

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN YÜZEY UYUMLU
ELEKTRONİK TARAMALI RADAR ANTEN TASARIMI**

Okan EVREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aviyonik Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Ağustos, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN YÜZEY UYUMLU
ELEKTRONİK TARAMALI RADAR ANTEN TASARIMI

Okan EVREN tarafından hazırlanan tez çalışması 22.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı, Aviyonik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ufuk SAKARYA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Sena Esen BAYER KESKİN, Üye
Kırklareli Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “İnsansız Hava Araçları İçin Yüzey Uyumlu Elektronik Taramalı Radar Anten Tasarımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Okan EVREN



Aileme
ve
eşime

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi tamamlamanın heyecanı ve gururunu yaşarken; yüksek lisans eğitimimi almam konusunda teşviki ve süreç boyunca sağladığı destekten ötürü bu hayattaki en büyük destekçim eşime, her zaman ve her konuda beni destekleyen, önemli kararlar arifesinde ve sonrasında varlıklarını hep arkamda hissettiğim aileme çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü desteğini, emeğini ve zamanını esirgemeyen Sayın hocam Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Okan EVREN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	9
2 ELEKTRONİK TARAMALI RADAR ANTEN DİZİSİ TASARIMI	10
2.1 Birim Anten Tasarımı	10
2.1.1 Mikroşerit İletim Hattı Beslemeli Birim Yama Anten Tasarımı	10
2.1.2 Koaksiyel Beslemeli Birim Yama Anten Tasarımı	12
2.1.3 Birim Yama Anten Tasarımların Karşılaştırılması	14
2.2 Düzlemsel Dizi Anten Tasarımı	17
2.2.1 4×4 Düzlemsel Dizi ile Hüzme Yönlendirme	18
2.2.2 4×1 Düzlemsel Dizi ile Hüzme Yönlendirme	22
2.3 Düzlemsel Dizi Anten için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı	24
2.3.1 $\theta = 0^\circ$ 'ye Hüzme Yönlendirme için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı	25
2.3.2 $\theta = 15^\circ$ 'ye Hüzme Yönlendirme için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı	28
2.3.3 $\theta = -20^\circ$ 'ye Hüzme Yönlendirme için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı	30
3 İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN YÜZEY UYUMLU ELEKTRONİK TARAMALI DİZİ ANTEN TASARIMI	33
3.1 4×4 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı	33
3.2 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı	38
3.3 Wilkinson Güç Bölücülü 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı	41

3.4 $\theta = 15^\circ$ 'ye Yönlendirilmiş Wilkinson 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı.....	42
3.5 $\theta = -20^\circ$ 'ye Yönlendirilmiş Wilkinson 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi Anten Tasarımı	44
4 DENEYSEL DOĞRULAMA	47
4.1 Ölçüm Düzenegi	47
4.2 Ölçüm Sonuçları	48
5 SONUÇ	54
KAYNAKÇA	55
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	58



SİMGELİSTESİ

β	Beta
Z_{out}	Çıkış Empedansı
ϵ_r	Dielektrik Katsayısı
c	Işık Hızı
Z_0	Karakteristik Empedans
λ	Lambda
Ω	Ohm
φ	Phi Açısı
θ	Theta Açısı

KISALTMA LİSTESİ

ComJam	Communication Jamming
DD	Düzlemsel Dizi
DDA	Düzlem Dizi Anten
EA	Electronic Attack
ESM	Electronic Support Measure
GHz	Giga Hertz
GPS	Global Positioning System
İHA	İnsansız Hava Aracı
IFF	Identification Friend or Foe
Mbps	Mega Bit Per Second
MHz	Mega Hertz
SAR	Sentetik Açıklıklı Radar
SDR	Software Define Radio
VSA	Vektör Sinyal Analizör
YUD	Yüzey Uyumlu Dizi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Mikroşerit anten yapısı [10]	3
Şekil 1.2 6×33 Boyutunda X bant mikroşerit radar anten tasarım örneği [11].....	3
Şekil 1.3 Koaksiyel anten bölümleri [16]	4
Şekil 1.4 Farklı yama anten geometrileri.....	4
Şekil 1.5 X-Bant mikroşerit radar anten örneği [12]	6
Şekil 1.6 Pan-tilt unit anten örneği	6
Şekil 1.7 Faz kaydırıcılı dizi anten tasarım örneği	7
Şekil 1.8 Wilkinson güç bölücü devresi örneği.....	8
Şekil 1.9 Hava aracı prototip anten yerleşim görseli.....	9
Şekil 2.1 Mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten	11
Şekil 2.2 Mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten S_{11} değişimi.....	12
Şekil 2.3 Mikroşerit anten birim elemanı (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm	13
Şekil 2.4 Koaksiyel beslemeli antenin yansıma katsayısının frekans ile değişimi	14
Şekil 2.5 Birim antenin farklı besleme durumunda S_{11} karşılaştırma grafiği	15
Şekil 2.6 Mikroşerit beslemeli antenin 10 GHz'deki üç boyutlu uzak alan kazanç paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi.	15
Şekil 2.7 Koaksiyel beslemeli antenin 10 GHz'deki üç boyutlu uzak alan kazanç paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi.	15
Şekil 2.8 Mikroşerit beslemeli yama antenin 10 GHz'deki iki boyutlu normalize yönlendiricilik paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi.....	16
Şekil 2.9 Koaksiyel beslemeli yama antenin 10 GHz'deki iki boyutlu normalize yönlendiricilik paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi.....	17
Şekil 2.10 Koaksiyel beslemeli 4×4 DDA (a) üstten görünüm; (b) alttan görünüm	19
Şekil 2.11 4×4 Koaksiyel beslemeli DDA'nın S_{11} grafiği.....	20
Şekil 2.12 4×4 Koaksiyel beslemeli DDA'nın uzak alan ışıma paterni	20
Şekil 2.13 4×4 düzlem dizi antenlerin hüzmeye tarama performansı (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi	22
Şekil 2.14 4×1 Düzlem dizi anten şekilleri (a) koaksiyel iletim hatlı dizi anten; (b) mikroşerit iletim hatlı dizi anten.	23
Şekil 2.15 4×1 DDA koaksiyel ve mikroşerit iletim hattı yönlendirme analizi....	24
Şekil 2.16 2×1 Wilkinson güç bölücü tasarımı	25

Şekil 2.17 4×1 Wilkinson güç bölücü tasarımı	26
Şekil 2.18 4×1 Wilkinson güç bölücü faz grafiği	26
Şekil 2.19 4×1 Wilkinson güç bölücülü mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten analiz sonuçları	28
Şekil 2.20 4×1 $\theta = 15^\circ$ faz farkı oluşturulmuş Wilkinson güç bölücülü anten tasarımı	29
Şekil 2.21 $\theta = 15^\circ$ 'ye derece yönlendirilmiş antenin faz farkı gösterimi.....	29
Şekil 2.22 $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş 4×1 Wilkinson güç bölücülü dizi anten tasarımı analiz çıktıları (a) anten şekli; (b) üç boyutlu uzak alan görüntüsü; (c) iki boyutlu yönelim grafiği.....	30
Şekil 2.23 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirme için 4×1 Wilkinson güç bölücü çıkış fazları	31
Şekil 2.24 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş 4×1 Wilkinson güç bölücülü anten tasarımı analiz çıktıları	32
Şekil 3.1 4×4 Yüzey uyumlu dizi (YUD) anten (a) yandan görünüm; (b) perspektif görünüm.....	34
Şekil 3.2 4×4 DD ve YUD anten dizilerinin yansıma katsayısının frekans ile değişimleri	35
Şekil 3.2 4×4 anten dizilerinin 10 GHz'deki üç boyutlu kazanç paterni (a) DD anten; (b) YUD anten	35
Şekil 3.4 DD ve YUD antenlerin hüzme tarama performansı (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi.....	37
Şekil 3.5 DD ve YUD antenlerin $\theta = 45^\circ$ doğrultusunda $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ hüzme tarama performansı.	38
Şekil 3.6 4×1 YUD anten (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm.....	39
Şekil 3.8 4×1 YUD anten radyasyon paterni (a) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi; (d) iki boyutlu yönelim grafiği.....	40
Şekil 3.9 4×1 Wilkinson güç bölücülü YUD anten (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm.....	41
Şekil 3.10 4×1 Wilkinson güç bölücülü YUD anten tasarım çıktıları (a) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi; (d) iki boyutlu yönelim grafiği.....	42
Şekil 3.11 $\theta = 15^\circ$ 'ye 4×1 hüzme yönlendirme için tasarlanan YUD anten (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm.	43
Şekil 3.12 $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş Wilkinson güç bölücülü 4×1 YUD anten analiz çıktıları (a) iki boyutlu yönelim grafiği; (b) üç boyutlu uzak alan ışıma paterni.	44
Şekil 3.13 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş Wilkinson güç bölücülü 4×1 YUD anten (a) üstten görünüm; (b) perspektif görünüm.....	44
Şekil 3.14 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş Wilkinson güç bölücülü 4×1 YUD anten analiz sonuçları (a) iki boyutlu yönelim grafiği; (b) üç boyutlu uzak alan	

görüntüsü; (c) $\theta = 0^\circ$, $\theta = -20^\circ$ ve $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş antenlerin S_{11} grafikleri	45
Şekil 4.1 Üretimi yapılan DDA antenlerin görüntüsü (a) $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten; (b) $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten; (c) $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten	47
Şekil 4.2 Üretimi yapılan YUD antenlerin görüntüsü (a) $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten; (b) $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten; (c) $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten	48
Şekil 4.3 Üretimi yapılan antenlerin ölçüm düzeneği	48
Şekil 4.4 Üretimi yapılan DD antenlerin S_{11} grafiği	49
Şekil 4.5 Üretimi yapılan YUD antenlerin S_{11} grafiği	50
Şekil 4.6 Üretimi yapılan DD antenlerin normalize radyasyon patern grafiği	51
Şekil 4.7 Üretimi yapılan YUD antenlerin normalize radyasyon patern grafiği ...	52
Şekil 4.8 Üretimi yapılan antenlerin kazanç grafiği (a) DD antenlerin kazanç grafiği; (b) YUD antenlerin kazanç grafiği.	53

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Mikroşerit iletim hattı beslemeli yama anten parametreleri 11

Tablo 2.2 Koaksiyel iletim hattı beslemeli anten parametreleri 13



İnsansız Hava Araçları için Yüzey Uyumlu Elektronik Taramalı Radar Anteni Tasarımı

Okan EVREN

Aviyonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aviyonik Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

İnsansız hava araçları dünyada ve ülkemizde savunma sanayii alanında oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu tez kapsamında, insansız hava araçlarında kullanılan elektronik sistemlerden biri olan, radar ekipmanı için tasarlanmış faz dizili anten üzerine çalışılmıştır. İnsansız hava araçlarının temel görevlerinden olan keşif ve gözetleme için farklı yapıda ve frekanslarda çalışan birçok sistem bulunmaktadır. Bu sistem bileşenlerinden biri olan X-bant radar anteni, tez kapsamında 4×4 düzlemsel dizi formunda tasarlanmış olup anten hüzmeye yönlendirmesi için faz ve genlik değerlerinin değişimi yöntemi kullanılmıştır. Önerilen anten dizisi, faz ve genlik değerleri kontrol edilerek yaklaşık 500 MHz bant genişliği ile yanca 360° tarama yapabilmektedir. Kolay üretimi, küçük boyutu ve üretim maliyeti göz önünde bulundurularak dikdörtgensel mikroşerit anten dizide birim eleman olarak kullanılmıştır. 16 elemanlı mikroşerit yama anten dizisi ile farklı doğrultulara düşük yan lob seviyesi ile ışıma yapılabilmektedir. İnsansız hava aracı üzerinde faz dizili radar anteninin yerleştirileceği bölge ile uyumlu yüzeye sahip dizi anten için analiz yapılarak anten performansı ve hüzmeye tarama özellikleri düzlemsel dizi ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yüzey uyumlu dizi ile hedef kriterlerle uyumlu özelliklere sahip bir anten üretilebileceğini, bu düzlemsel antenin

insansız hava araçlarında hali hazırda kullanılan 3-boyutlu antenin yerini alabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda Wilkinson güç bölücü yapısı kullanılarak tasarlanan ve birim anten ile uyumlu olarak üretilen 4×1 dizi anten yapısı analiz ve ölçüm sonuçları detaylı olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Anten, anten dizisi, insansız hava araçları (İHA), radar, yüzey uyumlu anten.



Surface-Compatible Electronic Scanning Radar Antenna Design for Unmanned Aerial Vehicles

Okan EVREN

Department of Avionics Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Unmanned aerial vehicles have a very important place in the defense industry in the world and in our country. In this thesis, a phased array antenna designed for radar equipment, one of the electronic systems used in unmanned aerial vehicles, has been studied. There are many systems operating in different structures and frequencies for reconnaissance and surveillance, which are the basic tasks of unmanned aerial vehicles. The X-band radar antenna, one of the components of this system, is designed in the form of a 4×4 planar array, and the method of changing phase and amplitude values is used for antenna beam steering. The proposed antenna array can perform 360° scanning with a bandwidth of approximately 500 MHz by controlling the phase and amplitude values. Considering its easy production, small size, and production cost, the rectangular microstrip antenna was used as the unit element in the array. The 16-element microstrip patch antenna array can radiate in different directions with low side lobe level. The antenna performance and beam scanning characteristics are compared with the planar array by analyzing the array antenna with a surface compatible with the area where the phased array radar antenna will be placed on the unmanned aerial vehicle. The results obtained have shown that an antenna with features compatible with the target criteria can be produced with the proposed surface compatible array, and this planar antenna can replace the 3-dimensional antenna currently used in unmanned aerial vehicles. In

this context, the analysis and measurement results of the 4×1 array antenna structure designed by using the Wilkinson power divider structure and fabricated in accordance with the unit antenna are analyzed in detail.

Keywords: Antenna, antenna array, unmanned aerial vehicles (UAV), radar, surface compatible antenna.



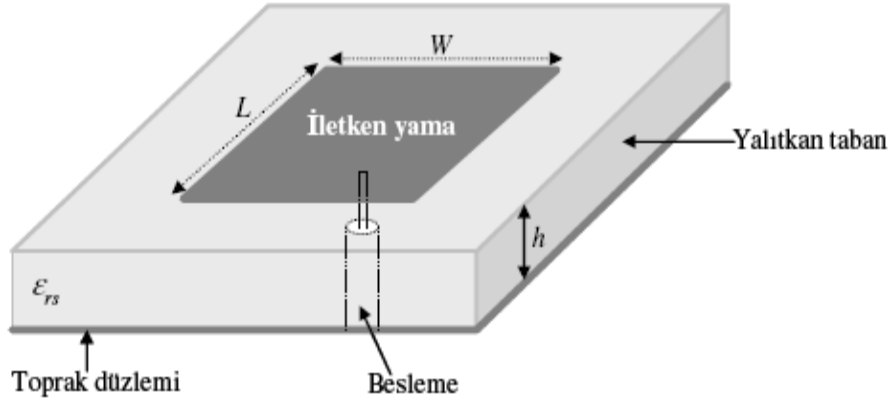
1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler ve ülkelerin silahlı kuvvetlerinde bu teknolojilere olan ihtiyaçları, elektronik harp sistemleri ile savunma sanayii teknolojilerinde hızlı ilerlemeyi mümkün kılmıştır. Son on yılda, harp ortamlarında insansız hava araçları, silahlı kuvvetler için önemli bir kuvvet çarpanı haline gelmiştir [1]. Geçmişte, savaş ortamında tanklar, uzak menzil keskin nişancı silahları, kuvvetli ve yüksek infilak özelliğine sahip patlayıcılar ve bunlar gibi envanterleri bünyesinde bulunduran tarafa yüksek fayda sağlayan, ve savaşın gidişatını etkileyen ekipmanlar kuvvet çarpanı olarak nitelendirilmektedir. Bu kapsamda son yıllarda havacılık sektöründe yaşanan gelişmeler ışığında, insansız hava araçları harekât ortamında, ülkelerin vazgeçilmez unsuru olmuş, savaş ve barış ortamında ciddi görevler yüklenmiştir [2]. İnsansız hava araçları (İHA) üzerinde bulunan haberleşme sistemleri, hava aracının topladığı verileri, görüntüleri anlık olarak kontrol istasyonuna iletmekte ve bu bilgiler uzman ekipler tarafından değerlendirilmektedir. Farklı boyut ve özelliklerde olan insansız hava araçları, günümüzde kolayca ulaşılabilen, drone olarak bilinen mini İHA'lar ile çeşitlilik kazanmıştır [3]. Askerî açıdan değerlendirildiğinde İHA'lar, profesyonel bir işletim ihtiyacı olan, havacılık standartlarına tabii olan bir hava aracı olarak nitelendirilmektedir. İHA'lar farklı yapı ve özelliklerde olmakla birlikte, yaklaşık olarak 17 metre kanat açıklığına, 7 metre gövde uzunluğuna sahip bir uçak olarak düşünülebilir [4]. İHA'lar üzerinde herhangi bir personel taşımadığı için, risk seviyesi yüksek görevlerde daha hızlı karar alabilmeye ve askeri personel kaybının olmadığı bir harekât gerçekleştirmeye imkân tanımaktadır. Bununla birlikte, İHA kontrol merkezinde bulunan operatör-pilot, stres ve baskı gibi karar alma süreçlerinde hataya sevk edebilecek etkenlerden bağımsız şekilde operasyon icra edebilmekte ve bu sayede operasyon başarı oranını arttırmaktadır. Aynı zamanda, otonom görev kabiliyeti sayesinde minimum personel sayısı ile görev icra edebilmektedir [5]. İHA, yapısal özelliklerine bağlı olarak, düşük yakıt tüketimi ile gün mertebesinde havada kalmasına olanak vermektedir. Hava muhalefeti olan bir

harekât ortamında dahi, yüksek irtifa, taşıdığı faydalı yük ekipmanları ile istihbarat, keşif ve gözetleme yaparak, hem savaş ortamında hem de barış ortamında dost ve düşman birliklere fayda sağlamaktadır. Tüm bu faydalı yüklere ek olarak, silah entegrasyonu ile düşman birlikler için önlem alınması gereken bir kuvvet çarpanı haline gelmiştir.

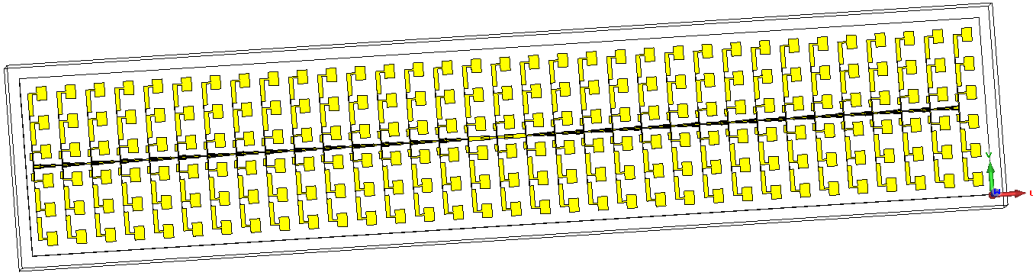
İHA üzerinde bulunan haberleşme sistemleri, hava aracının topladığı verileri, görüntüleri anlık olarak kontrol istasyonuna iletmekte ve değerlendirilmesine imkân tanımaktadır [6]. İHA'nın kontrol istasyonu ile olan haberleşmesi, 250 km görüş hattı menzilinde, yedekli olarak tasarlanan, üzerindeki yönlü ve yönsüz antenler aracılığı ile sağlamaktadır. Ek kabiliyet olarak, Mbps mertebelerinde veri aktarım hızına sahip, uydu anteni sayesinde uydu haberleşmesine imkân tanımaktadır. Bir hava aracı için olmazsa olmaz denilebilecek, GPS, radar ve IFF antenlerinin uçak üzerine entegrasyonu mevcuttur. Haberleşme ve aviyonik antenleri ile birlikte, görev ekipman antenleri olan ESM/EA (Elektronik Destek Tedbirleri, Elektronik Taarruz), ComJam (İletişim Sinyal Karıştırıcı) antenleri de İHA'lar üzerinde mevcuttur [7]. İnsansız hava aracı teknolojileri göz önüne alındığında radar ekipmanları önemli rol oynamaktadır. Bu tez kapsamında incelen antenin muadili niteliğinde olan, sentetik açıklıklı radar sistemi (SAR) anteni ile, İHA'nın yüksek irtifada iken görüş hattının olmadığı, bulutlu bir havada, yüksek coğrafi hassasiyet ve yüksek çözünürlük ile geniş alan gözetleme yapılabilir. Operasyon bölgesinde bulunan potansiyel hedeflerin tespit ve takibi ile hareketli hedef takip imkânı sunarak, düşman birlikleri hakkında istihbarat toplamaya ve arazi topografyasını üretmeye imkân tanımaktadır [8].

Mikroşerit antenler kullanılmaya başladığından itibaren, mobil iletişim, radar sistemleri, sensör antenleri, bluetooth sistemleri gibi birçok farklı alanda aktif olarak kullanılmakta olup bu ihtiyaca paralel olarak gelişim kazanmıştır. Farklı şekil ve besleme yöntemleri, yüksek bant genişliği, yüksek kazanç gibi avantajları da beraberinde getirmiştir [9]. Havacılık, uzay ve askeri teknolojilerde ortaya çıkan ihtiyaçlara karşılık veren mikroşerit antenler, idame edilebilirlik, maliyet ve çeşitlilik gibi özellikleri ile farklı sektör ve alanlarda, geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Mikroşerit anten yapısı [10]

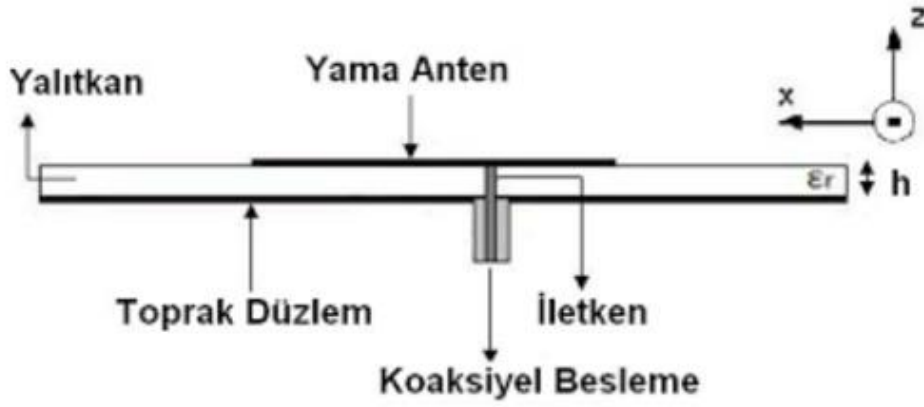
Mikroşerit antenlerin kullanım avantajlarından birisi de dizi (array) formunda yapı uygulaması, diğer anten tiplerine göre daha kolay ve çeşitlilik sağlayacak farklı antenler ortaya çıkarılabilmektedir [11]. Dizi mikroşerit anten yapılarının geniş kullanım alanlarının başında ise radar anten uygulamaları yer almaktadır. Şekil 1.2’de örnek X-bant radar anten örneği yer almaktadır.



Şekil 1.2 6×33 Boyutunda X bant mikroşerit radar anten tasarım örneği [11]

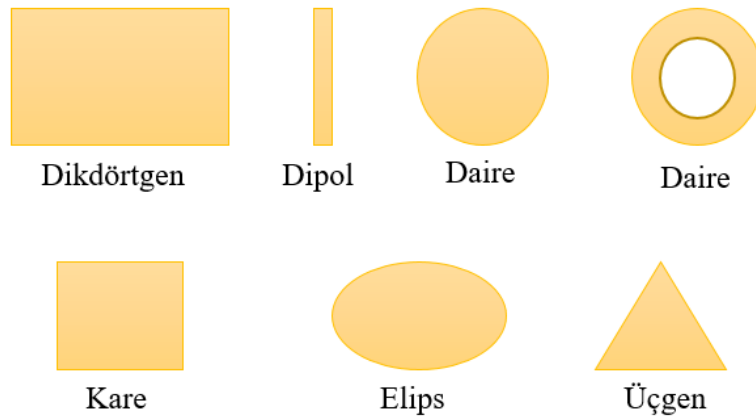
Kullanım alanları oldukça geniş olan mikroşerit antenlerin bir diğer avantajı ise kolay entegre edilebilir olması ve yüzey uyumlu olarak tasarım için uygun bir alt yapı ve tasarım şeklidir [12]. Tez kapsamında, mikroşerit antenlerin yüzey uyumlu olarak tasarlanabilme avantajlarından istifade edilerek, İHA araçlarında kullanım amacına uygun radar anteni tasarlanmıştır. Yama antenleri besleme türü olarak iki temel gruba ayıracak olursak, bunlar mikroşerit besleme ve koaksiyel besleme olacaktır.

Koaksiyel beslemeli antenler, besleme teflon malzemesi ile kaplanmış, yama antenin uygun bir noktasından koaksiyel kablo aracılığı ile yapılan anten besleme yöntemidir [13]. Koaksiyel besleme yöntemi, bant genişliğini arttırılmak amacı ile sıklıkla kullanılmaktadır [14].



Şekil 1.3 Koaksiyel anten bölümleri [16]

Anten performansını arttırmak için sadece bu yöntem yeterli olmamakla birlikte, farklı dielektrik malzeme kullanılarak ve farklı taban kalınlığı kullanılarak performans arttırımı yapılabilmektedir. Farklı yama şekilleri, besleme yöntemleri, besleme konumu, farklı tipte ve kalınlıkta yama şekli vb gibi birçok varyasyon ile anten performansı daha verimli bir hale getirilebilir [15]. Şekil 1.4’te farklı anten geometrileri örnekleri, bahsedilen farklı yama şekillerine örnektir.



Şekil 1.4 Farklı yama anten geometrileri

Yama antenlerin özellikleri göz önüne alındığında, anten tasarımın temel matematiksel eşitlikleri, tasarımda değişken olarak nitelendirilebilecek parametrelere dayanarak, teorik olarak anten performansı hakkında yol gösterebilmektedir. 1.1 numaralı formül tasarım parametrelerinden olan dielektrik malzemenin efektif dielektrik katsayısı değerini ifade etmektedir, ϵ_{reff} = Efektif dielektrik sabiti ϵ_r =dielektrik malzeme sabiti olarak ifade edilmektedir. Bu sabit ile antenin yama kısmının uzunluğu olan L değerinin bulunması 1.2 ve 1.3 numaralı

denklemler ile mümkündür. Benzer şekilde 1.5 numaralı denklem ile antenin yama kısmının genişliği bulunurken, 1.6 ve 1.7 numaralı denklemler anten taban malzemesinin genişlik ve uzunluk değerinin matematiksel olarak karşılığını ifade etmektedir. Bununla beraber 1.8 numaralı denklem anten besleme empedansının hangi değişkenlere bağlı olduğu görülmektedir [17] - [18].

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right] \quad (1.1)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (1.2)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1.3)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (1.4)$$

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_r + 1/2}} \quad (1.5)$$

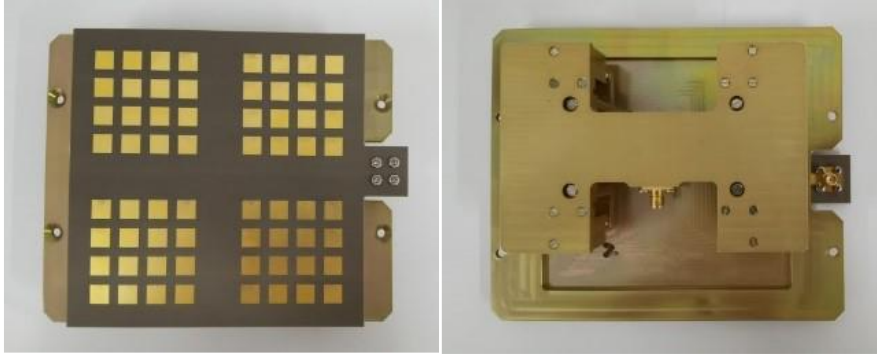
$$L_g = 6h + L \quad (1.6)$$

$$W_g = 6h + W \quad (1.7)$$

Z_0 Karakteristik empedansı $W/h \geq 1$ koşulu sağlandığında 1.8 numaralı eşitlik ile elde edilmektedir.

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left[\left(\frac{W}{h} \right) + 1.393 + \frac{2}{8} \ln \left\{ \left(\frac{W}{h} \right) + 1.499 \right\} \right]} \quad (1.8)$$

Radar antenleri ve sistemleri, savaş ortamlarının çeşitlilik kazanması ile birlikte gelişim göstermeye başlamış olup günümüzde de halen gelişmektedir. Farklı harp doktrinlerinin ortaya çıktığı bu dönemde, savunma sanayii teknolojileri de bu doğrultuda gelişmektedir. Bu kapsamda radar, sinyal işleme, görüntüleme vb. gibi savaş ortamında dost birliklere önemli katkılar sağlayan teknolojiler gelişim göstermektedir. Radar sistemleri, tespit, izleme, elektronik saldırı ve elektronik destek, optik görüntünün ötesinde elektronik görüntü tespiti örnekleri gibi popüler uygulamalara sahiptir [19].



Şekil 1.5 X-Bant mikroşerit radar anten örneği [12]

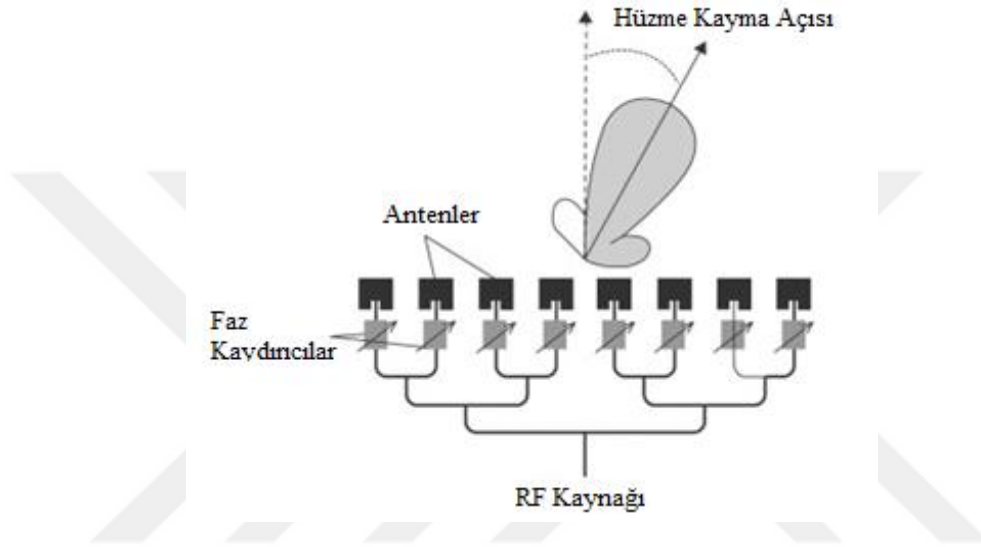
Radar antenleri farklı boyut, frekans ve diğer karakteristik özellikleri ile farklı amaçlar doğrultusunda tasarlanmıştır. Dual bant, hüzme yönlendirme, geniş bant gibi spesifik özellikleri olan anten çeşitleri radar sistemlerinde tercih edilen anten tiplerinden olmuştur. Bu tez amacından olan hüzme yönlendirme, radar sistemleri için kabiliyet arttıran bir özelliktir. Hüzme yönlendirmede farklı teknik ve yöntemler kullanılmaktadır. Hüzme yönlendirme, anten ışıma paterninin istenen açı veya doğrultuya ışıma yapılabilmesidir. Şekil 1.5'te X-bant uygulamaları için tasarlanan bir mikroşerit radar anten verilmiştir. Bir dizi antenin istenen bir açıya ışıma yapabilmesi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Söz konusu yönlendirme mekaniksel ve elektronik yönlendirme olarak iki ana başlıkta incelenebilir. Mekanik olarak yönlendirme, anteni pan tilt unit, gimbal vb sistemler ile istenilen doğrultuya yönlendirmektir. Şekil-1.6'da görüldüğü üzere, mekanik olarak yönlendirmenin beraberinde getirmiş olduğu dezavantaj, yüksek enerji ihtiyacı, boyut tasarrufu yapılamaması ve maliyet gibi faktörler yer almaktadır.



Şekil 1.6 Pan-tilt unit anten örneği

Elektronik olarak hüzme yönlendirmede ise, herhangi bir fiziki yönlenme olmadan antenin, ışıma paterninin, anten besleme faz ve genlik parametrelerine müdahale

edilerek yönlendirilmesidir. Hüzme yönlendirme için temel olarak faz farkının verilmesi gerekmektedir. Faz farkının oluşması için anten tasarımı faz kaydırıcı eklenerek oluşturulabilir. Şekil 1.7’de örnek olarak gösterilmiştir. Tez kapsamında, faz farkının oluşması için $\beta_x = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$ formülü temel alınmaktadır. Buradaki k ifadesi dalga sayısı, d_x , x -ekseninde bulunan anten sayısı, θ , antenin yönlendirilmek istendiği açı, β_x ise her bir antene verilen faz farkının değerini ifade etmektedir.

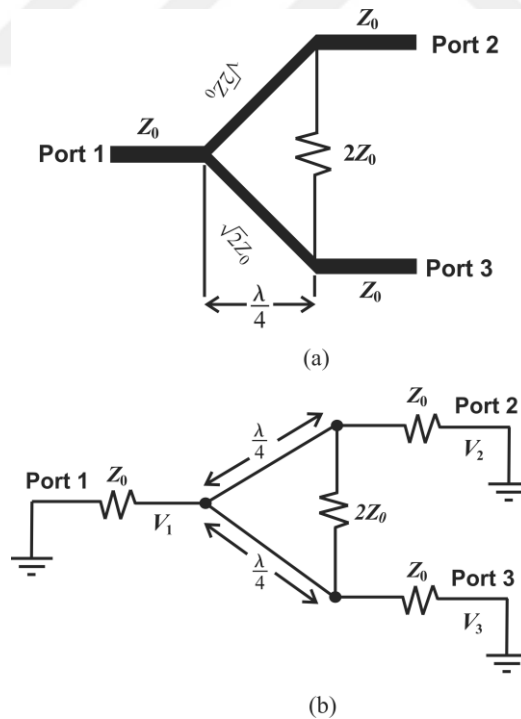


Şekil 1.7 Faz kaydırıcılı dizi anten tasarım örneği

Elektronik hüzme yönlendirmede, anteni oluşturan elemanların sayısı arttıkça dizinin yönlendiriciliği ve kazancı doğru orantılı olarak artar. Ancak kaybın olduğu ortamlarda kazanç belli bir sayıdan sonra en yüksek değere ulaşır ve sonrasında azalmaya başlaması beklenmektedir. Faz kaymalı dizi antenlerin her bir elemanına uygun faz değerlerine sahip besleme verilerek antenin uzayda mekanik kısıtlamalara maruz kalmadan çok yüksek hızlarda tarama yapması sağlanır. Dizide bulunan bütün elemanların özdeş, elemanlar arası uzaklığın eşit (dalga boyunun yarısı kadar) ve her bir dizi elemanına ait besleme değerinin aynı olduğunu varsayımında, dizinin bütün elemanlarına aynı değerde bir faz kayması verildiğinde, ardışık elemanlar arasında göreceli faz farkının sıfır olmasından dolayı antenin ana hüzmesi anten yüzeyine dik olacaktır. Eğer elemanlar arası göreceli bir faz farkı uygulanırsa bu durumda ana hüzme antenin normali ile bir açı yapar. Antenin ana hüzmesi θ_0 kadar kaydırılmış ise faz farkı $\beta = 2\pi(d/\lambda) \sin \theta_0$

olacaktır. Bu durumda, her bir dizi elemanına ait faz değerleri, $\beta + m\beta$ ile ifade edilebilir. Burada $m=0, 1, 2, \dots, (N-1)$ değerlerinden oluşur [20].

Anten dizilerinde, anten besleme yöntemi olarak Wilkison güç bölücü yapısı sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 1.8’de görüldüğü üzere port-1’den giren sinyal, port iki ve üçü besleyen, aynı faz ve genlikteki sinyaldir. Empedans uyumluluğu için $\lambda/4$ dönüştürücü kullanılmaktadır. Karakteristik empedans uyumluluğu için $\lambda/4$ hattı $\sqrt{2}Z_0$ empedansında olmalıdır ve böylece port iki ve üç, Z_0 empedansına uyumlu bir hale gelsin [21]. Wilkinson Güç bölücüleri literatürde oldukça geniş şekilde incelenmiş olup, çok bantlı bölücüler [22] - [23], filtre bölücüler [24], harmonik bastırma bölücüler [25] gibi oldukça çeşitli uygulama alanları mevcuttur. Tez kapsamında, anten dizi elemanlarının faz değerlerinin kontrol edilmesi için Wilkinson güç bölücü kullanılacaktır. Wilkinson güç bölücü devreleri farklı karakteristik empedans değerlerine sahip çeyrek dalga boyu hatlarından oluşur [26]. Wilkinson güç bölücülerinin avantajlarından olan, düşük maliyet ve basit üretim, dizi uygulamalarında tercih edilmesini sağlamıştır. Bir diğer avantajı ise, giriş ve çıkış portları arasında izolasyon sağlayabilmesidir [27].



Şekil 1.8 Wilkinson güç bölücü devresi örneği

1.2 Tezin Amacı

Dizi anten yapıları, günümüzde radar, yazılım tanımlı telsiz ve haberleşme gibi birçok alanda kullanılan önemli anten türleridir. Yapılan tasarım, bir insansız hava aracının ihtiyacı olan senaryolar düşünüldüğünde, bu konseptte bir anten ve tasarım temel alınarak ilerlenmiştir. Tez kapsamında tasarlanan anten, bir hava aracı yüzeyine, aerodinamiğini en az seviyede etkileyecek şekilde, yüzeye uyumlu olacak biçimde oluşturulmuş anten dizisidir. Öncelikle 4×4 faz dizili anten tasarımında, yapısal olarak herhangi bir mekanik yönlendirme olmaksızın, faz ve genlik değişimi ile yönlendirme yapılmıştır. X-bant frekansında çalışan elektronik taramalı radar sistemi özelinde tasarlanmış olan 16 elemanlı mikroşerit yama anten dizisi ile hüzmeye yönlendirme yapılabilmektedir. Mikroşerit yama anten, besleme ve ısıtma yapılan antenin iletken ön yüzü, dielektrik yalıtkan malzeme ve topraklama bölgesi olarak 3 ayrı katmandan oluşmaktadır. Yaklaşık 500 MHz bant genişliği ile yanca 360° tarama yapabilmektedir.



Şekil 1.9 Hava aracı prototip anten yerleşim görseli

Şekil 1.9’da verilen görselde tez kapsamında yapılan çalışmanın, hava aracına uygulanması durumunda temsili gösterimi yapılmıştır. 4×4 faz dizili antenin, detaylı analiz çalışmasının devamında, prototip üretimi yapılan 4×1 mikroşerit anten dizisinin analiz ve ölçüm sonuçları yer alacaktır. Üretimi yapılan antende, analiz çalışması yapılan anten ile birebir aynı malzemeler kullanılmıştır. Ölçüm ve benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

ELEKTRONİK TARAMALI RADAR ANTEN DİZİSİ TASARIMI

2.1 Birim Anten Tasarımı

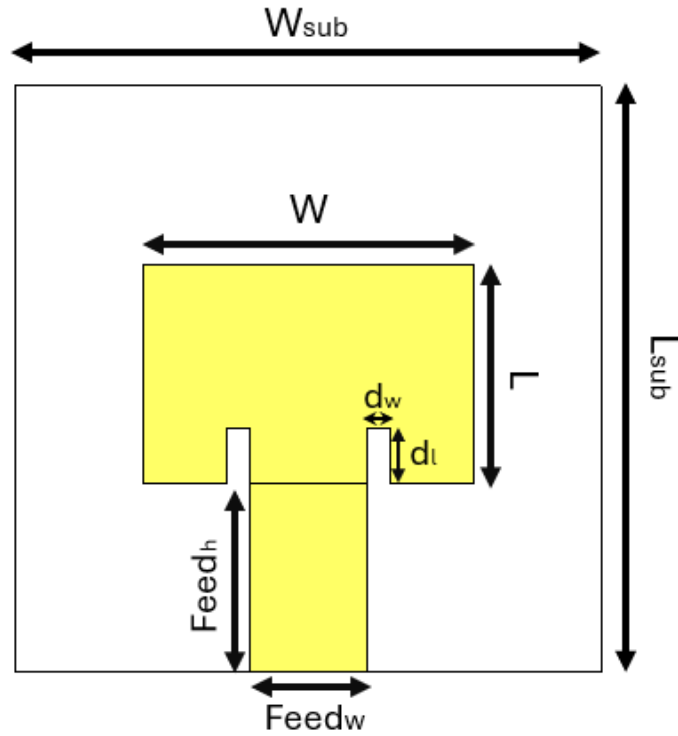
Elektronik harp kapsamında, bir hava aracında kullanılabilecek radar sisteminin temel ekipmanlarından olan antenin tüm parametreleri göz önünde bulundurulmalı, ve optimum değerlerde çalışabilen, verimlilik, maliyet, şekil gibi önemli parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda, birim antenin seçimi yapılırken farklı opsiyonlar üzerinde tasarım ve analiz çalışmaları yapılmış olup devam eden bölümlerde çalışma sonuçlarına yer verilmiştir. Mikroşerit iletim hattı beslemeli ve koaksiyel beslemeli yama anten tasarımları olmak üzere iki farklı birim anten tasarımına yer verilmiştir.

2.1.1 Mikroşerit İletim Hattı Beslemeli Birim Yama Anten Tasarımı

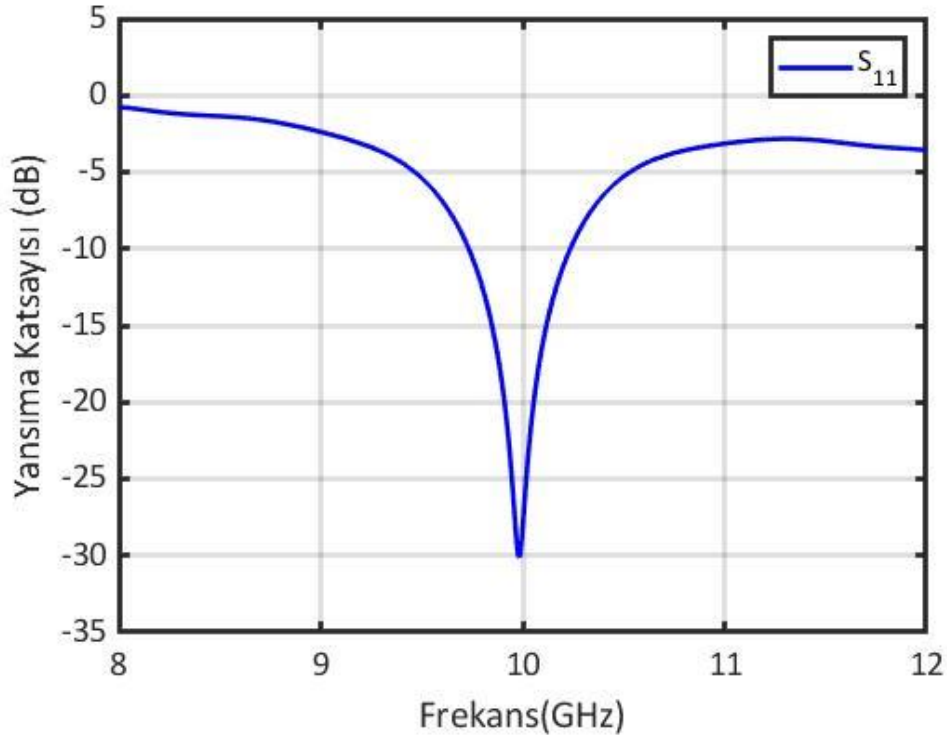
X-bantta çalışan radar anten tasarımı için önce, mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten tasarlanmıştır. Dielektrik malzeme, yama bölümü ve topraklama düzlemi olmak üzere 3 temel bölümden oluşan birim antende, temel bölümlerde kullanılan malzemeler değiştirilmemiştir. Mikroşerit iletim hattı beslemeli antende, dielektrik malzeme olarak kullanılan Rogers RT5880 tipi malzemenin bağli elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon_r = 2.2$, kalınlığı ise $h = 1.57$ mm'dir. Antenin yama bölümü ve toprak bölümü bakır malzemedен olup kalınlığı $Patch_h = 0.035$ mm olarak sabit tutulmuştur. Tablo- 2.1'de tasarım parametreleri detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1 Mikroşerit iletim hattı beslemeli yama anten parametreleri

Parametre	Tanım	Değer(mm)
h	Dielektrik malzeme kalınlığı	1.57
W_{sub}	Dielektrik Malzeme Genişliği	25
L_{sub}	Dielektrik Malzeme Uzunluğu	25
W	Patch Genişliği	14.12
L	Patch uzunluğu	9.4
$Feed_w$	Mikroşerit Hattı Besleme Genişliği	5
$Feed_l$	Mikroşerit Hattı Besleme Uzunluğu	10
d_L	Yama Anten Çentik Uzunluğu	2.4
d_w	Yama Anten Çentik Genişliği	1

**Şekil 2.1** Mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten

Şekil 2.1’de görülen anten parametreleri, 1.2 - 1.5 - 1.6 ve 1.7 numaralı matematiksel ifadeler ile teorik olarak hesaplanmış olup, tam dalga analizi CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio programında yapılmıştır.



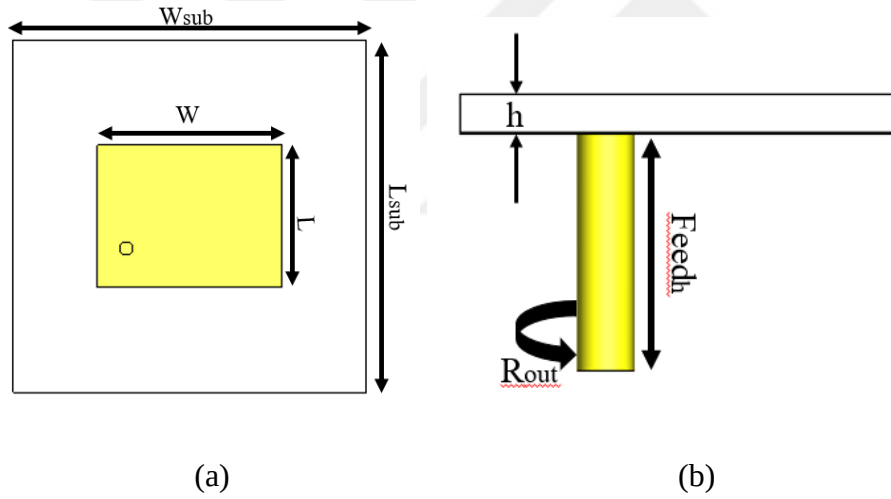
Şekil 2.2 Mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten S_{11} değişimi

2.1.2 Koaksiyel Beslemeli Birim Yama Anten Tasarımı

Birim anten tasarımında, dizi yapısında kullanılacak olan birim antene ait temel parametreler verilmiştir. $W_{sub} = 18.2$ mm ve $L_{sub} = 18.2$ mm boyutunda dielektrik malzeme üzerine tasarlanan koaksiyel beslemeli mikroşerit antende, mikroşerit iletim hattı beslemeli antende olduğu gibi Rogers RT5880 malzeme kullanılmıştır. Dielektrik malzemenin bağıl elektriksel geçirgenlik değeri $\epsilon_r=2.2$, kalınlığı ise $h = 1.57$ mm'dir. Tablo 2.2'de anten tasarımında kullanılan parametreler ve antenin tasarım boyutları detaylı olarak verilmiştir. Tasarlanan antenin X-bantta çalışması hedeflenmektedir.

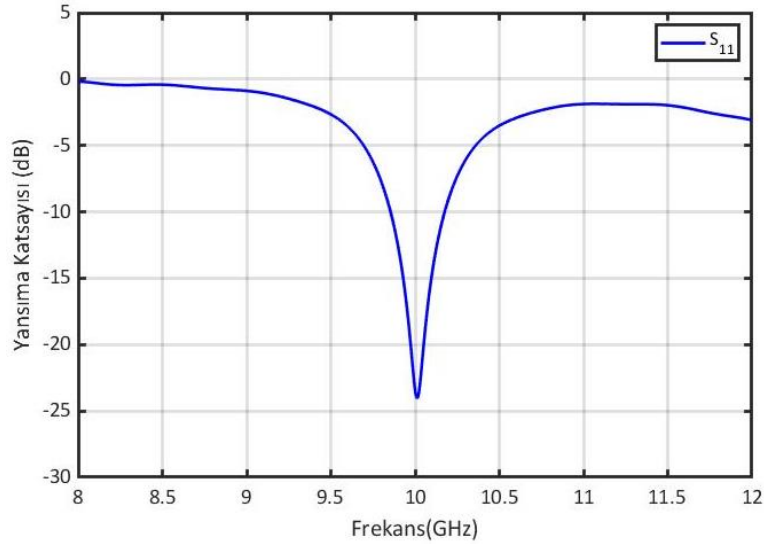
Tablo 2.2 Koaksiyel iletim hattı beslemeli anten parametreleri

Parametre	Tanım	Değer(mm)
h	Dielektrik Malzeme Kalınlığı	1.57
W_{sub}	Dielektrik Malzeme Genişliği	25
L_{sub}	Dielektrik Malzeme Uzunluğu	25
W	Patch Genişliği	14.12
L	Patch Uzunluğu	9.4
$Feed_h$	Mikroşerit Hattı Besleme Uzunluğu	10
R_{out}	Koaksiyel Besleme Dış Yarıçapı	2.35



Şekil 2.3 Mikroşerit anten birim elemanı (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm

X-bantta çalışacak şekilde tasarlanan birim antenin tam dalga analizi CST (Computer Simulation Technology) Microwave Studio programında yapılmıştır.

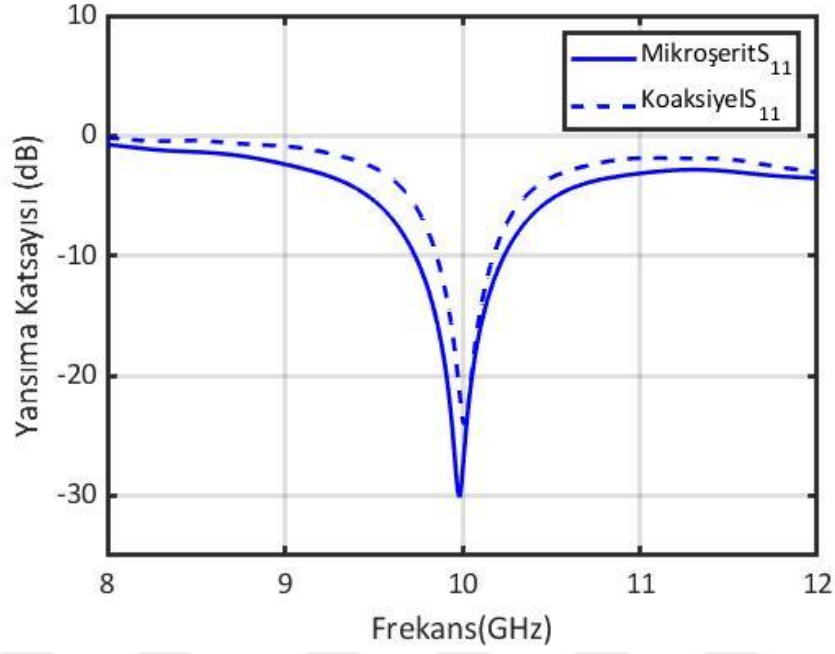


Şekil 2.4 Koaksiyel beslemeli antenin yansıma katsayısının frekans ile değişimi

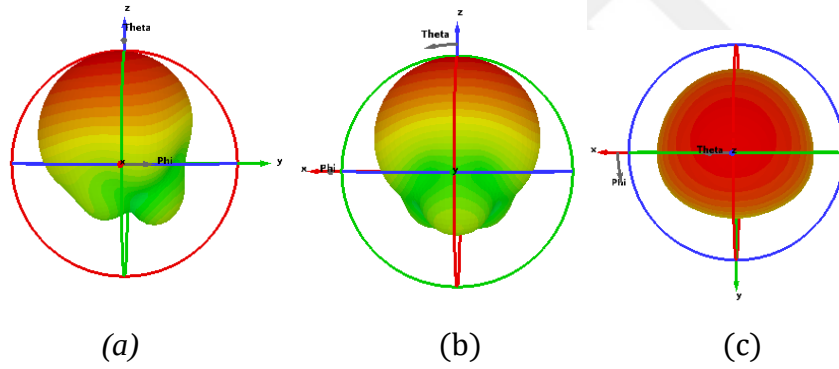
2.1.3 Birim Yama Anten Tasarımların Karşılaştırılması

Birim yama anten tasarımlarının farklı beslemeleri arasındaki analiz sonuçları, yukarıdaki tasarım parametreleri ışığında bu bölümde incelenecektir. Mikroşerit iletim hattı beslemeli ve koaksiyel iletim hattı beslemeli antenlerin analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş olup, her iki anten benzer koşullarda ve aynı frekans aralığında incelenmiştir. Tüm tasarım ve analiz CST Microwave Studio programında yapılmıştır.

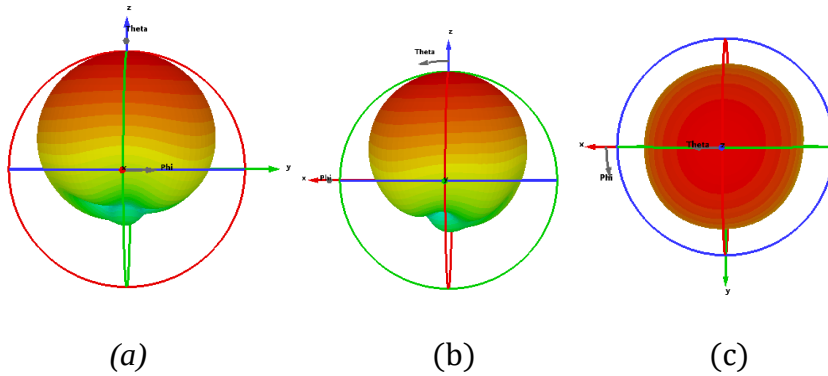
Yansıma katsayısının frekansla değişimini gösteren S_{11} grafiği her iki anten için Şekil 2.5'te verilmiştir. Şekil 2.5'teki S_{11} grafiğine göre dikdörtgen formdaki mikroşerit beslemeli yama anten, X-bandında 9.7 GHz ile 10.25 GHz frekans aralığında 550 Mhz bant genişliği ile çalışmaktadır. Bununla beraber, 10 GHz olan merkez frekansında yansıma katsayısı -30.132 dB değerini almaktadır. Yine aynı şekil üzerinde görülen, koaksiyel beslemeli iletim hattına sahip antene ait S_{11} grafiğine göre yama anten, X-bandında 9.8 GHz ile 10.20 GHz frekans aralığında 400 Mhz bant genişliği ile çalışmaktadır. İki antenin frekans bant genişlikleri göz önünde bulundurulduğunda her iki antenin 10 GHz merkez frekansında çalışıyor oldukları görülmektedir. Bununla beraber, 10 GHz çalışma frekansında yansıma katsayıları arasındaki karşılaştırma dikkate alındığında koaksiyel beslemeli antende -23.068 dB değerinde iken, mikroşerit iletim hatlı antende -30.132 dB olarak görülmektedir



Şekil 2.5 Birim antenin farklı besleme durumunda S_{11} karşılaştırma grafiği



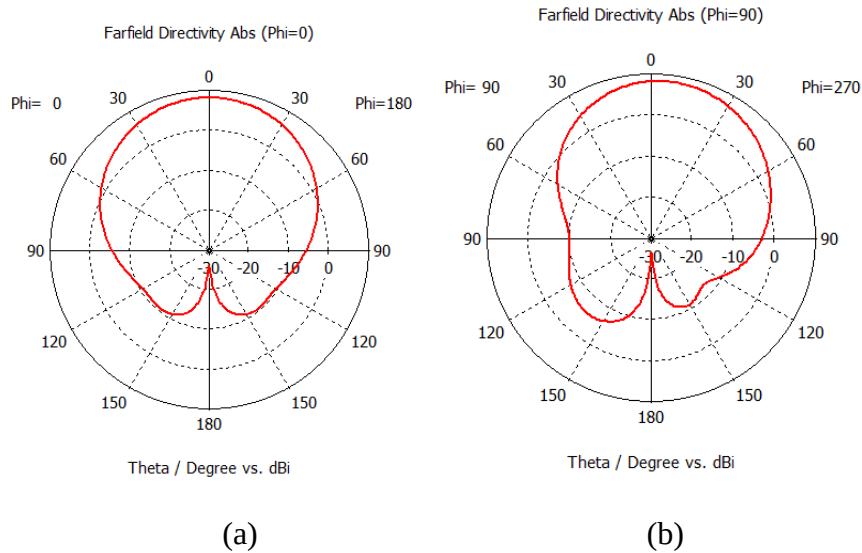
Şekil 2.6 Mikroşerit beslemeli antenin 10 GHz'deki üç boyutlu uzak alan kazanç paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi



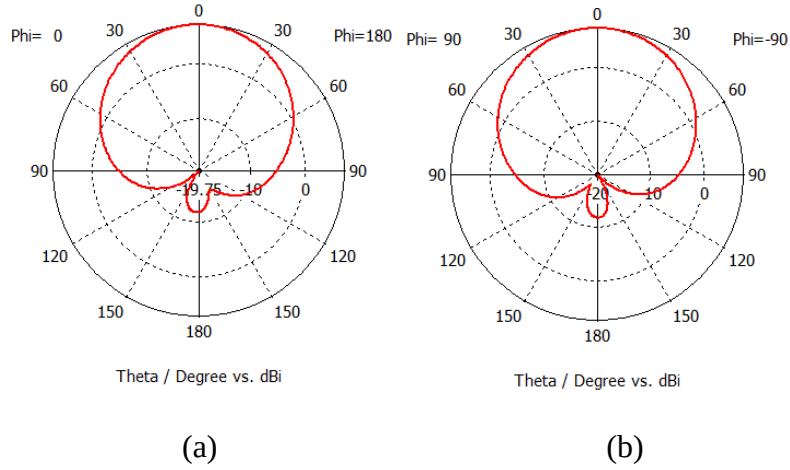
Şekil 2.7 Koaksiyel beslemeli antenin 10 GHz'deki üç boyutlu uzak alan kazanç paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi

Şekil 2.7’de koaksiyel beslemeli birim antenin 10 GHz frekansındaki üç boyutlu ışıma paterni verilmiştir. Işıma paterninin ana hüzmesinin z-ekseni doğrultusunda maksimum ışıma yapacak şekilde dağıldığı gözlemlenmektedir. Uzak alan görüntüsünden anlaşılacağı üzere, yönlü anten olarak ışıma yapan birim antenin maksimum kazanç değeri 7.029 dBi, yan lob seviyesi ise -19.4 dB’dir. Şekil 2.6’da ise mikroşerit iletim hattına sahip birim antenin 10 GHz frekansındaki üç boyutlu kazanç ışıma paterni verilmiştir. Işıma paterninin ana hüzmesinin z-ekseni doğrultusunda maksimum ışıma yaptığı ve yönlü anten olarak ışıma yapan birim antenin maksimum kazanç değeri 7.930 dBi, yan lob seviyesi ise -19.1 dB olarak analiz sonuçlarına yansımıştır.

Şekil 2.8’de ise birim anten olarak kullanılacak olan mikroşerit antenin 10 GHz’deki iki-boyutlu yönlendiricilik paterni verilmiştir. İki boyutlu ışıma paternlerinde yarım güç hüzme genişliğinin $\varphi = 0^\circ$ ve $\varphi = 90^\circ$ düzlemlerinde 76.2° ve 70.1° olduğu görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği 7.38 dBi olup maksimum ışıma doğrultusu $\theta = 0^\circ$ ’dir. Şekil 2.9’da koaksiyel beslemeli birim antenin 10 GHz’deki iki-boyutlu yönlendiricilik paternine göre, yarım güç hüzme genişliğinin $\varphi = 0^\circ$ ve $\varphi = 90^\circ$ düzlemlerinde 82.2° ve 77.4° olduğu görülmektedir. Antenin yönlendiriciliği 7.38 dBi olup maksimum ışıma doğrultusu $\theta = 0^\circ$ ’dir.



Şekil 2.8 Mikroşerit beslemeli yama antenin 10 GHz’deki iki boyutlu normalize yönlendiricilik paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi



Şekil 2.9 Koaksiyel beslemeli yama antenin 10 GHz'deki iki boyutlu normalize yönlendiricilik paterni (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi

2.2 Düzlemsel Dizi Anten Tasarımı

Dizi antenler, birim anten özellikleri değiştirilmeden ışıma yoğunluklarının bir araya getirilmesidir. Çoklu yapıdan oluşan bu yeni yapı, anten dizisi olarak nitelendirilmektedir. Birçok alanda kullanılan dizi antenlerde, genellikle her bir anten elemanı eş yapıdadır. Dizi antenler, radyo ve televizyon yayınında, radyo-dalga iletişim sistemlerinde, cep telefonlarında, radar sistemlerinde, çarpışma önleyici otomobil sensörleri gibi geniş yelpazede, farklı boyut ve şekillerde kullanılmaktadır. Yama antenlerin yapı itibarı ile dizi anten tasarımına elverişli olduğu bilinmektedir.

Koaksiyel ve mikroşerit iletim hattına sahip anten tasarımları dizi anten tasarımı için uygun yapılar olup, dizi antene evrilme noktasında farklılıklara sahiptirler. Şöyle ki; koaksiyel beslemeli birim antenler, boyutu fark etmeksizin her bir birim elemanı farklı ve bağımsız besleme portlarından beslenebileceği için daha özgür bir yapıya sahip olacaktır. Ancak mikroşerit iletim hattına sahip anten tasarımlarında $N \times 1$ formatında olan tek bir eksen üzerine dizilen antenlerde bağımsız portlardan beslemek mümkün iken, $N \times M$ formatında olan, ($N \neq 1$ ve $M \neq 1$) en az iki eksen üzerine dizilen dizi anten tasarımında tek bir porttan beslemek zorunluluk haline gelmektedir. Söz konusu durumlarda ise anten tasarımında wilkinson güç bölücü devresi kullanılarak, anten beslemelerinin uygun şekilde yapılması mümkündür.

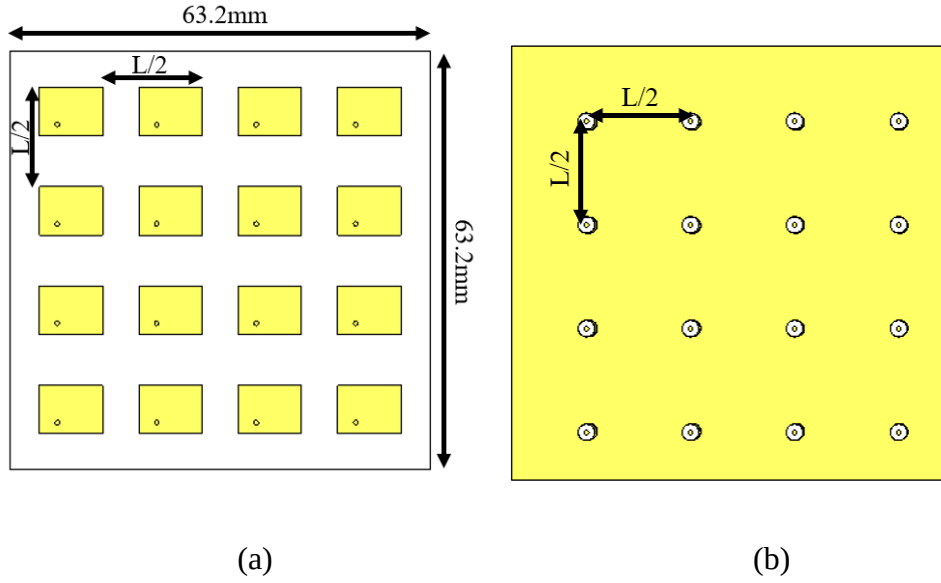
Tez kapsamında öncelikle koaksiyel beslemeli ve mikroşerit beslemeli iletim hattına sahip dizi anten tasarımları yapılmış olup, tasarlanan bu dizi anten yapıları

ile elektronik hüzme yönlendirme teknikleri kullanılarak, anten hüzme yönlendirmelerinin analiz sonuçları detaylı olarak incelenmiştir.

2.2.1 4×4 Düzlemsel Dizi ile Hüzme Yönlendirme

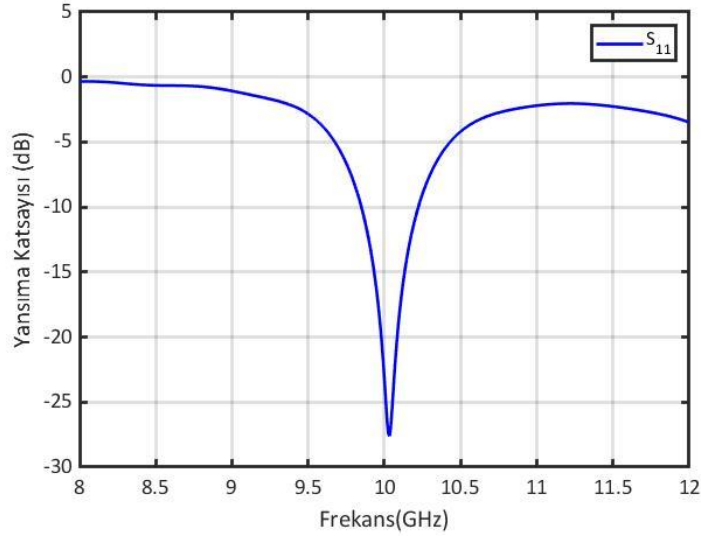
Dizi anten yapısı, herhangi bir anten yapısının hedeflen uygulama için, uygun yönlendiricilik ve polarizasyon özelliklerin sahip olacak şekilde tasarlanmasıdır. Bu kapsamda da anten dizisinin paternini etkileyebilecek değişkenler göz ardı edilmemelidir. Anten dizisinin istenilen uygulama özelliğine uygun hale gelebilmesi için gerekli değişkenler, birim antenlerin besleme genliği ve besleme fazı, antenler arası mesafe, her bir antenin bağlı paterni ve anten dizisinin geometrik şeklidir (dairese, düzlemsel vb) [28].

Koaksiyel iletim hattına sahip birim yama anten kullanılarak 4×4 formunda dizi anten tasarımı yapılmıştır. Dizideki antenler, besleme noktaları arası uzaklık $\lambda / 2$ olacak şekilde yerleştirilmiştir. λ değeri, $\lambda_o = c/f$ formülünden faydalanılarak bulunmuştur. Yama antenler, 50Ω empedans değeri ile uyumlu koaksiyel kablo kullanılarak beslenmiştir. Koaksiyel kabloların girişine port eklenerek analiz yapılmıştır. Eklenen portların genlik ve faz açısı değerleri parametrik olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yöntem ile dizi hüzmesinin istenilen doğrultuya hızlı ve efektif bir şekilde yönlendirilmesi sağlanmıştır. Hüzme yönlendirmesi için MATLAB programı kullanılarak faz hesabı kodları hazırlanmıştır. Hazırlanan kodda, koordinat sisteminde hedeflenen θ ve φ açıları ve eksenler üzerindeki anten sayıları girdi olarak verildiğinde anten elemanlarının besleme faz ve genlikleri otomatik olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.10'da koaksiyel beslemeli mikroşerit antenler kullanılarak oluşturulan 4×4 düzlemsel dizi antenin (DDA) üstten ve alttan görünümü verilmiştir. Bu şekilde koaksiyel iletim hatlarının merkezleri arasındaki mesafe, yatay ekseninde 15 mm, dikey ekseninde de 15 mm olup, anten dizisinin toplam boyutu 63.2mm×63.2 mm'dir.

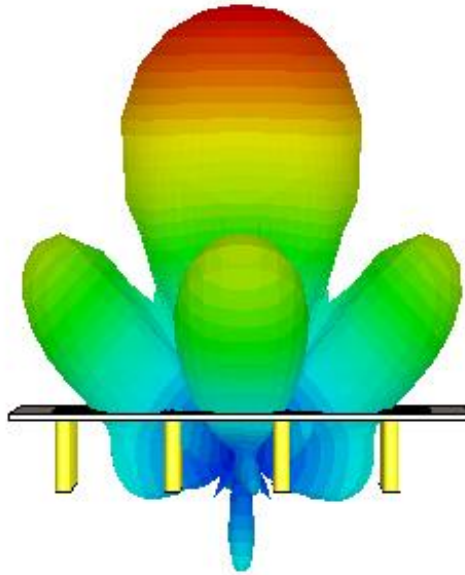


Şekil 2.10 Koaksiyel beslemeli 4×4 DDA (a) üstten görünüm; (b) alttan görünüm

4×4 formdaki dizi antene ait S_{11} grafiği Şekil 2.11’de verilmiştir. X-bant hedeflenerek tasarlanan antenin merkez frekansının 10 GHz olduğu ve bant genişliğinin 9.8 GHz ile 10.25 GHz arasında yaklaşık olarak 450 MHz olduğu görülmektedir. Merkez frekansta görülen yansıma katsayısı değerinin ise -27.3 dB olduğu analiz sonuçlarında gözlemlenmiştir. İstenilen frekans aralığında ışıyan dizi antenin herhangi bir yönlendirme uygulaması yapılmadan analiz yapıldığında Şekil 2.12’de ki gibi uzak alan ışıma görüntüsüne sahip olduğu görülmektedir. Düzlem dizi antenin 3 boyutlu uzak alan ışıma paterni, ana hüzmelerin $\theta = 0^\circ$ ’ye yönlendiğini ve kazanç değerinin 17 dBi olduğunu göstermektedir. Yan lob seviyesi ise hüzmelerin $\theta = 0^\circ$ ’ye yönlendiği durumunda -13.9 dB olarak elde edilmiştir. 3 dB hüzmeye genişliğinin 25° civarında olduğu görülmüştür.



Şekil 2.11 4×4 Koaksiyel beslemeli DDA'nın S_{11} grafiği

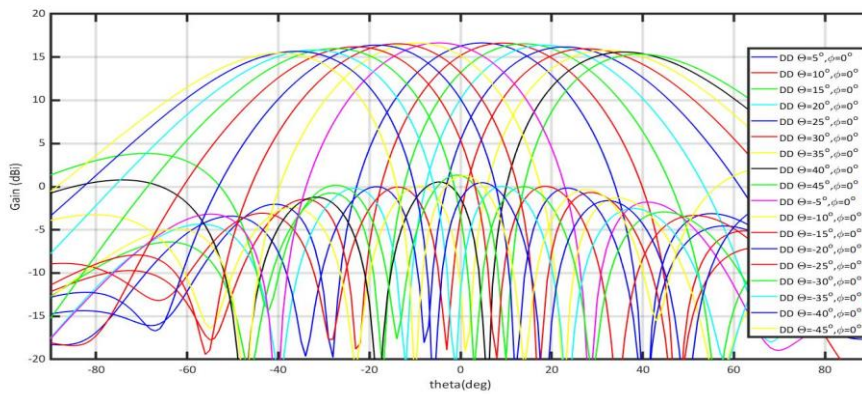


Şekil 2.12 4×4 Koaksiyel beslemeli DDA'nın uzak alan ışıma paterni

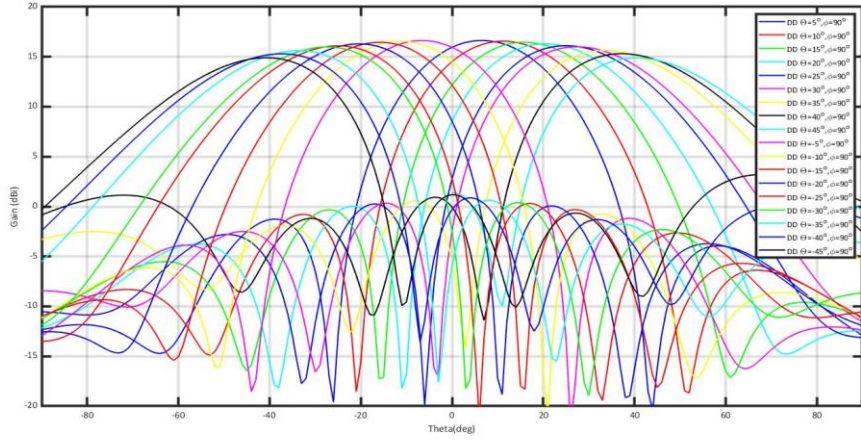
4×4 düzlemsel dizi anten yapısında hüzme yönlendirme için faz kaydırma tekniği kullanılmıştır. Faz değerleri hesaplanırken, x -ekseni üzerinde bulunan antenler için $\beta_x = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$ formülü ile hesaplama yapılırken, y -ekseni üzerine dizili antenler için, $\beta_y = -k \cdot d_y \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi$ formülü ile hesaplama yapılmıştır. MATLAB programı aracılığıyla, sadece yönlendirilmek istenilen açı değerleri girilerek, dizinin beslemesi için gerekli faz değerleri hızlı bir şekilde hesaplanmıştır. Genlik değerlerinde ise yan lob seviyesini minimum seviyede

tutmak amacı ile binom açılımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem göz önüne alınarak, anten dizisinin köşe noktalarında yer alan anten genlik değerleri 0.5, kenar orta noktalarda bulunan antenlerin genlik değerleri 0.75, iç orta noktada bulunan 4 adet anten ise 1.0 genlik değerine sahip olacak şekilde analiz edilmiştir.

Şekil 2.13'te DD antenin hüzme taraması yaparak ana hüzmelerinin $\varphi = 0^\circ$ düzleminde 5° açısal aralıklarla yönlendirildiği bir grafik verilmiştir. $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmelenin yönlendirildiği durumda $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirildiği durumuna göre kazançta 1.3 dBi düşüş görülmektedir. Genel olarak 15 dBi üzerinde kazanç değerine sahip yönlendirilen paternler istenilen açıya ışıma yapabilmektedir. Şekil 2.13 (b)'de DD antenin $\varphi = 90^\circ$ düzleminde, $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ açısal aralığında hüzme taraması yaparak ana hüzmelerinin 5° açısal aralıklarla yönlendirilmesi için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. $\varphi = 90^\circ$ düzleminde de $\varphi = 0^\circ$ düzleminde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmelenin yönlendirildiği durumda $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirildiği durumuna göre kazançta 1.7 dBi düşüş görülmektedir. Operasyonel konseptte, bu grafiklerdeki θ açısı hava aracından yeryüzü yönündeki ışımayı (elevasyon açısı), φ açısı ise yanal açıyı (azimuth açısını) temsil etmektedir. Şekil 2.13'te verilen grafiklerde antenlerin yan lob seviyelerinin açığa bağlı değişimleri incelendiğinde ise $\varphi = 0^\circ$ düzleminde DD anteni, $\theta = 5^\circ$ 'ye hüzmelenin yönlendiği durumda yan lob seviyesi -18.7 dB iken $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmelenin yönlendiği durumda -7.6 dB olduğu görülmüştür. $\varphi = 90^\circ$ düzlemindeki yan lob seviyelerine bakıldığında ise, $\theta = 5^\circ$ iken DD anten yan lob seviyesi -17.9 dB, $\theta = 45^\circ$ ise anten -8.6 dB yan lob seviyesine sahip olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

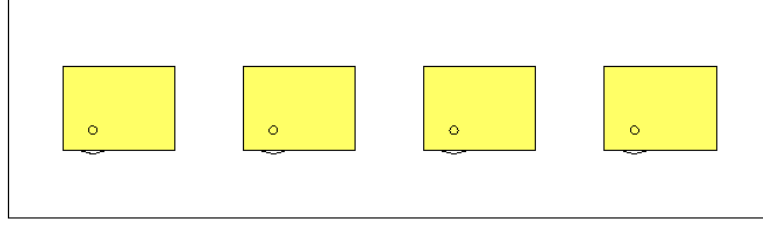
Şekil 2.13 4×4 düzlem dizi antenlerin hüzme tarama performansı (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi

2.2.2 4×1 Düzlemsel Dizi ile Hüzme Yönlendirme

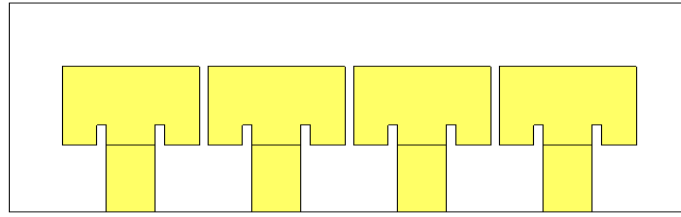
4×4 elemanlı koaksiyel besleme anten analiz sonuçları, mikroşerit hattı beslemeli anten ile karşılaştırmak mümkün olmadığı için 4×1 koaksiyel iletim hattı ve 4×1 mikroşerit iletim hattına sahip antenlerin hüzme yönlendirme analizleri bu başlık altında incelenmiştir.

4×1 koaksiyel beslemeli dizi anten Şekil 2.14 (a)'da, mikroşerit iletim hattına sahip anten ise Şekil 2.14 (b)'de görülmektedir. Her iki anten dizisi, analiz sonuçları verilen birim antenler ile aynı antenlerdir. Antenler arası mesafeler, 4×4 elemanlı dizi anten yapısındaki ile benzer şekilde, $\lambda / 2$ kadar olacak şekilde tasarlanmıştır.

Koaksiyel beslemeli anten boyutu $63.2\text{mm} \times 18.2\text{mm}$ iken, mikroşerit iletim hattına sahip anten ise $70\text{mm} \times 25\text{mm}$ 'dir



(a)



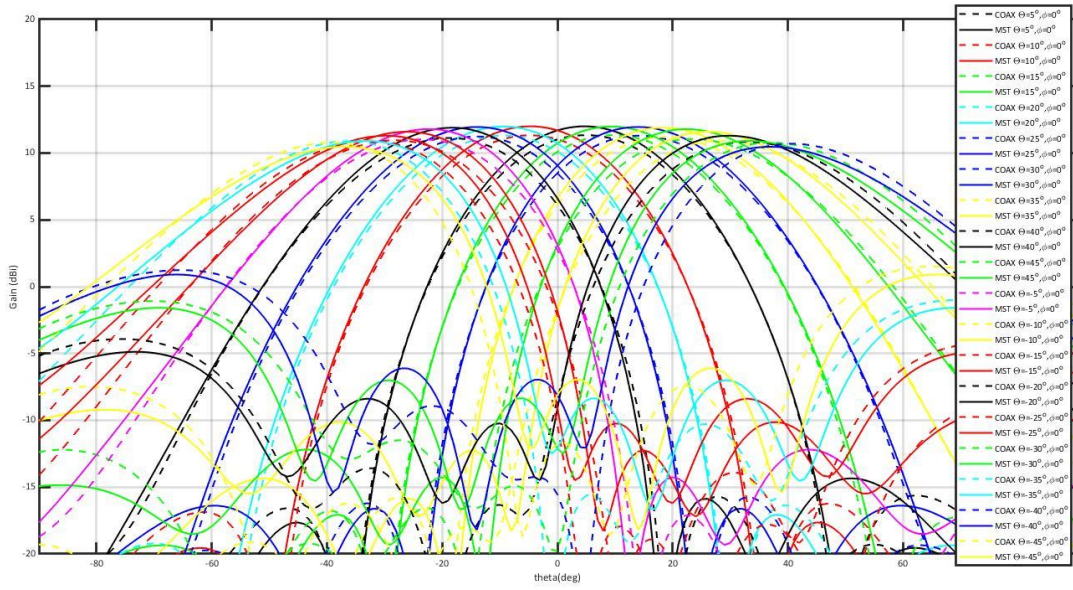
(b)

Şekil 2.14 4×1 Düzlem dizi anten şekilleri (a) koaksiyel iletim hatlı dizi anten; (b) mikroşerit iletim hatlı dizi anten.

4×4 dizi anten yapısında kullanılan faz kaydırma tekniği, 4×1 düzlem dizi antenlerin yönlendirme analizinde de kullanılmıştır. Genlik seviyelerinde yan lob seviyesini en az indirgeyebilmek adına anten dizisinin dışında kalan antenlerin genlik değerleri 0.5 iken, dizinin ortasında olan iki adet birim elemanın genlik değeri 1.0 olarak analiz edilmiştir.

Şekil 2.15'te DD koaksiyel ve mikroşerit iletim hattı beslemeli antenlerin hüzme taraması yaparak ana hüzmelerinin $\varphi = 0^\circ$ düzleminde 5° açısal aralıklarla yönlendirildiği bir grafik verilmiştir. $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmanın yönlendirildiği durumda $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirildiği durumuna göre kazançta her iki DD antende de yaklaşık 1 dBi düşüş görülmektedir. Genel olarak 12 dBi üzerinde kazanç değerine sahip olarak yönlendirilen anten paternleri, istenilen açıya ışıma yapabildiği görülmektedir. Antenler $\varphi = 0^\circ$ düzleminde, $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ açısal aralığında hüzme taraması yaparak ana hüzmelerinin 5° açısal aralıklarla yönlendirilmesi için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Paylaşılan sonuçlar amaçlanan değerlere uygun olup, bu grafiklerdeki θ açısı hava aracından yeryüzü yönündeki ışımayı (elevasyon

açısı), φ açısı ise yanal açıyı (azimuth açısını) temsil etmektedir. Şekil 2.15’de verilen grafiklerde antenlerin yan lob seviyelerinin açığa bağlı değişimleri incelendiğinde ise $\theta = 5^\circ$ ’ye hüzmünün yönlendiği durumda yan lob seviyesi, koaksiyel iletim hattına sahip anten de -18.6 dB iken, mikroşerit iletim hattına sahip antende -24.9 dB olduğu, $\theta = 45^\circ$ ’ye hüzmünün yönlendiği durumda koaksiyel iletim hattına sahip antende -9.3 dB olduğu ve mikroşerit antende ise -9.6 olarak elde edildiği görülmektedir.



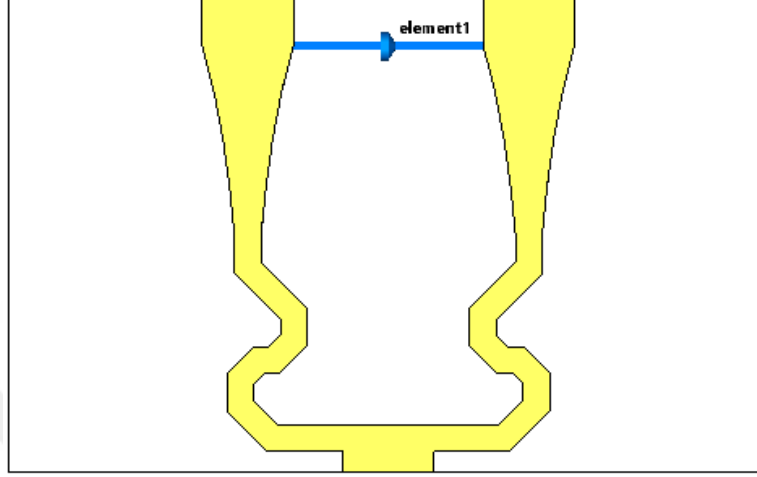
Şekil 2.15 4×1 DDA koaksiyel ve mikroşerit iletim hattı yönlendirme analizi

2.3 Düzlemsel Dizi Anten için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı

4×1 Mikroşerit beslemeli dizi anten tasarımında, Wilkinson güç bölücü devresi kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu amaçla, dizi anten tasarımından önce Wilkinson güç bölücü tasarımına öncelik verilmiş olup ilk olarak 2×1 formatında -3 dB güç bölücü tasarımı, sonrasında 4×1 formatında, -6 dB Wilkinson güç bölücü tasarımları yapılmıştır.

Şekil 2.16’da görülen 2×1 wilkinson güç bölücü tasarımı, bir sonraki tasarım olan 4×1 için ön çalışma niteliği taşımaktadır. 40mm×31mm substrate boyutuna sahip güç bölücü tasarımında tüm portalar 50Ω olacak şekilde ayarlanmıştır. Karakteristik empedans uyumluluğu için, iletim hatları $\lambda/4$ uzunluğunda ve $\sqrt{2}Z_0$

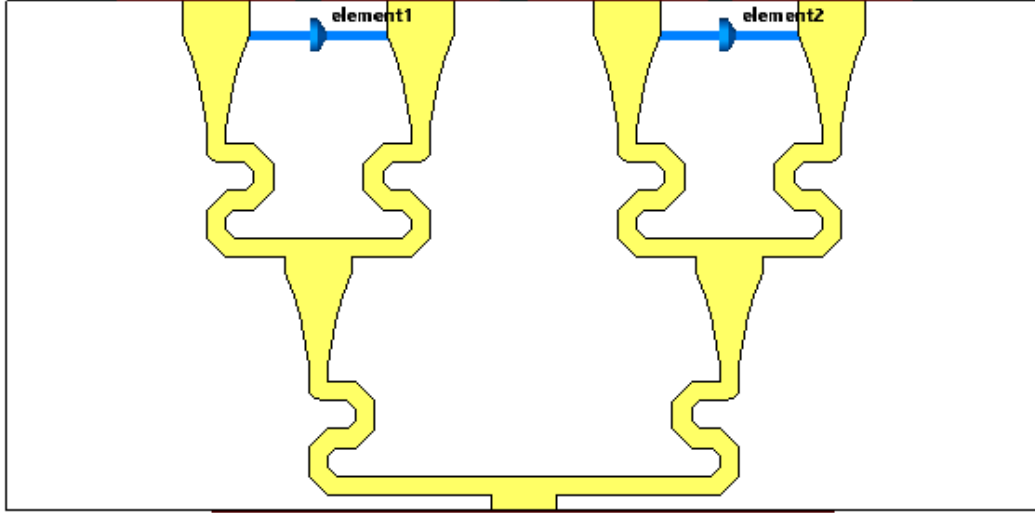
empedansına sahiptir. Tasarımında eğilimli şekilde tasarlanan uzunluklar, ilerleyen analiz sonuçlarında yönlendirme amacı ile yapılmıştır. CST Microwave Studio programında tasarlanan Wilkinson güç bölücünün ölçüleri, yalıtkan malzemenin ϵ değeri, yalıtkan malzeme kalınlığı, çalışması istenen frekans aralığı gibi değişkenlere göre hesaplanarak elde edilmiştir [27].



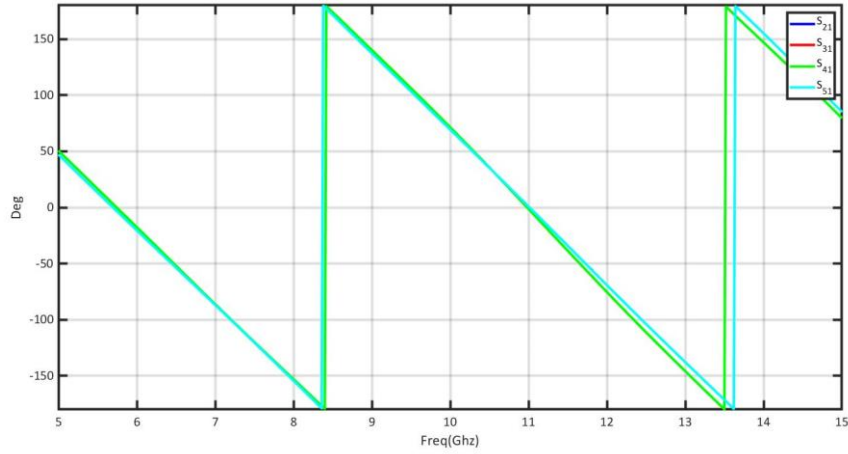
Şekil 2.16 2×1 Wilkinson güç bölücü tasarımı

2.3.1 $\theta = 0^\circ$ 'ye Hüzme Yönlendirme için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı

2×1 temel alınarak tasarlanan 4×1 wilkinson güç bölücü tasarımı Şekil 2.17'de görülmektedir. Wilkinson güç bölücü prensiplerine uygun şekilde tasarlanan güç bölücünün 5 GHz ile 15 GHz frekans bandında, faz değişimi Şekil 2.18'de verildiği üzere, 10 GHz'de herhangi bir faz kayması görülmemektedir. Yaklaşık 69° 'lik faz değerinin tüm portlar için aynı olduğu analiz edilmektedir. Şekilde görülen her bir çıkış portunun empedansı 50Ω , farklı açılara hüzme yönlendirme için gerekli olacak olan “S” şeklinde olan yapılar 100Ω ve empedans uyumluluğu için tapered line olarak isimlendirilen inceden kalın bir görünüme doğru giden alanlar ise 100Ω 'dan 50Ω 'a logaritmik şekilde tasarlanmıştır.



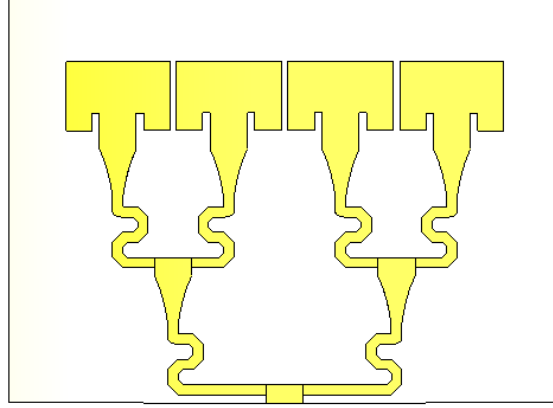
Şekil 2.17 4×1 Wilkinson güç bölücü tasarımı



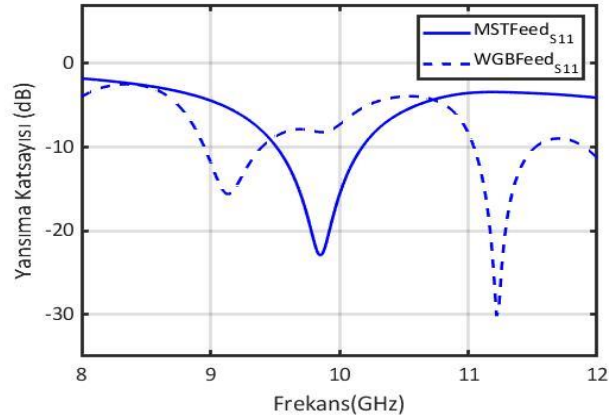
Şekil 2.18 4×1 Wilkinson güç bölücü faz grafiği

Yukarıda faz grafiği ve şekli verilen temel Wilkinson devresine, birim mikroşerit iletim hattına sahip anten entegre edilerek elde edilen benzetim sonuçları Şekil 2.19’da görülmektedir. Daha önceki bölümlerde analiz sonuçları paylaşılan 4×1 anten herhangi bir değişiklik yapılmadan Wilkinson devresine entegre edilmiştir. Bu kapsamda Şekil 2.19 (b)’de görülen S_{11} grafiğine göre, yansıma katsayısı -30.905 dB olup, 10.3 GHz merkez frekansında yaklaşık 250 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Bununla beraber üç boyutlu uzak alan ışıma örüntüsü ve tek boyutlu yönelim grafiğine göre, 10.28 dBi kazanç değerine sahip olan anten dizisi, $\theta = 0^\circ$ ’ye yönlendiği görülmektedir. Yan lob seviyesi -10 dB civarında ve yarı güç hüzmeye açısı ise 24.3° olarak elde edilmiştir. Wilkinson güç bölücü olmadan tasarlanan, 4×1 düzlem dizi anten ile karşılaştırıldığında birbirine yakın

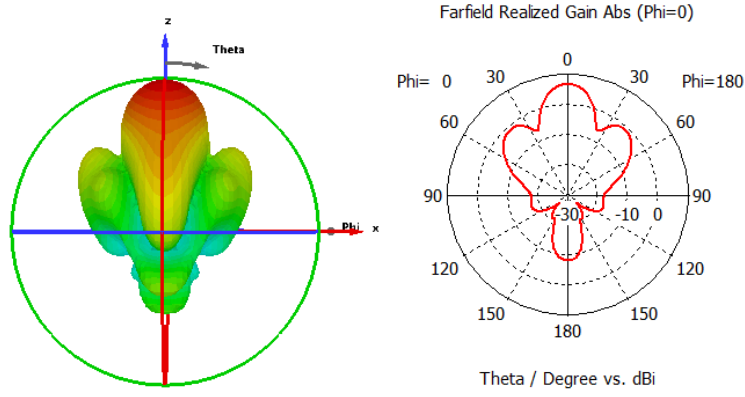
değerler elde edildiği görülmektedir. Bu durum yapılan tasarım hedefleri doğrultusunda olumlu olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.19 (b)'de görülen antenlerin S_{11} grafiklerinde, X-bant frekansında çalışan antenler olduğu ve anten yansımaya katsayı değerlerinin, mikroşerit beslemeli anten için -23 dB iken, Wilkinson güç bölücü beslemeli anten için -30 dB civarındadır.



(a)



(b)

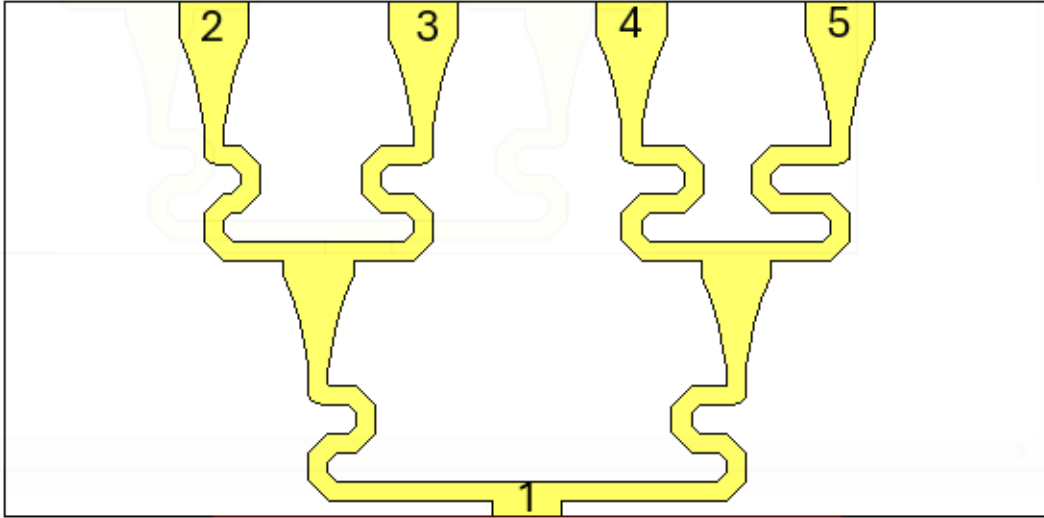


(c)

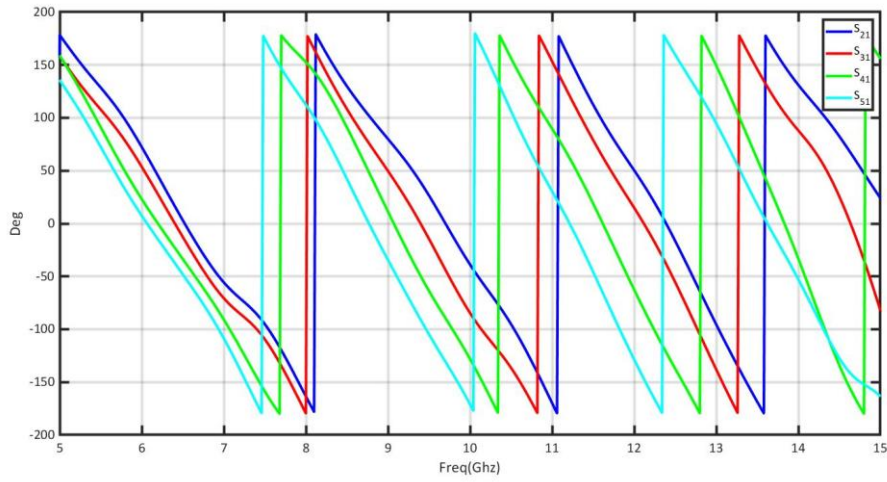
Şekil 2.19 4×1 Wilkinson güç bölücülü mikroşerit iletim hattı beslemeli birim anten analiz sonuçları

2.3.2 $\theta = 15^\circ$ 'ye Hüzme Yönlendirme için Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı

$\theta = 15^\circ$ yönlendirme, Wilkinson güç bölücü tasarımında yönlendirme amacı ile faz değerleri hesaplanırken, diğer yönlendirme tasarımlarında olduğu gibi $\beta_x = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$ formülü kullanılmıştır. Ancak hesaplama sonucu elde edilen açı değerleri, tasarıma direkt girdi olarak verilmemiştir. Bulunan açı değerlerine göre, Wilkinson besleme bacaklarının uzunlukları değiştirilerek çıkış portlarında faz kayması elde edilmiştir. x -eksenine dizilecek antenler, $\theta = 15^\circ$ açısına yönelim için $\beta_x = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$ formülüne göre yaklaşık 46° 'lik faz farkı oluşması gerekmektedir. Her bir anten arasında belirtilen faz farkı oluşması için portlara ait besleme yol uzunlukları, 2 numaradan 5 numaralı porta doğru artarak gitmektedir. Buna göre oluşan faz farkı Şekil 2.21'de net bir şekilde görülmektedir. Bu şekle göre 2 numaralı çıkış portu olan S_{21} portu faz değeri 321° olarak görülmektedir. 2. çıkış portu olan S_{31} ise, 2 numaralı çıkış portunda istenen değere göre 46° derece fark ile 275° ve diğer son iki port olan S_{41} , S_{51} yine aynı fark ile sırasıyla 229° ve 183° olarak analiz edilmiştir.

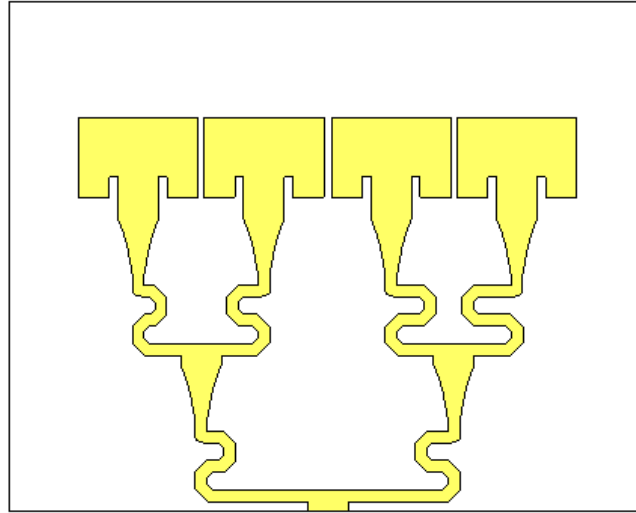


Şekil 2.20 4×1 $\theta = 15^\circ$ faz farkı oluşturulmuş Wilkinson güç bölücülü anten tasarımı

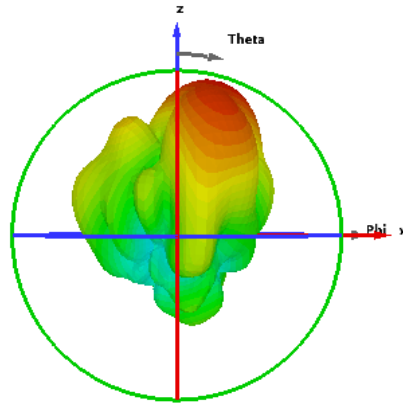


Şekil 2.21 $\theta = 15^\circ$ 'ye derece yönlendirilmiş antenin faz farkı gösterimi

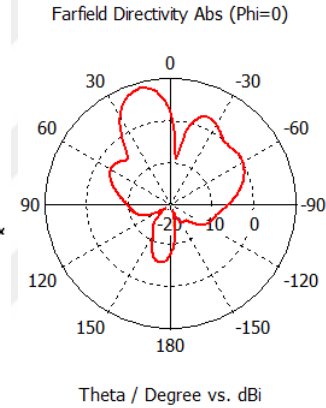
Faz farkı elde edilen Wilkinson güç bölücü devresine, 4×1 mikroşerit birim anten tasarımı eklenerek yapılan faz çıktıları Şekil 2.21'de detaylı olarak verilmektedir. Şekil 2.22 (b) ve (c)'de ise antenin 15° yönlendiği ve 8.54 dBi kazanca sahip olduğu, üç boyutlu uzak alan ışıma örüntüsü ile iki boyutlu yönelim grafiği gösterilmektedir. İki boyutlu hüzmeye yönlendirme grafiğine göre, yan lob seviyesi -5.9 dB, yarı güç hüzmeye açısı ise 22.7° olarak analiz edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

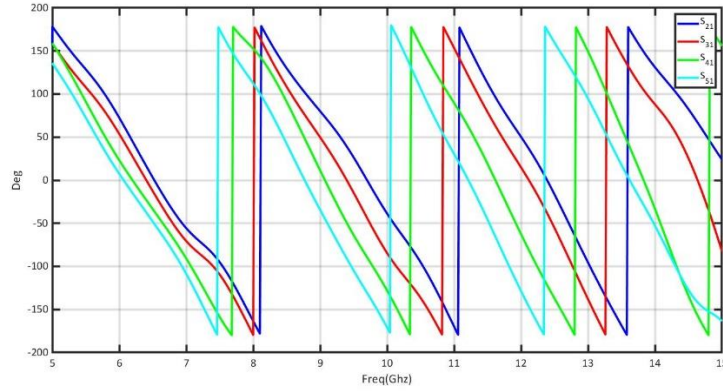
Şekil 2.22 $\theta=15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş 4×1 Wilkinson güç bölücülü dizi anten tasarımı analiz çıktıları (a) anten şekli; (b) üç boyutlu uzak alan görüntüsü; (c) iki boyutlu yönelim grafiği

2.3.3 $\theta = -20^\circ$ 'ye Hüzme Yönlendirme için Wilkinson Güç Bölücü

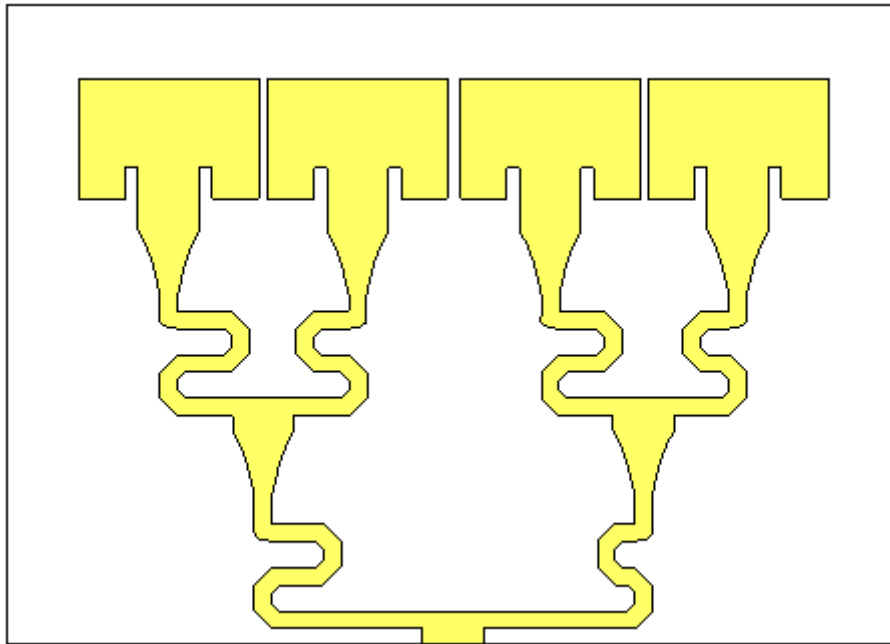
Tasarımı

$\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirme için tasarlanan Wilkinson güç bölücü devresinde, yönlendirme amacı ile faz değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda $\beta_x = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$ formülü kullanılarak, $\theta = -20^\circ$ açısına yönelim için yaklaşık -61° 'lik faz farkı oluşması gerektiği bulunmuştur. Şekil 2.20'ye göre, 2 numaralı çıkış portu olan S_{21} portunun faz değeri 155° iken, 2. çıkış portunun faz değeri 217° , diğer iki portun ise sırayla 278° ve 339° olarak ölçülmüştür.

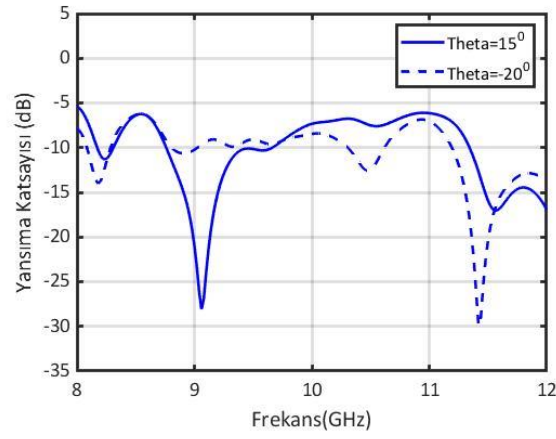
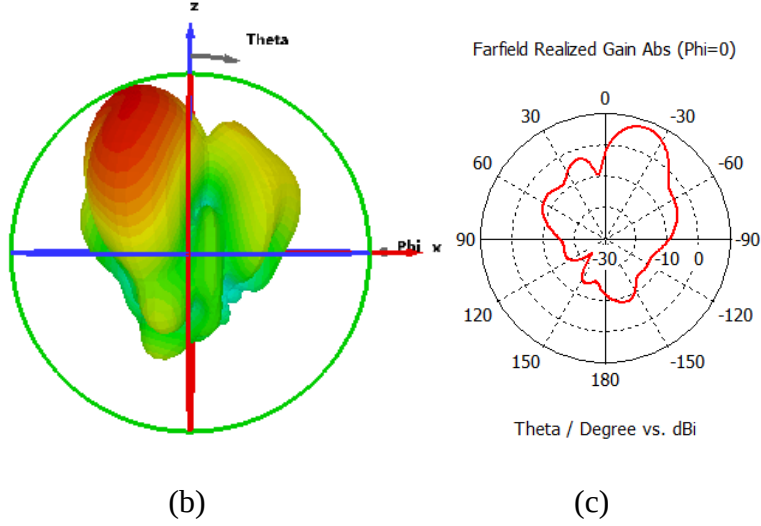
Şekil 2.24 (a)'da görülen antenin, b ve c çıkışlarında $\theta = -20^\circ$ yönlendirilmiş ve yaklaşık 10 dBi kazanca sahip bir anten olduğu görülmektedir. Yan lob seviyesi -10.8 dB iken, 3 dB açısal genişliği 25.7° olarak analiz edilmiştir. Belirtilen değerlerin $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 15^\circ$ için analiz edilen değerlerle yakın olması, önerilen dizi antenin hüzme yönlendirme uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.23 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirme için 4×1 Wilkinson güç bölücü çıkış fazları



(a)



Şekil 2.24 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş 4×1 Wilkinson güç bölücülü anten tasarımı analiz çıktıları

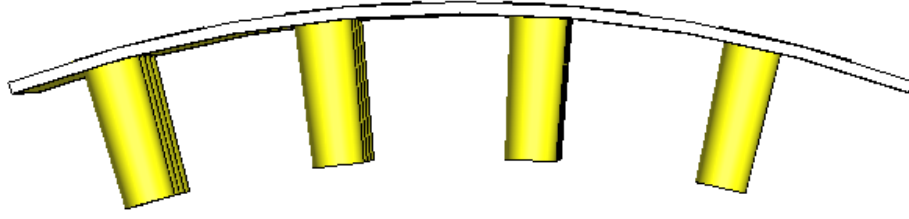
(a) anten şekli; (b) üç boyutlu uzak alan görüntüsü; (c) iki boyutlu yönelim grafiği; (d) $\theta = 15^\circ$ ve $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirme durumunda S_{11} grafiği

Şekil 2.24 (d)'ye göre S_{11} grafikleri verilen Wilkinson güç bölücülü yönlendirilmiş antenler, 10 GHz' de -7.5 dB ve -8 dB yansımaya katsayı değerlerine sahiptir. X-bant frekanslarında çalışan her iki anten tasarımının benzer bant genişliklerine sahip olduğu görülmektedir. Antenler, çalışma bandının dip noktasında kayma göstermiştir, yaklaşık 500 MHz bant genişliğe sahip olduğu analiz edilmiştir.

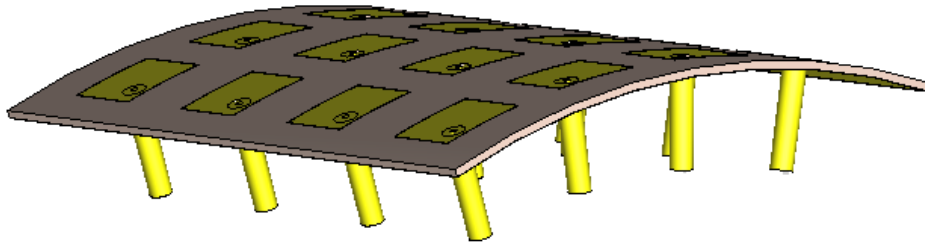
İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN YÜZEY UYUMLU ELEKTRONİK TARAMALI DİZİ ANTEN TASARIMI

3.1 4×4 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı

4×4 dizi anten, insansız hava araçlarında (İHA) hüzme yönlendirme amacıyla kullanılacaktır. Anten dizisi, kullanım konseptine uygun olarak hava aracının yapısal özelliklerine ve kullanılacağı bölgeye göre uyumlu hale getirilmiştir. 4×4 DDA ile benzer şekilde, antenler arası mesafe ve anten dizisinin ölçüleri birebir aynıdır. Antenin yüzey uyumlu bir şekil alması için, CST Microwave programı kullanılarak, yarıçapı 90 ve 160 cm arasında değişen bir hava aracının şekline uyumlu olacak şekilde benzetim yapılarak, silindirik bir yüzeye tam olarak örtüşecek şekilde büküm yapılmıştır. Gövdesi keskin hatlara sahip olmayan ve eğimli yüzeye sahip bir hava aracının yüzeyine montajı olabilecek şekilde yapılan dizi anten tasarımı, antenin kullanım açısından efektif olması hedeflenmektedir. Hava aracında sürtünme etkisini en az seviyeye indirmek amacıyla, uçak gövdesi ile tamamen uyumlu bir anten tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım, uçakların en büyük ihtiyaçlarından olan havada kalma sürelerinin arttırılmasına katkı sağlayacaktır. Yüzeyle uyumlu olmayan, çıkıntılı bir anten gövdesi, hava aracında sürtünme etkisini arttırarak daha fazla yakıt tüketimine neden olacaktır. Bu durum, hava aracının havada kalış süresinin azalmasına yol açacaktır. Ancak söz konusu yüzeyde sürtünme etkisi minimum düzeyde tutulabilirse uçağın havada kalış süresi artacaktır. İHA yüzeyi ile uyumlu hale getirilen dizi anten analizinde, düzlem formda olan anten yapısına göre port yapısında farklı bir yöntem kullanılmıştır. Eğimli yapıda olan koaksiyel beslemeli anten yapısında düz yüzey yapısı olmadığı için, koaksiyel besleme noktalarında waveguide port yerine, discrete port kullanılarak analiz yapılmıştır. Kullanılan port değişikliği dışında herhangi bir değişiklik yapılmamış olup analiz sonuçları bir sonraki bölümde detaylı olarak verilmiştir. Şekil 3.1’de yüzey uyumlu 4×4 anten dizisinin yandan ve perspektif görüntüleri paylaşılmıştır.



(a)



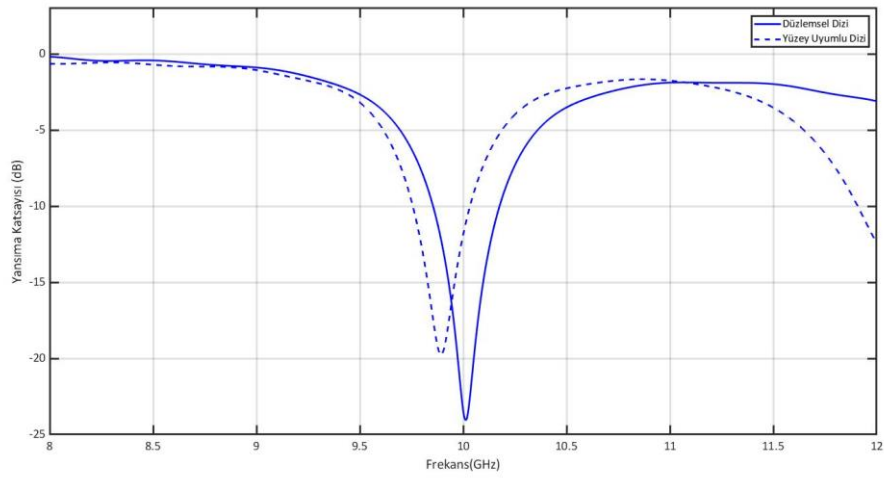
(b)

Şekil 3.1 4×4 Yüzey uyumlu dizi (YUD) anten (a) yandan görünüm; (b) perspektif görünüm

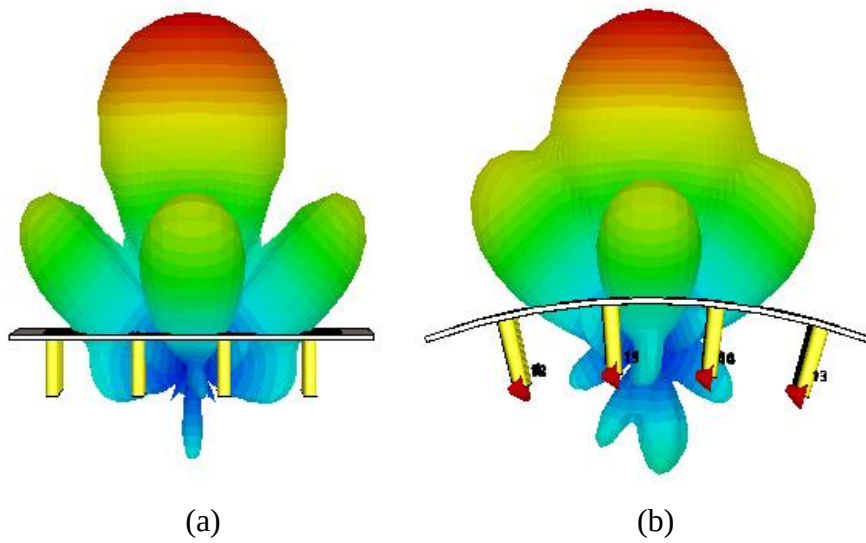
Düzlemsel ve İHA'nın gövdesi ile uyumlu olacak şekilde bükülmüş yüzey uyumlu anten dizisinin temel kullanım amacı, ana hüzmeyi istenen doğrultulara yönlendirebilmektir. İHA'nın alt yüzeyinde konumlandırılacak dizi antenin, yanca 360° ve yükselişte 65° açıyla yönlenebilmesi, günümüz uygulamaları için yeterli görülmektedir. Elektronik taramalı dizi antenin yönlendirme parametreleri olan faz ve genlik değerleri, hazırlanan kod ile elde edilmiştir. Analiz sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır.

Koaksiyel beslemeli 4×4 DD ve YUD antenlerin yansıma katsayısı ve uzak alan ışıma paternleri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. S_{11} 'in frekansa bağlı değişim grafiğinden, DD antenin 10 GHz' deki yansıma katsayısının dip değerinin -27.68 dB olduğu görülmektedir. DD antenin 3 boyutlu uzak alan ışıma paterni, ana hüzmelerin $\theta = 0^\circ$ 'yönlendiğini ve kazanç değerinin 17 dBi olduğunu göstermektedir. Yan lob seviyesi ise, hüzmelerin $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendiği durumda -13.9 dB olarak elde edilmiştir. 3 dB hüzmeye genişliğinin 25° civarında olduğu görülmüştür. YUD anten analiz sonuçları incelendiğinde, antenin uzak alan ışımasında ana hüzmelerin $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendiği görülmektedir. z-ekseni

doğrultusundaki bu ışıma 16.4 dBi kazanca sahiptir. Antenin bükülmesi sonucunda kazanç değerinde 0.6 dB’lik bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. YUD anten ile elde edilen 16.4 dBi kazanç seviyesi, hedeflenen İHA üzerindeki kullanım için yeterlidir. YUD antenin S_{11} grafiği incelendiğinde, birim anten bant genişliğine benzer şekilde, yaklaşık 400 MHz bant genişliğine sahip olduğu ve yan lob seviyesinin ise -13.4 dB seviyelerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, DD anten ile benzer şekilde 3 dB hüzme genişliğinin yaklaşık 25° civarında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2 4x4 DD ve YUD anten dizilerinin yansıma katsayısının frekans ile değişimleri

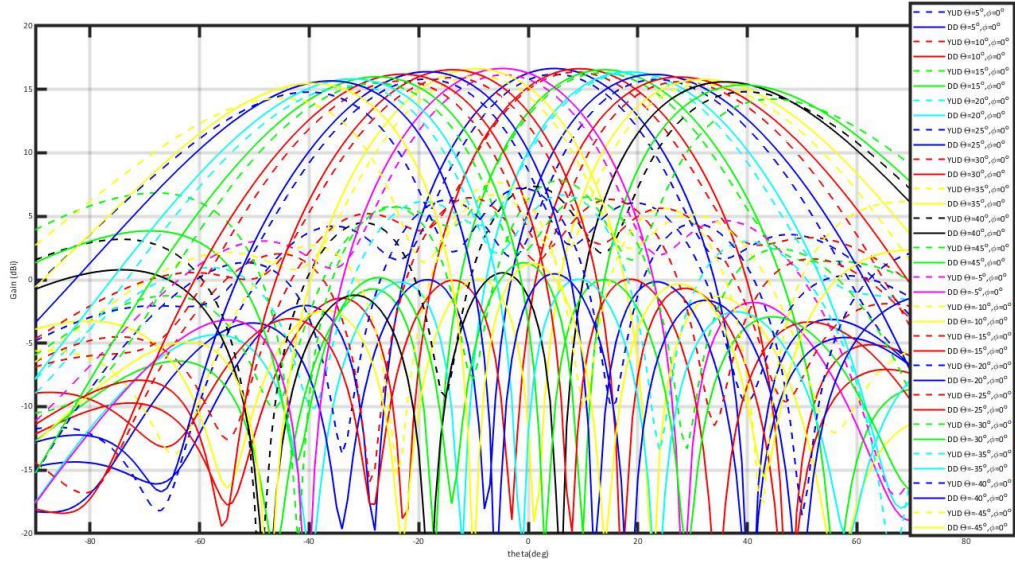


Şekil 3.3 4x4 anten dizilerinin 10 GHz'deki üç boyutlu kazanç paterni (a) DD anten; (b) YUD anten

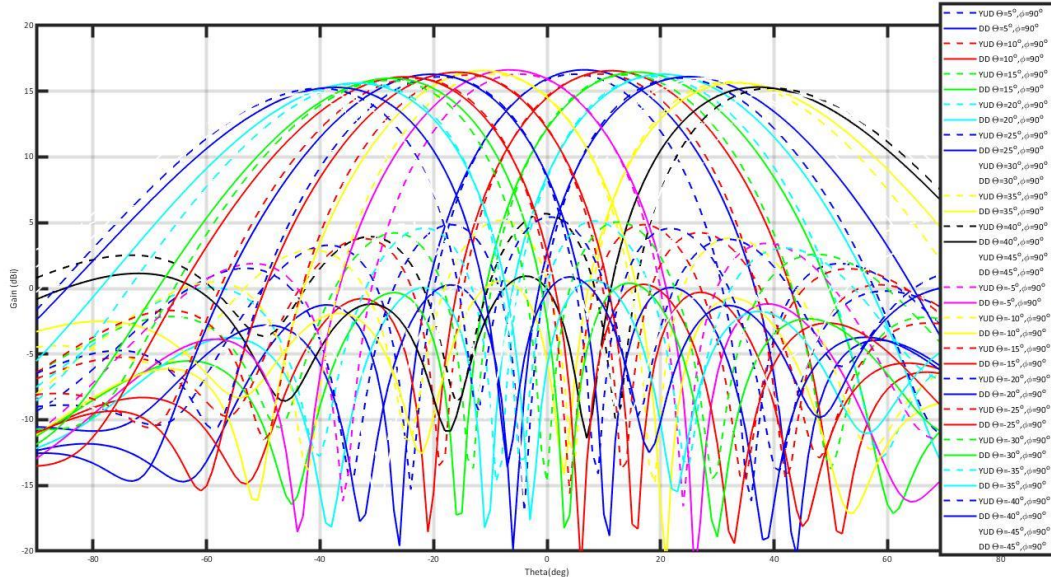
Faz değerleri hesaplanırken, x -ekseni üzerinde bulunan antenler için, $\beta_x = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$ formülü ile hesaplama yapılırken, y -ekseni üzerine dizili antenler için, $\beta_y = -k \cdot d_x \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi$ formülü ile hesaplama yapılmıştır. MATLAB programı üzerinde sadece yönlendirilmek istenilen açı değerleri girilerek, dizinin beslemesi için gerekli faz değerlerini hesaplayan bir kod aracılığı ile faz değerleri kısa sürede elde edilmiştir. Genlik değerlerinde ise yan lob seviyesini minimum seviyede tutmak amacı ile binom açılımı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem göz önüne alınarak, anten dizisinin köşe noktalarında yer alan antenlerin genlik değerleri 0.5, kenar orta noktalarda bulunan antenlerin genlik değerleri 0.75, en iç orta noktada bulunan 4 adet antenin ise 1.0 genlik değerine sahip olacak şekilde analiz edilmiştir.

Şekil 3.4 (a)'da DD ve YUD antenin hüzmeye taraması yaparak ana hüzmelerinin $\varphi = 0^\circ$ düzleminde 5° açısal aralıklarla yönlendirildiği bir grafik verilmiştir. $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmeyi yönlendirildiği durumda $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirildiği durumuna göre kazançta DD antende 1.3 dBi, YUD antende 2 dBi düşüş görölmektedir. Genel olarak 15 dBi üzerinde kazanç değerine sahip yönlendirilen paternler, istenilen açıya ışıma yapabilmektedir. Şekil 3.4 (b)'de DD ve YUD antenin $\varphi = 90^\circ$ düzleminde, $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ açısal aralığında hüzmeye taraması yaparak, ana hüzmelerinin 5° açısal aralıklarla yönlendirilmesi için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. $\varphi = 90^\circ$ düzleminde, $\varphi = 0^\circ$ düzleminde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmeyi yönlendirildiği durumda $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirildiği durumuna göre kazançta, DD ve YUD antende 1.7 dBi düşüş görölmektedir. Operasyonel konseptte, bu grafiklerdeki θ açısı hava aracından yeryüzü yönündeki ışımayı (elevasyon açısı), φ açısı ise yanal açıyı (azimuth açısını) temsil etmektedir. Şekil 3.4'de verilen grafiklerde antenlerin yan lob seviyelerinin açıya bağlı değişimleri incelediğinde ise $\varphi = 0^\circ$ düzleminde DD anteni, $\theta = 5^\circ$ 'ye hüzmeyi yönlendiği durumda yan lob seviyesi -18.7 dB iken $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmeyi yönlendiği durumda -7.6 dB olduğu ve YUD anteni yine $\varphi = 0^\circ$ düzleminde iken $\theta = 5^\circ$ 'ye hüzmeye yönlendiğinde -12 dB görölürken, $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmeyi yönlendiği durumda -6.4 dB olarak analiz çıktısı olarak değerlendirilmektedir. $\varphi = 90^\circ$ düzlemindeki yan lob seviyelerine bakıldığında ise, $\theta = 5^\circ$ iken DD anten yan lob seviyesi -17.9 dB, YUD antende yan lob seviyesi -

13 dB, $\theta = 45^\circ$ ise DD anten -8.6 dB yan lob seviyesine sahipken, YUD antende 8.3 dB yan lob seviyesi olarak görülmektedir.



(a)



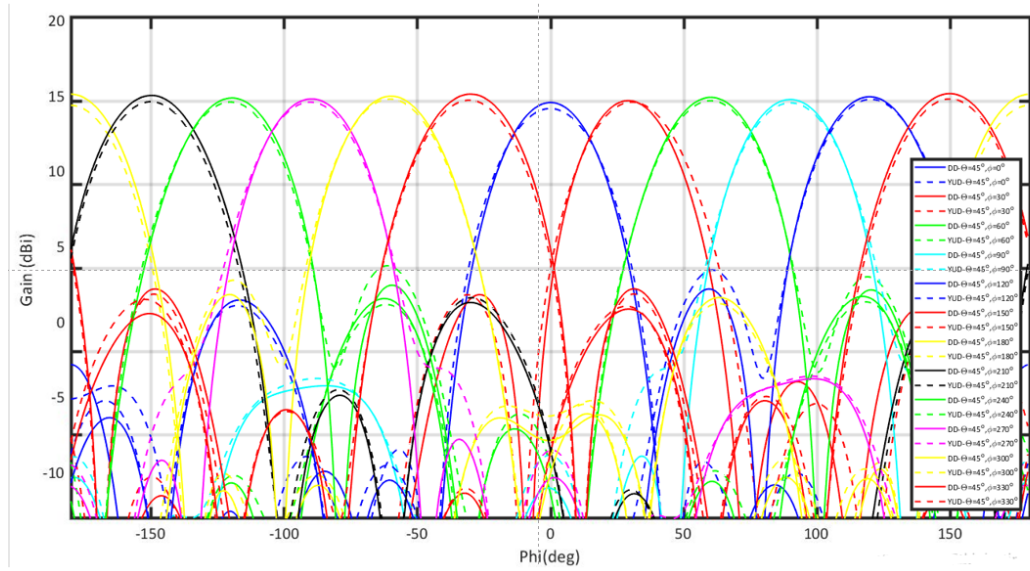
(b)

Şekil 3.4 DD ve YUD antenlerin hüzme tarama performansı (a) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi;

(b) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi

Antenlerin azimuth açısında 360° 'ye başarılı bir şekilde yönlenebildiğini göstermek adına, θ açısı sabit iken φ açısının $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ açısal aralığındaki değişimi incelenmiştir. $\theta = 45^\circ$ açısı, sabit olarak alınıp, φ açısı, 30°

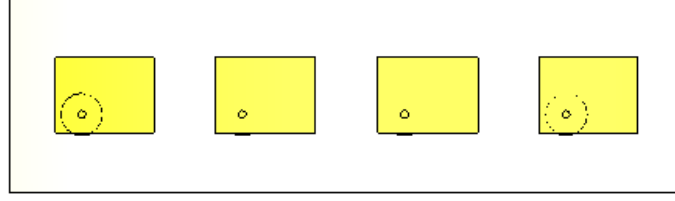
açısal aralık ile -180° 'den 180° 'ye kadar arttırılmıştır. Şekil 3.5'te DD ve YUD antenin hüzme taraması yaparak ana hüzmelerinin $\theta = 45^\circ$ 'ye yönlendirildiği durumdaki sonuçlar paylaşılmıştır. $\theta = 45^\circ$ 'ye hüzmelerin yönlendirildiği durumda kazançta DD antenin kazancı 14.92 dBi iken YUD antenin kazancı 14.55 dBi değerine sahiptir. Bu açıya yönlendirilme durumunda, YUD antenin kazancında DD antene göre 0.37 dBi azalma olduğu görülmüştür. Her iki durumda da hedeflenen en uç açı değeri olan 45° 'ye yönlendirmede ortalama 15 dBi üzerinde kazanç seviyesi elde edilmiştir. Bu değerler hedeflenen kazanç isterleri ile uyumludur. Yanal taramada $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ aralığında kazanç değerinde, her iki anten dizisi için de neredeyse hiç düşüş olmadığı görülmektedir. Bu da önerilen antenin performansının hedeflenen kriterler ile uyumlu olduğunu göstermektedir.



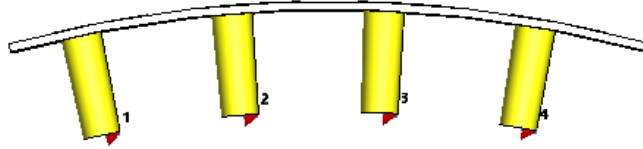
Şekil 3.5 DD ve YUD antenlerin $\theta = 45^\circ$ doğrultusunda $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ hüzme tarama performansı.

3.2 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı

Bu bölümde, 4×1 dizi anten yapısına sahip YUD anten tasarımının temel analiz çıktıları paylaşılmıştır. Şekil 3.6'da anten yapısının üstten ve yandan görünümü yer almaktadır.



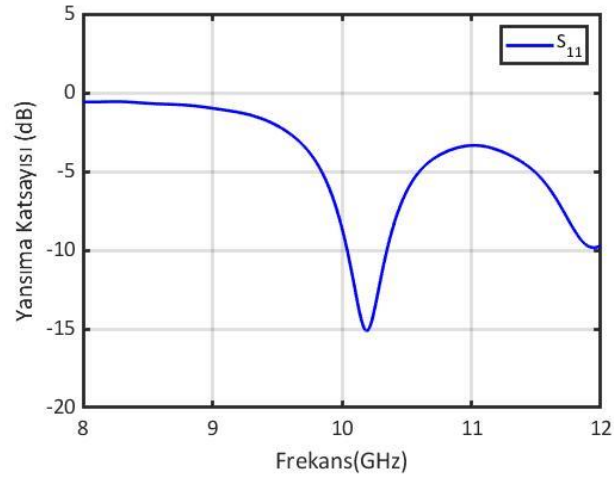
(a)



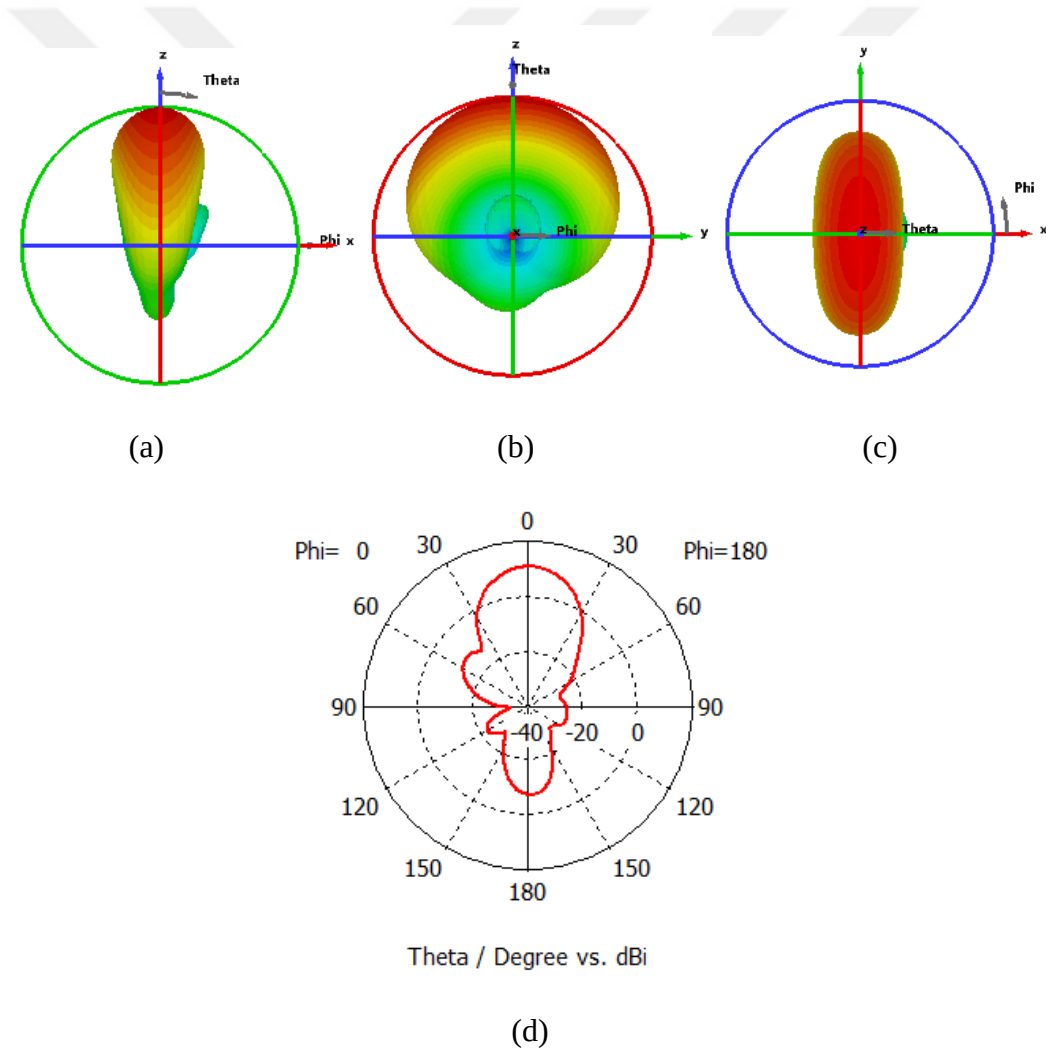
(b)

Şekil 3.6 4×1 YUD anten (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm.

Koaksiyel beslemeli 4×1 YUD anteninin yansıma katsayısı ve uzak alan ışıma paternleri Şekil 3.7 ve 3.8’de verilmiştir. S_{11} grafiğinin değişiminden, antenin 10 GHz’ deki yansıma katsayısının -15 dB olduğu görülmektedir. 4×1 YUD antenin 3 boyutlu uzak alan ışıma paterni, ana hüzmenin $\theta = 0^\circ$ yönlendiğini ve kazanç değerinin 11.4 dBi olduğunu göstermektedir. Yan lob seviyesi, ana hüzmenin $\theta = 0^\circ$ yönlendiği durumda -18.4 dB olarak elde edilmiştir. 3 dB hüzme genişliğinin yaklaşık 30° olduğu görülmüştür. YUD ile elde edilen 11.4 dBi kazanç seviyesi, hedeflenen İHA üzerindeki kullanım için yeterlidir. YUD antenin S_{11} grafiği incelendiğinde, birim anten bant genişliği ile benzer şekilde yaklaşık 250 MHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7 4×1 YUD antenin S_{11} grafiği

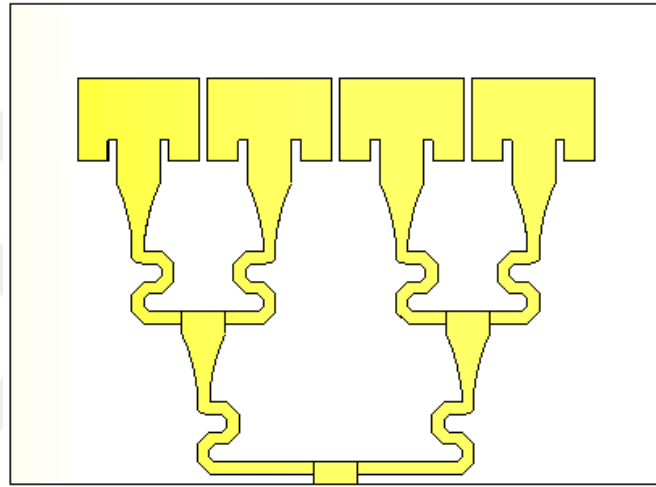


Şekil 3.8 4×1 YUD anten radyasyon paterni (a) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi; (d) iki boyutlu yönelim grafiği.

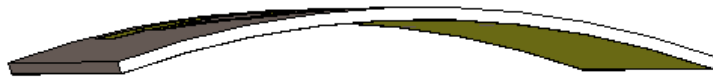
3.3 Wilkinson Güç Bölücülü 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD)

Anten Tasarımı

Yüzey uyumlu dizi anten tasarımında, Wilkinson güç bölücü devresi entegrasyonu yapılarak 4×1 yüzey uyumlu dizi anten incelenmiştir. Wilkinson güç bölücü devresinin YUD anten yapısındaki karakteristik özellikler incelenmiştir. Şekil 3.9’da anten yapısının eğik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Eğim miktarı, daha önceki bölümlerde yapılan YUD anten tasarımları ile uyumlu olacak şekilde 160 cm yarıçapındaki silindir yüzeyine bükülerek oluşturulmuştur.

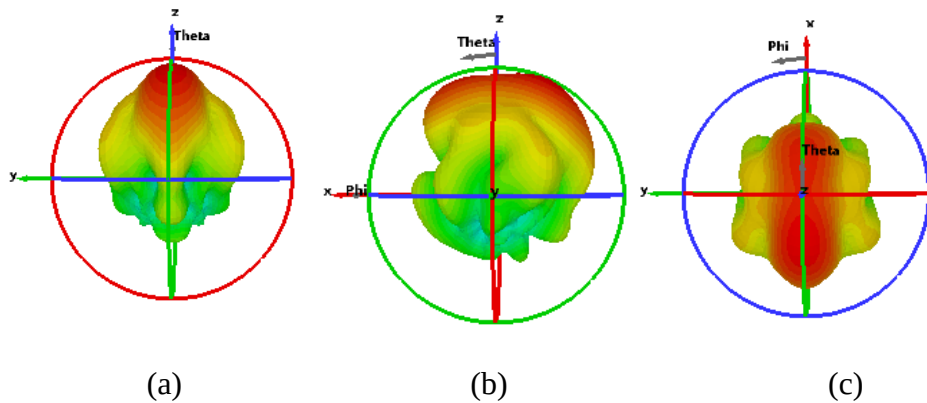


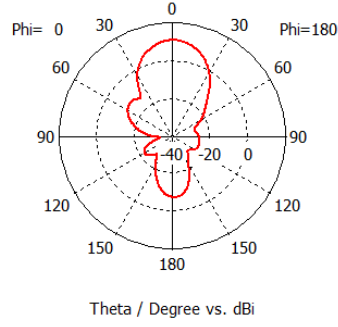
(a)



(b)

Şekil 3.9 4×1 Wilkinson güç bölücülü YUD anten (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm





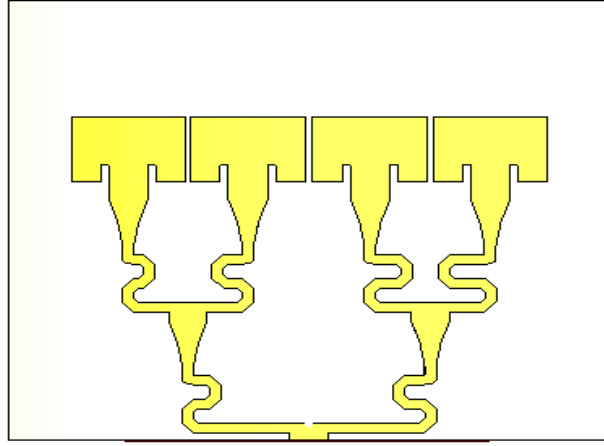
(d)

Şekil 3.10 4×1 Wilkinson güç bölücülü YUD anten tasarım çıktıları (a) $\varphi = 90^\circ$ düzlemi; (b) $\varphi = 0^\circ$ düzlemi; (c) $\theta = 90^\circ$ düzlemi; (d) iki boyutlu yönelim grafiği.

Analiz sonuçlarının yer aldığı Şekil 3.10’da anten hüzmesinin $\theta = 0^\circ$ yönünde 8.75 dBi ana hüzme kazancı ile 10 Ghz frekansında ışıma yaptığı görülmektedir. Yan lob seviyesi, normal beslemeli 4×1 YUD anten analizine göre artarak -15.5 dB olarak elde edilmiştir. Üç boyutlu hüzme yönlendirme şekilleri incelendiğinde, ana hüzme doğrultusunun z-ekseni yönüne ışıma yaptığı ve 10.86 dBi ana hüzme kazancına sahip olduğu görülmektedir.

3.4 $\theta = 15^\circ$ ’ye Yönlendirilmiş Wilkinson 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi (YUD) Anten Tasarımı

Faz farkı oluşturulmuş, yüzey uyumlu Wilkinson güç bölücülü anten tasarımının analizleri bu bölümde incelenecektir. Şekil 3.11’de $\theta = 15^\circ$ ’ye yönlendirilmiş 4×1 Wilkinson güç bölücü YUD anten tasarımının şekli görülmektedir. Şekil 3.12’de ise $\theta = 15^\circ$ ’ye yönlendirilmiş olarak tasarlanan YUD antene ait üç boyutlu ve iki boyutlu radyasyon paternleri yer almaktadır.



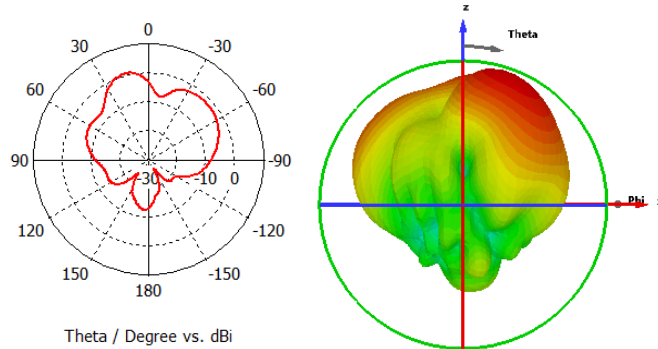
(a)



(b)

Şekil 3.11 $\theta = 15^\circ$ 'ye 4×1 hüzme yönlendirme için tasarlanan YUD anten (a) üstten görünüm; (b) yandan görünüm.

Şekil 3.12'de verilen ışıma paternlerinde $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş olan yüzey uyumlu anten tasarımının, istenilen açığa yönlendiği ve bu açıda 3.728 dBi kazanç değerine sahip olduğu görülmektedir. Yüzey uyumlu dizi anten yapısının -2.9 dB yan lob seviyesi olduğu analiz edilmiştir. 28,8°'lik yarım güç hüzme genişliği ile, yüzey uyumlu olmayan anten dizisine göre daha az verimli bir anten olarak değerlendirilebilir. Söz konusu anten yapısı yüzey uyumlu hale getirilirken, yarıçapı 160 cm olan bir silindir yapı yüzeyine uyumlu hale getirilerek büküm yapılmıştır.



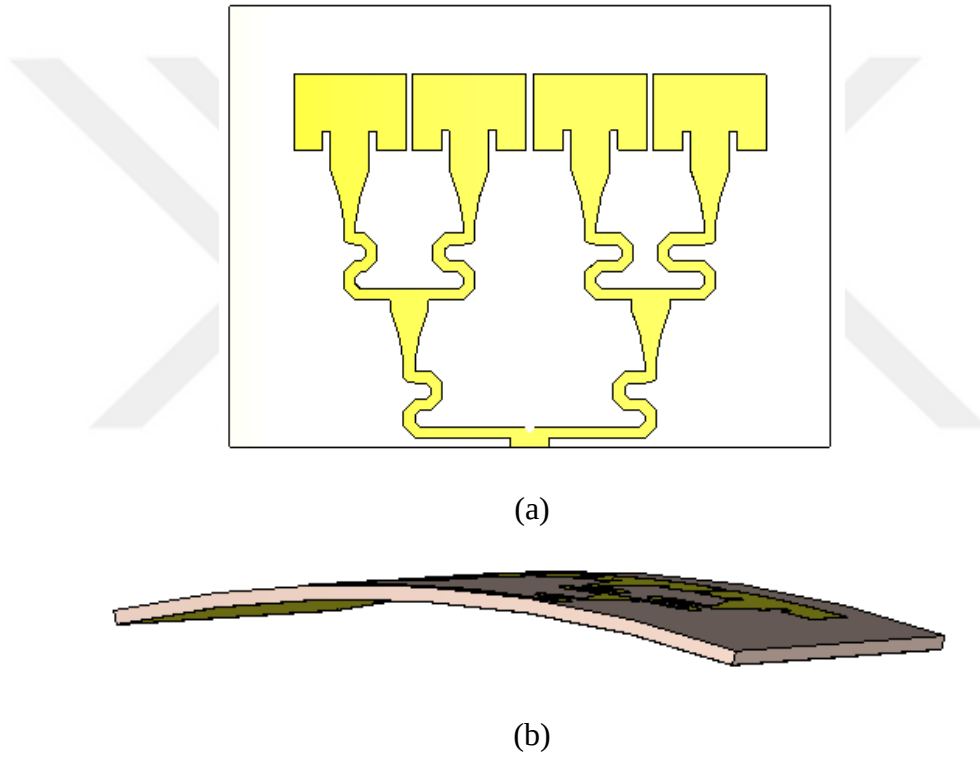
(a)

(b)

Şekil 3.12 $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş Wilkinson güç bölücülü 4×1 YUD anten analiz çıktıları (a) iki boyutlu yönelim grafiği; (b) üç boyutlu uzak alan ışıma paterni.

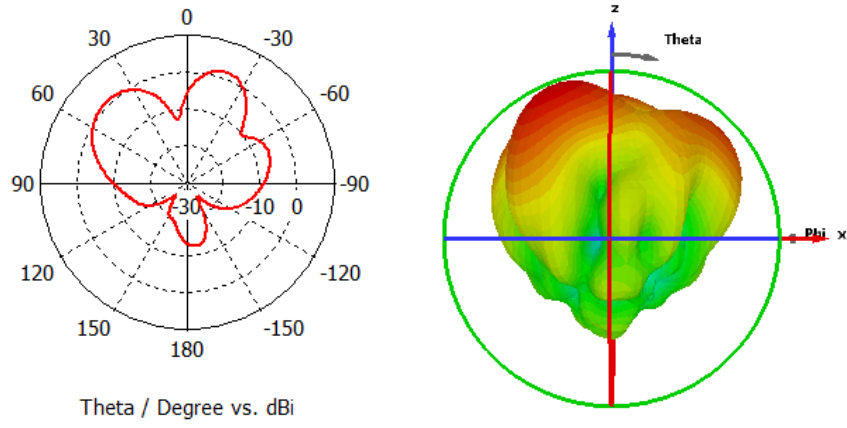
3.5 $\theta = -20^\circ$ 'ye Yönlendirilmiş Wilkinson 4×1 Yüzey Uyumlu Dizi Anten Tasarımı

Faz farkı uygulanarak $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten tasarımının şekli ve analiz çıktıları bu başlık altında incelenmiştir. Büküm yapılan ve analiz edilen antenin analiz sonuçları Şekil 3.14'te verilmiştir.



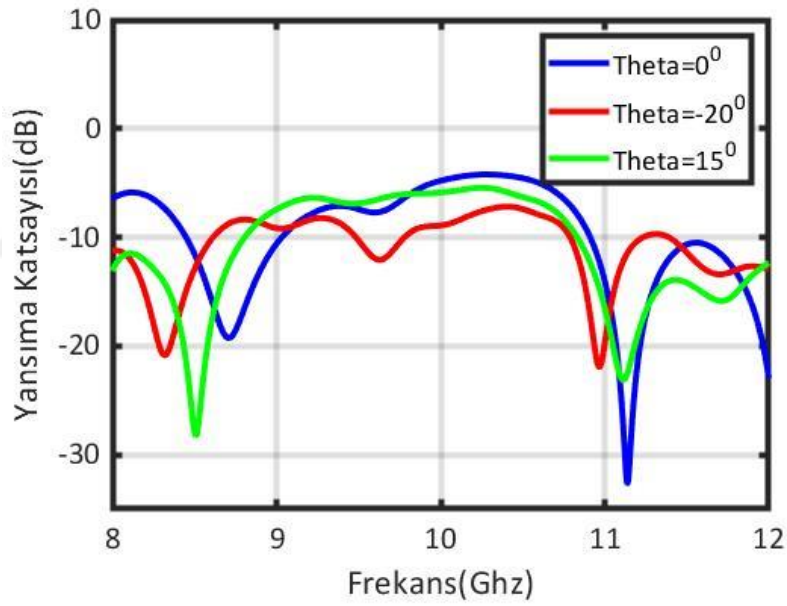
Şekil 3.13 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş Wilkinson güç bölücülü 4×1 YUD anten (a) üstten görünüm; (b) perspektif görünüm

Şekil 3.13'te verilen anten yapısında, diğer yüzey uyumlu antenlerde olduğu gibi, sadece 160 cm yarıçapındaki silindir üzerine büküm yapılarak tasarlanmış ve diğer parametrelerde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Şekil 3.14'te verilen analiz sonuçlarına göre 4.41 dBi kazanca sahip anten, $\theta = -20^\circ$ ana hüzmeye doğrultusuna yönlendirilmiş olarak görülmektedir. Yan lob seviyesi -0.7 dB ve 3 dB yarım güç hüzmeye genişliği ise 26.5° olarak analiz edilmiştir. Diğer yüzey uyumlu antenlerin analiz sonuçlarıyla tutarlı, benzer sonuçlar elde edilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Şekil 3.14 $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş Wilkinson güç bölücülü 4×1 YUD anten analiz sonuçları (a) iki boyutlu yönelim grafiği; (b) üç boyutlu uzak alan görüntüsü; (c) $\theta = 0^\circ$, $\theta = -20^\circ$ ve $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş antenlerin S_{11} grafikleri

Şekil 3.14 c'de verilen S_{11} grafiği, yüzey uyumlu olarak tasarlanan yönlendirilmiş antenlerin yansımaya katsayı değerlerinin frekansa göre değişimini gösteren grafiklerdir. Grafiğe göre antenler X-bant frekansında çalışmakta olup, $\theta = 0^\circ$ 'ye ışıma yapan

antenin 10.9 ile 11.6 GHz frekans aralığında yansımaya katsayısının -10 dB' nin altında kaldığı ve yaklaşık -33 dB yansımaya katsayısı değerine sahip olduğu görülmektedir. $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş antenin, -22 dB yansımaya katsayısı değerine sahip olduğu ve frekans aralığı 10.8 ile 11.3 GHz aralığında olduğu analiz sonuçlarına yansımıştır. $\theta = 15^\circ$ 'ye ışıma yapan antenin yansımaya katsayısının, 10.9 GHz' den başlayarak -10 dB'nin altında kaldığı ve dip değerinin -23 dB olduğu belirlenmiştir. Anten yapılarının, benzer frekanslarda yaklaşık yansımaya değerlerine sahip olmaları tutarlı analiz sonucu olduğunu göstermektedir.

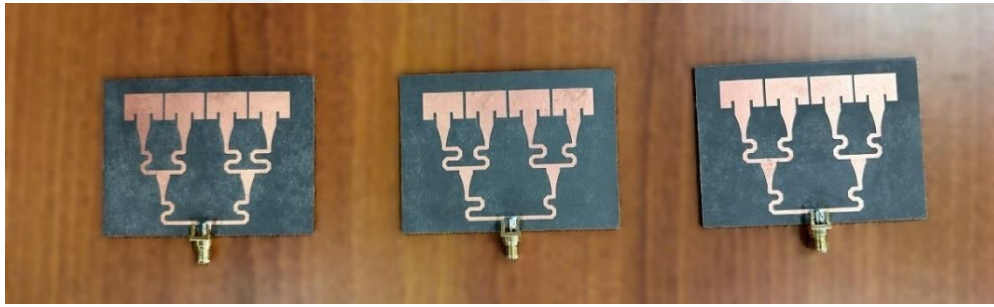


4

DENEYSEL DOĞRULAMA

4.1 Ölçüm Düzeneği

Bölüm 3’te elde edilen simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla, tasarlanan yönlendirilmiş antenlerin üretimi yapılmıştır. CST Microwave Studio programında tasarlanan ve 4×1 Wilkinson güç bölücüsüne sahip mikroşerit iletim hattı beslemeli antenler, $\epsilon_r=2.2$, $\tan\delta=0.0009$ ve kalınlığı $Subh=1.57\text{ mm}$ olan Rogers RT5880 tipi malzeme üzerine üretilmiştir. Antenin yama ve toprak kısımları bakır malzemeden üretilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de üretilen antenlerin görüntüleri yer almaktadır. Şekil 4.1 DDA görüntüleri, Şekil 4.2 ise YUD antenlerin şekilleri yer almaktadır. Antenlerin üretim parametreleri, tasarım ve analiz aşamasında belirlenen değerlerle aynıdır.

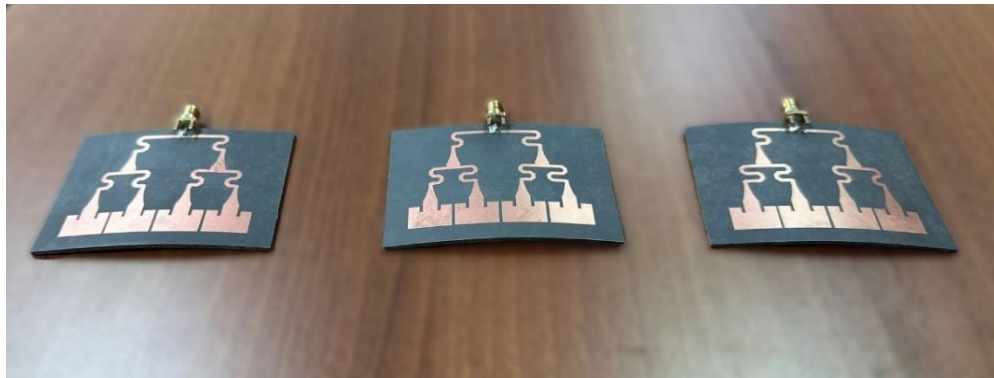


(a)

(b)

(c)

Şekil 4.1 Üretimi yapılan DDA antenlerin görüntüsü (a) $\theta = 15^\circ$ ’ye yönlendirilmiş anten; (b) $\theta = -20^\circ$ ’ye yönlendirilmiş anten; (c) $\theta = 0^\circ$ ’ye yönlendirilmiş anten



(a)

(b)

(c)

Şekil 4.2 Üretimi yapılan YUD antenlerin görüntüsü (a) $\theta = 0^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten; (b) $\theta = -20^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten; (c) $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmiş anten

Üretimi yapılan anten ölçümleri, vektör sinyal analizör ekipmanı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlere başlanmadan önce, uygun kalibrasyon kiti, kalibrasyon türü ve frekans ayarları yapılmıştır. Ölçüm düzeneğinin kurulumunda, iki adet tripod 60 cm aralıkla karşılıklı olarak sabitlenmiştir. Sabitlenen tripodlardan birincisine, X-bant frekansında çalışan horn anten, diğerine ise ölçümü yapılacak olan anten monte edilmiştir. Her iki tripoda monte edilen antenlerin yerden yükseklikleri 88 cm olarak ayarlanmıştır. Antenlerin SMA konektörleri ile vektör sinyal analizör arasında uygun kablaj bağlantısı RF tork anahtarı yardımıyla yapılmıştır. Şekil 4.3'te kurulan test düzeneğinin görüntüsü verilmiştir.

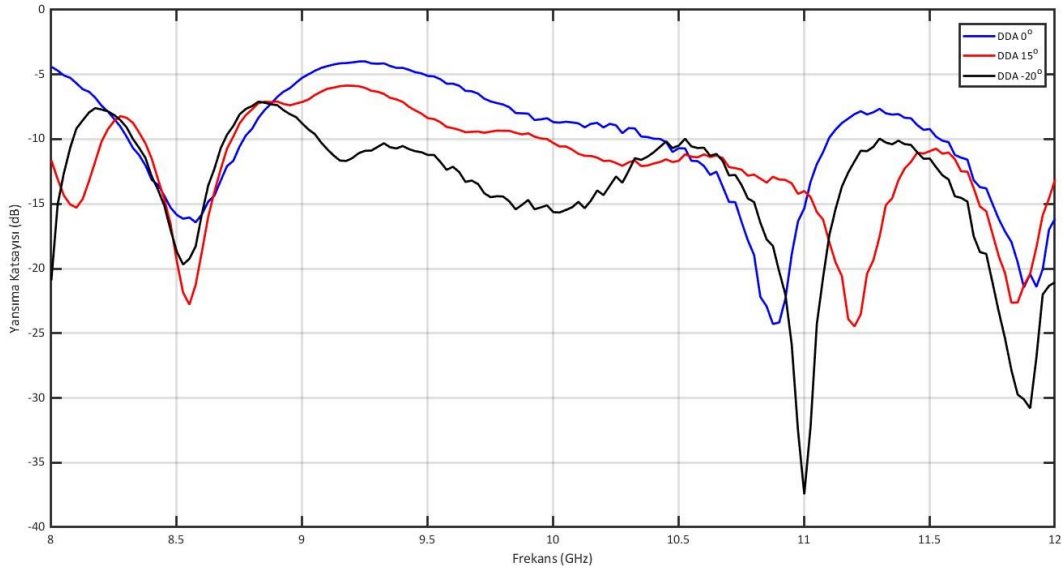


Şekil 4.3 Üretimi yapılan antenlerin ölçüm düzeneği

Tez kapsamında incelenen hüzmeye yönlendirme amacı ile tasarlanan test düzeneğinde, açı hassasiyeti sağlamak için düzeneğe yerleştirilen 180° 'lik bir açıölçer kullanılarak açı yönlendirilmesi yapılmıştır. Ölçümü yapılan her antenin sonuçları, 1° aralıklarla kaydedilmiş ve MATLAB ortamında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

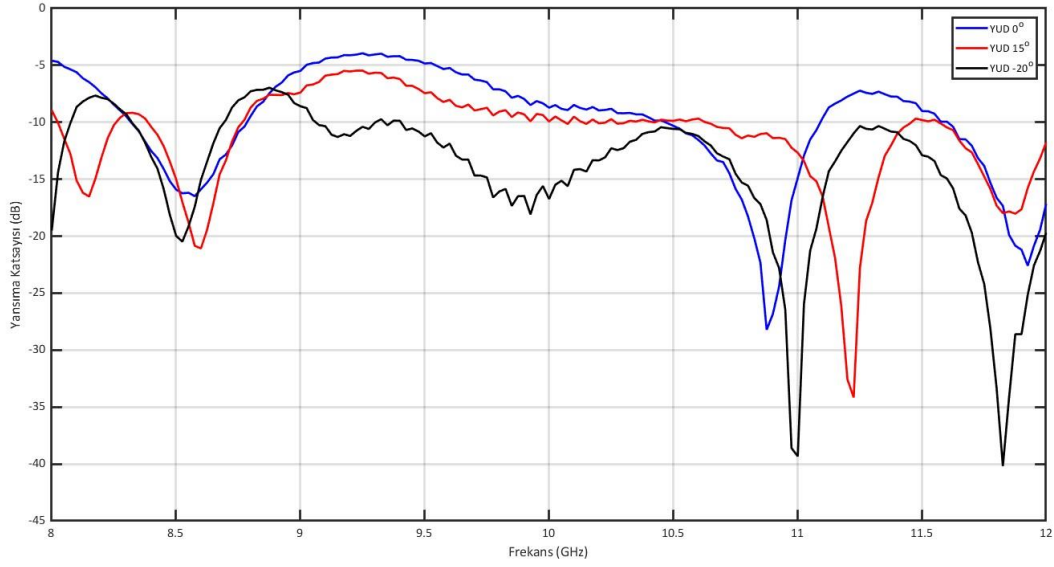
4.2 Ölçüm Sonuçları

Tasarlanan, analizi yapılan ve üretimi yapılan DD ve YUD antenlerin, ölçüm sonuçları bu başlık altında incelenmiştir. Şekil 4.4'te 0° , 15° ve -20° 'ye yönlendirilmiş DD antenlerin, yansıma katsayısı değerinin frekansa bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 4.4 Üretimi yapılan DD antenlerin S_{11} grafiği

Şekil 4.4'te verilen S_{11} grafiğine göre, X-bant frekansında çalıştığı görülen antenlerin, 8.5 GHz ile yaklaşık 11 GHz frekanslarında -10 dB altında değere sahip olduğu görülmektedir. Buna göre 0° 'ye yönlendirilmiş DD anten, 8.5 GHz frekansında -16 dB yansıma katsayı değerine sahip iken, 10.8 GHz merkez frekansında yaklaşık -25 dB yansıma katsayı değerine sahip olduğu görülmektedir. 10.8 merkez frekansında yaklaşık 700 MHz bant genişliği olduğu ölçüm sonucu olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, 8.5 GHz frekansında -22.5 dB yansıma katsayısı değerine sahip olan ve 15° 'ye yönlendirilen DD antenin, 11.2 GHz merkez frekansında yaklaşık -25 dB geri yansıma katsayısı değeri olduğu görülmektedir. Grafikte görülen -20° 'ye yönlendirilmiş antenin, diğer DD antenlere benzer şekilde, 8.5 GHz merkez frekansında yaklaşık -20 dB yansıma katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında, -37 dB yansıma katsayısına sahip olan antenin merkez frekansının 11 GHz olduğu ölçüm sonucu olarak görülmektedir. -20° 'ye yönlendirilen DD antenin yaklaşık 800 MHz bant genişliği olduğu elde edilmiştir.

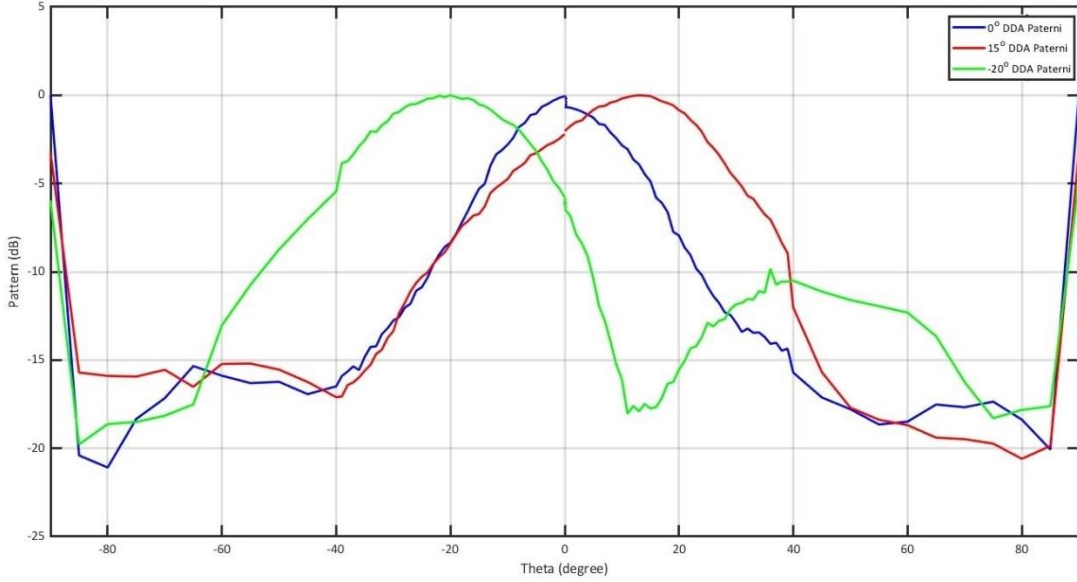


Şekil 4.5 Üretimi yapılan YUD antenlerin S_{11} grafiği

Şekil 4.5'te yönlendirilmiş YUD antenlere ait olan S_{11} grafiği, DD antenlere ait S_{11} grafiği ile benzer olduğu görülmektedir. Her iki grafikte de 8.5 GHz ve 11 GHz merkez frekanslarında ışıma yaptıkları görülmektedir. 8.5 GHz merkez frekansına bakıldığında, her 3 antende -15 dB ile -20 dB arasında geri yansımaya katsayı değerine sahip olduğu ve yaklaşık 550 MHz bant genişliğine sahip oldukları görülmektedir. Grafikte mavi olarak görülen S_{11} grafiği, 0° 'ye yönlendirilmiş YUD antene ait S_{11} grafiğini temsil etmektedir. 10.9 GHz frekansında, yaklaşık -28 dB yansımaya katsayısına sahip olduğu ve 600 MHz bant genişliğinin olduğu ölçüm sonucu olarak elde edilmiştir. 15° 'ye yönlendirilmiş YUD antenin, 11.3 GHz frekansında sahip olduğu yansımaya katsayısı değeri -35 dB civarında olduğu görülmektedir. Bununla beraber yaklaşık 1 GHz bant genişliğine sahip olduğu Şekil 4.5'te görülmektedir. -20° 'ye yönlendirilmiş olan YUD antenin, -40 dB yansımaya katsayısı değerinin merkez frekansı 11 GHz olarak elde edilmiştir.

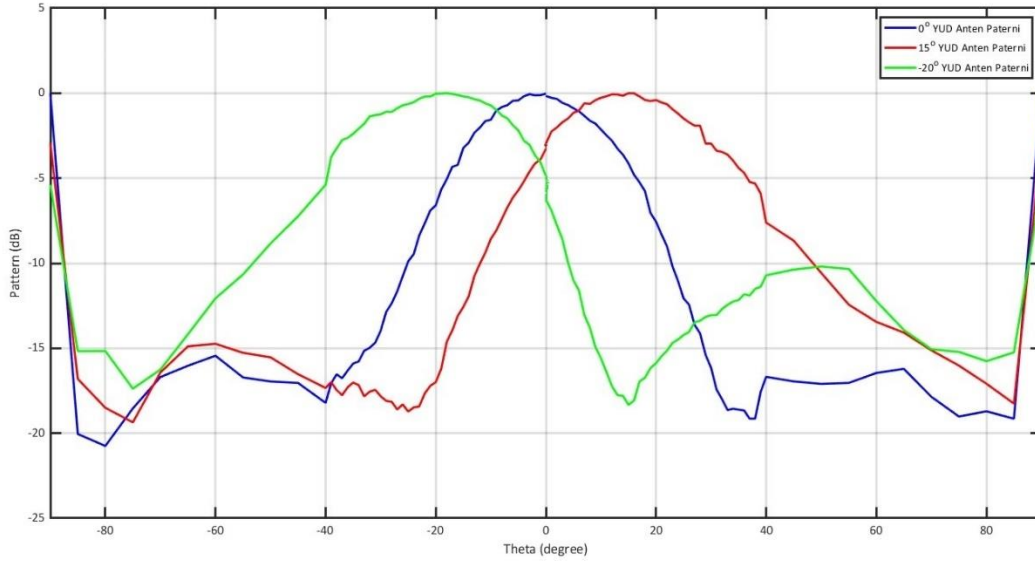
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te incelenen üretimi yapılan antenlerin ölçüm sonuçları ile CST Microwave Studio programında yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Bu kapsamda 0° 'ye yönlendirilmiş DD antenlerin 11 GHz civarında merkez frekansa sahip olduğu ve her iki antenin de yaklaşık -30 dB yansımaya katsayı değeri olduğu görülmektedir. Bir diğer analiz sonucu olan Şekil 3.14'te verilen YUD antenlerin S_{11} grafiği, Şekil 4.5 ile benzerliği açık şekilde görülmektedir.

DDA ve YUD antenlerin radyasyon paternlerine ait ölçüm sonuçları Şekil 4.6 ile 4.7’de yer alan grafiklerde verilmektedir. Hüzme yönlendirme amacı ile tasarlanan antenler, 0° , 15° ve -20° ’ye yönlendiği durumda ölçüm sonuçları incelenmiştir.



Şekil 4.6 Üretimi yapılan DD antenlerin normalize radyasyon patern grafiği

Şekil 4.6’da yer alan normalize radyasyon paterni grafiğine göre, DD antenlere ait S_{11} grafiğindeki, merkez frekanslarının radyasyon paternleri görülmektedir. Buna göre 0° ’ye yönlenen DD antenin 10.8 GHz, 15° ’ye yönlenen antenin 11.2 GHz ve -20° ’ye yönlenen antenin 11 GHz frekansında, belirtilen açılara ışıma yaptığı ölçüm sonucu olarak görülmektedir.



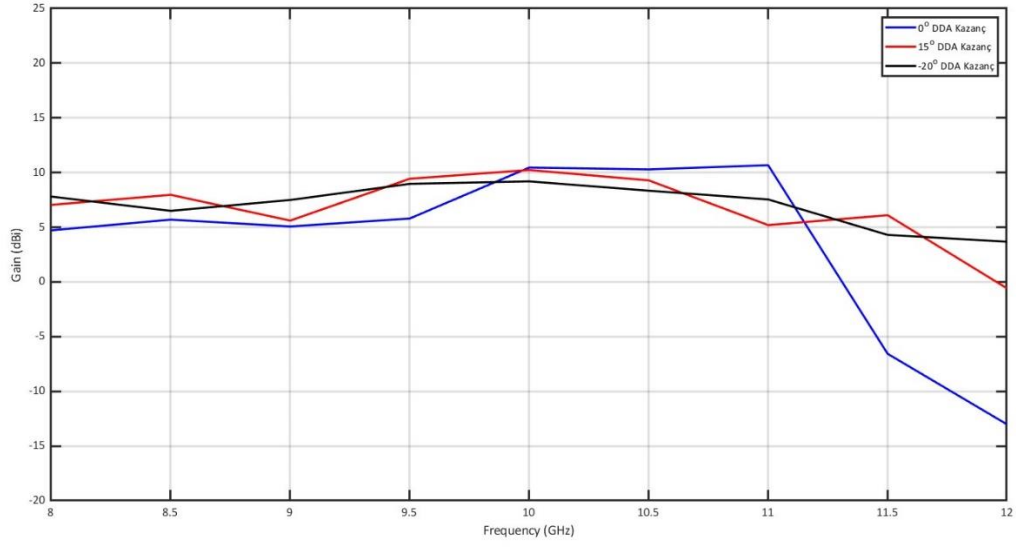
Şekil 4.7 Üretimi yapılan YUD antenlerin normalize radyasyon patern grafiği

Şekil 4.7’de üretimi yapılan YUD antenlerin normalize radyasyon paterni verilmiştir. Buna göre, mavi renkle belirtilen 0° ’ye yönlendirilmiş YUD anten, 10.9 GHz frekansında kırmızı renk ile belirtilen 15° ’ye yönlendirilmiş YUD anten 11.3 GHz frekansında ve yeşil renk ile belirtilen -20° ’ye yönlendirilmiş YUD anten 11 GHz frekansında istenilen açıya ışıma yaptığı görülmektedir. Antenlere ait radyasyon patern grafiğinin istenilen açıya ışıma yapıyor olması, hem üretimin hem de ölçüm sonucunun başarılı olduğunu ifade etmektedir.

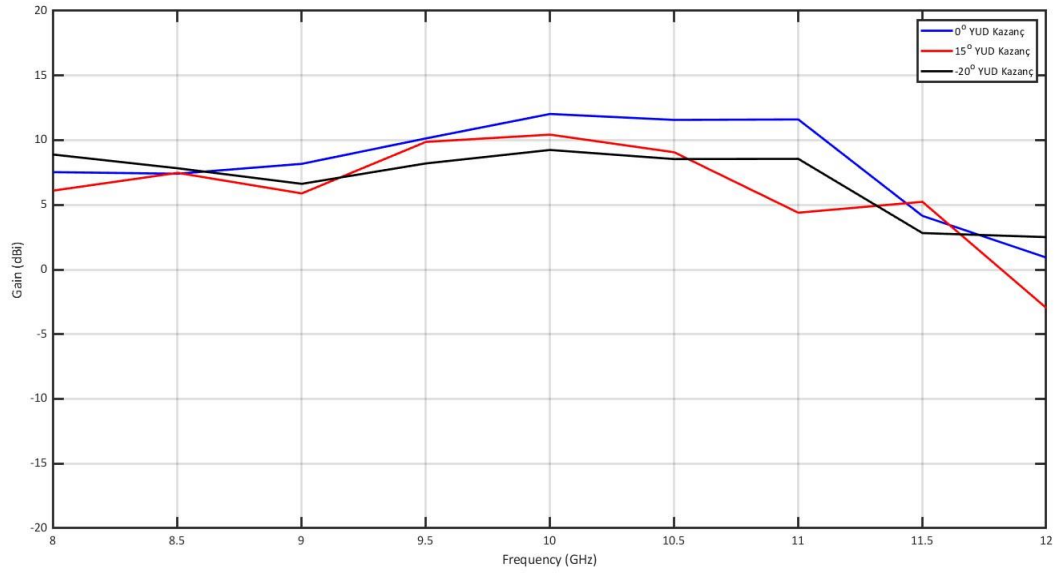
Yansıma katsayısı değerleri ve normalize patern grafikleri incelenen antenlerin, kazanç değerlerini incelemek için Friis denkleminde yararlanılmıştır. 4.1 numaralı Friis denkleminde göre, S parametresi güç ile ilişkilendirilirken, büyüklüğünün karesine eşittir. G_t ve G_r değerlerinin aynı olduğu, λ ifadesinin bilindiği ve antenler arası mesafe olan R ifadesi 0.6 m olarak denkleme girdi sağlamıştır.

$$\frac{P_r}{P_t} = |S_{21}|^2 = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’e göre hesaplanan kazanç grafikleri Şekil 4.8 verilmiştir. Şekil 4.8 a’ya göre ölçüm sonucunda elde edilen kazanç grafiğinde, 0° ’ye yönlendirilmiş DD antenin kazancı 10 dBi olarak görülmektedir. 15° ’ye yönlendirilen antenin, S_{11} grafiğinde ışıma yaptığı merkez frekanstaki kazanç değeri 5 dBi iken, -20° ’ye yönlendirilmiş antenin kazancı 7.5 dBi olarak görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.8 Üretimi yapılan antenlerin kazanç grafiği (a) DD antenlerin kazanç grafiği; (b) YUD antenlerin kazanç grafiği.

Şekil 4.8 b’de verilen YUD antenlere ait kazanç grafiğinde, 0° ’ye yönlendirilmiş YUD anten kazancı 10.9 GHz frekansında 12 dBi olduğu görülmektedir. 11.2 GHz merkez frekansı olan 15° ’ye yönlendirilmiş YUD anten kazancı yaklaşık 5 dBi olarak ölçülmüştür. Son olarak -20° ’ye yönlendirilmiş YUD antenin kazancı 8 dBi olarak görülmektedir.

Son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler neticesinde, İHA'lar kabiliyetleri bakımından değerlendirildiğinde birçok alanda kullanılmakta olup, savaş ortamından, ziraat alanına kadar oldukça çeşitli alanda kullanılan temel havacılık ürünü olmuştur. Başlıca kullanım alanı olan harp ortamındaki keşif ve gözetleme özellikleri sayesinde, ülkelerin envanterlerinde önemli bir yere sahiptir. Tez kapsamında, İHA'ların önemli faydalı yüklerinden biri olan radar sistemlerinin bileşeni olan radar anteninin tasarımı yapılmıştır. X-bant frekansında çalışan bir radar olan SAR sistemi için muadil olabilecek anten tasarımı ve analizi yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında farklı yapı ve özelliklerde anten tasarımları yapılmış, tasarlanan bu antenler CST Microwave Studio aracılığı ile detaylı olarak analiz edilmiştir. Antenler kendi içlerinde malzeme, belirli ölçüler gibi spesifik özellikleri sabit tutularak, besleme şekilleri farklı olacak biçimde tasarım yapılarak birbirleri ile karşılaştırmalı olarak analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

Birim anten olarak tasarlanan bu antenler, dizi anten yapısına dönüştürülerek hüzmeye yönlendirme adımları icra edilmiştir. Bu bölümde de 4×1 boyutunda dizi antenlerde karşılaştırmalı olarak analiz çıktıları verilmiştir. Dizi anten tasarımları asıl amaç olan, İHA yüzeyine uyumlu olabilecek bir anten tasarımı olduğu için YUD anten yapısı tasarlanıp analiz edilmiştir. Tasarlanan antenlerin hedeflendiği gibi X bantta çalışabildiği ve operasyonel olarak uygun çıktılar elde edildiği görülmüştür.

Dizi anten yapısı bozulmadan mikroşerit iletim hattına sahip anten yapısı için Wilkinson güç bölücü devresi tasarlanarak DD ve YUD olarak analiz edilmiştir ve normal dizi analizlerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu doğrultuda, üretimi yapılan antenlerin ölçüm sonuçları, analizi yapılan antenlerin analiz sonuçları ile benzer olduğu görülmüştür. Çalışmanın temel dayanak noktası olan, İHA sistemlerinde sıklıkla kullanılan radar antenlerinin yüzey uyumlu olacak şekilde tasarlanabileceği, bu sayede hava aracının havada kalış süresi ve dolayısı ile görev süresini uzatabilecek efektif, halihazırda kullanılan radar sistemlerine fayda sağlaması muhtemel anten tasarımları elde edilmiştir.

-
- [1] O. Villi ve M. Yakar, “İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri”, *tiha*, c. 4, sy. 2, ss. 73–100, 2022.
- [2] B. Erdil, “İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ile Bu Araçların Türkiye’nin Yurtdışı Operasyonlarındaki Yeri ve Önemi”, *BAD*, c. 5, sy. 2, ss. 581–607, 2021
- [3] A. Körez and N. Barişçi, “İnsansız Hava Aracı (İHA) Görüntülerindeki Yayaların Faster R-CNN Algoritması ile Otomatik Tespiti,” 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 2018, pp. 1-4.
- [4] Türk Havacılık ve Uzay Sanayii “İnsansız hava Araçları” *tusas.com*. Accessed: April 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.tusas.com/urunler/iha/operatif-stratejik-iha-sistemleri/anka>
- [5] J. Xu, Q. Guo, L. Xiao, Z. Li and G. Zhang, "Autonomous Decision-Making Method for Combat Mission of UAV based on Deep Reinforcement Learning," 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chengdu, China, 2019, pp. 538-544.
- [6] Y. Xue, Z. Wang, L. Liu, C. Fang, Y. Sun and H. Chen, "UAV-Assisted Control Design with Stochastic Communication Delays," 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2022, pp. 707-710
- [7] Türk Havacılık ve Uzay Sanayii “İnsansız hava Araçları” *tusas.com*. Accessed: April 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.tusas.com/urunler/iha/operatif-stratejik-iha-sistemleri/anka>
- [8] Meteksan savunma “Meteksan Ürünleri” *meteksan.com*. Accessed: Oct. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.meteksan.com/tr/urunler/radar-sistemleri/milsar-sar-mti-radar>
- [9] S. Dey, P. Satheesh, M. S. Keerthi, N. Kunju and S. Dey, "Novel Dual Band High Gain Antenna Array Using Aperture Coupled Feeding for X-Band Radar" 2023 First International Conference on Microwave, Antenna and Communication (MAC), Prayagraj, India, 2023, pp. 1-5.
- [10] Balanis C. A., “Antenna Theory Analysis and Design”, John Wiley& Son, 2nd ed., New York, 1982, pp 204-282.
- [11] H. S. Setiadji, F. Y. Zulkifli and E. T. Rahardjo, "Radiation characteristics of Microstrip Array Antenna for X-Band Radar application," 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 2016, pp. 3992-3995.
- [12] P. Persson and L. Josefsson, "Calculating the mutual coupling between apertures on convex cylinders using a hybrid UTD-MoM method," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.99CH37010), Orlando, FL, USA, 1999, pp. 890-893 vol.2.
- [13] A. Iqbal *et al.*, "Comparative study of micro strip patch antenna for X band using micro strip line feed and coaxial feed," 2018 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), Lahore, Pakistan, 2018, pp. 1-6.
- [14] P. A. Immagulate, V. J. Rajam, A. S. R. Chrysolite and G. S. Let, "Design and analysis of multiband microstrip antenna using coaxial feed for C & X-

- Band," 2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT), Kollam, India, 2017, pp. 1-4.
- [15] M. Abdullah- Al- Mamun, S. Datto and M. S. Rahman, "Performance Analysis of Rectangular, Circular and Elliptical Shape Microstrip Patch Antenna using Coaxial Probe Feed," 2017 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), Rajshahi, Bangladesh, 2017, pp. 1-4.
- [16] İsa Ataş, M. Bahaddin Kurt, Teymuraz Abbasov, "High Gain Microstrip Antenna Design for 2.4 GHz WLAN Application," in 23'nd Signal Process. and Commun. Appl. Confre, Malatya, Türkiye, 2015, pp 1-3.
- [17] A. Kumar, J. Kaur and R. Singh "Performance analysis of different feeding technique" semanticscholar.org. Accessed: Feb. 5, 2024. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-Analysis-of-Different-Feeding-Kumar-Kaur>
- [18] Hemant Kumar Varshney, Mukesh Kumar, A.K.Jaiswal, Rohini Saxena, Komal Jaiswal, Eds., "Survey on Different Feeding Techniques of Rectangular Microstrip Patch Antenna" ,International Journal of Current Engineering and Technology, June 2014 [Online]. Available: <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2014/05/Paper391418-14231.pdf>
- [19] P. Su, R. Shen and D. Sun, "Design of an S/X Dual-Band Shared Aperture Antenna Array," 2021 CIE International Conference on Radar (Radar), Haikou, Hainan, China, 2021, pp. 2728-2731.
- [20] F. Karaağaç, N. Akcam "Faz Kaymalı Doğrusal Dizi Antenlerde Sıfır Noktalarının Kaydırılması Ve Oruntunun Sekillendirilmesi" Y. Lisans Tezi, Fen Bil. Enst Gazi Un. Ankara, 2005.
- [21] N. F. A. Hakim, N. Sartika, M. Al Qibtiya, S. A. T. Al Azhima, T. Hariyadi and I. Kustiawan, "Analysis of UWB Wilkinson Power Divider Design Using 4-Stepped Patch and Ring Structure," 2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2022, pp. 1-4.
- [22] Y. Liu, W. Chen, X. Li and Z. Feng, "Design of Compact Dual-Band Power Dividers With Frequency-Dependent Division Ratios Based on Multisection Coupled Line," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 3, no. 3, pp. 467-475, March 2013.
- [23] A. Genc and R. Baktur, "Dual- and Triple-Band Wilkinson Power Dividers Based on Composite Right- and Left-Handed Transmission Lines," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 1, no. 3, pp. 327-334, March 2011.
- [24] C. -F. Chen, T. -Y. Huang, T. -M. Shen and R. -B. Wu, "Design of Miniaturized Filtering Power Dividers for System-in-a-Package," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 3, no. 10, pp. 1663-1672, Oct. 2013.
- [25] Y. Liu, L. Xia and R. Xu, "A U-band Wilkinson type UWB power divider in LTCC technology," 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Shenzhen, China, 2012, pp. 1-3.
- [26] F. Y. Zulkifli, T. Hidayat, Basari and E. T. Rahardjo, "Sidelobe level suppression using unequal four-way power divider for proximity coupled microstrip antenna," 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC), Seoul, Korea (South), 2013, pp. 1166-1168.
- [27] B. Dökmetaş, "S-BANT MİKROŞERİT WİLKİNSON GÜÇ BÖLÜCÜ TASARIMI", Journal of Scientific Reports-B, sy. 004, ss. 8–18, Aralık 2021.

[28]Fawwaz T. Ulaby “Radiation and Antennas” Fundamentals Of Applied Electromagnetics, 2nd ed. , New Jersey, 2015, pp 406-452.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

- [1] Nurhan TÜRKER TOKAN, Okan EVREN “Surface-Compatible Electronic Scanning Radar Antenna Design for Unmanned Aerial Vehicles”, Icsas 2nd Int. Conf. on Appl. Sci., Erzurum, Türkiye, April 19-21, 2024.

