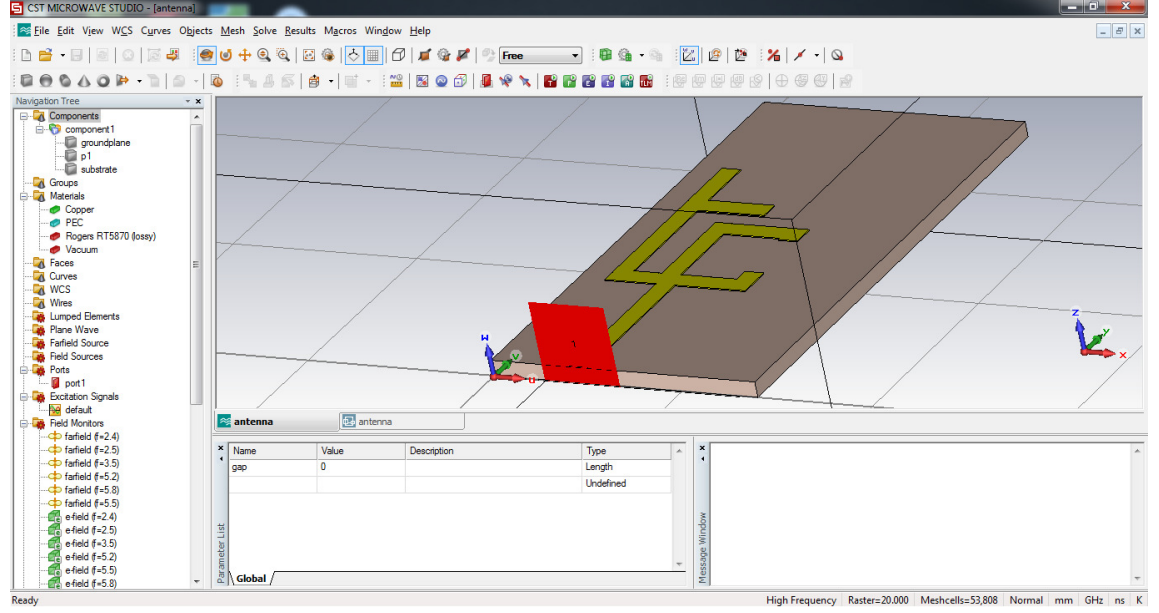
Tasarımı yapılan anten için besleme, CST programında dalga portu (Wave Port) olarak adlandırılan araç kullanılarak yapılmıştır. Beslemenin konumunun ve boyutlarının girilmesi, beslemenin gerçekleştirilmesi için yeterli olmaktadır. Beslemesi yapılan antenin alttan görüntüsü Şekil EK2.5.'te görülmektedir.



Şekil E2.5. Anten beslemesini sağlayan dalga portu görünümü

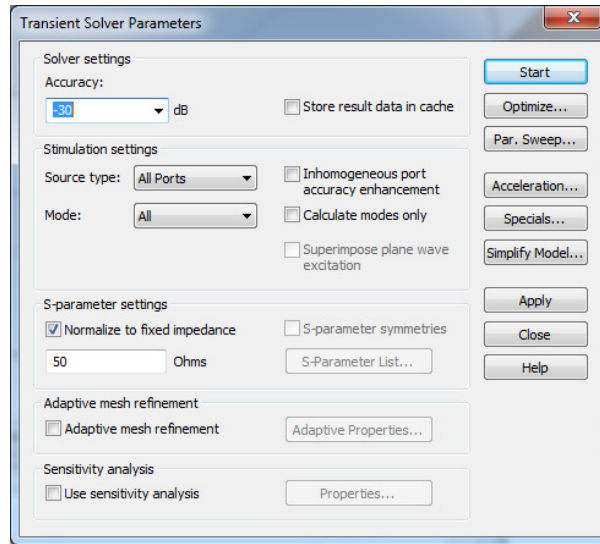
Antenin görüntülenmesinin kolaylaştırmak için, ekranda döndürme işlemleri, araç menüleri yardımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Beslemesi yapılan antenin alt köşeden görüntüsü Şekil E2.6.'da görülmektedir.





Şekil E2.6. Dalga portu ile beslenmiş anten

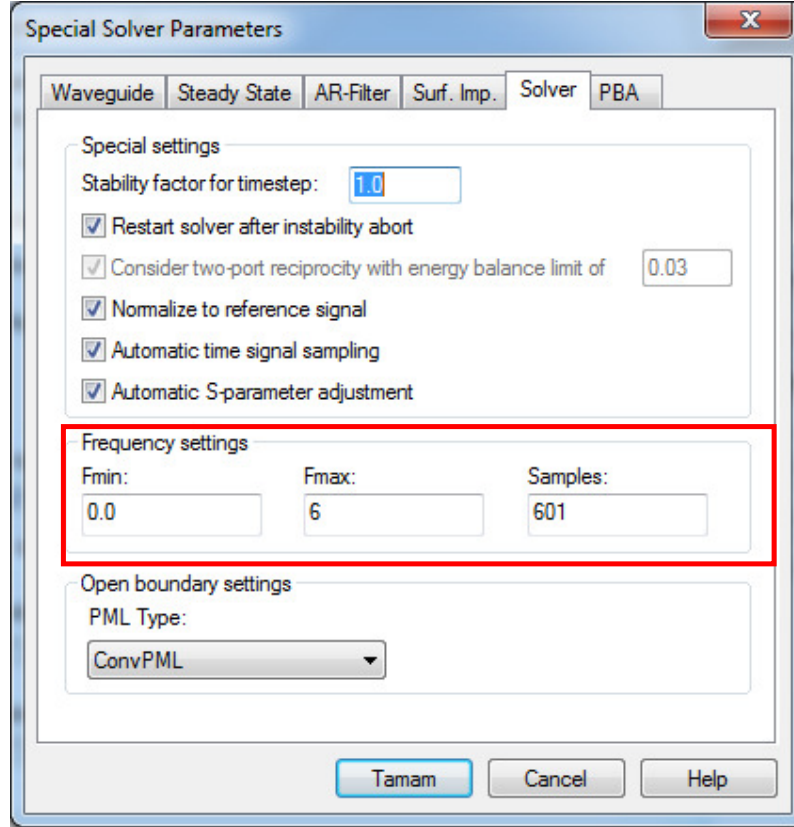
Besleme işleminin ardından benzetim işlemine geçilebilmektedir. Bu programda ızgaralama işlemi ile ilgili özellikler program tarafından otomatik olarak ayarlanıp gerçekleştirilmektedir. Bundan dolayı benzetim işlemi, IE3D'ye göre daha kısadır. Benzetim işlemi ekranı Şekil E2.7.'de verilmiştir. Benzetim işlemini başlatmadan, bu ekranda “Specials...” butonuna tıklanmalıdır.



Şekil E2.7. Benzetim ayarları

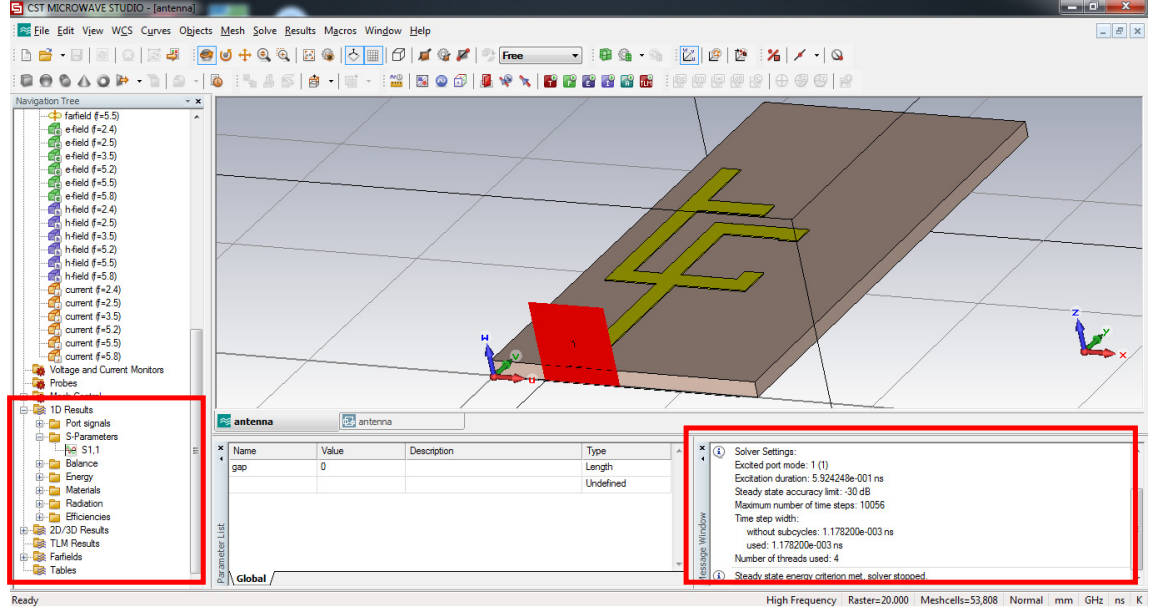


Şekil E2.8.'de görülen ekran açılacaktır. Bu ekranda çözücü (Solver) sekmesi açılarak frekans ayarları (Frequency settings) bölümünde yer alan örnekler (Samples) değeri, yapılan çalışmalara göre,  $((f_{\max} - f_{\min}) \times 100) + 1$  olarak belirlenmelidir.



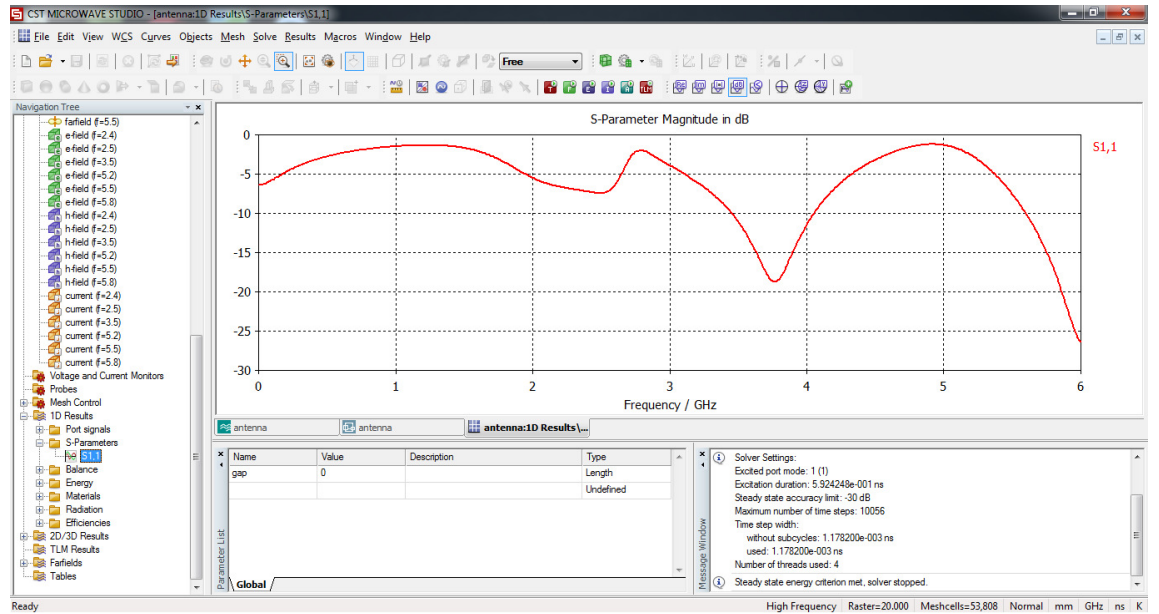
Şekil E2.8. Benzetimi yapılacak anten için belirlenen frekans aralığında nokta sayısı seçimi

Bu ekrandan tamam butonuna tıklanmalı ve benzetim ayarları ekranından yine tamam butonuna tıklanarak benzetim işlemi başlatılmalıdır. Benzetim işlemi boyunca ekranın sağ alt bölümünde yer alan mesaj bölmesine, benzetim işlemleri ile ilgili mesajlar eklenmektedir. Benzetim işlemi bittiğinde, işlemin bittiğine dair bir mesaj eklenerek sonuçlar kaydedilmektedir. Benzetim işleminden sonraki pencere, Şekil E2.9.'da görülmektedir.



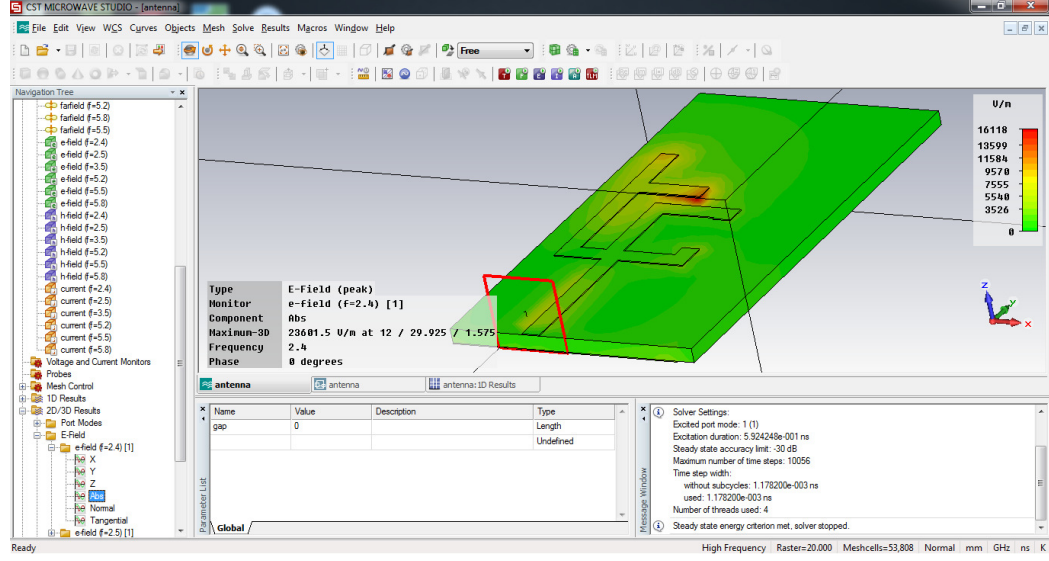
Şekil E2.9. Benzetim sonrası ekran görüntüsü

Şekil E2.9.'da ekranın sol kenarında görülen kırmızı kutu ile belirtilen alan, benzetim sonuçlarının yer aldığı bölümü göstermektedir. Benzetim işlemi sonrası sonuçlara buradan ulaşılabilir. Benzetimi yapılan antenin geri dönüş kaybı parametresi grafiği Şekil E2.10.'da görülmektedir.



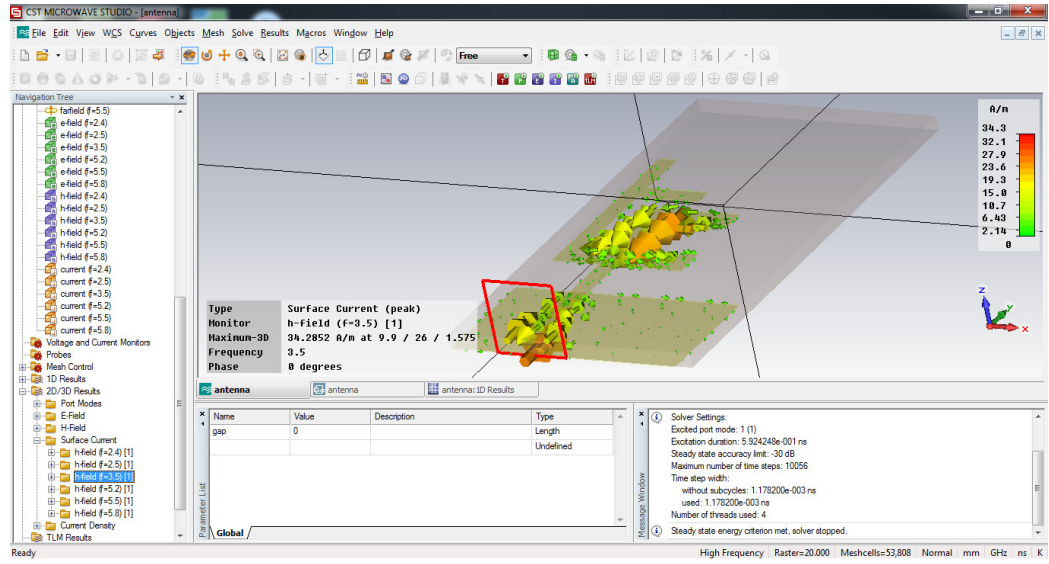
Şekil E2.10. Benzetim sonucu elde edilen geri dönüş kaybı grafiği

Benzetimi yapılan antenin E-Alanının görüldüğü üç boyutlu görüntüsü Şekil E2.11.'de görülmektedir. Bu grafiğe, sonuçlar kısmından erişilebilmektedir.



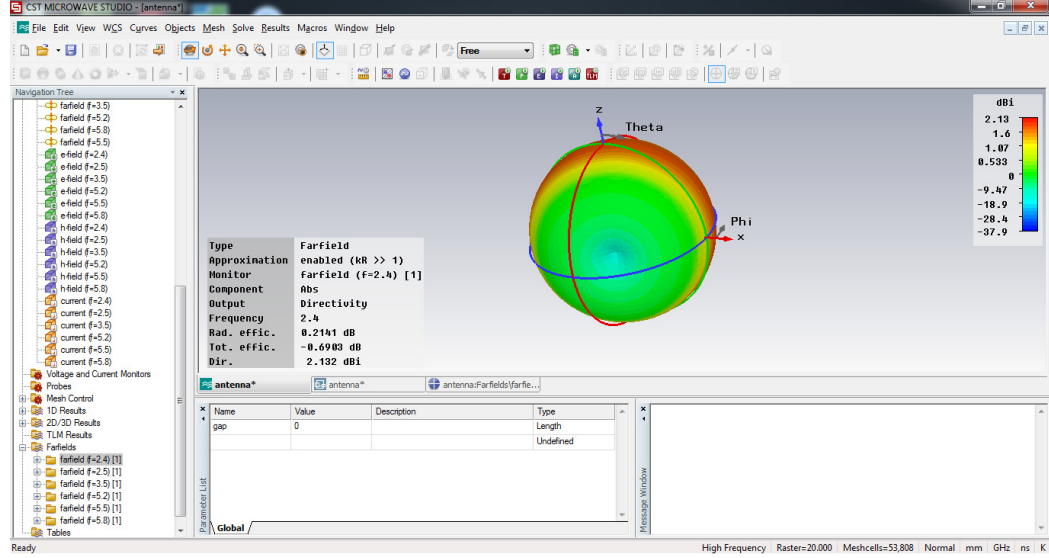
Şekil E2.11. Benzetimi yapılan anten için E-Alanı gösterimi

Benzetimi yapılan antenin üç boyutlu görüntüsü ve yüzey akımları ile ilgili örnek görüntü Şekil EK2.12.'de görülmektedir.



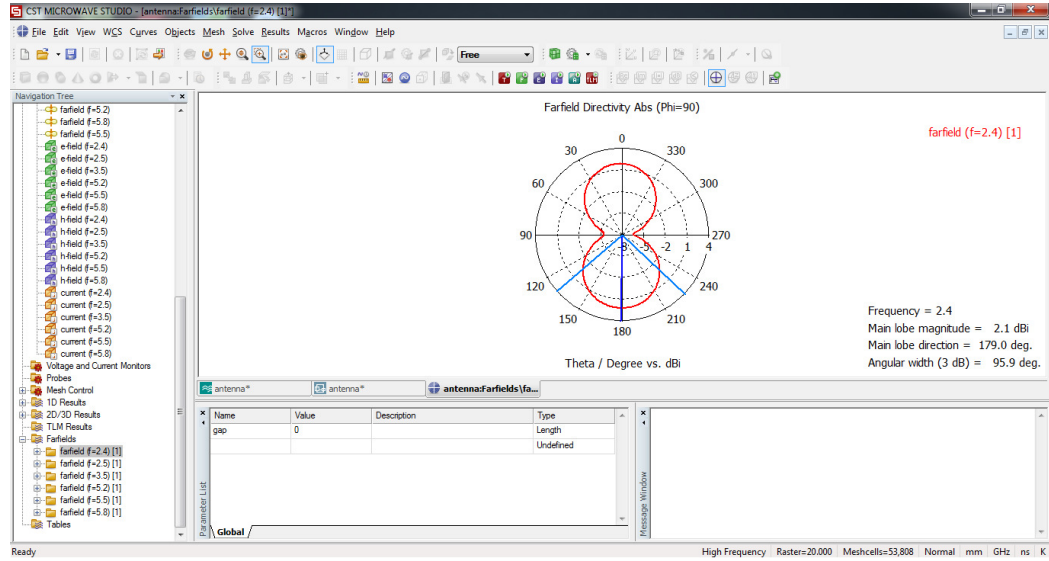
Şekil E2.12. Benzetimi yapılan anten için yüzey akımları gösterimi

Benzetimi sonucu, antenin üç boyutlu ışınma diyagramı Şekil E2.13.'te görülmektedir.



Şekil E2.13. Benzetimi yapılan anten için üç boyutlu ışınma diyagramı gösterimi

Benzetimi yapılan antenin iki boyutlu ışınma diyagramı ile ilgili örnek görüntü Şekil E2.14.'te görülmektedir. Bu grafiğe, sonuçlar kısmından erişilebilmektedir.



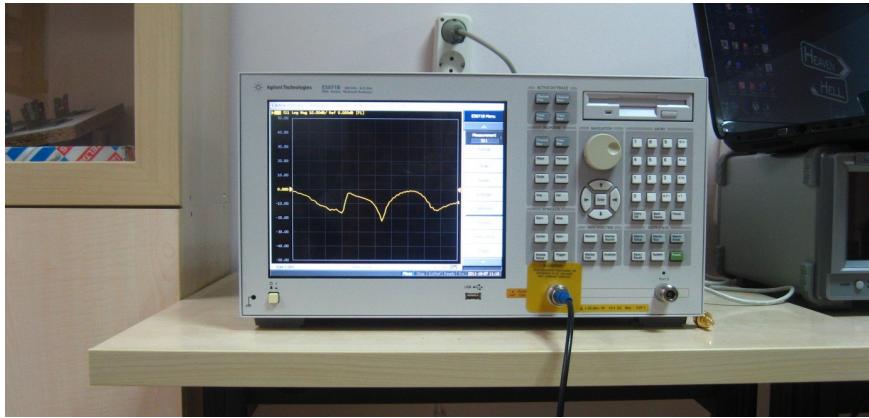
Şekil E2.14. Benzetimi yapılan anten için iki boyutlu ışınma diyagramı

### **EK 3. Antende Ölçüm İşlemi**

Tasarımı yapılan anten, 3.ncü bölümde belirtildiği gibi gerçekleştirilmiş ve Agilent ENA E5071B Series RF Network Analyzer cihazı ile ölçüm işlemine tabi tutulmuştur. Daha önceden belirtildiği gibi geri dönüş kaybının -10 dB değerinin altında olması, antenin iyi bir performans göstereceğini belirtmektedir. Antenin geri dönüş kaybı ( $S_{11}$ ) ölçülerek bilgisayara aktarılmıştır. Geri dönüş kaybının ölçülmesi için network analizöründe ölçümün yapılacağı frekans aralığı belirlenmiştir. Daha sonra, cihazı üreten firma tarafından sunulan kalibrasyon kiti kullanılarak cihazın kalibrasyonu yapılmıştır. Bundan sonra ise anten, network analizörüne bağlanarak ölçüm işlemi yapılmış ve sonuçlar USB bağlantısı yapılarak bilgisayara aktarılmıştır. Deney düzeneği ile ilgili fotoğraflar Şekil E3.1. ve Şekil E3.2.'de verilmiştir.

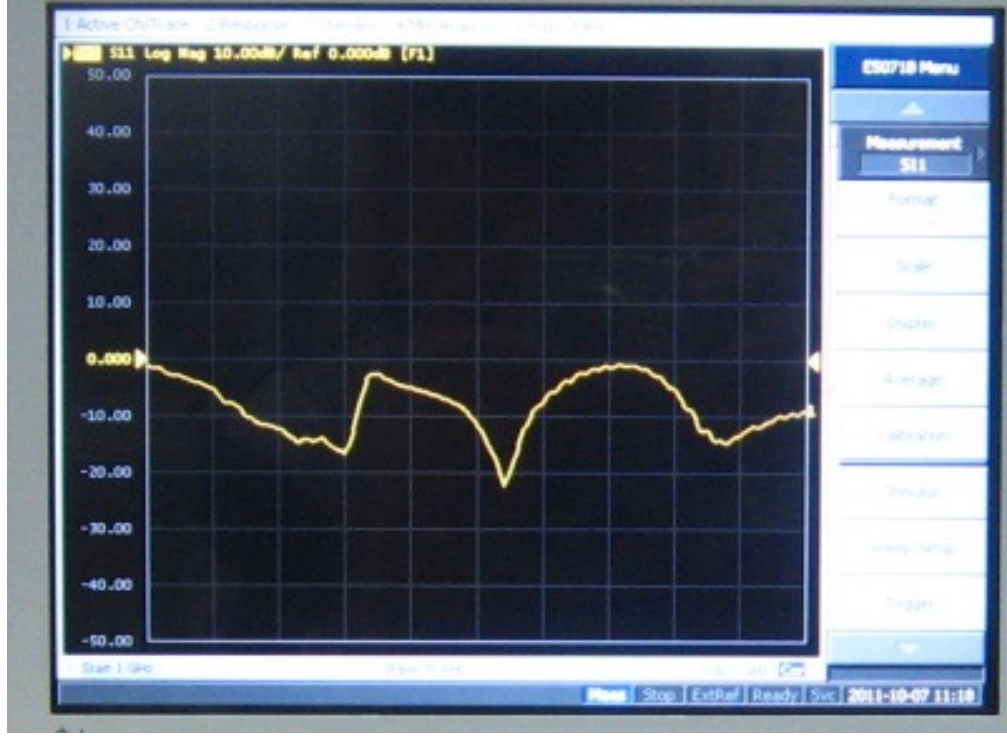


Şekil E3.1. Ölçüm ortamı ve düzeni



Şekil E3.2. Ölçüm sırasındaki network analizör ekranı





Şekil E3.3. Network analizörü ekranında geri dönüş kaybı sonucu

## ÖZGEÇMİŞ VE ESERLER LİSTESİ

**Adı Soyadı:** Mustafa Berkan BİÇER

**Doğum Tarihi:** 14/04/1988

**Öğrenim Durumu:**

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Fırat Üniversitesi	2005-2009
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2009-

**(Varsa) Görevler:**

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Mersin Üniversitesi	2009-

### ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Kayabasi, A., **Bicer, M. B.**, Akdagli, A. ve Toktas, A., “Yapay Sinir Ağları Kullanarak UHF Bandında Çalışan H Şekilli Kompakt Mikroşerit Antenlerin Rezonans Frekansının Belirlenmesi”, J Fac Eng Archit Gazı Univ, (2011), (Baskıda).
2. Toktas, A., **Bicer, M. B.**, Akdagli, A. ve Kayabasi, A., “Simple Formulas for Calculating Resonant Frequencies of C and H Shaped Compact Microstrip Antennas Obtained by Using Artificial Bee Colony Algorithm”, J. Of Electromagn. Waves and Appl., 25, 1718-1729, (2011).
3. Akdagli A., **Bicer M. B.** ve Ermis S., “A Novel Expression for Resonant Length Obtained by Using Artificial Bee Colony Algorithm in Calculating Resonant Frequency of C-Shaped Compact Microstrip Antennas”, Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci., 19, 597-606, (2011).
4. Kayabasi, A., Akdagli, A., **Bicer, M. B.** ve Toktas, A., “Yapay Sinir Ağları Kullanarak UHF Bandında Çalışan C Şekilli Kompakt Mikroşerit Antenlerin Rezonans Frekansının Belirlenmesi”, URSI’2010, KKTC, (2010), (sözlü).