

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAMATERYAL ALTYAPILI VE HALKA YÜKLEMELİ  
MİKROŞERİT ANTEN TASARIMLARI VE GERÇEKLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Adnan SONDAŞ**

**Anabilim Dalı: Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi**

**Danışman: Doç. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ**

**KOCAELİ, 2011**

**METAMATERYAL ALTYAPILI VE HALKA YÜKLEMELİ  
MİKROŞERİT ANTEN TASARIMLARI VE GERÇEKLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Adnan SONDAŞ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16 Mayıs 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 04 Temmuz 2011**

**Tez Danışmanı**

**Doç.Dr. Yunus Emre ERDEMLİ**

()

**Üye**

**Doç.Dr.Gonca ÇAKIR**

()

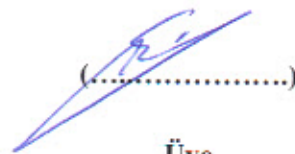
**Üye**

**Doç.Dr.Namık YENER**

()

**Üye**

**Doç.Dr.A.Arif ERGİN**

()

**Üye**

**Doç.Dr.Korkut YEĞİN**

()

**KOCAELİ, 2011**

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, özgün mikroşerit anten dizilerinin sayısal tasarımı ve prototip üretimlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasının ilk aşamasında, frekans-ayarlamalı SRR altyapılı yeni bir mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise, geniş-bantlı balun/besleme yapısına sahip, halka-yüklemeli mikroşerit dipol anten tasarımları geliştirilmiştir. İlgili dipol tasarımları 3.0 ve/veya 5.5 GHz bantlarında çift-bant veya anahtarlanabilir tek-bant özelliğine sahiptirler. Elektronik anahtarlama, yüzey-uyumlu ve düşük kayıplı PIN-diyot anahtarlarla sağlanmaktadır. Anten panellerinin sayısal analizi ve tasarımında, CST Microwave Studio simülatörü kullanılmıştır. İlgili ölçüm ve simülasyon sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada önerilen 3/5.5 GHz çift-bant dipol anten dizi tasarımının muhtemel bir askeri uygulamada yer alabilecek radar sistemi için temel teşkil etmesi düşünülmektedir.

Bu tez çalışması, 1 adet TÜBİTAK (No:107E198) ve 1 adette KOÜ-BAP (No:2010/35) projesi desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde, sahip olduğu bilgi birikimini benimle paylaşıp, bana yol gösteren ve katkılarıyla tezin bugünlere gelmesini sağlayan danışmanım Doç. Dr. Yunus Emre ERDEMLİ'ye, değerli yorumlarından dolayı Doç. Dr. Gonca ÇAKIR'a ve Doç. Dr. A. Arif ERGİN'e sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım. Ayrıca, yardımlarını benden esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa H. B. UÇAR'a; tasarlanan anten yapılarının prototip üretimi ve ölçümlerinin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı, TÜBİTAK/UEKAE birimine, özellikle Dr. Fatih ÜSTÜNER'e, Mustafa DOĞAN'a ve Sefa OGAN'a teşekkür ederim. Tez çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve anlayış, verdikleri manevi desteklerinden ötürü eşim Sibel SONDAŞ ve oğlum Burak Kamil SONDAŞ başta olmak üzere, anneme, babama, kardeşlerime ve bütün dostlara sonsuz şükran ve minnetlerimi sunarım.

Adnan SONDAŞ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	v
SEMBOLLER .....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. SRR ALTYAPILI MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Mikroşerit Yama Anten/SRR Alttaş Tasarımı .....	8
2.3. MYA/SRR Tasarımında Pratik Anahtar Modellemesi.....	12
3. ÇİFT-BANT HALKA-YÜKLEMELİ MİKROŞERİT DİPOL ANTEN TASARIMLARI ..	15
3.1. Giriş.....	15
3.2. Tek Elemanlı MDA-I Tasarımı .....	15
3.3. Tek Elemanlı MDA-II Tasarımı.....	18
3.4. Tek Elemanlı MDA-III Tasarımı .....	21
3.5. 2×2 MDA Dizi Tasarımı .....	28
3.6. 4×4 MDA Dizi Tasarımı .....	31
3.7. Çift-Polarizasyonlu Çift-Bant 2×2 MDA Dizi Tasarımı.....	34
4. ANAHTARLAMALI MİKROŞERİT DİPOL ANTEN TASARIMLARI.....	37
4.1. Giriş.....	37
4.2. Tek Elemanlı Anahtarlamaalı MDA Tasarımı.....	37
4.3. 2×2 Anahtarlamaalı MDA Dizi Tasarımı .....	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	45
KAYNAKLAR.....	49
KİŞİSEL YAYINLAR VE PROJELER .....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: SRR altyapılı MYA tasarımı. ....	3
Şekil 1.2: Önerilen halka-yüklemeli MDA tasarımları.....	4
Şekil 2.1: MYA/SRR konfigürasyonu. ....	9
Şekil 2.2: Yüklemeli SRR yapısı. ....	9
Şekil 2.3: MYA/SRR tasarımının frekans-ayarlama performansı. ....	10
Şekil 2.4: SRR+y <sub>3</sub> tasarımının 4.85 GHz'teki 3D ve 2D ışımaya diyagramları.....	10
Şekil 2.5: Gerçeklenen MYA/SRR prototipi. ....	11
Şekil 2.6: MYA/SRR tasarımının ölçüm ve analiz sonuçları. ....	12
Şekil 2.7: Köprü MEMS anahtar modelli MYA/SRR tasarımının frekans-ayarlamalı performansı. ....	13
Şekil 2.8: Köprü MEMS modeli ve PIN diyot eşdeğer devre modeli sonuçlarının karşılaştırılması. ....	14
Şekil 3.1: MDA-I konfigürasyonu.....	16
Şekil 3.2: Gerçeklenen MDA-I prototipi ve S <sub>11</sub> performansı. ....	16
Şekil 3.3: MDA-I tasarımına ait ışımaya örüntüleri (simülasyon). ....	17
Şekil 3.4: MDA-I tasarımına ait ışımaya örüntüleri (ölçüm). ....	17
Şekil 3.5: Yüklemeli balun konfigürasyonu. ....	18
Şekil 3.6: Balun tasarımlarının VSWR benzetim ve ölçüm sonuçları.....	19
Şekil 3.7: MDA-II tasarımı ve S <sub>11</sub> performansı.....	19
Şekil 3.8: Anten üzerindeki yüzey akım dağılımı grafiği. ....	20
Şekil 3.9: MDA-II tasarımına ait ışımaya örüntüleri (simülasyon). ....	20
Şekil 3.10: MDA-II tasarımına ait ışımaya örüntüleri (ölçüm). ....	21
Şekil 3.11: MDA-III tasarımı.....	22
Şekil 3.12: MDA-III tasarımında kullanılan balun yapısına ait VSWR karakteristiği.....	22
Şekil 3.13: Halkalı ve halkasız MDA-III tasarımının giriş empedans grafiği. ....	23
Şekil 3.14: MDA-III tasarımının S <sub>11</sub> performansı.....	23
Şekil 3.15: MDA-III tasarımına ait ışımaya örüntüleri (simülasyon). ....	24
Şekil 3.16: MDA-III tasarımına ait ışımaya örüntüleri (ölçüm). ....	24
Şekil 3.17: Halka elemanlarının uzunluk ve genişliğine göre parametrik çalışma sonuçları. ....	25
Şekil 3.18: Dipol uzunluğuna göre parametrik çalışma sonuçları. ....	26
Şekil 3.19: MDA-III tasarımı için önerilen eşdeğer devre modeli.....	27
Şekil 3.20: MDA-III tasarımı ile eşdeğer devre modelinin yansıma karakteristikleri. ....	27
Şekil 3.21: 2×2 MDA dizi konfigürasyonu.....	29
Şekil 3.22: 2×2 MDA dizi tasarımının S <sub>11</sub> performansı. ....	29
Şekil 3.23: 2×2 MDA dizi tasarımına ait ışımaya örüntüleri (simülasyon). ....	30

Şekil 3.24: 2×2 MDA dizi tasarımına ait ışına örüntüleri (ölçüm). .....	30
Şekil 3.25: 4×4 MDA dizi konfigürasyonu .....	31
Şekil 3.26: 4×4 MDA dizi tasarımının $S_{11}$ performansı. ....	32
Şekil 3.27: 4×4 MDA dizi tasarımına ait ışına örüntüleri (simülasyon). ....	32
Şekil 3.28: 4×4 MDA dizi tasarımına ait ışına örüntüleri (ölçüm). ....	33
Şekil 3.29: Çift-bant MDA dizi tasarımlarına ait hesaplanan toplam kazanç performansları. ....	34
Şekil 3.30: Çift-polarizasyonlu MDA dizi konfigürasyonu. ....	35
Şekil 3.31: Çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımı $S_{11}$ performansı. ....	35
Şekil 3.32: Çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımına ait simülasyon ışına örüntüleri. ....	36
Şekil 3.33: Çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımına ait toplam kazanç performansı. ....	36
Şekil 4.1: Anahtarlama MDA tasarımı. ....	38
Şekil 4.2: Anahtarlama MDA tasarımına ait $S_{11}$ ölçüm ve simülasyon sonuçları. ....	38
Şekil 4.3: Anahtarlama MDA tasarımına ait ışına örüntüleri (simülasyon). ....	38
Şekil 4.4: Şerit yüklemelerin uzunluğuna göre parametrik çalışma sonuçları. ....	39
Şekil 4.5: PIN-diyotlu MDA tasarımı ve ölçüm düzeneği. ....	40
Şekil 4.6: PIN-diyotlu MDA tasarımına ait $S_{11}$ performansı (ölçüm). ....	40
Şekil 4.7: Anahtarlama 2×2 MDA dizi konfigürasyonu .....	41
Şekil 4.8: Anahtarlama 2×2 MDA dizi tasarımının simülasyon ve ölçüm $S_{11}$ performansı. ....	42
Şekil 4.9: Anahtarlama 2×2 MDA dizi tasarımına ait ışına örüntüleri (simülasyon). ....	42
Şekil 4.10: Anahtarlama 2×2 MDA dizi tasarımına ait ışına örüntüleri (ölçüm). ....	43
Şekil 4.11: Işına örüntüsü ölçüm düzeneği. ....	44

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: MYA/SRR tasarımının yönlendirme kazanç performansı.....	11
Tablo 3.1: MDA–I tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon) .....	18
Tablo 3.2: MDA–II tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon). .....	21
Tablo 3.3: MDA–III tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).....	24
Tablo 3.4: 2×2 MDA dizi tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).....	30
Tablo 3.5: 4×4 MDA dizi tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).....	33
Tablo 4.1: Anahtarlmalı MDA tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon). .....	39
Tablo 4.2: Anahtarlmalı 2×2 MDA dizi tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon). .....	43
Tablo 5.1: Tezde önerilen anten tasarımları ve özellikleri.....	47
Tablo 5.1 (Devam): Tezde önerilen anten tasarımları ve özellikleri.....	48

## SEMBOLLER

$d$	: SRR'lar arası mesafe
$D_0$	: Yönlendirme kazancı
$g$	: Boşluk mesafesi
$h$	: Taban malzemenin kalınlığı
$k \Omega$	: Kilo Ohm
$K_1$	: Dış halkanın yatay uzunluğu
$K_2$	: Dış halkanın düşey uzunluğu
$L_1$	: Antenin uzunluğu
$l_1$	: Balun uzunluğu
$L_3$	: Şerit yükleme uzunluğu
pF	: Pikofarad
$S_1$	: İçteki halkanın genişliği
$S_{11}$	: Yansıma katsayısı
$S_{22}$	: Yansıma katsayısı
$S_{33}$	: Yansıma katsayısı
$S_{44}$	: Yansıma katsayısı
$S_2$	: İçteki halkanın genişliği
$T_1$	: İç halkanın yatay uzunluğu
$T_2$	: İç halkanın düşey uzunluğu
$w$	: Metalik şerit hattın genişliği
$W_1$	: Antenin genişliği
$w_2$	: Dipol genişliği
$y_1$	: 1 nolu metalik yükleme
$y_2$	: 2 nolu metalik yükleme
$y_3$	: 3 nolu metalik yükleme
$\Omega$	: ohm
$\epsilon_r$	: Anten taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti
$\lambda_0$	: Boşluktaki dalga boyu



## Kısaltmalar

2D	: 2 boyutlu
3D	: 3 boyutlu
BAP	: Bilimsel Araştırma Proje Birimi
CPW	: Coplanar Waveguide
dB	: Desibel
DC	: Direct Current
diğ.	: Diğerleri
G	: Gain
GHz	: Gigahertz
HPBW	: Half Power Beam Width
KOU	: Kocaeli Üniversitesi
LLPD	: Loop-Loaded Printed Dipole
MDA	: Mikroşerit Dipol Anten
MDA-I	: Balun beslemeli MDA tasarımı
MDA-II	: Yüklemeli balun beslemeli MDA tasarımı
MDA-III	: Şerit beslemeli MDA tasarımı
MEMS	: Micro Electro Mechanical System
MYA	: Mikroşerit Yama Anten
PL	: Path Loss
RF	: Radio Frequency
SLL	: Side Lobe Level
SRR	: Split Ring Resonator
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UEKAE	: Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü
vb.	: Ve benzeri
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio (Gerilim Duran Dalga Oranı)

# METAMATERYAL ALTYAPILI VE HALKA YÜKLEMELİ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMLARI VE GERÇEKLENMESİ

Adnan SONDAŞ

**Anahtar kelimeler:** Mikroşerit anten dizileri, Çift-bant performans, Frekans seçicilik, RF anahtarlar, Sayısal benzetim.

**Özet:** Günümüz haberleşme platformlarında yer alan anten sistemlerinin sayısındaki artışla birlikte, aynı platform içindeki sistemlerin karşılıklı etkileşimi, güvenilirliği, bakımı, maliyeti ve kapsanan fiziksel alan gibi konularda yaşanan problemlerde artış gözlenmektedir. Çalışma frekansını, bant genişliğini veya ışınma örüntüsünü yeniden yapılandırabilecek çok fonksiyonlu bir entegre anten paneliyle bu sorunların aşılması mümkündür. Bu tez çalışmasında, özgün mikroşerit anten ve anten dizilerinin sayısal tasarımı ve prototip üretimlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen anten panelleri, geniş-bantlı balun/besleme yapısına sahip, halka-yüklemeli mikroşerit dipol anten elemanlarından meydana gelmektedir. İlgili tasarımlar 3.0 ve/veya 5.5 GHz bantlarında çift-bant veya anahtarlanabilir tek-bant özelliğine sahiptirler. Elektronik anahtarlama, yüzey-uyumlu ve düşük kayıplı PIN-diyot anahtarlarla sağlanmaktadır. Ayrıca tez çalışmasında, frekans-ayarlanabilir SRR altyapılı yeni bir mikroşerit yama anten tasarımı geliştirilmiştir. Anten panellerinin sayısal analizi ve tasarımında, CST Microwave Studio simülatörü kullanılmıştır. Standart baskı-devre teknolojisi kullanılarak üretilen anten prototiplerinin ışınma örüntüsü ve empedans ölçümleri gerçekleştirilmiş olup ölçüm ve ilgili simülasyon sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

# DESIGN AND REALIZATION OF MICROSTRIP ANTENNAS WITH METAMATERIAL SUBSTRATES AND LOOP LOADINGS

Adnan SONDAŞ

**Keywords:** Microstrip antenna arrays, Dual-band performance, Frequency selectivity, RF switches, Numerical analysis.

**Abstract:** As the number of antenna systems on today's communication platforms grows, so do the problems of co-site interference, reliability, maintainability, cost, and covered physical area. These problems may be overcome by an integrated antenna panel which can reconfigure operational frequency, bandwidth, or radiation pattern. In this context, the design and prototype fabrication of a novel multi-functional microstrip antenna array is considered in this thesis. The proposed antenna panel consists of loop-loaded printed dipole (LLPD) elements excited by wideband balun/feed structures. The proposed LLPD designs offer dual-band or tunable single-band operation at 3 GHz and 5.5 GHz bands where surface-mounted, low-loss, high-isolation PIN-diode switches are employed for frequency-tuning. Also, the idea of tunable split-ring resonator (SRR) based substrate for a microstrip patch antenna is demonstrated in the thesis. The numerical analysis and design of the integrated antenna panels was carried out using CST Microwave Studio, and the antenna prototypes were fabricated using the standard printed-circuit technology. It is demonstrated that the simulations and the corresponding antenna measurements (radiation pattern & impedance) are in quite good agreement.

## 1. GİRİŞ

Mikroşerit yapıların anten olarak kullanılabilceği fikri ilk olarak Deschamps (1953) tarafından ortaya atılmış olsa da ilk mikroşerit anten ancak 1970'li yıllarda gerçekleştirilmiştir (Munson, 1974), (Howell, 1975). Düşük profilli, üretimin kolay ve maliyetinin uygun olması sebebiyle mikroşerit antenler, cep telefonlarından radar sistemlerine, askeri füzelerden uzay mekiklerine (Sainati, 1996) kadar pek çok sivil ve askeri haberleşme uygulamalarının vazgeçilmez elemanları olmayı başarmıştır.

Standart bir mikroşerit anten yapısı, toprak düzlemi üzerindeki dielektrik bir taban malzemesinden (substrate: altaş veya altyapı) ve onun üzerine yerleştirilen ışınım elemanından meydana gelmektedir. Işınım elemanının boyutu, şekli, taban malzemesinin kalınlığı ( $h$ ) ve dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) antenin performansını belirleyen başlıca etkenlerdir. Taban malzemesinin kalınlığındaki artış, antenin frekans bant-genişliğini artırırken anten verimini düşürmektedir. Buna karşılık, dielektrik sabitinin düşük olması, kenar alanlar (fringe fields) etkisini artırarak antenin ışınım performansının iyileşmesine neden olur. Diğer taraftan bu durum, ışınım elemanının ve dolayısı ile antenin fiziki boyutlarının büyümesine neden olmaktadır (Garg ve diğ., 2001). Mikrodalga uygulamalarında, dar bantlı ve düşük verimli olmasına rağmen, küçük boyutlu ve istenmeyen ışımanın az olması nedeniyle yüksek dielektrik sabitli ve ince taban malzemelerinin kullanımı genelde tercih edilmektedir (Balanis, 2005), (Pozar, 1992).

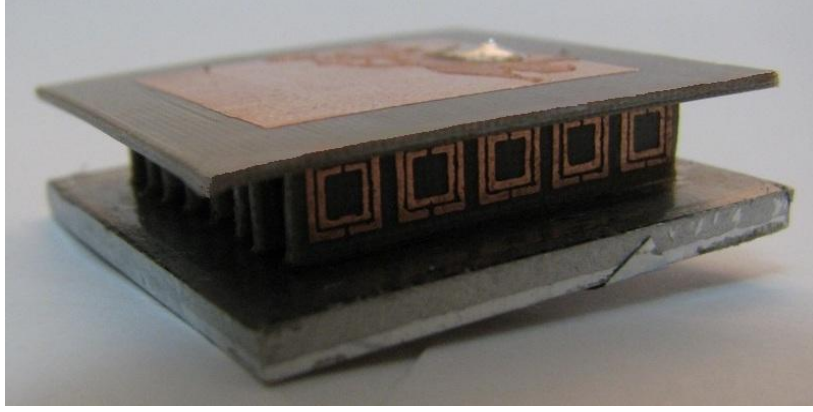
Mikroşerit antenlerin sahip olduğu avantajlar nedeniyle (az hacim kaplamaları, hafif ve yüzeye uyumlu olmaları, fazla maliyet gerektirmemeleri, üretimlerinin kolay olması, vb.) kablosuz haberleşmenin hemen hemen her alanında kullanılmaya başlanılmışlardır (Yang ve diğ., 2001), (Erdemli ve diğ., 2004), (Rmili ve diğ., 2006), (Qu ve diğ., 2007), (Başaran ve diğ., 2008), (Wee ve diğ., 2011). Bu antenler, minyatür boyutları sayesinde küçük boyutlu cihazların dışına ya da içine kolayca yerleştirilebilir, yüzeye uyumlu olmalarından dolayı da uçak, füze ve uydu gibi özel hassasiyet gerektiren araçların aerodinamik yapısını bozmadan bu araçların üzerine monte edilebilirler. Gerektiğinde katı hal devreleri aynı taban malzemesi

üzerine yerleştirilerek, elde edilen tümleşik anten sistemiyle daha ideal bir elektriksel performans sağlanabilir. Ayrıca bu antenlerden çoklu-bant karakteristiği elde edilebilirken, tasarım üzerinde yapılan küçük oynamalar sayesinde doğrusal veya dairesel kutuplanmış ışına da gerçekleştirilebilir.

Mikroşerit antenlerin bu avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu yapıların başlıca dezavantajı olarak, bant genişliklerinin sınırlı olması ( $< \%5$ ) gösterilebilir. Ayrıca kazançlarının ( $\sim 6$  dB) düşük olması, yüzey dalga uyarımının bulunması ve yüksek çapraz-polarizasyon seviyesine sahip olması, mikroşerit antenlerin diğer dezavantajlarından (Balanis, 2005), (Çakır, 2004), (Başaran, 2008).

Askeri veya sivil haberleşme platformlarında yer alan anten sistemlerinin sayısındaki artışla birlikte, aynı platform içindeki sistemlerin karşılıklı etkileşimi, güvenilirliği, bakımı, maliyeti ve kapsanan fiziksel alan gibi konularda yaşanan problemlerde artış gözlenmiştir. Her bir anten sistemine birden fazla fonksiyonel özellik kazandırılmasıyla bu sorunların aşılması mümkün olabilir. Bu çözüm önerisi, çalışma frekansını, bant genişliğini veya ışına örüntüsünü (pattern) yeniden yapılandırabilecek inovasyonlu teknolojilerin entegrasyonu ile gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda, elektronik anahtarlama ile konfigürasyonu değiştirilebilen ve böylece farklı frekans bantlarında uygulamaya olanak sağlayan, özgün anten panellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu uygulamalarda çoğunlukla anten elemanının kendisi anahtarlanırken Erdemli ve diğ. (2002), Nair ve diğ. (2010), Kim ve diğ. (2011), alternatif olarak antenin alttaşı da anahtarlanabilir (Sondaş ve diğ., 2011).

Bu tez çalışmasında, mikroşerit yama antenler (MYA) için frekans-ayarlamalı yeni bir SRR alttaşı yapısı önerilmektedir (Sondaş ve diğ., 2008a), (Sondaş ve diğ., 2008b), (Sondaş ve diğ., 2011). Şekil 1.1'de, bu tez çalışmasının bir ürünü olan, MYA elemanı altına yerleştirilmiş yarık-halka rezonatör (split-ring resonator; SRR) alttaşı yapısı görülmektedir.



Şekil 1.1: SRR altyapılı MYA tasarımı.

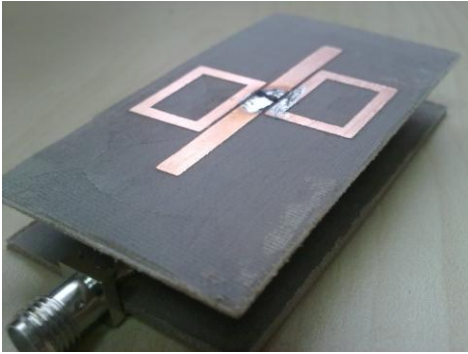
SRR elemanları, iç içe geçmiş iki adet metalik halka ve her halkanın üzerinde  $180^\circ$  ters yönde birer yarıktan meydana gelmektedir. İçteki halka, yapı içerisinde daha fazla kapasitif etkinin elde edilebilmesi için kullanılmaktadır. Halkalar üzerindeki yarıklar herhangi bir halka üzerinden akım geçişine izin vermese de, halkalar arasında oluşan yüksek kapasitif etkiden dolayı, halkalar üzerinde akım oluşmaktadır. Halkalar arasındaki kapasitif etki artırıldıkça oluşan akım değerleri de artmakta, dolayısıyla yapının rezonans bandı kaymaktadır. Bu özellikleri sebebiyle de, SRR elemanları belirli bir frekans bandında  $\mu$ -negatif karakteristik göstermektedirler (Pendry ve diğ., 1999), (Smith ve diğ., 2000).

Metamateryal yapıların temel yapı taşı özelliğine sahip olan SRR elemanları, farklı filtre ve anten uygulamalarında tercih edilmektedirler. Örneğin Kim ve diğ. (2005), boşluklu (slotted) SRR elemanları kullanarak bant-durduran mikroşerit filtre tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Rajo-Iglesias ve diğ. (2009)'nin yapmış olduğu çalışmada, SRR elemanları ile yüklenmiş dalga kılavuzu incelenmiştir. Başaran ve diğ. (2008) ile Alici ve diğ. (2007) ise SRR elemanlarını kullanarak mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

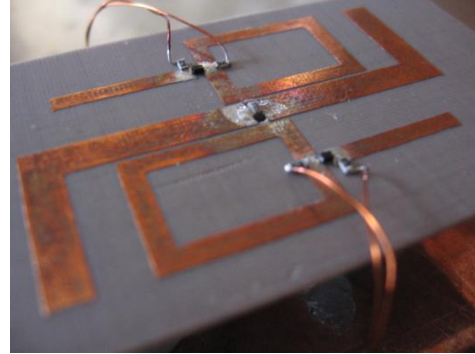
Ayrıca, SRR elemanları, frekans-ayarlamalı mikrodalga uygulamalarında da kullanılmışlardır. Bu uygulamalarda, SRR halkaları arasındaki kapasitif etki değiştirilerek tasarımların rezonans frekansları kaydırılmıştır. Özel olarak, SRR yarıklarına varaktör diyotlar bağlanarak (Gil ve diğ., 2004), MEMS anahtarlar monte edilerek (Park ve diğ., 2006), (Entesari ve diğ., 2005) veya SRR halkaları arasında aç/kapa anahtarlar kullanılarak (Erdemli ve Sondaş, 2005), (Cenk ve diğ., 2006), (Uçar ve diğ., 2008), (Sondaş, 2006) yapının karakteristiği dinamik olarak kontrol edilmiş ve farklı frekans bantlarında çalışma sağlanabilmektedir.

Diğer taraftan, SRR altyapıları mikroşerit anten yapıları için minyatürizasyona da dolayısıyla daha düşük profilli anten elemanlarının gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Wu ve diğ., 2005), (Karkkainen ve diğ., 2005), (Ermütlu ve diğ., 2005). Tez çalışmasında önerilen özgün SRR alttaş sayesinde, anten yapısında minyatürizasyon sağlandığı gibi, halkalar arasına aç/kapa anahtarlar yerleştirilerek MYA/SRR tasarımının rezonans frekansı farklı bantlara kaydırılmıştır. İlgili bantlarda tasarımın ışına örüntüsü ve kazanç performansında önemli bir bozulmaya rastlanmamıştır. Ayrıca ilgili tasarımların prototip üretimleri gerçekleştirilerek analiz sonuçları ölçüm sonuçları ile desteklenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, çift-bant ve anahtarlamalı tek-bant performans gösteren halka-yüklemeli mikroşerit dipol anten (MDA) ve dizi tasarımları geliştirilmiştir (Sondaş ve diğ., 2008a), (Sondaş ve diğ., 2009), (Sondaş ve diğ., 2010a), (Sondaş ve diğ., 2010b), (Uçar ve diğ., 2010). Şekil 1.2’de, önerilen çift-bant ve anahtarlamalı MDA tasarımlarına birer örnek verilmiştir. Çift-bant anten performansı, mikroşerit dipol etrafına yerleştirilen iki adet dikdörtgen halka elemanı ile gerçekleştirilmektedir. Literatürde, çift-bant başarımı için benzer şekilde yüklemeli dipol tasarımları kullanılmıştır (Herraiz-Martinez ve diğ., 2008, 2009), (Gonzalez-Posadas ve diğ., 2009), (Chen ve Yu, 2008).



Çift-bant MDA tasarımı



Anahtarlamalı tek-bant MDA tasarımı

Şekil 1.2: Önerilen halka-yüklemeli MDA tasarımları.

Örneğin; Gonzalez-Posadas ve diğ., (2009)’lerinin yapmış olduğu çalışmada, çift-yüzlü (antipodal) mikroşerit dipol anten elemanı, dört adet SRR elemanı ile parazitik olarak yüklenmiştir. Farklı boyutlarda SRR elemanları kullanılarak tasarımın çift-bant ve çok-bantlı performansa sahip olacağı gösterilmiştir. Ayrıca önerilen konfigürasyonun iki elemanlı dizi

performansı da incelenmiş ve dizinin ilgili frekans aralığında yaklaşık 2.5 dB anten kazancına sahip olduğu gösterilmiştir.

Chen ve Yu (2008)'nin yapmış olduğu çalışmada ise koaksiyel beslemeli mikroşerit dipol elemanına, parazitik olarak bükümlü şerit yapıları eklenmiş ve tasarımın, WiMAX frekanslarını kapsayan çift-bant performans göstermesi sağlanmıştır. Tasarım, 3.0 ve 5.5 GHz bantlarında yaklaşık olarak 1.5 dBi yönlendirme kazancına sahiptir.

Bu tez çalışmasında önerilen halka-yüklemeli MDA tasarımları, konfigürasyon olarak literatürdeki tasarımlardan farklıdır. Ayrıca önerilen tasarımların boyutları, literatürdekilerden bir miktar büyük olsa da kazanç değerleri literatürdekilere göre daha yüksektir. Bir başka önemli özellik ise, önerilen tasarımın basit bir yapıda olması ve dizi yapılandırması için oldukça uygun olmasıdır. İlgili tasarımların analiz sonuçları ölçümlerle de desteklenmektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasında yer alan bir başka tasarım ile anahtarlamalı tek-bant dipol performansı elde edilebilmektedir. İlgili tasarım, bükülmüş dipol elemanı, halka elemanları ve anahtarlamının sağlanacağı halka elemanlarına ait ekstra şerit yüklemelerden oluşmaktadır (Sondaş ve diğ., 2010b), (Sondaş ve diğ., 2010c). Bu tasarımda, şerit yüklemeler ile halkalar arasındaki bağlantı aç/kapa PIN diyot anahtarlar ile sağlanmakta, böylece anten konfigürasyonu elektronik anahtarlama ile değiştirilebilmektedir. Sonuçta, çalışma frekansı dinamik bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Literatürde, yeniden-şekillendirilebilir (reconfigurable) antenler ile çalışma frekansının veya ışınım örüntüsünün kaydırılabildiğini gösteren çalışmalar yer almaktadır. Örneğin, Erdemli ve diğ. (2002)'nin yaptığı çalışmada, frekans-seçici yüzey (FSS) altyapılı dipol anten elemanının anahtarlanması ile tasarımın 1.5 GHz veya 2.5 GHz bantlarında çalışması sağlanmıştır.

Panagamuwa ve diğ. (2006)'nin yaptığı çalışmada, eş düzlemli dalga kılavuzu (coplanar waveguide; CPW) beslemeli dipol kolları üzerine iki adet optik anahtar yerleştirilmiş ve tasarımın 2.3 GHz ve 3.2 GHz bantlarında çalışması sağlanmıştır. Bu tasarımdaki optik anahtarlar ışık şiddetiyle kontrol edildiği için tasarımda DC-RF sinyallerin izolasyonu için ekstra bobin ve kondansatör elemanları kullanılmamıştır.



Piazza ve diğ. (2008)'nin yaptığı çalışmada ise, dipol kolları üzerine iki adet PIN-diyot yerleştirilmiş ve tasarımın 2.2 GHz ve 2.5 GHz merkez frekanslarında farklı iki bantta çalışması sağlanmıştır.

Yoon ve diğ. (2009)'nin yaptığı çalışmada, çapraz (cross) olarak yerleştirilen dipol elemanları ile koaksiyel besleme hattı arasına dört adet PIN-diyot yerleştirilmiş ve tasarımın 2.0–2.8 GHz bandında çalışması sağlanmıştır ve sonuçlar ölçümlerle desteklenmiştir.

Literatürdeki tasarımlarda kullanılan DC beslemeli anahtarlar (PIN-diyot, MEMS, varaktör diyot, vs.), anten elemanı üzerine yerleştirildiğinden, DC-RF sinyallerin izolasyonu için ekstra kondansatör ve bobin elemanı kullanımına ihtiyaç duyulmuştur. Bu tez çalışmasında önerilen anahtarlamalı MDA tasarımında, parazitik elemanlar anahtarlandığından, anten RF besleme hattı ile PIN-diyotların DC hattı arasında doğrudan bir bağlantı bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu iki sinyalin birbiri ile etkileşmediği kabul edilmekte ve ekstra bir ayırıştırma işlemine (filtrelemeye) gerek duyulmamaktadır.

Önerilen MDA tasarımlarındaki dipol elemanları, toprak düzleminden anten düzlemine uzanan ve giriş empedansı  $50\Omega$  olan mikroşerit balun yapıları ile beslenmektedirler. İlgili tasarımların fiziksel gerçeklemelerinde, koaksiyel besleme yapısı üzerinde oluşan dengesiz akım dağılımı nedeniyle istenilen anten performansı sağlanamamaktadır (Sondaş ve diğ., 2010-a). Kullanılan balun tasarımları ile dengeli ve empedans uyumlu performans elde edilebilmektedir. Benzer balun tasarımları, mikroşerit dipol anten elemanlarını beslemek için literatürde kullanılmaktadırlar (Xia ve diğ., 2009), (Kim ve diğ., 2003).

Bu tez çalışmasında önerilen anten yapılarının sayısal analiz ve tasarımları, sonlu integral metodunu temel alan CST Microwave Studio simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tasarlanan antenlerin prototip fabrikasyonları, standart baskı-devre teknolojisi kullanan özel bir firma (Metaş Elektronik, İstanbul) tarafından yapılmıştır. Anten ölçümleri (empedans ve ışımaya örüntüsü) ise Gebze TÜBİTAK–UEKAE EMC Tempest Test Merkezindeki yarı yansız odada gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması, Giriş bölümüyle birlikte beş bölümden oluşmaktadır ve aşağıdaki şekilde organize edilmiştir.

Bölüm 2’de; mikroşerit yama antenler için tasarlanmış SRR alttaş yapısı tanıtılmaktadır. SRR halkaları arasına yerleştirilen aç/kapa anahtarlar ile anten yapısının çalışma frekansının değiştirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca gerçek anahtar modellemeleri yapılarak, tasarımda PIN-diyot, MEMS v.b. anahtarların da kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Bölümde, MYA/SRR tasarımının frekans kaydırma performansını içeren analiz ve ölçüm sonuçlarına yer verilmektedir.

Bölüm 3’te; 3.0 ve 5.5 GHz bantlarında eşzamanlı olarak çalışan, halka yüklemeli MDA ve MDA dizi tasarımları tanıtılmakta ve ilgili tasarımların analiz ve ölçüm sonuçlarına yer verilmektedir.

Bölüm 4’te; 3.0 veya 5.5 GHz bantlarında çalışan, anahtarlamalı MDA ve MDA dizi tasarımları tanıtılmaktadır. İlgili tasarımda PIN-diyot kullanılarak, tasarımın çalışma frekansının dinamik bir şekilde kontrol edilebileceği, gerçekleştirilen analiz ve ölçümler ile gösterilmiştir.

Bölüm 5’te ise, elde edilen sonuçlar özetlenerek, gelecekte yapılabilecek çalışmalar konusundaki görüş ve öneriler tartışılmaktadır.

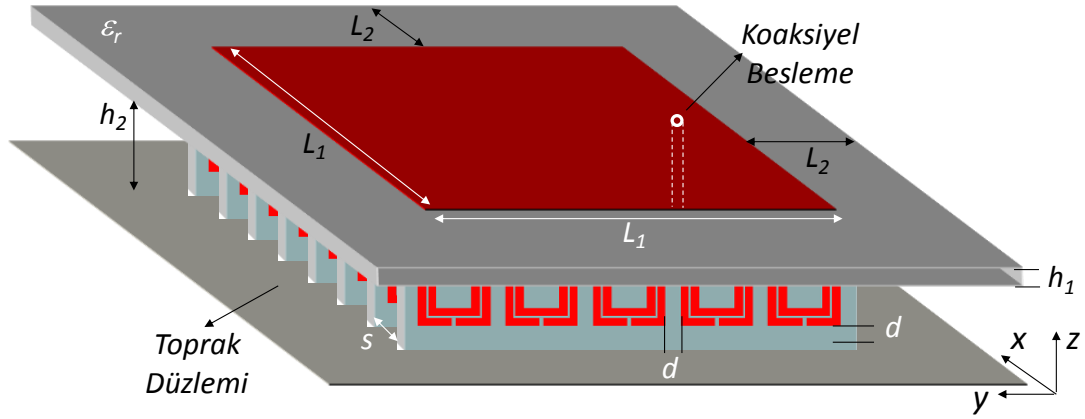
## **2. SRR ALTYAPILI MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMI**

### **2.1. Giriş**

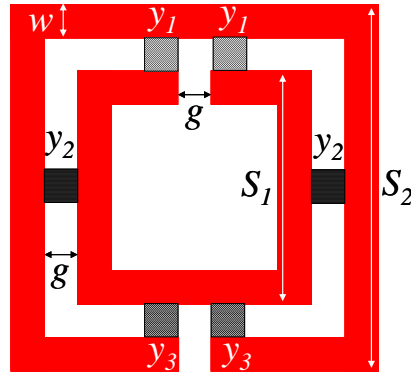
Bu bölümde, yarık-halka rezonatör (SRR) elemanlarını temel alan alttaş üzerine yerleştirilmiş mikroşerit yama anten (MYA) tasarımı incelenmektedir. Önerilen SRR alttaş yapısı, anten elemanının minyatürleşmesine katkıda bulunmakla birlikte, ilgili halka elemanları arasına yerleştirilen yüklemeler ile de frekans-ayarlamalı performans sergilemektedir. İlgili yapı, sonlu integral metodunu temel alan CST Microwave Studio simülatörü aracılığıyla tasarlanmıştır. Ayrıca MYA/SRR prototiplerinin fabrikasyonu gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ilgili ölçümlerle desteklenmiştir.

### **2.2. Mikroşerit Yama Anten/SRR Alttaş Tasarımı**

Şekil 2.1’de görülen SRR altyapılı mikroşerit yama anten (MYA) tasarımı, yama anten elemanı ile toprak düzlemi arasına dikine yerleştirilmiş sekiz adet SRR plakasından ve her bir SRR plakası da ince bir dielektrik tabaka üzerine yerleştirilmiş beş adet SRR elemanından meydana gelmektedir. Her bir SRR elemanı ise iç-içe geçmiş iki adet karesel yarık halka ve halkalar arasına uygun konumlara yerleştirilen metalik yüklemelerden ( $y_1, y_2, y_3$ ) oluşmaktadır (Şekil 2.2). Pratik uygulamada çalışma frekansının dinamik bir şekilde kontrol edilebilmesi için, bu yüklemelerin yerine, aç/kapa RF anahtarların (PIN diyot veya MEMS) kullanılabileceği öngörülmektedir. Bu tasarımda anten elemanı, toprak düzlemi ile yama arasına dik doğrultuda yerleştirilmiş koaksiyel bir yapıyla beslenmektedir.

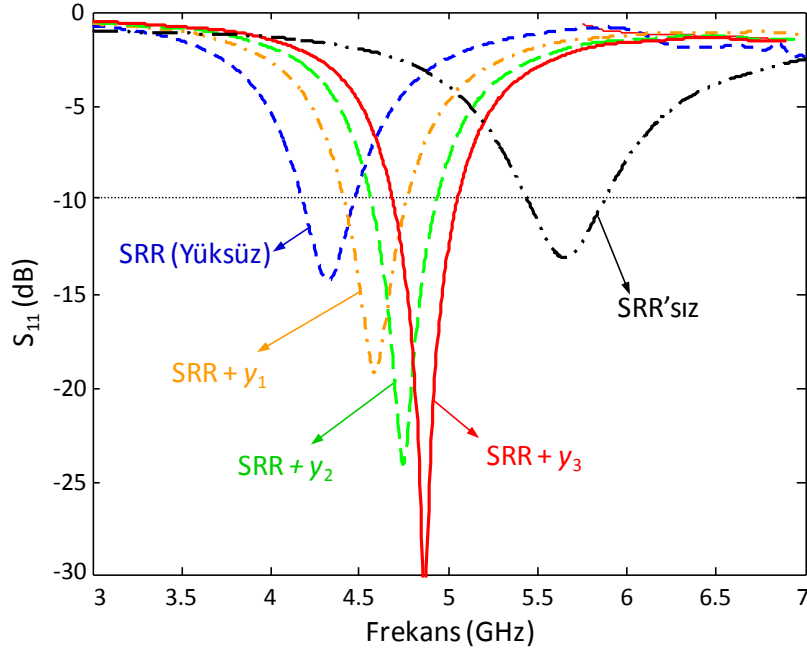


Şekil 2.1: MYA/SRR konfigürasyonu:  $L_1=21$ ,  $L_2=5$ ,  $h_1=0.5$ ,  $h_2=4.5$ ,  $s=3$ ,  $d=1$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .



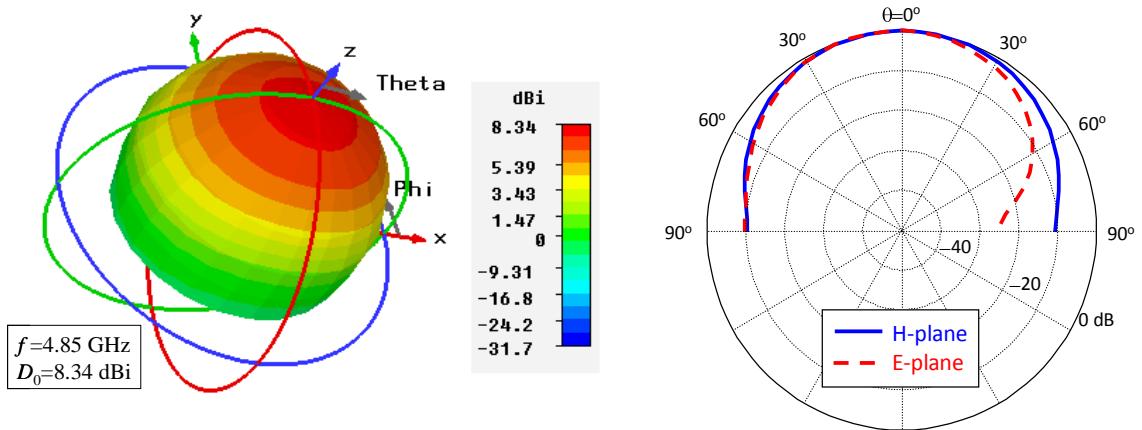
Şekil 2.2: Yüklmeli SRR yapısı:  $S_1=3.5$ ,  $S_2=2.5$ ,  $w=g=0.25$  (mm).

Önerilen MYA/SRR tasarımına ait geri-dönüş kaybı ( $S_{11}$ ) karakteristikleri Şekil 2.3'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, SRR altyapısı eklenmesiyle, yüklemekten dolayı rezonans frekansı 5.65 GHz'ten 4.35 GHz'e kaymakta, böylece 1.3 oranında minyatürleşme sağlanmaktadır. Daha önemlisi, halkalar arasına yerleştirilen  $y_1$ ,  $y_2$  ve  $y_3$  yüklemeleri ile halkalar arasındaki kapasitif etki değiştirilmekte ve rezonans frekansı sırasıyla 4.60 GHz, 4.75 GHz ve 4.85 GHz bantlarına kaydırılmaktadır. İlgili bantlardaki  $S_{11}$  bant-genişlikleri ( $50\Omega$  sistem empedansı ve  $|S_{11}| < -10\text{dB}$  kriterine göre) ise yaklaşık %7 seviyelerindedir.



Şekil 2.3: MYA/SRR tasarımının frekans-ayarlama performansı.

Şekil 2.4'te, SRR+y<sub>3</sub> tasarımının rezonans frekansındaki (4.85 GHz) broadside ışın diyagramı yer almaktadır. Ayrıca Tablo 1'de görüldüğü üzere, önerilen SRR'lı tasarımlar SRR'sız MYA ile karşılaştırıldığında, yönlendirme kazancında önemsiz sayılabilecek maksimum 1 dB'lik düşüş gözlenmektedir. MYA/SRR altyapılı tasarımlar ortalama 8 dBi yönlendirme kazancına sahip olup hesaplanan ışın verimlilikleri yaklaşık %95'tir. Ayrıca ilgili tabloda SRR yapısının sergilediği eşdeğer  $\epsilon_r$  değerleri de yer almaktadır.

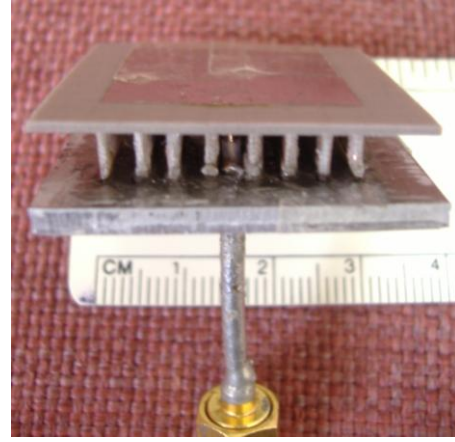
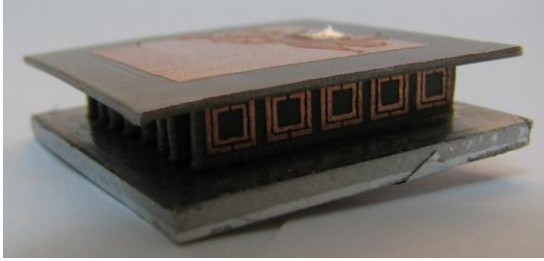


Şekil 2.4: SRR+y<sub>3</sub> tasarımının 4.85 GHz'teki 3D (solda) ve 2D (sağda) ışın diyagramları.

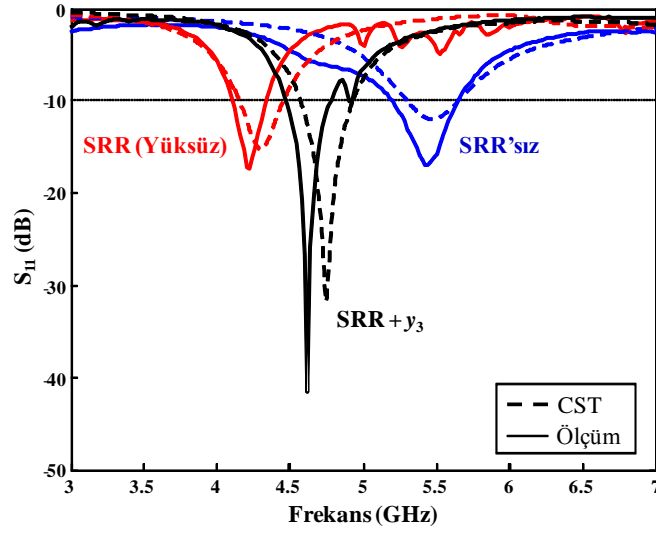
Tablo 2.1: MYA/SRR tasarımının yönlendirme kazanç performansı.

Yönlendirme Kazancı	MYA/SRR Tasarımları				
	<i>SRR</i> 'süz 5.65 GHz	<i>SRR</i> 4.35 GHz	<i>SRR</i> + $y_1$ 4.6 GHz	<i>SRR</i> + $y_2$ 4.75 GHz	<i>SRR</i> + $y_3$ 4.85 GHz
<i>Eşdeğer</i> $\epsilon_r$	1	2.4	2	1.82	1.7
$D_0$ (dBi)	8.7	7.75	8.05	8.2	8.34

Önerilen MYA/SRR tasarımlarının performans değerlendirmesi için SRR'süz MYA, MYA/SRR (Şekil 2.5) ve MYA/SRR+ $y_3$  olmak üzere üç adet prototip fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.6'da ilgili ölçüm ve sayısal analiz sonuçları yer almaktadır. Bu tasarımın prototip üretimi Bölümümüz bünyesindeki mütevazı laboratuvar olanaklarıyla gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere, ilgili sonuçlar olabildiğince uyumlu olup gözlenen seviye farklılıkları ve frekans kaymaları malzeme ve fabrikasyon toleransları göz önüne alındığında makul karşılanabilir. Burada önemli olan, gerçekleştirilen MYA/SRR tasarımının öngörülen frekans-ayarlamalı performansı göstermesidir.



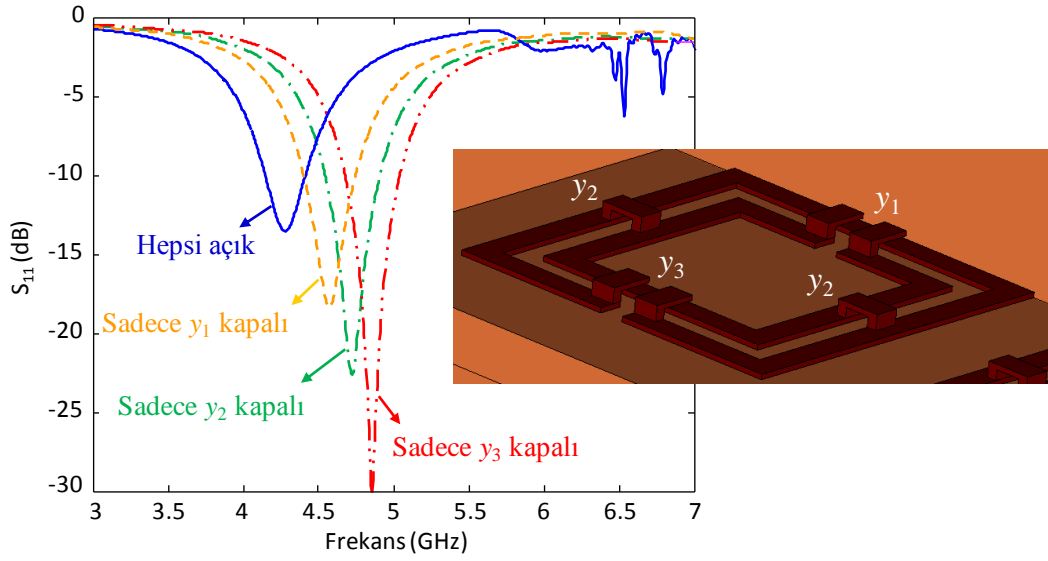
Şekil 2.5: Gerçeklenen MYA/SRR prototipi.



Şekil 2.6: MYA/SRR tasarımının ölçüm ve analiz sonuçları.

### 2.3. MYA/SRR Tasarımında Pratik Anahtar Modellemesi

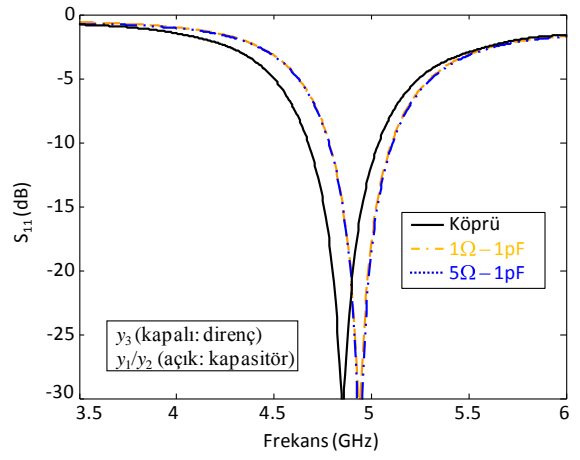
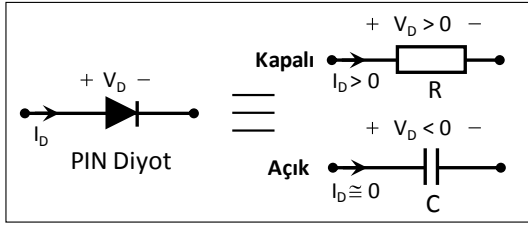
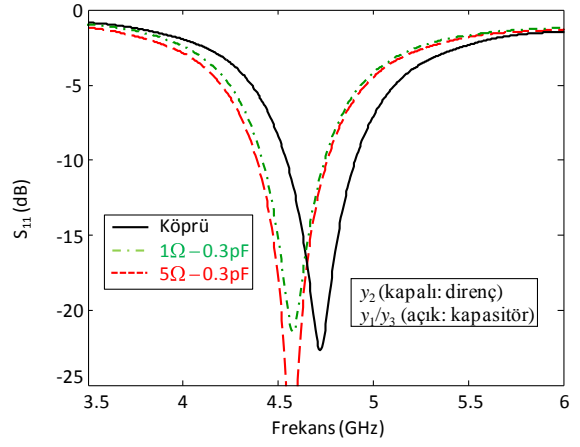
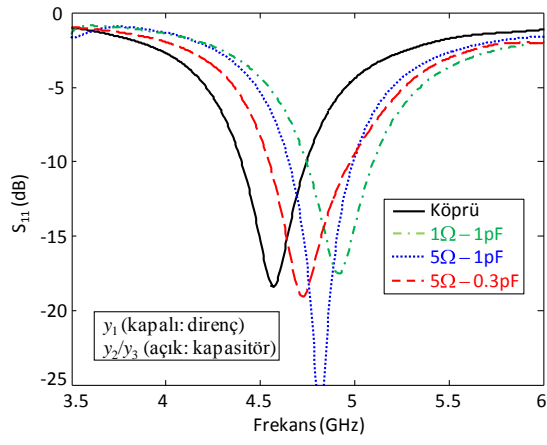
Önerilen metalik-şerit yapılu yüklemelerin, uygulamada anahtarlama işlevini üstlenmesi düşünüldüğünde, pratikte, ilgili yükleme konumlarında aç/kapa RF anahtarların (PIN diyot veya MEMS anahtarları) kullanılması öngörülmektedir. Bu amaç doğrultusunda, metalik yüklemeler yerine, pratik anahtarların eşdeğer fiziksel ve elektriksel devre modelleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.7’de, SRR halkaları arasında MEMS yapısına uygun olarak modellenen köprü şeklindeki bir anahtarlama yapısı (Rebeiz ve Muldavin, 2001) ve ilgili geri-dönüş kaybı ( $S_{11}$ ) karakteristikleri verilmiştir. Görüldüğü üzere, ilgili MEMS anahtarı ( $y_2$  yükleme konumundaki) kapalı pozisyondayken bir köprü gibi SRR halkalarını birbirine bağlamakta, açık durumda ise ( $y_1$  ve  $y_3$  yükleme konumlarında) köprü yapısındaki ayaklardan birinin olmayışıyla ilgili konumlarda yalıtım gerçekleşmektedir. Görüldüğü üzere, köprü MEMS anahtar modellemesi, metalik-şerit yüklemeli tasarımda (Şekil 2.2) gözlenen frekans-ayarlamalı anten performansını, benzer bir şekilde sağlamaktadır. Şerit modeliyle karşılaştırıldığında, köprü modeli yaklaşık 0.2 GHz’lik aşağı doğru bir frekans kaymasına neden olmaktadır. Ayrıca bu yeni durumda  $S_{11}$  seviyelerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bu gözlenen farklılıklar, her bir yükleme konumuna yerleştirilmiş açık veya kapalı köprü yapılarının ekstra yükleme etkisinden kaynaklanmaktadır. Asıl önemli olan, pratik anahtar modeliyle de beklenen frekans-ayarlamalı anten performansının elde edilmiş olmasıdır.



Şekil 2.7: Köprü MEMS anahtar modeli MYA/SRR tasarımının frekans-ayarlamalı performansı. Resimde,  $y_2$  kapalı,  $y_1$  ve  $y_3$  açık anahtar konumundayken ilgili simülatör modellemesi görülmektedir.

Köprü MEMS anahtar modellemesinin yanı sıra, çalışmalarımızda PIN-diyot anahtarların eşdeğer devre modellerine de yer verilmiştir. PIN-diyot anahtar modelinde, kapalı anahtar yapısı  $1-5\Omega$ 'luk direnç ve açık anahtar yapısı ise  $0.3-1\text{pF}$ 'lık kapasitör elemanları ile modellenmiştir. Bu direnç ve kapasitör değerleri, pratik uygulamalarda kullanılan PIN-diyot elemanlarının karakteristik değerleridir. Şekil 2.8'de, ayrı ayrı  $y_2$  ve  $y_3$  yükleme konumlarında kapalı anahtar (direnç elemanı) ve her bir durum için diğer yükleme konumunda ise açık anahtar (kapasitör elemanı) modellemesiyle gerçekleştirilmiş MYA/SRR tasarımına ait  $S_{11}$  karakteristikleri verilmiştir. Görüldüğü üzere, PIN ve MEMS anahtar modellemeleri frekans bantları açısından oldukça uyumludur. Ayrıca PIN modellemesinde kullanılan direnç ve kapasitör elemanlarının uygun değerleri için  $S_{11}$  seviyelerinin iyileştiği gözlemlenmektedir. Uygulamada kullanılacak RF anahtarların, kapalı pozisyon-dayken düşük kayıplı, açık pozisyondayken yüksek izolasyon özelliklerine sahip olması önem arz etmektedir. Ayrıca anahtarların fiziksel boyutlarının monte edilecekleri konuma uygun ebatta olması ve DC besleme yapılarının da olabildiğince basit yapılı olması istenen özelliklerdir.





Şekil 2.8: Köprü MEMS modeli ve PIN diyet eşdeğer devre modeli sonuçlarının karşılaştırılması.

### **3. ÇİFT-BANT HALKA-YÜKLEMELİ MİKROŞERİT DİPOL ANTEN TASARIMLARI**

#### **3.1. Giriş**

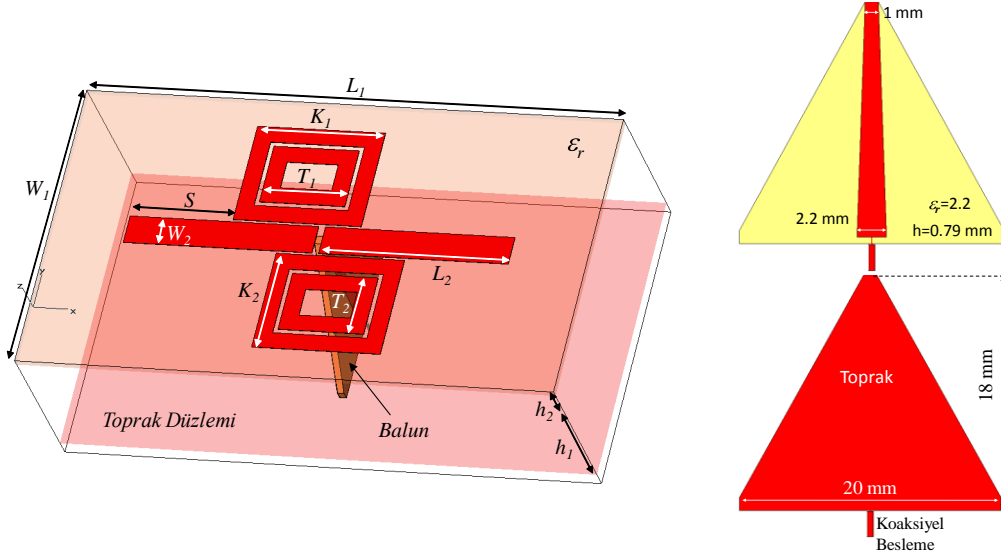
Bu bölümde, çift-bant (3.0/5.5 GHz) halka-yüklemeli mikroşerit dipol anten (MDA) tasarımları (tek elemanlı MDA-I, MDA-II, MDA-III tasarımları, 2×2 ve 4×4 MDA dizi tasarımları) sunulmaktadır. İlgili anten tasarımlarının CST analiz sonuçları ölçüm sonuçları ile desteklenmektedir.

#### **3.2. Tek Elemanlı MDA-I Tasarımı**

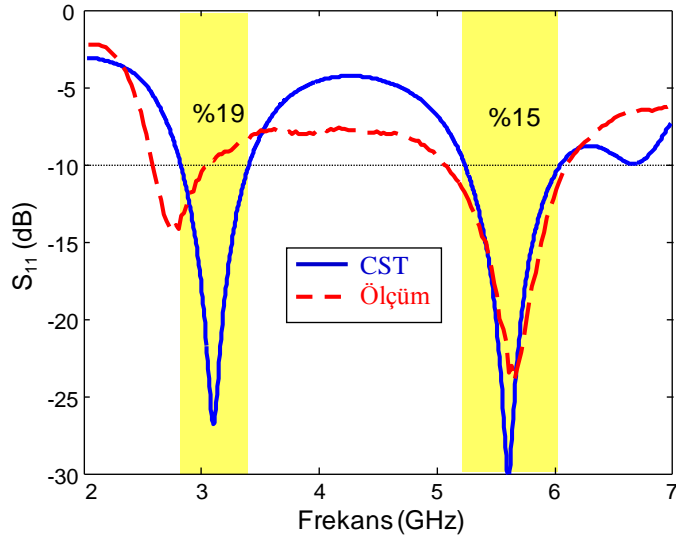
Önerilen çift-bant tek elemanlı MDA-I konfigürasyonu ve ilgili tasarım parametreleri Şekil 3.1'de verilmektedir. Görüldüğü üzere, bu tasarımda iki adet çift-halka elemanı dipol elemanının besleme konumuna asimetrik olarak ve aynı düzlemde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dipol elemanı ile halka elemanları arasındaki mesafe 0.3 mm'dir. Dipol elemanı; konfigürasyonla uyumlu, toprak düzleminde anten düzlemine uzanan ve giriş empedansı  $50\Omega$  olan konik kesimli bir mikroşerit balun yapısı ile beslenmektedir. Fiziksel gerçekleştirilmede koaksiyel besleme yapısı üzerinde dengesiz akım dağılımı oluşmakta ve istenilen anten performansı sağlanamamaktadır (Sondaş ve diğ., 2010-a). Önerilen balun tasarımı ile dengeli ve empedans uyumlu performans elde edilmesi öngörülmüştür.

Şekil 3.2'de, halka-yüklemeli MDA-I tasarımının  $S_{11}$  ölçüm ve analiz sonuçları verilmiştir. Ölçüm sonuçlarının özellikle 3 GHz bandında simülasyon sonuçlarına göre farklılık göstermesinin temel sebebinin, balun tasarımının ilgili bantta yeterli performansı gösterememesi olduğu düşünülmektedir. Görüldüğü üzere, önerilen tasarım 3 GHz ve 5.5 GHz bantlarında minimum %15 bant-genişliğine sahip çift-bant performans sergilemektedir. Bu tasarımda, alt-frekans bandı esas itibarıyla dipol elemanının uzunluğuna

bağlı iken, üst-frekans bandı dıştaki halka elemanlarının boyutlarına bağlı olarak optimize edilmiştir. İç halkalar ise üst-frekans bandının frekans ayarı için kullanılmıştır.

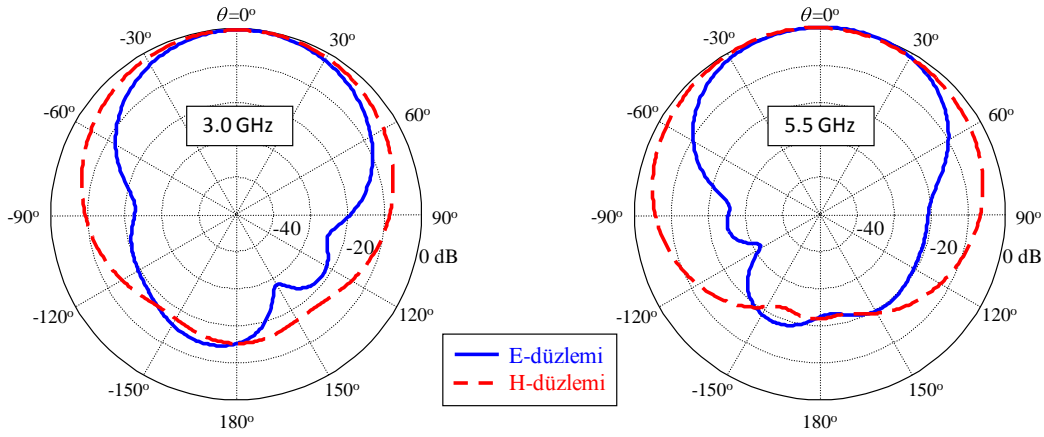


Şekil 3.1: MDA-I konfigürasyonu:  $W_1=36$ ,  $L_1=66$ ,  $W_2=3.5$ ,  $L_2=23.21$ ,  $K_1=15.75$ ,  $K_2=12.4$ ,  $T_1=10.5$ ,  $T_2=7.4$ ,  $S=12.6$ ,  $h_1=17.3$ ,  $h_2=0.79$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .

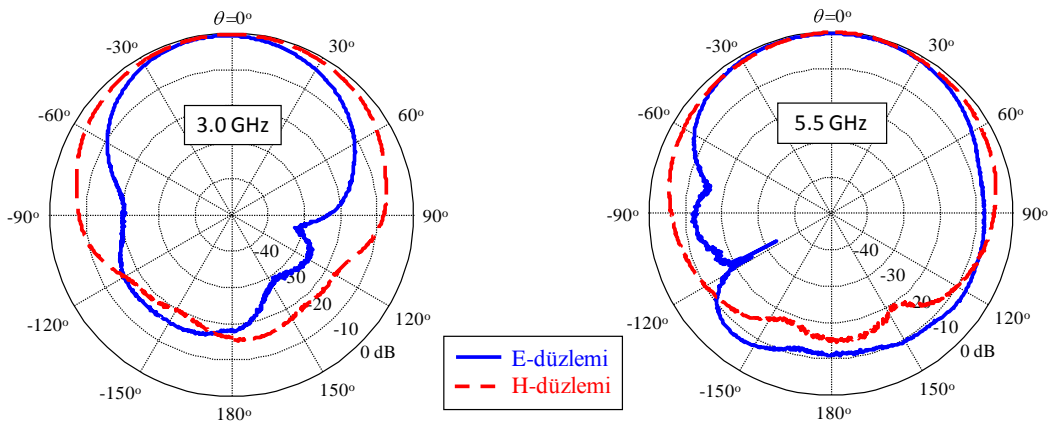


Şekil 3.2: Gerçeklenen MDA-I prototipi ve  $S_{11}$  performansı.

Şekil 3.3'te, MDA–I tasarımının CST Microwave Studio simülatörü ile elde edilmiş, 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışına örüntüleri; Şekil 3.4'te ise ölçülen ışına örüntüleri yer almaktadır. İlgili şekillerden, seviyelerde farklılıklar olsa da sonuçların birbirleri ile genelde uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Rezonans frekanslarında, hesaplanan en yüksek arka-hüzme seviyesi  $-15$  dB seviyelerinde olup hesaplanan ışına verimliliği %90 üzerinde gerçekleşmektedir. Ayrıca ilgili frekanslardaki yönlendirme anten kazancının  $7.3$  dBi seviyelerinde olduğu ölçülmüştür. Tablo 3.1'de, MDA–I tasarımının rezonans frekanslarındaki yönlendirme karakteristik bilgileri yer almaktadır. Görüldüğü üzere hesaplanan ve ölçülen kazanç değerleri birbiriyle uyuşmaktadır.



Şekil 3.3: MDA–I tasarımına ait ışına örüntüleri (simülasyon).



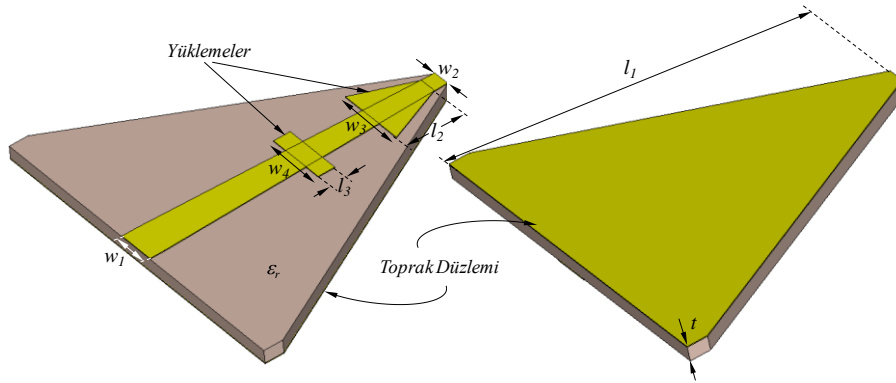
Şekil 3.4: MDA–I tasarımına ait ışına örüntüleri (ölçüm).

Tablo 3.1: MDA-I tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon)

	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_0$ (dBi)	HPBW	$D_0$ (dBi)	HPBW
E-Düzlemi	7.5	66°	7.3	74°
H-Düzlemi		99°		128°

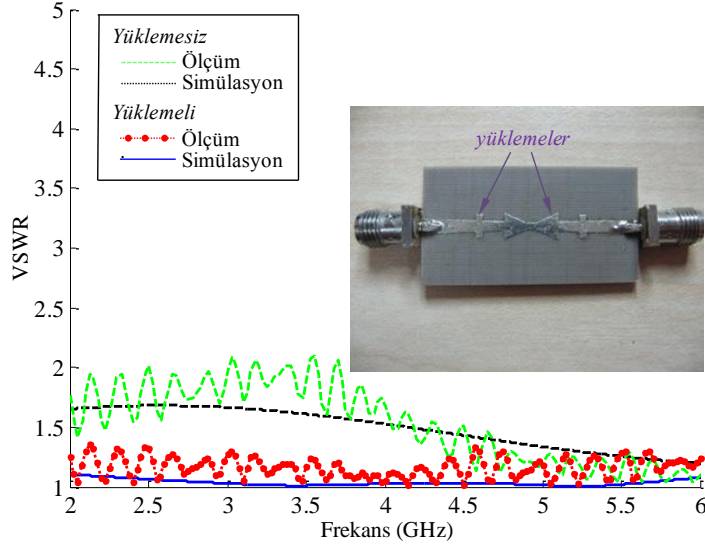
### 3.3. Tek Elemanlı MDA-II Tasarımı

MDA-I tasarımında özellikle 3.0 GHz bandında  $S_{11}$  ölçüm ve simülasyon sonuçlarında belirgin frekans kaymaları ve seviye farklılıkları görülmektedir. Gözlenen farklılıkların temel sebebinin ilgili balun/besleme yapısının yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülerek yeni bir balun tasarımı geliştirilmiştir. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, geliştirilen balun tasarımı, üçgenel yapıdaki toprak tabanlı dielektrik altaş üzerine yerleştirilmiş, konik kesimli canlı iletim hattı ve bu iletim hattı doğrultusunda, ilgili konumlara yerleştirilen biri dikdörtgen ve diğeri üçgen geometriye sahip metalik yüklemelerden oluşmaktadır. Hedeflenen geniş-bantlı VSWR < 1.5 performansının elde edilmesinde, ilgili metalik yüklemelerin konumları ve boyutları önemli rol oynamaktadır.



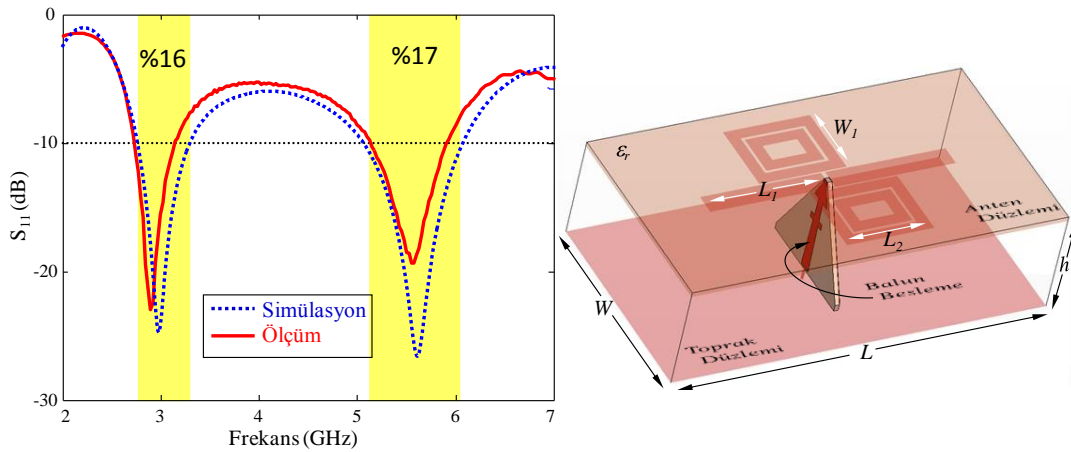
Şekil 3.5: Yüklemeli balun konfigürasyonu:  $l_1=18.275$ ,  $l_2=3.4$ ,  $l_3=1$ ,  $w_1=2.2$ ,  $w_2=1$ ,  $w_3=4$ ,  $w_4=3.5$ ,  $t=0.79$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .

Şekil 3.6'da, yüklemeli (MDA-II tasarımı için geliştirilen) ve yüklemesiz (MDA-I tasarımında kullanılan) uç-uca eklenmiş balun tasarımlarının VSWR benzetim ve ölçüm sonuçları verilmektedir. Görüldüğü üzere, yüklemesiz balun yapısı 2–6 GHz bandında VSWR < 2 başarımı sergilerken, yüklemelerin katkısıyla bu performans VSWR < 1.3 olarak iyileştirilmiştir. İlgili ölçüm sonuçlarının oldukça zigzaglı bir profil sergilediği görülmektedir. Ölçüm sırasında ilgili frekans adım aralığının artırılması veya uygun bir filtrelemeyle simülasyon karakteristiğiyle daha uyumlu ve düzgün bir VSWR profili elde edilebilir.



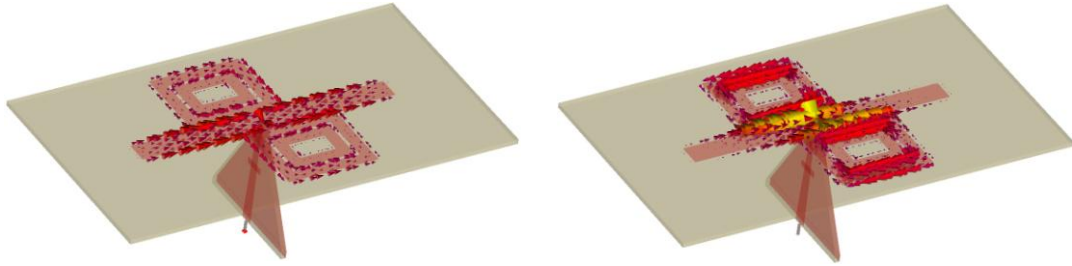
Şekil 3.6: Balun tasarımlarının VSWR benzetim ve ölçüm sonuçları.

Önerilen yeni balun yapısının anten tasarımına entegrasyonu ile tekrar optimize edilen çift-bant MDA/balun konfigürasyonu ve bu tasarıma ait geri-dönüş kaybı ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, MDA–II tasarımına ait ölçüm ve simülasyon sonuçları her iki bantta da oldukça uyumlu bir karakteristik sergilemektedir. Gerçeklenen MDA–II tasarımı 3.0 GHz ve 5.5 GHz bantlarında sırasıyla %16 ve %17 bant-genişliğine sahip çift-bant performans göstermektedir. Ölçüm sonuçlarına göre ise bu bant-genişlikleri sırasıyla %15 ve %16’dır.



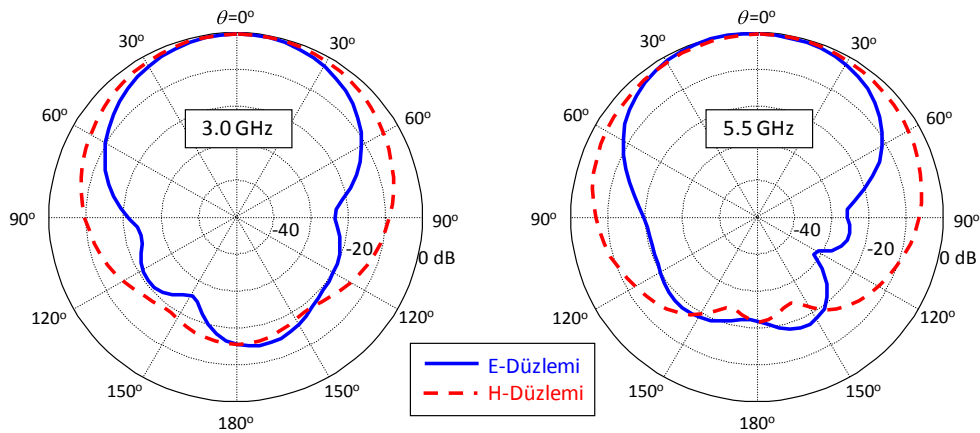
Şekil 3.7: MDA–II tasarımı ve  $S_{11}$  performansı.  $W=36$ ,  $L=66$ ,  $W_1=12.4$ ,  $L_1=21.16$ ,  $L_2=15.28$ ,  $h= 17.5$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .

Şekil 3.8’de, CST Microwave Studio simülasyonu aracılığı ile elde edilmiş, anten yüzeyindeki akım dağılımları verilmiştir. Görüldüğü üzere, 3.0 GHz bandında akım dipol etrafında yoğunken, 5.5 GHz’de halkalar üzerinde daha yoğun bir akım dağılımı bulunmaktadır. Bu sonuç düşük bandın dipolün etkisi ile yüksek bandın ise halkaların etkisi ile oluştuğunu göstermektedir.

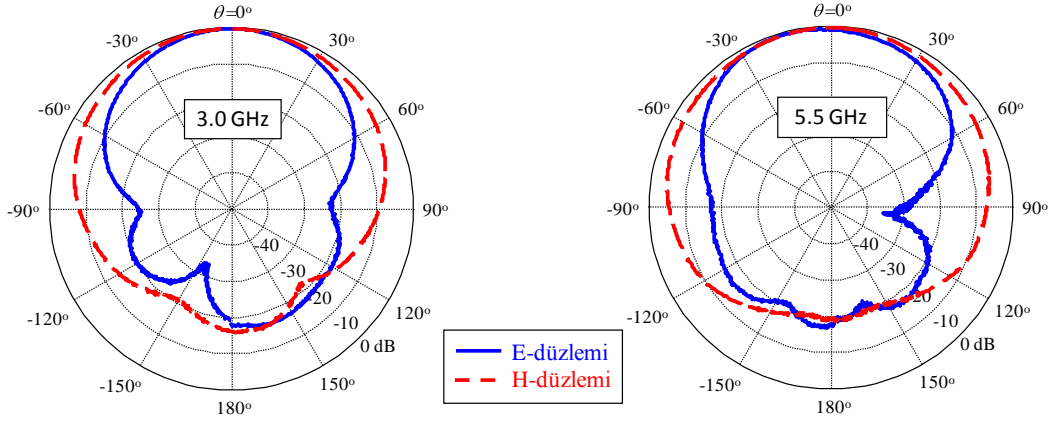


Şekil 3.8: Anten üzerindeki yüzey akım dağılımı grafiği.

Şekil 3.9’da, MDA–II tasarımının simülasyon ile elde edilmiş 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışınma örüntüleri; Şekil 3.10’da ise ölçülen ışınma örüntüleri yer almaktadır. İlgili şekillerden, sonuçların birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Rezonans frekanslarında, hesaplanan en yüksek arka-hüzme seviyesi  $-13$  dB seviyelerinde olup hesaplanan ışınma verimliliği %95 üzerinde gerçekleşmektedir. Ayrıca tasarımın 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki yönlendirme anten kazancının  $7.7$  dBi seviyelerinde olduğu ölçülmüştür. Tablo 3.2’de MDA–II tasarımının rezonans frekanslarındaki yönlendirme karakteristik bilgileri yer almaktadır. Görüldüğü üzere hesaplanan ve ölçülen kazanç değerleri birbirleri ile uyumaktadır.



Şekil 3.9: MDA–II tasarımına ait ışınma örüntüleri (simülasyon).



Şekil 3.10: MDA-II tasarımına ait ışınma örüntüleri (ölçüm).

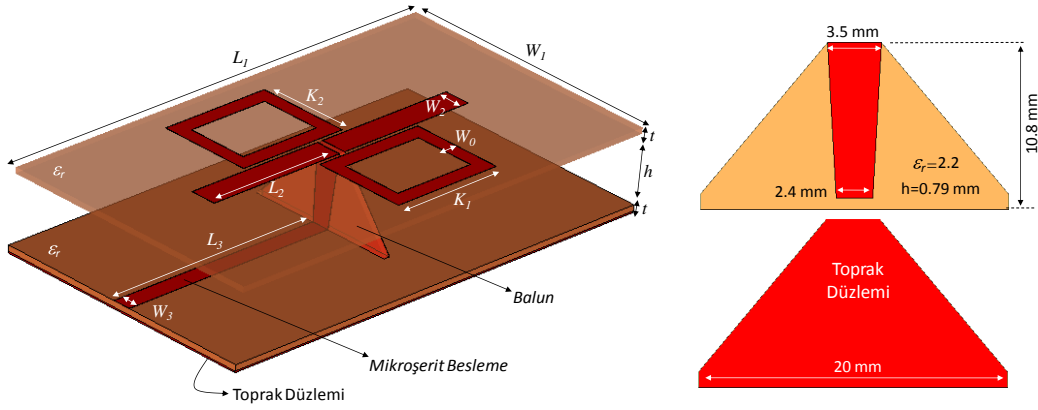
Tablo 3.2: MDA-II tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).

	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_o$ (dBi)	HPBW	$D_o$ (dBi)	HPBW
E-Düzlemi	7.7	65°	7.8	68°
H-Düzlemi		105°		115°

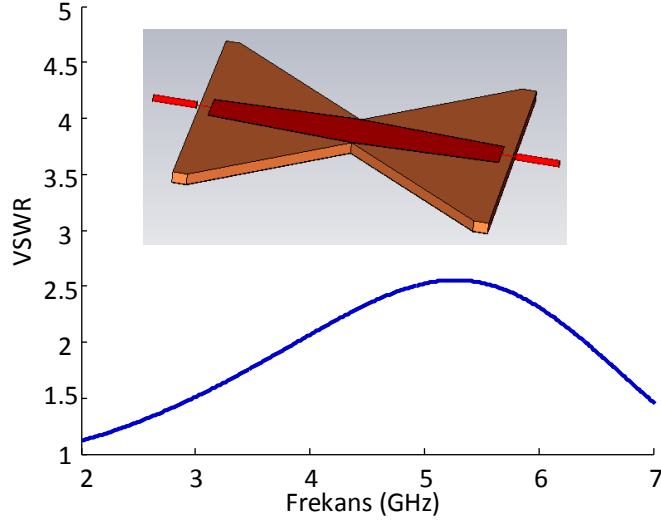
### 3.4. Tek Elemanlı MDA-III Tasarımı

Şekil 3.1’de verilen çift-bant MDA-I tasarımı temel alınarak, Şekil 3.11’deki mikroşerit beslemeli balun tasarımının yer aldığı MDA-III konfigürasyonu geliştirilmiştir. Bu yeni tasarım daha sonra tümeleşik besleme yapısını içeren dizi konfigürasyonlarına temel teşkil edecektir. Görüldüğü üzere, MDA-III tasarımında iki adet halka elemanı dipol elemanının besleme konumuna asimetrik olarak ve aynı düzlemde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Dipol elemanı ile halka elemanları arasındaki mesafe 0.5 mm olup dipol elemanı 50Ω’luk mikroşerit besleme hattından anten düzlemine uzanan farklı bir balun yapısı ile beslenmektedir. Burada kullanılan balun yapısına ait VSWR simülasyon karakteristiği Şekil 3.12’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, bu tasarımda 2–6 GHz bandında VSWR < 2.6 performansı gözlemlenmektedir.



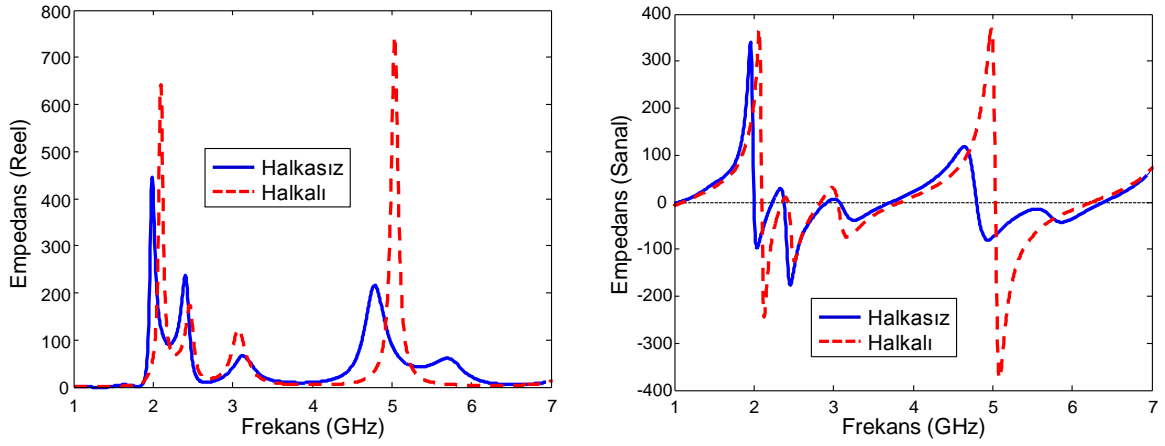


Şekil 3.11: MDA-III tasarımı:  $W_1=36$ ,  $L_1=66$ ,  $W_2=3.5$ ,  $L_2=20.57$ ,  $W_3=2.4$ ,  $L_3=32.6$ ,  $K_1=16.25$ ,  $K_2=12.4$ ,  $W_0=2.1$ ,  $h=9.2$ ,  $t=0.79$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .



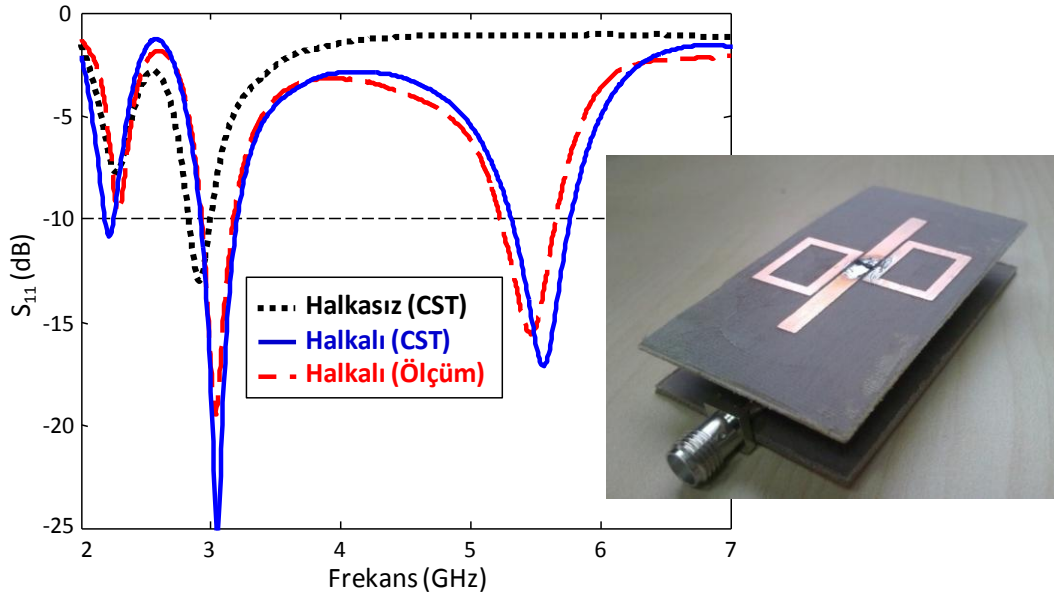
Şekil 3.12: MDA-III tasarımında kullanılan balun yapısına ait VSWR karakteristiği.

Şekil 3.13'te, halkalar yok iken ve var iken MDA-III tasarımının giriş empedans grafiği yer almaktadır. Görüldüğü üzere, halka elemanlarının eklenmesi ile 3.0 GHz bandında reel ve sanal empedans değerlerinde küçük değişimler meydana gelmektedir. Diğer taraftan; halkalar eklenmeden önce 5 GHz'de gözlenen dar-bant ve yüksek değerli (reel değer  $\sim 700 \Omega$ ) rezonans empedans profili, halkaların eklenmesiyle yerini, 5.5 GHz merkezli ortalama  $50 \Omega$  seviyelerinde geniş-bantlı empedans karakteristiğine bırakmaktadır. Sonuç olarak halka elemanları, empedans uyumlu ikincil üst-bandın oluşmasında oldukça önemli bir katkı sağlamaktadır.



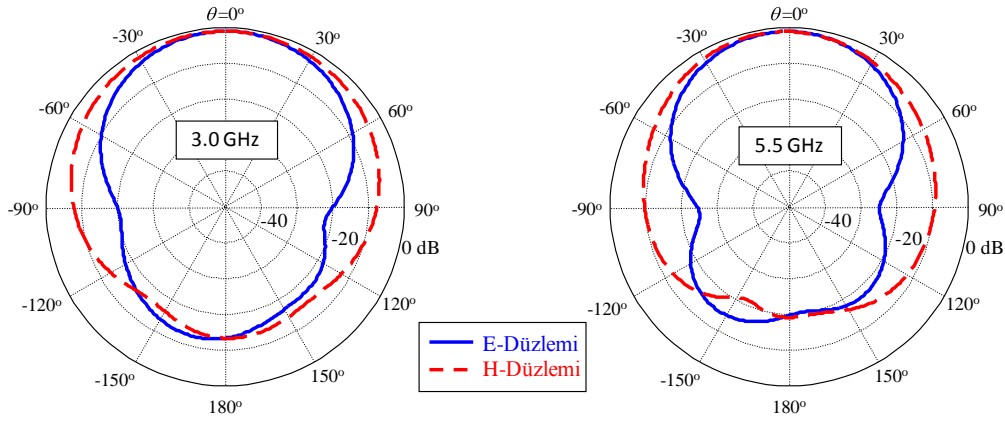
Şekil 3.13: Halkalı ve halkasız MDA-III tasarımının giriş empedans grafiği.

Şekil 3.14'te, MDA-III tasarımının  $S_{11}$  ölçüm ve analiz sonuçları verilmiştir. Görüldüğü üzere, halka elemanlarının eklenmesi ile ilk bant yüklenme etkisinden dolayı 3 GHz'e kaymış ve 5.5 GHz etrafında ikinci bir bant oluşmuştur. Ölçüm ve analiz sonuçlarının oldukça uyumludur. Üst banttaki frekans kaymasının fabrikasyon ve ölçüm toleranslarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Tasarım ilgili frekans bantlarında daha önceki MDA tasarımlarına göre %9'luk daha mütevazı bir bant-genişliğine sahiptir.

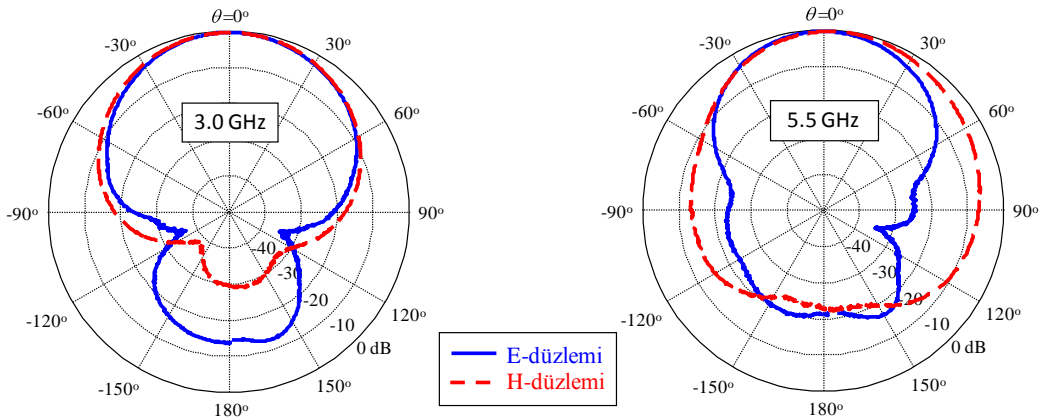


Şekil 3.14: MDA-III tasarımının  $S_{11}$  performansı.

Şekil 3.15'te, MDA-III tasarımının simülasyon ile elde edilmiş 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışınma örüntüleri; Şekil 3.16'da ise ölçülen ışınma örüntüleri yer almaktadır. İlgili şekillerden, üst bant sonuçlarının birbirleri ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Alt bantta ise ölçüm sonuçlarından daha iyi bir performans elde edilmiştir. Buna rağmen ölçülen ve hesaplanan HPBW değerleri birbirleri ile oldukça uyumludur. Rezonans frekanslarında, en yüksek arka-hüzme seviyesi  $-12$  dB seviyelerinde olup hesaplanan ışınma verimliliği %90 üzerinde gerçekleşmektedir. Ayrıca tasarımın 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki yönlendirme anten kazancının sırasıyla 6.7 dBi ve 9 dBi olduğu ölçülmüştür.



Şekil 3.15: MDA-III tasarımına ait ışınma örüntüleri (simülasyon).



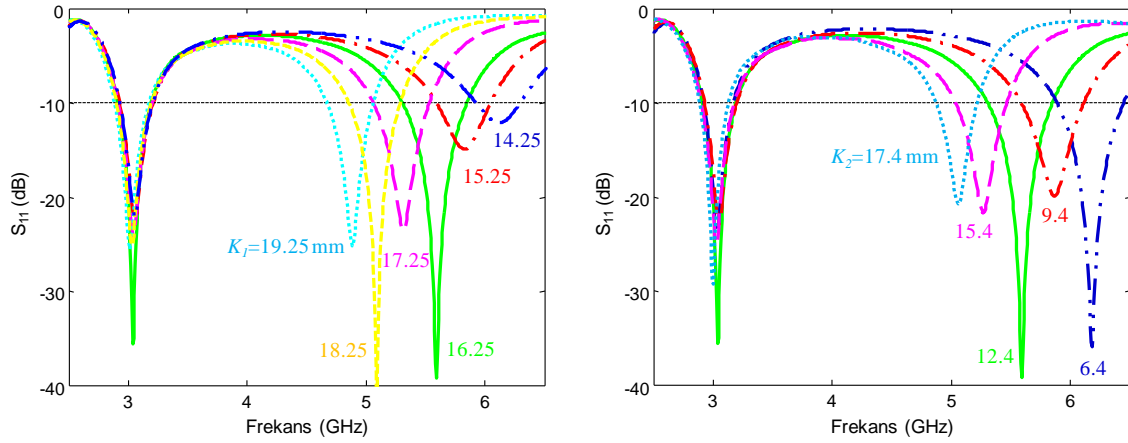
Şekil 3.16: MDA-III tasarımına ait ışınma örüntüleri (ölçüm).

Tablo 3.3'te MDA-III tasarımının rezonans frekanslarındaki hesaplanan yönlendirme karakteristik bilgileri yer almaktadır. Görüldüğü üzere, alt-bantta ölçülen kazanç değeri hesaplanana göre 0.4 dBi daha yüksek iken üst bantta durum tam terstir.

Tablo 3.3: MDA–III tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).

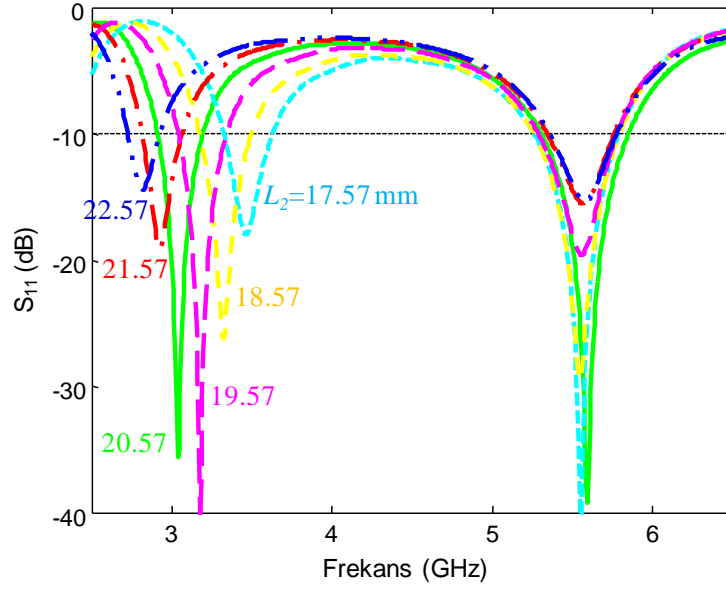
	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_0$ (dBi)	HPBW	$D_0$ (dBi)	HPBW
E–Düzlemi	7.1	$68^\circ$	8.6	$60^\circ$
H–Düzlemi		$108^\circ$		$74^\circ$

Önerilen antenler belirli frekans bantlarında kullanılmak üzere tasarlanmış olsa da ilgili tasarımlar farklı frekans bantlarına da adapte edilebilir. Bunu göstermek için dipol uzunluğu sabit tutularak (42 mm) halka elemanlarının boyutları ( $K_1$ ,  $T_1$ ) değiştirilmiş ve tasarımın  $S_{11}$  performansı incelenmiştir (Şekil 3.17). Bu durumda düşük bant sabit kalırken (3.0 GHz), üst bantın farklı frekans değerlerine kaydırılabildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3.17: Halka elemanlarının uzunluk ( $K_1$ ) ve genişliğine ( $K_2$ ) göre parametrik çalışma sonuçları.

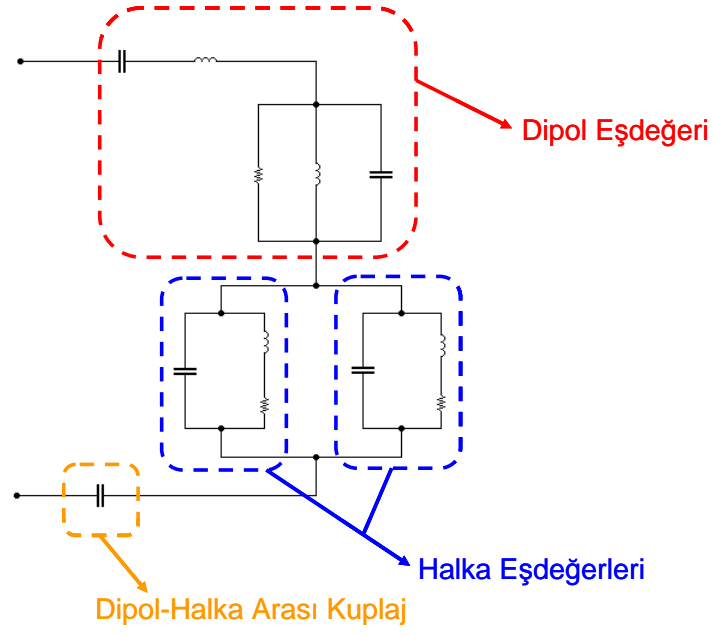
Benzer şekilde halka elemanlarının boyutları sabit tutularak dipol elemanının uzunluğu ( $L_2$ ) değiştirilmiş ve tasarımın  $S_{11}$  performansı incelenmiştir (Şekil 3.18). Görüldüğü üzere bu durumda üst bant sabit kalırken (5.5 GHz), alt bant 2.6–3.6 GHz arasında kaydırılabilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmalar, alt bantın (3 GHz) dipolün etkisi ile üst bantın (5.5 GHz) ise halkaların etkisi ile oluştuğunu göstermektedir. Bu parametrik çalışma sonuçlarından da görüldüğü üzere, ilgili parametreler optimize edilerek tasarım farklı frekans bantlarına adapte edilebilir.



Şekil 3.18: Dipol uzunluğuna ( $2L_2$ ) göre parametrik çalışma sonuçları.

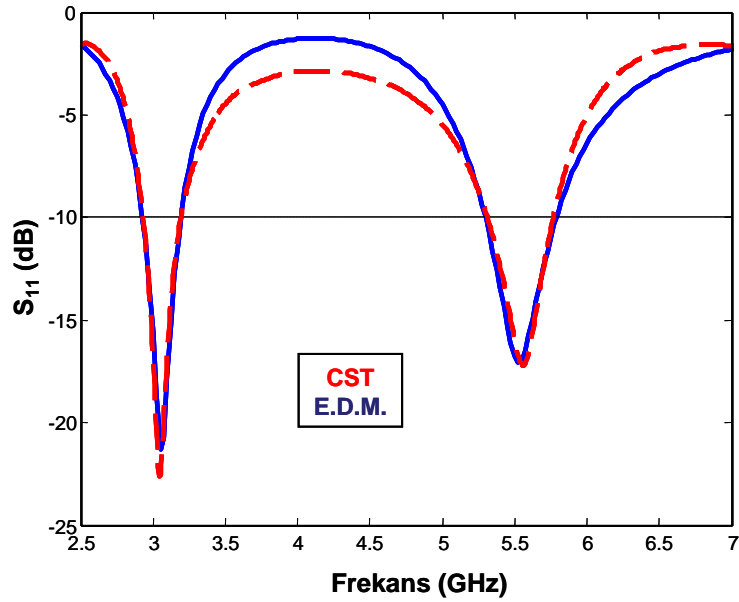
Bu tez çalışmasında yer alan anten tasarımları, ilgili yapının geometrik boyutları için yapılan parametrik çalışmaların bir ürünüdür. Bu süreçte; önemli görülen her bir parametre için, bir dizi simülasyon gerçekleştirilmiş ve optimum performans sağlayacak anten geometrisi elde edilmiştir. Temel olarak deneme-yanılma yöntemini benimseyen bu yaklaşım, tasarımcıya, kabaca parametrelerin performansa etkisi konusunda bir fikir verse de, farklı dizaynlar için nicel bir ölçüt olamamaktadır. Böyle bir yaklaşıma alternatif olarak; MDA geometrisine ait elde edilecek bir eşdeğer devre modeliyle, tasarım daha sistematik ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu amaçla; tek elemanlı MDA-III yapısına ait eşdeğer devre modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

MDA-III tasarımının devre modeli elde edilirken yapının geometrisi de dikkate alınmış, bu nedenle, Hamid ve Hamid (1997)'in önerdiği dipol anten eşdeğer devresi ile Underhill ve Harper (2002)'nin önerdiği halka eşdeğer devresi bir araya getirilmiştir (Şekil 3.19). Dipol ve halkanın bir araya getirilmesi sonucunda oluşacak kuplaj etkisini modellemek için devreye ayrıca bir kapasitör eklenmiştir.



Şekil 3.19: MDA-III tasarımı için önerilen eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devre modelinin doğruluk derecesini görmek amacıyla; MDA-III tasarımı ve ilgili eşdeğer devrenin iletim karakteristikleri Şekil 3.20’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, simülasyon ve eşdeğer devre modeline ait iletim karakteristikleri birbiri ile oldukça uyuşmaktadır.

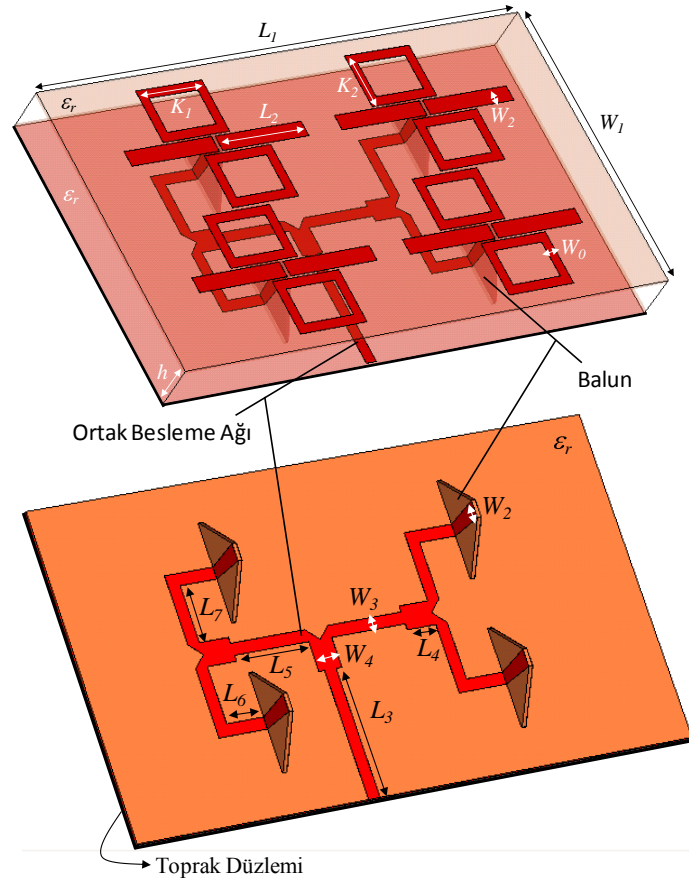


Şekil 3.20: MDA-III tasarımı ile eşdeğer devre modelinin yansıma karakteristikleri.

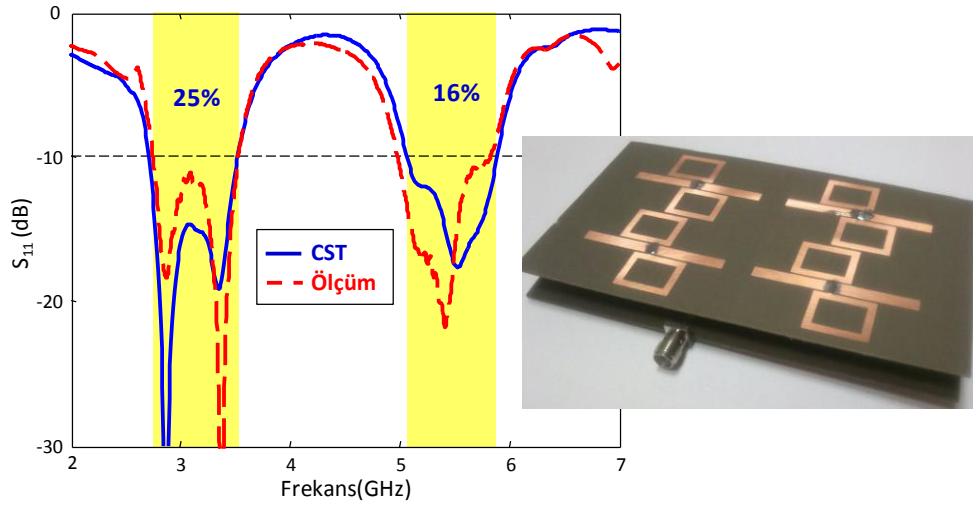
### 3.5. 2×2 MDA Dizi Tasarımı

Şekil 3.11’de verilen ve ortak besleme konfigürasyonuna daha uygun olan MDA–III tasarımı temel alınarak, Şekil 3.21’de yer alan 2×2 MDA dizi konfigürasyonu geliştirilmiştir. Bu dizi tasarımı, MDA–III yapısındaki balun muhafaza edilerek ilgili halka elemanlarının yatay boyutlarının optimizasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20’de görüldüğü üzere, bu tasarımdaki önemli bir yenilik ortak bir besleme ağının geliştirilmiş olmasıdır. 2×2 MDA dizisine ait  $S_{11}$  simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.22’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, önerilen tasarım 3 GHz bandında %25, 5.5 GHz bandında ise %16’lık  $|S_{11}| < -10$  dB başarımlı göstermektedir.

Şekil 3.23’te, 2×2 MDA dizi tasarımının simülatör ile elde edilmiş 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışınma örüntüleri; Şekil 3.24’te ise ölçülen ışınma örüntüleri yer almaktadır. İlgili şekillerden, sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Özel olarak 5.5 GHz’te, E-düzlemindeki kenar-hüzme seviyesinin  $SLL = -10$  dB değerinde olduğu gözlenmektedir. Ayrıca tasarımın 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki yönlendirme anten kazancının sırasıyla 9.5 dBi ve 13.5 dBi seviyelerinde olduğu ölçülmüştür. Tablo 3.4’te, 2×2 MDA dizi tasarımının CST ile elde edilmiş rezonans frekanslarındaki yönlendirme karakteristik bilgileri yer almaktadır.

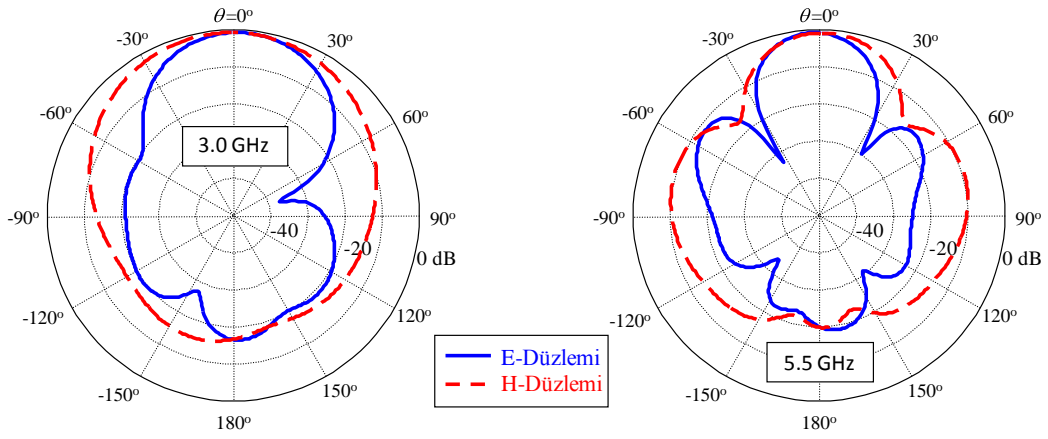


Şekil 3.21: 2×2 MDA dizi konfigürasyonu:  $L_1=116$ ,  $W_1=66$ ,  $K_1=15.75$ ,  $K_2=12.4$ ,  $W_0=2.1$ ,  $W_2=3.5$ ,  $L_2=20.57$ ,  $h=9.21$ ,  $L_3=25.8$ ,  $L_4=6$ ,  $L_5=15.4$ ,  $L_6=7.57$ ,  $L_7=11.4$ ,  $W_3=2.4$ ,  $W_4=4.8$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .

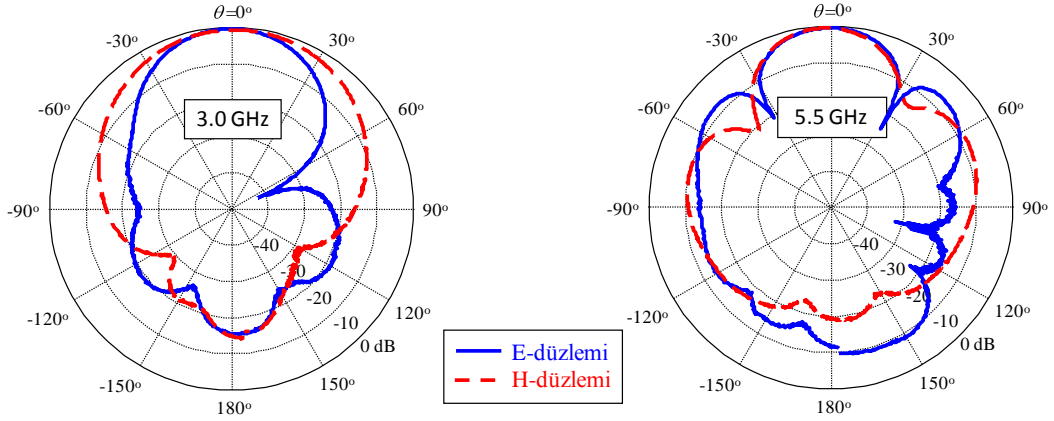


Şekil 3.22: 2×2 MDA dizi tasarımının  $S_{11}$  performansı.





Şekil 3.23:  $2 \times 2$  MDA dizi tasarımına ait ışıma örüntüleri (simülasyon).



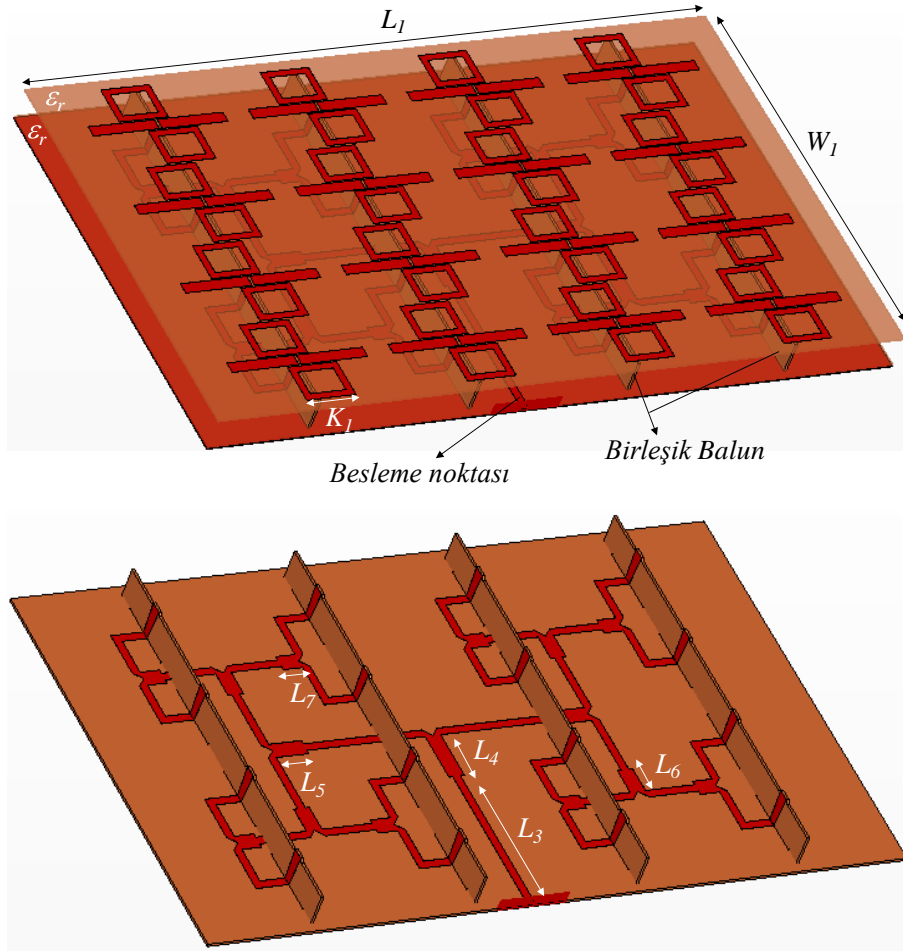
Şekil 3.24:  $2 \times 2$  MDA dizi tasarımına ait ışıma örüntüleri (ölçüm).

Tablo 3.4:  $2 \times 2$  MDA dizi tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).

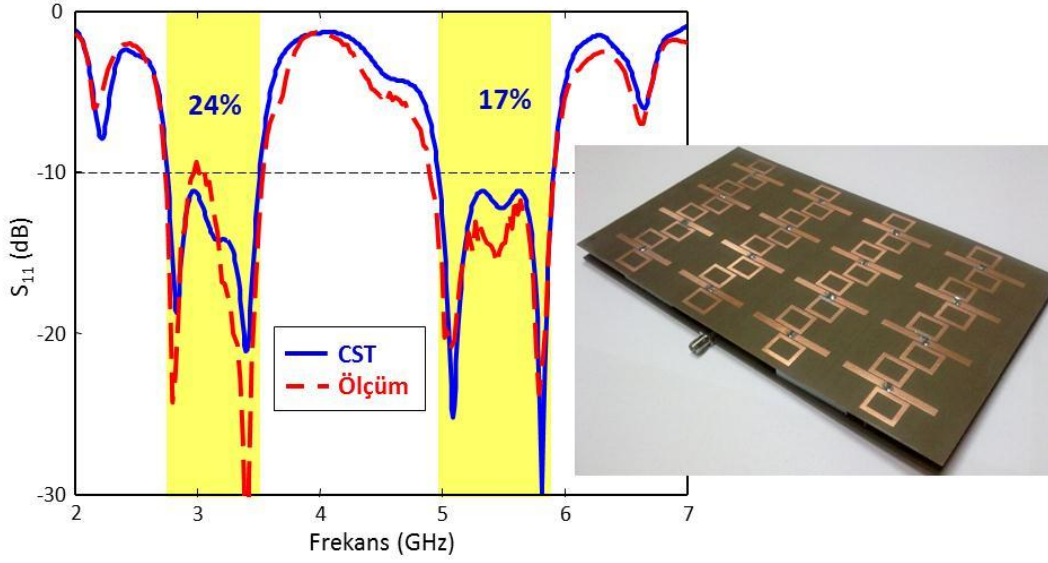
	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_0$ (dBi)	HPBW	$D_0$ (dBi)	HPBW
E-Düzlemi	9.8	44°	13.9	28°
H-Düzlemi		76°		40°

### 3.6. 4×4 MDA Dizi Tasarımı

Şekil 3.21'deki 2×2 MDA dizi tasarımı temel alınarak, Şekil 3.25'te yer alan 4×4 MDA dizi konfigürasyonu geliştirilmiştir. Önceki balun yapısı ve Şekil 3.25'te belirtilen tasarım parametreleri dışındaki parametreler 2×2 MDA dizi tasarımınıninkilerle aynıdır. Görüldüğü üzere, ortak besleme ağı 2x2 dizi yapısındaki genişletilmiş versiyonu olup, önerilen besleme yapısı benzer şekilde  $2^n \times 2^n$  ( $n > 1$ ) dizi konfigürasyonları için uyarlanabilir. 4×4 MDA dizisine ait  $S_{11}$  simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 3.26'da verilmiştir. Önerilen tasarım 3 GHz bandında %24, 5.5 GHz bandında ise %17'lik  $S_{11}$  bant-genişliği başarımlı göstermektedir. Ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırıldığında; seviyelerde bir miktar farklılıklar olsa da ilgili bantlar oldukça örtüşmektedir.

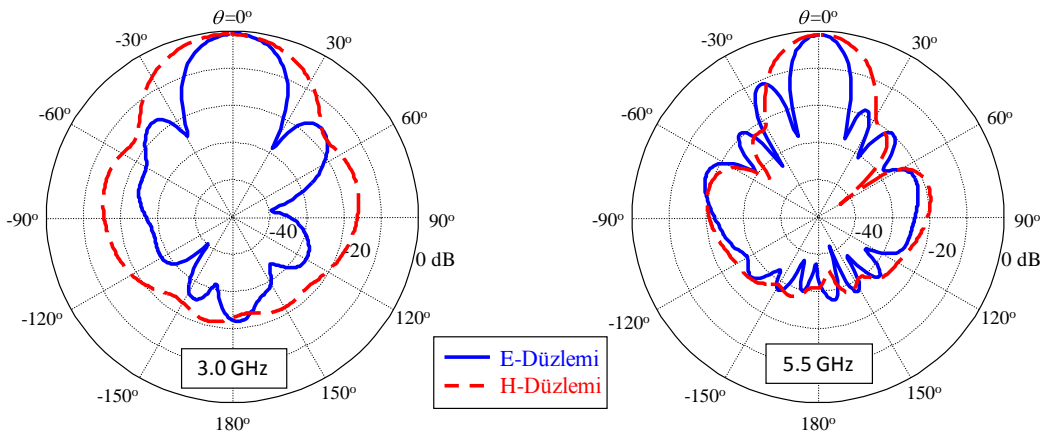


Şekil 3.25: 4×4 MDA dizi konfigürasyonu:  $L_1=216$ ,  $W_1=126$ ,  $K_1=15.25$ ,  $L_3=46.8$ ,  $L_4=15$ ,  $L_5=10$ ,  $L_6=8$ ,  $L_7=6$ , (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .

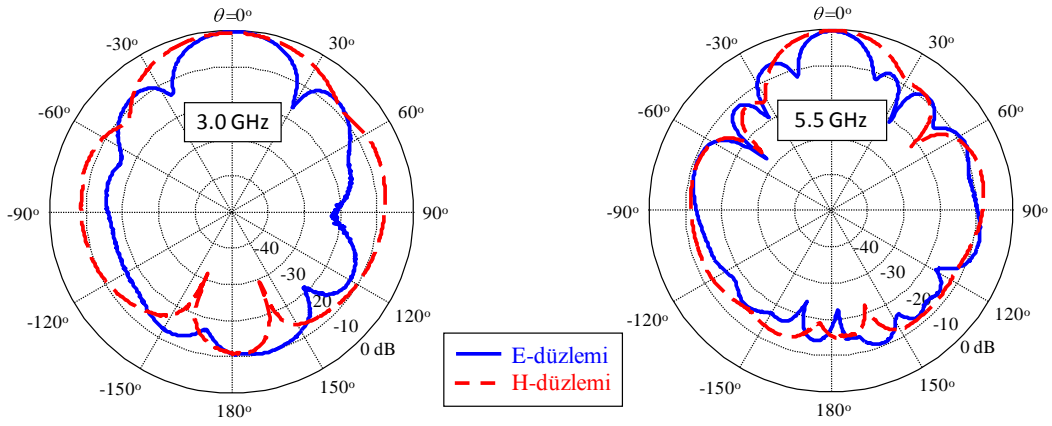


Şekil 3.26: 4×4 MDA dizi tasarımının  $S_{11}$  performansı.

Şekil 3.27’de, 4×4 MDA dizi tasarımının simülasyon ile elde edilmiş 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışınma örüntüleri; Şekil 3.28’de ise ölçülen ışınma örüntüleri yer almaktadır. İlgili şekillerden, sonuçlar birbirleri ile genel olarak uyumlu olsa da yan ve arka huzme seviyelerinin farklı olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca tasarımın 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki yönlendirme anten kazancının sırasıyla 14.3 dBi ve 19 dBi olduğu ölçülmüştür. Tablo 3.5’te, 4×4 MDA dizi tasarımının CST ile elde edilmiş rezonans frekanslarındaki yönlendirme karakteristik bilgileri yer almaktadır. Görüldüğü üzere hesaplanan yönlendirme kazançları ölçülenlere göre yaklaşık 0.7 dBi daha yüksektir.



Şekil 3.27: 4×4 MDA dizi tasarımına ait ışınma örüntüleri (simülasyon).



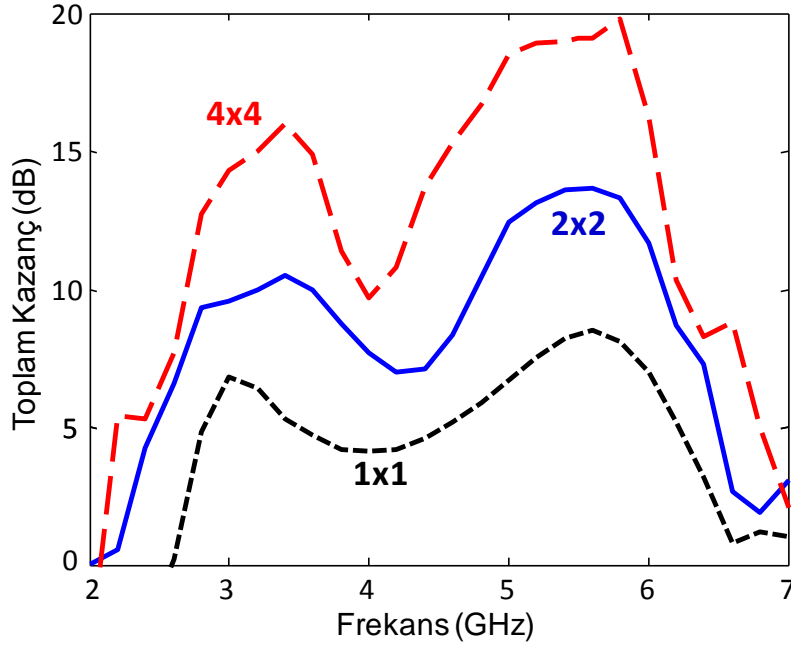
Şekil 3.28: 4×4 MDA dizi tasarımına ait ışınma örüntüleri (ölçüm).

Tablo 3.5: 4×4 MDA dizi tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).

	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_0$ (dBi)	HPBW	$D_0$ (dBi)	HPBW
E-Düzlemi	15.1	24°	19.6	14°
H-Düzlemi		40°		24°

Ayrıca, çift-bant halka-yüklemeli MDA dizi tasarımlarına ait ana hüzmeye doğrultusunda hesaplanan toplam kazanç (yönlendirme kazancı × ışınma verimliliği × empedans-uyumsuzluk kaybı) karakteristiği Şekil 3.29’da verilmiştir. İlgili grafikte, 1x1 dizi tasarımı MDA-III tasarımına karşılık gelmektedir. Görüldüğü üzere üç tasarım da benzer çift-bant kazanç profili sergilemektedir. Beklenildiği üzere, anten sayısı arttıkça kazanç seviyeleri de artmaktadır. Özel olarak 2×2 dizi tasarımı, ortalama olarak, 3 GHz bandında 10 dB ve 5.5 GHz bandında 13 dB kazanç değerlerine sahipken, 4×4 dizi tasarımı ilgili bantlarda sırasıyla 15 dB ve 19 dB kazanç seviyelerine ulaşmaktadır.

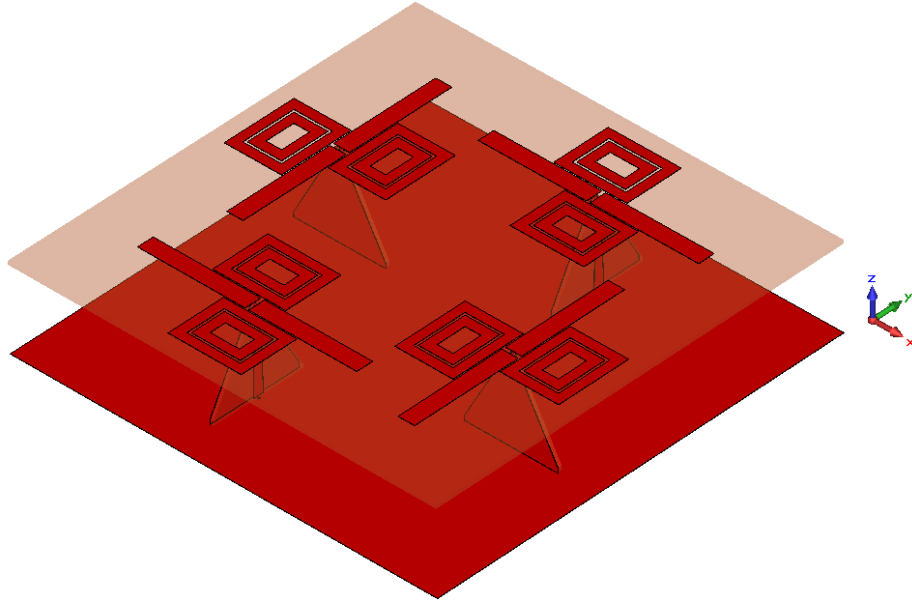
Ayrıca, Şekil 3.29’da görüldüğü üzere, tek elemanlı MDA tasarımında alt ve üst bantlar arasındaki toplam kazanç farkı yaklaşık 1.5 dB iken, 2×2 MDA dizisi için bu değer 3 dB’ye, 4×4 MDA dizisi için ise yaklaşık 4 dB’ye ulaşmaktadır. Dizi elemanlarının sayısındaki artışla birlikte gözlenen üst ve alt bantlardaki kazanç farkındaki bu artış sebebinin; ikinci bant oluşumunda önemli bir role sahip olan halka elemanlarının ilgili dizilerdeki sayısının artışı ve dizi yapısındaki halka elemanlarının H-düzleminde birbirlerine oldukça yakın yerleşimi sonucu kuplaj etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



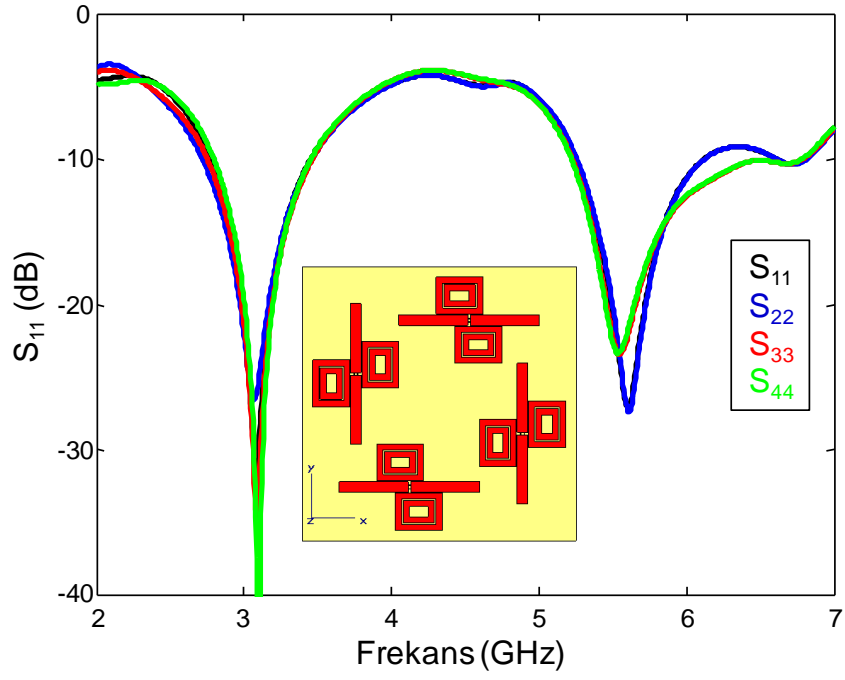
Şekil 3.29: Çift-bant MDA dizi tasarımlarına ait hesaplanan toplam kazanç performansları.

### 3.7. Çift-Polarizasyonlu Çift-Bant 2×2 MDA Dizi Tasarımı

Çift-bant MDA tasarımlarından bir diğeri de çift-polarizasyon performansı için tasarlanmış Şekil 3.30'da verilen konfigürasyondur. Görüldüğü üzere, iki dikey ve iki yatay doğrultuda fan şeklini oluşturmak üzere yerleştirilmiş dört adet halka-yüklemeli dipol elemanının her biri ayrı bir balun elemanı ile beslenmektedir. Bu dizi tasarımına ait her bir besleme elemanı için geri-dönüş kaybı ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$ ,  $S_{44}$ ) simülasyon sonuçları Şekil 3.31'de verilmiştir. Görüldüğü üzere, ilgili karakteristikler 3 GHz ve 5.5 GHz bantlarında birbirleriyle oldukça örtüşen performans sergilemektedirler.

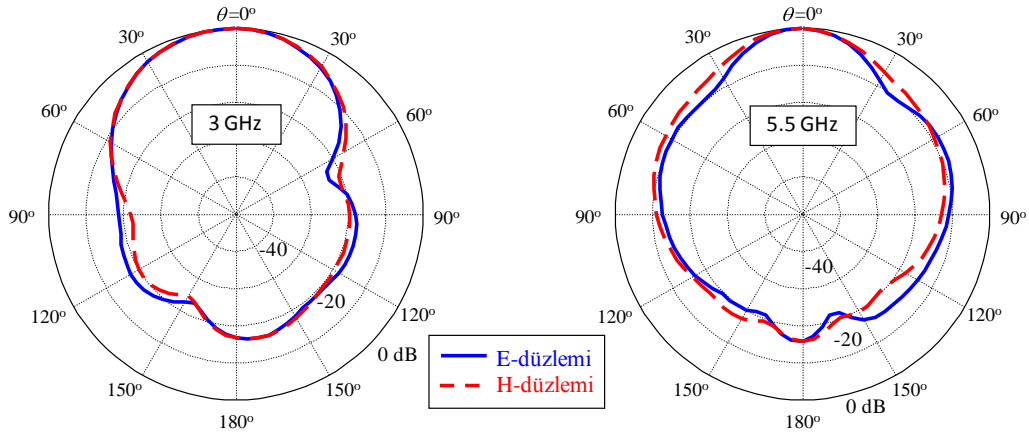


Şekil 3.30: Çift-polarizasyonlu MDA dizi konfigürasyonu.

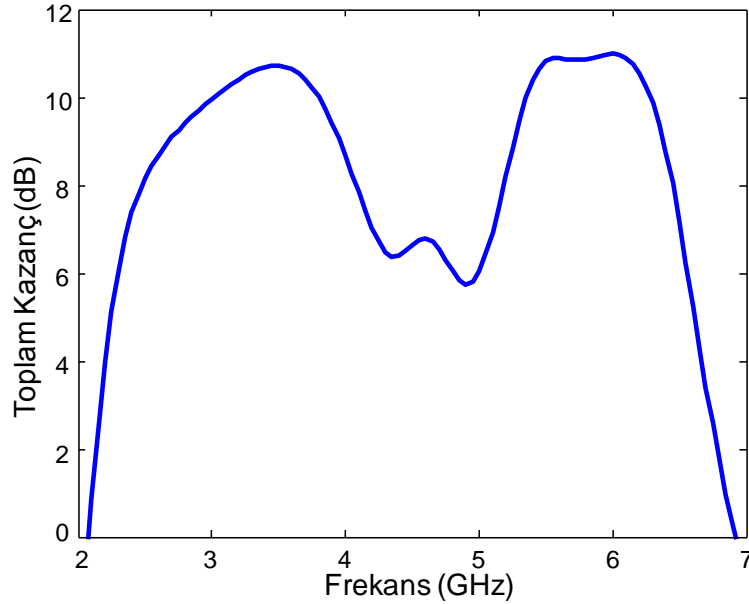


Şekil 3.31: Çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımı S<sub>11</sub> performansı.

Şekil 3.32’de, çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımının 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışınma örüntüleri görülmektedir. E-düzlemi ve H-düzlemi ışınma karakteristiklerinin simetrik profile sahip olduğu bu tasarımda yönlendirme kazancı 10.5 dBi seviyelerindedir. Ayrıca, Şekil 3.33’te verilen toplam kazanç karakteristiğinde çift-bant performans gözlenmektedir.



Şekil 3.32: Çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımına ait simülasyon ışınma örüntüleri.



Şekil 3.33: Çift-polarizasyonlu MDA dizi tasarımına ait toplam kazanç performansı.

## 4. ANAHTARLAMALI MİKROŞERİT DİPOL ANTEN TASARIMLARI

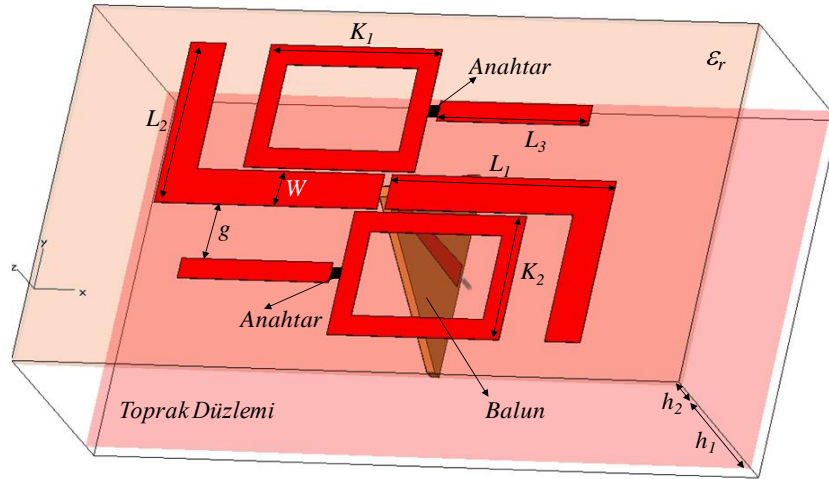
### 4.1. Giriş

Bu bölümde, 3 GHz veya 5.5 GHz bantlarında performans gösteren frekans-ayarlamalı MDA tasarımlarına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları, sırasıyla tek elemanlı ve 2×2 dizi yapıları için sunulacaktır. İlgili anten tasarımlarının CST analiz sonuçları ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.

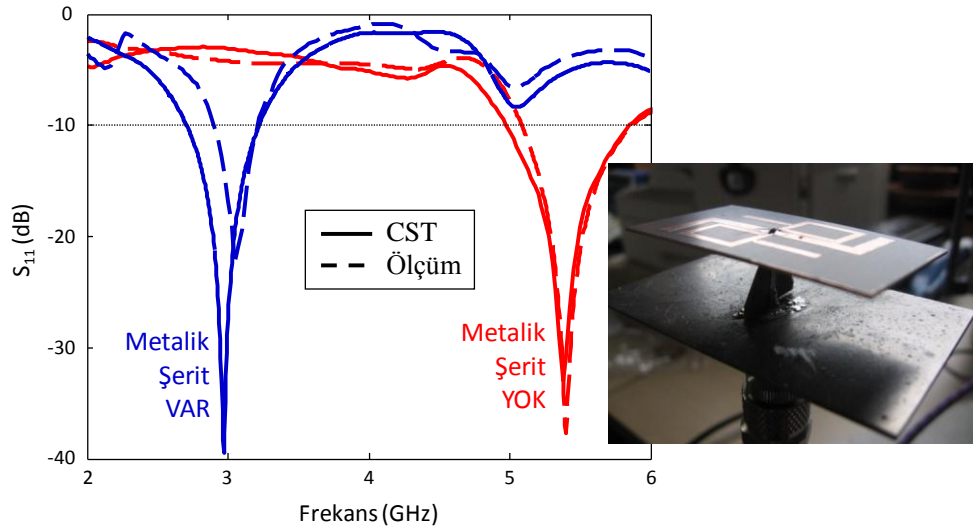
### 4.2. Tek Elemanlı Anahtarlamalı MDA Tasarımı

Şekil 4.1’de, önerilen anahtarlamalı MDA konfigürasyonu ve ilgili tasarım parametreleri verilmektedir. Görüldüğü üzere bu tasarımda, bükülmüş dipol elemanının besleme konumuna asimetrik olacak şekilde iki adet halka elemanı yerleştirilmiştir. Bükülmüş dipol, kavite içinde toprak düzleminde anten düzlemine uzanan, MDA–I tasarımında kullanılan mikroşerit balun yapısı ile beslenmektedir. Dipol elemanına paralel uzanan şerit yüklemelerin ( $L_3$ ) halkalara bağlantıları ise iki adet aç/kapa anahtar ile sağlanmaktadır. Pratik uygulamada PIN-diyot elemanlarının yer alacağı bu anahtar konumlarında, simülasyonlarda  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  boyutlarında metalik parçalar ile modelleme gerçekleştirilmiştir. Anahtarların kapalı durumunda, şerit yüklemelerin halkalarla bağlantısı sağlanmakta (metalik parça var; kısa devre) ve anten 3.0 GHz bandında; anahtarların açık durumunda ise, şerit yüklemelerin halkalarla bağlantısı kesilmekte (metalik parça yok; açık devre) ve anten 5.5 GHz bandında performans göstermektedir (Şekil 4.2). Tasarım 3 GHz ve 5.5 GHz bantlarında sırasıyla %17 ve %15’lik frekans bant-genişliğine sahip olup ilgili simülasyon ve ölçüm sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir. Anahtarlamalı MDA tasarımı, ilgili bantlarda broadside ışınma performansı (Şekil 4.3) göstermektedir ve yönlendirme kazanç değerleri yaklaşık olarak 6.9 dBi seviyelerindedir. Tablo 4.1’de anahtarlamalı MDA tasarımının rezonans bantlarındaki yönlendirme karakteristik bilgileri yer almaktadır.

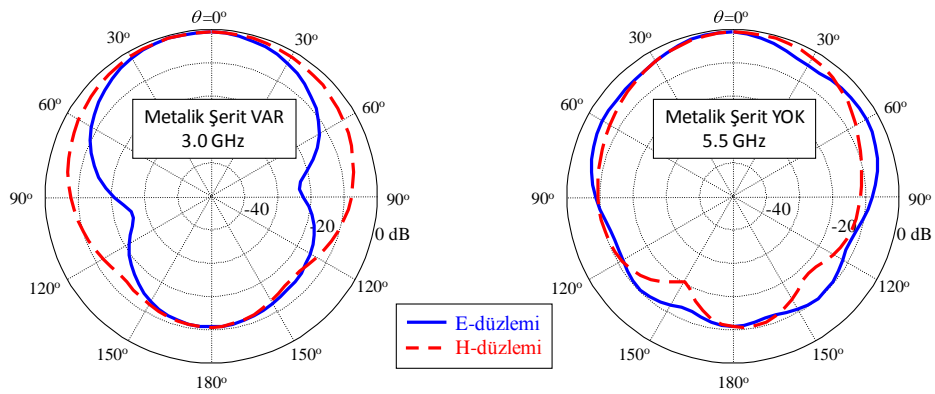




Şekil 4.1: Anahtarlamalı MDA tasarımı:  $L_1=22.1$ ,  $L_2=16.2$ ,  $L_3=15$ ,  $W=3.5$ ,  $K_1=17$ ,  $K_2=12.4$ ,  $W_0=2.0$ ,  $g=5.5$ ,  $h_1=17$ ,  $h_2=0.79$  (mm), anahtar ( $1 \times 1$  mm<sup>2</sup>),  $\epsilon_r=2.2$ .



Şekil 4.2: Anahtarlamalı MDA tasarımına ait  $S_{11}$  ölçüm ve simülasyon sonuçları.

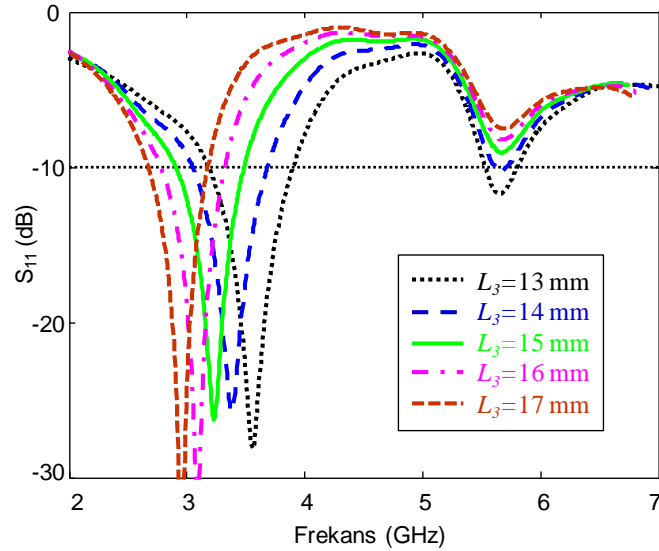


Şekil 4.3: Anahtarlamalı MDA tasarımına ait ışıma örüntüleri (simülasyon).

Tablo 4.1: Anahtarlamalı MDA tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).

	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_0$ (dBi)	HPBW	$D_0$ (dBi)	HPBW
E-Düzlemi	6.8	68°	7.1	52°
H-Düzlemi		110°		74°

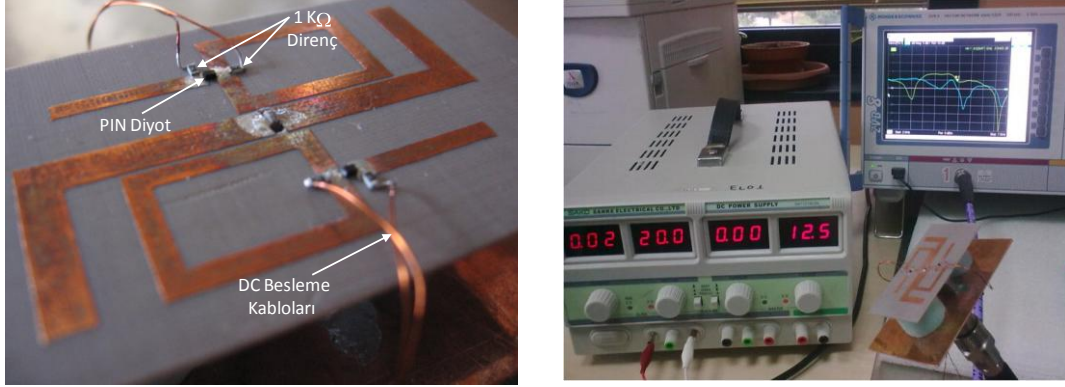
Önerilen bu anten yapısı belirli frekans bantlarında kullanılmak üzere tasarlanmış olsa da ilgili tasarım farklı frekans bantlarına da adapte edilebilir. Bunu göstermek için, anahtarların mevcut olduğu tasarımda, halka elemanlarının yatay boyutları ( $K_1$ ) sabit tutularak (17 mm) şerit yüklemelerin uzunluğu ( $L_3$ ) değiştirilmiş ve tasarımın  $S_{11}$  performansı incelenmiştir (Şekil 4.4). Bu durumda alt bantın 2.5–3.5 GHz arasında kaydırılabildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4: Şerit yüklemelerin uzunluğuna göre parametrik çalışma sonuçları.

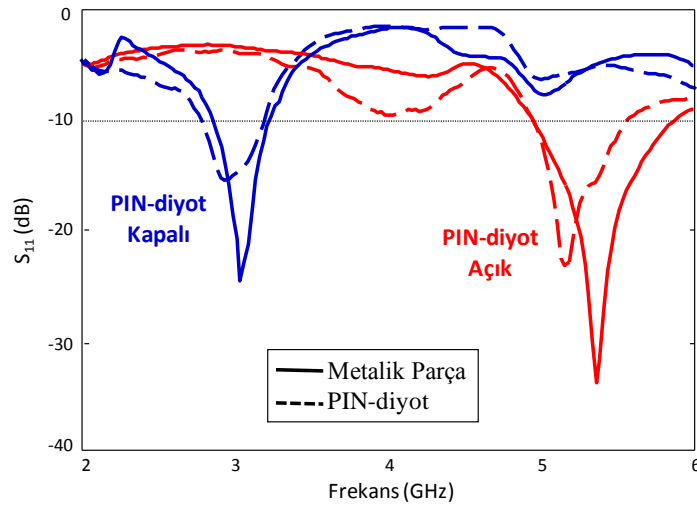
Antenin çalışma frekansının dinamik olarak kontrol edilebilmesi için metalik anahtarlar yerine yüzey uyumlu NXP Semiconductors firmasının üretimi olan SOD523 paketli BAP70–02 seri numaralı silikon PIN-diyot elemanları kullanılmıştır. PIN-diyotlu MDA tasarımı ve ölçüm düzeneği Şekil 4.5'te verilmiştir. PIN-diyotların üzerinden geçen akımı sınırlamak için hatlar üzerine 2 K $\Omega$  direnç bağlanmış ve 20V'luk DC gerilim uygulanmıştır. Tasarımda, anten besleme hattı ile PIN-diyotların DC hattı arasında direk bir bağlantı olmadığından bu iki sinyal birbiri ile karışmamakta, dolayısı ile hatlar üzerinde DC-RF izolasyonu için ekstra kondansatör veya bobin elemanı kullanmaya gerek olmadığı öngörülmektedir.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere PIN-diyotların DC hattı olarak kablolar kullanılmaktadır. İlgili kabloların ışına örüntüsüne olumsuz bir etki yapacağı öngörülmektedir. Bu olumsuz etkinin azaltılabilmesi için kablolar yerine optimum konum ve boyuttaki mikroşerit hatlar ile PIN-diyotların beslenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.5: PIN-diyotlu MDA tasarımı ve ölçüm düzeneği.

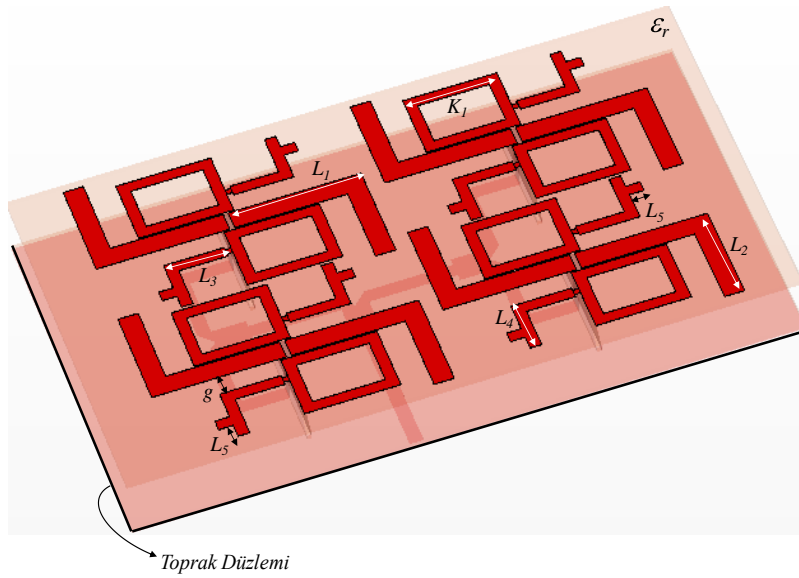
Metalik anahtarlı yapı ile PIN-diyotlu yapının,  $S_{11}$  ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.6'da verilmektedir. İki ölçüm sonucu arasında farklılıklar olsa da karakteristiklerin olabildiğince uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Burada önemli olan, önerilen anahtarlamalı tasarım ile çalışma bandının dinamik olarak kontrol edilebilmesidir.



Şekil 4.6: PIN-diyotlu MDA tasarımına ait  $S_{11}$  performansı (ölçüm).

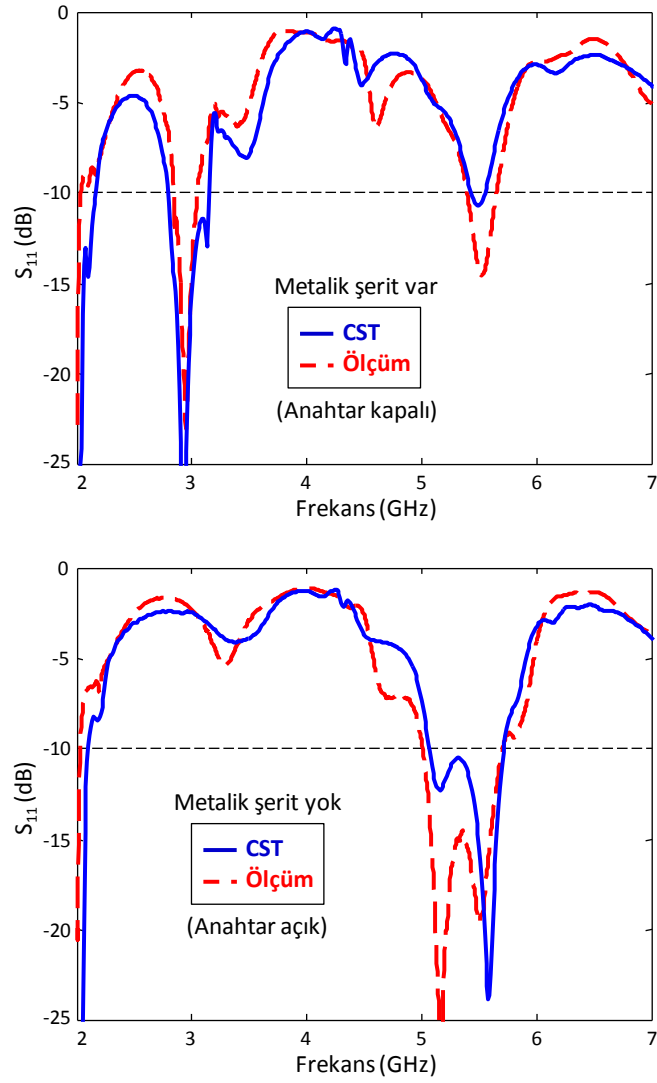
### 4.3. 2×2 Anahtarlama MDA Dizi Tasarımı

Şekil 4.1’de verilen anahtarlama (metalik-şerit yüklemeli) MDA tasarımı temel alınarak, Şekil 4.7’de yer alan anahtarlama 2×2 dizi konfigürasyonu geliştirilmiştir. Bu yeni dizi tasarımı, halka elemanlarının yatay boyutları, dipol uzunlukları ve yüklemeler optimize edilerek gerçekleştirilmiştir. MDA dizisinin  $S_{11}$  simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir. Görüldüğü üzere, önerilen tasarım 3.0 ve 5.5 GHz bantlarında %12’lik bant genişliğine sahiptir.

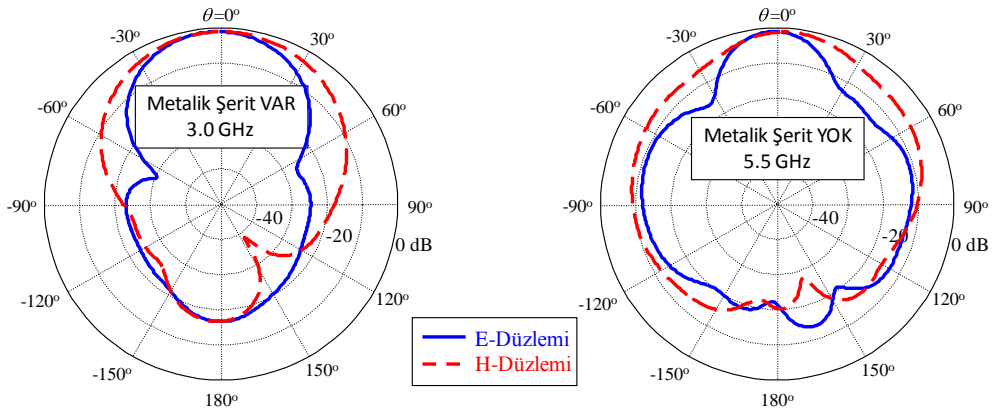


Şekil 4.7: Anahtarlama 2×2 MDA dizi konfigürasyonu:  $L_1=23.07$ ,  $L_2=18.2$ ,  $L_3=10.5$ ,  $L_4=9.7$ ,  $L_5=2.5$ ,  $K_1=17$ ,  $K_2=12.4$ ,  $g=3.5$ ,  $h_1=17$ ,  $h_2=0.79$  (mm),  $\epsilon_r=2.2$ .

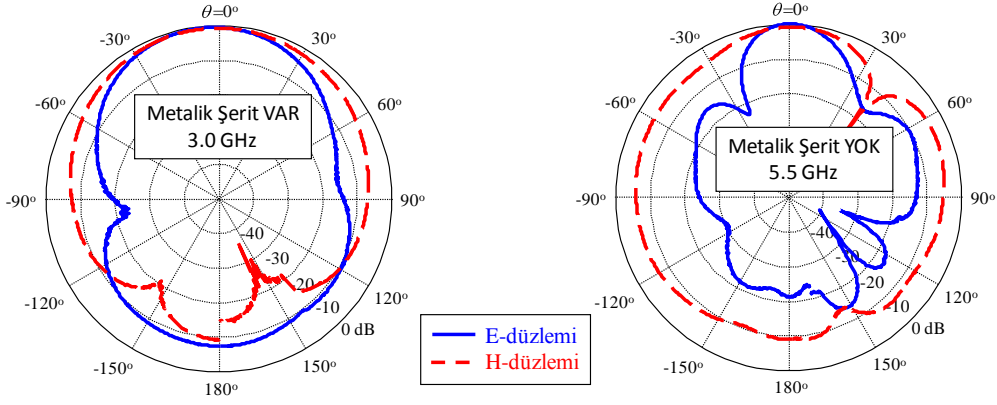
Şekil 4.9’da, 2×2 anahtarlama MDA dizi tasarımının simülasyon ile elde edilmiş 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki broadside ışınma örüntüleri; Şekil 4.10’da ise ölçülen ışınma örüntüleri yer almaktadır. İlgili şekillerden, sonuçlar birbirleri ile özellikle ışınma doğrultusunda uyumlu olsa da, ölçülen yan ve arka huzme seviyelerinin hesaplanandan farklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu tasarımın 3 GHz ve 5.5 GHz frekanslarındaki yönlendirme anten kazancının sırasıyla 8.7 dBi ve 11.4 dBi olduğu ölçülmüştür. Tablo 4.2’de, 2×2 MDA dizi tasarımının rezonans frekanslarındaki karakteristik bilgileri yer almaktadır. Görüldüğü üzere simülasyon aracılığıyla hesaplanan ve ölçülen kazanç değerleri arasında 2.1 dBi’lik fark bulunmaktadır.



Şekil 4.8: Anahtarlama 2×2 MDA dizisinin simülasyon ve ölçüm  $S_{11}$  performansı.



Şekil 4.9: Anahtarlama 2×2 MDA dizisine ait ışıma örüntüleri (simülasyon).



Şekil 4.10: Anahtarlamalı 2×2 MDA dizi tasarımına ait ışınma örüntüleri (ölçüm).

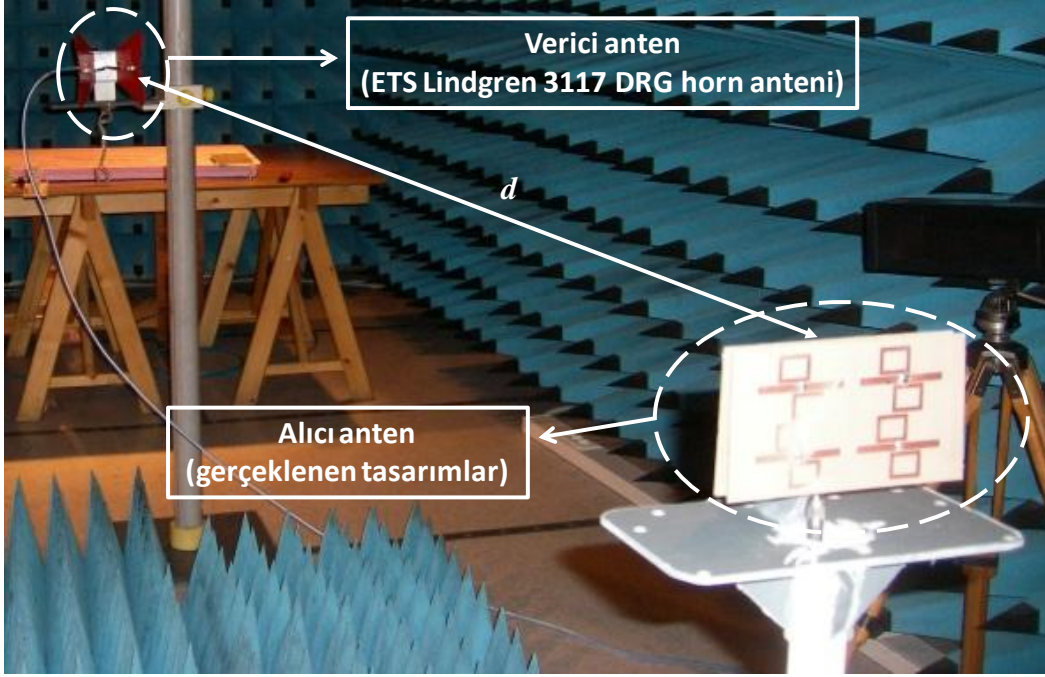
Tablo 4.2: Anahtarlamalı 2×2 MDA dizi tasarımının yönlendirme karakteristiği (simülasyon).

	3 GHz		5.5 GHz	
	$D_o$ (dBi)	HPBW	$D_o$ (dBi)	HPBW
E-Düzlemi	10.8	45°	11.8	29°
H-Düzlemi		60°		47°

Şekil 4.11’de ise ışınma örüntüsü ölçüm düzeneği görülmektedir. İlgili hassas anten ölçümleri, Anten ölçümleri ( $S_{11}$ , ışınma örüntüsü) Gebze TÜBİTAK–UEKAE EMC Tempest Test Merkezindeki yarı yansısız oda içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.4). Ölçümler esnasında Agilent E8362B Network Analizörü kullanılmış ve 2 kapı için tam kalibrasyon (full 2-port calibration) uygulanmıştır. Analizörün birinci kapısına ETS-Lindgren 3117 DRG Horn anten verici olarak bağlanmış, diğer kapısına ise tasarlanan antenler bağlanmıştır ve bu antenler yatayda 360° döndürülerek ışınma örüntüleri elde edilmiştir. Gerçeklenen antenlerin kazanç değerleri hesaplanırken öncelikle (4.1) eşitliği kullanılarak ortamın yol kaybı (PL) bulunmuştur.

$$PL = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (4.1)$$

Verici anten ile alıcı anten, aralarında 300 cm mesafe ( $d$ ) olacak şekilde yerleştirilmiştir. Işınma doğrultusunda ölçülen  $S_{21}$  değeri ile hesaplanan ortam kaybı (PL) arasındaki fark, alıcı ve verici antenlerin kazançlarının toplamından kaynaklanmaktadır. İlgili frekansta verici antenin kazancı bilindiği için (anten katalogundan) gerçekleştirilen antenlerin kazancı bulunabilmektedir.



Şekil 4.11: Işıma örüntüsü ölçüm düzeneği.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, öncelikle frekans-ayarlamalı SRR altyapılı yeni bir mikroşerit yama anten tasarımı geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen analiz ve ölçümler ile MYA tasarımlarında SRR alttaş kullanılarak minyatürleştirmenin sağlanabileceği ve alttaş yapısını anahtarlayarak antenin çalışma frekansının değiştirilebileceği gösterilmiştir. Bu fikrin hayata geçirilebilmesi için SRR panelleri ile bu paneller üzerine yerleştirilen yüzey-uyumlu anahtar elemanlarının (PIN-diyot, MEMS, vb.) aynı üretim sürecinde yer alacağı uygun teknolojinin kullanılması ve optimum DC besleme hattının tasarlanması gerekmektedir.

Tez çalışmanın ikinci aşamasında, 3 GHz ve 5.5 GHz bantlarında performans gösteren geniş-bantlı balun/besleme yapısına sahip çift-bant MDA tasarımları gerçekleştirilmiştir.  $2^n \times 2^n$  dizi tasarımları için geliştirilmiş ortak besleme hattı bu çalışmanın önemli bir katkısıdır. Gerçeklenen  $2 \times 2$  ve  $4 \times 4$ 'lük dizi tasarımları her bir frekans bandında en az %16 bant genişliğine sahip olup optimum ışınım performansı sergilemektedirler. Ayrıca tez çalışması kapsamında, çift-polarizasyonlu/çift-bant MDA tasarımının öncü çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın tez sonrası devam ettirilerek ortak beslemeli optimum tasarımın geliştirilmesi planlanmaktadır.

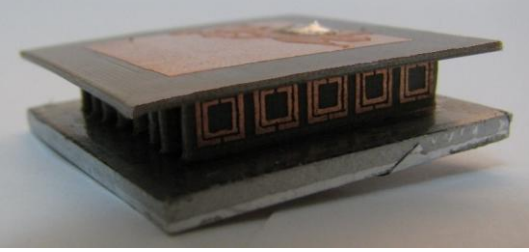
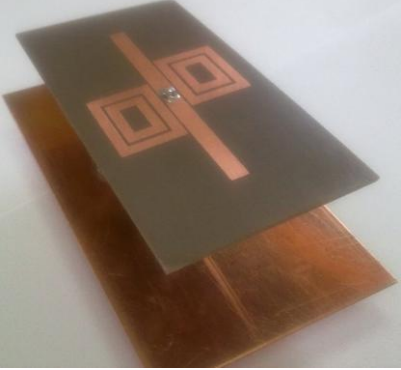
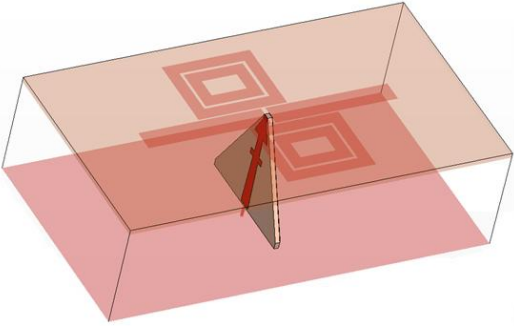

Tez çalışmasının son aşamasında ise, 3 GHz veya 5.5 GHz bantlarında performans gösteren anahtarlamalı tek-bant MDA yapısı incelenmiştir. İlgili tasarımın analiz çalışmalarında, halkalar ile yüklemeler arasına yerleştirilen metalik şeritler sayesinde antenin çalışma frekansının ayarlanabileceği gösterilmiştir. Pratikte ise bu metalik şeritler yerine PIN-diyotların kullanılabileceği ve antenin çalışma frekansının dinamik bir şekilde kontrol edilebileceği ölçümlerle gösterilmiştir. Ayrıca, metalik-şerit yüklemeli  $2 \times 2$  anahtarlamalı MDA dizi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen anahtarlamalı tasarımların uygulamada daha iyi başarı gösterebilmesi için anten yapısıyla uyumlu, olabildiğince az parazitik etkileşime sahip mikroşerit DC besleme konfigürasyonunun geliştirilmesi yakın gelecekte planlanan çalışmalar arasında yer almaktadır.



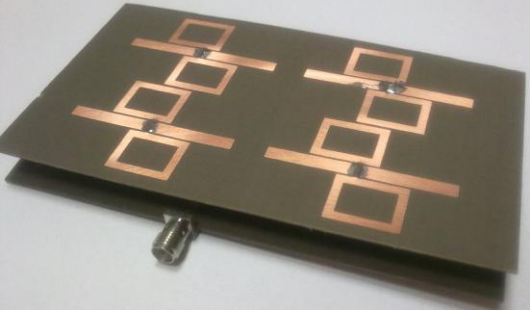
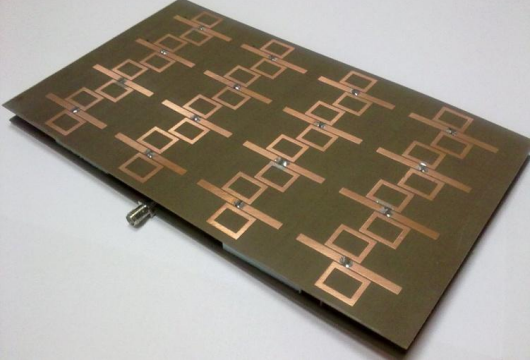
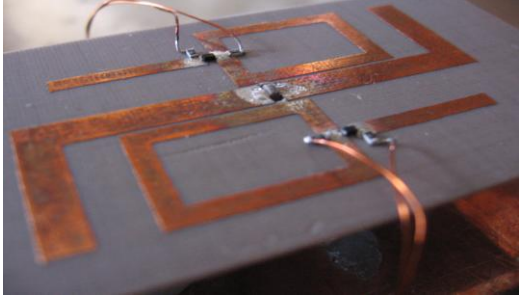
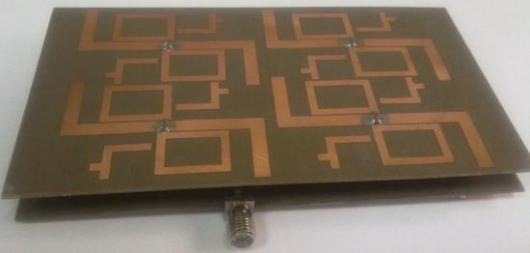
CST Microwave Studio simülatörü kullanılarak gerçekleştirilen sayısal tasarım sonuçları ile fabrikasyonu gerçekleştirilen prototip tasarımların ölçüm sonuçlarının (malzeme ve fabrikasyon toleransları göz önüne alındığında) oldukça uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. Bu da çalışmanın başarısı olarak değerlendirilebilir. Tez çalışmasında sunulan anten tasarımları Tablo 5.1’de kısaca özetlenmektedir.

Bu tez çalışmasının ürünü olarak, 1 hakemli SCI dergi makalesi Sondaş ve diğ. (2011), 4 uluslararası konferans bildirisi Sondaş ve diğ. (2008, 2009, 2010a, 2010c) ve 3 ulusal konferans bildirisi Sondaş ve diğ. (2008b, 2010b), Uçar ve diğ. (2010) yayınlanmış, böylece önerilen tasarımlar literatürde yerini almıştır. Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında, 1 adet TÜBİTAK (No:107E198) ve 1 adette KOU–BAP (No:2010/35) projesi başarılı şekilde sonuçlandırılmıştır.

Tablo 5.1: Tezde önerilen anten tasarımları ve özellikleri

Tasarım	Performans
 <p data-bbox="443 667 590 696">MYA/SRR</p>	<p data-bbox="837 416 1316 450">Anahtarlanabilir tek-bant performans (4.35, 4.60, 4.75, 4.85 GHz)</p> <p data-bbox="954 521 1200 555">Bant genişliği: % 7</p> <p data-bbox="979 577 1174 611">Kazanç: ~8 dB</p> <p data-bbox="884 633 1270 667">Broadside ışınma karakteristiği</p>
 <p data-bbox="459 1126 574 1155">MDA-I</p>	<p data-bbox="847 842 1310 875">Çift-bant performans (3.0/5.5 GHz)</p> <p data-bbox="903 898 1254 931">Bant genişliği: % 19 – % 15</p> <p data-bbox="967 954 1190 987">Kazanç: ~7.4 dB</p> <p data-bbox="884 1010 1270 1043">Broadside ışınma karakteristiği</p>
 <p data-bbox="459 1563 574 1592">MDA-II</p>	<p data-bbox="847 1290 1310 1323">Çift-bant performans (3.0/5.5 GHz)</p> <p data-bbox="903 1346 1254 1379">Bant genişliği: % 16 – % 17</p> <p data-bbox="967 1402 1190 1435">Kazanç: ~7.5 dB</p> <p data-bbox="884 1458 1270 1491">Broadside ışınma karakteristiği</p>
 <p data-bbox="459 1977 574 2007">MDA-III</p>	<p data-bbox="847 1715 1310 1749">Çift-bant performans (3.0/5.5 GHz)</p> <p data-bbox="951 1771 1206 1805">Bant genişliği: ~%9</p> <p data-bbox="928 1827 1228 1861">Kazanç: 7 dB – 8.3 dB</p> <p data-bbox="884 1883 1270 1917">Broadside ışınma karakteristiği</p>

Tablo 5.1 (Devam): Tezde önerilen anten tasarımları ve özellikleri

Tasarım	Performans
 <p data-bbox="448 689 587 723">2×2 MDA</p>	<p data-bbox="847 432 1305 470">Çift-bant performans (3.0/5.5 GHz)</p> <p data-bbox="900 490 1252 528">Bant genişliği: %25 – %16</p> <p data-bbox="919 548 1233 586">Kazanç: 9.5 dB – 13 dB</p> <p data-bbox="882 607 1270 645">Broadside ışınım karakteristiği</p>
 <p data-bbox="448 1160 587 1193">4×4 MDA</p>	<p data-bbox="847 869 1305 907">Çift-bant performans (3.0/5.5 GHz)</p> <p data-bbox="900 927 1252 965">Bant genişliği: %24 – %17</p> <p data-bbox="900 985 1252 1023">Kazanç: 15.2 dB – 18.5 dB</p> <p data-bbox="882 1043 1270 1081">Broadside ışınım karakteristiği</p>
 <p data-bbox="384 1563 651 1597">Anahtarlama MDA</p>	<p data-bbox="847 1272 1305 1310">Anahtarlama tek-bant performans</p> <p data-bbox="970 1330 1182 1368">(3.0 – 5.5 GHz)</p> <p data-bbox="900 1388 1252 1426">Bant genişliği: %17 – %15</p> <p data-bbox="919 1447 1233 1485">Kazanç: 6.8 dB – 7.1 dB</p> <p data-bbox="882 1505 1270 1543">Broadside ışınım karakteristiği</p>
 <p data-bbox="352 1921 683 1955">2×2 Anahtarlama MDA</p>	<p data-bbox="847 1659 1305 1697">Anahtarlama tek-bant performans</p> <p data-bbox="970 1718 1182 1756">(3.0 – 5.5 GHz)</p> <p data-bbox="938 1776 1214 1814">Bant genişliği: ~%12</p> <p data-bbox="970 1834 1182 1872">Kazanç: ~11 dB</p> <p data-bbox="882 1892 1270 1930">Broadside ışınım karakteristiği</p>

## KAYNAKLAR

Alici, K. B., Ozbay, E., “Electrically small split ring resonator antennas”, *Journal of Applied Physics*, 101(8), 083104-083104-4, (2007).

Balanis, C. A., “Antenna theory analysis and design”, Third Edition, *John Willey & Sons*, 811-876, (2005).

Başaran, S. C., “Kablosuz haberleşme uygulamaları için yarık-halka mikroşerit anten tasarımı”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 1-18, (2008a).

Başaran, S. C., Erdemli, Y. E., “Dual-band split-ring antenna design for WLAN applications”, *Turk. J. Elec. Engin.*, 16, 79-86, (2008b).

Bayındır, M., Aydın, K., Özbay, E., “Transmission properties of composite metamaterials in free space”, *Applied Physics Lett.*, 81(1), 120–122, (2002).

Çakır, G., “Gezgin iletişim sistemleri için hüzmeye yönlendirmeli mikroşerit dizi anten tasarımı: analitik hesaplama, bilgisayar benzetimleri ve ölçümler”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 1-24, (2004).

Cenk, C., Sondaş, A., Erdemli, Y. E., “Tunable split ring resonator microstrip filter design”, *Mediterranean Microwave Symp.*, Genova, Italy, 19-21 Sep. (2006).

Chen, W.-S., Yu, Y.-H., “Dual-band printed dipole antenna with parasitic element for WiMAX applications”, *Electronics Letters*, 44(23), 1338-1339, (2008).

Deschamps, G. A., “Microstrip microwave antennas”, *Proc. 3rd USAF Symposium on Antennas*, (1953).

Entesari, K., Rebeiz, G.M., “A differential 4-bit 6.5-10 GHz RF MEMS tunable filter”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 53(3), 1103-1110, (2005).

Erdemli, Y. E., Gilbert, R. A., Volakis, J. L., “A reconfigurable slot aperture design over a broad-band substrate/feed structure”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 52, 2860-2870, (2004).

Erdemli, Y. E., Sertel, K., Gilbert, R. A., Wright, D. E., Volakis, J. L., “Frequency-selective surfaces to enhance performance of broad-band reconfigurable arrays”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 50, 1716-1724, (2002).

Erdemli, Y. E., Sondaş, A., “Dual-polarized frequency-tunable composite left handed slab”, *J. Electromagn. Waves and Appl.*, 19(14), 1907-1918, (2005).

- Ermutlu, M., Simovski, C. R., Karkkainen, M. K., Ikonen, P., Tretyakov, S. A., Sochava, A. A., “Miniaturization of patch antennas with new artificial magnetic layers”, *IEEE Int. Workshop on Antenna Tech.*, 87-90, (2005).
- Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A., “Microstrip antenna design handbook”, *Artech House Antennas and Propagation Library*, 1-2, (2001).
- Gil, I., Garcia, J., Bonache, J., Martin, F., Sorolla, M., Marques, R., “Varactor-loaded split ring resonators for tunable notch filters at microwave frequencies”, *Electron. Lett.*, 40(21), 809-811, (2004).
- Gonzalez-Posadas, V., Jimenez-Martin, J. L., Herraiz-Martinez, F. J., Garcia-Munoz, L. E., Segovia-Vargas, D., “Design of dual-frequency SRR-loaded dipole with equivalent circuit approach”, *Electronics Letters*, 45(19), 964-966, (2009).
- Hamid M., Hamid, R., “Equivalent Circuit of Dipole Antenna of Arbitrary Length”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 45 (11), 1997.
- Herraiz-Martinez, F. J., Garcia-Munoz, L. E., Segovia-Vargas, D., Gonzalez-Posadas, V., Segovia-Vargas, D., “Multi-frequency printed dipoles loaded with metamaterial particles”, *14th Conference on Microwave Techniques, 2008. COMITE 2008*, 1–4, (2008).
- Herraiz-Martinez, F. J., Garcia-Munoz, L. E., Segovia-Vargas, D., Gonzalez-Ovejero, D., Craeye, C. “Arrays of dual-band printed dipoles loaded with metamaterial particles”, *3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009, EuCAP 2009.*, 3818–3822, (2009).
- Howell, Q. E., “Microstrip antennas”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 23, 90-93, (1975).
- Karkkainen, M. K., Ermutlu, M., Maslovski, S., Ikonen, P., Tretyakov, S., “Numerical simulations of patch antennas with stacked split-ring resonators as artificial magnetic substrates”, *IEEE Int. Workshop on Antenna Tech.*, 395-398, (2005).
- Kim, J. I., Kim, J. M., Yoon, Y. J., Pyo, C. S., “Wideband printed fat dipole fed by tapered microstrip balun”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Daejeon, South Korea, 3, 32-35, (2003).
- Kim, J., Cho, C.S., Lee, J.W., “CPW bandstop filter using slot-type SRRs”, *Electronics Letters*, 41(24), 1333-1334, (2005).
- Munson, R. L., “Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays”, *IEEE Trans. Antennas Propogat.*, 22(1), 74-78, (1974).
- Nair, S., Ammann, M.J., “Reconfigurable antenna with elevation and azimuth beam switching”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9, 367-370, (2010).

- Park, S.J., Lee, K.Y., Rebeiz, G.M., “Low-loss 5.15-5.70 GHz RF MEMS switchable filter for wireless LAN applications”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 54(11), 3931-3939, (2006).
- Panagamuwa, C.J., Chauraya, A., Vardaxoglou, J.C., “Frequency and beam reconfigurable antenna using photoconducting switches”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54(2), 449-454, (2006).
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robins, D. J., Stewart, W. J., “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 47(11), 2075-2084, (1999).
- Piazza, D., Kirsh, N. J., Forenza, A., Heath, R. W., Dandekar, K. R., “Design and evaluation of a reconfigurable antenna array for MIMO systems”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 56, 869-881, (2008).
- Pozar, D., “Microstrip antennas”, *Proc. IEEE*, 80(1), 79-81, Jan. (1992).
- Qu, X., Zhong, S. S., Zhang, Y. M., Wang, W., “Design of an S/X dual-band dual-polarised microstrip antenna array for SAR applications”, *IET Microwaves, Antennas Propag.*, 1(2), 513-517, (2007).
- Rajo-Iglesias, E., Quevedo-Teruel, O., Kehn, M., “Multiband SRR loaded rectangular waveguide”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(5), 1571-1575, (2009).
- Rebeiz, G. M., Muldavin J. B., “RF-MEMS switches and switch circuits,” *IEEE Microwave Magazine*, 2(4), 59–71, (2001).
- Rmili, H., Floc’h, J. M., Besnier, P., Drissi, M., “A dual-band printed dipole antenna for IMT-2000 and 5-GHz WLAN applications”, *Proceedings of the 9th European Conference on Wireless Technology*, 6-10 Nov. (2006).
- Sainati, R. A., “CAD of microstrip antennas for wireless application”, Artech House, London, 1996.
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., Schultz, S., “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”, *Phys. Rev. Lett.*, 84(18), 4184-4187, (2000).
- Sondaş, A., “Sol-elli metamaterial yapıların sayısal analizi ve tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 1-47, (2006).
- Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., “Dual-band loop-loaded printed dipole array”, *Mediterranean Microwave Symposium*, Güzelyurt, KKTC, (2010a).
- Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., “Halka-yüklemeli mikroşerit dipol anten tasarımları”, *V. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi*, Güzelyurt, KKTC, (2010b).

Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., “Tunable loop-loaded printed dipole antenna design”, *2010 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/CNC/URSI Meeting*, Toronto, Canada, (2010c).

Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., “Loop-loaded printed dipole array design for a dual-band radar application”, *LAPC Proceedings, LAPC 2009*, Loughborough University, UK, (2009).

Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., “SRR-based substrates for microstrip antennas”, *Mediterranean Microwave Symposium (MMS2008)*, Damascus, Syria, (2008a).

Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., "Mikroşerit anten uygulamaları için frekans-ayarlamalı SRR altyapısı ", *IV. URSI-Türkiye'2008 Bilimsel Kongresi*, Antalya, (2008b).

Sondaş, A., Uçar, M. H. B., Erdemli, Y. E., “Tunable SRR-based substrate for a microstrip patch antenna”, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, (kabul edildi, muhtemel yayın yılı 2011)

Uçar, M. H. B., Sondaş, A., Erdemli, Y. E., “Geniş-bantlı mikroşerit balun tasarımı”, *V. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi*, Güzelyurt, KKTC, (2010).

Uçar, M. H. B., Sondaş, A., Erdemli, Y. E., “Switchable split-ring frequency selective surfaces”, *Progress in Electromagnetics Research*, 6, 65-79, (2008).

Underhill, M. J., Harper, M., “Simple circuit model of small tuned loop antenna including observable environmental effects”, *Electronics Letters*, 38 (18), 2002.

Wee, K. T., Xianming, Q., Zhi, N. C., “A planar dualband antenna array”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(3), 833-838, (2011).

Wu, M. F., Meng, F. Y., Wu, Q., Wu, J., Li, L. W., “Miniaturization of a patch antenna with dispersive double negative medium substrates”, *Proc. APMC*, 1(4), (2005).

Xia, T., Yang, S., Nie, Z., “Design of a tapered balun for broadband arrays with closely spaced elements”, *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 8, (2009).

Yang, M., Chen, Y., “A novel U-shaped planar microstrip antenna for dual-frequency mobile telephone communications”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 49(6), 1002-1004, (2001).

Yoon, W.-S., Han, S.-M., Baik, J.-W., Pyo, S., Lee, J., Kim, Y.-S., “Crossed dipole antenna with switchable circular polarisation sense”, *Electronics Letts.*, 45(14), 717-718, (2009).

## KİŞİSEL YAYINLAR VE PROJELER

### A. Uluslararası Hakemli Dergilerde (SCI) Yayımlanan Makaleler

1. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Dual-Band Loop-Loaded Printed Dipole Array with a Corporate Balun/Feed Structure”, *IET Microwave Antennas & Propagation*, (Hakem Değerlendirmesinde).
2. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Switchable Loop-loaded Printed Dipole Antenna with a Balun/Feed Structure”, *Microwave and Optical Technology Letters*, (Hakem Değerlendirmesinde).
3. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Tunable SRR-Based Substrate for a Microstrip Patch Antenna”, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, (kabul edildi, muhtemel yayın yılı 2011).
4. Yunus E. Erdemli, **Adnan Sondaş**, “Dual-polarized frequency-tunable composite left-handed slab”, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 19(14), 1907–1918, (2005).

### B. SCI Kapsamı Dışındaki Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Mustafa H. B. Uçar, **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Switchable Split-Ring Frequency Selective Surfaces”, *Progress in Electromagnetic Research B*, 6, 65–79, (2008).

### C. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Tunable Loop-Loaded Printed Dipole Antenna Design”, *2010 IEEE AP-S International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/CNC/URSI Meeting*, Toronto, Canada, (2010).
2. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Dual-Band Loop-Loaded Printed Dipole Array”, *Mediterranean Microwave Symposium*, Güzelyurt, KKTC, (2010).
3. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Loop-Loaded Printed Dipole Array Design for a Dual-Band Radar Application”, *Loughborough Antennas&Propagation Conference LAPC2009*, Loughborough, UK., (2009).



4. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “SRR-Based Substrates for Microstrip Antennas”, *Mediterranean Microwave Symposium (MMS2008)*, Damascus, Syria, (2008). (*Best Student Paper Award*)
5. Mustafa H. B. Uçar, **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Switchable Split-Ring Frequency Selective Surface”, *IV. International Workshop on Electromagnetic Wave Scattering (EWS2006)*, Gebze, Kocaeli, (2006).
6. Cumhuri Cenk, **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Tunable Split Ring Resonator Microstrip Filter Design”, *Mediterranean Microwave Symposium (MMS2006)*, Genova, Italy, (2006).
7. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Numerical Analysis of a Composite Left-Handed Slab Using the Finite Element Method”, *APS-URSI 2005 Kongresi*, Washington, A.B.D., (2005).

#### **D. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler**

1. **Adnan Sondaş**, Mustafa H.B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Halka-Yüklemeli Mikroşerit Dipol Anten Tasarımı”, *V. URSI-Türkiye'2010 Bilimsel Kongresi*, Güzelyurt, KKTC, (2010).
2. Mustafa H.B. Uçar, **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Geniş-Bantlı Mikroşerit Balun Tasarımı”, *V. URSI-Türkiye'2010 Bilimsel Kongresi*, Güzelyurt, KKTC, (2010).
3. Mustafa H.B. Uçar, **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Çevrimiçi RF Veri Toplama Sistemi için UHF-RFID Okuyucu Anten Tasarımı”, *V. URSI-Türkiye'2010 Bilimsel Kongresi*, Güzelyurt, KKTC, (2010).
4. Emir K. Ulusoy, **Adnan Sondaş**, Mustafa H.B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Bant-Durduran Yarık-Halka Filtre Tasarımları”, *IV. URSI-Türkiye'2008 Bilimsel Kongresi*, Antalya, (2008).
5. **Adnan Sondaş**, Mustafa H.B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Mikroşerit Anten Uygulamaları için Frekans-Ayarlamalı SRR-Alttaş Yapısı”, *IV. URSI-Türkiye'2008 Bilimsel Kongresi*, Antalya, (2008).
6. **Adnan Sondaş**, Cumhuri Cenk, Yunus E. Erdemli, “Frekans-Ayarlamalı Bant-Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı”, *UMES'2007 Sempozyumu*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, (2007).
7. **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Sol-Elli Metamateryal Tabakanın Eşdeğer Devre Modeli”, *III. URSI-Türkiye'2006 Bilimsel Kongresi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, (2006).
8. Cumhuri Cenk, **Adnan Sondaş**, Yunus E. Erdemli, “Anahtarlanabilir Yarık-Halkalı Bant-Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı”, *III. URSI-Türkiye'2006 Bilimsel Kongresi*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, (2006).

9. **Adnan Sondaş**, Mustafa H. B. Uçar, Yunus E. Erdemli, “Bileşik Metamateryal Yapıların Sonlu Eleman Metoduyla Sayısal Analizi”, *URSI-Türkiye 2004 İkinci Ulusal Kongresi*, Ankara, (2004).

#### **E. Görev Aldığı Projeler**

1. Yardımcı Araştırmacı, *Metamateryal Altyapılı Mikroşerit Anten Dizilerinin Analiz ve Tasarımı*, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, KOU-2010/35, (Tamamlandı).
2. Bursiyer, *Elektronik Anahtarlama Çok Fonksiyonlu Anten Paneli (EAÇAP) Tasarımı ve Üretimi*, TÜBİTAK, EEEAG-107E198, (Tamamlandı).
3. Yardımcı Araştırmacı, *Sol-Elli Metamateryal Yapıların Analizi, Tasarımı ve Gerçeklenmesi*, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, KOU-2005/15, (Tamamlandı).

## ÖZGEÇMİŞ

Adnan SONDAŞ, 15.08.1978 yılında Tokat'ta doğdu. 1997 yılında lise öğrenimini Tokat Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Elektronik Öğretmenliği programını kazandı ve 2001 yılında bu programdan başarıyla mezun oldu. 2003–2006 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2003 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta olup, evli ve bir çocuk babasıdır.