

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

X BANT FAZ DİZİLİ ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

MELİH TÜRK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HABERLEŞME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. FİKRET TOKAN**

İSTANBUL, 2019

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

X BAND FAZ DİZİLİ ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Melih TÜRK tarafından hazırlanan tez çalışması 08.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Fikret TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Fikret TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hamid TORPİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Aytaç ALPARSLAN
Trakya Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, geniş frekans bandına sahip yama yapısı oluşturulup bu yapıyı 1 x 8 lineer ve 8 x 8 düzlemsel anten dizilerinde, anten elamanı olarak kullanarak X bant faz dizili mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda anten parametrelerinin iyileştirilmesi ve optimizasyon yoluyla farklı tasarım versiyonları sunulup tasarımlar arasında en iyi özelliklere sahip yapı kullanılarak üretilen anten dizisinin ölçümleri yapılmış olup simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Öncelikle tez konusunu seçerken isteklerimi göz önünde bulundurup, bana yol gösteren ve tasarım aşamasında yıl boyunca benimle çalışmalarda bulunup değerli bilgilerini aktaran tez danışmanım sayın Doç. Dr. Fikret TOKAN'a ve anten üretimi konusunda yardımını esirgemeyen iş arkadaşım sayın Koray SÜRMEİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana her zaman destek olan aileme ve tez çalışmalarım boyunca manevi desteğini esirgemeyen nişanlım Dilara İPLİKÇİ'ye teşekkür ederim.

Ağustos, 2019

Melih TÜRK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	7
BÖLÜM 2	
TEMEL ANTEN PARAMETRELERİ	9
2.1 Giriş Empedansı	9
2.2 Anten Işıma Örüntüsü	10
2.3 Anten Yönlülüğü (Directivity)	12
2.4 Anten Verimi	12
2.5 Anten Kazancı (Gain)	13
2.6 Bant Genişliği (Bandwidth)	13
2.7 Yarım Güç Huzme Genişliği (YGHG)	14
2.8 İstenmeyen Ana Huzme	14
2.9 Aktif S-Parametresi	15
BÖLÜM 3	
MİKROŞERİT YAMA ANTENLER	17
3.1 Mikroşerit Yama Anten Hakkında Genel Bilgiler	17
3.2 Mikroşerit Yama Anten Avantaj ve Dezavantajları	19
3.3 Mikroşerit Yama Anten Bant Genişliği	20
3.4 Mikroşerit Yama Anten Besleme Teknikleri	21
3.4.1 Açıklık Kuplajlı Besleme	21
3.4.2 Yakınlık Kuplajlı Besleme	22
3.4.3 Mikroşerit Besleme	22

3.4.4	Koaksiyel Besleme	23
3.5	Yığılı Yama Anten (Stacked Patches).....	25
3.5.1	Yığılı Yama Tasarımı ve Analizi.....	26
BÖLÜM 4		
ANTEN DİZİ ELEMANI TASARIMI		28
4.1	Tek Katmanlı Klasik Mikroşerit Yama Anten Tasarımı	28
4.2	Yığılı Yapı Mikroşerit Yama Anten Tasarımı	30
BÖLÜM 5		
FAZ DİZİLİ ANTEN		37
5.1	Doğrusal (Lineer) Dizi Anten Analizi.....	39
5.1.1	İki Elemanlı Doğrusal Dizi Analizi	40
5.1.2	N Elemanlı Doğrusal Dizi Analizi	42
5.2	Düzlemsel Dizi Anten Analizi.....	43
BÖLÜM 6		
FAZ DİZİLİ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI		46
6.1	Tasarım Prosedürü	46
6.2	1 x 8 Lineer Faz Dizili Anten Tasarımı ve Analizi	47
6.3	8 x 8 Düzlemsel Faz Dizili Anten Tasarımı ve Analizi.....	77
BÖLÜM 7		
LİNEER DİZİ ANTEN ÜRETİMİ ve ÖLÇÜM SONUÇLARI.....		88
BÖLÜM 8		
SONUÇ VE ÖNERİLER		95
KAYNAKLAR.....		99
EK-A.....		102
FPGA KONTROL KARTI.....		102
A-1	Faz Kontrol Kodu	102
ÖZGEÇMİŞ		127

SİMGE LİSTESİ

c	Işık hızı
d	Dizi anten elemanları besleme noktaları arası uzaklık
dB	Desibel
D	Anten yönlülüğü
E	Elektrik Alan
$\epsilon_r, \epsilon_{eff}$	Dielektrik sabiti, etkin dielektrik sabiti
e	Verimlilik
$f_a, f_{\bar{u}}$	Alt frekans, üst frekans
f_o, f_r	Merkez frekans
G	Anten kazancı
h	Dielektrik malzeme yüksekliği
I_o	Uyarım genliği
k	Faz sabiti
L	Yama boyu
Q_t	Toplam kalite faktörü
Q_{rad}	Işıma kayıpları kalite faktörü
r	Gözlem noktasının antene uzaklığı
S_{11}	Geri dönüş kaybı
t	Yama kalınlığı
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
U	Işıma şiddeti
w	Dizi anten elemanları genlik ağırlığı
W	Yama genişliği
Z_{in}	Anten giriş empedansı
η	Boşluk empedansı
μ_o	Manyetik geçirgenlik sabiti
θ	Küresel koordinat sistemi enlem açısı(yükselme açısı)
ϕ	Küresel koordinat sistemi boylam açısı(yanca açısı)
Γ	Yansıma katsayısı
λ	Dalga boyu
ΔL	Saçak değeri
$\Delta\phi, \beta$	Faz dizili anten elemanlarının faz değerleri

KISALTMA LİSTESİ

AF	Array Factor
BG	Bant Genişliği
BW	Bandwidth
DF	Dizi Faktörü
EKKT	Elektronik Karşı Karşı Tedbir
EMD	Elektromanyetik Dalga
FSY	Frekans Seçici Yüzey
GDDO	Gerilim Duran Dalga Oranı
YGHG	Yarım Güç Huzme Genişliği
YGHG _D	Dikey Düzlemde Yarım Güç Huzme Genişliği
YGHG _Y	Yatay Düzlemde Yarım Güç Huzme Genişliği
RF	Radyo Frekans
RKA	Radar Kesit Alanı
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
UHF	Ultra High Frequency
YLS	Yan Lob Seviyesi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Verici anten ve eşdeğer devresi blok diyagramı	10
Şekil 2.2 Yönlü anten ışıma diyagramı.....	11
Şekil 2.3 Ana huzme ve loblar	11
Şekil 2.4 Kartezyen ışıma diyagramı	12
Şekil 2.5 Yarım güç huzme genişliği.....	14
Şekil 3.1 Mikroşerit yama anten ışıma alanı.....	18
Şekil 3.2 Tek katmanlı mikroşerit yama anten	18
Şekil 3.3 Kullanılan temel yama şekilleri	19
Şekil 3.4 Açıklık kuplajlı besleme	22
Şekil 3.5 Yakınlık kuplajlı besleme	22
Şekil 3.6 Mikroşerit besleme	23
Şekil 3.7 Koaksiyel besleme.....	24
Şekil 3.8 Temel yığılı yama yapısı örnek gösterim.....	25
Şekil 3.9 Temel yığılı yama yapısı ayrıntılı örnek gösterim.....	25
Şekil 4.1 Tek katmanlı mikroşerit yama anten (a) üst görünüm, (b) yan görünüm ...	29
Şekil 4.2 SMA konnektör (a) yan görünüm, (b) üst görünüm	29
Şekil 4.3 Tek katmanlı mikroşerit yama anten S_{11} grafiği	30
Şekil 4.4 Tek katmanlı mikroşerit yama anten $GDDO$ grafiği	30
Şekil 4.5 Yığılı yapı mikroşerit anten (a) önden görünüm, (b) yan görünüm	31
Şekil 4.6 Yığılı yapı mikroşerit yama anten S_{11} grafiği	32
Şekil 4.7 Yığılı yapı mikroşerit yama anten $GDDO$ grafiği.....	32
Şekil 4.8 Yığılı yapıdaki yama antene ait 3-boyutlu ışıma örüntüsü (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz	33
Şekil 4.9 Yığılı yapıdaki yama antene ait polar ışıma örüntüsü (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz	34
Şekil 4.10 Tek katmanlı ve yığılı yapıya ait (a) geri dönüş kaybı (S_{11}), (b) kazanç, (c) toplam verimliliğin frekans ile değişimi	35
Şekil 5.1 Faz dizili anten mimarisi.....	37
Şekil 5.2 Anten koordinat sistemi.....	39
Şekil 5.3 Örnek doğrusal dizi anten yerleşimi	39
Şekil 5.4 İki elemanlı doğrusal dizi (a) yakın alan davranışı , (b) uzak alan davranışı	40
Şekil 5.5 İki elemanlı dizinin (a) DF örüntüsü, (b) eleman örüntüsü, (c) toplam ışıma örüntüsü.....	42
Şekil 5.6 z-eksenine yerleştirilmiş N -elemanlı doğrusal dizi anten yerleşimi.....	43

Şekil 5.7	Düzlemsel dizi anten dizilimi.....	44
Şekil 6.1	Lineer dizi ilk tasarım (a) üst görünüm, (b) alt görünüm, (c) perspektif görünüm (parametreler: en x boy=20 x 160 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.25$ mm, $W_2=11.25$ mm).....	49
Şekil 6.2	Tasarım-1 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	50
Şekil 6.3	Tasarım-1 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	51
Şekil 6.4	Tasarım-1 aktif S-parametreleri ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$).....	52
Şekil 6.5	Tasarım-1 aktif S-parametreleri ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$).....	52
Şekil 6.6	Tasarım-1 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	53
Şekil 6.7	Tasarım-1 polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	54
Şekil 6.8	Lineer dizi tasarım-2 perspektif görünüm (parametreler: en x boy=27 x 168 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.25$ mm, $W_2=11.25$ mm).....	56
Şekil 6.9	Tasarım-2 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	57
Şekil 6.10	Tasarım-2 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	58
Şekil 6.11	Tasarım-2 aktif S-parametreleri ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$).....	59
Şekil 6.12	Tasarım-2 aktif S-parametreleri ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$).....	59
Şekil 6.13	Tasarım-2 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	60
Şekil 6.14	Tasarım-2 polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	61
Şekil 6.15	Dolph-Chebyshev fonksiyonu ($L=8, r=30$ dB).....	63
Şekil 6.16	Lineer dizi tasarım-3 perspektif Görünüm (en x boy=27 x 168 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.25$ mm, $W_2=11.25$ mm).....	63
Şekil 6.17	Tasarım-3 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	65
Şekil 6.18	Tasarım-3 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	66
Şekil 6.19	Tasarım-3 aktif S-parametreleri ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$).....	66
Şekil 6.20	Tasarım-3 aktif S-parametreleri ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$).....	67
Şekil 6.21	Tasarım-3 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	68
Şekil 6.22	Tasarım-3 polar örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	69
Şekil 6.23	Lineer dizi tasarım-4 arka görünüm (en x boy=45 x 190 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.8$ mm, $W_2=9.65$ mm).....	71
Şekil 6.24	Tasarım-4 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, asimetrik yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	72
Şekil 6.25	Tasarım-4 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, asimetrik yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	73
Şekil 6.26	Tasarım-4 aktif S-parametreleri grafiği ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$).....	74

Şekil 6.27	Tasarım-4 aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$)	74
Şekil 6.28	Tasarım-4 aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=40^\circ$, $\phi=0^\circ$)	74
Şekil 6.29	Tasarım-4 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, <i>asimetrik</i> yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	75
Şekil 6.30	Tasarım-4 polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, <i>asimetrik</i> yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	76
Şekil 6.31	Düzlemsel dizi (a) üst görünüm, (b) alt görünüm, (c) perspektif görünüm (<i>parametreler</i> : $en \times boy=160 \times 160 \text{ mm}$, $dx, dy=0.54 \lambda$, $L_1=8.8 \text{ mm}$, $W_1=9.1 \text{ mm}$, $L_2=10.7 \text{ mm}$, $W_2=9.09 \text{ mm}$).....	80
Şekil 6.32	Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü (8 GHz, <i>E</i> -düzlemi) (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$	80
Şekil 6.33	Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü (8 GHz, <i>E</i> -düzlemi) (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$	81
Şekil 6.34	Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü (9 GHz, <i>E</i> -düzlemi) (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$	81
Şekil 6.35	Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü (9 GHz, <i>E</i> -düzlemi) (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$	82
Şekil 6.36	Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü (10 GHz, <i>E</i> -düzlemi) (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$	82
Şekil 6.37	Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü (10 GHz, <i>E</i> -düzlemi) (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$	83
Şekil 6.38	Düzlemsel dizi aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=0^\circ$, <i>E</i> -düzlemi)	83
Şekil 6.39	Düzlemsel dizi aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=40^\circ$, <i>E</i> -düzlemi)	84
Şekil 6.40	Düzlemsel dizi aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=50^\circ$, <i>E</i> -düzlemi)	84
Şekil 6.41	Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, <i>H</i> -düzlemi) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	85
Şekil 6.42	Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, <i>H</i> -düzlemi) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz.....	86
Şekil 6.43	Düzlemsel dizi aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=30^\circ$, <i>H</i> -düzlemi)	86
Şekil 6.44	Düzlemsel dizi aktif <i>S</i> -parametreleri grafiği ($\theta=40^\circ$, <i>H</i> -düzlemi)	87
Şekil 7.1	Üretilen lineer anten dielektrik katmanlar Rogers 4003C ve Rogers 5880 üstten görünüm	88
Şekil 7.2	Üretilen lineer anten (a) yan görünüm, (b) alttan görünüm	89
Şekil 7.3	Anten besleme noktaları arasındaki uzaklık	89
Şekil 7.4	Anten en ve boy uzunlukları	90
Şekil 7.5	Antenin (a) besleme ağı ile ölçüme hazır hale getirilmesi ,(b) ölçüm düzeneğine yerleşimi	90
Şekil 7.6	Yansız oda anten ölçüm düzeneği	91
Şekil 7.7	Normalize ışıma örüntüsü ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (a) 8 GHz'de, (b) 9 GHz'de, (c) 10 GHz'de	92
Şekil 7.8	Co-pol ve Cross-pol ölçüm sonuçları grafiği (9-GHz)	93
Şekil 7.9	Üretilen lineer dizi antene ait aktif <i>S</i> -parametreleri ölçüm grafiği ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$)	93
Şekil 7.10	Üretilen lineer faz dizili anten mimarisi	94
Şekil 8.1	Lineer faz dizili anten huzme tarama açıları	97
Şekil 8.2	Düzlemsel faz dizili anten huzme tarama açıları (<i>E</i> -düzlemi)	97

Şekil 8.3	Düzlemsel faz dizili anten huzme tarama açıları (H -düzlemi).....	98
-----------	--	----



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1	Tek katmanlı anten tasarım boyutları 29
Çizelge 4.2	Yığılı yapı anten tasarım boyutları..... 31
Çizelge 4.3	Tek katmanlı ile yığılı yapı parametrik karşılaştırma 36
Çizelge 6.1	Tasarım kriterleri 47
Çizelge 6.2	Lineer dizide huzme yönlenme açılarına göre “istenmeyen ana huzme” oluşmadan verilecek maksimum “ d ” mesafeleri 47
Çizelge 6.3	Tasarım-1 anten parametreleri 48
Çizelge 6.4	Tasarım-2 anten parametreleri 55
Çizelge 6.5	Tasarım-3 anten parametreleri 62
Çizelge 6.6	Tasarım-4 anten parametreleri 70
Çizelge 6.7	Düzlemsel dizide huzme yönlenme açılarına göre “istenmeyen ana huzme” oluşmadan verilecek maksimum “ d ” mesafeleri..... 77
Çizelge 6.8	Düzlemsel dizi anten tasarım parametreleri 78
Çizelge 8.1	Tasarım-4 anten elemanları faz kayma açıları 96

X-BAND FAZ DİZİLİ ANTEN TASARIMI VE ANALİZİ

Melih TÜRK

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fikret TOKAN

Anten ışıma örüntüsünün farklı doğrultulara yönlendirilmesi mekanik olarak döndürme ve elektronik olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilir. Mekanik yönlenmede huzmenin farklı hedeflerin üzerinden geçmesi milisaniye seviyesindedir. Bu da hedef tespit ve takip performansı için büyük bir dezavantaj teşkil etmektedir. Bu olumsuzluğu aşmak ve elektronik huzme taraması yapmak için faz dizili anten yapıları tasarlanmaktadır. Bu yapıda anten dizimizdeki her bir eleman farklı faz ve genlik değerleriyle beslenmektedir. Faz kaydırıcılar sayesinde tarama açısı içerisinde her bir elemanın ana ışıma lobu aynı doğrultuya yönlendirilir ve belirlenen sınırlar taranır. Huzme yönlendirme mekanik olarak değil de faz kaydırıcılar vasıtasıyla yapıldığından huzme yönlendirme için gereken süre mikro saniyeler mertebesinde.

Bu tez çalışmasında X-bant (8-10 GHz) lineer ve düzlemsel faz dizili mikroşerit yama anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Lineer anten dizisi 8 elemandan oluşmaktadır 1 x 8 şeklinde x-düzleminde dizilmiştir. Düzlemsel anten dizisi ise 64 elemandan oluşmaktadır ve 8 x 8 şeklinde x-y düzlemlerinde dizilmiştir. Anten elemanı olarak katmanlı patch yapısı tasarlanmıştır. Alt katman dielektrik sabiti düşük olan malzeme ($\epsilon_r = 3.3$) ve yamalardan üst katman ise dielektrik katsayısı daha da düşük ($\epsilon_r = 1.07$) köpük benzer bir malzeme ve yamalardan oluşmaktadır. Bu yapı ile mikroşerit antenin bant genişliği %3.8'den %23 seviyesine çıkmıştır. Lineer faz dizili antenin kazancı tüm çalışma aralığında 14 dB ile 16 dB arasında değer almıştır. Anten elemanlarına genlik ağırlıklandırma uygulanarak yan lob seviyelerinin bastırıldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra anten geometrisi asimetrik olarak tasarlandığında ana huzme karşıya ışıma

yaparken oluşan arka lob seviyesi ana loba göre -18 *dB* seviyesinden -30 *dB* seviyelerine düşürülmüştür. Düzlemsel faz dizili anten kazancı ise tüm çalışma aralığında 21.5 *dB* ile 25 *dB* arasında değer almıştır. Tasarlanan faz dizili mikroşerit antenler X-bantta çalışan bir İHA tespit radar sisteminde lineer dizi verici, düzlemsel dizi ise alıcı anten olarak mobil bir sistem şeklinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Faz Dizili Anten Dizisi, Mikroşerit Anten, Elektronik Huzme Yönlendirme, X-bant Radar



X-BAND PHASED ARRAY ANTENNA DESIGN and ANALYSIS

Melih TÜRK

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Fikret TOKAN

Beam scanning can be done in 2 different ways: mechanical rotation and electronic. In mechanical Scanning, the beam passes over different targets in milliseconds. This is a major disadvantage for target performance. Phased array antenna structures are designed to overcome this drawback and perform electronic beam scanning. In this structure, each element in our antenna array is fed with different phase and amplitude values. By means of phase shifters, the main radiation lobe of each element in the scanning angle is directed in the same direction and the determined limits are scanned. Since the beam scanning is made by means of phase shifters rather than mechanically, the time required for beam Steering is in the order of micro seconds.

In this thesis, X-band (8-10 GHz) phase array microstrip patch antenna design has been realized. The linear antenna array is consist of 8 elements and they sequenced on x-plane. The planar antenna array is consist of 64 elements and they sequenced both x and y planes. The stacked patch structure is designed as the antenna element. The lower layer consists of a material with a low dielectric constant ($\epsilon_r = 3.3$) and the upper layer consists of a foam-like material with a lower dielectric coefficient ($\epsilon_r = 1.07$) and a patch antenna with a lower dielectric constant. With this structure, the bandwidth of the microstrip antenna has increased from %3.8 to 23%. The gain of array is seen in the whole working range between 14 dB and 16 dB. Array elements were observed to suppress side lobe levels by applying amplitude tapering. In addition, the antenna geometry was designed asymmetrically and the back lobe level was

reduced from -18 dB to -30 dB levels compared to the main lobe. Planar phase array antenna gain is between 21.5 dB and 25 dB in the whole working range. The designed phase array microstrip antennas can be used a X-band mobile UAV (Unmanned Aerial Vehicles) detection radar system.

Keywords: Phased Array Antenna, Microstrip antenna, Electronic Beam Scan, X-Band Radar System



1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde, bu tez kapsamında yürütülen çalışmalar ile ortak paydaları olan ve tezin ilerleyiş sürecine altyapı sağlayan literatür özeti sunulmuştur. Yapılan çalışmaları tez içerisindeki aşamalar doğrultusunda sırası ile inceleyecek olursak:

J. Q. Howell (1975), çalışmasında dielektrik kalınlığının ve dielektrik sabitinin bant genişliğine etkisini incelemiştir. Dielektrik malzemenin kalınlığı arttıkça veya dielektrik sabiti küçüldükçe mikroşerit antenin bant genişliğinin arttığını söylemiştir. Bu çalışmaları yama farkı yama şekillerinde (kare, dikdörtgen, daire) gerçekleştirmiştir. Tasarladığı anten için lineer ve dairesel polarizasyon için sonuçlar almıştır. Bunların neticesinde 4-7 *dB* arasında bir anten kazancı elde etmiştir. Mikroşerit antenlerin hafif, portatif, ucuz maliyetli, tasarım ve üretim kolaylığı sebepleriyle UHF bandından X bant aralığına kadar düşük profilli uygulamalarda kullanılabilmesi için öneride bulunmuştur [1].

A.Bhattacharyya (1988), çalışmasında yama antenini yağmur, sis ve kar gibi çevresel şartlardan korunması amacıyla antenin en üst tabakasına ince bir dielektrik koruyucu katman ekledi ve bu dielektrik katmanın mikroşerit anten üzerindeki etkisini inceledi. Antenin rezonans frekansının yama boyutlarının, dielektrik malzemenin dielektrik sabitinin ve kalınlığının bir fonksiyonu olduğunu söyledi. En üstte eklenen koruyucu katmanın dielektrik kalınlığı arttıkça anten rezonans frekansının azaldığını ancak çalışma bant genişliğinin bundan etkilenmediğini gösterdi. Bant genişliği için -10 *dB* geri dönüş kaybı değerlerini kriter olarak kullandı [2].

D.Guha ve J.Y.Sissiqui (2003), çalışmalarında koruyucu dielektrik katmana sahip mikroşerit antenler için rezonans frekansı hesabının matematiksel analizini yapıp önceki çalışmalarla geniş bir kıyaslama tablosu oluşturdular. Analizler sonucu belirledikleri rezonans frekans formülünün düşük ve yüksek dielektrik sabitine sahip koruyucu dielektrik katman kullanımlarında doğru hesaplamalar için uygun olacağını söylediler [3].

A. Elfatimi, S. Bri ve A. Saadi (2018), mikroşerit antenlerin besleme yöntemleri ve yama şekilleri ile ilgili karşılaştırmalı bir çalışma yayınladılar. Çalışmalarında 2.45 GHz rezonans frekansına sahip bir mikroşerit antenin geri dönüş kaybı, bant genişliği, kazanç ve ışıma verimi parametrelerini mikroşerit ve koaksiyel besleme yöntemleri için karşılaştırıp detaylı bir analiz sonucu elde ettiler. Aynı anten parametrelerini dikdörtgen, daire ve üçgen yama şekillerini karşılaştırmak için de kullandılar. Elde ettikleri sonuca göre mikroşerit besleme kazanç ve geri dönüş kaybı değerlerinde daha iyi sonuç verirken koaksiyel besleme yöntemi % 5-6 daha fazla bir bant genişliği sunmaktadır. Bunun yanı sıra dikdörtgen yama şekli diğer yama şekillerine göre daha geniş bir bant ve daha büyük bir kazanç sunmaktadır [4].

W. F. Richards, Y. T. LO ve D. D. Harrison (1981), çalışmalarında mikroşerit anten besleme noktasının konumunun etkisi ile ilgili basit ve etkili bir teori sundu. Buna göre besleme noktasının değişimi ile anten giriş empedansı geniş bir aralıkta değişkenlik göstermektedir. Teori ayrıca çok girişli anten konfigürasyonu için de denenerek deney sonuçları ve teori büyük ölçüde tutarlı sonuçlar verdi [5].

Nasimuddin, P. Esselle ve A.K. Verma (2006), çalışmalarında dairesel polarizasyonlu yığılı mikroşerit antende en iyi koaksiyel besleme noktasının belirlenmesi için yeni bir teknik geliştirdiler. Buna göre besleme noktasının iyileştirmesi ile % 19.5'lik bant genişliği elde ettiler [6].

J. S. Dahale ve K. F. Lee (1985), çalışmalarında dielektrik alt tabaka ile toprak katmanı arasına ayarlanabilir hava boşluğu bırakılarak mikroşerit anten rezonans frekansının değişebileceğini ve bant genişliğinin de arttırılabileceğini söylediler [7].

A. A. Kishk ve L. Shafai (1986), çalışmalarında yığılı yapının ışıma örüntüsü ve bant genişliğini araştırdılar. Klasik mikroşerit antenlerin kullanımındaki avantajlarının yanı

sıra % 2-3 gibi dar bant genişliğine sahiptiler. Bant genişliği normalde dielektrik alt tabakanın kalınlığı ve dielektrik sabitine (ϵ_r) bağlı olduğu biliniyordu. Dielektrik kalınlığı arttırılarak veya ϵ_r değerini azaltarak bant genişliğinin arttırılması sağlanmakta ancak bu durum maliyetli ve pratik değişikliklere uygun değildi. Bu sebeple bant genişliğinin arttırılması için farklı bir method üzerinde çalıştılar. Birden fazla boyutları birbirinden farklı yamanın yığılı yapıda kullanılarak tasarladıkları antende ilk katmanda ışıyan yama üst katmanda ise parazitik yama kullandılar. Alt ve üst katman arasındaki mesafeyi ayarlayarak bant genişliğinde önemli ölçüde iyileştirmeler ve ayarlamalar yapılabildiğini gösterdiler [8].

H. K. Smith ve P. E. Mayes (1987), çalışmalarında tek katmanlı mikroşerit anten ile iki katmanlı mikroşerit antenin bant genişliği açısından karşılaştırmasını yaptılar. İki katmanda da aynı boyutlara sahip yama kullandılar. Ölçümler sonucu bant genişliği tek katmanlı yapıda % 3.3 iken iki katmanlı yapıda % 8.8 olarak bulunmuştur. Böylece bant genişliği yaklaşık iki buçuk kat artması sağlanmıştır. Bununla birlikte anten ışıma örüntüsünde iki tasarım arasında önemli bir fark gözlenmemiştir [9].

J. Xu (1995), çalışmasında yığılı mikroşerit antenin uzak alan ışıma örüntüsü analizi için yeni bir numerik teknik sundu. Spektral uzayında tanımlı olan teknikte, farklı katmanlardaki elektrik alan etkileşimlerini Green fonksiyonu ile hesaplayarak anten ışıma örüntüsünü çıkarmak için kullanıldı. Numerik hesaplamalar geliştirilen antenin ölçümleri ile karşılaştırıldı ve benzer sonuçlar elde edildi [10].

R. B. Waterhouse (1999), çalışmasında % 25'lik bir bant genişliğine sahip yığılı mikroşerit anten tasarımı sundu. Bu değere ulaşmak için düşük dielektrik sabiti (ϵ_{r1}) değerine sahip malzemeyi alt katman olarak kullanırken köpük benzeri (ϵ_{r2}) dielektrik malzemeyi ise üst katman olarak kullandı. Katmanlar için $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$ olan malzemeler kullandı. Tasarımını dikdörtgen ve dairesel yama yapıları için karşılaştırdığında dikdörtgen yamaya sahip antenin dairesel yamaya sahip antene göre empedans kontrolü için daha esnek ve daha geniş bir aç aralığına sahip olduğunu söyledi. Bu sebeple geniş bant yığılı mikroşerit anten uygulamalarında yama şekli olarak dikdörtgen yamayı önerdi. İncelediği bir diğer parametre ise anten besleme noktasının yama üzerindeki yeri idi. Bununla birlikte besleme noktasının yama üzerindeki yerinin

iyileştirilmesinin ile anten bant genişliğine olumlu bir katkısı olmadığını sadece daha iyi bir empedans uyumlaması sağladığını belirtmiştir [11].

E. Nishiyama, M. Aikawa ve S. Egashira (2004), çalışmalarında 7.5 GHz merkez çalışma frekansı olan yığılı mikroşerit antenin yüksek kazanç ve bant genişliğine sahip olabilmesi için yaptıkları analizler sonucu parazitik yama ile ışıyan yamanın boyutları hemen hemen aynı olduğunda ve aralarındaki mesafe h_p 0.1 λ olduğunda bant genişliğinin arttığını, bu mesafenin yaklaşık 0.5 λ olması durumunda kazancın da büyük oranda arttığını belirtmişlerdir. Tasarımlarında h_p mesafesi 0.5 λ iken 9.43 dB kazanç elde ederken bu değer h_p 0.4 λ ve 0.6 λ iken azalmıştır [12].

M. A. Dahab, H. H. M. Ghouz ve A. Z. A. Zaki (2016), çalışmalarında 10 GHz'de çalışan mikroşerit yama antenin kazanç ve ışıma verimi arttırmak için frekans seçici yüzey tasarladılar (FSY). Tasarladıkları FSY yapısını antenin üzerinde koruyucu katman olacak şekilde yerleştirdiler. FSY'li yapı ile FSY'siz yapıyı karşılaştırdıklarında bant genişliği 600 MHz'den 250 MHz'e düşerken % 48'lik kazanç artışı ve ışıma veriminde % 94.3'ten % 97'ye yükselme sağladılar [13].

Anders G. Derneryd (1976), çalışmasında lineer polarizeli bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirdi. Mikroşerit antenin besleme hattı için yarım dalga rezonatör tasarladı ve bu şekilde yapılan ışımanın sonuçlarını inceledi. Tasarladığı anten elemanı ile 4 elemanlı 9 GHz çalışma frekansına sahip lineer bir dizi tasarladı. 1 x 4 lük mikroşerit anten dizisi ile 13.3 dB anten kazancı elde ederken huzme genişlikleri E-düzlemi ve H-düzlemi için sırasıyla 20° ve 68° oldu [14].

H. S. Noh ve U. H. Park (2006), çalışmalarında Ku bantta verici ve alıcı olarak çalışabilen lineer 1 x 8 mikroşerit dizi anten tasarımı ve analizi yaptılar. Dizi anteni yatay polarizasyonda alıcı olarak, dikey polarizasyonda ise verici olarak kullandılar. Dizi anten elemanı olarak yığılı yapı mikroşerit anten kullandılar. Yığılı yapı 1 adet ışıyan yama ve 2 adet parazitik yamadan oluşmaktaydı. Anten alıcı ve verici durumda çalışırken sırası ile 17 ve 18 dB kazanç değerine sahipken iki modda da % 10'luk bir bant genişliğine sahipti. Bunlarla birlikte -25 dB çapraz polarizasyon değeri ve -9.4 dB'lik yan lob seviyesi ölçtüler [15].

Y. İpekoğlu, Ş. Saraydemir (2016), çalışmalarında radar uygulamasına yönelik 4 GHz çalışma frekansı olan mikroşerit dizi anten tasarımı gerçekleştirdiler. 1 x 1, 1 x 2, 1 x 4 ve 1 x 8'lik dizi antenleri *GDDO* (Gerilim Duran Dalga Oranı), geri dönüş kaybı, bant genişliği, ışıma örüntüleri, verimlilik, yarı güç huzme genişlikleri ve yan lob seviyeleri açısından karşılaştırdıklarında dar ışıma karakteristiğine sahip 1 x 8 (*YGHG* 10.4°) anten dizisinin radar uygulamasına uygun olacağı sonucunu vermişlerdir [16].

N. Bayat, H. R. Hassani ve S. Mohammad (2011), çalışmalarında 1 x 16 koaksiyel beslemeli mikroşerit anten dizisinin yan lob seviyesi (*YLS*) düşürmek için anten portlarına Chebysev genlik dağılımı uyguladılar. Uygulama sonucu dizi antenin kazancı 18.2 dB ölçülürken *YLS* değerinde 4.2 dB'lik bir iyileşme elde edildi [17].

G. Jain, R. Kumar ve J. Ghosh (2014), çalışmalarında 5.5 GHz frekansında çalışan iki adet 1 X 4 dizi anten tasarımı gerçekleştirdi. İlk antende klasik eşit genlik beslemesi kullanırken ikinci antene Tschebyscheff genlik ağırlıklandırılması uygulandı. Elde edilen sonuçlara göre ilk antenin yan lob seviyesi -12.7 dB iken ikinci antende bu değer -15.4 dB olarak ölçüldü. Böylelikle yan lob seviyesinde -2.7 dB'lik bir iyileşme sağlanmıştır [18].

Silveria, E.S., Nascimento, D.C. ve Tinoco, A.F. (2017), çalışmalarında lineer mikroşerit antenin arka lob ışımasını azaltmak için antenin toprak düzlemi ile birlikte asimetrik tasarımı gerçekleştirdiler. Çalışmalarında 1 x 4 lük lineer dizi anten kullandılar. Dizi antenin ortasından sanal bir çizgi çektiklerinde besleme noktaları tarafında kalan parçanın diğer parçaya göre en uzunluğunu 2 kat olarak ayarlayarak asimetrik bir yapı elde ettiler. Analiz sonucunda asimetrik yapının arka lob seviyesinin simetrik yapıya göre -20 dB düştüğünü gösterdiler [19].

Yazdi, S. R., Chamaani, S. ve Ahmadi, S.A. (2015), çalışmalarında 1 x 5 lineer faz dizili mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirdiler. Çalışma frekansı 5.8 GHz olan dizi antende anten elemanları arasındaki mesafe 0.7λ olarak seçildi. Yan lob seviyesi -9 dB civarında çıkan antende istenmeyen ana huzme oluşmadan yapılan tarama alanı -30° ile 30° olarak görüldü [20].

Chen, S., Toit, C., Hersey, K., Pao, D. ve Karasack V. (2001), çalışmalarında 16 x 16 elemanlı bir düzlemsel faz dizili anteni tasarlayıp analiz ettiler. 28 GHz frekansında

alışan ve tarama açısı 0° iken 22.5 dB'lik bir kazana sahip olan düzlemsel dizi anten uniform genlik dağılımlı besleme durumunda yan lob seviyesi -12 dB olarak ölçüldü. İstenmeyen ana huzme oluşmadan ulaştıkları tarama açıları E-düzleminde $\pm 45^\circ$ iken bu değer H-düzleminde $\pm 30^\circ$ olarak ölçülmüştür. Huzme $\pm 45^\circ$ yönlendiğinde kazançta 2.5 dB düşüş oluşmuştur [21].

Gulbrandsen, F. (2013), tez çalışmasında X bant 8 x 8 düzlemsel faz dizili mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirdi. Çalışma frekansı 8-8.5 GHz olan düzlemsel antende elemanlar arasındaki boşluk her iki düzlemde de 16.5 mm olarak belirlendi. %96'lık bir verime sahip antende yarım g huzme genişliği, anten broadside ışıma yaptığında 14° olarak ölçülmüştür. Bu yapı ile elde ettiği sonuçlara göre E-düzleminde $\pm 55^\circ$ lik bir tarama alanı elde ederken bu değer H-düzleminde $\pm 45^\circ$ olarak ölçülmüştür [22].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışması kapsamında insansız hava aracı gibi küçük boyuttaki nesneleri tespit etmek ve anten yapısının portatif, küçük olması düşünüldüğünden X bant (8-10 GHz) frekans bandı içerisinde çalışabilen lineer ve düzlemsel faz dizili mikroşerit yama anten dizisi yapılarının tasarımının analizinin gerçekleştirilmesi bununla birlikte lineer dizi anten üretilmesi ve üretim sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Faz dizili yapıya geçmeden önce dizi anten için uygun anten elemanı tasarlanmış ve anten parametleri (band genişliği, kazanç, geri dönüş kaybı, ışıma diyagramları, ışıma verimliliği gibi) bakımından uygunluğu analiz edilmiştir. Ayrıca bu tasarım süresince istenilen sonuç doğrultusunda iyileştirmeler gerçeklenmiştir. Mikroşerit yama antenlerin en bk dezavantajlarından biri dar bantta çalışıyor olmalarıdır. Oluşturulan dizi antenin, dizi elemanının tasarımı gerçekleştirilirken tek katmanlı yama anten yapısının yığılı yapıya dönüştürülerek kullanılması ve X bant frekans bandında anten parametrelerinin uygun değerler için analiz edilerek lineer ve düzlemsel dizi tasarımlarına ışık tutması amaçlanmıştır.

Oluşturulan mikroşerit dizi anten yapısının faz dizili olarak çalışması için gerekli değişiklikler ve analizler yapılıp sonuçların yorumlanması ve uygun anten parametrelerinde optimum değerlere ulaşılması hedeflenmiştir. Tasarlanan antenin faz dizili yapıda elektronik huzme yönlendirme için kullanılması adına gerekli

optimizasyonları ve gereksinimleri incelenecektir. Hedeflenen huzme tarama aralıkları lineer dizi için $\pm 40^\circ$ iken düzlemsel anten dizisinde her iki düzlemde $\pm 40^\circ$ olması amaçlanmıştır.

Lineer ve düzlemsel anten tasarımlarının çalışma bandı olarak seçilen X bant frekans bandında 2 GHz'lik bir band genişliği (%25) içerisinde çalışması hedeflenmiştir. Geniş bant çalışma isteği, tasarlanan anten yapısının radar uygulamalarında kullanılabilir olması ve elektronik harp tekniklerinden Elektronik Karşı Karşı Tedbir (EKKT) kapsamında frekans atlama özelliğinden yararlanılmak istenmesidir. Ayrıca Elektronik huzme tarama ile de EKKT kapsamında yapının kullanılabilir olması amaçlanmıştır.

Özetle tez kapsamında yapılan çalışmanın amaçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Geniş bantta çalışabilen lineer mikroşerit yama anten dizisi tasarımı
- Geniş bantta çalışabilen düzlemsel mikroşerit yama anten dizisi tasarımı
- Faz dizili anten yapısının incelenmesi
- Lineer ve düzlemsel yama anten yapılarının radar sistemlerinde alıcı ve verici anten olarak kullanılabilirliği
- Lineer mikroşerit yama anten üretimi ve anten parametrelerinin ölçülmesi

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, 8-10 GHz frekans bandında çalışabilen mikroşerit faz dizili lineer ve düzlemsel anten tasarımı yapılacaktır. İlk olarak dizi anten elemanı tasarlanacak ve geniş bantta çalışmaya uygun hale getirilecektir. Dar bant genişliğine sahip olan tek katmanlı klasik mikroşerit anten, yığılı yapı kullanılarak geniş bantta kullanılacaktır. Elektronik huzme taraması sağlanması için 1 x 8 lineer faz dizili mikroşerit anten için $-30^\circ +30^\circ$ arası huzme taraması yapılırken 8 x 8 düzlemsel faz dizili mikroşerit anten için yatayda $-30^\circ +30^\circ$ iken düşeyde $-40^\circ +40^\circ$ huzme taraması yapılacaktır.

Lineer faz dizili mikroşerit anten için anten elemanları giriş beslemelerine Chebyshev fonksiyonu kullanılarak genlik ağırlıklandırması uygulanarak yan lob seviyelerinin bastırılması sağlanacaktır. Genlik ağırlıklandırılması uygulandığı halde anten karşıya

ışıma yaptığında oluşan arka lob seviyesinin bastırılması için ise anten tasarımında asimetrik yapı kullanılarak arka lob seviyesinin bastırılması sağlanacaktır.



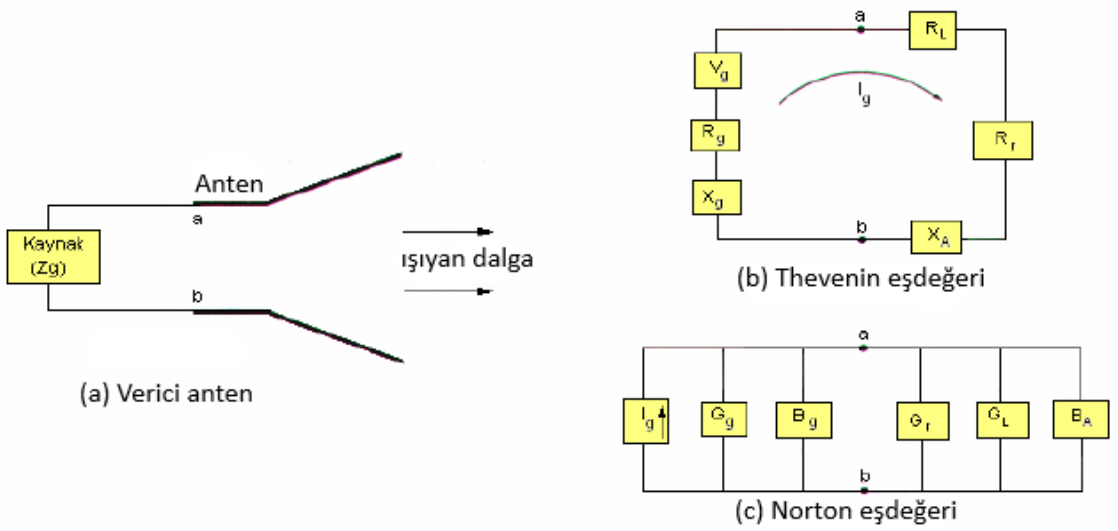
TEMEL ANTEN PARAMETRELERİ

Bu bölümde temel anten parametrelerinin anten teorisinde geçen genel ifadelerinden bahsedilmiştir. Anten parametreleri bir anten tasarımı ve analizi öncesinde dikkatle incelenmeli ve nihai tasarım doğrultusunda yön verici unsurlar olmaktadır. Bu çalışma öncesinde de tasarıma karar verilirken her bir iterasyonda ilgili anten parametreleri dikkatle incelenmiş ve tasarımlar arasında karşılaştırmalar yapılarak en uygun değerler seçilmeye çalışılmıştır.

Anten karakteristiğini, kullanım amacını ve tasarıma yönelik kısıtlamalar getirebilen temel anten parametreleri aşağıda alt başlıklar halinde kısaca özetlenmiştir.

2.1 Giriş Empedansı

Anten giriş empedansı, anten terminallerindeki oluşan gerilimin akıma oranı olarak tanımlanabilir ve hesaplanır. Anten giriş empedansı, eşitlik (2.1)'de belirtildiği gibi ifade edilebilir [23]. Şekil 2.1'de anten giriş terminali (a-b) şeklinde gösterilmiş olup verici anten girişi ve kaynağın oluşturduğu eşdeğer devreler verilmiştir. Eşdeğer devreleri kullanarak anten devre analizi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.1 Verici anten ve eşdeğer devresi blok diyagramı

$$R_A = R_r + R_L \quad (2.1)$$

Burada R_A giriş direncini, X_A giriş reaktansı, Z_A antenin giriş empedansını ifade eder.

R_A direnci (2.2) eşitliğinde verildiği üzere iki bileşenden oluşur [23].

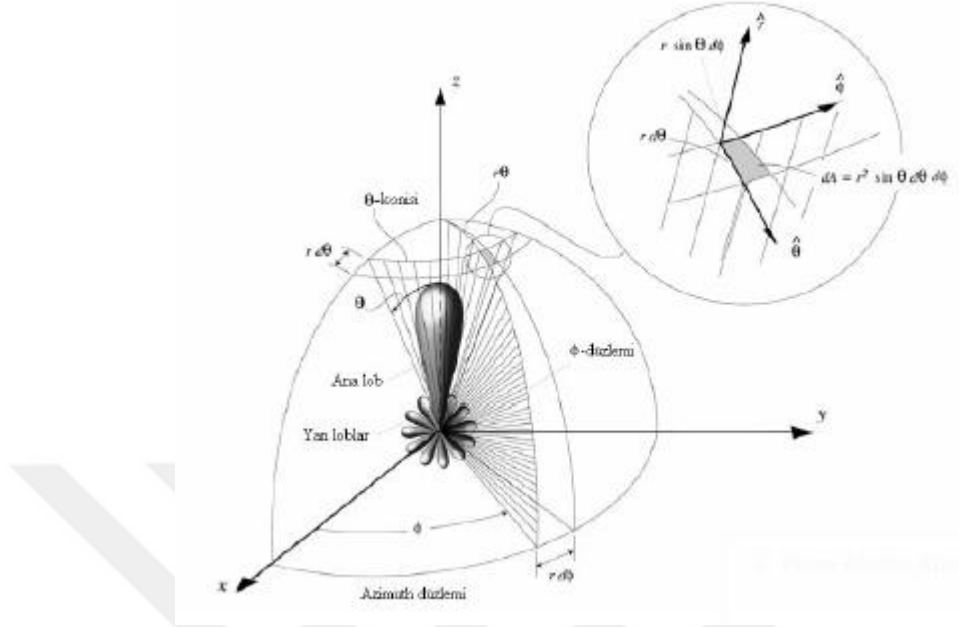
$$R_A = R_r + R_L \quad (2.2)$$

Burada R_r antenin ışıma direnci, R_L antenin kayıp direncini ifade eder. Birimleri ohm 'dur.

2.2 Anten Işıma Örüntüsü

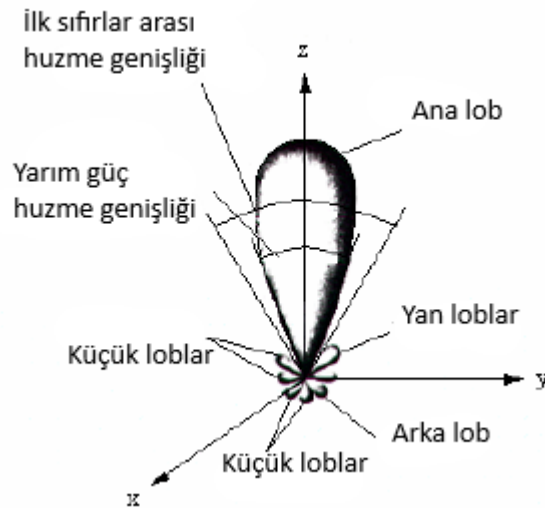
Anten ışıma diyagramı tanımlarken kullanılan en genel hal, “*uzay koordinatlarına bağlı olarak antenin ışıma özelliklerinin grafiksel gösterimidir*”. Işıma diyagramları genel olarak uzak alan bölgesinde anlam kazanır. Işıma diyagramları elektrik alan, güç ve güç ışıma yoğunluğu büyüklüklerine bağlı olarak çizilebilir. Çizdirilen grafikler arasında nitelik açısından fark olmamasına rağmen görünümünde farklılıklar vardır. İzotropik anten, uzayın her yönüne eşit ışıyan noktasal kaynak gibi davranan bir tüm yönlü antendir. Gerçeklemesi mümkün olmayan bir anten olsa da izotropik anten yaklaşımlar yapmak ve diğer anten parametre büyüklüklerine referans olması açısından kullanılmaktadır. Örneğin bir yönlü antenin kazancı izotropik anten referans alınarak tanımlanır. Belli bir doğrultuda ışıma yapan ve belli bir doğrultuda elektromanyetik

dalgaları alabilen antenlere “yönlü anten” denir. Şekil 2.2’de yönlü ışıma yapan bir antene ait ışıma diyagramı örneği verilmiştir [23].



Şekil 2.2 Yönlü anten ışıma diyagramı

İşıma diyagramlarında lop veya kulakçık olarak adlandırılan eğriler oluşur. Bu lop seviyeleri anten ana ışıma huzmesine göre çok düşük seviyede tutulmak istenir. Şekil 2.3’te ışıma loblarını gösteren polar ışıma diyagramı sergilenmiştir [23].

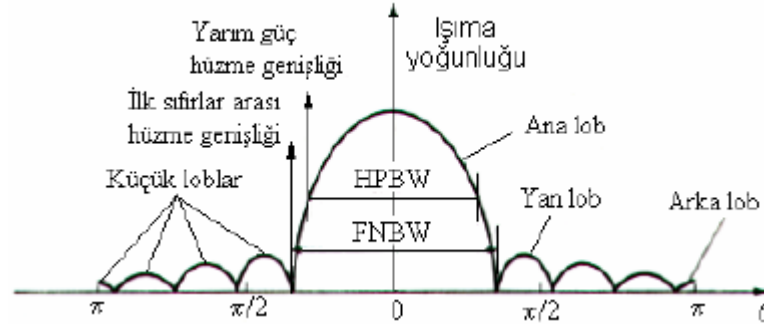


Şekil 2.3 Ana huzme ve loblar

Ana lob: Maksimum ışımayı gösteren loptur. Şekil 2.4’te ana lob $\theta = 0$ da oluşmuştur.

Arka lob: Ana lobun tam zıttında oluşan loptur.

Minör (küçük) loblar: İstenmeyen yönlerde oluşan ışımaları ifade eder. En büyük minör loblar yan lob olarak ifade edilir. Yan lobların seviyeleri olabildiğince düşük tutulmak istenmektedir [23].



Şekil 2.4 Kartezyen ışıma diyagramı

2.3 Anten Yönlülüğü (Directivity)

Belirli bir yönde oluşan ışımanın şiddetinin tüm yönlerdeki ortalama ışıma şiddetine oranına yönlülük denilmektedir [23]. Yönlülük $D(\theta, \varphi)$, yükselme (elavation) ve yanca (azimut) açılarının bir fonksiyonu olarak eşitlik (2.3)'teki gibi ifade edilebilir [24].

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\text{Antenin}(\theta, \varphi) \text{ yönündeki ışıma şiddeti}}{\text{Antenin tüm yönlerdeki ort. ışıma şiddeti}} \quad (2.3)$$

Ortalama ışıma şiddeti, antenden ışıyan gücün 4π 'ye oranı olarak hesaplandığında, yönlülük eşitlik (2.4)'teki gibi yazılabilir [23];

$$D(\theta, \varphi) = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \varphi)}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

Burada; D yönlülük [Birimsiz, dBi], P_{rad} ışıyan güç [W], U ışıma şiddeti [W/Birim katı açı] olarak ifade edilir.

2.4 Anten Verimi

Anten ışıma verimi, dielektrik ve iletim kayıplarının hesaba katılarak antenin ışıma performansını veren önemli parametrelerden biridir. Işıma verimliliği (e_{cd}), eşitlik (2.5)'teki şekliyle ifade edilir [23], [24].

$$e_{cd} = \frac{R_r}{R_L + R_r} = \frac{\text{Işıyan güç}}{\text{Anten tarafından kabul edilen güç}} \quad (2.5)$$

Yüzde yüz güç transferi olması için, $Z_s = R_s + jX_s$ (kaynak empedansı) ve $Z_a = R_r + RL + jX_a$ (antenin giriş empedansı) karmaşık eşlenik olmalıdır [24]. Eğer bir empedans uyumsuzluğu olursa bu yansıma yol açar. Yansıma katsayısını gösteren eşitlik (2.6)'da verilmiştir.

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_a - Z_s}{Z_a + Z_s} \quad (2.6)$$

Burada " V_r " antenden yansıyan gerilim ve " V_i " antene iletilen gerilimdir. Oluşan geri yansımalar duran dalgalar oluşturur. Bu durum gerilim duran dalga oranı (GDDO) ile belirtilir. [24]

$$GDDO = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (2.7)$$

2.5 Anten Kazancı (Gain)

Önemli anten parametrelerinden olan kazanç, ışıma yönündeki gücün besleme gücüne oranı olarak ifade edilir. Kazanç, yönlülük ve verimin çarpımıyla ifade edilir. Yükselme (θ) ve yanca (φ) açılarının bir fonksiyonudur. Verimi % 100 olan antende kazanç ve yönlülük eşittir.

$$G(\theta, \varphi) = e_{cd} D(\theta, \varphi) \quad (2.8)$$

2.6 Bant Genişliği (Bandwidth)

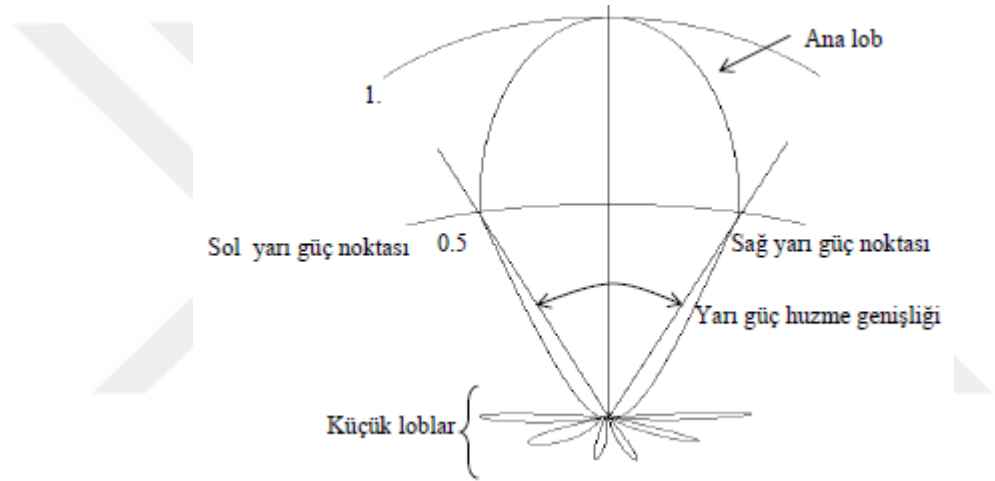
Bant genişliği antenin verimli bir şekilde ışıma yapabildiği ve belirlenen parametreleri sağladığı alt (f_a) ve üst (f_u) frekans değerleri arasında belirlenen frekans aralığıdır. Bant genişliği belirlenirken dikkate alınan f_a ve f_u kazancın en yüksek değerinin -3 dB altındaki iki nota olarak belirlenir. Bir başka yöntem ise GDDO değerlerinin 2:1 den daha küçük olduğu aralık olarak da bant genişliği belirlenebilir [24].

Özellikle mikroşerit antenlerin bant genişliği belirtilirken % (yüzde BG) cinsinden ifade kullanılır. Burada f_o merkez frekansı temsil etmektedir.

$$\%BG = \frac{f_u - f_a}{f_o} \times 100 \quad (2.9)$$

2.7 Yarım Güç Huzme Genişliği (YGHG)

Ana ışıma huzmesinde ışıma şiddetinin yarıya düştüğü noktaları arasında kalan açıya yarım-güç huzme genişliği (YGHG) denir. Bununla birlikte huzme genişliği, ışıma diyagramı üzerinde ana huzmenin iki yanında aynı seviyedeki iki nokta arasında tanımlanabilir. Örneğin 10-dB, 5-dB huzme genişlikleri gibi. Ancak genelde 3-dB huzme genişliği ile ilgilenilir, bu da yarım-güç huzme genişliğini verir [23]. Şekil 2.5'te YGHG'nin polar ve kartezyen diagramlarda gösterimi verilmiştir.



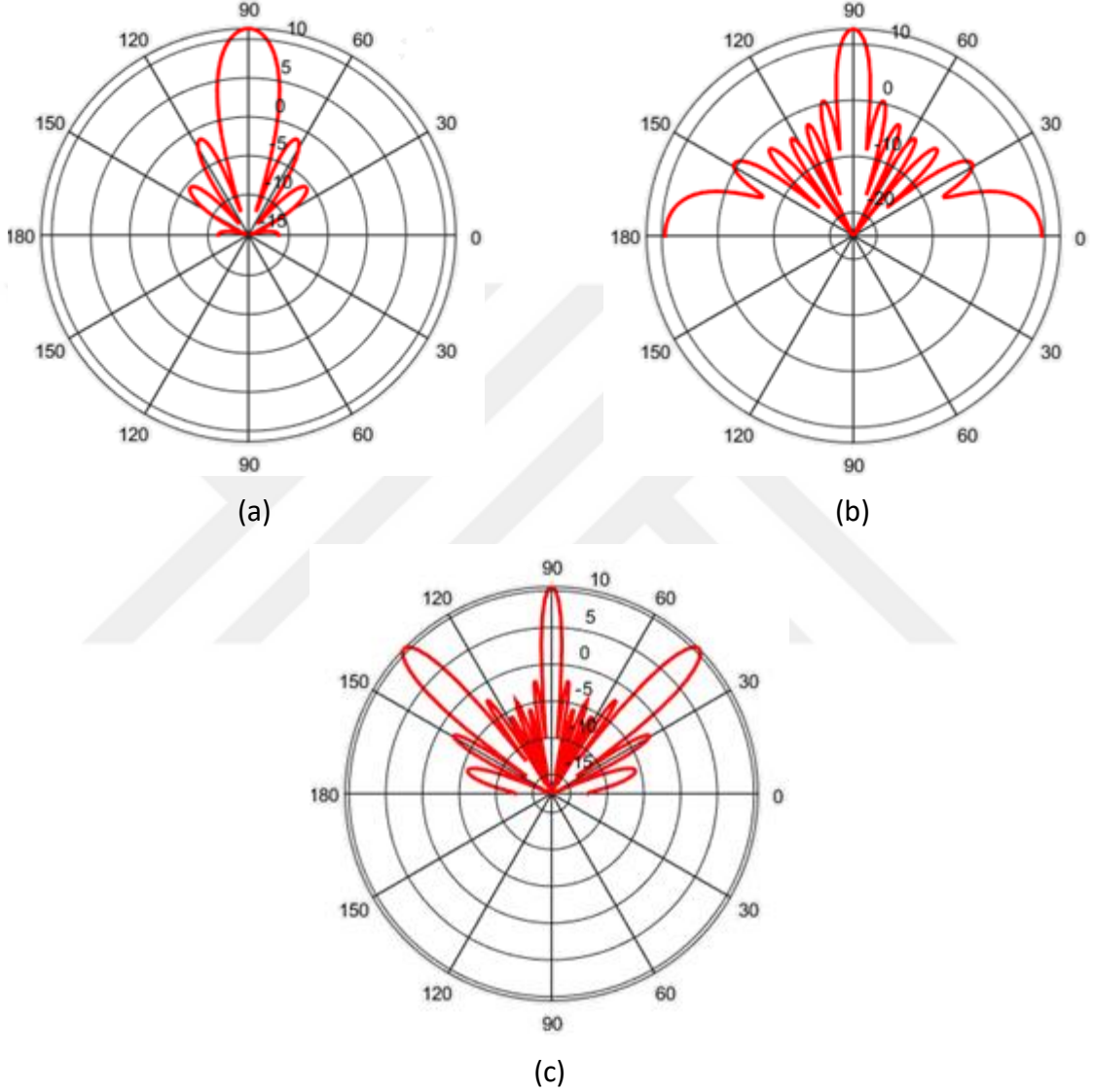
Şekil 2.5 Yarım güç huzme genişliği

2.8 İstenmeyen Ana Huzme

Eleman dizilimi eş uzaklıkla (uniform dizilim) gerçekleştirilen faz dizili anten, uzak bir açıya yönlendirildiğinde ana huzme istenmeyen farklı bir doğrultuda yeniden oluşur. Oluşan bu huzmeler istenmeyen ana huzme olarak tanımlanmaktadır [25]. Dizi elemanları arasındaki d mesafesi, $\lambda/2$ veya daha az olduğu durumda görünür bölgede sadece ana lob oluşur ve istenmeyen ana huzme oluşmaz. d mesafesi $\lambda/2$ 'den büyük olduğunda ise istenmeyen ana huzme oluşmaktadır. d mesafesi çok daha geniş olduğu durumlarda tarama açısı 0 derece olsa bile görünür bölgede istenmeyen ana huzme oluşabilir [26]. Maksimum d mesafesi, dalga boyu ve maksimum yönlenme açısının bir fonksiyonudur.

$$d_{maks.} = \frac{\lambda}{1 + \sin\theta} \quad (2.10)$$

Burada; $d_{maks.}$ dizi elemanları arasındaki maksimum mesafe , λ dalga boyu , θ ise ana huzme yönlenme açısı olarak ifade edilmektedir [25]. Şekil 2.6'da üç farklı d mesafesi için istenmeyen ana huzme seviyeleri polar diagramlarda gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Dizi elemanları arasındaki mesafeye göre istenmeyen ana huzme oluşumu
(a) $d = \lambda/2$, (b) $d = \lambda$, (c) $d = 1,5 \lambda$

2.9 Aktif S-Parametresi

Tek bir anten elemanı için bilinen empedans uyumlama parametresi S_{11} iken, dizi anten için aktif yansıma katsayısı incelenmelidir. Aktif yansıma katsayısı tüm dizi

elemanları eş zamanlı beslendiğinde ışıma elemanından geri yansıyan güç oranı olarak tanımlanabilir. Aktif yansıma katsayısı Γ_m eşitlik (2.11) ile hesaplanabilir [27]:

$$\Gamma_m(\theta) = \sum_{n=1}^N S_{mn} \exp(-jknd \sin \theta) \quad (2.11)$$

Burada; $k = (2\pi / \lambda)$ faz sabitini, m m. dizi elemanını, S_{mn} port n den port m ye iletim katsayısını, d dizi elemanları arasındaki boşluğu ve θ ise huzme yönlenme açısını ifade etmektedir. Bu denklemde dizi elemanları arasındaki uyumlu bağlantı katsayısı (mutual coupling) faktörü de hesaba katılmaktadır ve dizi elemanı için daha gerçekçi bir S-parametresi belirlenmektedir [27]. Tezin ilerleyen bölümlerinde dizi anten tasarım ve ölçüm sonuçları grafiklerinde belirtilen aktif S-parametreleri kullanılacaktır.



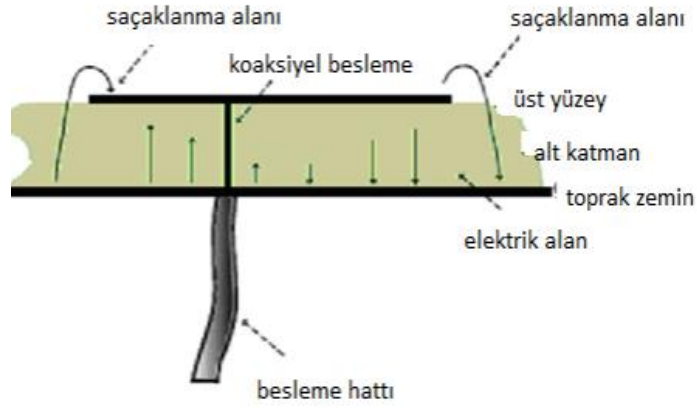
MİKROŞERİT YAMA ANTENLER

Bu bölümde mikroşerit yama antenlerin özellikleri, tasarım parametreleri, besleme teknikleri ve tez çalışmasında dizi anten tasarımı için neden tercih edildiği hakkında genel bilgiler sunulacaktır.

3.1 Mikroşerit Yama Anten Hakkında Genel Bilgiler

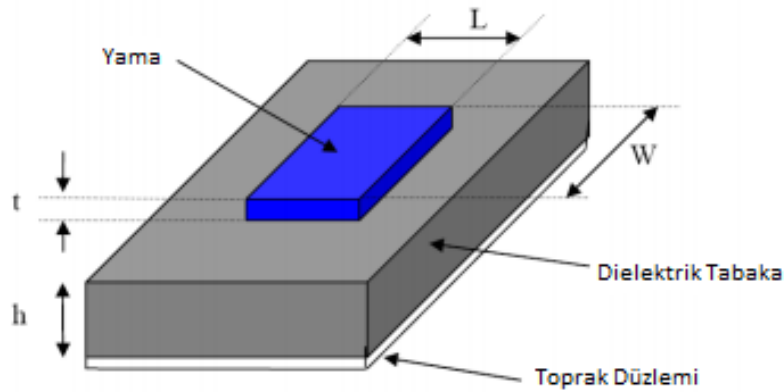
Mikroşerit yama anten en temel haliyle paralel iki iletkenin ince bir dielektrik katman ile birbirinden ayrılmasıyla oluşturulur. Üst taraftaki iletken ışıma amaçlı kullanılırken, alt yüzeydeki iletken topraklama amaçlı kullanılır. İletken olarak iletkenlik katsayısı yüksek elementler kullanılır. Bakır mikroşerit anten tasarımında ve üretiminde en sık kullanılan iletkenidir.

Mikroşerit anten yama kısmının uyarılması neticesinde yama kenarlarından yer düzlemi doğrultusuna bir EM dalga propagasyonu olur. Yansıyan dalgalar ise boşluğa yayılarak ışıma yaparlar. Fringing effect olarak adlandırılan yama kenarlarında oluşan saçaklanma olayı mikroşerit anten ışımasına yol açar [29]. Şekil 3.1’de mikroşerit yama anten ışıma alanları gösterilirken Şekil 3.2’de klasik bir yama antene ait katmanlar ve parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Mikroşerit yama anten ışıma alanı

Tanjant kaybı alt katman için önemli bir parametredir. Dielektrik kaybı olarak da adlandırılan “tanjant kaybı” frekans ile artar. Alt katmanın düşük tanjant kayıplı olması anten ışıma verimini arttıran önemli bir unsurdur [29].

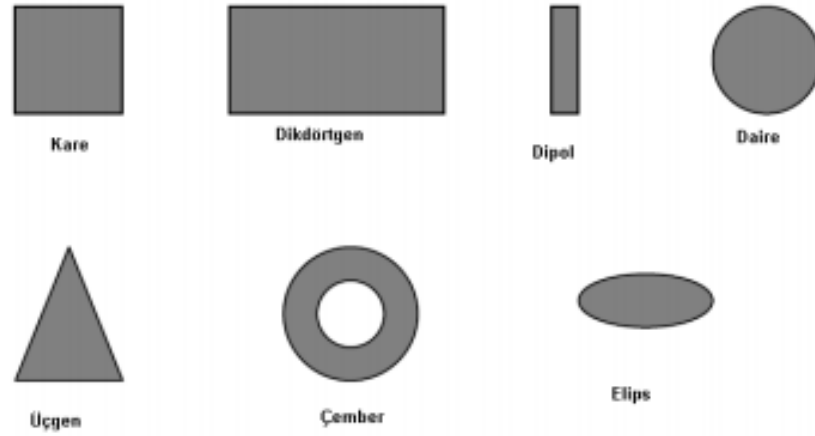


Şekil 3.2 Tek katmanlı mikroşerit yama anten

Burada; h toprak yüzey ile yama arasında yer alan dielektrik malzeme yüksekliğini, t yama kalınlığını, L yama boyunu, W ise yama genişliğini ifade etmektedir.

Tasarım parametreleri belirlenirken h için; $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.005\lambda_0$, ϵ_r (Dielektrik sabiti) için; $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$, L için; $0.333\lambda_0 \leq L \leq 0.5\lambda_0$ eşitsizlikleri geçerli kabul edilmektedir [23].

Yama iletken tasarımında dikdörtgen, kare, üçgen, daire ve eliptik gibi temel geometrik şekiller tercih edilir. Şekil 3.3’de mikroşerit antenlerde kullanılan temel yama şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Kullanılan temel yama şekilleri

Düşük dielektrik sabiti ve kalın dielektrik katman ile yüksek ışıma performansı sağlanır. Böylelikle bant genişliği ve verimlilik artıp anten daha iyi ışıma performansına sahip olacaktır. Ancak bu durumda ise mikroşerit yama anten boyutları artabilir. Bu sebeple yüksek dielektrik sabiti seçilerek daha kompakt yapıda ve daha dar bant genişliğine sahip tasarımlar elde edilir. Yani anten boyutları ve anten ışıma performansı arasında optimum noktaya ulaşılmaya çalışılır [23]. Rezonans anten olarak da adlandırılan mikroşerit yama antenler UHF bandı aşağısında boyutlarının artmasından ötürü, çoğunlukla 1-100 GHz frekans bandında kullanılırlar [28].

3.2 Mikroşerit Yama Anten Avantaj ve Dezavantajları

Mikroşerit yama antenlerin sahip olduğu küçük boyutları, üretim kolaylığı ve kompakt yapıları nedeniyle kablosuz uygulamalar, otonom araç teknolojileri, radar uygulamaları gibi alanda kullanımı tercih edilmektedir. Ayrıca yama antenler tümleşik sistemlere de uyumlu olması sebebiyle kablosuz haberleşmeye sahip elektronik cihazlarda (cep telefonu, dizüstü bilgisayara vs.), füze sanayinde, uzay teknolojisinde haberleşme anteni olarak kullanılmaktadır.

Mikroşerit Yama Anten Avantajları:

- Küçük boyutlara sahip olması dolayısıyla düşük hacim alanı
- Boyutlarının küçük tasarlanabilmesi sebebiyle yüzeylere montaj kolaylığı sunması
- Üretim kolaylığı

- Ucuz maliyetlerle üretilebilmesi nedeniyle sayıca fazla üretilebilmesi
- Tüm polarizasyon türleri (Lineer, dairesel) ile çalışabilmesi
- Mikrodalga tümleşik devrelere kolay entegre edilmeleri
- Dual veya çoklu bant frekanslarında çalışabilmeleri
- Yüksek mekaniksel dayanıklılığı (Örneğin bir otomobilin eğik yüzeyine bile uygulanabilir) [23], [30].

Mikroşerit Yama Anten Dezavantajları (Konvansiyonel antenlere göre):

- Bant genişliği dardır (%1)
- Verimliliği düşüktür
- Anten kazancı düşüktür
- İstenmeyen saçılma ve ışımlar olmaktadır
- Güç işleme kapasiteleri düşüktür
- Yüzey dalgaları etkisiyle kayıplar meydana gelir
- Kazancın pratik üst sınırı 20 dB civarındadır.
- Işıma elemanı ile besleme noktası arası yalıtım güçlü değildir.

3.3 Mikroşerit Yama Anten Bant Genişliği

Horn ve parabolik anten elemanları %15-%50 arası değişen bant genişliklerinde çalışabilirken, geleneksel mikroşerit yama antenleri çok düşük bant genişliğine sahiptir. Alt katmanın kalınlığının artması ve dielektrik katsayının azalması bant genişliğini artırır. Her iki durum da alt katmandaki yama akımının toprak düzlemi negatif görüntüsü sebebiyle artan rezonatör kalite faktörü (Q) ile açıklanabilir [31]. Kalite faktörü Q ile ölçülür. Q nün değeri eşitlik (3.1)'de verilmiştir.

$$Q = \frac{w_0}{\Delta w} = \frac{f_0}{f_u - f_a} \quad (3.1)$$

Görüldüğü üzere kalite faktörü ile bant genişliği ters orantılıdır. Düşük dielektrik sabitli, alt katmanı kalın bir anten yapısı bant genişliği için tercih edilir. Bununla birlikte alt katman kalınlığı, mikroşerit devrelerden gelebilen saçılma ışımları ve endüktif yükleme nedeniyle 0.02λ veya daha düşük olarak gerçekleşir. Tamamen ihtiyaç ve isterler doğrultusunda bant genişliği yüksek bir antende birim eleman olarak mikroşerit

anten kullanımı için temel anten elemanın bant genişliğini çeşitli yöntemler ve teknikler kullanılmaktadır. Böylelikle %10-40'lık bant genişliklerine ulaşmak mümkün olabilir. Bu teknikleri üç tip yaklaşıma göre sınıflandırırsak;

1. Empedans uydurma devreleri kullanımı ve optimizasyonu
2. Kayıplı elemanlar eklenmesiyle verimin düşürülüp bant genişliğinin arttırılması (verimin düşürülme sınırı önemlidir ve bizi kısıtlar)
3. Yığılmış yapı tasarımı ve parazitik yama katları kullanma (Stacked Patches yapısı) [31].

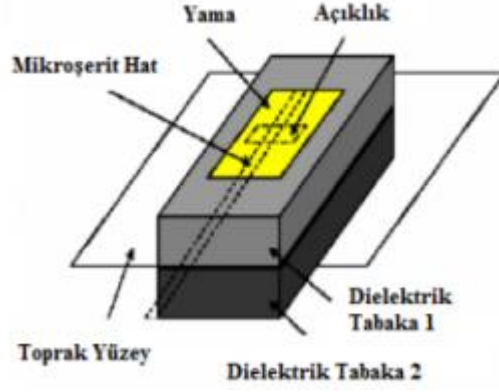
3.4 Mikroşerit Yama Anten Besleme Teknikleri

Mikroşerit anten tasarımlarında kullanılan anten besleme yöntemleri anten giriş empedansı (Z_{in}) ve polarizasyonu için önemli bir öneme sahiptir. Bağlantısız besleme ve bağlantılı besleme olarak ana iki yönetime ayrılır [23].

1. Bağlantısız besleme şekillerinde güç, birbiriyle direkt bağlantısı olmayan mikroşerit besleme hattı ve yama arasında meydana gelen elektromanyetik alan ile iletilir. Bağlantısız besleme teknikleri olarak açıklık ve yakınlık kuplajlı tekniklerden bahsedilebilir [23].
2. Bağlantılı beslemede ise güç, direkt olarak ışıyan yamaya iletilir. Bağlantılı besleme teknikleri; mikroşerit besleme ve koaksiyel besleme olarak ayrılır.

3.4.1 Açıklık Kuplajlı Besleme

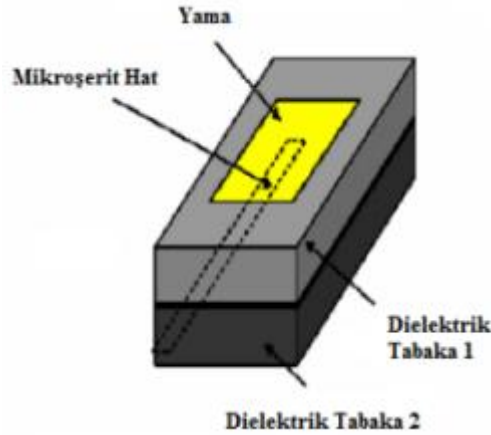
Bu yapıda toprak yüzey mikroşerit hat ve yama arasına yerleştirilmektedir. Mikroşerit hat altta yer alan dielektrik tabaka üzerine yerleştirilirken toprak yüzeyde açılan yarıklar ile enerjinin yamaya aktarımı sağlanmaktadır. Alt dielektrik tabaka yüksek, üst dielektrik tabaka ise düşük dielektrik sabitli malzemelerden seçilir. Bu yapıda yama ile besleme hattı toprak yüzey ile yalıtımı sağlandığından polarizasyon saflığı yüksektir. Modellenmesi kolay olan yapının, üretim işlemleri bağlantılı besleme tekniklerine nazaran zordur. Ek olarak dar bantlı frekans tepkisine sahiptir. Hat genişlikleri ve yarıklar uzunluklarının değiştirilmesiyle empedans uyumu optimize gerçekleştirilir. Şekil 3.4'te açıklık kuplajlı beslemeye sahip bir yama anten gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Açıklık kuplajlı besleme

3.4.2 Yakınlık Kuplajlı Besleme

Açıklık kuplajlı beslemede olduğu gibi ışıma yapan yama mikroşerit besleme hattı üzerinde yerleştirilen bir alt katmanın tepesinde yer almaktadır. Besleme hattı yama altında “açık devre yan hat” ile sonlandırılmaktadır. Yama, nispeten kalın bir alt tabaka üzerine yerleştirilebildiğinden bant genişliği artmaktadır. Açıklık kuplajlı besleme yapısındaki gibi sahte ışıma ve kuplaj azdır. Üretim işlemleri bağlantılı besleme tekniklerine nazaran zordur [32]. Şekil 3.5’te yakınlık kuplajlı beslemeye sahip bir yama anten gösterilmektedir.

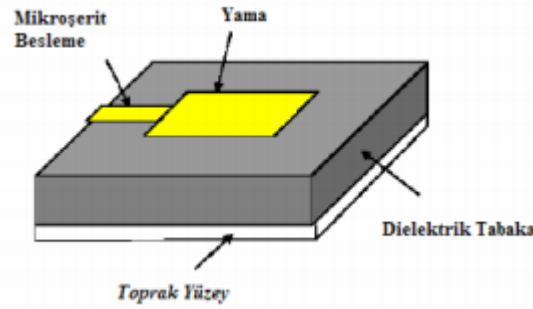


Şekil 3.5 Yakınlık kuplajlı besleme

3.4.3 Mikroşerit Besleme

Mikroşerit beslemede güç iletimi (anten beslemesi), yama genişliğine nazaran daha küçük hat genişliğine sahip mikroşerit hat yamanın bir kenarına eklenmesiyle sağlanır. Besleme hattı yama ile aynı katman üzerine yerleştirilebilmesinden dolayı üretim

kolaylığı konusunda avantaj sağlamaktadır. Aynı şekilde empedans uydurma optimizasyonu için de besleme hattına ait boyut parametreleri ile oynanabilir ve yama ile hat arasındaki empedans uyumu sağlanır. Bu avantajlarına karşın kalın dielektrik kullanımı durumunda yüzey dalgaları¹ sebebiyle istenmeyen ısımlar meydana gelerek kayıplara neden olur. Bant genişliği bu sebeple %2-5 aralığında sınırlıdır. Şekil 3.6'da mikroşerit beslemeye sahip bir yama anten gösterilmektedir [23].

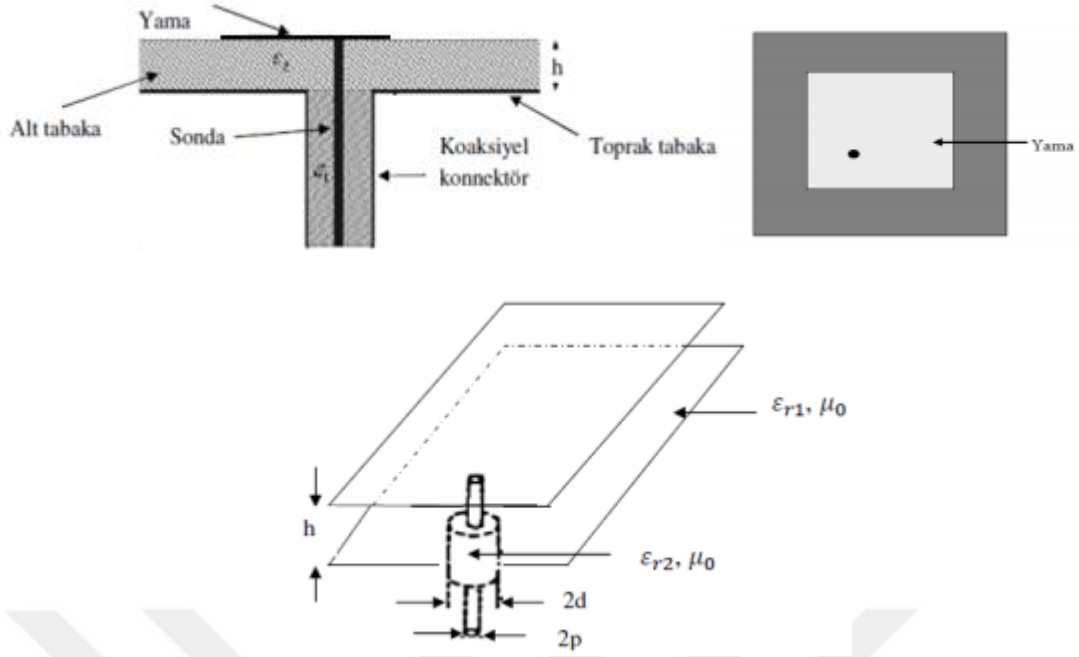


Şekil 3.6 Mikroşerit besleme

3.4.4 Koaksiyel Besleme

Koaksiyel beslemede koaksiyel bileşen (koaksiyel konnektör) iç kısmındaki iletken üst katmandaki yama kısmına temas edecek şekilde yerleştirilirken konnektörün dış iletken kısmı da antenin en alt tabakasında yer alan toprak yüzeye bağlanır. Bu besleme tipinin en önemli avantajı empedans uyumlandırmanın fazladan çabaya gerek kalmadan konnektör içerisindeki iletken koaksiyel hattın yamanın herhangi bir noktasına temas etmesiyle sağlanmasıdır. Ayrıca üretimleri kolay ve mikroşerit besleme hatlarına göre istenmeyen ısıma oranları da düşük seviyededir. Buna karşın en büyük dezavantajı besleme yapılacak yama ile konnektör arasında kalın dielektrik katman kullanıldığında besleme ucunun yamaya ulaşması ile ilgili sorunlar ortaya çıkacaktır. Bu durum modellemesi zor bir yapıya yol açmaktadır [23]. Şekil 3.7'de koaksiyel konnektör ile beslenen bir mikroşerit anten yapısı gösterilmektedir.

¹ Yüzey dalgaları farklı dielektrik sabitlerine sahip katmanlar arasında yüzey doğrultusunda ilerleyen elektromanyetik dalgaları ifade eder [23].



Şekil 3.5’de görüldüğü üzere, koaksiyel konnektör besleme kaynağı anten alt tabakaya bağlanır ve konnektör içerisinde geçen pin (iletken malzeme) üst tabakadaki ısıma yamasına ulaştırılır. Koaksiyel konnektör yamanın bulunduğu yüzeyin arkasına eklenirken, iletken pin ise konnektör içerisinde geçerek yamaya lehimlenerek birleştirilir. Lehimleme ihtiyacı güvenilirliği yapıya güvenilirliği azaltabilir(soğuk lehim gibi olumsuzluklar) ayrıca çok elemanlı bir anten tasarımında maliyeti yükseltebilir.

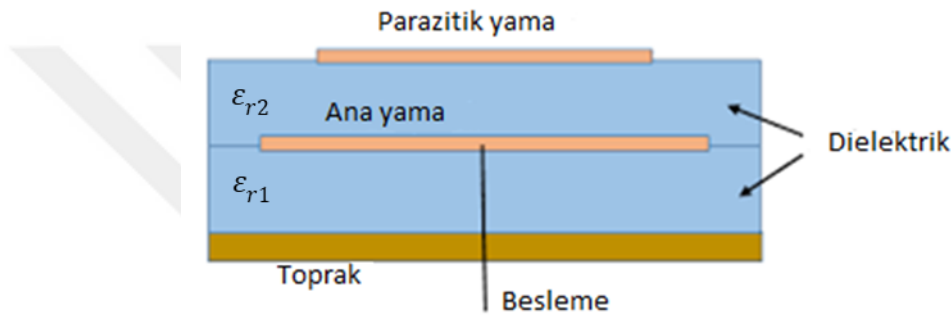
Bahsedilen her iki besleme yöntemi anten yapısında asimetriye sebep olup çapraz polarizasyonlu ışıma yolu açan yüksek dereceden EMD modlarının oluşmasına yol açarlar. Bu sebeple bazı tasarımlarda bahsi geçen yüksek dereceli modların oluşmasını engellemek için bağlantısız besleme teknikleri tercih edilebilmektedir [23].

Bu tez çalışmasında nihai hedefimiz olan faz dizili anten yapısında temel anten elemanı olarak kullanılmak üzere anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyum performansı ,nispeten geniş bant çalışmaya uyumu, dayanıklılığı sebebiyle koaksiyel besleme yöntemi kullanılmıştır. 50 Ω karakteristik empedansa sahip koaksiyel konnektörler anten temel elemanı ve sonrasında oluşturulan dizi anten yapısında kullanılmıştır. Tasarım sırasında yapılan analizler anten yapısına bağlı olacak şekilde modellenmiş ve tasarım ile üretim arasındaki besleme hattından doğacak farklılıklar azaltılmaya çalışılmıştır. Temel anten elemanı tasarlanırken yığılı yama anten yapısı

üzerinde çalışılmıştır. Tek katlı yama anten yerine yığılı yapı tercih edilmesinin başlıca nedeni bant genişliğinin arttırılmak istenmesidir. Bölüm 3.5'te yığılı yama anten ile ilgili genel teorik bilgiler verilmiştir.

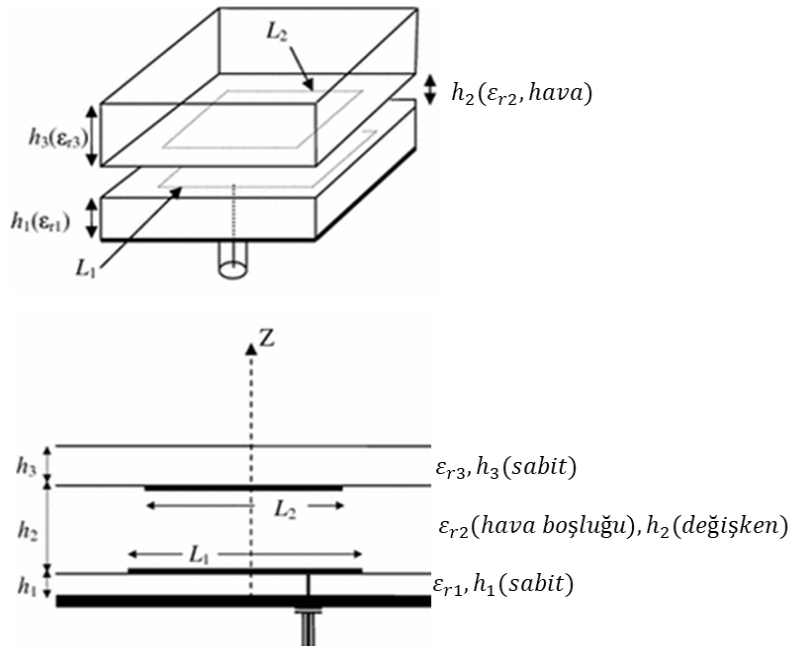
3.5 Yığılı Yama Anten (Stacked Patches)

Yığılı yapı en alt tabaka olarak toprak, üzerine dielektrik katman onun üzerine ana ışımayı yapan yama ve üzerine farklı kalınlık ve dielektrik sabitlerine sahip dielektrik katmanlar ve en üstte de parazitik yama ile oluşur. Tasarım boyutları katman sayısı, via geçişleri, besleme teknikleri tasarım kriterleri doğrultusunda değişkenlik gösterir.



Şekil 3.8 Temel yığılı yama yapısı örnek gösterim

Şekil 3.8'de ana hatları belirtilen yığılı yapı mimarisi gösterilirken Şekil 3.9'da yığılı yapı katmanlarının ve parametrelerinin ayrıntılı gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.9 Temel yığılı yama yapısı ayrıntılı örnek gösterim

3.5.1 Yıgılı Yama Tasarımı ve Analizi

Bu bölümde faz dizili anten tasarımında kullanılmak üzere dizi anten temel eleman özelliğini taşıması adına yığılı yama yapısı tasarımından bahsedilecektir. Yığılı yapının son haline getirilmesi sürecinde tek katmanlı klasik mikroşerit anten yapısı ile olan kıyaslanması ve tercih sebepleri belirtilmiştir.

Anten tasarımı için alt dielektrik tabaka olarak Rogers 4003C malzemesi seçilmiştir. Alt dielektrik tabaka malzemesine ait parametreler şöyledir:

Dielektrik malzeme: Rogers 4003C, dielektrik sabiti: 3.38, kalınlık: 1.52 mm, dielektrik kayıp tanjantı $\tan\delta$: 0.0027, dielektrik malzeme genişliği: 30 mm, dielektrik malzeme genişliği: 30 mm.

Yukarıdaki parametreler doğrultusunda dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Anten tasarımında kullanılan yamaların boyutları için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır.

$$W = \frac{c}{2f_o} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.2)$$

Eğer $\frac{W}{h} \geq 1$ ise ϵ_{ref} (efektif dielektrik sabiti) eşitlik 3.3 ile hesaplanır.

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \quad (3.3)$$

$1 \leq \epsilon_{ref} \leq \epsilon_r$ ise;

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_o \sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3.4)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ref} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.5)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (3.6)$$

Bu denklemlerde “ W ” yama genişliğini, “ L ” yama boyunu, “ h ” dielektrik malzemenin yüksekliğini, “ f_o ” merkez çalışma frekansını, “ c ” ışık hızını, “ ΔL ” ise saçak değerini ifade etmektedir.

İlk olarak hesaplanan teorik değerler tasarım parametresi olarak kullanılmış olup simülasyon iterasyonları neticesinde optimum değerler bulunmaya çalışılmıştır. Tezin devamındaki faz dizili anten tasarımında da Computer Simulation Technology (CST) Mikrodalga stüdyo simülasyon benzetim programı anten parametreleri iyileştirme aşamasında kullanılmıştır.



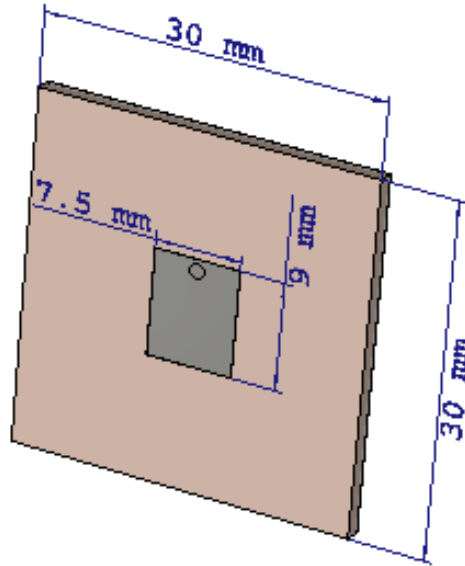
BÖLÜM 4

ANTEN DİZİ ELEMANI TASARIMI

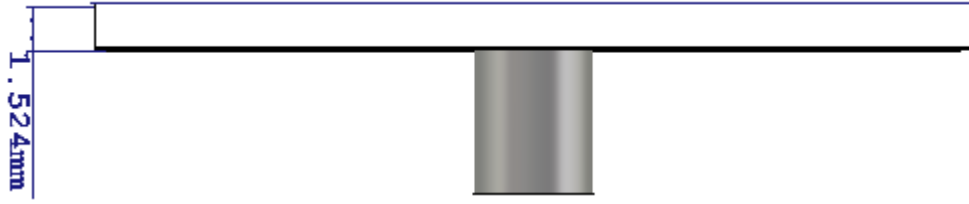
Bu bölümde Bölüm 3.5'te genel bilgileri verilen ve anten dizi elemanı olarak kullanılan yığılı yapının tek katmanlı yapı ile simülasyon sonuçları eşliğinde karşılaştırılması, yığılı yapının tercih sebebi ve her iki yapıya ait tasarım boyutları verilmiştir.

4.1 Tek Katmanlı Klasik Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Tasarımı yapılan tek katmanlı yama antene görünüm Şekil 4.1'de verilmiştir.



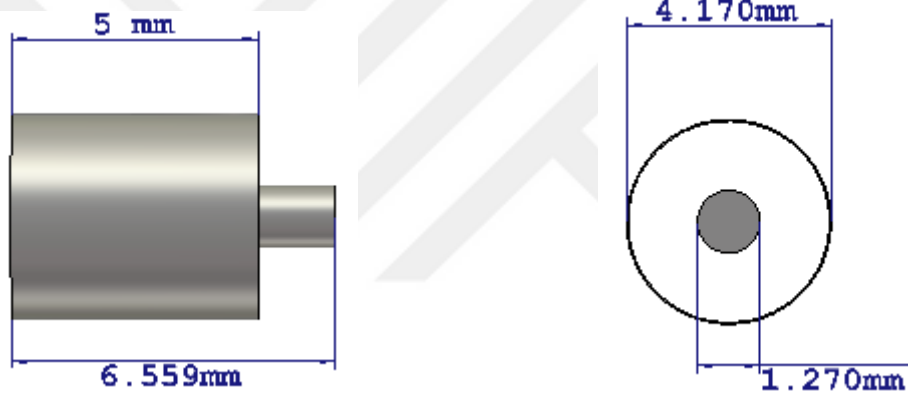
(a)



(b)

Şekil 4.1 Tek katmanlı mikroşerit yama anten (a) üst görünüm, (b) yan görünüm

Anten tasarımında koaksiyel besleme için SMA RF konnektör kullanılmıştır. Üretim sonuçlarına yakın olması açısından simülasyonlarda gerçek boyutlarında SMA konnektör tasarlanmıştır. SMA konnektöre ait tasarım boyutlarını belirten görseller Şekil 4.2’de sunulmuştur.



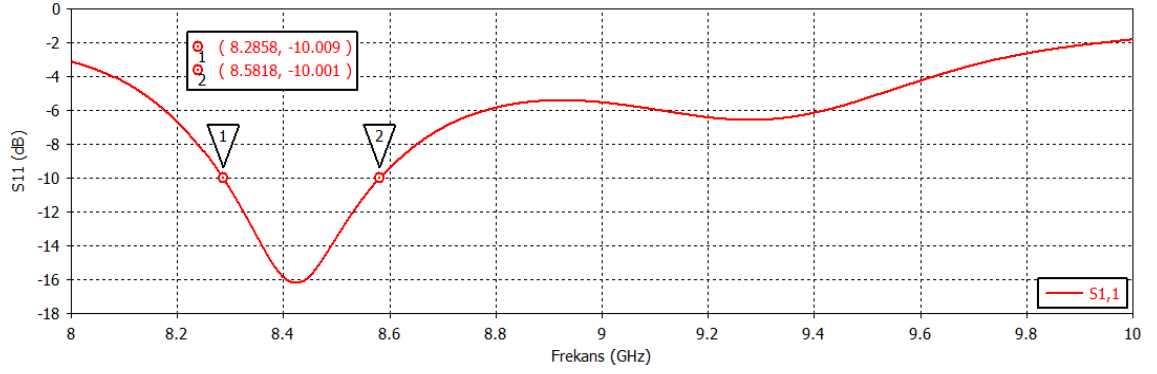
(a)

(b)

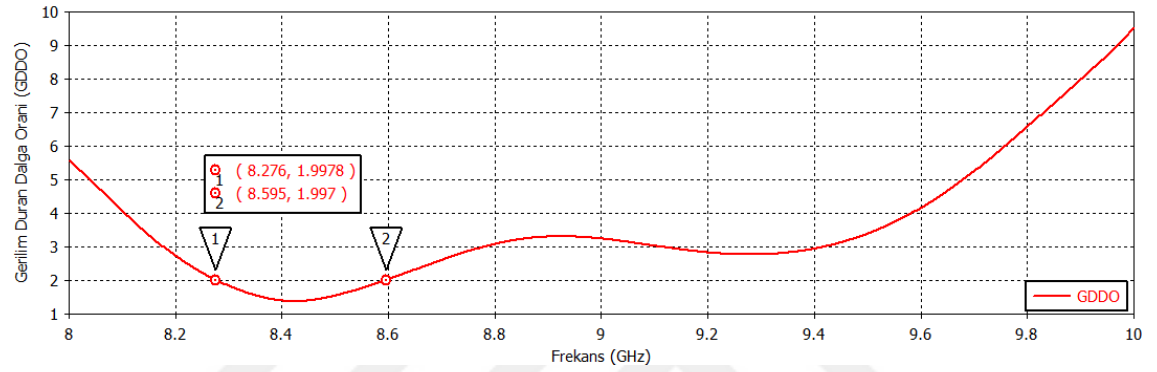
Şekil 4.2 SMA konnektör (a) yan görünüm, (b) üst görünüm

Çizelge 4.1 Tek katmanlı anten tasarım boyutları

Anten boyutları	En x Boy (mm)	30x30
W	Yama Genişliği (mm)	7.5
L	Yama Boyu (mm)	9
Dielektrik malzeme	Dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h	Dielektrik Kalınlığı (mm)	1.52
ϵ_r	Dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta$	Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027



Şekil 4.3 Tek katmanlı mikroşerit yama anten S_{11} grafiği



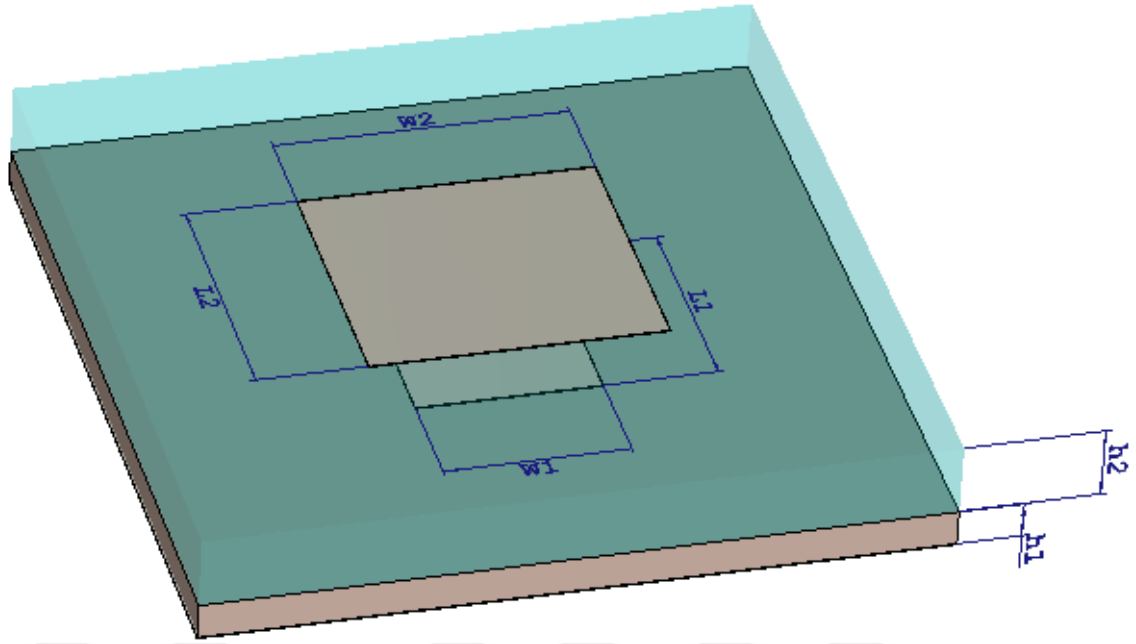
Şekil 4.4 Tek katmanlı mikroşerit yama anten $GDDO$ grafiği

Tek katmanlı mikroşerit antene ait geri dönüş kaybı (S_{11}) ve $GDDO$ grafikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Bir antenin çalışma frekans aralığı belirlenirken S_{11} değerinin maksimum -10 dB olduğu frekanslar belirlenir. Aynı şekilde $GDDO$ grafiği yorumlanırken de çalışma aralığında $GDDO$ değerinin 2'den büyük olmaması gereklidir.

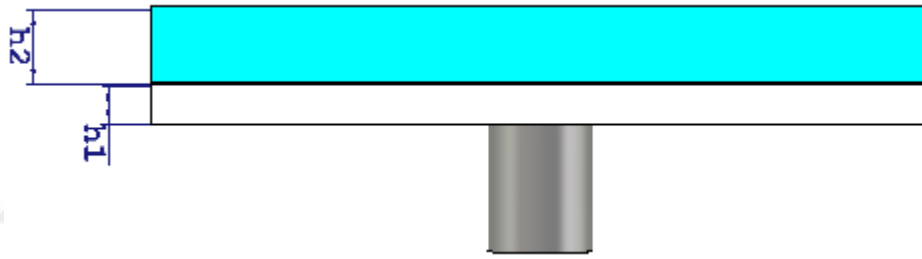
Bu referans bilgiler ışığında tek katmanlı yapının alt çalışma frekansı $f_a=8.28 \text{ GHz}$, üst çalışma frekansı ise $f_u=8.6 \text{ GHz}$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda yaklaşık 320 MHz'lik bir çalışma bant aralığına sahiptir. Merkez frekansı $f_0=8.45 \text{ GHz}$ alındığında (2.9) eşitliğinden; $\%BG \cong \%3.8$ olarak hesaplanmıştır.

4.2 Yığılı Yapı Mikroşerit Yama Anten Tasarımı

Yığılı yapı tasarımına ait dielektrik katmanlar ve yamalar farklı açı görünümüleri ile Şekil 4.5'te sergilenmiştir.



(a)



(b)

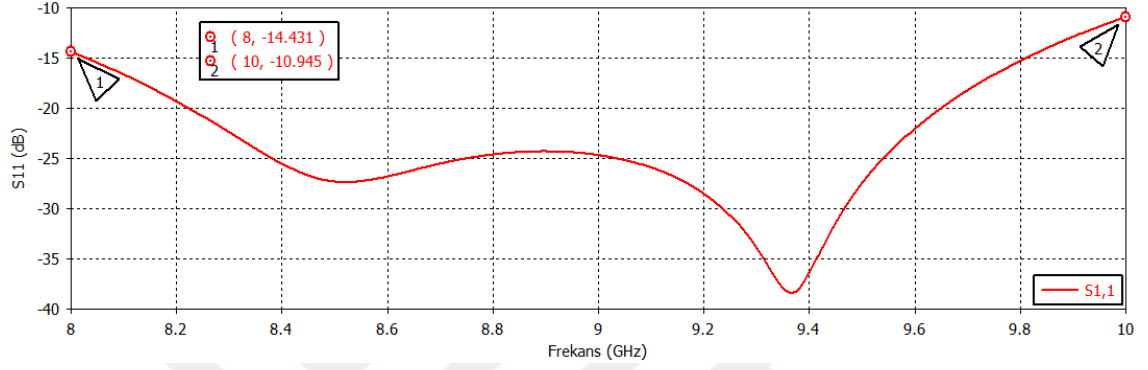
Şekil 4.5 Yığılı yapı mikroşerit anten (a) önden görünüm, (b) yan görünüm

Çizelge 4.2 Yığılı yapı anten tasarım boyutları

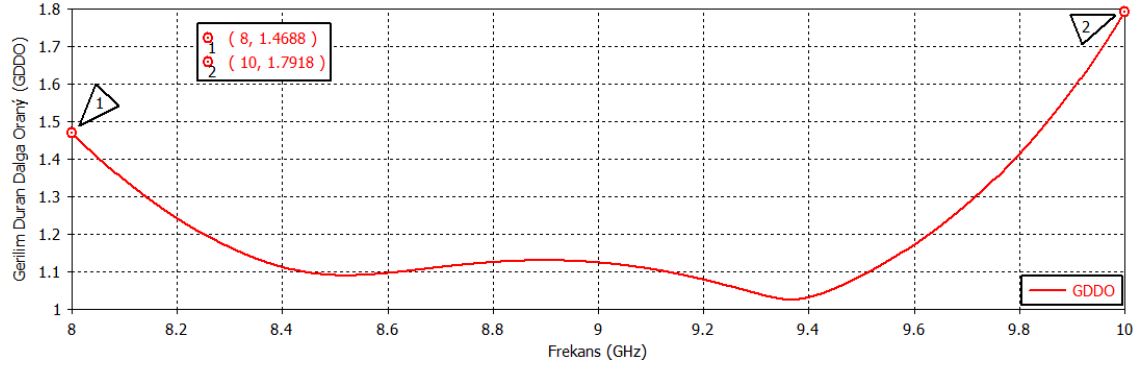
Anten boyutları	En x Boy (<i>mm</i>)	30x30
W_1	Alt katman yama genişliği (<i>mm</i>)	7.5
L_1	Alt katman yama boyu (<i>mm</i>)	9
Dielektrik malzeme	Alt katman dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h_1	Alt katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	1.52
ϵ_{r1}	Alt katman dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta_1$	Alt katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027
W_2	Üst katman yama genişliği (<i>mm</i>)	12
L_2	Üst katman yama boyu (<i>mm</i>)	11

Çizelge 4.2 Yığılı yapı anten tasarım boyutları (devamı)

Dielektrik malzeme	Üst katman dielektrik malzeme	Köpük
h_2	Üst katman dielektrik Kalınlığı (mm)	3
ϵ_{r2}	Üst katman dielektrik sabiti	1.07
$\tan\delta_2$	Üst katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.001

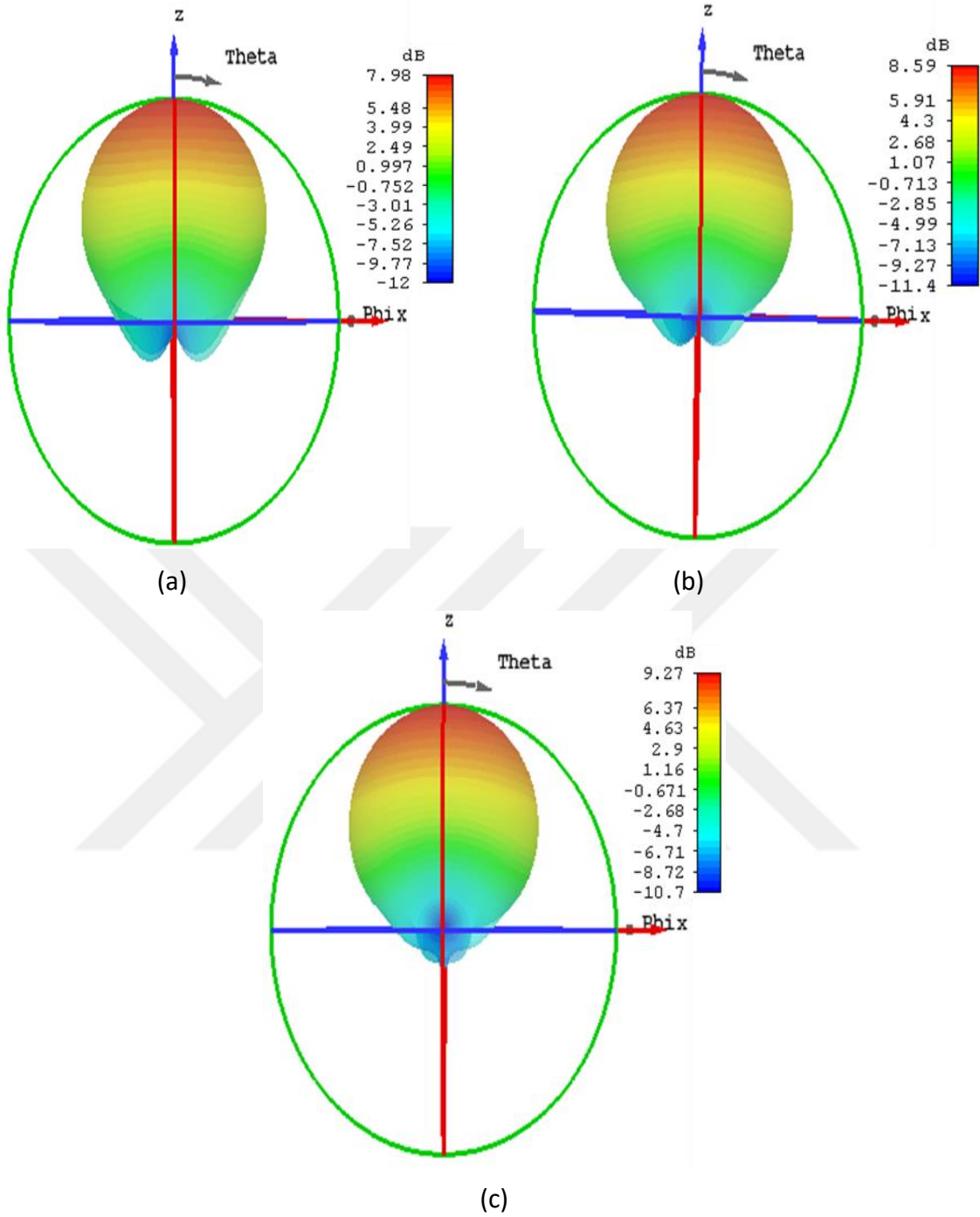


Şekil 4.6 Yığılı yapı mikroşerit yama anten S_{11} grafiği



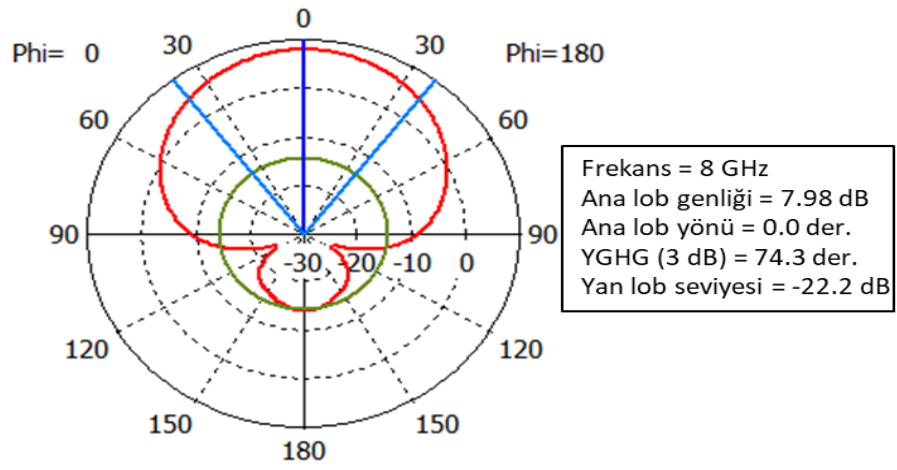
Şekil 4.7 Yığılı yapı mikroşerit yama anten $GDDO$ grafiği

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 grafiklerini incelendiğinde yığılı yapının 8-10 GHz frekans bandında çalıştığı görülmektedir. Alt çalışma frekansı $f_a=8$ GHz, üst çalışma frekansı ise $f_u=10$ GHz olarak ölçülmüştür. Bu durumda 2 GHz'lik bir çalışma bant aralığına ulaşmaktayız. Merkez frekansı $f_0=9$ GHz alırsak; %BG = %23 civarında hesaplanmaktadır.

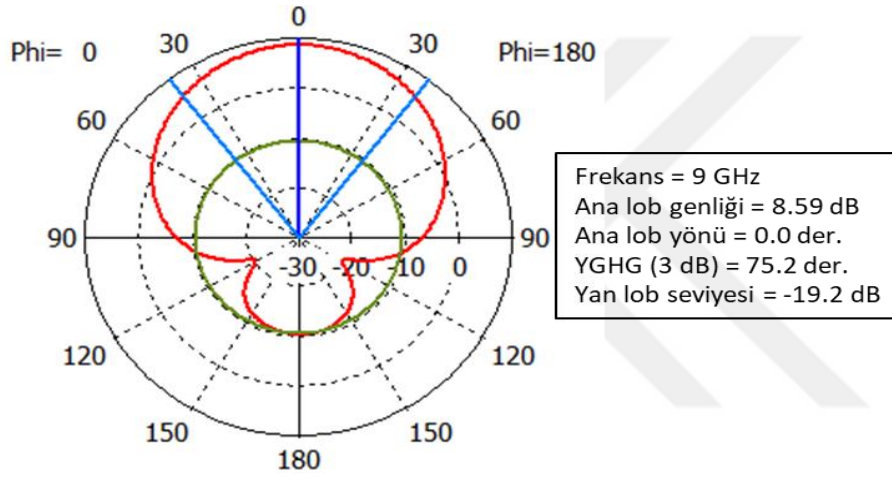


Şekil 4.8 Yığılı yapıdaki yama antene ait 3-boyutlu ışıma örüntüsü (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

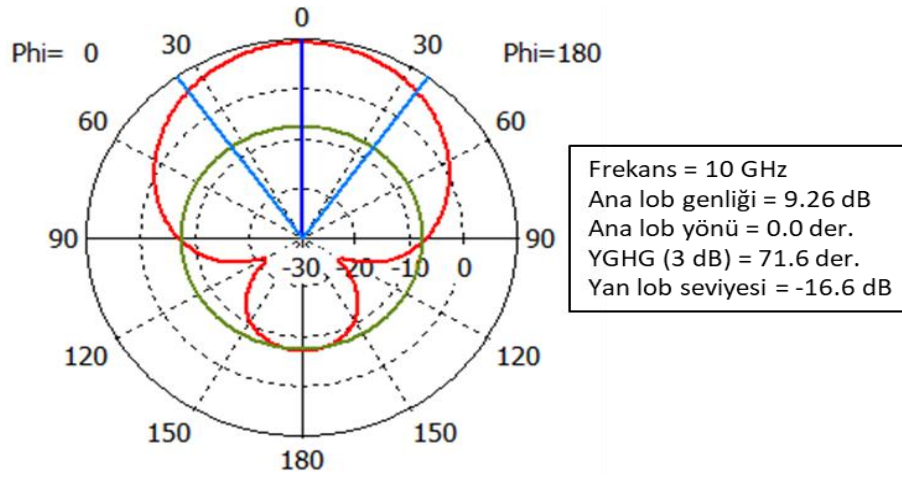
Şekil 4.8’de yığılı yapıdaki mikroşerit antene ait 3 boyutlu ışıma örüntüsünde antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 4.9’da ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genişliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.



(a)

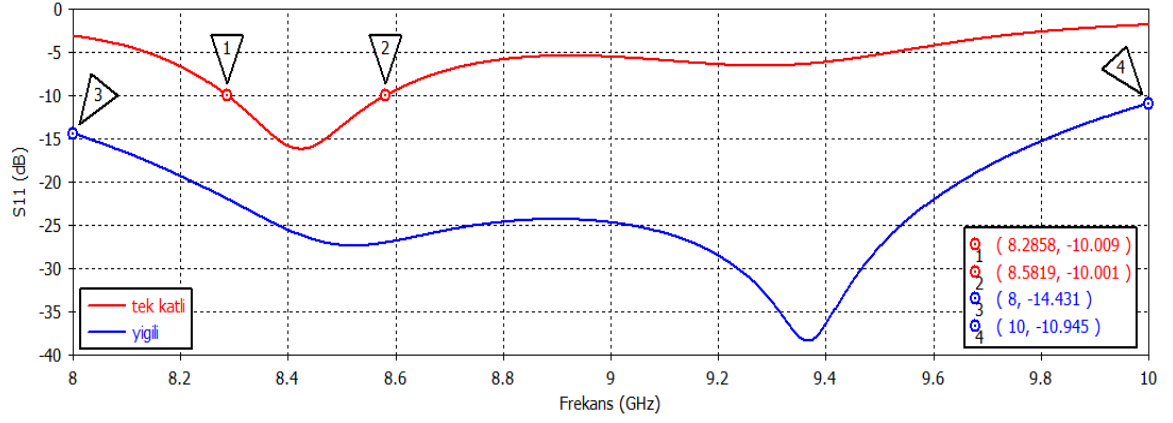


(b)

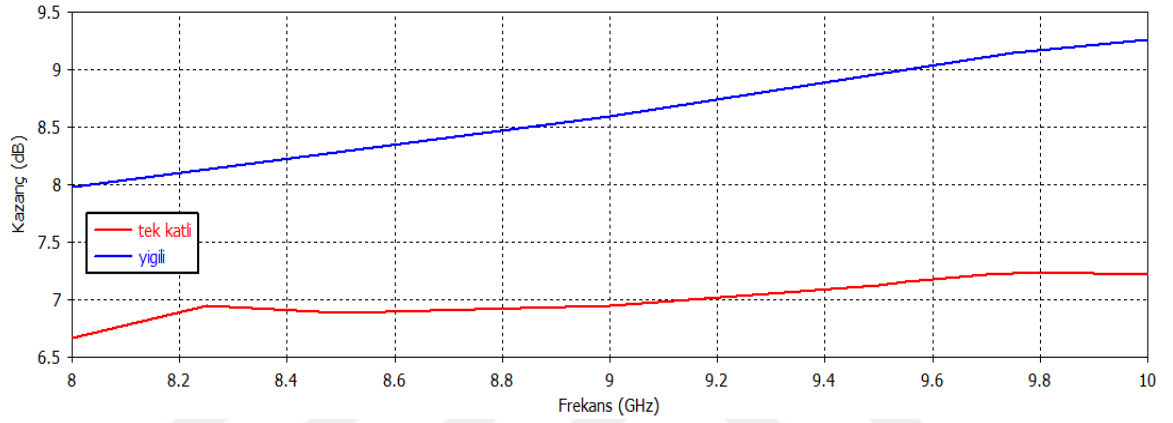


(c)

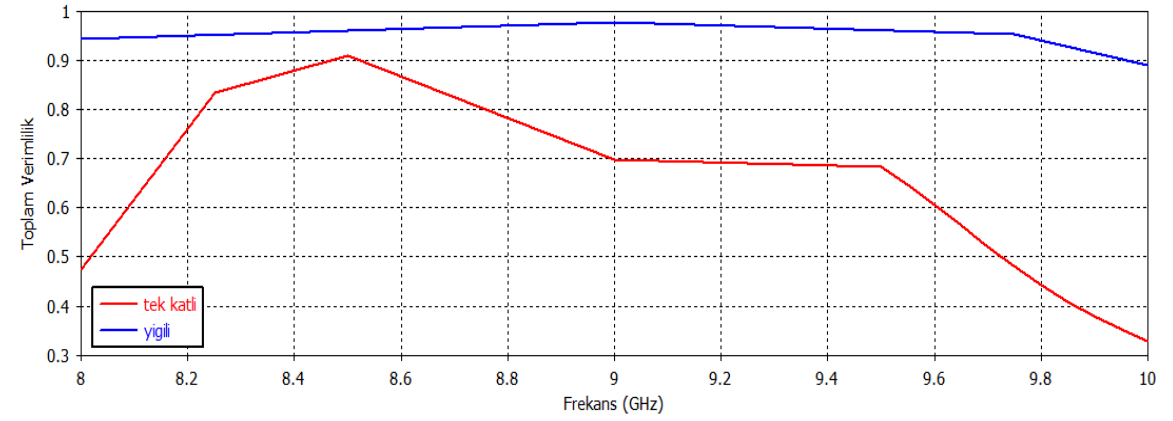
Şekil 4.9 Yığılı yapıdaki yama antene ait polar ışıma örüntüsü (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.10 Tek katmanlı ve yığılı yapıya ait (a) geri dönüş kaybı (S_{11}), (b) kazanç, (c) toplam verimliliğin frekans ile değişimi

Şekil 4.10 (a)'da tek katmanlı ve yığılı yapı S_{11} değerleri birlikte verilmiştir. Grafikleri incelediğimizde geri dönüş kaybı değerinin maksimum -10 dB olduğu frekans değerleri tek katmanlı yapı için 1-2 numaralı işaretçilerle belirtilmiş olup 3-4 numaralı işaretçiler de yığılı yapı için kullanılmıştır. Şekil 4.10 (b)'de ise yığılı yapının tek katmanlı yapıya

göre 8-10 GHz frekans bandında anten kazancının daha fazla olduğu görülmektedir. Son olarak Şekil 4.10 (c)'de görüldüğü gibi tek katmanlı yapı sadece 8.3-8.7 GHz frekans bandında %80'nin üzerinde bir toplam verimlilik gösterirken diğer frekans değerlerinde bu oran daha da aşağı seviyelere düşmektedir. Yığılı yapı ise tanımlanan tüm frekans bandında (8-10 GHz) %90'nın üzerinde bir verimlilik performansı göstermektedir.

Çizelge 4.3 Tek katmanlı ile yığılı yapı parametrik karşılaştırma

Tasarım Tipi	%BG	G_{max} (10GHz)	$D_{maks.}$ (10GHz)	% e_{top} (min.-maks.)	$YGHG_D$ (10GHz)
Tek Katmanlı	3.8	7.2 dB	7.42 dBi	33-90	87.4°
Yığılı Yapı	23	9.26 dB	9.4 dBi	90-97.7	71.6°

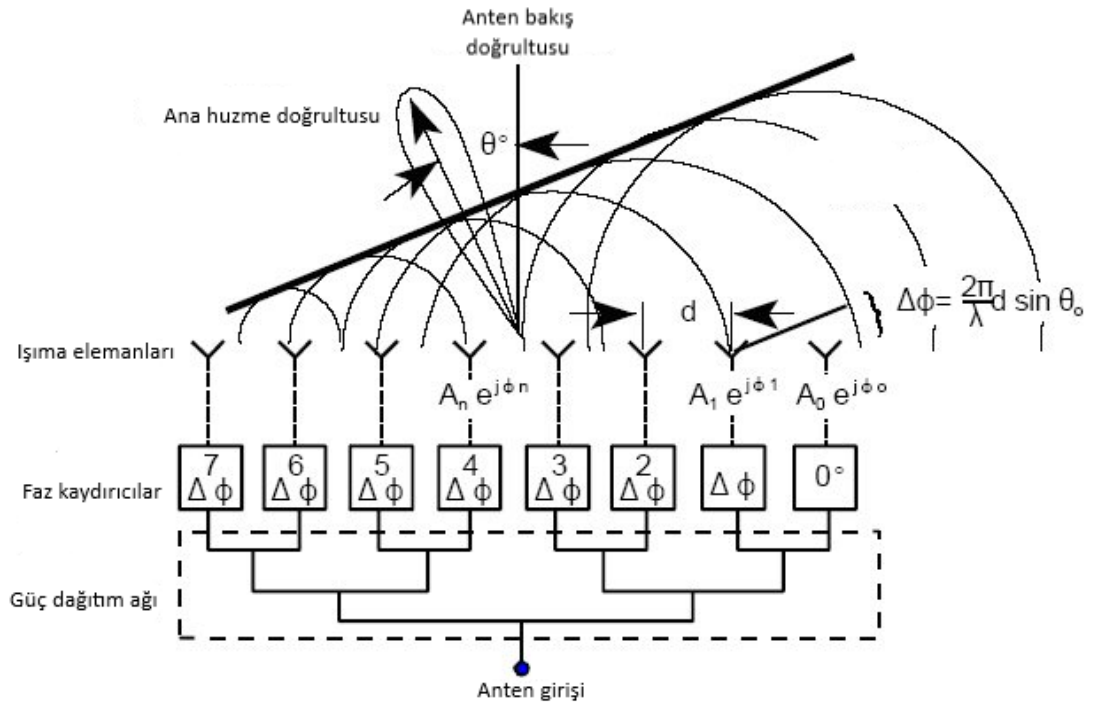
Bu simülasyon ve tasarım sonuçları ışığında Çizelge 4.3'te verilen kazanç, bant genişliği ve toplam verim performansları neticesinde yığılı yapı yama anten, faz dizili antenin temel anten elemanı olarak seçilmiştir. Bölüm 6'da Lineer ve düzlemsel faz dizili anten tasarımına ait ayrıntılar verilmiştir.

BÖLÜM 5

FAZ DİZİLİ ANTEN

Bu bölümde faz dizili yapılarla ilgili teorik bilgiler ışığında elektromanyetik alan denklemleri verilecektir.

Faz dizi antenler, her ışıma elemanın farklı faz açılarıyla beslenerek belirlenen açı doğrultusuna huzme yönlenmesini sağlayan bir anten grubudur. Böylelikle elektronik huzme taraması yapabilen bir anten ışıma çizgesi oluşur [30]. Şekil 5.1’de huzme yönlenebilmesi için gerekli yapıları da içeren temel faz dizili anten mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Faz dizili anten mimarisi

Bazı durumlarda kullanılan tek bir anten elemanı ihtiyaçları karşılamayabilir. Genel olarak tek bir antenin anten kazancı düşüktür ve huzme tek bir doğrultuda yoğunlaşır. Gereksinimler doğrultusunda anten kazancının artırılması ve huzme şekillendirilmesi yapıp huzmenin ışıma doğrultusunda yoğunlaştırılması gerekmektedir [33]. Örneğin, EM dalganın çok uzaklara dar huzme ile iletilmesi için gerekli anten çok büyük boyutta olacaktır. Bunun yerine, uygun parametreler ile oluşturulan anten dizisi ile EM dalga iletimi daha az maliyeti ve daha pratik olmaktadır [34].

Anten dizileri yan lob seviyelerini bastırması, yönlendiricilik kazancını arttırması, huzme genişliği daraltıp açısız çözünürlüğü arttırması ve ışıma mesafesini arttırmasıyla tek bir antene nazaran daha fazla kullanılır [23]. Bu ışıma parametrelerini sağlamak için anten dizileri tasarlanır. Anten dizileri birden fazla anten elemanının istenilen doğrultu ve geometrik şekilde yerleştirilmesi ile oluşur. Anten dizisi için her tip anten temel eleman olarak seçilebilir. Diziyi oluşturan anten elemanlarının tümü aynı tip olabileceği gibi farklı tipte antenlerin yerleşimi ile de dizi oluşturulabilir. Bununla birlikte anten dizisinin toplam EM alanını, ışıma örüntüsünü hesaplamak için temel anten elemanı olarak aynı tip antenler tercih sebebidir. Dizi antenin üretimi ve tasarımının kolaylığı sebebiyle mikroşerit antenler, dizi elemanı olarak en çok tercih edilene anten türlerindendir [33].

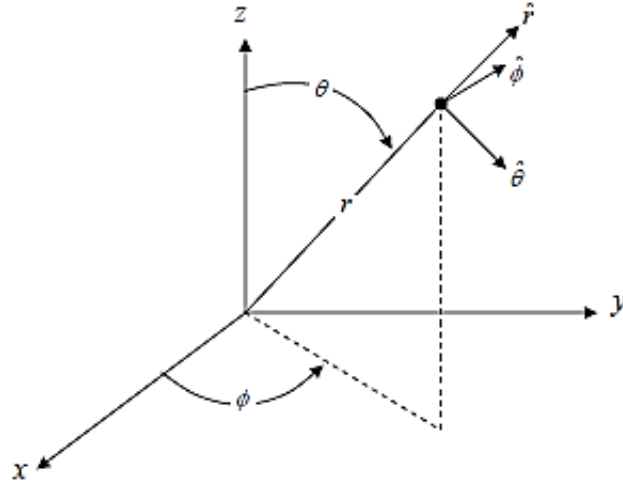
Bu tezde de dizi anten önceki bölümlerde analizi verilen mikroşerit anten, dizi tasarımında kullanılmıştır.

Oluşturulan dizi antenin elektrik ve manyetik alan şiddetleri, her bir anten elemanın ışıma alanlarının vektörel toplanması ile oluşur. Işımanın istenen yönde elde edilebilmesi için, her bir antenin ışıma örüntüsünün istenilen yönde birbirine eklenip, ışıma yapılmak istenmeyen yönde ise birbirini sönmemesi sağlanmalıdır. Anten dizisinin toplam anten örüntüsünü şekillendirmek adına 5 kontrol unsuru vardır [23]. Bunlar aşağıda verilmiştir:

- Dizinin geometrik yerleşimi (lineer, dairesel, küresel vb.)
- Dizi elemanları arasındaki mesafe
- Her bir dizi elemanın uyarım genliği
- Her bir dizi elemanın uyarım fazı

- Her bir dizi elemanın ışıma örüntüsü [23]

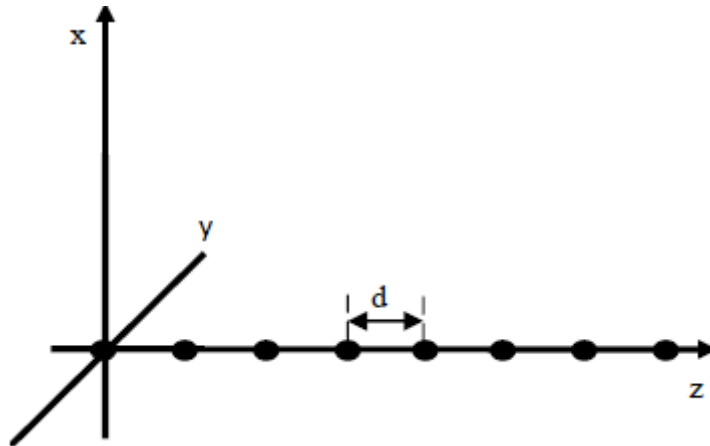
Anten dizisinin yerleşimi ve analizi yapılırken Şekil 5.2’de gösterilen küresel koordinat sistemi referans alınmıştır. θ ve ϕ açıları yatay (x-y) ve düşey (z) düzlemleri ifade etmekte kullanılır. Burada ϕ , +x eksenini merkez kabul edip x-y düzleminde hareket eder ve $0 \leq \phi \leq 2\pi$ (rad.) arasında değer alabilir. θ ise +z eksenini merkez kabul edip $0 \leq \theta \leq \pi$ (rad.) arasında değer alır [35].



Şekil 5.2 Anten koordinat sistemi

5.1 Doğrusal (Lineer) Dizi Anten Analizi

Birden fazla antenin aynı eksen boyunca aralarında mesafe bırakarak dizildiği yapılardır [23]. Doğrusal anten dizi geometrisi örneği Şekil 5.3’de verilmiştir.

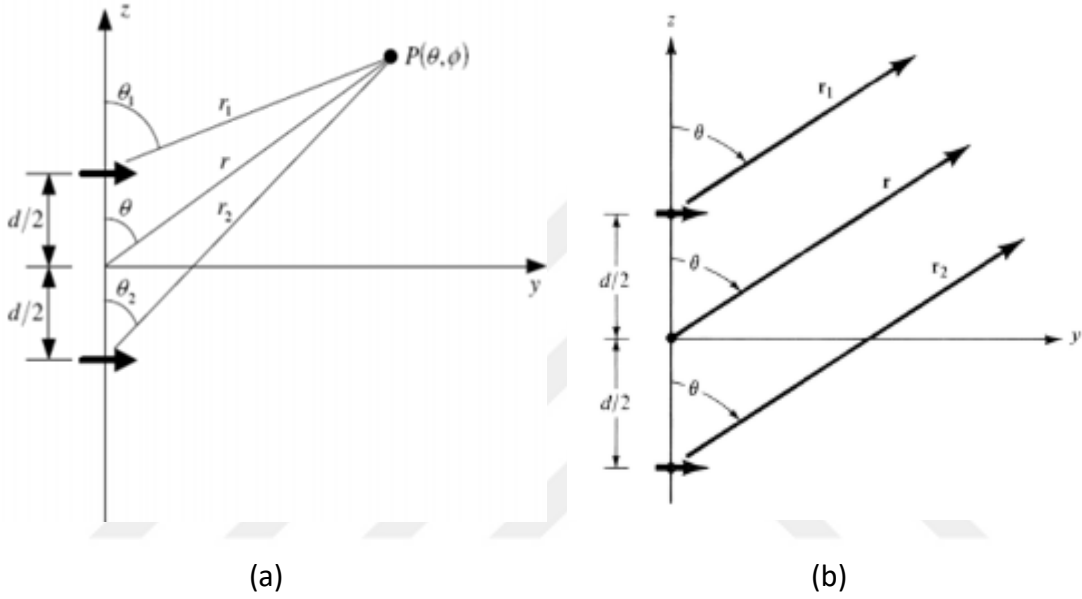


Şekil 5.3 Örnek doğrusal dizi anten yerleşimi

Doğrusal anten dizisi elektrik alan ifadelerini çıkartmak ve analizini yapmadan önce iki elemanlı dizi incelemesi yapmak doğru olacaktır.

5.1.1 İki Elemanlı Doğrusal Dizi Analizi

Şekil 5.4’de dipol anten elemanlarından oluşan z eksenı boyunca konumlandırılmış, iki elemanlı dizi gösterilmiştir. Şekil 5.4 (a) ve Şekil 5.4 (b) yakın alan ve uzak alan davranışlarını göstermektedir [23], [34].



Şekil 5.4 İki elemanlı doğrusal dizi (a) yakın alan davranışı , (b) uzak alan davranışı

Tek bir anten elemanın uzak elektrik alan ifadesi:

$$E = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \cos(\theta) , kr \gg 1 \quad (5.1)$$

şeklinde yazılabilir. Elemanlar arası kuplaj etkisi olmadığı kabul edilerek, y-z düzleminde oluşturdukları toplam elektrik alanı şu şekilde ifade edebiliriz:

$$E_T = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi r} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 + (\beta/2)]}}{r_2} \cos\theta_2 \right\} \quad (5.2)$$

Burada η serbest uzayın dalga empedansını (120π), k faz sabitini ($2\pi/\lambda$), I_0 uyarım akımı genliğini, d = dizi elemanları arasındaki mesafeyi, β = faz farkını göstermektedir. Uzak alan koşulunda; $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ olarak kabul edilmektedir. Bu durumda faz değişkenleri için;

$$r_1 = r - \frac{d}{2} \cos \theta \quad (5.3a)$$

$$r_2 = r + \frac{d}{2} \cos \theta \quad (5.3b)$$

genlik değişkenleri için ise;

$$r_1 = r_2 = r \quad (5.4)$$

kabul edilebilir. Bu varsayımlar ile birlikte eşitlik (5.2) yeniden düzenlendiğinde;

$$E_T = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} |\cos \theta| \left[e^{+j(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)/2} \right] \quad (5.5)$$

$$E_T = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (5.6)$$

eşitlik (5.6) elde edilir.

(5.1) ve (5.6)'ya bakıldığında; dizi toplam elektrik alan ifadesinin, tek bir eleman elektrik alan ifadesiyle dizi faktörünün (DF) çarpımı sonucu elde edildiği görülür. Sabit genlik dağılımına sahip iki elemanlı dizi için dizi faktörü:

$$DF = 2 \cos \theta \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (5.7)$$

olarak ifade verilir [23].

N elemanlı bir dizi için dizi faktörü ifadesi:

$$(DF)_n = \cos \theta \left[\frac{1}{2} (kd \cos \theta + \beta) \right] \quad (5.8)$$

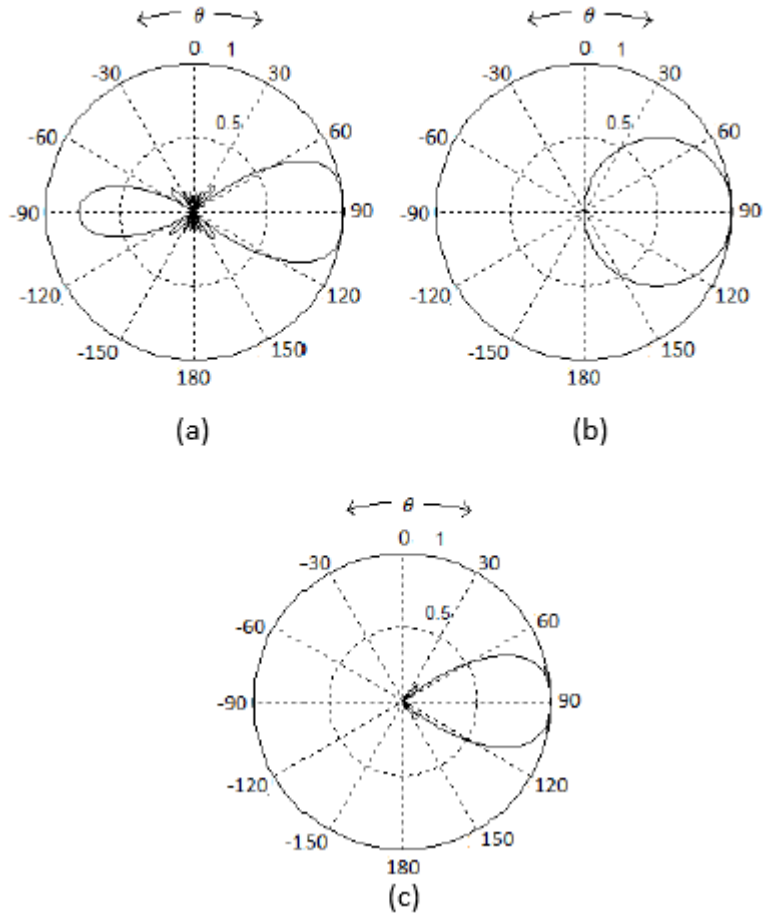
yazılırken,

$$E(\text{toplam}) = [E(\text{tek bir eleman}) \times DF(\text{dizi faktörü})] \quad (5.9)$$

olarak ifade edilebilir.

Dizi faktörü; dizi anten elemanı sayısının , elemanlar arasındaki faz farkının, elemanlar arasındaki mesafenin ve elemanların geometrik diziliminin bir fonksiyonudur. Anten dizilerinde dizi faktörü; antenlerin geometrik diziliminin, anten sayısının, antenler arası faz farkının ve antenler arası mesafenin bir fonksiyonudur. Şekil 5.5 (a) dizi faktörü

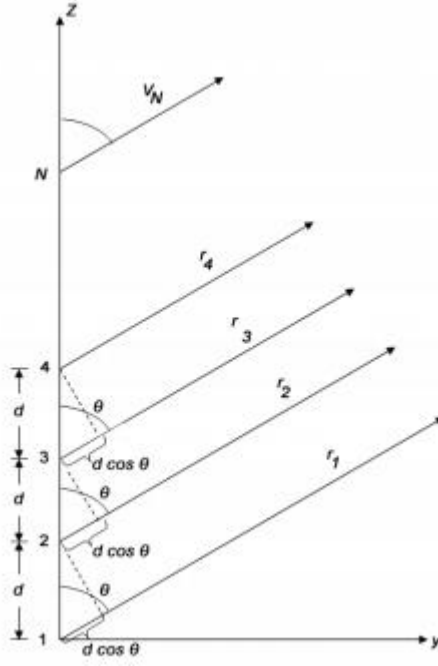
örüntüsünü, Şekil 5.5 (b) dizi elemanı örüntüsünü, Şekil 5.5 (c) ise toplam ışıma örüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.5 İki elemanlı dizinin (a) DF örüntüsü, (b) eleman örüntüsü, (c) toplam ışıma örüntüsü

5.1.2 N Elemanlı Doğrusal Dizi Analizi

İki elemanlı anten dizisi de doğrusal anten dizisi olmakla beraber, anten dizisi karakteristiğinin daha iyi kontrol edilebilmesi için, eleman sayısının arttırılması gereklidir. Şekil 5.6'te N elemanlı aynı doğrultuda yerleşimi yapılan doğrusal anten dizisi geometrisi görülmektedir.



Şekil 5.6 z-eksenine yerleştirilmiş N -elemanlı doğrusal dizi anten yerleşimi

N elemanlı doğrusal anten dizisinin her elemanının özdeş ve besleme faz farklarının bir önceki elemana göre β kadar fark olduğunu varsayarak, dizinin toplam Elektrik alan ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$E_T = a_1 e^{j\left(\frac{1}{2}\right)k d \sin \theta} + a_2 e^{j\left(\frac{3}{2}\right)k d \sin \theta} + \dots + a_N e^{j\left[\frac{2N-1}{2}\right]k d \sin \theta} \quad (5.9)$$

$$E_T = \sum_{n=1}^N a_n e^{j[(2N-1)/2]k d \sin \theta} \quad (5.10)$$

$\psi = (k d \cos \theta + \beta)$ (z-eksenine dizili anten için faz ifadesi) ise dizi faktörü:

$$DF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (5.11)$$

şeklinde yazılır [23].

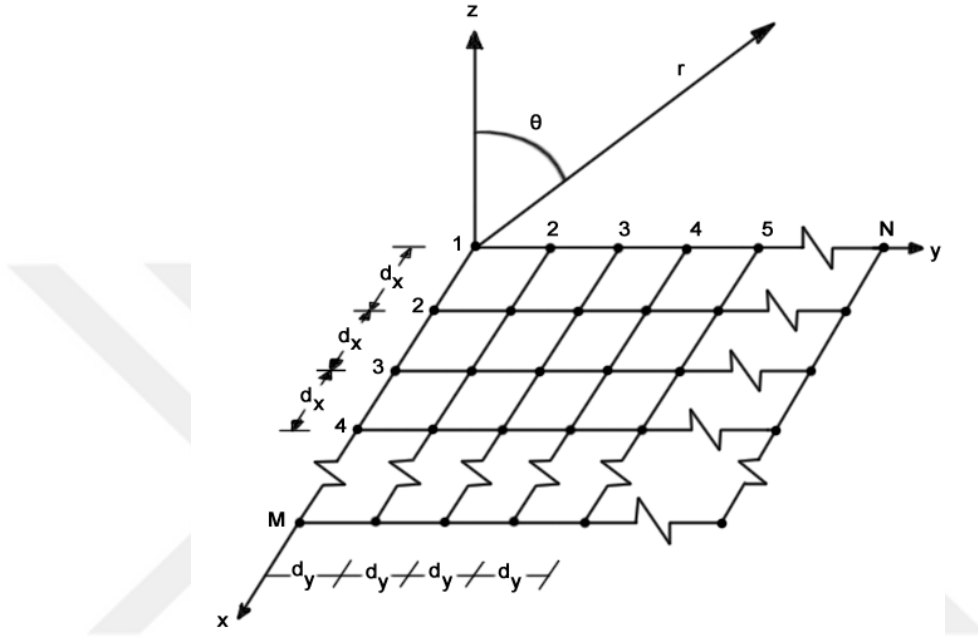
5.2 Düzlemsel Dizi Anten Analizi

Anten elemanları doğrusal dizi anten diziliminde sadece bir eksen üzerine yerleştirilebilirken, Şekil 5.7’de görüldüğü gibi aynı anda farklı eksenler üzerine yerleştirilip düzlemsel bir yapı oluşturulur. Düzlemsel anten dizilerinin doğrusal anten dizilerine göre başlıca avantajları şunlardır:

- Yatay ve düşeyde daha simetrik ışıma huzmesi oluşturulabilmesi

- Daha düşük yan lob seviyelerinin elde edilebilmesi
- Ana ışınma huzmesinin bir düzlem ile sınırlı kalmayıp, uzayın herhangi bir noktasına yönlenebilmesi

Bu tipte oluşturulan anten yapıları başta radar sistemleri olmak üzere birçok sayısal haberleşme uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır [36].



Şekil 5.7 Düzlemsel dizi anten dizilimi

Düzlemsel dizi antende dizi faktörü ifadesini elde etmek için öncelikle düzlemsel yapının N adet anten elemanından oluşan M adet doğrusal dizinin yan yana konumlandırılması ile meydana getirildiği varsayılabilir. Doğrusal dizi için eşitlik (5.11)'de belirtilen dizi faktörü ifadesi kullanılarak eşitlik (5.12) elde edilir [36].

$$DF = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \varphi + \beta_x)} \quad (5.12)$$

Burada; I_{m1} doğrusal diziler için uyarım akımını, d_x x-ekseninde bulunan dizi elemanları arasındaki mesafeyi, β_x ise x-ekseni üzerinde bir önceki dizi elemanına göre faz farkını ifade etmektedir. Bu durumda tüm düzlemsel alan için dizi faktörü:

$$DF = \sum_{n=1}^M I_{1n} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \varphi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \varphi + \beta_y)} \quad (5.13)$$

eşitlik (5.13) şeklinde yazılabilir. Burada; d_y y -ekseninde bulunan dizi elemanları arasındaki mesafeyi, β_y ise y -ekseni üzerinde bir önceki dizi elemanına göre faz farkını ifade etmektedir. Uyarım akımının tüm dizi için aynı olduğu kabul edildiğinde eşitlik (5.14) elde edilir.

$$DF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_y \sin\theta \cos\varphi + \beta_y)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y)} \quad (5.14)$$

Düzlemsel anten için normalizasyon işlemi yapıldığında ise eşitlik (5.15) elde edilmektedir.

$$DF_n(\theta, \varphi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (5.15)$$

Burada:

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x \text{ (x-eksenine dizili anten için faz ifadesi)} \quad (5.16a)$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y \text{ (y-eksenine dizili anten için faz ifadesi)} \quad (5.16b)$$

olarak kullanılır. Eşitlik (5.15)'te elde edilen ifade anten elemanları arasındaki faz farkının bir önceki eleman ile aynı olduğu durum için oluşturulmuştur. Dizi elemanları arasındaki faz farkının bir önceki ile aynı olması, uygulamada antenlerin beslemesini basitleştirmektedir. Anten elemanlarının uyarım fazlarının birbirinden farklı olması durumunda anten dizisi için dizi faktörü şu şekilde verilir [36]:

$$DF(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N \alpha_i e^{j\beta_i} e^{j2\pi d_x \sin\theta \cos\varphi} e^{j2\pi d_y \sin\theta \sin\varphi} \quad (5.17)$$

Her iki düzlemde yer alan ışın elemanları arasındaki faz farkı değeri β ise ψ_x ve ψ_y eşitliklerinin sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir.

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x|_{\theta=\theta_0, \varphi=\varphi_0} = kd_x \sin\theta_0 \cos\varphi_0 = 0 \text{ ise;}$$

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \quad (5.17a)$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y|_{\theta=\theta_0, \varphi=\varphi_0} = kd_y \sin\theta_0 \sin\varphi_0 = 0 \text{ ise;}$$

$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \quad (5.17b)$$

FAZ DİZİLİ MİKROŞERİT ANTEN TASARIMI

Bu bölümde önceki bölümlerde verilen bilgiler ışığında lineer ve düzlemsel faz dizili anten tasarımı yapılacaktır. Nihai tasarıma karar verilene kadar olan iterasyonlar ve sonuçları paylaşılarak tasarım son haline getirilecektir. Nihai tasarıma ulaşmak için faz dizili anten simülasyonları anten kazancı, S -parametreleri, yarım güç huzme genişliği, ışıma örüntüleri, yan kulakçık seviyeleri, ışıma verimliliği gibi anten parametreleri açısından karşılaştırılacaktır.

6.1 Tasarım Prosedürü

Tasarımda ulaşılmak istenen hedefler çizelge 6.1’de verilmiştir. Tasarım denemelerindeki karşılaştırmalar bu hedefler doğrultusunda gerçekleşmiştir.

Bölüm 3’te tasarım detayları verilen katmanlı mikroşerit anten faz dizili yapıyı oluşturma aşamasında kullanılmıştır. Bunun yanı sıra Bölüm 3’te belirtildiği gibi faz dizili anten tasarım ve simülasyonlarında da CST Mikrodalga Stüdyo simülasyon benzetim programı kullanılmıştır.

Bu kapsamda Bölüm 6.2’de detayları verilen 4 adet tasarıma ait sonuçlar anten parametreleri doğrultusunda karşılaştırılarak içlerinden en uygun olan tasarım seçilmiştir.

Çizelge 6.1 Tasarım kriterleri

Tasarım Özelliği	Değer
Boyut	1 x 8 (Lineer Dizi) , 8 x 8 (Düzlemsel Dizi)
Frekans Bandı	8-10 GHz
Polarizasyon	Lineer
Tarama Yönü	Yatay (Lineer dizi) , Yatay ve Dikey (Düzlemsel Dizi)
Aktif S-Parametresi (Geri Dönüş Kaybı)	≤ -10 dB
Tarama Alanı	E-düzlemi (Lineer dizi) , E ve H-düzlemi (Düzlemsel dizi) Maksimum Limit
İstenmeyen Ana Huzme	Oluşmamalı

6.2 1 x 8 Lineer Faz Dizili Anten Tasarımı ve Analizi

Anten elemanları faz dağılım hesapları 9 GHz frekansına göre yapılmıştır.

9 GHz frekansına karşılık gelen dalga boyu $\lambda_{(9GHz)} = 33.3$ mm'dir.

İstenmeyen ana huzme oluşmaması için gerekli maksimum d mesafesi; $d_{max} = \frac{\lambda}{1+\sin\theta}$ formülü ile hesaplanır. Burada d anten besleme noktaları arası mesafe, θ ise huzme yönlenme açısını belirtmektedir. Bu formüle göre hesaplanan yönlenme açısına karşılık gelen maksimum d değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Lineer dizide huzme yönlenme açılarına göre "istenmeyen ana huzme" oluşmadan verilecek maksimum " d " mesafeleri

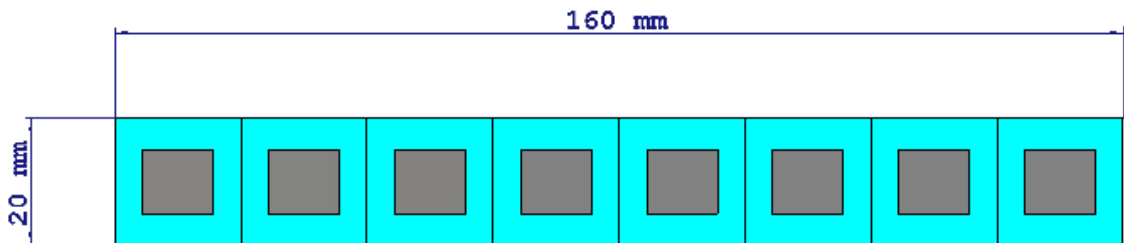
θ	$d_{maks.} (mm)$
0°	33.3
10°	28.38
20°	24.8
30°	22.2
40°	20.2

Lineer faz dizili anten elemanlarına uygulanacak faz değerlerinin hesaplamalarında anten, x -düzlemi boyunca yerleştirildiği için $\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\varphi_0$ formülü kullanılmıştır. Lineer faz dizili anten tasarımında karşılaştırmalı sonuçlar ışığında hedef değerlere ulaşmak için dört tasarıma ait veriler sunulmuştur. İlk tasarıma ait bilgiler Çizelge 6.3'te verilmiştir. Tezin bundan sonraki bölümlerinde ilk tasarım Tasarım-1 olarak adlandırılacaktır.

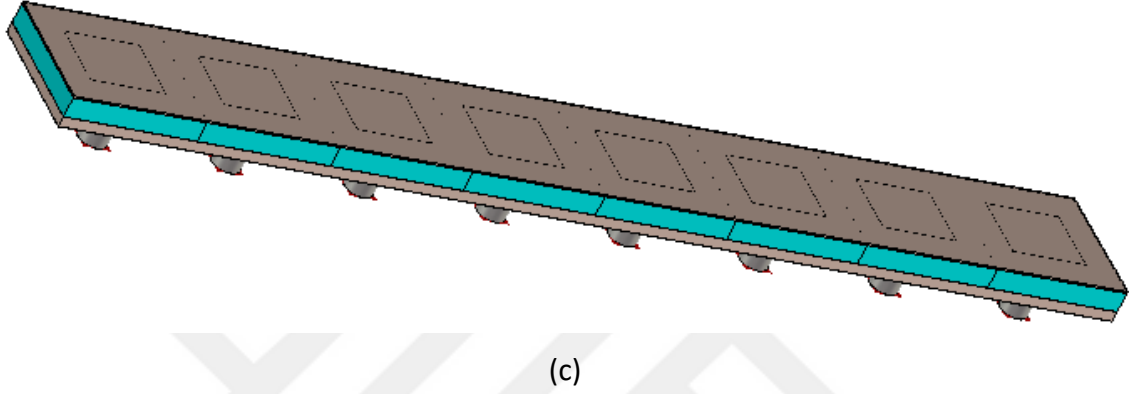
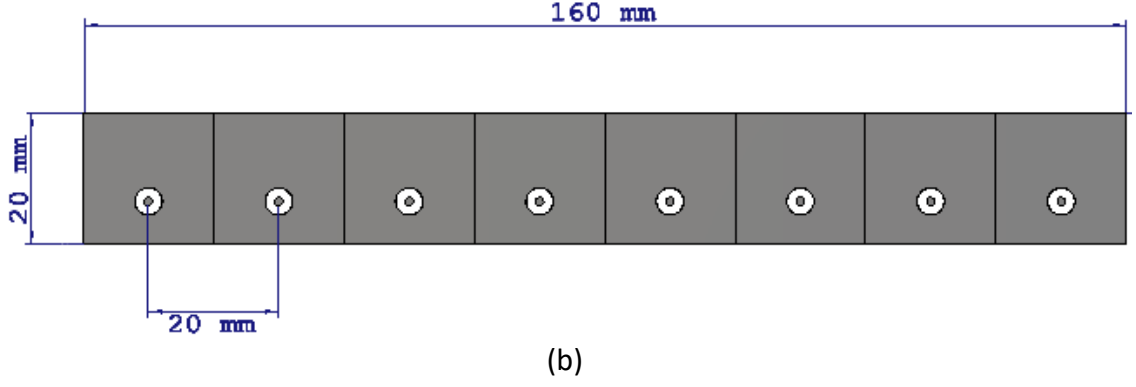
- **Tasarım-1**

Çizelge 6.3 Tasarım-1 anten parametreleri

Anten boyutları	En x Boy (mm)	20x160
d	Anten besleme noktaları arası mesafe (mm)	20
Genlik Dağılımı	Uniform	Uniform
W_1	Alt katman yama genişliği (mm)	7.5
L_1	Alt katman yama boyu (mm)	9
1.Dielektrik malzeme	Alt katman dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h_1	Alt katman dielektrik Kalınlığı (mm)	1.52
ϵ_{r1}	Alt katman dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta_1$	Alt katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027
W_2	Üst katman yama genişliği (mm)	12
L_2	Üst katman yama boyu (mm)	11
2.Dielektrik malzeme	Üst katman dielektrik malzeme	Köpük
h_2	Üst katman dielektrik Kalınlığı (mm)	3
ϵ_{r2}	Üst katman dielektrik sabiti	1.07
$\tan\delta_2$	Üst katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.001
3.Dielektrik Malzeme	Radom katmanı	Rogers 5880
h_3	Radom katman dielektrik Kalınlığı (mm)	0.254
ϵ_{r3}	Radom katman dielektrik sabiti	2.2
$\tan\delta_3$	Radom katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.009



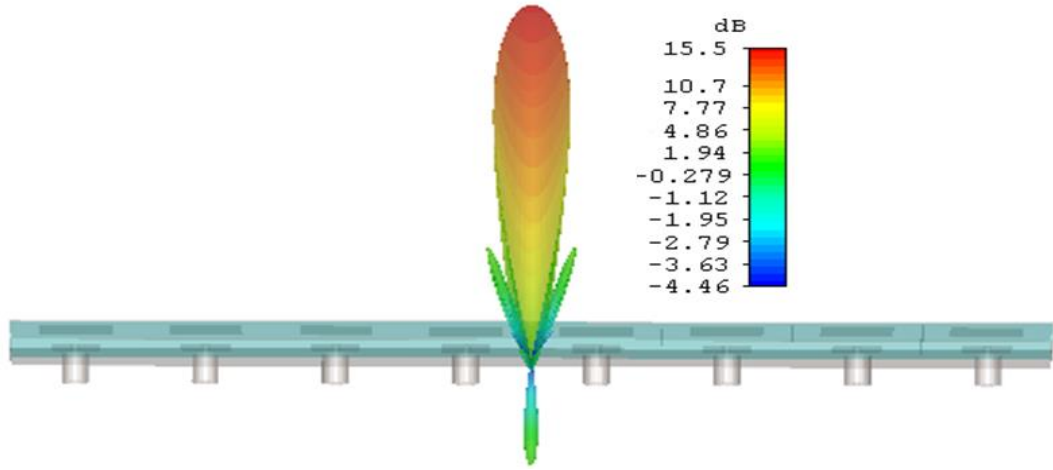
(a)



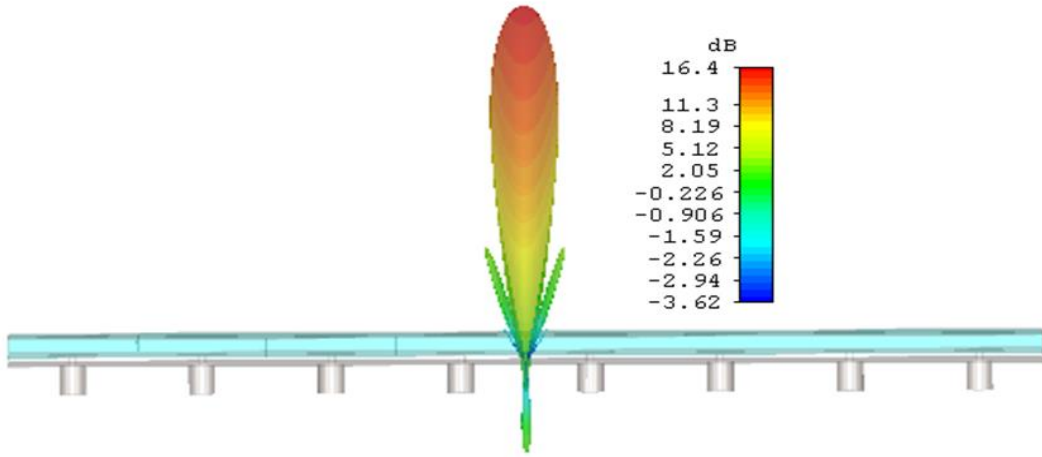
Şekil 6.1 Lineer dizi ilk tasarım (a) üst görünüm, (b) alt görünüm, (c) perspektif görünüm (parametreler: en x boy=20 x 160 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.25$ mm, $W_2=11.25$ mm)

Tasarım-1'e ait CST görünümleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Dizi antenin en üst katmanına radom görevi görmesi ve üretim durumunda üst katman yamaların köpük malzemeye intizamlı şekilde yapıştırılamaması sebebiyle 0.254 mikron kalınlığında $\epsilon_r = 2.2$ olan dielektrik malzeme (Rogers 5880) kullanılmıştır. Ayrıca tüm dizi anten tasarımlarına eklenerek simülasyon sonuçları bu katmanın da etkisi gözetilerek yapılmıştır. Şekil 6.2'de tasarım-1'e ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma)¹ antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.3'de ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.

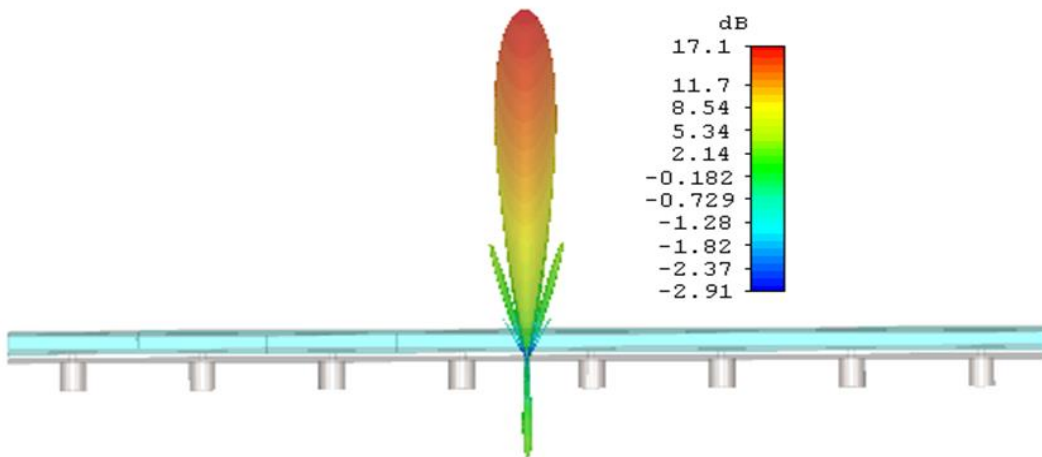
¹ Ana lob yönünün antenin bakış doğrultusunda oluşması broadside ışıma olarak adlandırılmaktadır [37].



(a)



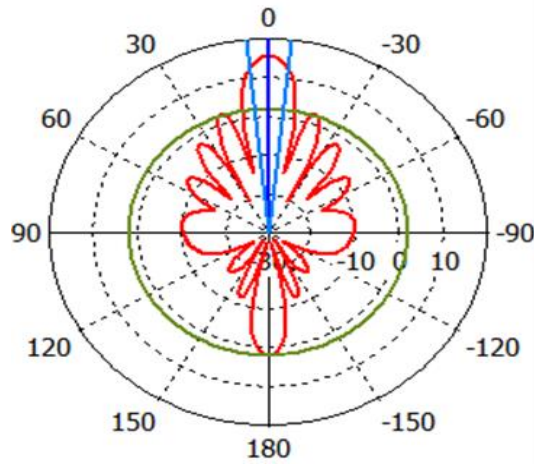
(b)



(c)

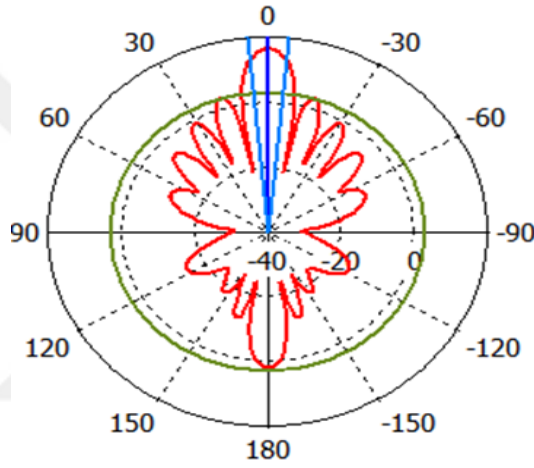
Şekil 6.2 Tasarım-1 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10

GHz



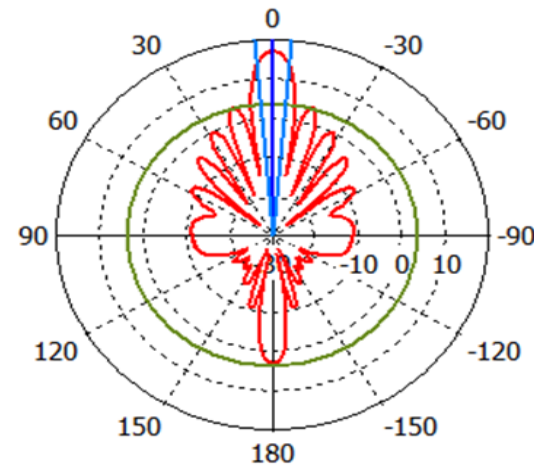
Frekans = 8 GHz
 Ana lob genliği = 15.5 dB
 Ana lob yönü = 0.0 der.
 YGHG (3 dB) = 11.7 der.
 Yan lob seviyesi = -13.3 dB

(a)



Frekans = 9 GHz
 Ana lob genliği = 16.4 dB
 Ana lob yönü = 0.0 der.
 YGHG (3 dB) = 10.5 der.
 Yan lob seviyesi = -13.2 dB

(b)



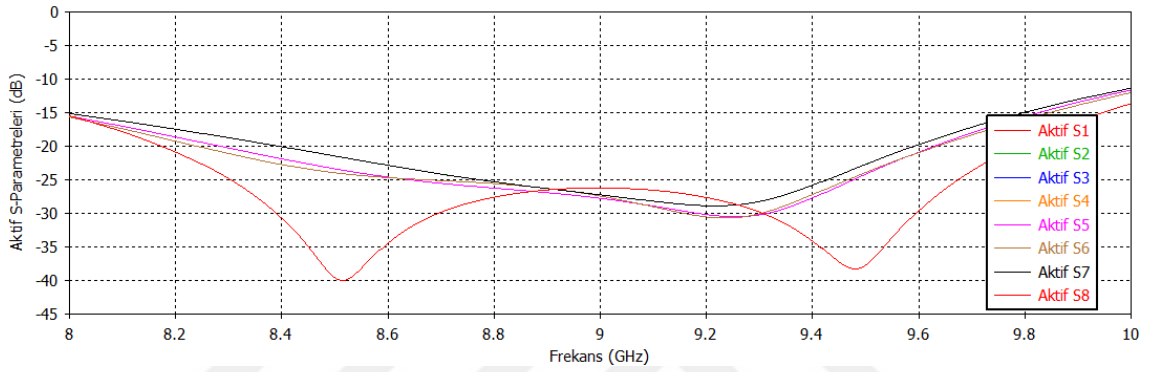
Frekans = 10 GHz
 Ana lob genliği = 17 dB
 Ana lob yönü = 0.0 der.
 YGHG (3 dB) = 9.4 der.
 Yan lob seviyesi = -13.1 dB

(c)

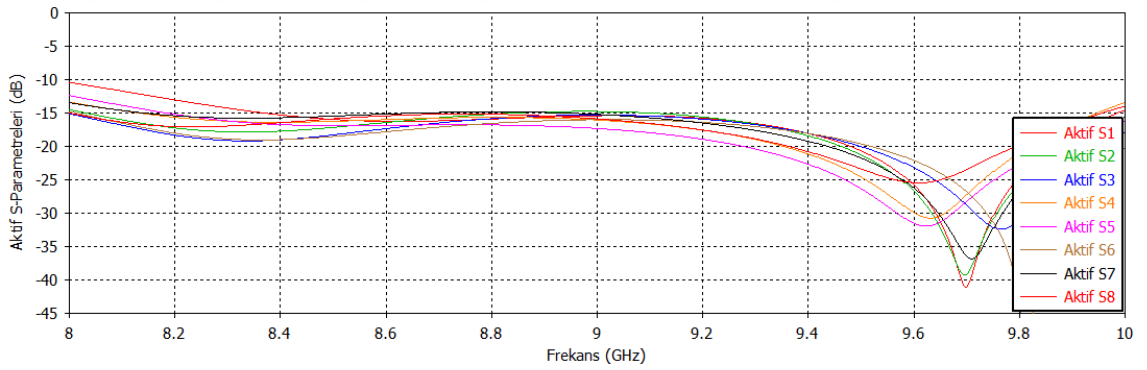
Şekil 6.3 Tasarım-1 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

Şekil 6.4'te anten broadside yönünde ışıma yaparken ($\theta=0^\circ$) tasarım-1'e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerinin -10 dB altında olduğu görülmüştür. Huzme yönlendirme yapılmadığı için aktif S parametreleri simetrik olarak çıktığından aktif S1 ve aktif S8, aktif S2 ve aktif S7, aktif S3 ve aktif S6, aktif S4 ve aktif S5 eşit çıkmaktadır.

Şekil 6.5'te anten huzmesi $\theta=30^\circ$ 'ye yönlendirilmişken tasarım-1'e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerinin -10 dB altında olduğu görülmüştür.



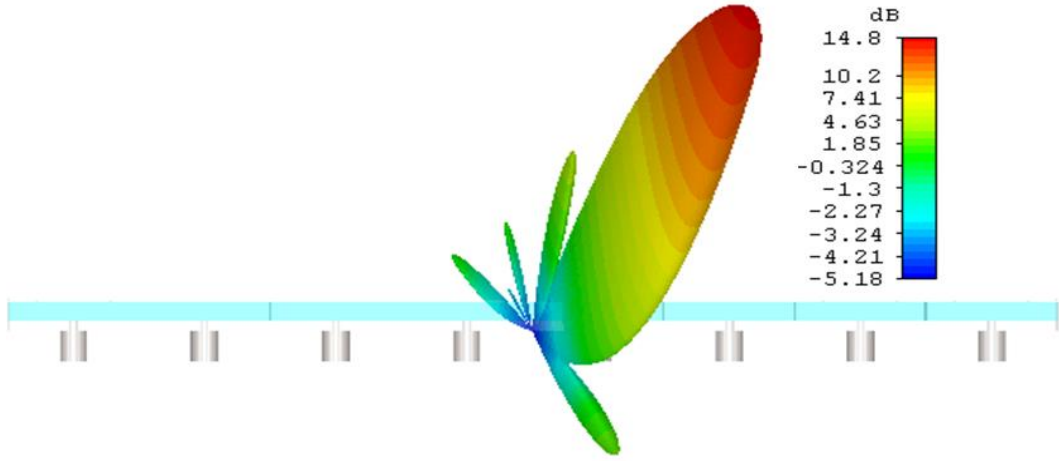
Şekil 6.4 Tasarım-1 aktif S-parametreleri ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$)



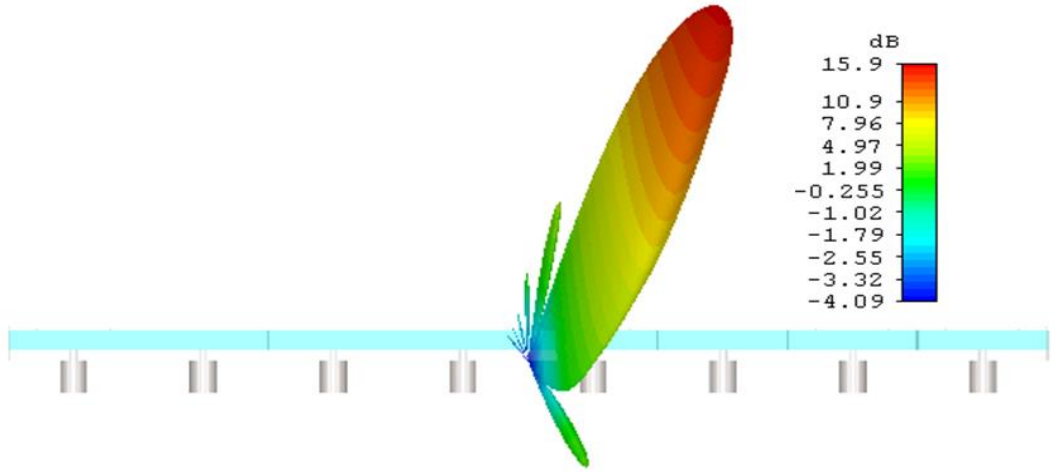
Şekil 6.5 Tasarım-1 aktif S-parametreleri ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$)

Şekil 6.6'da anten ana huzmesi $\theta=30^\circ$ 'ye yönlendirilmiş (boresight ışıma)¹ tasarım-1'e ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.7'de ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.

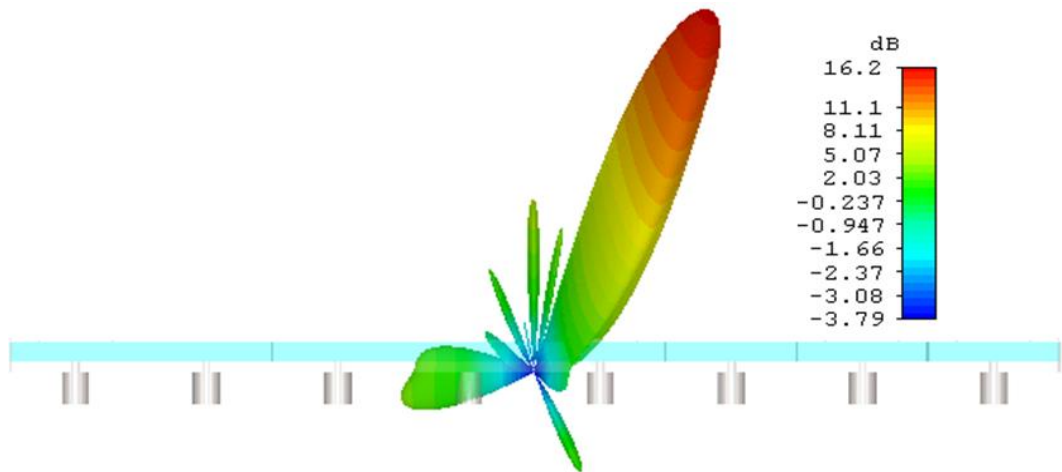
¹ Huzme yönlendirme yapıldığında maksimum kazançta sahip ışıma doğrultusu anten boresight olarak adlandırılır [38].



(a)



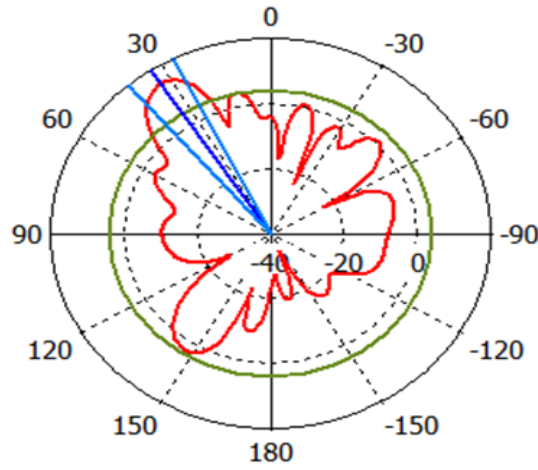
(b)



(c)

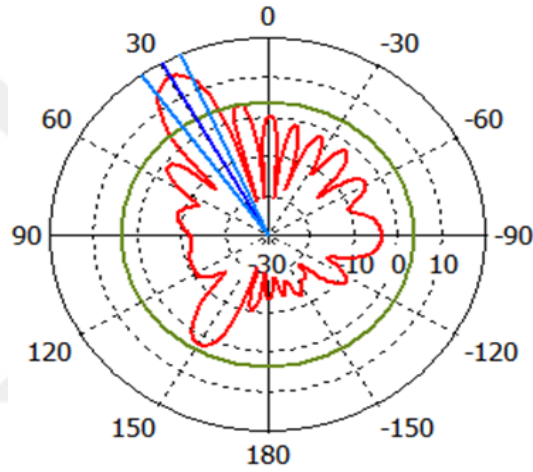
Şekil 6.6 Tasarım-1 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10

GHz



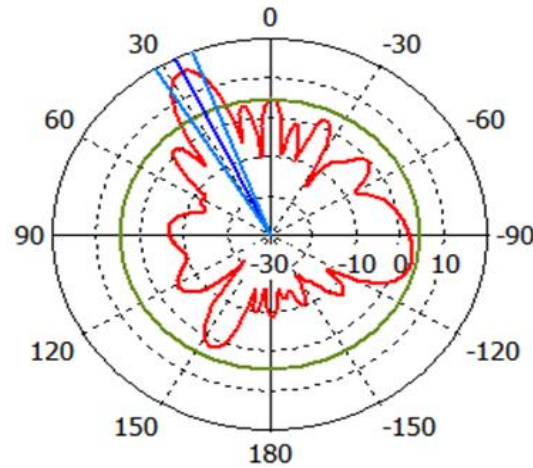
Frekans = 8 GHz
 Ana lob genliği = 14.8 dB
 Ana lob yönü = 33.0 der.
 YGHG (3 dB) = 14.1 der.
 Yan lob seviyesi = -10.5 dB

(a)



Frekans = 9 GHz
 Ana lob genliği = 15.9 dB
 Ana lob yönü = 29.0 der.
 YGHG (3 dB) = 12.2 der.
 Yan lob seviyesi = -12.0 dB

(b)



Frekans = 10 GHz
 Ana lob genliği = 16.2 dB
 Ana lob yönü = 26.0 der.
 YGHG (3 dB) = 10.5 der.
 Yan lob seviyesi = -11.5 dB

(c)

Şekil 6.7 Tasarım-1 polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

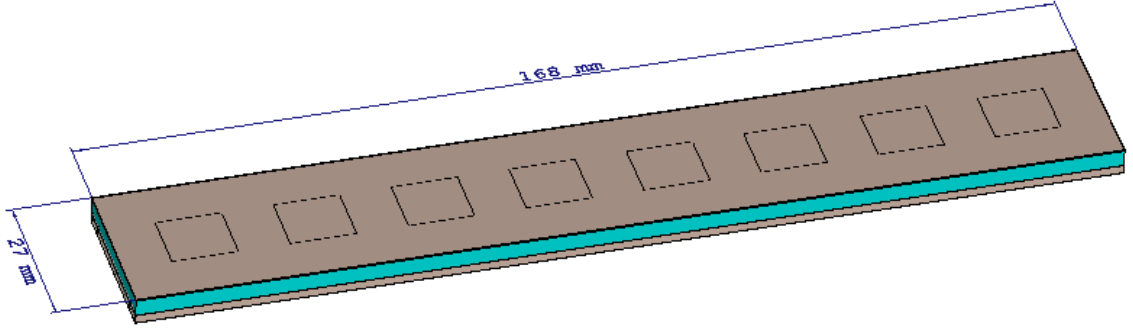
İkinci tasarıma ait bilgiler Çizelge 6.4'te verilmiştir. Tezin bundan sonraki bölümlerinde ikinci tasarım Tasarım-2 olarak adlandırılacaktır.

- **Tasarım-2**

Çizelge 6.4 Tasarım-2 anten parametreleri

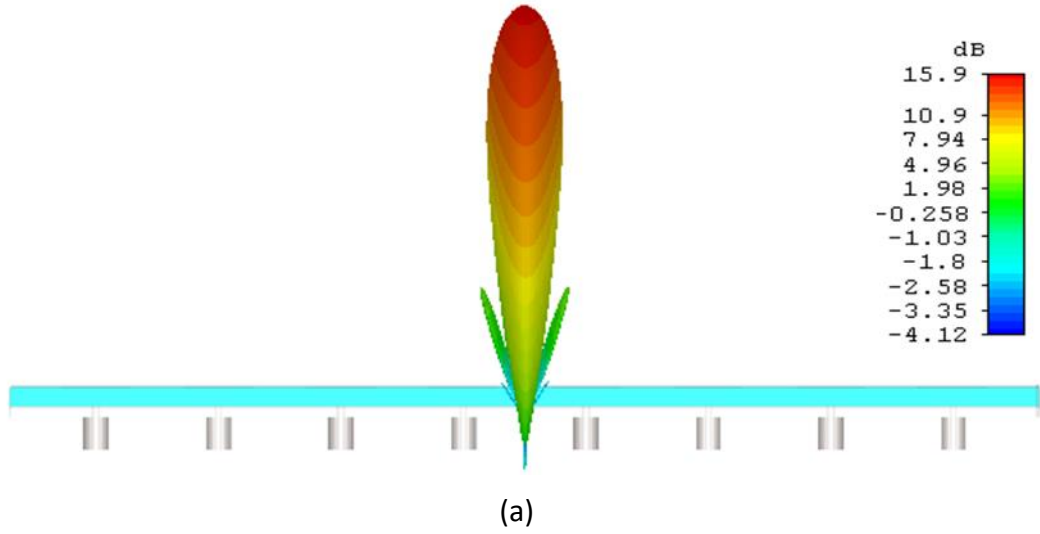
Anten boyutları	En x Boy (mm)	27x168
Genlik Dağılımı	Uniform	Uniform
d	Anten besleme noktaları arası mesafe (mm)	20
W_1	Alt katman yama genişliği (mm)	7.5
L_1	Alt katman yama boyu (mm)	9
1.Dielektrik malzeme	Alt katman dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h_1	Alt katman dielektrik Kalınlığı (mm)	1.52
ϵ_{r1}	Alt katman dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta_1$	Alt katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027
W_2	Üst katman yama genişliği (mm)	12
L_2	Üst katman yama boyu (mm)	11
2.Dielektrik malzeme	Üst katman dielektrik malzeme	Köpük
h_2	Üst katman dielektrik Kalınlığı (mm)	3
ϵ_{r2}	Üst katman dielektrik sabiti	1.07
$\tan\delta_2$	Üst katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.001
3.Dielektrik Malzeme	Radom katmanı	Rogers 5880
h_3	Radom katman dielektrik Kalınlığı (mm)	0.254
ϵ_{r3}	Radom katman dielektrik sabiti	2.2
$\tan\delta_3$	Radom katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.009

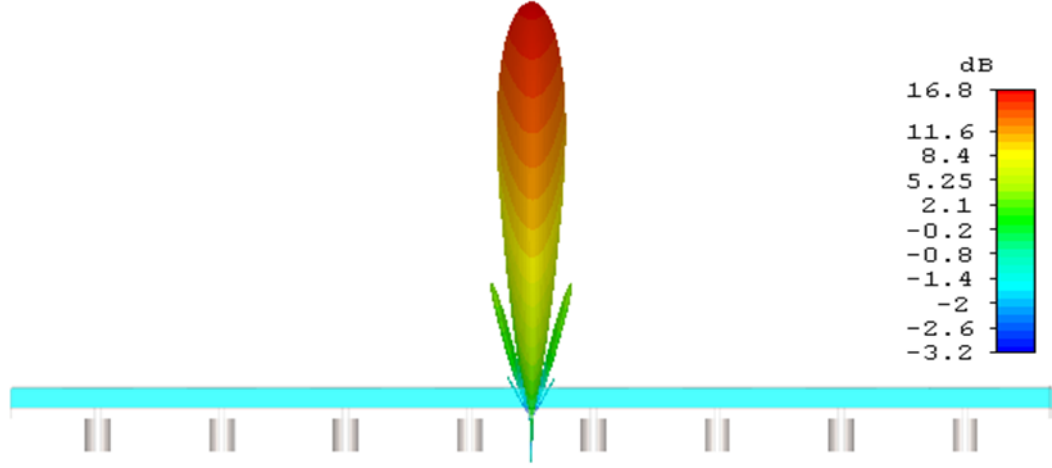
Tasarım-2'de yapılan parametre değişikliği sarı renk ile gösterilmiştir. Diğer parametreler Tasarım-1 ile aynıdır.



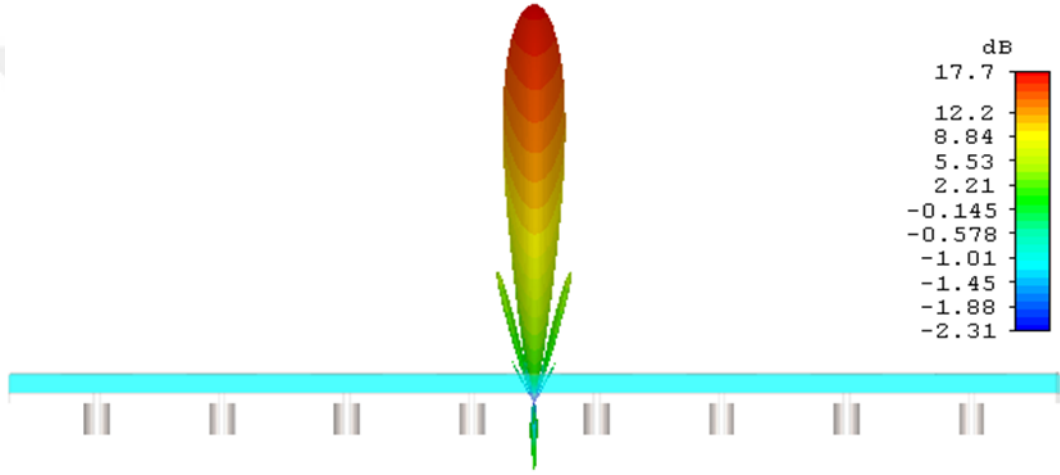
Şekil 6.8 Lineer dizi tasarım-2 perspektif görünüm (parametreler: en x boy=27 x 168 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.25$ mm, $W_2=11.25$ mm)

Şekil 6.9'da tasarım-2'ye ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.10'de ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.



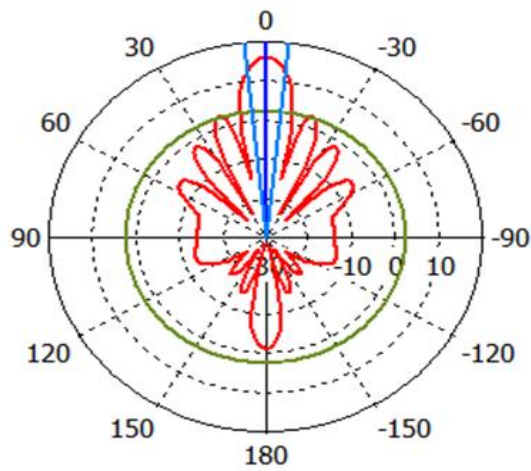


(b)



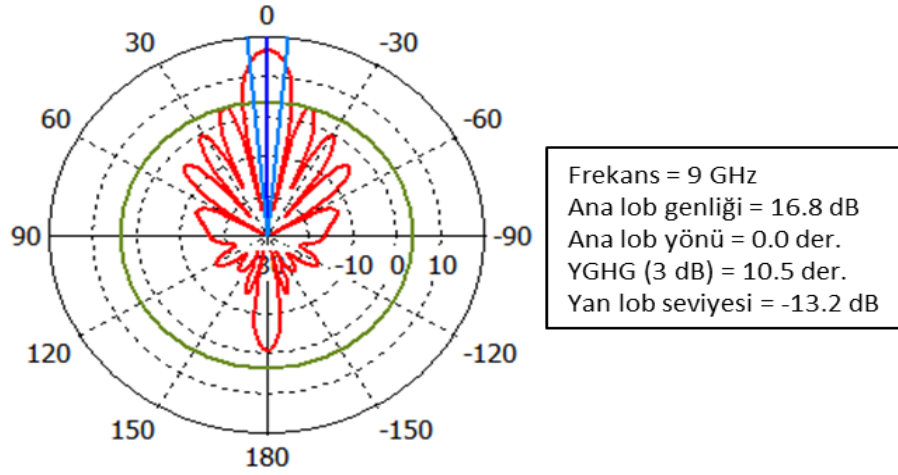
(c)

Şekil 6.9 Tasarım-2 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

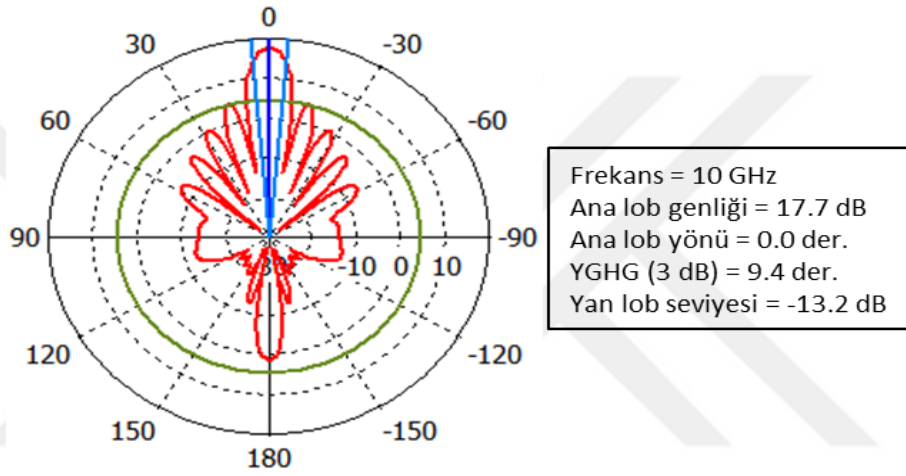


(a)

Frekans = 8 GHz
 Ana lob genliği = 15.9 dB
 Ana lob yönü = 0.0 der.
 YGHG (3 dB) = 11.7 der.
 Yan lob seviyesi = -13.2 dB



(b)

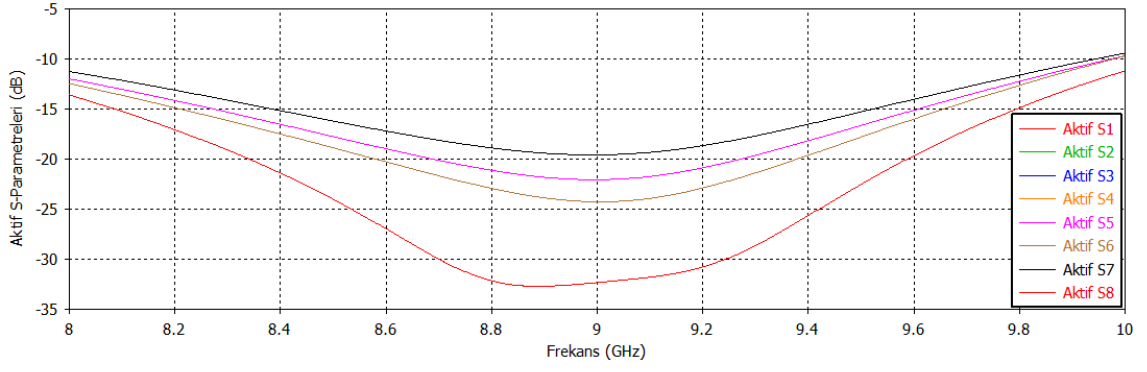


(c)

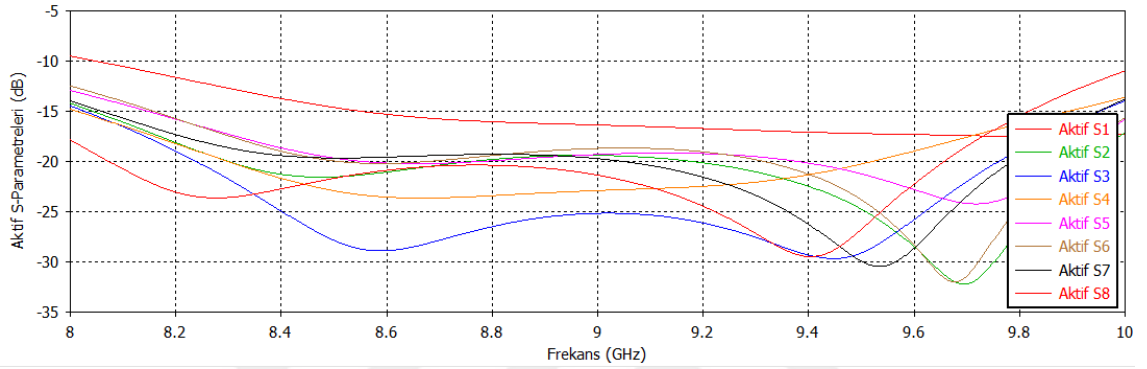
Şekil 6.10 Tasarım-2 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

Şekil 6.11’de anten broadside yönünde ışıma yaparken ($\theta=0^\circ$) tasarım-2’ye ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerinin -10 dB altında olduğu görülmüştür. Huzme yönlendirme yapılmadığı için aktif S parametreleri simetrik olarak çıktığından aktif S1 ve aktif S8, aktif S2 ve aktif S7, aktif S3 ve aktif S6, aktif S4 ve aktif S5 eşit çıkmaktadır.

Şekil 6.12’te anten huzmesi $\theta=30^\circ$ ’ye yönlendirilmişken tasarım-2’e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerinin -10 dB altında olduğu görülmüştür.

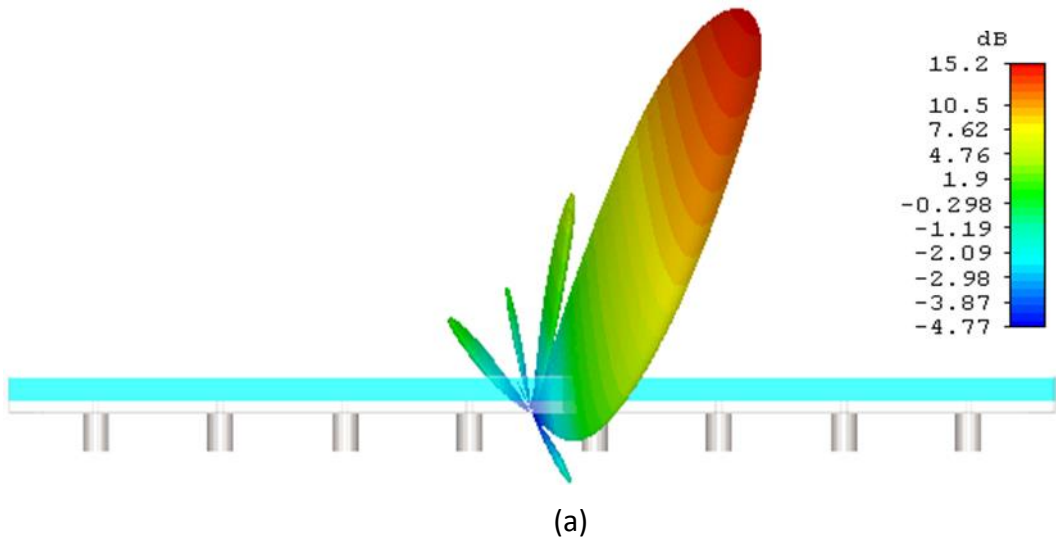


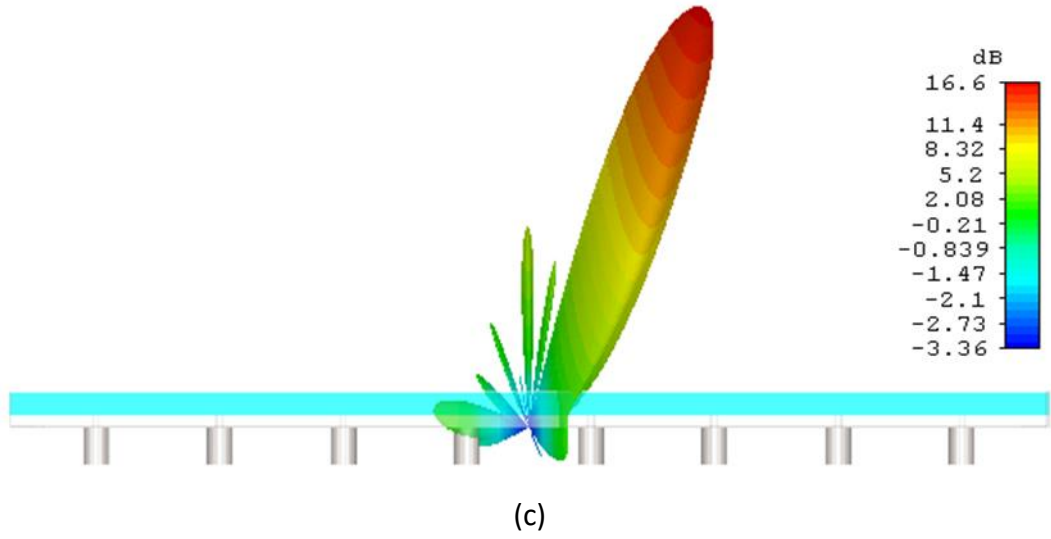
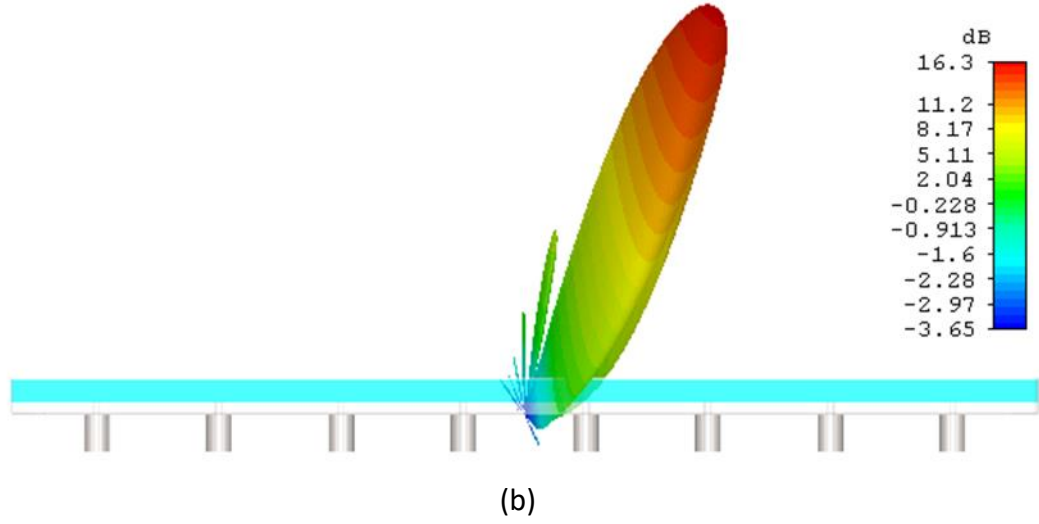
Şekil 6.11 Tasarım-2 aktif S-parametreleri ($\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$)



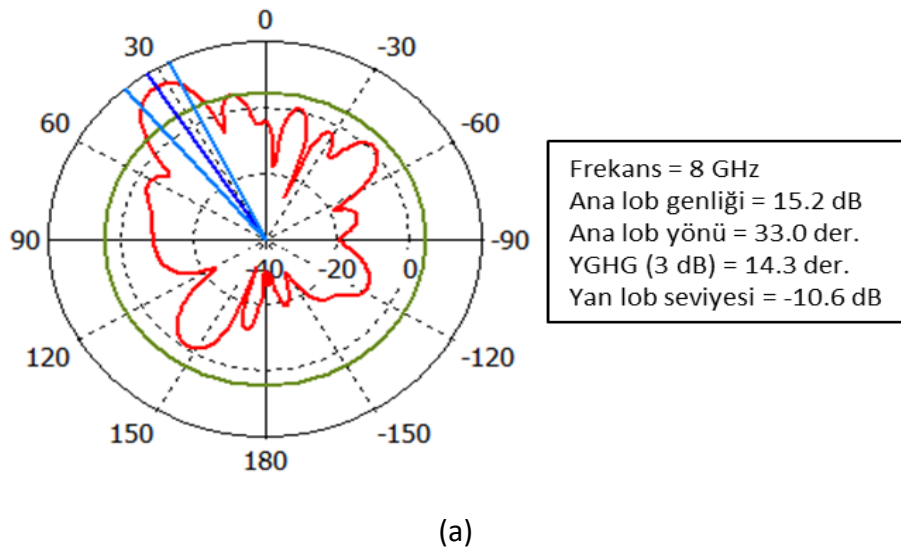
Şekil 6.12 Tasarım-2 aktif S-parametreleri ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$)

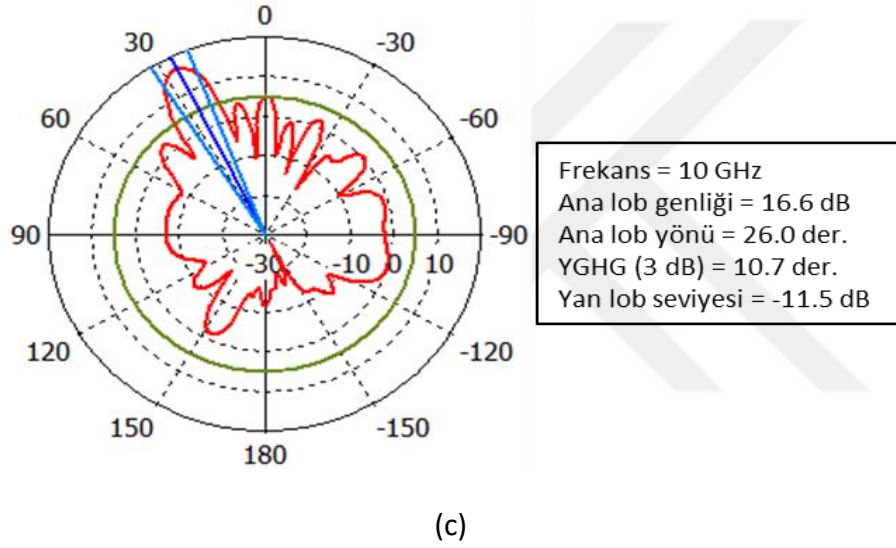
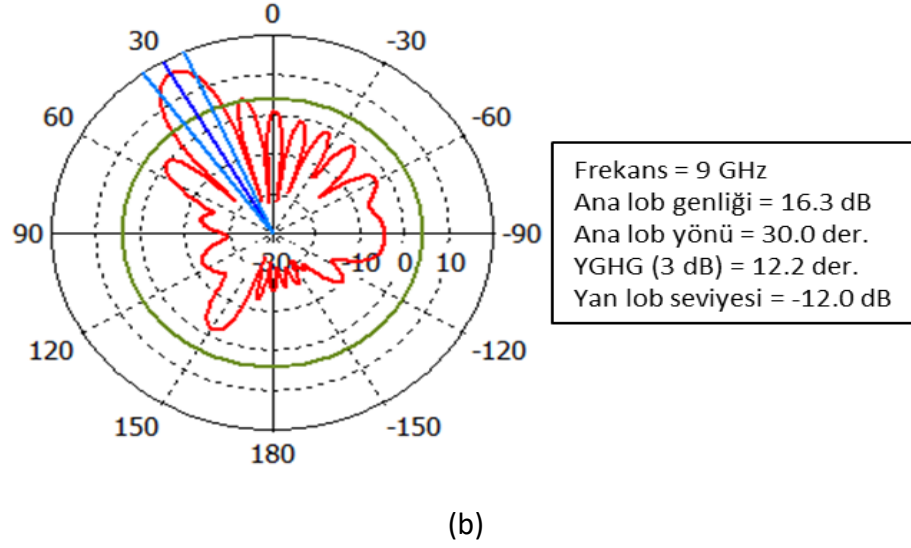
Şekil 6.13'de anten ana huzmesi $\theta=30^\circ$ 'ye yönlendirilmiş tasarım-2'ye ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.14'de ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genişliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.





Şekil 6.13 Tasarım-2 üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz





Şekil 6.14 Tasarım-2 polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ, \phi=0^\circ$) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

Üçüncü tasarıma ait bilgiler Çizelge 6.5'te verilmiştir. Tezin bundan sonraki bölümlerinde üçüncü tasarım Tasarım-3 olarak adlandırılacaktır.

- **Tasarım-3**

Çizelge 6.5 Tasarım-3 anten parametreleri

Anten boyutları	En x Boy (<i>mm</i>)	27x168
Genlik Dağılımı	Non-Uniform	Dolph-Chebyshev
d	Anten besleme noktaları arası mesafe (<i>mm</i>)	20
W_1	Alt katman yama genişliği (<i>mm</i>)	7.5
L_1	Alt katman yama boyu (<i>mm</i>)	9
1.Dielektrik malzeme	Alt katman dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h_1	Alt katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	1.52
ϵ_{r1}	Alt katman dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta_1$	Alt katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027
W_2	Üst katman yama genişliği (<i>mm</i>)	12
L_2	Üst katman yama boyu (<i>mm</i>)	11
2.Dielektrik malzeme	Üst katman dielektrik malzeme	Köpük
h_2	Üst katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	3
ϵ_{r2}	Üst katman dielektrik sabiti	1.07
$\tan\delta_2$	Üst katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.001
3.Dielektrik Malzeme	Radom katmanı	Rogers 5880
h_3	Radom katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	0.254
ϵ_{r3}	Radom katman dielektrik sabiti	2.2
$\tan\delta_3$	Radom katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.009

Tasarım-3’de yapılan parametre değişikliği **sarı** renk ile gösterilmiştir. Diğer parametreler Tasarım-2 ile aynıdır.

Yan lob seviyelerini bastırmak için bu adımda anten elemanlarına genlik dağılımı uygulanmıştır.

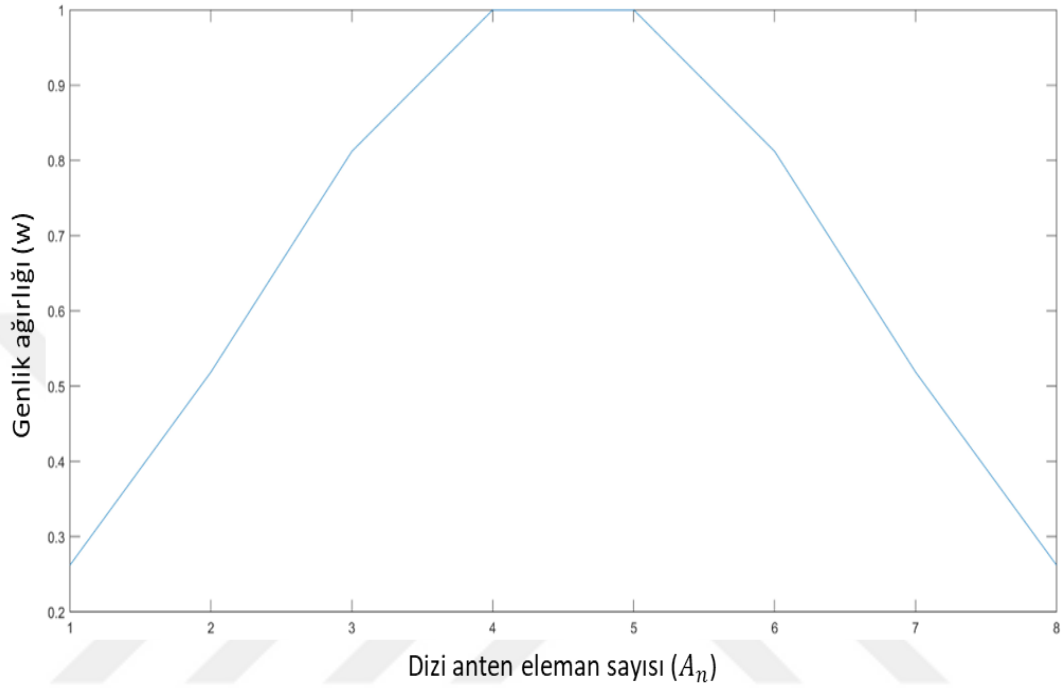
Genlik dağılımı dağılım değerlerini bulmak için Dolph-Chebyshev penceresi kullanılmıştır.

$w = \text{chebwin}(L, r)$ fonksiyonu Şekil 6.15’de görüldüğü üzere MATLAB’de çizdirilmiştir.

w :Genlik ağırlığı

L :Dizi Anten eleman sayısı

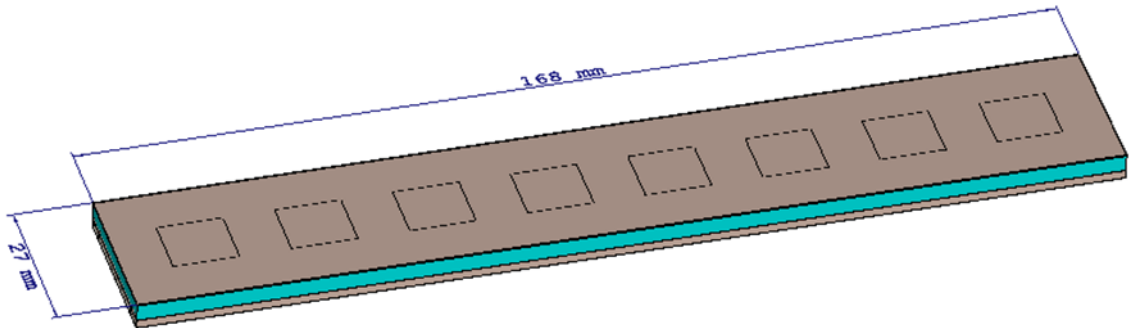
r :Yan lob bastırma değeri [39].



Şekil 6.15 Dolph-Chebyshev fonksiyonu ($L=8, r=30 \text{ dB}$)

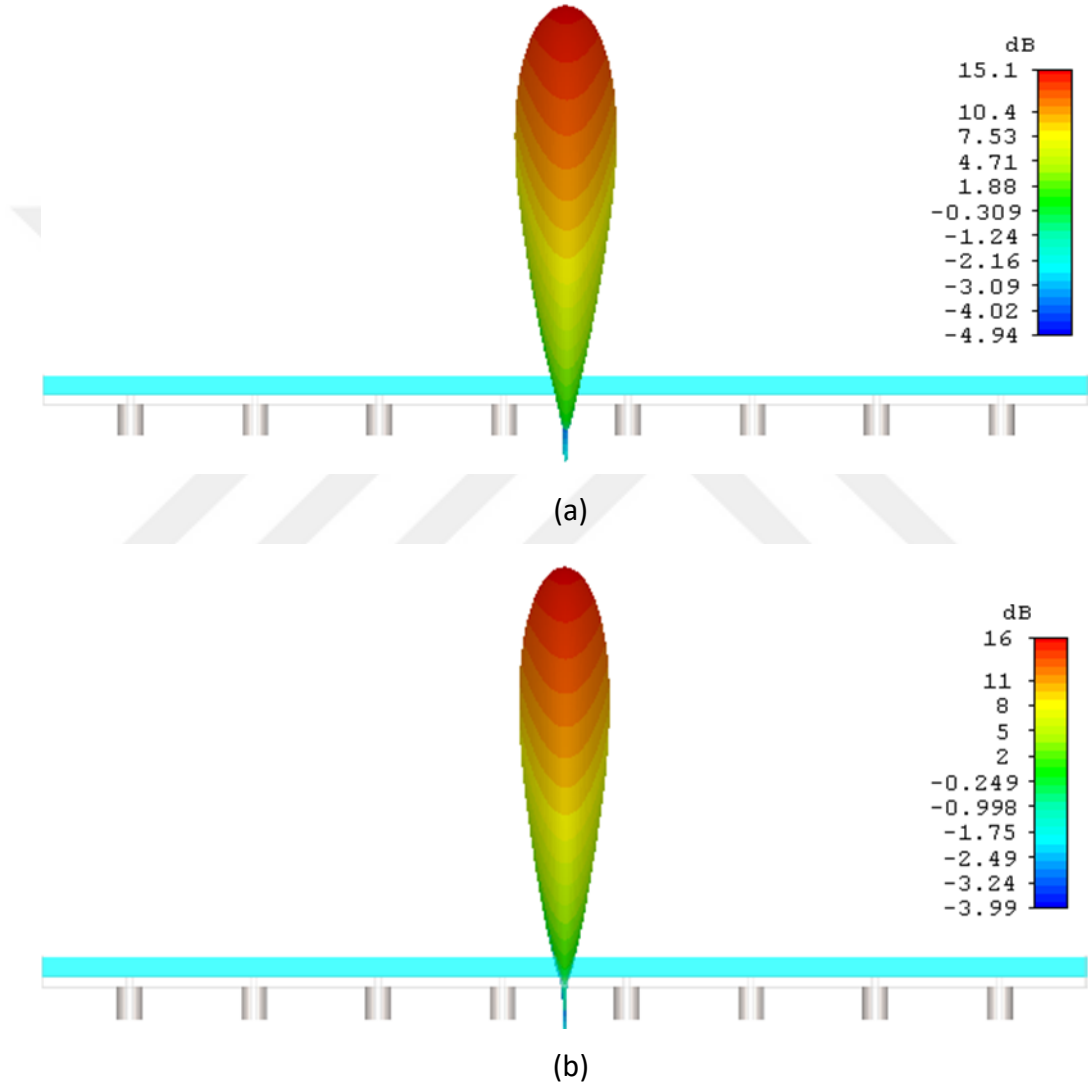
Çizdirilen fonksiyon sonucu genlik ağırlıkları şu şekilde oluşmuştur:

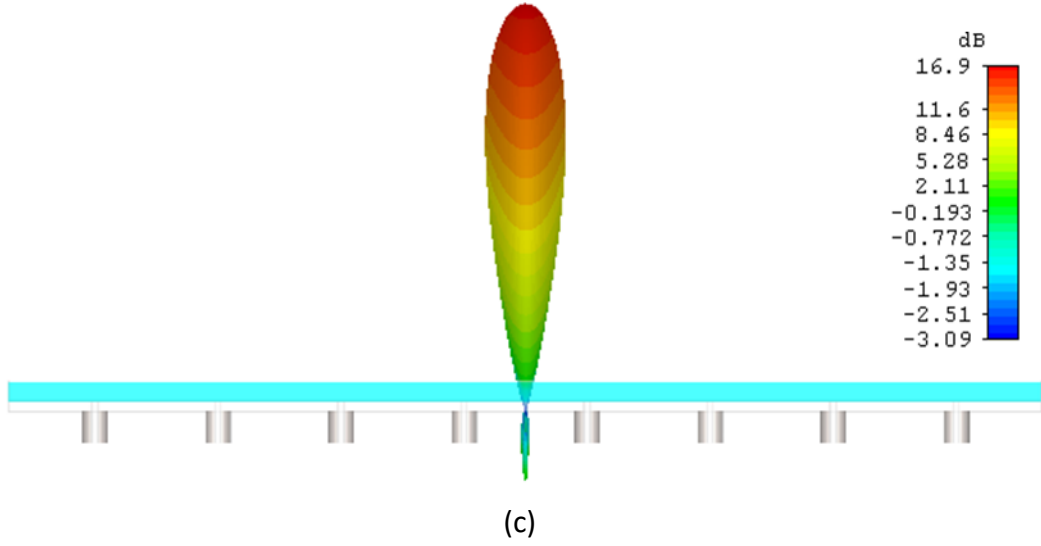
A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
0.2622	0.5287	0.812	1	1	0.812	0.5187	0.2622



Şekil 6.16 Lineer dizi tasarım-3 perspektif Görünüm (en x boy=27 x 168 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9 \text{ mm}$, $W_1=7.5 \text{ mm}$, $L_2=10.25 \text{ mm}$, $W_2=11.25 \text{ mm}$)

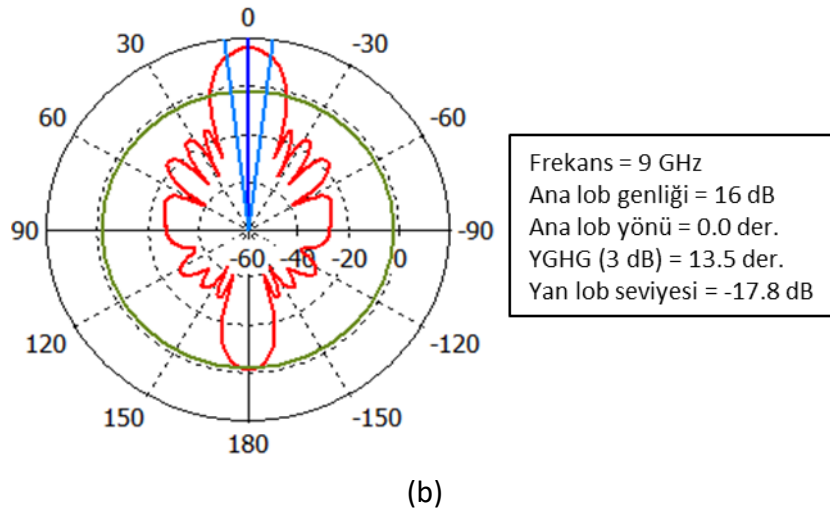
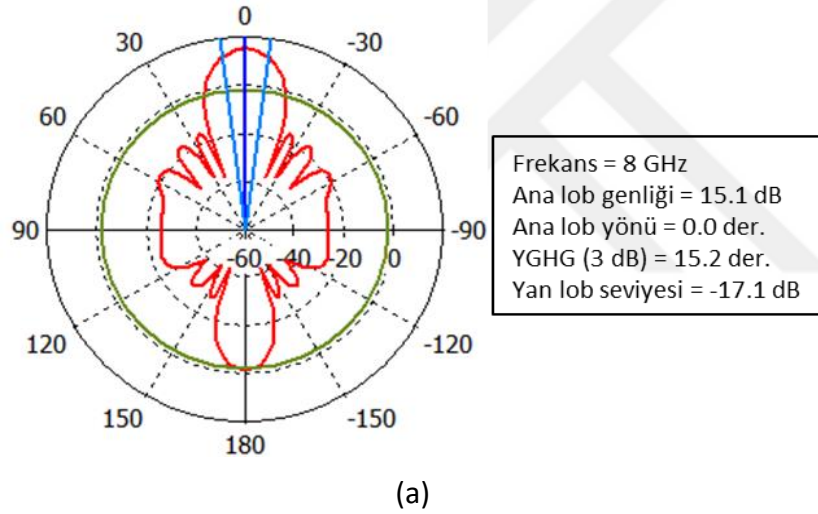
Şekil 6.17’de tasarım-1’e ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.18’de ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.

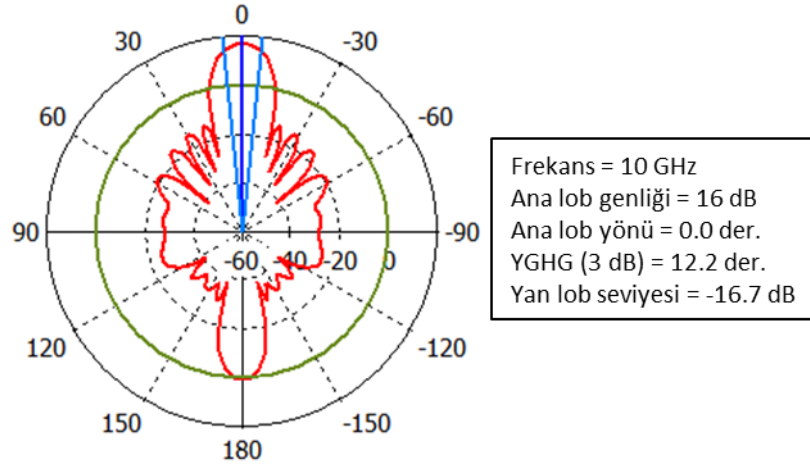




Şekil 6.17 Tasarım-3 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme)

(a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz



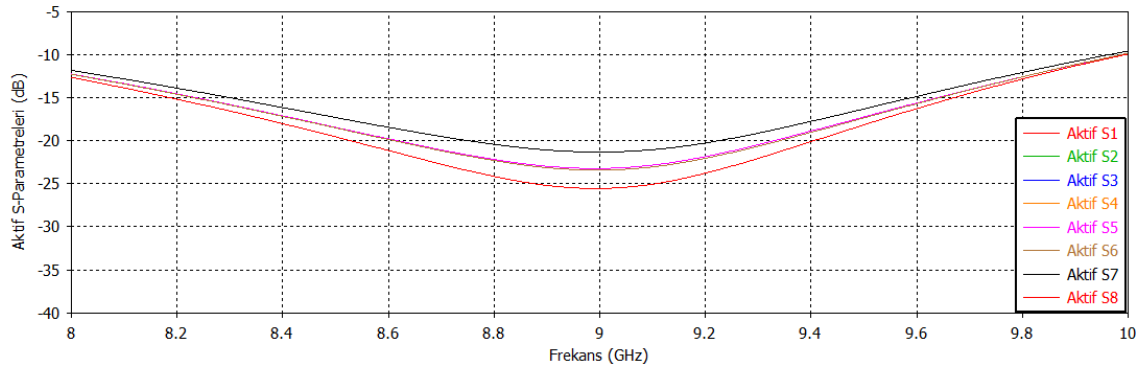


Şekil 6.18 Tasarım-3 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme)

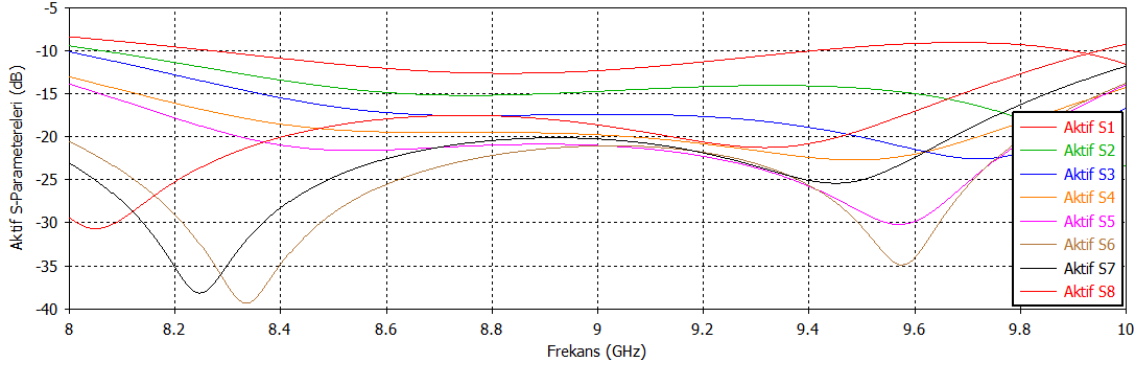
(a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

Şekil 6.19’da anten broadside yönünde ışıma yaparken ($\theta=0^\circ$) tasarım-3’e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerinin -10 dB altında olduğu görülmüştür. Huzme yönlendirme yapılmadığı için aktif S parametreleri simetrik olarak çıktığından aktif S1 ve aktif S8, aktif S2 ve aktif S7, aktif S3 ve aktif S6, aktif S4 ve aktif S5 eşit çıkmaktadır.

Şekil 6.2’de anten huzmesi $\theta=30^\circ$ ’ye yönlendirilmişken tasarım-3’e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında aktif S1 değerinin -10 dB üzerinde görülmüştür.

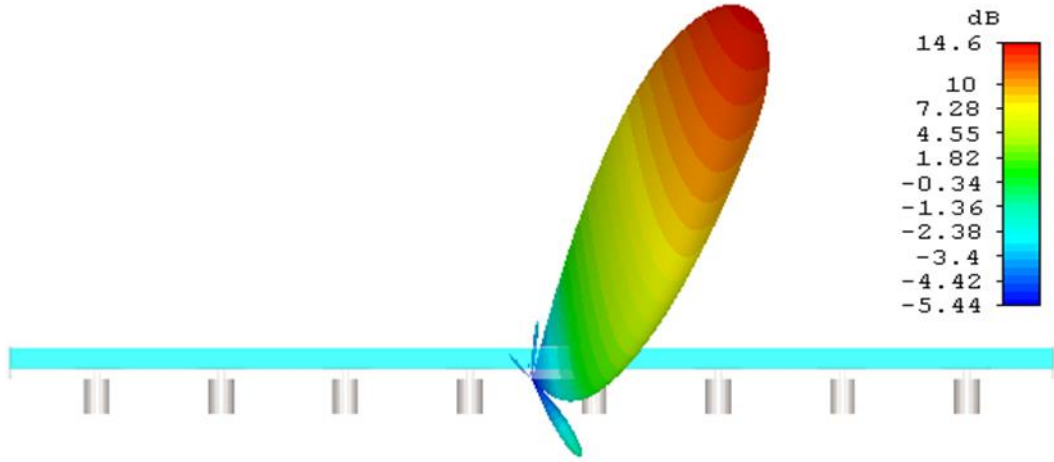


Şekil 6.19 Tasarım-3 aktif S –parametreleri ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$)

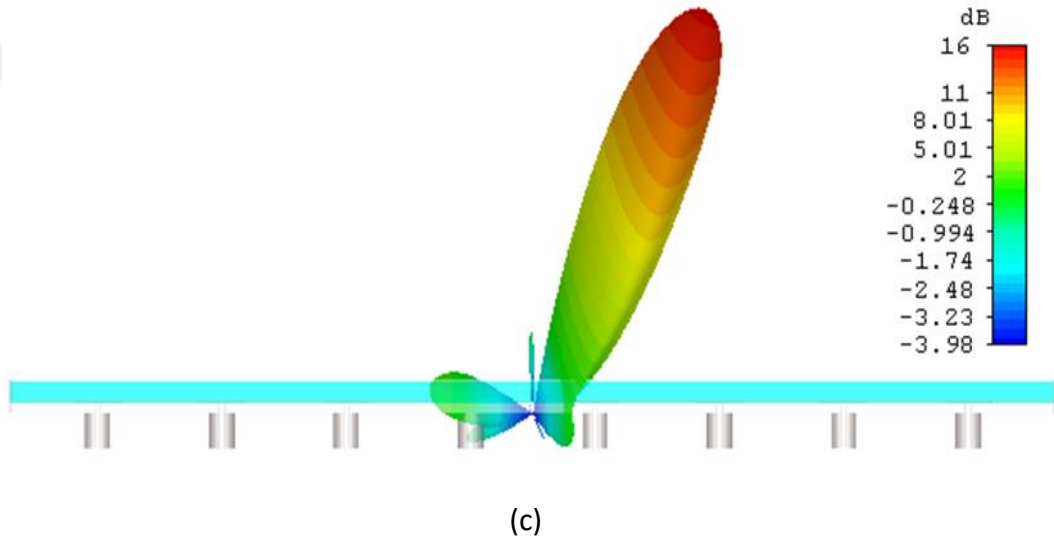
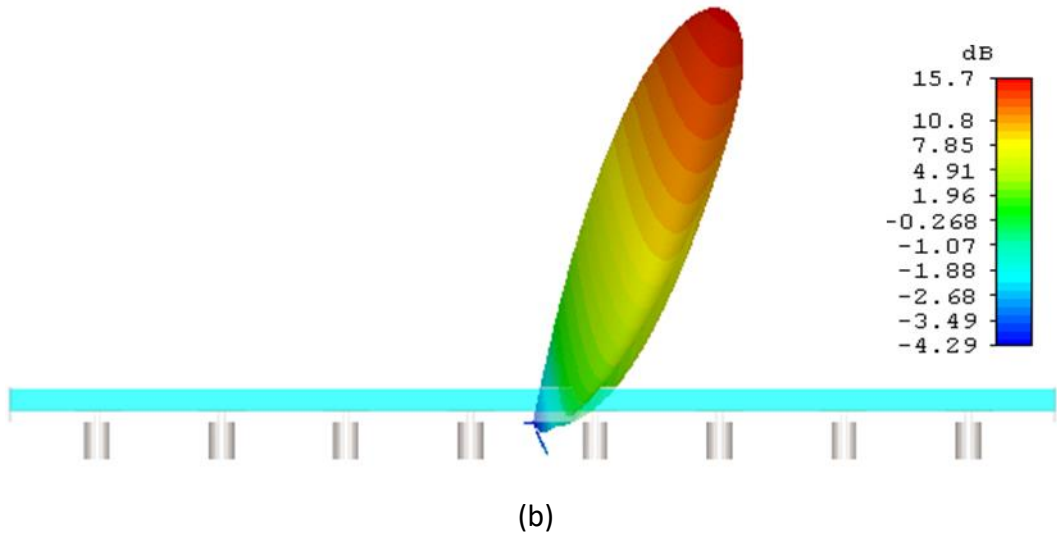


Şekil 6.20 Tasarım-3 aktif S –parametreleri ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$)

Şekil 6.21’de anten ana huzmesi $\theta=30^\circ$ ’ye yönlendirilmiş tasarım-3’e ait üç boyutlu ışınma örüntüsünde antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.22’de ise antene ait polar ışınma örüntüsü verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.

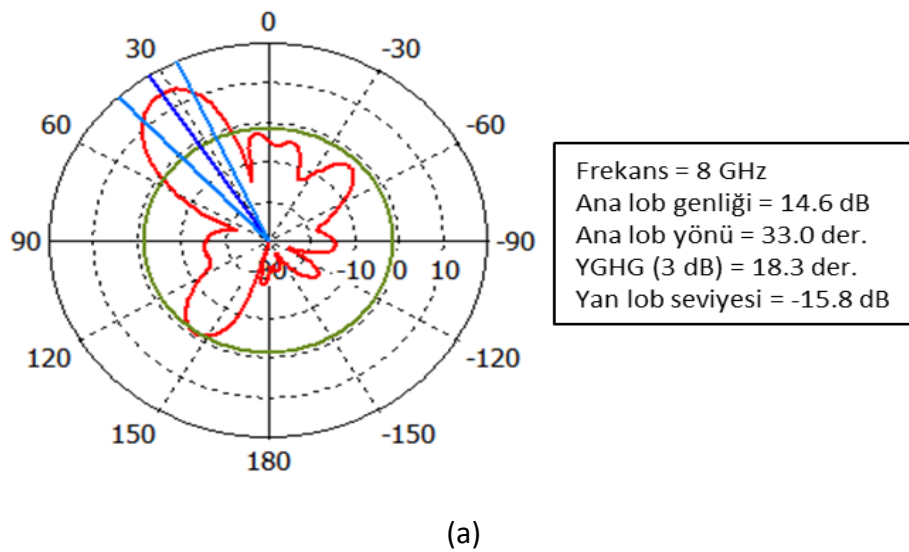


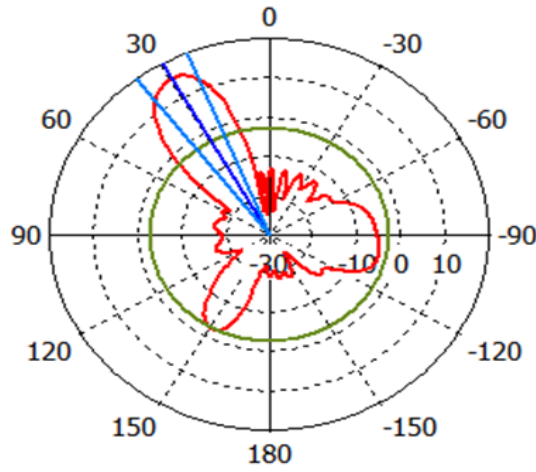
(a)



Şekil 6.21 Tasarım-3 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme)

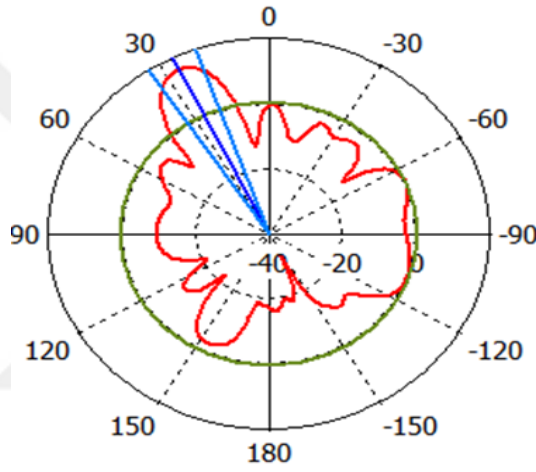
(a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz





Frekans = 9 GHz
 Ana lob genliği = 15.7 dB
 Ana lob yönü = 29.0 der.
 YGHG (3 dB) = 15.3 der.
 Yan lob seviyesi = -18.4 dB

(b)



Frekans = 10 GHz
 Ana lob genliği = 16 dB
 Ana lob yönü = 26.0 der.
 YGHG (3 dB) = 13.4 der.
 Yan lob seviyesi = -15.6 dB

(c)

Şekil 6.22 Tasarım-3 polar örüntüsü ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme)

(a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

Son tasarıma ait bilgiler Çizelge 6.6'da verilmiştir. Tezin bundan sonraki bölümlerinde son tasarım Tasarım-4 olarak adlandırılacaktır.

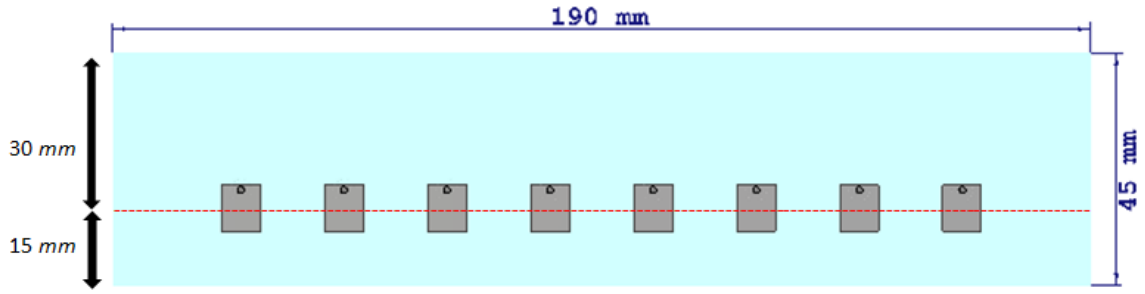
- **Tasarım-4**

Çizelge 6.6 Tasarım-4 anten parametreleri

Anten boyutları	En x Boy (mm)	45x190
Genlik Dağılımı	Non-Uniform	Dolph-Chebyshev
d	Anten besleme noktaları arası mesafe (mm)	20
W_1	Alt katman yama genişliği (mm)	7.5
L_1	Alt katman yama boyu (mm)	9
1.Dielektrik malzeme	Alt katman dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h_1	Alt katman dielektrik Kalınlığı (mm)	1.52
ϵ_{r1}	Alt katman dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta_1$	Alt katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027
W_2	Üst katman yama genişliği (mm)	9.65
L_2	Üst katman yama boyu (mm)	10.8
2.Dielektrik malzeme	Üst katman dielektrik malzeme	Köpük
h_2	Üst katman dielektrik Kalınlığı (mm)	3
ϵ_{r2}	Üst katman dielektrik sabiti	1.07
$\tan\delta_2$	Üst katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.001
3.Dielektrik Malzeme	Radom katmanı	Rogers 5880
h_3	Radom katman dielektrik Kalınlığı (mm)	0.254
ϵ_{r3}	Radom katman dielektrik sabiti	2.2
$\tan\delta_3$	Radom katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.009

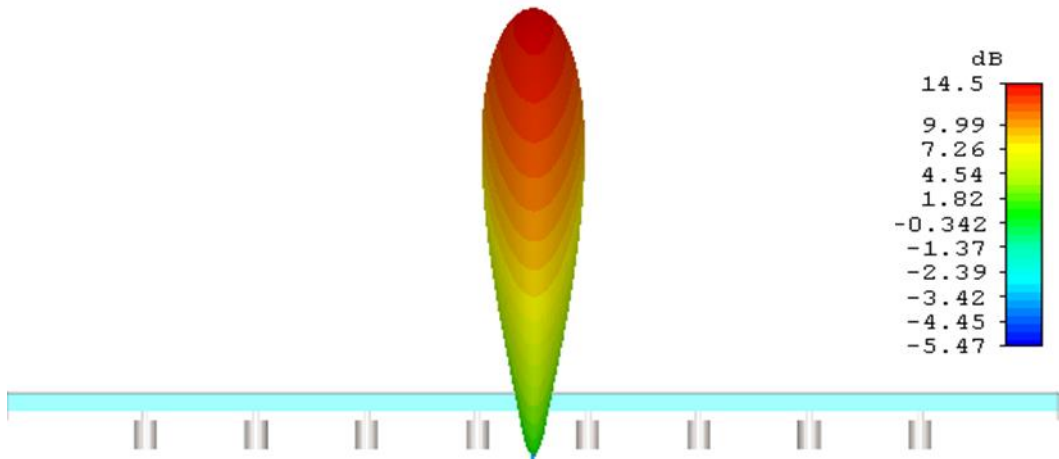
Tasarım-4’de yapılan parametre değişikliği **sarı** renk ile gösterilmiştir. Diğer parametreler Tasarım-3 ile aynıdır.

Tasarım 3’de özellikle broadside ışıma yapıldığında (huzme yönlenmemiş $\theta=0^\circ$), ortaya çıkan arka lob seviyesinin bastırılması için anten eni 45 mm olarak ayarlanmıştır. Buradaki önemli bir ayrıntı ise anten besleme noktalarının olduğu tarafın boyu alt tarafın 2 katı uzunluğundadır. Burada asimetrik bir yapı oluşturulmuş ve etkisi incelenmiştir.

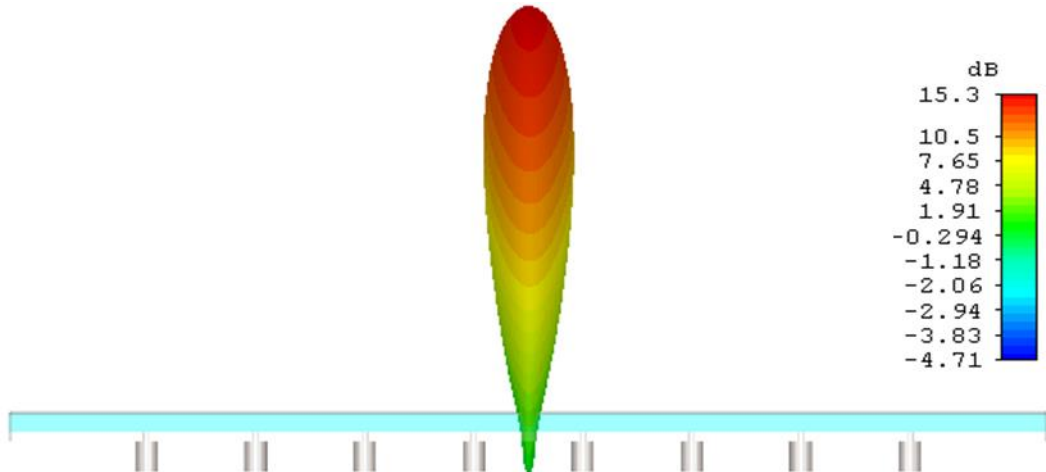


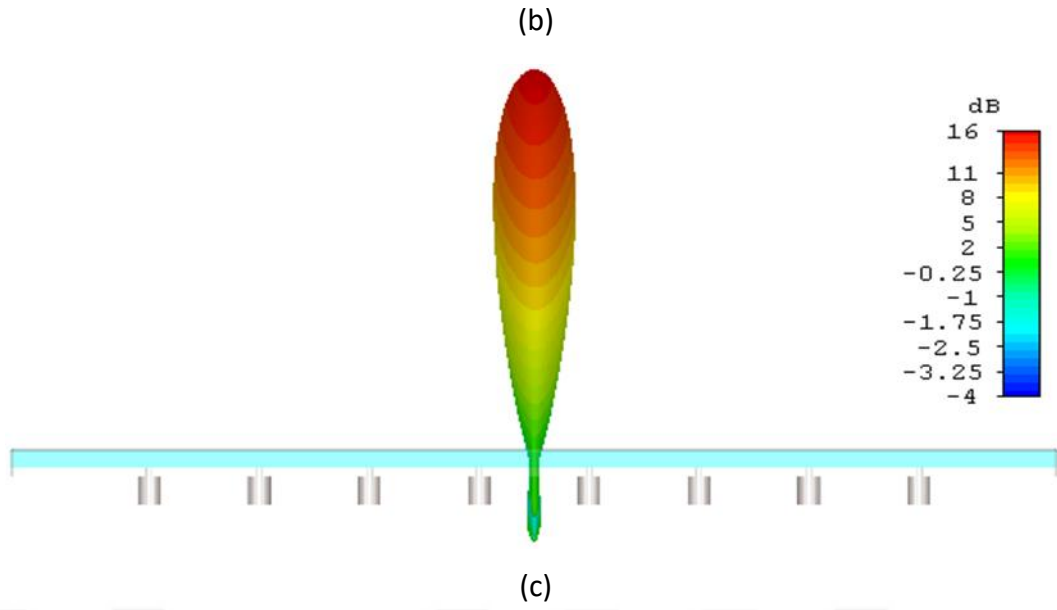
Şekil 6.23 Lineer dizi tasarım-4 arka görünüm (en x boy=45 x 190 mm, $d=0.6 \lambda$, $L_1=9$ mm, $W_1=7.5$ mm, $L_2=10.8$ mm, $W_2=9.65$ mm)

Şekil 6.24’de tasarım-1’e ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.25’de ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.

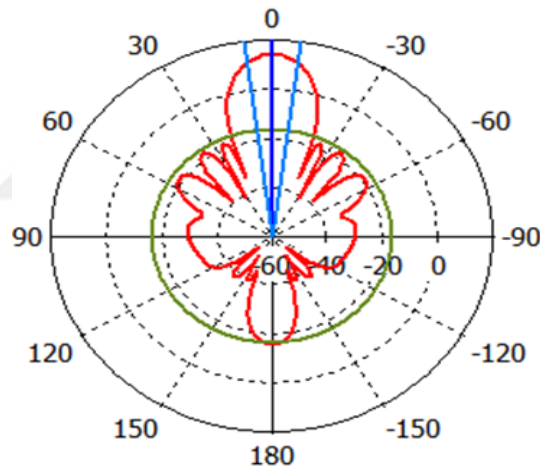


(a)



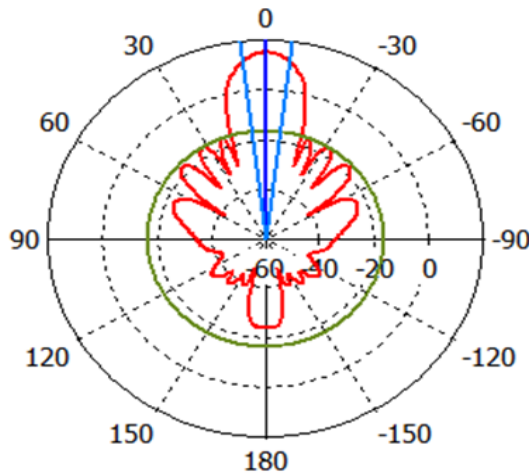


Şekil 6.24 Tasarım-4 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, asimetrik yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz



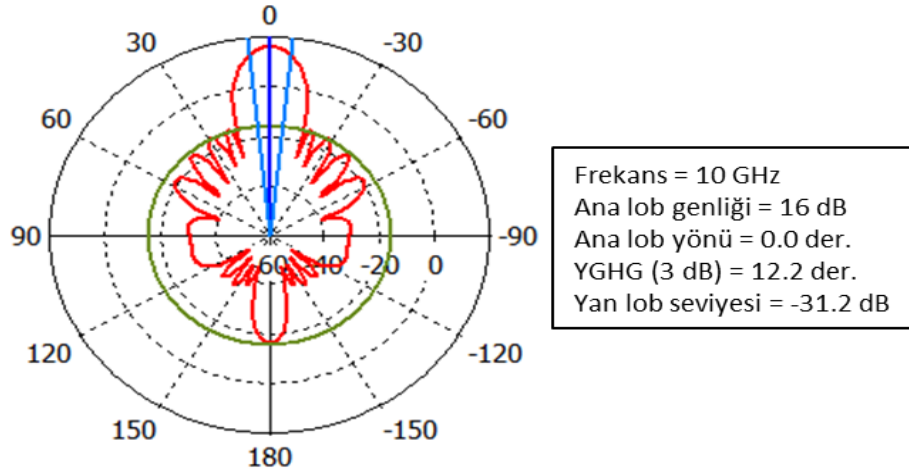
Frekans = 8 GHz
 Ana lob genliği = 14.2 dB
 Ana lob yönü = 0.0 der.
 YGHG (3 dB) = 15.1 der.
 Yan lob seviyesi = -30.2dB

(a)



Frekans = 9 GHz
 Ana lob genliği = 15.1 dB
 Ana lob yönü = 0.0 der.
 YGHG (3 dB) = 13.5 der.
 Yan lob seviyesi = -31.7 dB

(b)



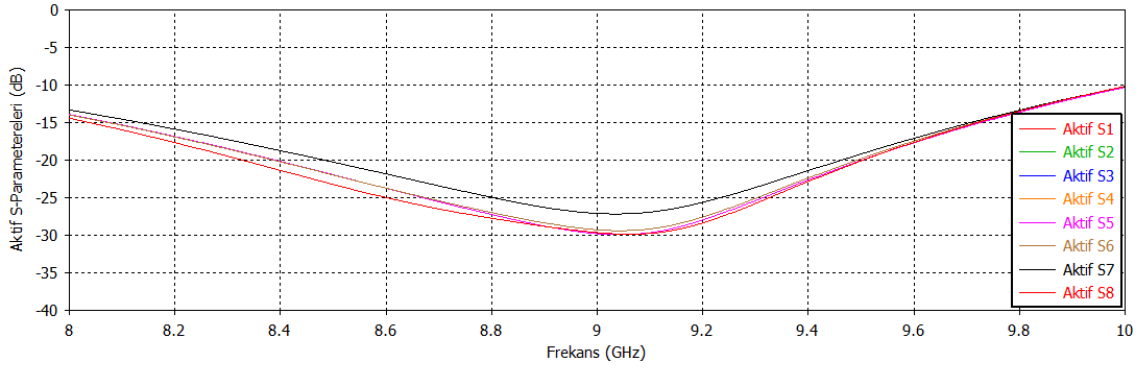
(c)

Şekil 6.25 Tasarım-4 polar ışıma örüntüsü ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, asimetrik yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

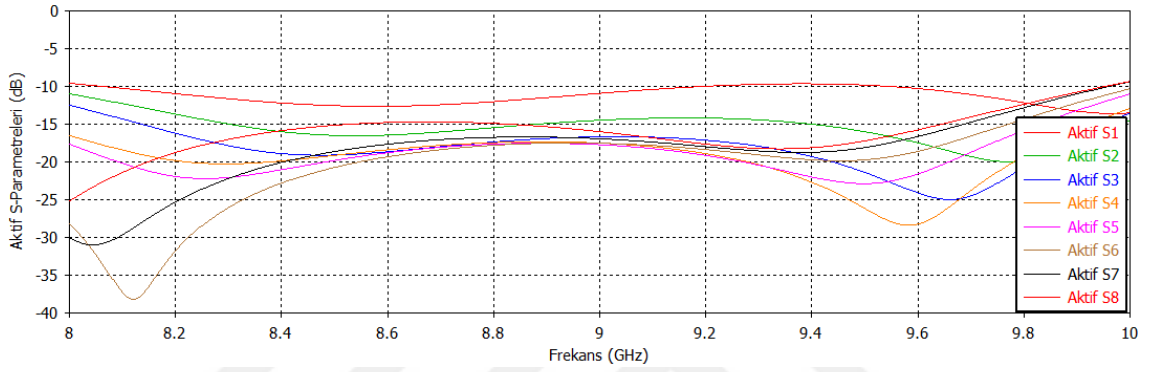
Şekil 6.26'da anten broadside yönünde ışıma yaparken ($\theta=0^\circ$) tasarım-4'e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında aktif S-parametre değerlerinin -10 dB altında olduğu görülmüştür. Huzme yönlendirme yapılmadığı için aktif S parametreleri simetrik olarak çıktığından aktif S1 ve aktif S8, aktif S2 ve aktif S7, aktif S3 ve aktif S6, aktif S4 ve aktif S5 eşit çıkmaktadır.

Şekil 6.27'de anten huzmesi $\theta=30^\circ$ 'ye yönlendirilmişken tasarım-4'e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerinin -10 dB altında olduğu ve tasarım 3'te karşılaşılan S1 değerindeki yükselmenin düzeltildiği görülmüştür.

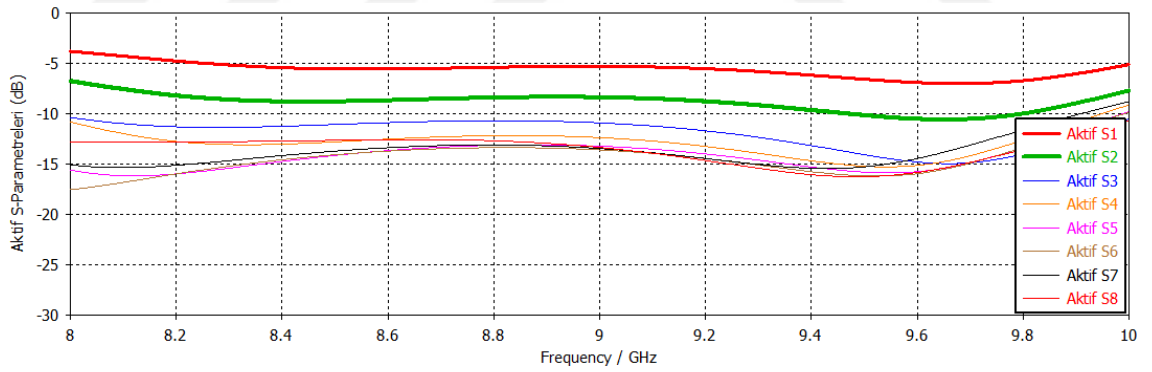
Şekil 6.28'de anten huzmesi $\theta=40^\circ$ 'ye yönlendirilmişken tasarım-4'e ait aktif S-parametreleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında S1 ve S2 geri dönüş kaybı değerlerinin -10 dB üzerine çıktığı ve anten huzmesinin $\theta=30^\circ$ ilerisine döndürüldüğünde ışıma karakteristiğinde bozulmalar oluşabileceği görülmüştür.



Şekil 6.26 Tasarım-4 aktif S-parametreleri grafiği ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$)

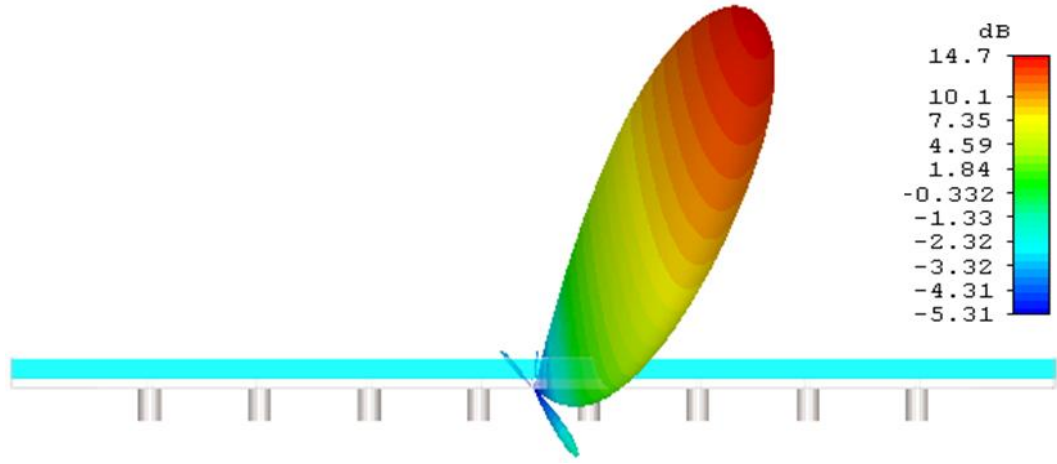


Şekil 6.27 Tasarım-4 aktif S-parametreleri grafiği ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$)

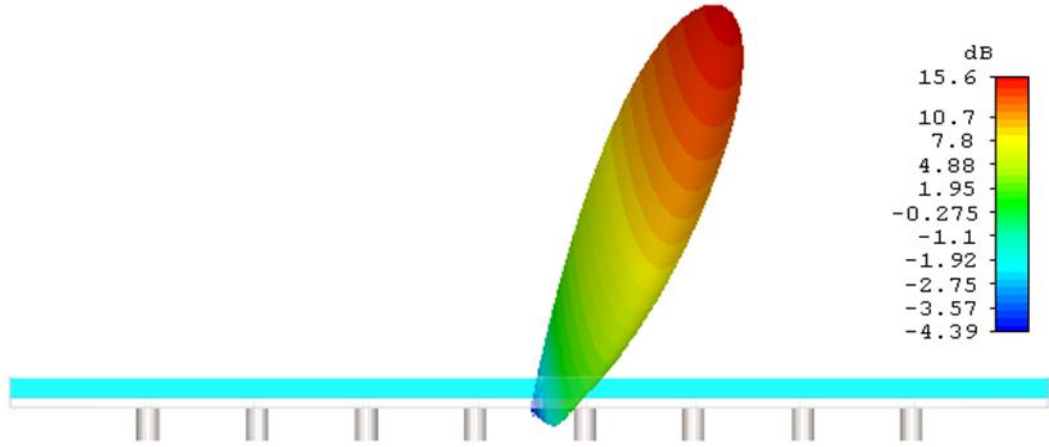


Şekil 6.28 Tasarım-4 aktif S-parametreleri grafiği ($\theta=40^\circ$, $\phi=0^\circ$)

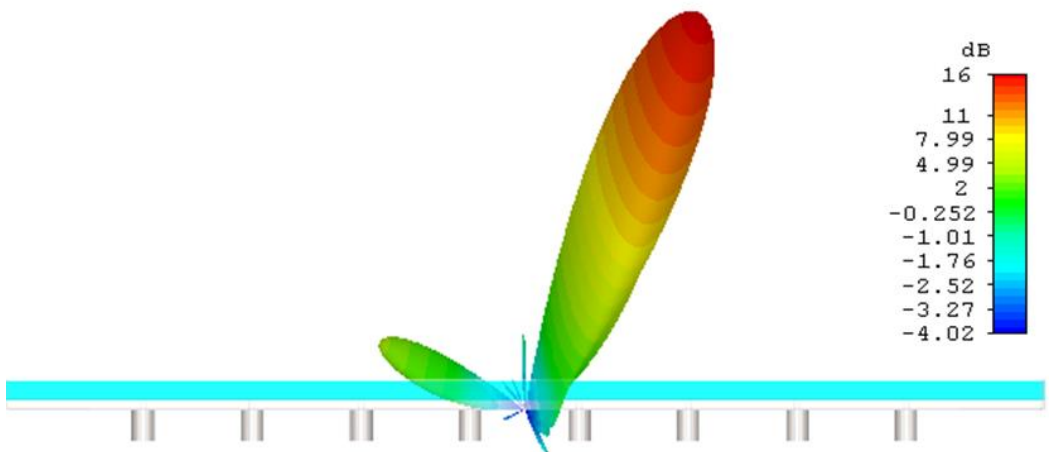
Şekil 6.29'da anten ana huzmesi $\theta=30^\circ$ 'ye yönlendirilmiş tasarım-4'ye ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.30'da ise antene ait polar ışıma örüntüsü verilmiş olup ana lob genişliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.



(a)

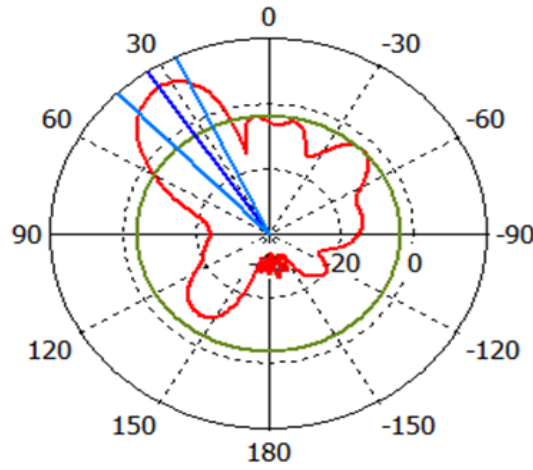


(b)



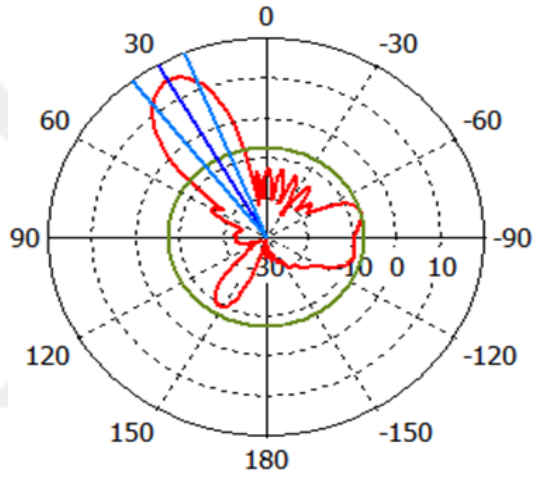
(c)

Şekil 6.29 Tasarım-4 üç-boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, asimetrik yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz



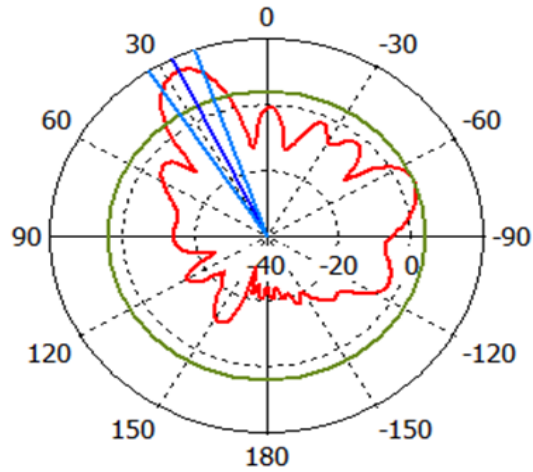
Frekans = 8 GHz
 Ana lob genliği = 14.2 dB
 Ana lob yönü = 34.0 der.
 YGHG (3 dB) = 18.5 der.
 Yan lob seviyesi = -17.7 dB

(a)



Frekans = 9 GHz
 Ana lob genliği = 15.3 dB
 Ana lob yönü = 30.0 der.
 YGHG (3 dB) = 15.5 der.
 Yan lob seviyesi = -22.9 dB

(b)



Frekans = 10 GHz
 Ana lob genliği = 15.7 dB
 Ana lob yönü = 26.0 der.
 YGHG (3 dB) = 13.4 der.
 Yan lob seviyesi = -11.8 dB

(c)

Şekil 6.30 Tasarım-4 polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, $\phi=0^\circ$, Non-Uniform besleme, asimetrik yapı) (a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

6.3 8 x 8 Düzlemsel Faz Dizili Anten Tasarımı ve Analizi

Anten elemanları faz dağılım hesapları 9 GHz frekansına göre yapılmıştır.

9 GHz frekansına karşılık gelen dalga boyu $\lambda_{(9GHz)} = 33.3 \text{ mm}$ 'dir.

İstenmeyen ana huzme oluşmaması için gerekli maksimum d mesafesi; $d_{max} = \frac{\lambda}{1+\sin\theta}$ formülü ile hesaplanır. Burada d anten besleme noktaları arası mesafe, θ ise huzme yönlenme açısını belirtmektedir. Bu formüle göre hesaplanan huzme yönlenme açılarına göre verilebilecek d değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 Düzlemsel dizide huzme yönlenme açılarına göre “istenmeyen ana huzme” oluşmadan verilecek maksimum “ d ” mesafeleri

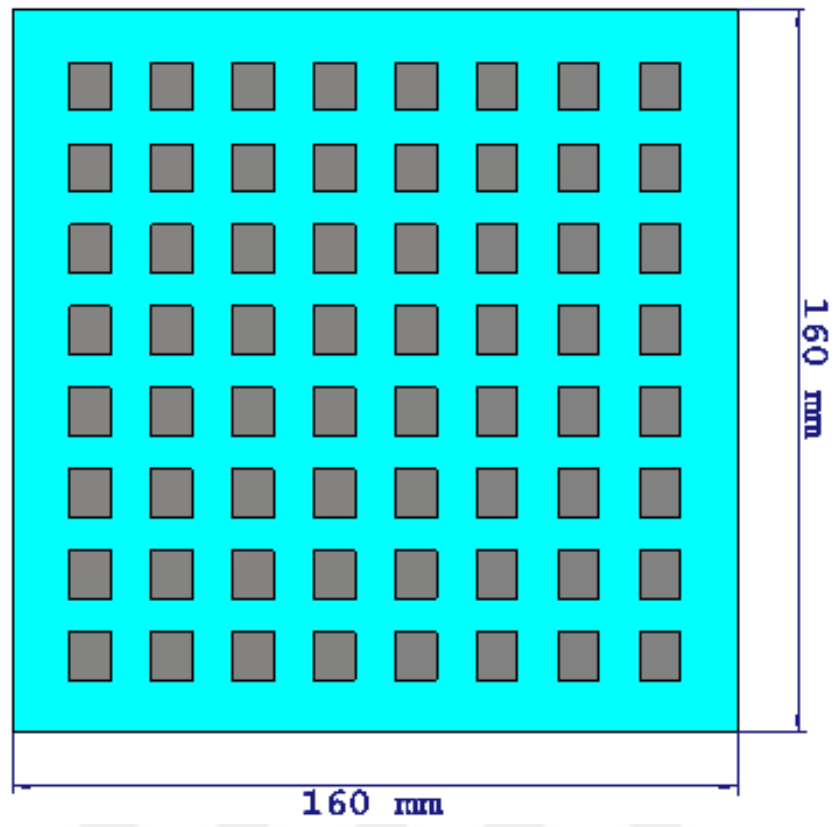
θ	$d_{maks.} (mm)$
0°	33.3
10°	28.38
20°	24.8
30°	22.2
40°	20.2
50°	18.9

Düzlemsel faz dizili anten elemanlarına uygulanacak faz değerlerinin hesaplamalarında x-ekseni boyunca yerleştirilmiş elemanlar için $\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0$ formülü, y-ekseni boyunca yerleştirilmiş elemanlar için $\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \sin\phi_0$ formülü kullanılmıştır. Düzlemsel faz dizili anten ait tasarım parametreleri Çizelge 6.8'de verilmiştir.

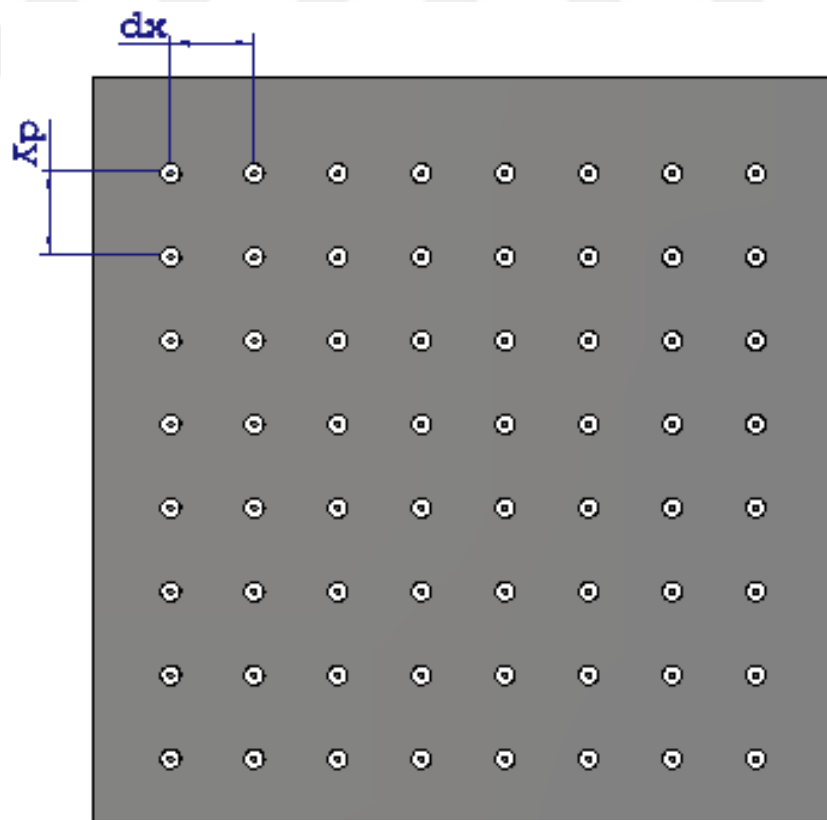
Çizelge 6.8 Düzlemsel dizi anten tasarım parametreleri

<i>Anten boyutları</i>	En x Boy (<i>mm</i>)	160 x 160
d_x	x-ekseni anten besleme noktaları arası mesafe (<i>mm</i>)	18
d_y	y-ekseni anten besleme noktaları arası mesafe (<i>mm</i>)	18
Genlik Dağılımı	Uniform	Uniform
W_1	Alt katman yama genişliği (<i>mm</i>)	9.1
L_1	Alt katman yama boyu (<i>mm</i>)	8.8
1.Dielektrik malzeme	Alt katman dielektrik malzeme	Rogers 4003C
h_1	Alt katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	1.52
ϵ_{r1}	Alt katman dielektrik sabiti	3.38
$\tan\delta_1$	Alt katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.0027
W_2	Üst katman yama genişliği (<i>mm</i>)	9.09
L_2	Üst katman yama boyu (<i>mm</i>)	10.7
2.Dielektrik malzeme	Üst katman dielektrik malzeme	Köpük
h_2	Üst katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	3
ϵ_{r2}	Üst katman dielektrik sabiti	1.07
$\tan\delta_2$	Üst katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.001
3.Dielektrik Malzeme	Radom katmanı	Rogers 5880
h_3	Radom katman dielektrik Kalınlığı (<i>mm</i>)	0.254
ϵ_{r3}	Radom katman dielektrik sabiti	2.2
$\tan\delta_3$	Radom katman Dielektrik kayıp tanjantı	0.009

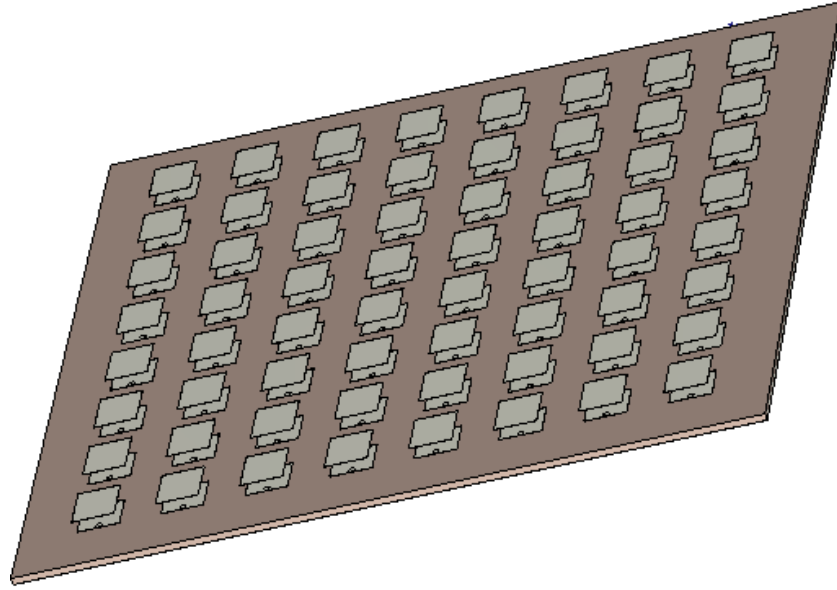
Tasarlan düzlemsel dizinin farklı bakış açılarından görünümüleri Şekil 6.31’de verilmiştir.



(a)



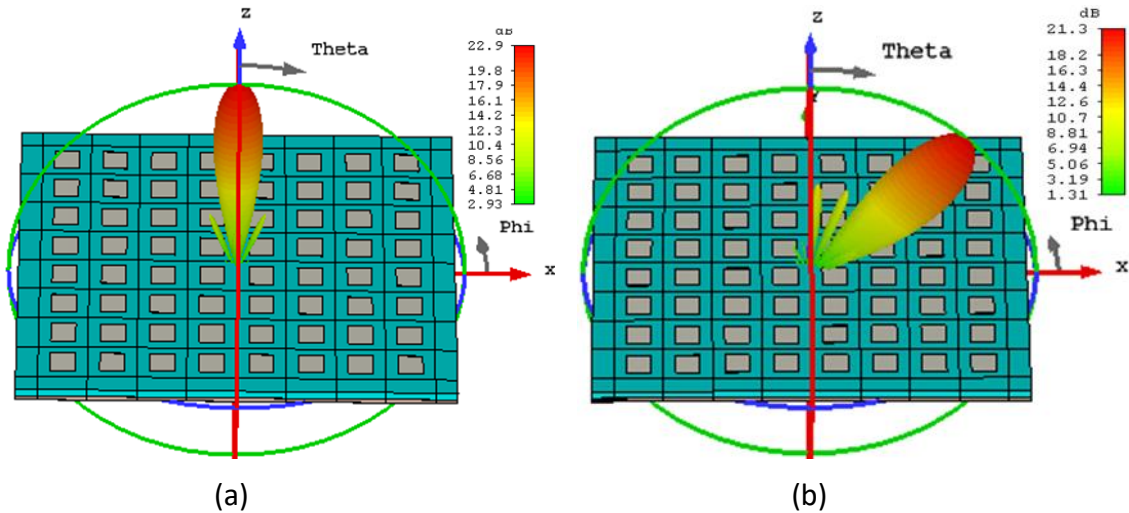
(b)



(c)

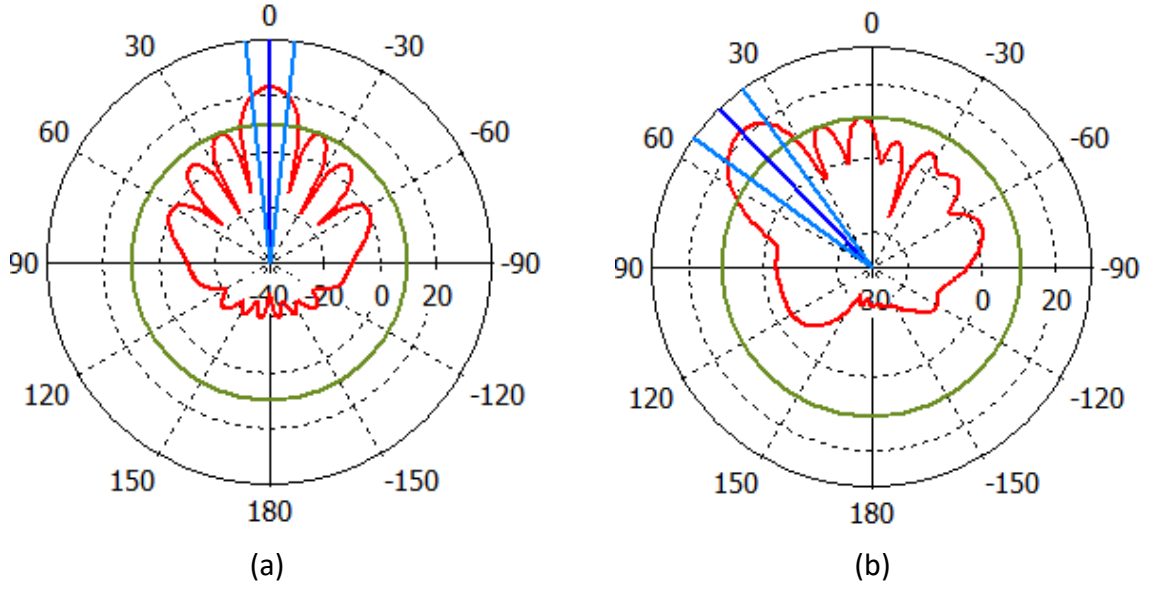
Şekil 6.31 Düzlemsel dizi (a) üst görünüm, (b) alt görünüm, (c) perspektif görünüm
(parametreler: en x boy=160 x 160 mm, $d_x, d_y = 0.54 \lambda$, $L_1=8.8$ mm, $W_1=9.1$ mm, $L_2=10.7$ mm, $W_2=9.09$ mm)

Şekil 6.32 (a) ve Şekil 6.32 (b)'de düzlemsel dizi antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde sırasıyla ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) ve E -düzleminde $\theta=40^\circ$ 'ye yönlendirilmişken antenin 8 GHz frekansında sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.33 (a) ve Şekil 6.33 (b)'de ise antene ait polar ışıma örüntüleri her iki huzme açısı için verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.



Şekil 6.32 Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü (8 GHz, E -düzleminde)

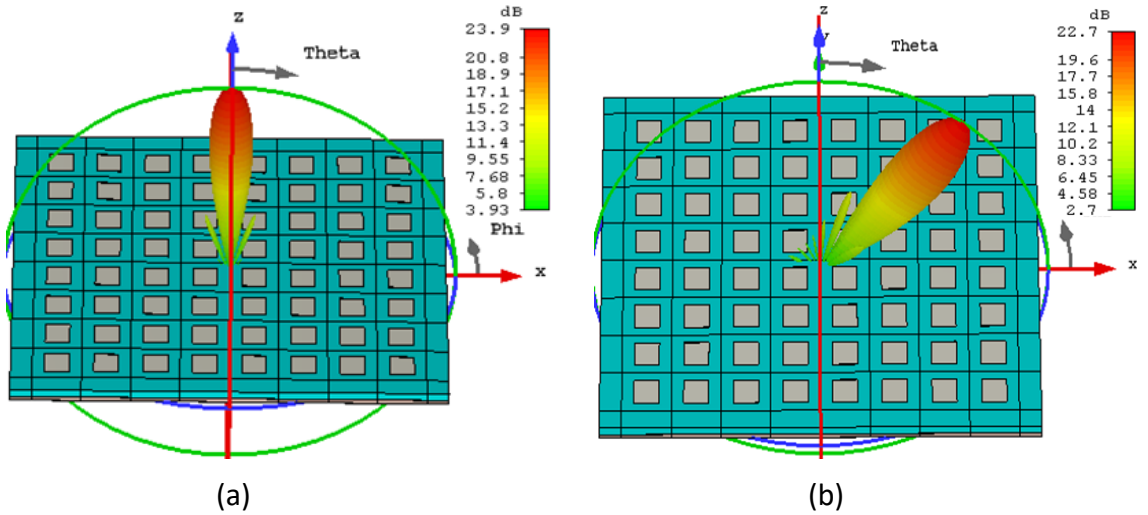
(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$



Şekil 6.33 Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü (8 GHz, E-düzlemi)

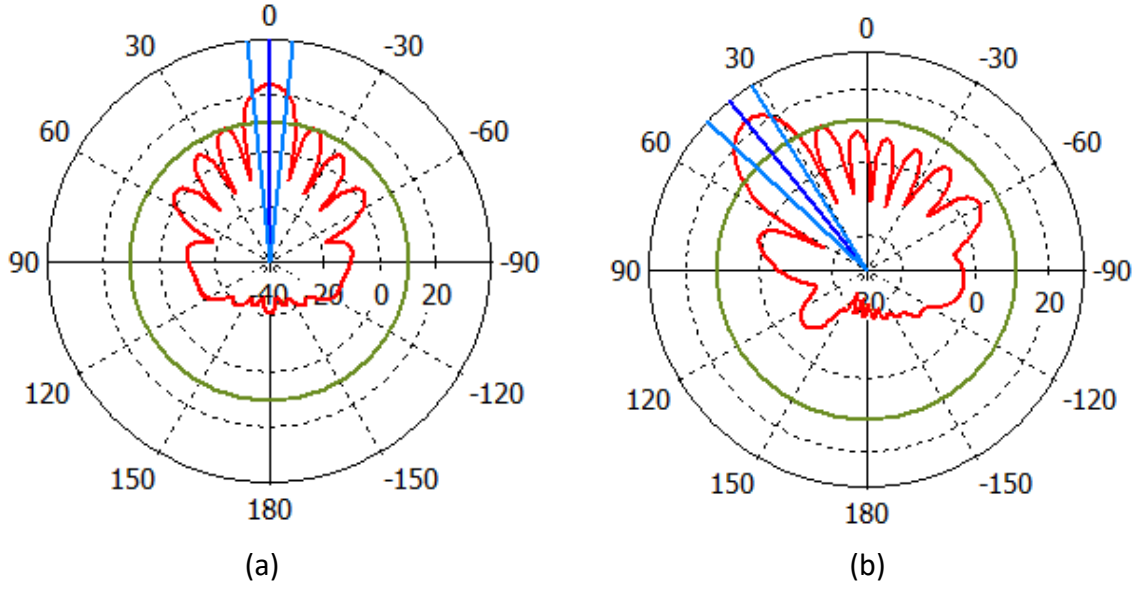
(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$

Şekil 6.34 (a) ve Şekil 6.34 (b)'de düzlemsel dizi antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde sırasıyla ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) ve E-düzleminde $\theta=40^\circ$ 'ye yönlendirilmişken antenin 9 GHz frekansında sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.35 (a) ve Şekil 6.35 (b)'de ise antene ait polar ışıma örüntüleri her iki huzme açısı için verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.



Şekil 6.34 Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü (9 GHz, E-düzlemi)

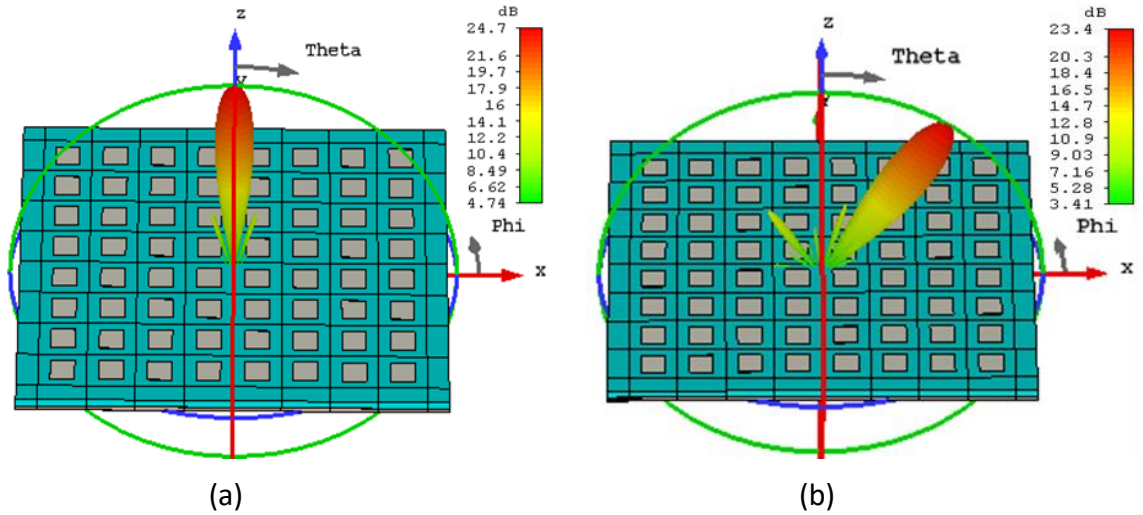
(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$



Şekil 6.35 Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü (9 GHz, E-düzlemi)

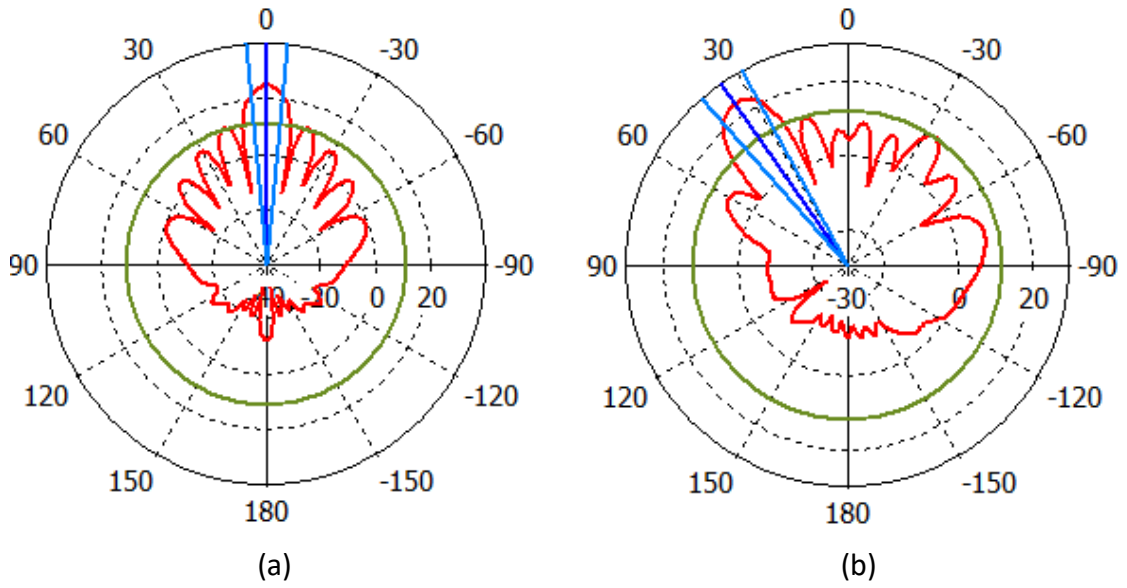
(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$

Şekil 6.36 (a) ve Şekil 6.36 (b)'de düzlemsel dizi antene ait üç boyutlu ışıma örüntüsünde sırasıyla ana huzme antene dik doğrultuda $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) ve E-düzleminde $\theta=40^\circ$ 'ye yönlendirilmişken antenin 10 GHz frekansında sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir. Şekil 6.37 (a) ve Şekil 6.37 (b)'de ise antene ait polar ışıma örüntüleri her iki huzme açısı için verilmiş olup ana lob genliği, ana lob yönü, YGHG (3 dB) ve yan lob seviye bilgileri belirtilmiştir.



Şekil 6.36 Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü (10 GHz, E-düzlemi)

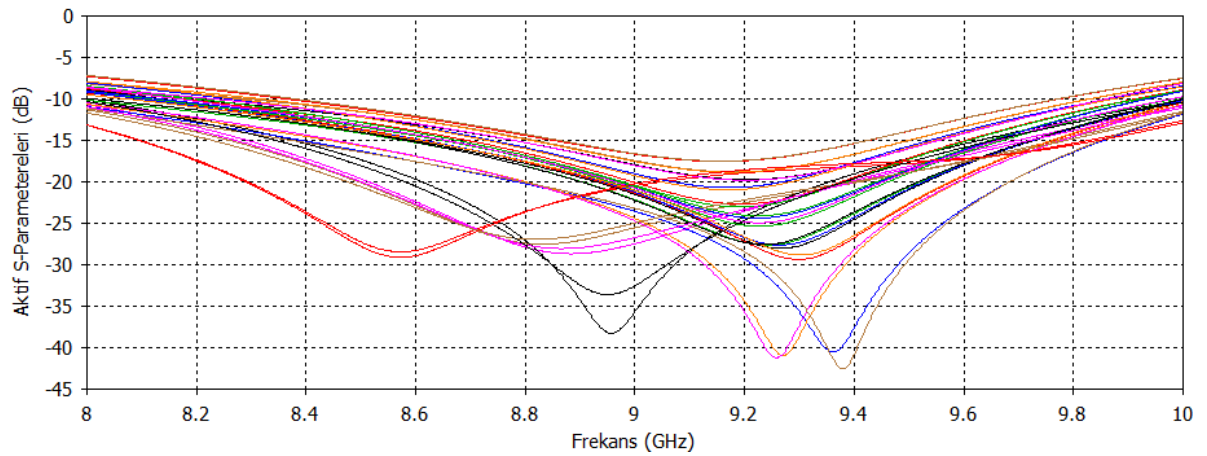
(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$



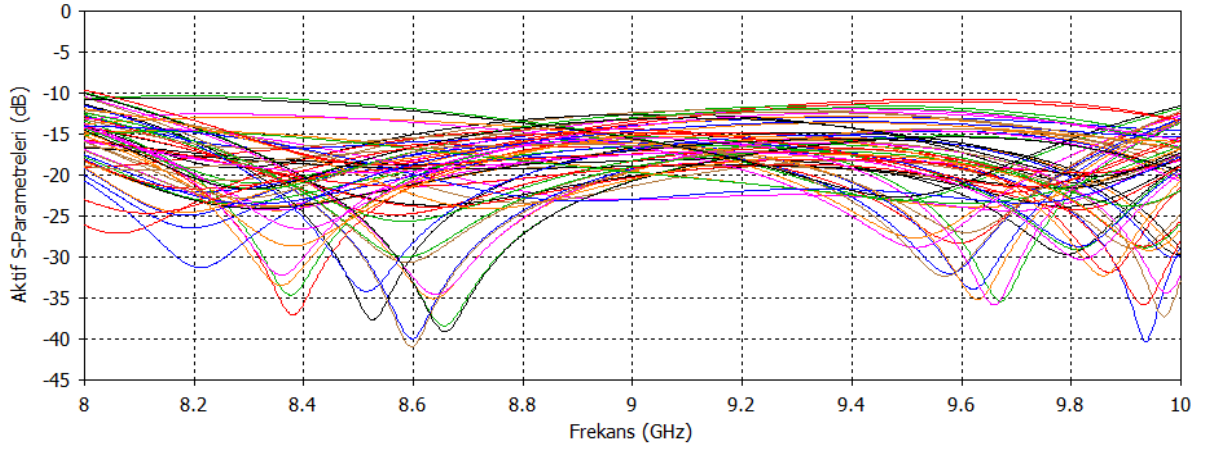
Şekil 6.37 Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü (10 GHz, E-düzlemi)

(a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=40^\circ$

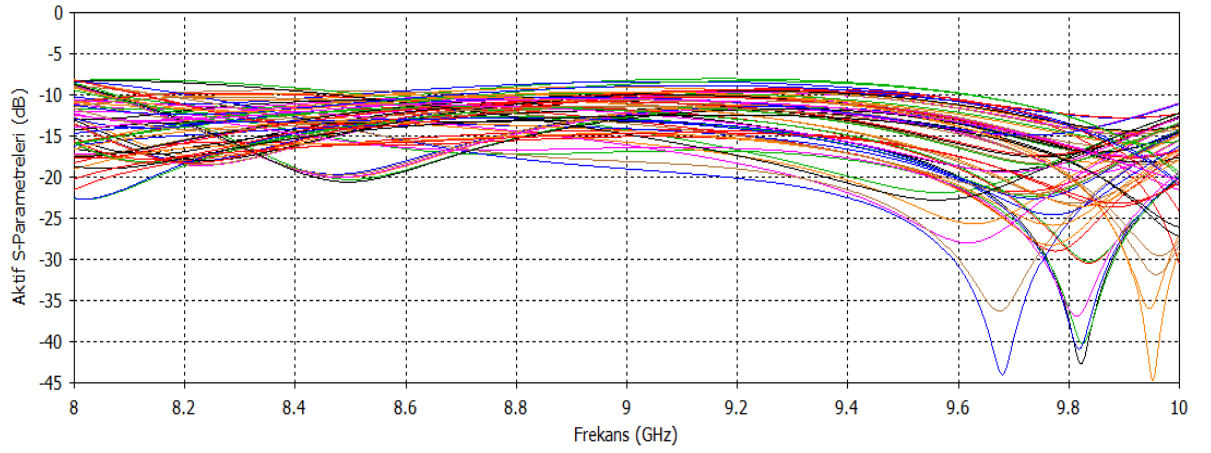
Şekil 6.38’de düzlemsel dizi anten huzmesi $\theta=0^\circ$ iken (broadside ışıma) oluşan aktif S-parametresi değerleri verilmiştir. Şekil 6.39’da düzlemsel dizi anten huzmesi E-düzleminde $\theta=40^\circ$ ye yönlendirildiğinde oluşan aktif S-parametresi değerleri verilmiştir. Şekil 6.40’da düzlemsel dizi anten huzmesi E-düzleminde $\theta=50^\circ$ ye yönlendirildiğinde oluşan aktif S-parametresi değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerlerinin birden çok portta -10 dB üzerine çıktığı ve anten huzmesinin $\theta=50^\circ$ ilerisine döndürüldüğünde ışıma karakteristiğinde bozulmalar oluşabileceği görülmüştür.



Şekil 6.38 Düzlemsel dizi aktif S -parametreleri grafiği ($\theta=0^\circ$, E-düzlemi)

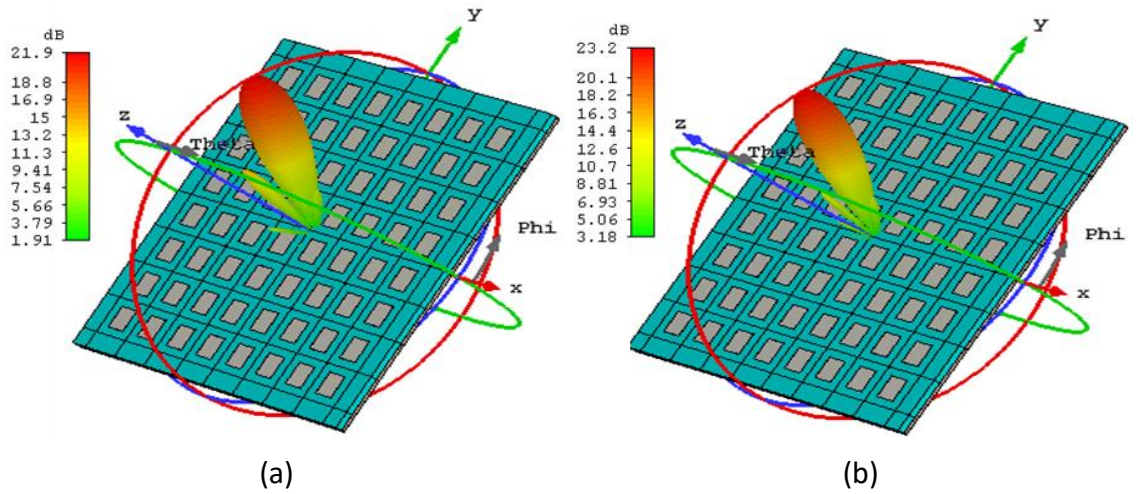


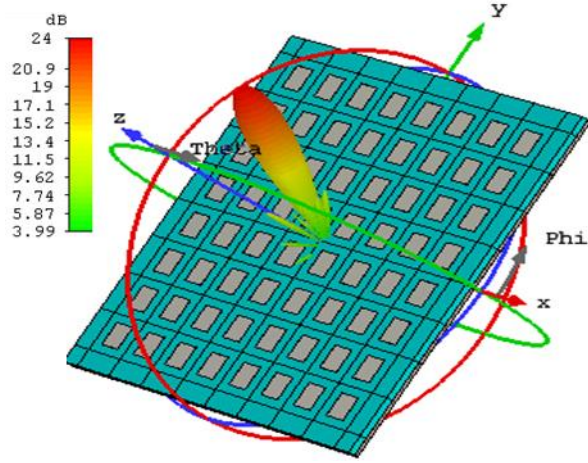
Şekil 6.39 Düzlemsel dizi aktif S -parametreleri grafiği ($\theta=40^\circ$, E -düzlemi)



Şekil 6.40 Düzlemsel dizi aktif S -parametreleri grafiği ($\theta=50^\circ$, E -düzlemi)

Şekil 6.41’de ana huzmesi H -düzleminde $\theta=30^\circ$ ’ye yönlendirilmiş düzlemsel dizi antene ait üç boyutlu ışınım örüntüsünde, antenin üç farklı frekansta (8-9-10 GHz) sahip olduğu maksimum kazanç değerleri görülmektedir.



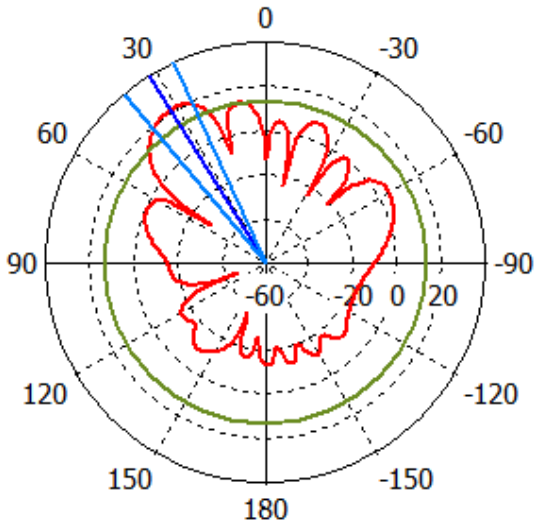


(c)

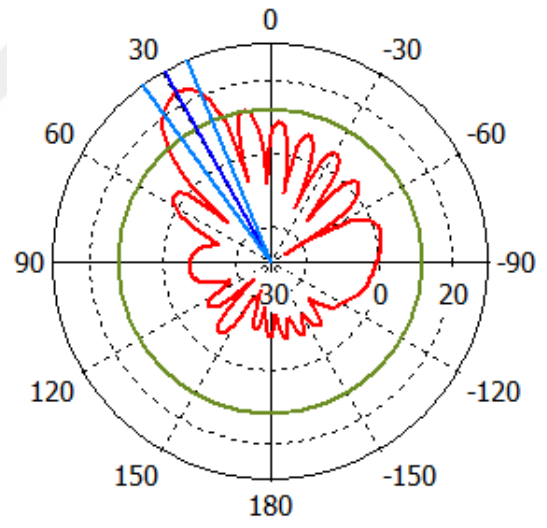
Şekil 6.41 Düzlemsel dizi üç boyutlu ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, H -düzlemi)

(a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

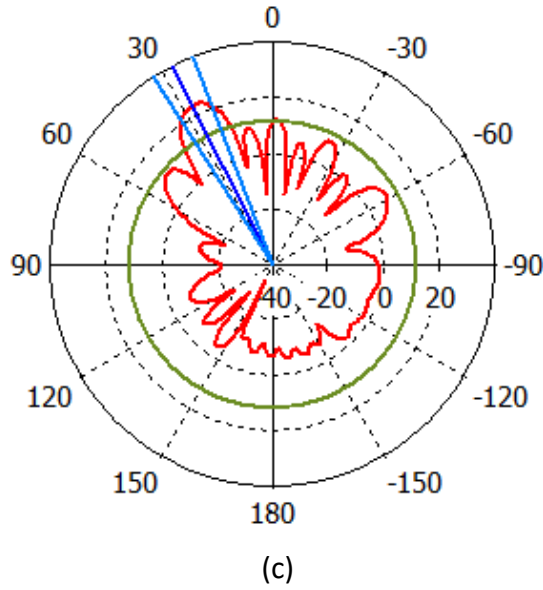
Şekil 6.42’de ana huzmesi H -düzleminde $\theta=30^\circ$ ’ye yönlendirilmiş düzlemsel dizi antene ait polar ışıma örüntüsünü üç farklı frekans (8-9-10 GHz) için verilmiştir.



(a)



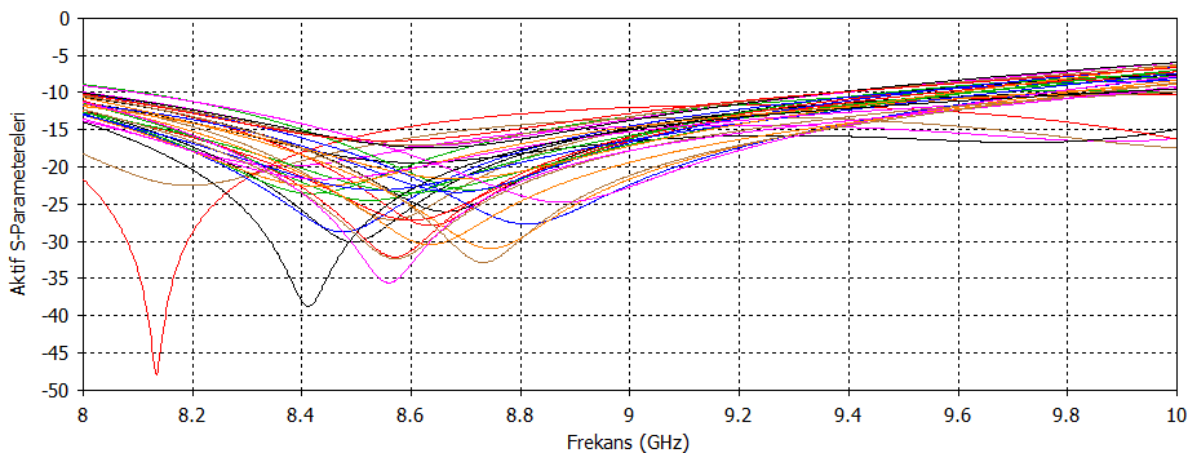
(b)



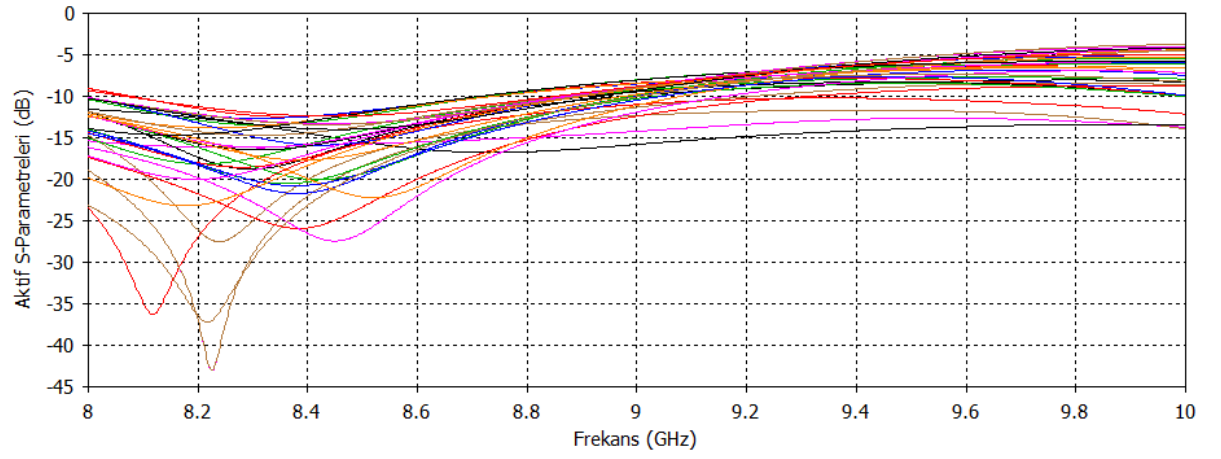
Şekil 6.42 Düzlemsel dizi polar ışıma örüntüsü ($\theta=30^\circ$, H -düzlemi)

(a) 8 GHz, (b) 9 GHz, (c) 10 GHz

Şekil 6.43'de düzlemsel dizi anten huzmesi H -düzleminde $\theta=30^\circ$ ye yönlendirildiğinde oluşan aktif S -parametresi değerleri verilmiştir. Şekil 6.44'te düzlemsel dizi anten huzmesi H -düzleminde $\theta=40^\circ$ ye yönlendirildiğinde oluşan aktif S -parametresi değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 8-10 GHz frekans bandında geri dönüş kaybı değerlerinin birden çok portta -10 dB üzerine çıktığı ve anten huzmesinin $\theta=40^\circ$ ilerisine döndürüldüğünde ışıma karakteristiğinde bozulmalar oluşabileceği görülmüştür.



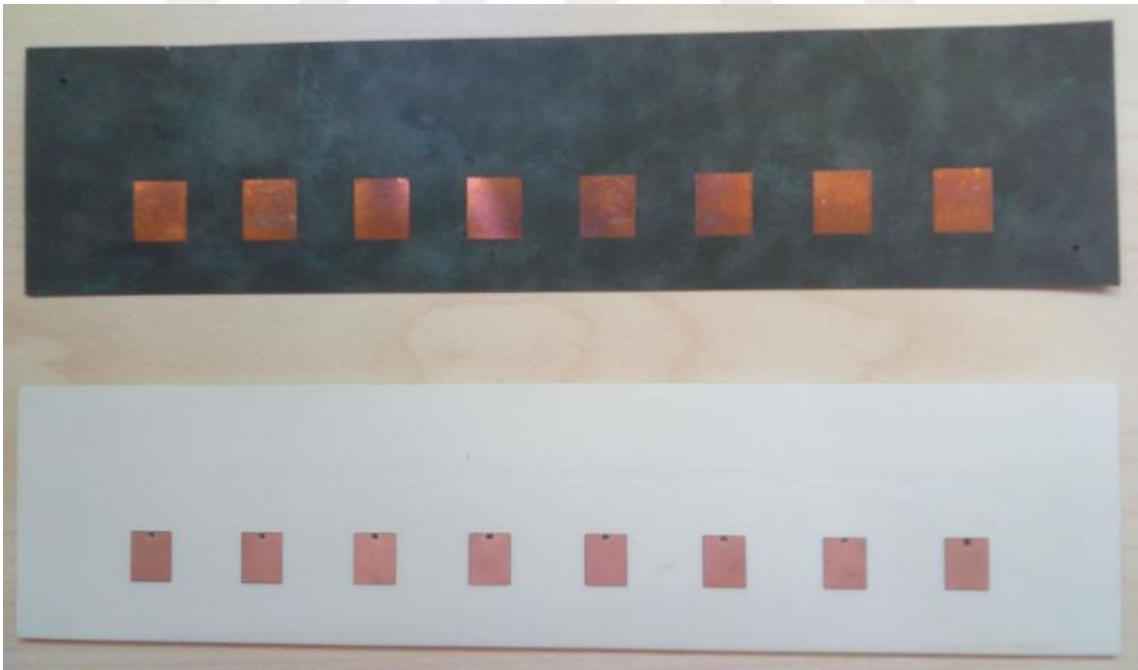
Şekil 6.43 Düzlemsel dizi aktif S -parametreleri grafiği ($\theta=30^\circ$, H -düzlemi)



Şekil 6.44 Düzlemsel dizi aktif S -parametreleri grafiği ($\theta=40^\circ$, H -düzlemi)

LİNEER DİZİ ANTEN ÜRETİMİ ve ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu bölümde bölüm 6.2’de tasarım parametrelerine göre üretimi yapılan 1 x 8 lineer faz dizili antene ait üretim bilgileri ve anten ölçüm laboratuvarında gerçekleştirilen ölçüm sonuçları verilip bu sonuçların simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 7.1’de üretilen antenin dielektrik alt katmanı ve ışıyan yamalar ile en üst katman ve parazitik yamalar görülmektedir.

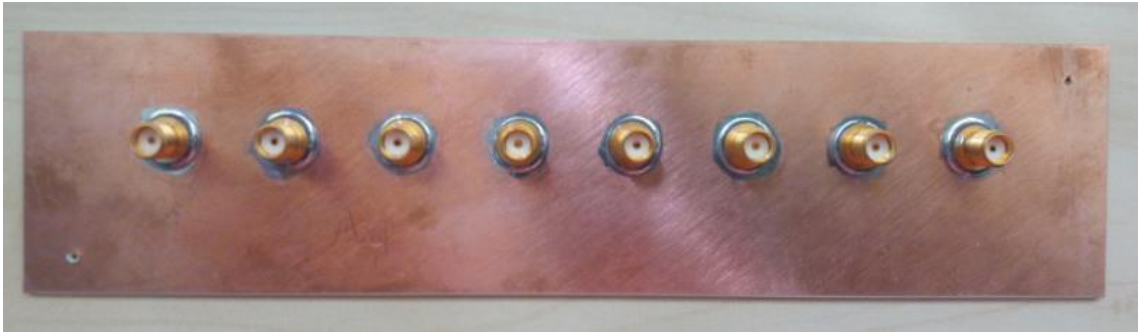


Şekil 7.1 Üretilen lineer anten dielektrik katmanlar Rogers 4003C ve Rogers 5880
üstten görünüm

Şekil 7.2 (a)'da ilk katman ile son katman ve aralarında köpük dielektrik katmanı yan görünüm ile verilirken, giriş portlarının görüldüğü alt görünüm Sekil 7.2 (b)'de verilmiştir.



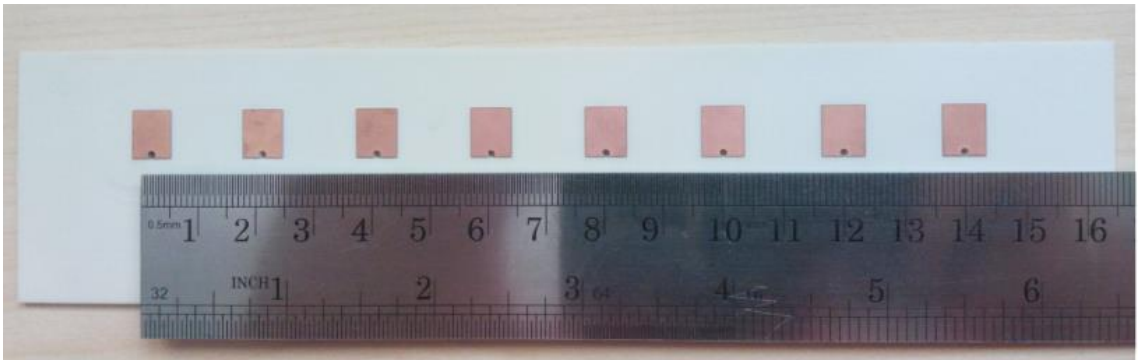
(a)



(b)

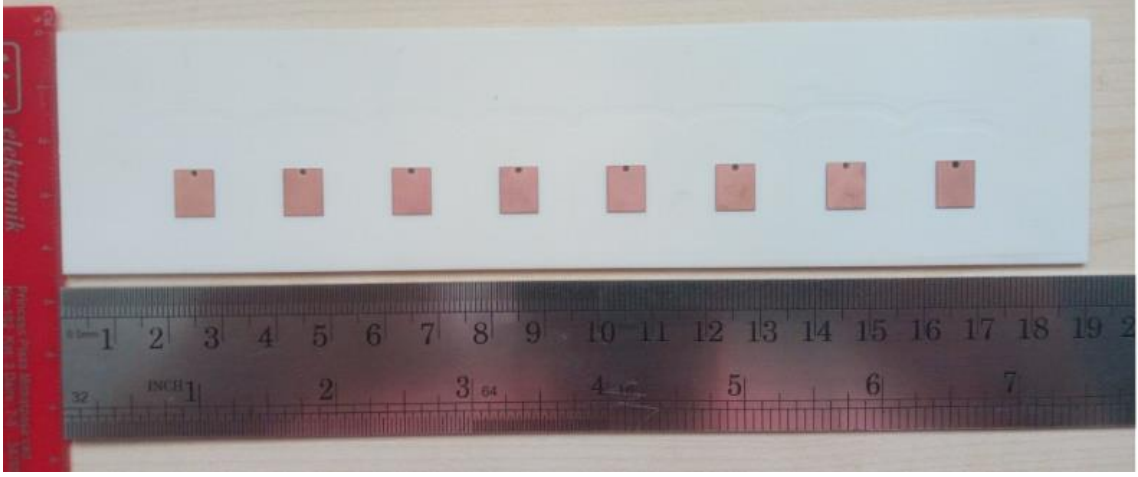
Şekil 7.2 Üretilen lineer anten (a) yan görünüm, (b) alttan görünüm

Şekil 7.3'de lineer dizi anten besleme noktaları arasındaki d mesafeleri görülmektedir. Üretim sonucu elde edilen d değerlerinin tasarımda verilen 20 mm ile aynı olarak üretilmiştir.



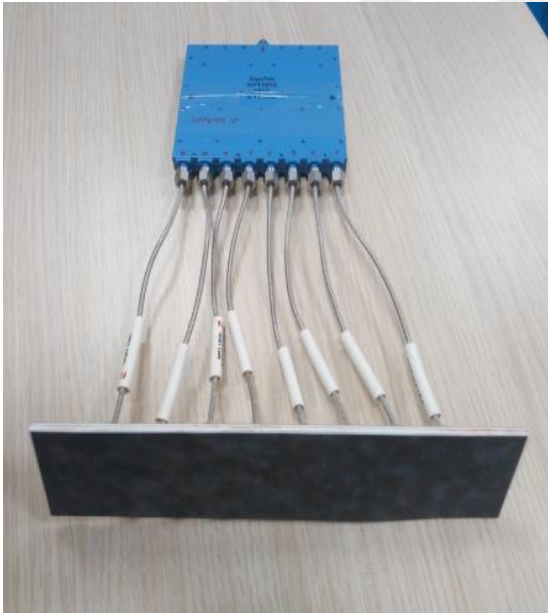
Şekil 7.3 Anten besleme noktaları arasındaki uzaklık

Şekil 7.4'te cetvel ile ölçülen anten alt katmanının boyutları görülmektedir.

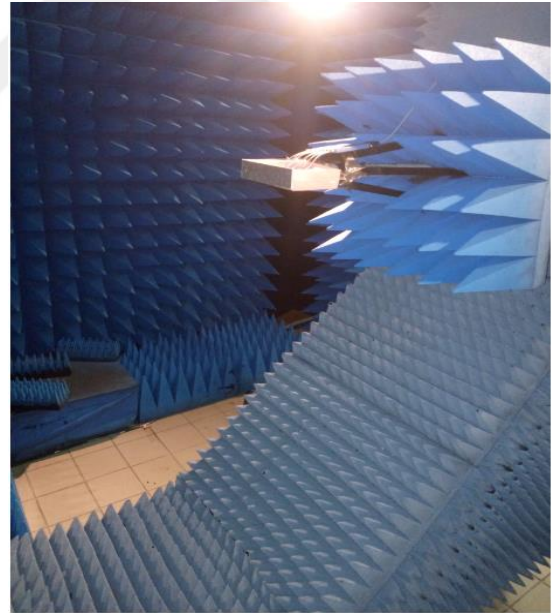


Şekil 7.4 Anten en ve boy uzunlukları

Anten ölçümü için anten ve 1 x 8 RF bölücü bağlantısı Şekil 7.5 (a)'da görülmektedir. Bağlantılarda kullanılan RF kabloların hepsi eşit uzunlukta seçilmiştir. Şekil 7.5 (b)'de ise antenin ölçüm platformuna yerleştirilmiş hali görülmektedir. RF sinyal girişi bölücü giriş portundan verilerek antenin beslemesi sağlanmıştır.



(a)

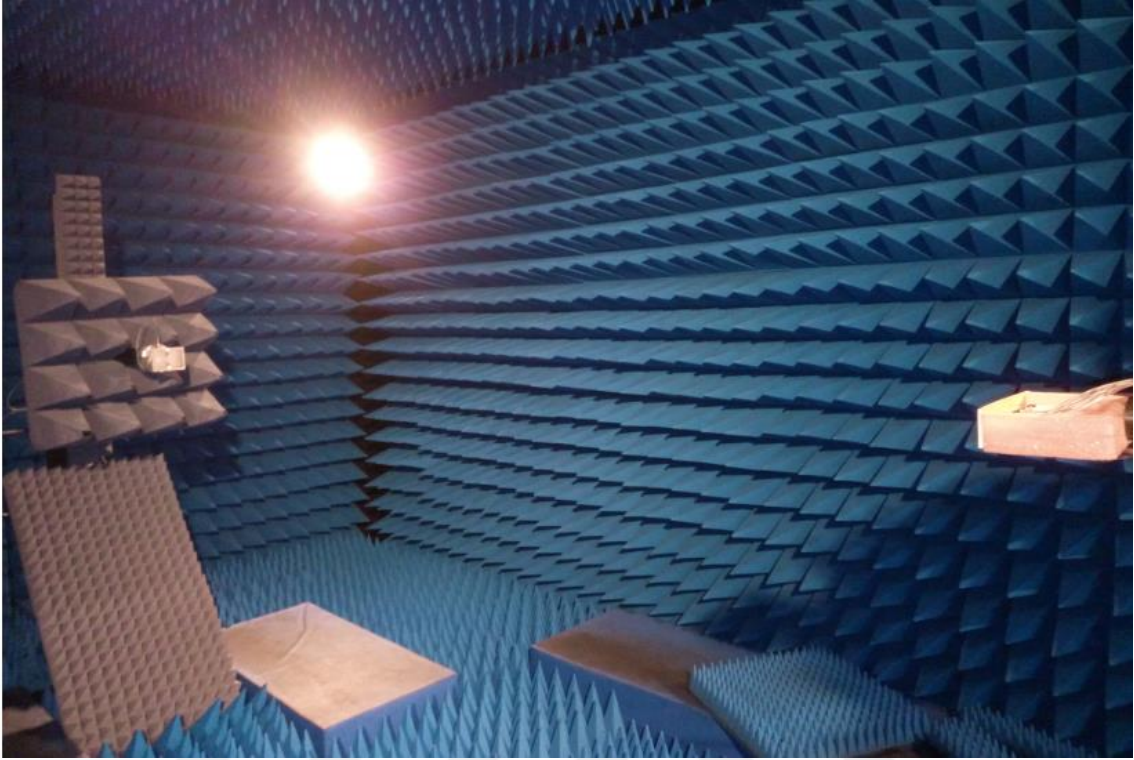


(b)

Şekil 7.5 Antenin (a) besleme ağı ile ölçüme hazır hale getirilmesi ,(b) ölçüm düzeneğine yerleşimi

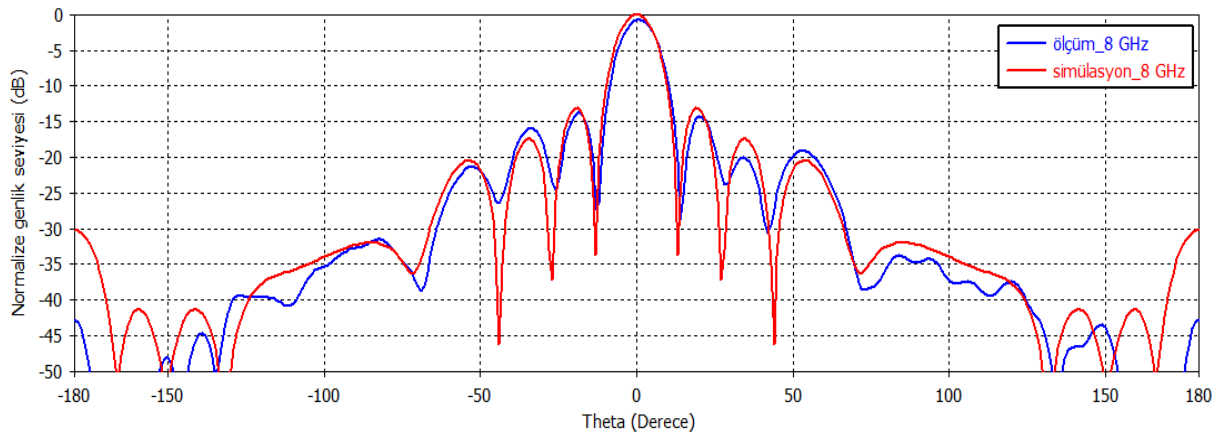
Ölçümlerin yapıldığı yansısız oda yerleşimi Şekil 7.6'da görülmektedir. Burada ölçümü alınan dizi anten verici olarak çalışırken 2.6 m uzaklıktaki platformda bulunan

referans alıcı anten yer almaktadır. Anten ölçüm sisteminde ilgili ayarlamalar yapılarak uzak alan ölçümleri ve anten parametreleri gerçekleştirilmiştir.

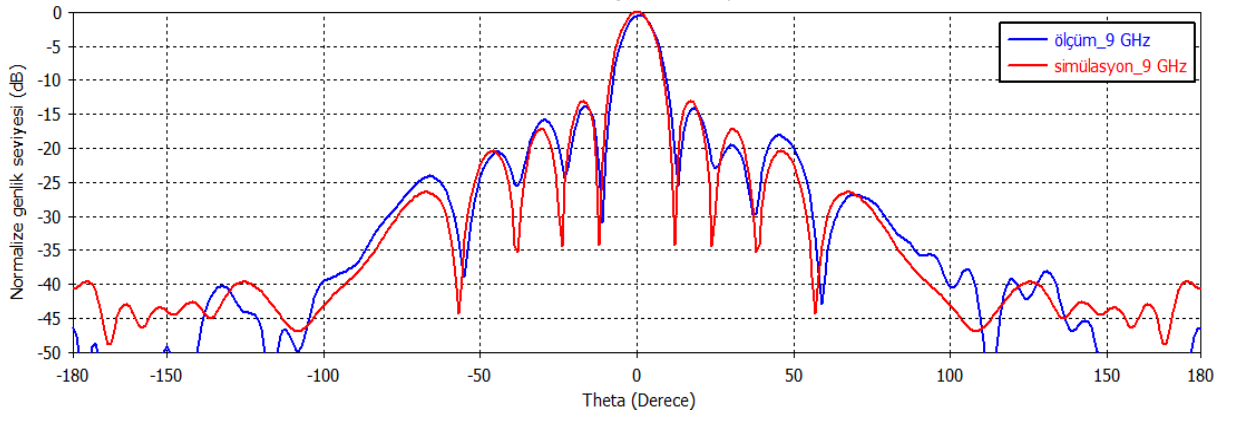


Şekil 7.6 Yansısız oda anten ölçüm düzeneği

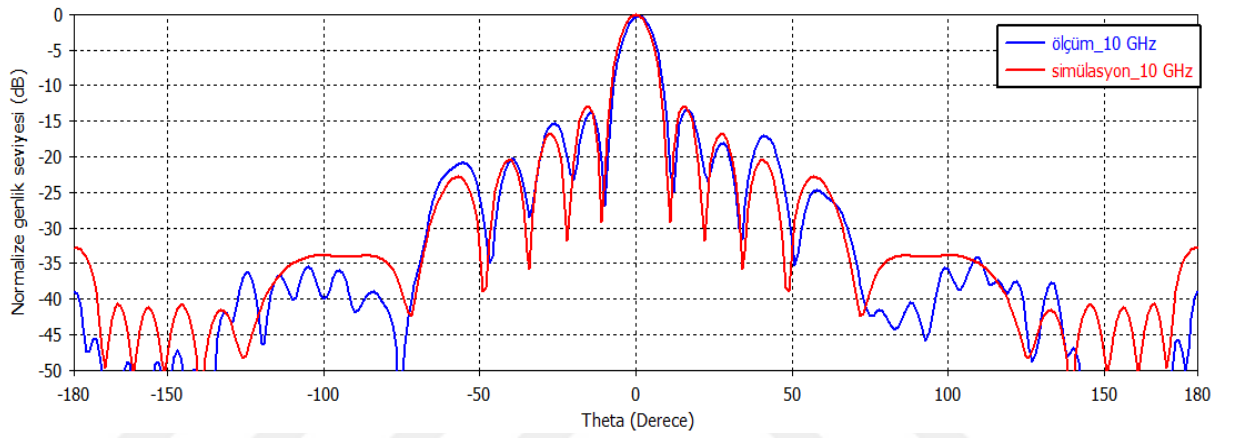
Ölçümler anten, broadside ışıma durumunda iken gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.7’de anten ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları 8-9-10 GHz frekanslarında kartezyen ışıma örüntüsü ile verilmiştir. Grafikler incelendiğinde simülasyon ve ölçüm sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü görülmüştür.



(a)



(b)



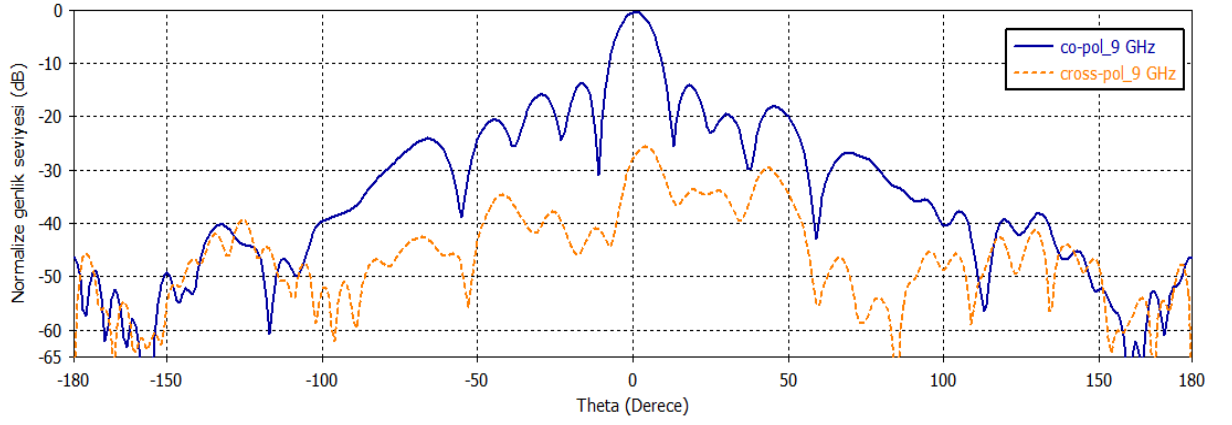
(c)

Şekil 7.7 Normalize ışıma örüntüsü ölçüm ve simülasyon karşılaştırması (a) 8 GHz’de, (b) 9 GHz’de, (c) 10 GHz’de

Şekil 7.8’de anten ölçümleri sonucu ana lob genlik seviyelerine bakıldığında cross polarizasyon¹ değerinin co-polarizasyona² göre yaklaşık -25 dB düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç tasarlanan antenin farklı polarizasyonda yayım yapan sinyaller ile karıştırılıp hedef tespit doğruluğunu düşürmesin engelleyecektir.

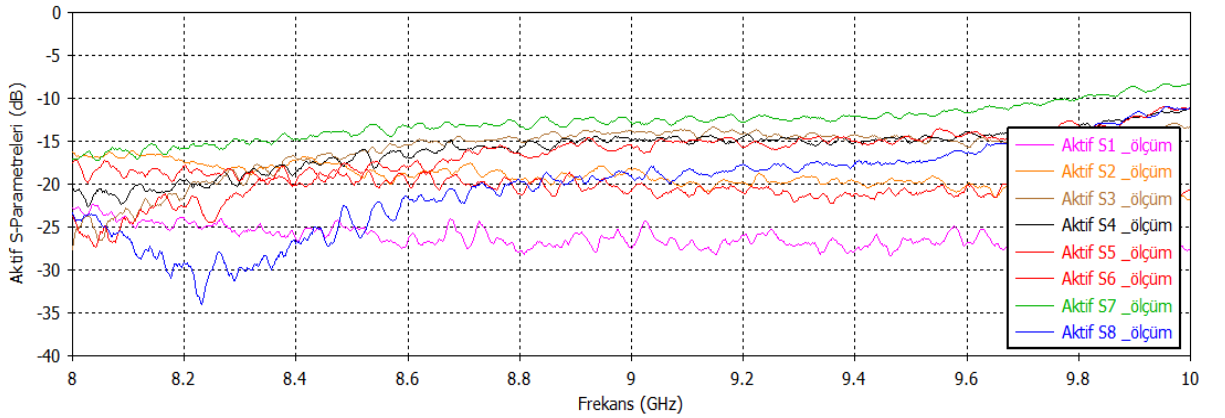
¹ Elektromanyetik sinyal ile anten polarizasyonunun aynı olması co-pol olarak adlandırılır [40].

² Elektromanyetik sinyal ile anten polarizasyonunun farklı olması cross-pol olarak adlandırılır [40].



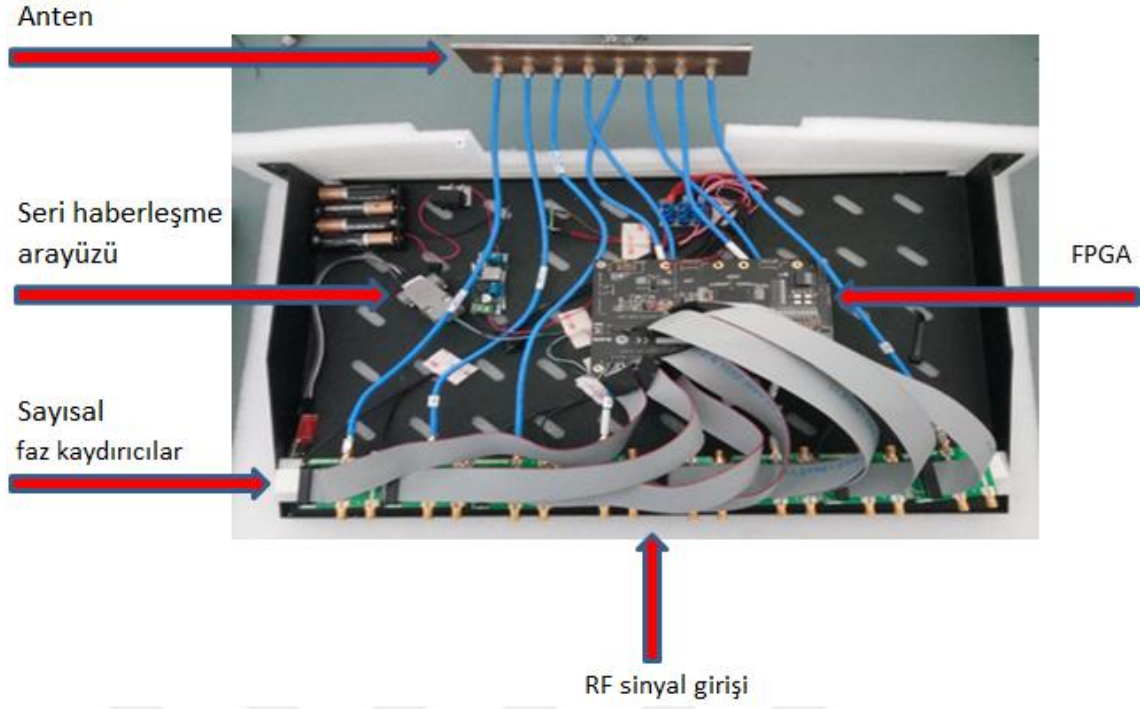
Şekil 7.8 Co-pol ve Cross-pol ölçüm sonuçları grafiği (9-GHz)

Şekil 7.9’da üretilen lineer faz dizili antene ait ölçülen aktif S-parametreleri görülmektedir. Ölçümler sırasında dışarıdan bozucu yansımalar alındığından değerlerde dalgalanmalar oluşmuştur.



Şekil 7.9 Üretilen lineer dizi antene ait aktif S -parametreleri ölçüm grafiği ($\theta=0^\circ$, $\phi=0^\circ$)

Şekil 7.10’da tasarımı gerçekleştirilen lineer faz dizili anten yapısı görülmektedir. Burada faz kaydırıcı olarak 8 adet 6 bit sayısal faz kaydırıcı kullanılmıştır. 6 bit faz kaydırıcı 5.6° derecelik açı çözünürlüğüne sahiptir. RF girişinden verilen sinyal 8 kollu güç bölücü ile faz kaydırıcılara girip, faz kaydırıcı çıkışından ise anten giriş portlarına gelmektedir. Huzmenin istenilen açıya yönlenebilmesi için gereken faz değerleri FPGA kartı ile sayısal faz kaydırıcılara gönderilmektedir. FPGA kartında gerçekleşen bu işleme ait kod EK-A’da verilmiştir.



Şekil 7.10 Üretilen lineer faz dizili anten mimarisi

BÖLÜM 8

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması neticesinde yığılı yama anten yapısının geniş bant uygulamalar için daha uygun bir temel eleman olduğu görülmüştür. Yapılan tasarım sonucu uygun dielektrik malzeme seçimi, optimum katman kalınlıkları ve yama ebatlarının belirlenmesi ile bant genişliğinde tek katmanlı klasik mikroşerit yama antene göre %20 artış görülmüştür. Aynı zamanda bu yapı ile birlikte anten kazancı, ışıma verimliliği ve geri dönüş kaybı da iyileştirmeler göstermiştir.

Tasarım Tipi	$\%BG$	G_{max}	$D_{maks.}$	$\%e_{top(max)}$	$YGHG_V$
Tek Katmanlı	3.8	7.2 dB	7.42 dBi	90	71.6°
Yığılı Yapı	23	9.26 dB	9.4 dBi	97.7	81°

Bu bilgiler doğrultusunda hedef tasarım olan faz dizili yapılar için temel anten elemanı seçilmiş oldu.

Dizi anten geometrisi olarak lineer 1 x 8 anten dizisi ve düzlemsel 8 x 8 anten dizisi tasarlanmıştır. Lineer dizi tasarımı için dört aşamalı tasarım iterasyonları detaylandırılıp ilgili anten tasarım parametreleri verilmiştir. Tasarlanan antenlerin 3 boyutlu ve polar ışıma örüntüleri $\theta=0^\circ$, $\theta=30^\circ$ için karşılaştırılmıştır. Faz dizili yapıda huzmenin yönleneceği açı için gerekli besleme fazları her bir anten için hesaplanmıştır. Lineer faz dizili anten için anten elemanları arası mesafe 20 mm olarak seçilmiştir. Faz hesapları eşitlik (5.17a)'da belirtilen formüle göre hesaplanmıştır. Analizler 8-10 GHz frekans aralığında analizler yapıldığından. Faz hesapları için gerekli dalga boyu değeri merkez frekans olan 9 GHz frekansı baz alınarak yapılmıştır. Bu durumda $d = 0.6 \lambda$ olarak alınmıştır.

Lineer dizinin huzme tarama aralığı E -düzleminde ($\varphi=0^\circ$) olup -30° ile $+30^\circ$ arasında yönlenebilecek durumdadır. Huzme yönlenme açısını artırılmamasının sebebi, yönlenen açının artmasıyla istenmeyen yan lob seviyelerinin artması ve istenmeyen ana huzme oluşumudur. İstenmeyen ana huzme oluşumu d mesafesi azaltılarak daha ileri açılara bırakılabilir ancak bu durumda toplam anten boyunda küçülmeye gidilmesi gerekmektedir. Bu da YGHG (yarım güç huzme genişliği) ve anten kazancının düşmesi anlamına gelmektedir.

Tasarım-1 ve Tasarım-2 uniform genlik dağılımı ile beslenmiş ve yan lob seviyeleri ana loba göre -13 dB seviyelerinde çıkmıştır.

Tasarım-3 ile birlikte Chebshev genlik ağırlıklandırması ile non-uniform besleme yapılmış ve yan lob seviyeleri bastırılmıştır.

Tasarım-4, anten enindeki asimetrik uzunluk yapısı ile Tasarım-3 te görülen yüksek arka lob seviyelerini -30 dB altına çekmiştir. Ayrıca $\theta_s=30^\circ$ deki $S1$ parametresinde iyileşme sağlamıştır. Böylelikle Bölüm 6.2’de incelenen lineer faz dizili anten tasarımları sonucu nihai olarak **Tasarım-4’ün en verimli anten** olduğu anlaşılmıştır.

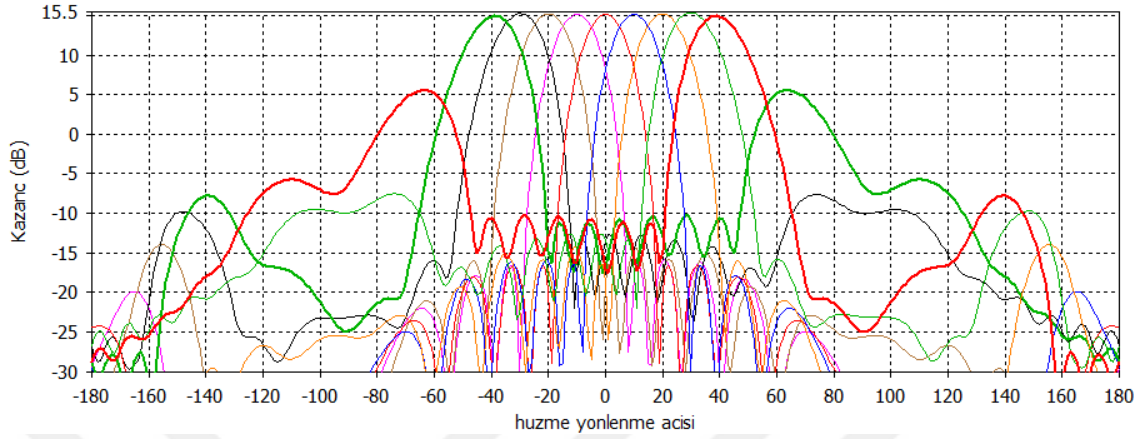
Çizelge 8.1’de tasarım-4’e ait huzmenin belirtilen açılara yönlenebilmesi için hesaplanan dizi elemanlarına ait besleme faz kayma açısı değerleri verilmiştir.

Çizelge 8.1 Tasarım-4 anten elemanları faz kayma açıları

θ (huzme yönlenme açısı)	β_1°	β_2°	β_3°	β_4°	β_5°	β_6°	β_7°	β_8°
-30°	0	108	216	324	72	180	288	36
-20°	0	73.8	147.6	221.4	295.2	9	82.8	156.6
-10°	0	37.5	75	112	150	187.5	225	262.5
-0°	0	0	0	0	0	0	0	0
10°	0	-37.5	-75	-112	-150	-187.5	-225	-262.5
20°	0	-73.8	-147.6	-221.4	-295.2	-9	-82.8	-156.6
30°	0	-108	-216	-324	-72	-180	-288	-36

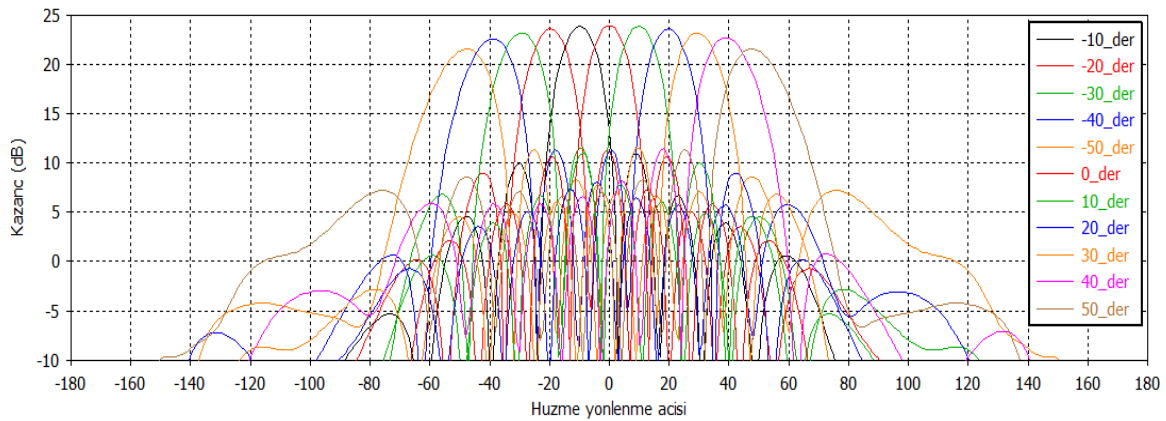
Şekil 8.1’de tasarım-4’e ait farklı yanca tarama açılarına yönlendirilmiş huzme şekillendirme (beamforming) yapısı gösterilmiştir. Burada lineer faz dizili yapımızın

hedeflenen -30° ile 30° arasındaki tarama alanı içerisinde huzme şeklinin ve kazancının korunduğu ancak huzme -40° ve 40° açılarına yönlendiğinde yan lob seviyelerin yükseldiği görülmektedir.



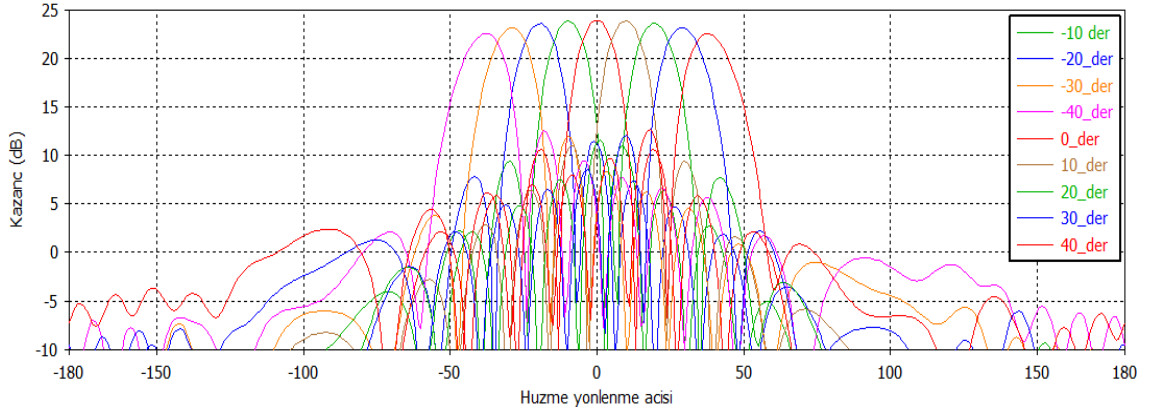
Şekil 8.1 Lineer faz dizili anten huzme tarama açıları

Şekil 8.2’de düzlemsel diziye ait *E*-düzleminde farklı tarama açılarına yönlendirilmiş huzme şekillendirme (beamforming) yapısı gösterilmiştir. Burada düzlemsel faz dizili yapımızın hedeflenen -40° ile 40° arasındaki tarama alanı içerisinde huzme şeklinin ve kazancının korunduğu ancak huzme -50° ve 50° açılarına yönlendiğinde yan lob seviyelerin yükseldiği görülmektedir.



Şekil 8.2 Düzlemsel faz dizili anten huzme tarama açıları (*E*-düzlemi)

Şekil 8.3’de düzlemsel diziye ait *H*-düzleminde farklı tarama açılarına yönlendirilmiş huzme şekillendirme (beamforming) yapısı gösterilmiştir. Burada düzlemsel faz dizili yapımızın hedeflenen -30° ile 30° arasındaki tarama alanı içerisinde huzme şeklinin ve kazancının korunduğu ancak huzme -40° ve 40° açılarına yönlendiğinde yan lob seviyelerin yükseldiği görülmektedir.



Şekil 8.3 Düzlemsel faz dizili anten huzme tarama açıları (*H*-düzlemi)

Bu çalışmada analizi yapılan lineer ve düzlemsel faz dizili mikroşerit antenlerin geniş bant aralığında çalışabilir olduğunu ispatlamıştır. Bu özelliği ile birlikte frekans atlama ihtiyacı hissedilen uygulamalarda örneğin; elektronik harp karşı tedbir sistemi olarak kullanılabilirler. Antenin boyutlarının ufak, üretim maliyetinin düşük olması sebebiyle kısa menzil radar sistemlerinde örneğin insansız hava aracı (yaklaşık $RKA=0.01m^2$) tespitlerinde kullanılabilir. Tasarlanan antenler, gerekli RF devre mimarisi oluşturulup, sinyal işleme algoritmalarının tasarlanması ile portatif bir radara dönüştürülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Howell, J.Q., (1975). "Microstrip Antennas" , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 25: 90-93.
- [2] Bhattacharyya, A., (1988). "Effects of dielectric superstrate on patch antennas" , Electronics Letters, 24 (6): 356-358.
- [3] Guha, D. Ve Siddiqui, J.Y., (2003). "Resonant Frequency of Circular Microstrip Antenna Covered With Dielectric Superstrate" , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 51 (7): 1649-1652.
- [4] Elfatimi, A., Bri, S. ve Saadi, A., (2018). "Comparison between techniques feeding for simple rectangular, circular and triangular patch antenna at 2.45 GHz", 2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), 26-27 April 2018, Mohammedia.
- [5] Richards, W.F., Lo, Y.T. ve Harrison, D.D., (1981). "An Improved Theory for Microstrip Antennas and Applications" , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 29 (1): 38-46.
- [6] Esselle, N.P. ve Verma, A.K., (2006). "Optimising the coaxial-fed location to enhance circular polarisation quality of stacked microstrip antennas", 2006 12th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and Canadian Radio Sciences Conference, 17-19 July 2006, Montreal.
- [7] Dahale, J.S. ve Lee, K.F., (1985). "Theory and experiment on microstrip antennas with airgaps" , IEE Proceedings H - Microwaves, Antennas and Propagation, 132 (7): 455-460.
- [8] Kishk A.A. ve Shafai, L., (1986). "Experimental and numerical investigation of stacked circular microstrip antennas", 1986 Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, 13-14 August 1986, Winnipeg.
- [9] Smith H.K. ve Mayes P.E., (1987). "Stacking resonators to increase the bandwidth of low-profile antennas" , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 35 (12): 1473-1476.

- [10] Xu, J., (1995). "Patterns of stacked microstrip patches antenna", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 18-23 June 1995, Newport Beach, California.
- [11] Waterhouse, R.B., (1999). "Design of Probe-Fed Stacked Patches" , IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 47 (12): 1780-1784.
- [12] Nishiyama, E., Aikawa, M. ve Egashira, S., (2004). "Wide-band and high-gain microstrip antenna with thick parasitic patch substrate", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 20-25 June 2004, Monterey.
- [13] Dahab M.A., Ghouz, H.M., ve Zaki, A.Z.A., (2016). "High Gain Compact Microstrip Patch Antenna For X-Band Applications" , International Journal of Antennas (JANT), 2 (1).
- [14] Derneryd, A.G., (1976). "Microstrip Array Antenna", 6th European Microwave Conference, 14-17 September 1976, Rome.
- [15] Noh, H.S. ve Park, U.H., (2006). "Three-stacked microstrip patch array antenna for both transmitting and receiving" , IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation, 153 (4): 385-388.
- [16] İpekoğlu, Y. ve Saraydemir, Ş., (2016). "İleri Saçılım Radar Anten Tasarımı", URSI-TÜRKİYE 8.Bilimsel Kongresi, 1-3 Eylül 1976, Ankara.
- [17] Bayat, N., Hassani, H.R. ve Mohammad, S., (2011). "Sidelobe Level Reduction in Microstrip Patch Antenna Arraya", Antennas & Propagation Conference, 14-15 November 2011, Loughborough.
- [18] Jain, G., Kumar, R., Ghosh, J., (2014). "Design of Low Sidelobe Microstrip Antenna Array", IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, 153 (4): 385-388.
- [19] Silveria, E.S., Nascimento, D.C. ve Tinoco, A.F., (2017). "Design of Microstrip Antenna Array with Suppressed Back Lobe", Journal of Microwaves, Optoelectroni Applications, 16 (2).
- [20] Yazdi, S. R., Chamaani, S. ve Ahmadi, S.A. (2015). "Mutual coupling reduction in microstrip phased array using stacked-patch reduced surface wave antenna IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 19-24 July 2015, Vancouver.
- [21] Chen, S., Toit, C., Hersey, K., Pao, D. ve Karasack V. (2001). "Azimuth scanning, Ka-band phased array antenna", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 8-13 July 2001, Boston.
- [22] Gulbrandsen, F. (2013). "Design and Analsis of an X-band Phased Array Patch Antenna", Yüksek Lisans Tezi, Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Department of Electronics and Telecommunications, Trondheim.
- [23] Balanis, C. A. ,(2005). Antenna Theory: Analysis and Design, Third Edition, John Wiley and Sons Inc. ,New Jersey.
- [24] Saunders, S.R. ve Zavala, A.A. ,(2007). Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems,Second Edition, John Wiley and Sons Inc., Chichester.

- [25] Microwaves101, <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/grating-lobes>, 27 Mayıs 2019.
- [26] Mathworks, <https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/grating-lobes.html>, 27 Mayıs 2019.
- [27] Tokan, F., (2014). "Optimization-based matching layer design for broadband dielectric lens antennas", Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 29, (6), pp. 499-507.
- [28] Nikolova, N.K., (2004). Antenna Theory: Analysis and Design. Lecture Notes, <http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/georgieva/antennas.html>, 20 Nisa 2019.
- [29] Mikroşerit yama anten ve uygulama alanları, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/mikroserit-yama-anten-ve-uygulama-alanlari>, 28 Mayıs 2019.
- [30] Radar Tutorial, <http://www.radartutorial.eu>, 25 Mayıs 2019.
- [31] Saniati, R.A., (1996). Cad of Microstrip Antennas for Wireless Applications, Artech House, London.
- [32] Yağcı B., PALAMUTÇUOĞLU O., ve PAKER S. (2005). " Evre Kaydırımlı Mikroşerit Yama Anten Dizili Ku Band Alıcı Tasarımı", İTÜ Dergisi, 4(1):43-49.
- [33] Pozar, D.M., Schaubert, D. H., (1995). Microstrip antennas, IEEE Press, New York.
- [34] Yıldız, C., (2008). Genetik Algoritma ile Anten Dizisi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] Connor, J.D., (2008). Antenna Array Synthesis Using the Cross Entropy Method, Florida State University, Florida.
- [36] Can, M.S, (2010). Faz Dizili Dairesel Mikroşerit Antenlerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [37] Chegg Study, Broadside Array, <https://www.chegg.com/homework-help/definitions/broadside-array-4>, 3 Haziran 2019.
- [38] Wikipedia, Antenna Boresight, https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_boresight, 3 Haziran 2019.
- [39] Mathworks, <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/chebwin.html>, 20 Mayıs 2019.
- [40] Mtiwe, Antenna Fundamentals, <https://www.mtiwe.com>, 6 Haziran 2019.

FPGA KONTROL KARTI

Her bir sayısal faz kaydırıcı için 6 bitlik veri girişi gerekmektedir. Bu durumda 8 adet faz kaydırıcı için 48 adet I/O çıkışına sahip bir kontrol kartı kullanımı gerekmektedir. Bu tezde elektronik faz kaydırıcı mimarisinde bu amaca yönelik gerekli I/O çıkışına sahip bir FPGA kontrol kartı kullanılmıştır. FPGA kartının kodlanması VHDL donanım tanımlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Kod içerisinde I/O bloklarının ilgili sayısal faz kaydırıcılara atanması, UART seri haberleşme ayarlarının yapılması, faz bilgisi içeren 6 bitlik verilerin tüm faz kaydırıcılara aynı anda gönderilmesi için gerekli kodlamalar yer almaktadır ve paket yapısı yer almaktadır.

A-1 Faz Kontrol Kodu

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;
use IEEE.std_logic_Unsigned.all;
entity machxo3_uart_ctrl is
port (
    resetn : in std_logic;
    clk      : in std_logic;
    ser_in   : in std_logic;
    ser_out  : out std_logic;
    led_active_ch: out std_logic;
    led_warning: out std_logic;
```

```

    led_count: out std_logic_vector(4 downto 0);
    led_error: out std_logic;
    phase_ctrl: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl2: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl3: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl4: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl5: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl6: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl7: out std_logic_vector(5 downto 0);
    phase_ctrl8: out std_logic_vector(5 downto 0);
    SW1: in std_logic;
    SW2: in std_logic;
    SW3: in std_logic;
    SW4: in std_logic
);
end machxo3_uart_ctrl;
architecture behavioral of machxo3_uart_ctrl is
    component machxo3_counter_uart
        port (Clock: in std_logic; Clk_En: in std_logic;
            Aclr: in std_logic; Q: out std_logic_vector(6 downto 0));
    end component;
    component uart_top
        port (
            -- Global reset ve clock
            MR : in std_logic; -- Master reset
            MCLK : in std_logic; -- Master clock
            -- İşlemci arayüzü
            A : in std_logic_vector(2 downto 0); //Adres bus
            DIN : in std_logic_vector(7 downto 0); //Veri bus giriş
            DOUT : out std_logic_vector(7 downto 0); //Veri bus çıkış
            ADSn : in std_logic; // Adres strobe
            CS : in std_logic; //Çip seçimi

```

```

RDn  : in std_logic; // Okuma
WRn  : in std_logic; //Yazma
DDIS : out std_logic; //Sürücü devre dışı
INTR : out std_logic; -- Interrupt

-- Alıcı arayüzü
SIN  : in std_logic; //Alıcı seri hat giriş
RxRDYn : out std_logic; // Alıcı okuma

-- Verici arayüzü
SOUT : out std_logic; // Verici seri çıkışı
TxRDYn : out std_logic; // Verici hazır

-- Modem arayüzü
DCDn  : in std_logic; // Veri taşıyıcı tespiti
CTSn  : in std_logic; // Gönderileni temizle
DSRn  : in std_logic; // Veri atama hazır
RIn   : in std_logic; // Ring göstergesi
DTRn  : out std_logic; // Veri terminal hazır
RTSn  : out std_logic // Gönderim isteği
);

end component;

type TX_state is (idle, check_txrdy, datain_wr);
type RX_state is (idle, state_ADDR_STR, state_wait_ADDR, state_wait_CS,
state_RD_data_wait, state_RD_data, state_WR_data, wait_rxdy_clear,
assign_channel,
state_RD_data_wait_start,
state_RD_data_start,wait_rxdy_clear_start,assign_channel_phase_ctrl1,
state_RD_data_wait_start2,
state_RD_data_start2,wait_rxdy_clear_start2,assign_channel_phase_ctrl2,
state_RD_data_wait_start3,
state_RD_data_start3,wait_rxdy_clear_start3,assign_channel_phase_ctrl3,
state_RD_data_wait_start4,
state_RD_data_start4,wait_rxdy_clear_start4,assign_channel_phase_ctrl4,

```

```

state_RD_data_wait_start5,
state_RD_data_start5,wait_rxdy_clear_start5,assign_channel_phase_ctrl5,
state_RD_data_wait_start6,
state_RD_data_start6,wait_rxdy_clear_start6,assign_channel_phase_ctrl6,
state_RD_data_wait_start7,
state_RD_data_start7,wait_rxdy_clear_start7,assign_channel_phase_ctrl7,
state_RD_data_wait_start8,
state_RD_data_start8,wait_rxdy_clear_start8,assign_channel_phase_ctrl8);
type config_state is (idle, set_LCR, read_LSR);
signal pulse_50ms_cnt: integer range 0 to 3840 := 0;
signal pulse_50ms_cnt: integer range 0 to 384000 := 0; // Test amaçlı 5 sn'de bir
göndersin
signal pulse_150ms_cnt: integer range 0 to 23040 := 0;
signal pulse_1500ms_cnt: integer range 0 to 230400 := 0;
signal reset: std_logic;
signal baud_count: std_logic_vector(6 downto 0);
signal CS : std_logic := '0';
signal RDn : std_logic := '1';
signal WRn : std_logic := '1';
signal ADSn : std_logic := '1';
signal ADDR : std_logic_vector(2 downto 0);
signal DIN : std_logic_vector(7 downto 0);
signal DOUT : std_logic_vector(7 downto 0);
signal RxRDYn : std_logic;
signal TxRDYn : std_logic;
-- Başlangıç karakteri: 'del' -- 128
signal start_char: std_logic_vector(7 downto 0);
signal ctrl_byte, ctrl_byte2, ctrl_byte3, ctrl_byte4, ctrl_byte5, ctrl_byte6, ctrl_byte7,
ctrl_byte8: std_logic_vector(7 downto 0);
signal state_TX: TX_state;
signal state_RX: RX_state;
signal state_config: config_state;

```

```

signal baud_clkx16, baud_clkx16_pre: std_logic;
signal status_check: std_logic := '0';
signal status_counter, status_counter_pre: std_logic := '0';
signal cnt_150ms_en, cnt_150ms_done :std_logic := '0';
signal start_cnt_wait_zone, cnt_wait_zone_done :std_logic := '0';
begin
reset <= not resetn;

baud_cnt: machxo3_counter_uart port map
(
    Clock => clk,
    Clk_en => '1',
    Aclr => reset,
    Q => baud_count
);
-- UUT yapılandırılması
uut: uart_top port map
    MR    => reset,
    MCLK  => baud_count(6), // Baud rate 9600 ayarlanır
    CS    => CS,
    RDn   => RDn,
    WRn   => WRn,
    ADSn  => ADSn,
    A     => ADDR,
    DIN   => DIN,
    DOUT  => DOUT,
    DDIS  => open,
    INTR  => open,
    SIN   => ser_in,
    RxRDYn => RxRDYn,
    SOUT  => ser_out,
    TxRDYn => TxRDYn,

```

```

DCDn => '1',
CTSn => '1',
DSRn => '1',
RIIn => '1',
DTRn => open,
RTSn => open
);
baud_clkx16 <= baud_count(6);
write_ctrl_word: process(reset, clk)
begin
  if (reset='1') then
    state_RX <= idle;
    baud_clkx16_pre <= '0';
    ctrl_byte <= "00000001"; // Varsayılanda birinci kanalda baslar
    status_byte <= (others => '0');
    status_byte_pre <= (others => '0');
    status_check <= '0';
    DIN <= (others => '0');
    WRn <= '1';
    RDn <= '1';
    led_count(1 downto 0) <= (others => '1');
    led_warning <= '1';
  elsif rising_edge(clk) then
    baud_clkx16_pre <= baud_clkx16;
  case state_RX is
    when idle =>
      if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
          state_RX <= state_ADDR_STR;
        else
          state_RX <= idle;
        end if;
      end if;
    end if;
  end case;
end process;

```

```

        ADSn <= '0';
    elsif(TxRDYn = '0' and status_check = '1') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_ADDR_STR;
        else
            state_RX <= idle;
        end if;
        ADSn <= '0';
    else
        state_RX <= idle;
        ADSn <= '1';
    end if;
    // Durumda degisim oldugunda veya 50 ms periyodik olarak gönder
    if((status_byte /= status_byte_pre) or ((status_counter and not
status_counter_pre) = '1')) then
        status_check <= '1';
    else
        status_check <= status_check;
    end if;
    DIN <= (others => '0');
    WRn <= '1';
    RDn <= '1';
when state_ADDR_STR =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= state_wait_ADDR;
        ADDR    <= "000";
        CS <= '1';
    else
        state_RX <= state_ADDR_STR;
        ADDR<= ADDR;
        CS<= CS;
    end if;

```

```

when state_wait_ADDR =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= state_wait_CS;
        ADSn <= '1';
    else
        state_RX <= state_wait_ADDR;
        ADSn <= ADSn;
    end if;
when state_wait_CS =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= state_RD_data_wait_start;
        ADDR <= "000";
        CS <= '0';
    else
        state_RX <= state_wait_CS;
        ADDR <= ADDR;
        CS <= CS;
    end if;

```

//Başlangıç karakteri kontrolü (128)

```

when state_RD_data_wait_start =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start;
        else
            RDn <= '1';
            WRn <= '0';
            DIN <= status_byte;
            state_RX <= state_WR_data;
        end if;
    end if;

```

```

else
    state_RX <= state_RD_data_wait_start;
    RDn <= '1';
    Wrn <= '1';
    DIN <= DIN;
end if;
when state_RD_data_start =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        start_char <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        start_char <= start_char;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(start_char = "10000000") then
            state_RX <= assign_channel_phase_ctrl1;
        else
            state_RX <= idle;
        end if;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl1 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait;

```

```

else
    state_RX <= assign_channel_phase_ctrl1;
end if;

else
    state_RX <= assign_channel_phase_ctrl1;
end if;

-- Faz_kontrol_1 yaz
when state_RD_data_wait =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data;
        else
            RDn <= '1';
            WRn <= '0';
            DIN <= status_byte;
            state_RX <= state_WR_data;
        end if;
    else
        state_RX <= state_RD_data_wait;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        DIN <= DIN;
    end if;
when state_RD_data =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte <= DOUT;
    end if;

```

```

else
    state_RX <= state_RD_data;
    RDn <= '0';
    Wrn <= '1';
    ctrl_byte <= ctrl_byte;
end if;
when state_WR_data =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= idle;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        status_check <= '0';
    else
        state_RX <= state_WR_data;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '0';
        status_check <= status_check;
    end if;
when wait_rxdy_clear =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear;
    end if;
when assign_channel =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start2;
            --state_RX <= idle;
        else
            state_RX <= assign_channel;
        end if;
    end if;

```

```

else
    state_RX <= assign_channel;
end if;

-- Faz_kontrol_2 yaz

when state_RD_data_wait_start2 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start2;
        else
            RDn <= '1';
            WRn <= '0';
            DIN <= status_byte;
            state_RX <= state_WR_data;
        end if;
    else
        state_RX <= state_RD_data_wait_start2;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        DIN <= DIN;
    end if;

when state_RD_data_start2 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start2;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte2 <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start2;
        RDn <= '0';
    end if;

```

```

        Wrn <= '1';
        ctrl_byte2 <= ctrl_byte2;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start2 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl2;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start2;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl2 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start3;
            --state_RX <= idle;
        else
            state_RX <= assign_channel_phase_ctrl2;
        end if;
    else
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl2;
    end if;
-- Faz_kontrol_3 yaz
when state_RD_data_wait_start3 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start3;
        else
            RDn <= '1';
            WRn <= '0';
            DIN <= status_byte;
        end if;
    end if;
end process;

```

```

        state_RX <= state_WR_data;
    end if;
else
    state_RX <= state_RD_data_wait_start3;
    RDn <= '1';
    Wrn <= '1';
    DIN <= DIN;
end if;
when state_RD_data_start3 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start3;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte3 <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start3;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte3 <= ctrl_byte3;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start3 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl3;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start3;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl3 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start4;
            --state_RX <= idle;
        else

```

```

        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl3;
    end if;
else
    state_RX <= assign_channel_phase_ctrl3;
end if;

-- Faz_kontrol_4 yaz
when state_RD_data_wait_start4 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start4;
        else
            RDn <= '1';
            WRn <= '0';
            DIN <= status_byte;
            state_RX <= state_WR_data;
        end if;
    else
        state_RX <= state_RD_data_wait_start4;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        DIN <= DIN;
    end if;
when state_RD_data_start4 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxrdy_clear_start4;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte4 <= DOUT;
    else

```

```

        state_RX <= state_RD_data_start4;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte4 <= ctrl_byte4;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start4 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl4;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start4;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl4 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start5;
            --state_RX <= idle;
        else
            state_RX <= assign_channel_phase_ctrl4;
        end if;
    else
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl4;
    end if;
end if;

```

-- Faz_kontrol_5 yaz

```

when state_RD_data_wait_start5 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start5;
        else
            RDn <= '1';

```

```

        WRn <= '0';
        DIN <= status_byte;
        state_RX <= state_WR_data;
    end if;
else
    state_RX <= state_RD_data_wait_start5;
    RDn <= '1';
    Wrn <= '1';
    DIN <= DIN;
end if;

when state_RD_data_start5 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start5;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte5 <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start5;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte5 <= ctrl_byte5;
    end if;

when wait_rxdy_clear_start5 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl5;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start5;
    end if;

when assign_channel_phase_ctrl5 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start6;

```

```

--state_RX <= idle;

else
    state_RX <= assign_channel_phase_ctrl5;
end if;

else
    state_RX <= assign_channel_phase_ctrl5;
end if;

-- Faz_kontrol_6 yaz

when state_RD_data_wait_start6 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start6;
        else
            RDn <= '1';
            WRn <= '0';
            DIN <= status_byte;
            state_RX <= state_WR_data;
        end if;
    else
        state_RX <= state_RD_data_wait_start6;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        DIN <= DIN;
    end if;

when state_RD_data_start6 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start6;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
    end if;

```

```

        ctrl_byte6 <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start6;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte6 <= ctrl_byte6;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start6 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl6;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start6;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl6 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start7;
            --state_RX <= idle;
        else
            state_RX <= assign_channel_phase_ctrl6;
        end if;
    else
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl6;
    end if;
-- Faz_kontrol_7 yaz
when state_RD_data_wait_start7 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        if(RxRDYn = '0') then
            RDn <= '0';
            WRn <= '1';
            DIN <= DIN;
            state_RX <= state_RD_data_start7;

```

```

else
    RDn <= '1';
    WRn <= '0';
    DIN <= status_byte;
    state_RX <= state_WR_data;
end if;
else
    state_RX <= state_RD_data_wait_start7;
    RDn <= '1';
    Wrn <= '1';
    DIN <= DIN;
end if;
when state_RD_data_start7 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start7;
        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte7 <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start7;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte7 <= ctrl_byte7;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start7 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl7;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start7;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl7 =>
    if(RxRDYn = '0') then

```

```

        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= state_RD_data_wait_start8;
            --state_RX <= idle;
        else
            state_RX <= assign_channel_phase_ctrl7;
        end if;
    else
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl7;
    end if;

-- Faz_kontrol_8 yaz
    when state_RD_data_wait_start8 =>
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            if(RxRDYn = '0') then
                RDn <= '0';
                WRn <= '1';
                DIN <= DIN;
                state_RX <= state_RD_data_start8;
            else
                RDn <= '1';
                WRn <= '0';
                DIN <= status_byte;
                state_RX <= state_WR_data;
            end if;
        else
            state_RX <= state_RD_data_wait_start8;
            RDn <= '1';
            Wrn <= '1';
            DIN <= DIN;
        end if;
    when state_RD_data_start8 =>
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            state_RX <= wait_rxdy_clear_start8;

```

```

        RDn <= '1';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte8 <= DOUT;
    else
        state_RX <= state_RD_data_start8;
        RDn <= '0';
        Wrn <= '1';
        ctrl_byte8 <= ctrl_byte8;
    end if;
when wait_rxdy_clear_start8 =>
    if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl8;
    else
        state_RX <= wait_rxdy_clear_start8;
    end if;
when assign_channel_phase_ctrl8 =>
    if(RxRDYn = '0') then
        if((not baud_clkx16_pre and baud_clkx16) = '1') then
            --state_RX <= state_RD_data_wait_start9;
            state_RX <= idle;
        else
            state_RX <= assign_channel_phase_ctrl8;
        end if;
    else
        state_RX <= assign_channel_phase_ctrl8;
    end if;

when others =>
    state_RX <= idle;
end case;
end if;
end process
counter_50ms: process(reset, baud_clkx16)

```

```

begin
  if (reset='1') then
    pulse_50ms_cnt <= 0 ;
    status_counter <= '0';
  elsif(rising_edge(baud_clkx16)) then
    if(pulse_50ms_cnt = 3840) then
      pulse_50ms_cnt <= 0;
      status_counter <= not status_counter;
    else
      pulse_50ms_cnt <= pulse_50ms_cnt+1;
      status_counter <= status_counter;
    end if;
  end if;
end process;
counter_150ms: process(reset, baud_clkx16)
begin
  if (reset='1') then
    cnt_150ms_done <= '0';
    pulse_150ms_cnt <= 0 ;
  elsif(rising_edge(baud_clkx16)) then
    if(cnt_150ms_en = '1') then
      if(pulse_150ms_cnt = 23040) then
        pulse_150ms_cnt <= pulse_150ms_cnt;
        cnt_150ms_done <= '1';
      else
        pulse_150ms_cnt <= pulse_150ms_cnt+1;
        cnt_150ms_done <= '0';
      end if;
    else
      pulse_150ms_cnt <= 0 ;
      cnt_150ms_done <= '0';
    end if;
  end if;
end process;

```

```

        end if;
    end process;
    counter_1500ms: process(reset, baud_clkx16)
    begin
        if (reset='1') then
            cnt_wait_zone_done <= '0';
            pulse_1500ms_cnt <= 0 ;
        elsif(rising_edge(baud_clkx16)) then
            if(start_cnt_wait_zone = '1') then
                if(pulse_1500ms_cnt = 230400) then
                    pulse_1500ms_cnt <= pulse_1500ms_cnt;
                    cnt_wait_zone_done <= '1';
                else
                    pulse_1500ms_cnt <= pulse_1500ms_cnt+1;
                    cnt_wait_zone_done <= '0';
                end if;
            else
                pulse_1500ms_cnt <= 0 ;
                cnt_wait_zone_done <= '0';
            end if;
        end if;
    end if;
end process;
led_active_ch <= '1';
led_count(4) <= '1';
led_count(3) <= not ctrl_byte8(5);
led_count(2) <= not ctrl_byte8(4);
led_warning <= not ctrl_byte8(3);
led_count(1) <= not ctrl_byte8(2);
led_count(0) <= not ctrl_byte8(1);
led_error <= not ctrl_byte8(0);
phase_ctrl <= ctrl_byte(5 downto 0);
phase_ctrl2 <= ctrl_byte2(5 downto 0);

```

```
phase_ctrl3 <= ctrl_byte3(5 downto 0);  
phase_ctrl4 <= ctrl_byte4(5 downto 0);  
phase_ctrl5 <= ctrl_byte5(5 downto 0);  
phase_ctrl6 <= ctrl_byte6(5 downto 0);  
phase_ctrl7 <= ctrl_byte7(5 downto 0);  
phase_ctrl8 <= ctrl_byte8(5 downto 0);  
end behavioral;
```



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Melih TÜRK
Doğum Tarihi ve Yeri :28.03.1988,Ünye
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :melihturk88@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elekt. ve Hab. Müh.	Kocaeli Üniversitesi	2011
Lise	Sayısal	Ünye Anadolu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2016	Tübitak BİLGEM	Araştırmacı
2015	Casper Bilgisayar Sistemleri A.Ş.	Ar-ge Mühendisi
2015	Natek Bilişim	Elektronik Mühendisi
2011	ALFA Telekomünikasyon A.Ş.	Elektronik Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Türk, M. ve Tokan, F., (2018).“X Bant Faz Dizili Mikroşerit Anten Tasarımı”, Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 24-25 Aralık, İstanbul.

