

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Husam Deen KAYALI Tarafından Hazırlanan**

**5G BAZ İSTASYONLARI İÇİN PATERNİ DEĞİŞTİRİLEBİLİR YÜKSEK KAZANÇLI
DİZİ ANTEN TASARIMI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 02 / 10 / 2025 gün ve 2122 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Ahmet GÜNER

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Haydar KAYA

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Bu tez çalışmasında 5G baz istasyonları için paterni değiştirilebilir yüksek kazançlı dizi anten tasarımı yapılmıştır.

Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne katıldığımdan beri, bilimsel desteği ve değerli düşünceleriyle bana her aşamada, konu seçiminde, planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda desteklerini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışmanım ve kendime örnek aldığım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN'a ne kadar teşekkür etsem azdır.

Çalışma süresince yardım ve desteklerini esirgemeyen Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Gerek lisans eğitimimde gerekse de yüksek lisans eğitim sürecimde hiçbir şekilde desteğini eksik etmeyen sevgili bölüm arkadaşlarım Ceyhun GENÇ ve Ahmad HAMIDI'ye çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitim sürecimde hiçbir şekilde desteklerini eksik etmeyen arkadaşlarım Ferihan ŞENGÜL ve Yalçın UZUNİSMAIL 'ye çok teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim bitene kadar bana destek olan herkese özellikle babama, anneme, kardeşlerime ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Husam Deen KAYALI

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “5G Baz İstasyonları için Paterni Değiştirilebilir Yüksek Kazançlı Dizi Anten Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/10/2025

Husam Deen KAYALI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Anten	2
1.2.1. Tel Antenler	2
1.2.2. Açıklık Antenler	3
1.2.3. Mikroşerit Antenler	4
1.2.4. Dizi Antenler	5
1.2.5. Yansıtıcı Antenler	5
1.2.6. Lens Antenler.....	6
1.3. Anten Parametreleri.....	6
1.3.1. Işıma Paterni.....	6
1.3.2. Yönlülük	7
1.3.3. Kazanç	7
1.3.4. Giriş Empedansı	8
1.3.5. Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR).....	8
1.3.6. Geri Dönüş Kaybı ve S11	8
1.3.7. Anten Verimi.....	9
1.3.8. Bant Genişliği.....	9
1.3.9. Kutuplanma	10
1.4. Mikroşerit Yama Anten.....	10
1.4.1. Mikroşerit Yama Antenlerin Besleme Yöntemleri.....	12

1.4.2.	Mikroşerit Yama Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	14
1.4.3.	Mikroşerit Yama Antenlerin Kullanım Alanları	15
1.5.	Dizi Antenler	15
1.5.1.	Dizi Antenlerin Kullanım Alanları ve Türleri.....	15
1.5.2.	Mikroşerit Yama Anten Dizileri	16
1.5.3.	Anten Dizi Faktörü	16
1.5.4.	Mikroşerit Yama Anten Dizilerinde Besleme Yöntemleri	17
1.6.	Anten Yeniden Yapılandırma Yöntemleri	17
1.6.1.	Elektronik Yeniden Yapılandırma.....	18
1.6.2.	Elektromekanik Yeniden Yapılandırma	18
1.6.3.	Optik Yeniden Yapılandırma.....	19
1.7.	5G Teknolojisi	19
1.7.1.	n 28 Frekans Bandı	20
1.7.2.	780 MHz Frekansının Seçilme Gerekçesi	21
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	22
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	37
3.1.	Mikroşerit Hat Beslemeli Tasarım.....	37
3.2.	Koaksiyel Hat Beslemeli Tasarım	47
3.3.	Yönlendirilebilir Dizi Anten İçin Gelişmiş 2x1 Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi	58
4.	SONUÇLAR	65
5.	ÖNERİLER	67
6.	KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

5G BAZ İSTASYONLARI İÇİN PATERNİ DEĞİŞTİRİLEBİLİR YÜKSEK KAZANÇLI DİZİ ANTEN TASARIMI

Husam Deen KAYALI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN
2025, 71 Sayfa

Bu tez çalışmasında, 5G baz istasyonlarında kullanılmak üzere yüksek kazançlı ve patern yönlendirme yeteneğine sahip bir anten sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, faz kaydırma tekniği kullanılarak farklı yönler ($+4^\circ$, -4° , 0°) ışın yönlendirebilen, yeniden yapılandırılabilir 1x8 doğrusal yama anten dizisi önerilmiştir. Anten, 780 MHz frekansında çalışacak şekilde optimize edilmiştir. İki farklı besleme yapısına sahip anten tasarımı geliştirilmiştir. Mikroşerit hat beslemeli tasarımda mikroşerit besleme hattı ve Rogers RO4003C dielektrik malzemesi kullanılmış, Koaksiyel hat beslemeli tasarımda ise koaksiyel besleme yöntemi kullanılmıştır. Her iki yapı, CST Studio Suite yazılımı ile modellenmiş ve simülasyonlarla değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, antenin her iki yöntemle de modellenebileceği, özellikle patern yapılandırma sayesinde tek bir anten ile farklı bölgelerin kapsama alanına alınabileceği ve antenin kırsal kesimlerde 5G verici anteni olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, anten yapılandırması için tasarlanan ve üretilen yapılandırılabilir Wilkinson güç bölücünün ölçümleri VNA ile yapılmış ve MATLAB ortamında simülasyon verileriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. FR-4 malzemesinin dielektrik kayıpları nedeniyle küçük sapmalar gözlemlense de genel olarak tasarımlar beklenen frekans, faz ve genlik değerlerine yakın seviyelerde veriler üretmiştir.

Anahtar Kelimeler: 5G, 780 MHz, Anten dizisi, Yeniden yönlendirilebilir antenler, Mikroşerit anten

Master Thesis

SUMMARY

PATTERNABLE HIGH GAIN ARRAY ANTENNA DESIGN FOR 5G BASE STATIONS

Husam Deen KAYALI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
Supervisor: Dr. Ayhan YAZGAN
2025, 71 Pages

In this thesis, a high-gain antenna system with beam steering capability for use in 5G base stations is designed and analyzed. Within the scope of the study, a pattern reconfigurable 1x8 linear patch antenna array capable of directing beams to different directions ($+4^\circ$, -4° , 0°) using a phase shifting technique is proposed. The antenna is optimized to operate at a frequency of 780 MHz. Antenna designs with two different feed structures were developed. The first design used a microstrip feed line and Rogers RO4003C dielectric material, while the second design used a coaxial feed method. Both structures were modeled and evaluated through simulations using CST Studio Suite. Based on the results, it was concluded that the antenna can be modeled with both methods, and that, in particular, the pattern reconfiguration allows coverage of different regions with a single antenna and that the antenna can be used as a 5G transmitter antenna in rural areas. In addition, measurements of the reconfigurable Wilkinson power divider designed and manufactured for the antenna configuration were performed with a VNA and compared with simulation data in MATLAB. Although small deviations were observed due to the dielectric losses of the FR-4 material, in general the designs produced data at levels close to the expected frequency, phase and amplitude values.

Keywords: 5G, 780 MHz, Antenna Array, Reconfigurable Antennas, Microstrip Antenna

ŞEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Farklı tel antenler (Balanis, 2016)	3
Şekil 2. Açıklık anten yapıları (Balanis, 2016).....	4
Şekil 3. Mikroşerit antenler (Balanis, 2016).....	4
Şekil 4. Dizi antenler (Balanis, 2016).....	5
Şekil 5. Anten ışıma örüntüsü (Balanis, 2016)	6
Şekil 6. Yama antenin S11 değişimi	10
Şekil 7. Mikroşerit yama anten	11
Şekil 8. Mikroşerit yama antenlerde kullanılan temel yama şekilleri.....	11
Şekil 9. Koaksiyel besleme	13
Şekil 10. Mikroşerit besleme	13
Şekil 11. PIN diyodun fiziksel paketleme yapısı	18
Şekil 12. Elektromekanik anahtar eşdeğeri.....	19
Şekil 13. Tek anten yapısı	23
Şekil 14. 1x8 dizi anten yapısı	25
Şekil 15. 1x8 dizi anten için besleme yapısının şematik gösterimi	26
Şekil 16. İlk anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artışı	28
Şekil 17. PIN diyot eşdeğer devresi: Açık durum.....	30
Şekil 18. PIN diyot eşdeğer devresi: Kapalı durum.....	30
Şekil 19. Besleme hattındaki uzunluk artışları ve anahtar yerleşimlerine ilişkin örnek yapı	31
Şekil 20. Standart 2x1 güç bölücü yapısı.....	32
Şekil 21. Geliştirilmiş 2x1 güç bölücü tasarımı.....	34
Şekil 22. Dizi anten için tasarlanan koaksiyel besleme yapısı.....	35
Şekil 23. SMA Yapısı – Ön Görünüm.....	35
Şekil 24. SMA Yapısı – Yan Görünüm	35
Şekil 25. CST ortamında tasarlanan 1x8 yönlendirilebilir dizi anten (Mikroşerit hat beslemeli tasarım).....	37
Şekil 26. +4 derece için S11 değişimi– Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	38
Şekil 27. +4 derece için VSWR – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	38
Şekil 28. +4 derece için giriş empedansı – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	39

Şekil 29.	+4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,9$ dB, $G = 16,4$ dB – Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	39
Şekil 30.	+4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım ...	40
Şekil 31.	+4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 0^\circ$) - Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	40
Şekil 32.	-4 derece için S_{11} değişimi– Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	41
Şekil 33.	-4 derece için VSWR – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	42
Şekil 34.	-4 derece için giriş empedansı – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	42
Şekil 35.	-4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,65$ dB, $G = 16,15$ dB – Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	43
Şekil 36.	-4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	43
Şekil 37.	-4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 0^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	44
Şekil 38.	0 derece için S_{11} değişimi– Mikroşerit hat beslemeli tasarım	45
Şekil 39.	0 derece için VSWR – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	45
Şekil 40.	0 derece için giriş empedansı – Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	45
Şekil 41.	0 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 16,74$ dB, $G = 15,25$ dB – Mikroşerit hat beslemeli tasarım.....	46
Şekil 42.	0 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	46
Şekil 43.	0 derece için ışıma paterni ($\Phi = 0^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım	47
Şekil 44.	CST ortamında tasarlanan 1×8 yönlendirilebilir dizi anten (Koaksiyel hat beslemeli tasarım).....	48
Şekil 45.	+4 derece için S_{11} değişimi – Koaksiyel hat beslemeli tasarım.....	49
Şekil 46.	+4 derece için VSWR – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	49
Şekil 47.	+4 derece için giriş empedansı – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	50
Şekil 48.	+4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 18,26$ dB, $G = 15,87$ dB – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	50
Şekil 49.	+4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım....	51
Şekil 50.	+4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 0^\circ$) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım.....	51
Şekil 51.	-4 derece için S_{11} değişimi– Koaksiyel hat beslemeli tasarım	52
Şekil 52.	-4 derece için VSWR – Koaksiyel hat beslemeli tasarım.....	52
Şekil 53.	-4 derece için giriş empedansı – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	53
Şekil 54.	-4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,93$ dB, $G = 15,55$ dB – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	53
Şekil 55.	-4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım.....	54
Şekil 56.	-4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 0^\circ$) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım.....	54
Şekil 57.	0 derece için S_{11} değişimi– Koaksiyel hat beslemeli tasarım.....	55
Şekil 58.	0 derece için VSWR – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	55

Şekil 59.	0 derece için giriş empedansı – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	56
Şekil 60.	0 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,27$ dB, $G = 14,97$ dB – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	56
Şekil 61.	0 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	57
Şekil 62.	0 derece için ışıma paterni ($\Phi = 0^\circ$) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım	57
Şekil 63.	Gelişmiş 2x1 Güç Bölücü - CST	59
Şekil 64.	Gelişmiş 2x1 Güç Bölücü - Deneysel.....	60
Şekil 65.	+4° için S11, S22 ve S33 değişimleri	60
Şekil 66.	+4° için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz.....	61
Şekil 67.	-4° için S11, S22 ve S33 değişimleri	62
Şekil 68.	-4° için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz.....	62
Şekil 69.	İlk 0° durumu için S11, S22 ve S33 değişimleri	63
Şekil 70.	İlk 0° durumu için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz.....	63
Şekil 71.	İkinci 0° durumu için S11, S22 ve S33 değişimleri.....	64
Şekil 72.	İkinci 0° durumu için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz.....	64

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Tek anten parametreleri	24
Tablo 2. 1x8 Dizi anten parametreleri	27
Tablo 3. Her anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artış miktarları (Mikroşerit hat beslemeli tasarım).....	29
Tablo 4. Standart 2x1 güç bölücünün parametreleri	33
Tablo 5. Her anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artış miktarları (Koaksiyel hat beslemeli tasarım).....	33
Tablo 6. Koaksiyel ve SMA Parametreleri	36
Tablo 7. Mikroşerit hat beslemeli tasarımın sonuçları.....	47
Tablo 8. Koaksiyel hat beslemeli tasarımın sonuçları	58
Tablo 9. R, L ve C Değerleri.....	58

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

G	: Kazanç
U	: Işıma şiddeti
P_{in}	: Toplam giriş güç
G	: Kazanç
D	: Yönlülük
U	: Işıma şiddeti
P_{in}	: Toplam giriş güç
VSWR	: Voltaj duran dalga oranı
Γ	: Yansıma katsayısı
Z_{in}	: Anten giriş empedansı
Z_0	: İletim hattın empedansı
GDK	: Geri dönüş kaybı
e_{cd}	: İletkenlik-dielektrik verimini
e_0	: Antenin toplam verimi
f	: Çalışma frekansı
W	: Genişlik
L	: Uzunluk
H	: Yükseklik
ϵ_r	: Dielektrik sabiti
ϵ_{reff}	: Etkin dielektrik sabiti
L_{eff}	: Etkin uzunluk
λ	: Dalga boyu
λ_g	: Etkin dalga boyu
d	: Mesafe
$\Delta\phi$	: Ardışık iki ışınlam yapan eleman arasındaki faz farkı
θ_s	: Işınlam açısı
AF	: Dizi faktörü
β	: Elemanlar arasındaki fazı farkı
k	: Faz sabiti

θ	: Anten dizisi ana kulak açısı
K	: Uzatma miktarı
dB	: Desibel
DC	: Direct current (doğru akım)
VNA	: Vektör Network Analizör
MATLAB	: Matrix Laboratory (Matris Laboratuvarı)



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beşinci nesil (5G) mobil iletişim sistemleri, yüksek veri hızları, geniş kapsama alanı ve düşük gecikme süreleri gibi performans hedeflerine ulaşabilmek için gelişmiş anten teknolojilerine ihtiyaç duymaktadır. Özellikle yüksek kazançlı ve patern değiştirilebilir anten sistemleri bu gereksinimlere yönelik önemli çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda, bu tezde ele alınan 5G baz istasyonları için patern değiştirilebilir yüksek kazançlı anten tasarımı, antenin yönünü dinamik olarak değiştirme kabiliyeti (beam-switching) ile yüksek kazanç sağlama yeteneğini bir araya getirmektedir.

Literatürdeki benzer çalışmalarda, farklı yöntemler kullanılarak yüksek kazanç elde edilmesi ve patern yönlendirme yeteneğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Örneğin, Siddiqui ve arkadaşları tarafından sunulan sub-6 GHz bandı için tasarlanmış dual-band anten dizisinde, dört U-şekilli dipol ve 8 uyarım portu kullanılarak faz kaydırmalı besleme yoluyla yaklaşık $\pm 20^\circ$ 'lik beam steering gerçekleştirilmiştir (Siddiqui vd., 2024).. Bu tasarım, aynı panel ile çift sektör kapsamı sağlayabilen kompakt bir çözüm sunması açısından dikkat çekicidir.

Metamalzeme tabanlı başka bir çalışmada ise, 3,6 GHz bandı için düzlemsel bir beam-steering anteni geliştirilmiştir. Bu tasarım, mikroşerit yama besleme dizisi ile iletim dizisi (transmitarray) katmanını birleştirerek $\pm 20^\circ$ 'lik 2D yönlendirme imkanı sunmuştur. Prototipte ise azimuth düzleminde 8° , elevasyonda 13° dolayında gerçek beam-steering elde edilmiştir (Reis vd., 2021).

Öte yandan, 3.5 GHz bandında 5G/6G makro baz istasyonları için geliştirilmiş elektronik beam downtilt ayarlanabilir lineer anten dizileri de mevcuttur. Bu yapı, hiyerarşik besleme ağı kullanarak $6-12^\circ$ arasında stabil faz kaydırma ile patern yönlendirmesi yapabilmektedir (Chen vd., 2024).

Bu tez çalışması ise, literatürdeki bu yaklaşımlardan farklı olarak, patern değiştirilebilir yüksek kazançlı anten dizisinin hem faz kontrolü hem uygulama kolaylığı açısından optimize edilmesini hedeflemektedir. Bu bağlamda, antenin, yüksek kazanç, patern yönlendirme kapasitesi, düşük profil ve entegre sistemlere uygunluk gibi kriterler açısından mevcut çalışmalardan üstün hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışma kapsamında, faz kaydırma tekniği kullanılarak farklı yönler ($+4^\circ$, 0° , -4°) patern yönlendirme yeteneğine sahip, yeniden yapılandırılabilir 1×8 doğrusal mikroşerit yama anten dizisi tasarlanmıştır. Bu yöntemde, her bir anten elemanına uygulanan besleme hattı uzunluğu belirli oranlarda artırılmış, böylece faz farkı oluşturularak istenilen yönlendirme gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, besleme yapısına entegre edilen anahtarlama elemanları sayesinde, patern yönü elektronik olarak kontrol edilebilmiş ve mekanik yapılandırmaya gerek kalmadan farklı yönler ışına yapılması sağlanabilmektedir. Böylece, anten dinamik yönlendirme ile farklı kapsama alanlarına uyum sağlayabilmektedir.

Bu bölümde, öncelikle antenlerin tanımı ve çalışma prensipleri genel hatlarıyla açıklanmaktadır. Ardından, anten performansını etkileyen temel parametreler, kazanç, yönlülük, bant genişliği, empedans uyumu ve geri dönüş kaybı gibi kavramlar detaylı şekilde ele alınmaktadır. Ayrıca, günümüzde hızla gelişen iletişim teknolojilerinden biri olan 5G teknolojisinin temel özellikleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmektedir. Son olarak, 5G'nin düşük bant spektrumu kapsamında yer alan ve özellikle geniş kapsama alanı ve yüksek penetrasyon avantajları ile öne çıkan n28 frekans bandının teknik özellikleri, kullanım alanları ve global önemi ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

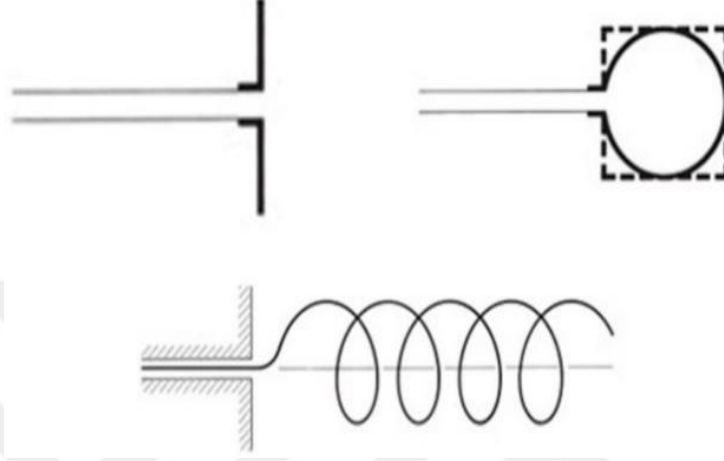
1.2. Anten

Anten, elektromanyetik dalgaların yayılımı veya alımı amacıyla kullanılan metalik bir yapı olup, genellikle çubuk veya tel formunda tasarlanabilmektedir. Anten, elektriksel sinyalleri elektromanyetik dalgalara dönüştüren veya elektromanyetik dalgaları elektriksel sinyallere çeviren bir elemandır. Hem alıcı hem de verici görevi gören antenler, gelişmiş kablolu sistemlerde enerjiyi belirli yönlerde yoğunlaştırmak için kullanılmaktadır. Antenin şekli, kullanım amacına göre değişebilir ve bir tel, açıklık, mikroşerit, dizi, yansıtıcı veya lens gibi çeşitli biçimlerde olabilir. Aşağıda, bazı anten türlerine genel bir bakış sunulmaktadır (Balanis, 2016; Reddy & Panicker, 2019; Erdoğan, 1993).

1.2.1. Tel Antenler

Tel antenler, özellikle kişisel uygulamalarda, otomobiller, binalar, gemiler, uçaklar ve uzay araçları gibi çeşitli platformlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu antenler, dipol, monopul, halka ve helezon gibi farklı şekillerde tasarlanabilmektedir. Şekil 1'de bu anten

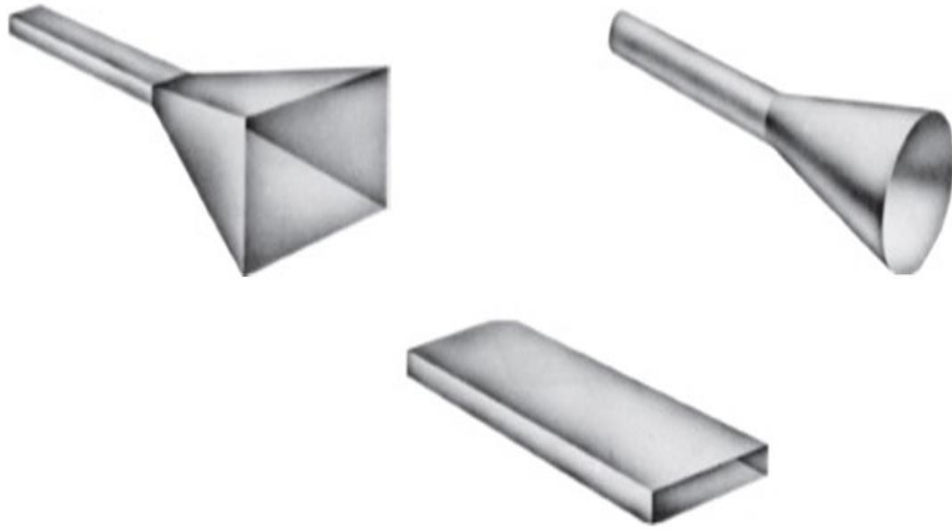
türlerinin bazı örneklerine yer verilmiştir. Her bir şekil, belirli uygulama ihtiyaçlarına ve iletişim gereksinimlerine göre avantajlar sunmaktadır. Basit yapıları ve geniş kullanım alanları sayesinde tel antenler, haberleşme sistemlerinde önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 1. Farklı tel antenler (Balanis, 2016)

1.2.2. Açıklık Antenler

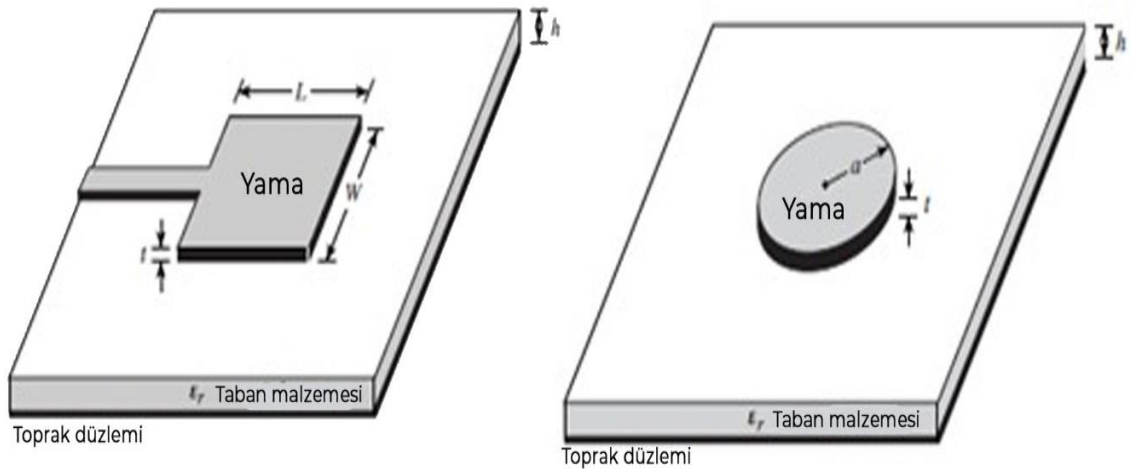
Açıklık antenler, yüksek frekanslı uygulamalara duyulan gereksinim ve gelişmiş anten tasarımlarına olan ihtiyaç doğrultusunda, günümüzde geçmişe kıyasla daha yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu antenler, özellikle uçak ve uzay aracı gibi uygulamalarda büyük avantajlar sunmaktadır. Bu tür antenlerin yüzeylere entegre edilebilme özelliği, aerodinamik yapının korunmasını sağlamakta ve alanın verimli kullanımına imkan tanıyarak iletişim performansını artırmaktadır. Şekil 2’de bazı anten çeşitlerin verilmiştir.



Şekil 2. Açıklık anten yapıları (Balanis, 2016)

1.2.3. Mikroşerit Antenler

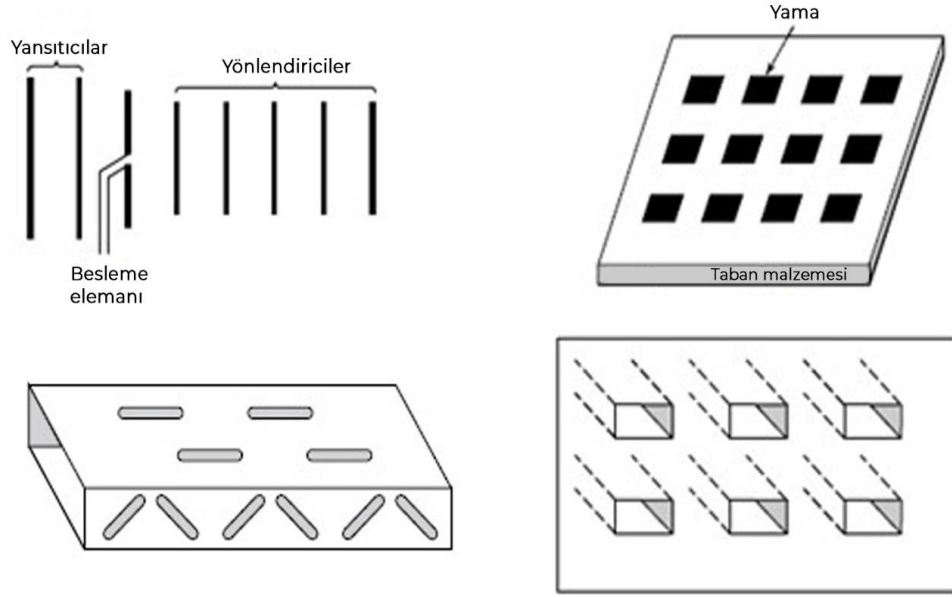
Mikroşerit antenler, 1970’lerde uzay teknolojilerinde kullanılmaya başlanmış olup, günümüzde ticari ve devlet uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu antenler, genellikle bir yalıtkan alt tabaka üzerinde yer alan metalik bir yama ile tasarlanır ve genellikle dikdörtgen veya dairesel şekillerde üretilir. Mikroşerit antenlerin; üretim kolaylığı, düşük profil tasarımı, dayanıklı yapıları ve yönlülük özellikleri gibi avantajları bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, yüksek performanslı araçlar, uydular, mobil cihazlar ve diğer çeşitli yüzeylere entegre edilebilirler. Geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan mikroşerit antenler, modern iletişim sistemlerinde önemli bir yere sahiptir. Şekil 3’te bazı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Mikroşerit antenler (Balanis, 2016)

1.2.4. Dizi Antenler

Bazı uygulamalar, tek bir elemanla elde edilemeyecek radyasyon özelliklerini bir dizi eleman kullanarak gerçekleştirebilir. Bu tür yapıların başında mikroşerit yama dizileri, Yagi-Uda anteni, açıklık dizileri ve yarıklı dalga kılavuzu dizileri gibi antenler yer almaktadır. Dizi antenler, genellikle yüksek kazanç gerektiren uygulamalarda tercih edilmekte olup, aynı zamanda yönlendirilebilir radyasyon deseni gibi ek avantajlar sunmaktadır. Şekil 4'te bazı dizi anten çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 4. Dizi antenler (Balanis, 2016)

1.2.5. Yansıtıcı Antenler

Uzay keşiflerinin başarısı, anten teorisinin gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Uzun mesafelerde iletişim sağlamak amacıyla, sinyallerin milyonlarca mil mesafeyi kat ederek iletilmesi ve alınması için yüksek kazançlı antenlerin kullanılması gerekliliği doğmuştur. Bu tür uygulamalar için en yaygın tercih edilen anten türlerinden biri parabolik yansıtıcıdır. Büyük boyutları, yüksek kazanç sağlamak için zorunludur. Bununla birlikte, parabolik yansıtıcılar kadar yaygın olmasa da köşe yansıtıcıları da benzer yüksek kazanç gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaktadır. Yansıtıcı antenler, özellikle radyo astronomisi, mikrodalga iletişimi ve uydu takibi gibi yüksek kazanç gerektiren uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır.

1.2.6. Lens Antenler

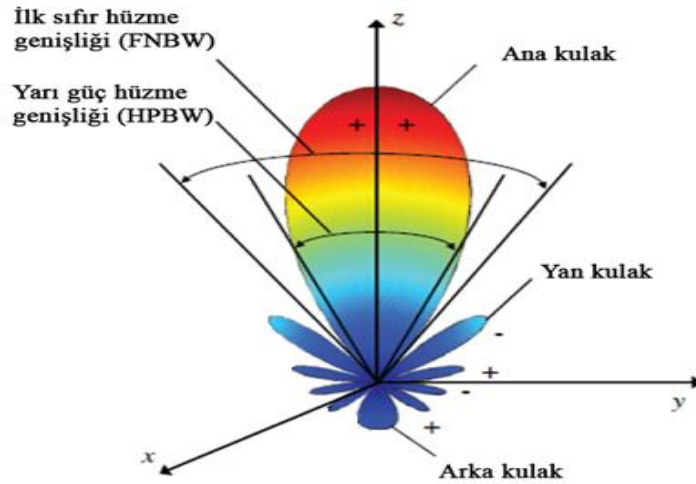
Lens antenler, dağılmış enerjiyi paralel hale getirerek istenmeyen yayılmayı engellemektedir. Yüksek frekanslı uygulamalarda, parabolik yansıtıcılarla benzer işlevler görmesine rağmen, düşük frekanslarda büyük ve ağır olmaları nedeniyle kullanımda zorluklar yaşanabilir. Ayrıca, lens antenler malzeme özellikleri veya şekillerine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar arasında konveks-düz, konveks-konveks, konveks-konkav ve konkav-düz lensler yer almaktadır.

1.3. Anten Parametreleri

Herhangi bir antenin performansını değerlendirebilmek için çeşitli parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Işıma örüntüsü, yönlülük, kazanç, giriş empedansı, gerilim duran dalga oranı, geri dönüş kaybı ve S11, anten verimi, bant genişliği ve kutuplanma bunlardan bazılarıdır (Balanis, 2016; Stutzman & Thiele, 2012; Pozar, 2011).

1.3.1. Işıma Paterni

Antenin, belirli bir frekansta etrafına yaydığı elektromanyetik dalgaların uzaydaki dağılımı Şekil 5'te gösterilmiştir. Bu örüntü ya da patern, antenin enerji yayılımının hangi yönlerde yoğunlaştığını belirler. Antenlerin ışıma paternleri ana kulak, arka kulak ve yan kulaklar olmak üzere genel olarak üç ana bileşenden oluşur.



Şekil 5. Anten ışıma örüntüsü (Balanis, 2016)

Ana kulak, en yüksek güç yoğunluğuna ve en geniş ışıın açıklığına sahip olan en önemli kulaktır. Bu kulak, antenin maksimum enerji yaydığı yönü belirlediğinden, antenin yönlülüğünü tanımlayan temel unsurdur.

Daha küçük kulaklar, radyasyon örüntüsünün istenmeyen kısımlarını oluşturur ve bu bölgelerde yayılan enerji genellikle verimsiz bir şekilde harcanmaktadır [6]. Bu küçük kulaklar arasında yer alan yan kulaklar, ana kulak dışındaki en büyük kulaklar olup, anten performansını olumsuz etkileyebilecek parazitlere neden olabilmektedir. Arka kulak ise, ana kulağın tam zıt yönünde konumlanmaktadır.

1.3.2. Yönlülük

Yönlülük, antenin belirli bir yönde yayılan ışıınının, ortalama ışıınım yoğunluğuna oranıdır. Bu parametre, antenin enerjiyi belirli bir yönde ne derece yoğunlaştırdığını gösterir (Kraus & Marhefka, 2002). Yönlülük matematiksel olarak eşitlik (1.1)'de gösterilmektedir (Balains, 2016):

$$D = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (1.1)$$

D: Yönlülük

U_{max} : Maksimum ışıma şiddeti

P_{rad} : Antenden yayılan toplam ışıma gücü

1.3.3. Kazanç

Kazanç, bir antenin belirli bir yönde yaydığı gücün, ideal bir antenin (örneğin dipol anten) aynı yönde yaydığı güce oranıdır. Bu oran, antenin performansını değerlendirmek için kullanılır. Yüksek kazanç, antenin belirli bir yönde daha fazla enerji yaydığına işaret eder ve bu, özellikle uzun mesafelerde sinyalin daha verimli bir şekilde iletilmesi açısından önemlidir. Kazanç matematiksel olarak eşitlik (1.2)'de gösterilmektedir (Erdoğan, 1993):

$$G = \frac{4\pi U_{max}}{P_{in}} \quad (1.2)$$

G: Kazanç

P_{in} : Antene verilen giriş gücü

1.3.4. Giriş Empedansı

Antenin girişindeki empedans, antenin elektriksel davranışını belirler ve doğru güç iletimi sağlamak için iletim hattı ile uyumlu olmalıdır. Antenin giriş empedansı, giriş iletim hattının empedansı ile uyumlu olmadığında, giriş gücü geri yansımakta ve bu da verimsi bir iletişime neden olmaktadır (Balanis, 2016; Stutzman & Thiele, 2012; Kraus & Marhefka, 2002).

1.3.5. Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)

VSWR, anten ile iletim hattı arasındaki empedans uyumsuzluğunun bir göstergesidir. Bu değer, iletim hattı üzerindeki en büyük gerilim (V_{max}) ile en küçük gerilimin (V_{min}) oranıdır. Düşük bir VSWR değeri, iyi bir empedans uyumunu ve dolayısıyla daha verimli enerji iletimini işaret eder. VSWR matematiksel olarak eşitlik (1.3)'de gösterilmektedir (Balanis, 2016):

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (1.3)$$

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1.4)$$

Γ : Yansıma katsayısı

Z_{in} : Anten giriş empedansı

Z_0 : iletim hattın empedansı

1.3.6. Geri Dönüş Kaybı ve S11

Geri dönüş kaybı (GDK), bir antenin girişine uygulanan gücün ne kadarının antene iletildiğini ve ne kadarının geri yansıldığını gösteren önemli bir parametredir. Bu kayıp, desibel (dB) cinsinden ifade edilir ve negatif bir değer olarak sunulur. Geri dönüş kaybının yüksek (daha negatif) olması, sistemdeki yansımanın az olduğunu ve dolayısıyla gücün

büyük bir kısmının antene iletildiğini gösterir. Geri dönüş kaybı aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Yazgan, 2015):

$$\text{GDK} = -20 \log|\Gamma| \quad (1.5)$$

Geri dönüş kaybı, genellikle saçılma parametrelerinden biri olan S11 üzerinden değerlendirilir. S11, birinci porttan gönderilen sinyalin yine aynı porta yansıyan kısmını temsil eder. Başka bir deyişle, antenin empedans uyumunun bir göstergesidir. S11 değeri -10 dB'nin altında olduğunda, bu durum genellikle kabul edilebilir bir uyum anlamına gelir ve antenin bu frekansta uyumlu şekilde çalıştığını gösterir.

Anten tasarımında S11 karakteristik eğrileri, hangi frekans aralıklarında antenin etkin olduğunu ve bant genişliğini belirlemek için kullanılır. Bu nedenle hem geri dönüş kaybı hem de S11, anten performans analizlerinde kritik öneme sahiptir.

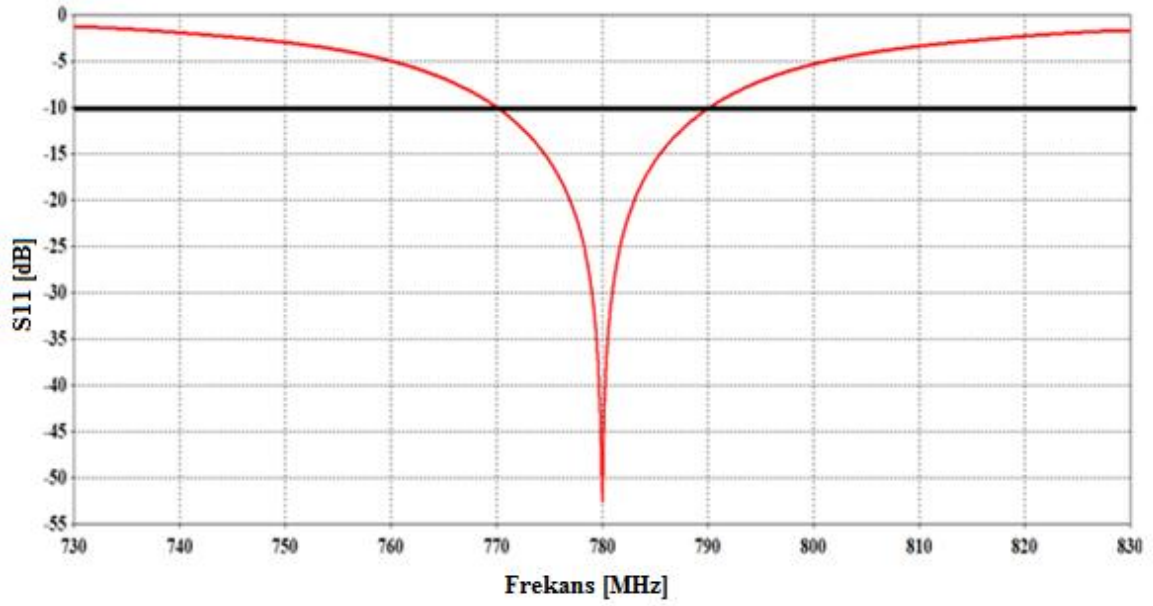
1.3.7. Anten Verimi

Anten verimi, antenin aldığı gücün ne kadarını etkin bir biçimde elektromanyetik enerjiye dönüştürdüğünü gösteren bir performans ölçütüdür. Yüksek verim, enerji kayıplarının düşük olduğunu ve dolayısıyla daha etkili bir performans sergilendiğini ifade etmektedir. Anten verimi, iletken-dielektrik verimi ile yansıma veriminin çarpımı olarak ifade edilebilir. Burada, e_{cd} iletkenlik-dielektrik verimini, e_r ise anten ile iletim hattı arasındaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan yansıma verimini temsil eder. Antenin toplam verimi e_0 aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Erdoğan, 1993):

$$e_0 = e_{cd}e_r = e_{cd}(1 - |\Gamma|) \quad (1.6)$$

1.3.8. Bant Genişliği

Bant genişliği, antenin etkili bir şekilde çalışabildiği frekans aralığını ifade eder. Genellikle bant genişliği, saçılma parametresi S11'in grafiği üzerinden kolaylıkla belirlenebilir; bu kapsamda, bant genişliği S11 değerinin -10 dB'nin altında olduğu frekans aralığı olarak tanımlanır. Şekil 6, bu koşulun yama anteni için 770–790 MHz arasında sağlandığını ve bu aralığın bant genişliği olarak kabul edildiğini göstermektedir.



Şekil 6. Yama antenin S11 değişimi

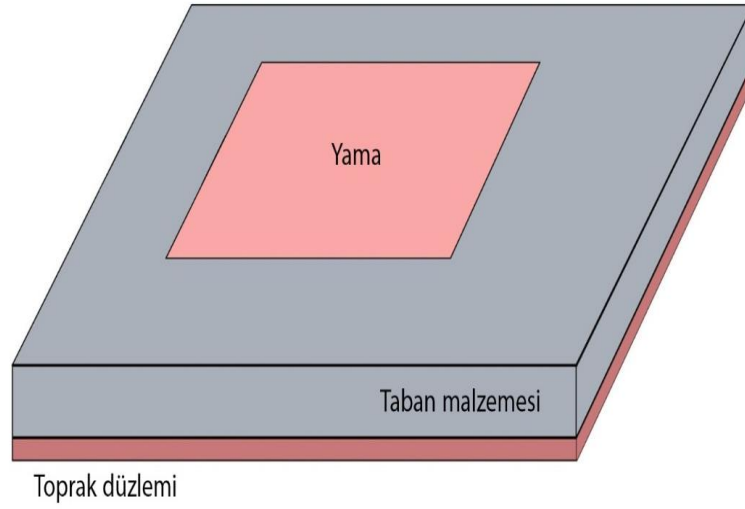
1.3.9. Kutuplanma

Anten kutuplanması ya da polarizasyonu, antenin elektromanyetik dalgaları maksimum doğrultuda yaydığı yönün kutuplanma biçimidir. Elektromanyetik dalga'nın kutuplanması, dalga'nın yayılımı sırasında elektrik alan vektörünün izlediği yön ile tanımlanır. Anten kutuplanması genel olarak doğrusal, dairesel ve eliptik olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Verici ve alıcı antenler arasında kutuplanma uyumu sağlanması, sağlıklı veri iletimi açısından büyük önem taşımaktadır. Kutuplanmalar arasında uyumsuzluk olması durumunda, bilgi iletimi mümkün olmayabilir ve bu durum 'kutuplanma uyuşmazlığı' olarak adlandırılmaktadır (Dolph, 1946; Yazgan, 2015).

1.4. Mikroşerit Yama Anten

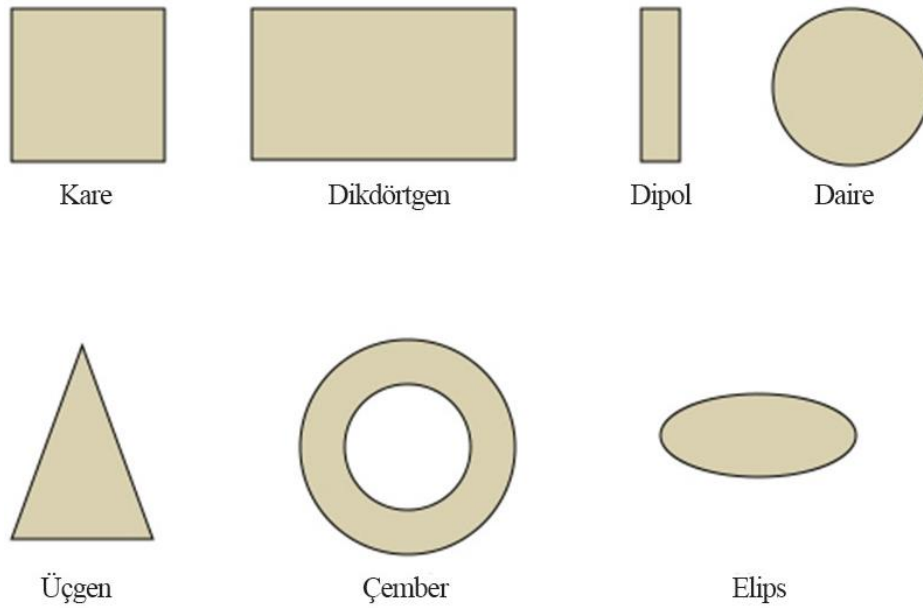
Mikroşerit yama antenler, büyük bir metal zemin düzlem üzerinde konumlandırılmış ince bir metalik yama yapısından oluşmaktadır. Bu yama, genellikle dielektrik tabaka olarak adlandırılan bir taban malzemesi tarafından desteklenmektedir. Yama, sıklıkla baskılı devre kartı teknolojisi kullanılarak dielektrik alt tabaka üzerine yerleştirilmektedir. Bu nedenle, mikroşerit yama antenler, bazen baskılı antenler olarak da tanımlanmaktadır.

Mikroşerit yama anteni Şekil 7'de gösterilmiştir, Genel olarak bu tür antenler dört ana bileşenden oluşmaktadır:



Şekil 7. Mikroşerit yama anten

1. Yama: Yamanın performansı, genellikle tasarım parametreleri olan boyut ve şekil gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Yama, kare, dikdörtgen, daire ve üçgen gibi çeşitli geometrik şekillerde tasarlanabilmekte olup, Şekil 8’de bazı örnekleri gösterilmektedir (Balanis, 2016). Bu şekiller, antenin istenilen performans özelliklerine göre seçilmekte ve optimize edilmektedir, böylece belirli uygulamalar için en uygun çözüm elde edilmektedir.



Şekil 8. Mikroşerit yama antenlerde kullanılan temel yama şekilleri

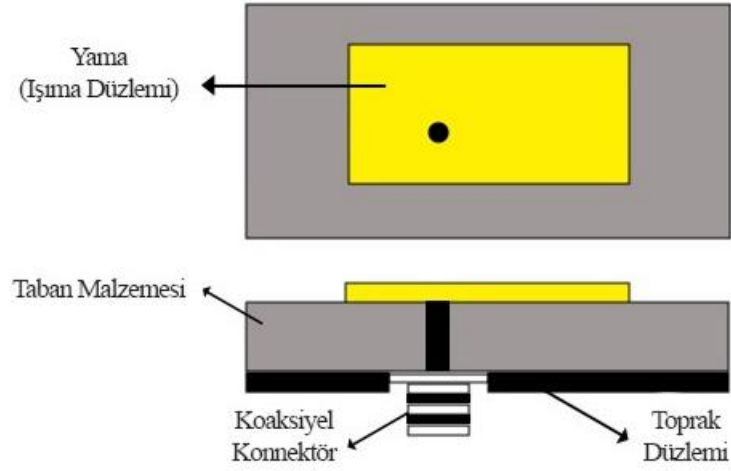
2. Taban Malzemesi: Yama ile toprak düzlemi arasında yer alan bu katman, genellikle düşük kayıplara sahip bir yalıtkan malzemeden oluşmakta olup, yamanın iletim özelliklerini ve yamanın boyutlarını doğrudan etkilemektedir.
3. Toprak Düzlemi: Antenin alt kısmında yer alan bu metalik tabaka, elektromanyetik dalgaların yansımalarını sağlamakta ve antenin performansını etkilemektedir.
4. Besleme Hattı: Bir besleme hattı, anteni doğrudan veya dolaylı temas yoluyla uyararak ışıma yapmasını sağlamaktadır. Besleme teknikleri çeşitli yöntemlere dayanmakta olup, en yaygın olarak kullanılan dört temel teknik: Mikroşerit hattı, Koaksiyel prob, açıklık bağlaşımı ve yakınlık bağlaşımı olarak sınıflandırmaktadır.

1.4.1. Mikroşerit Yama Antenlerin Besleme Yöntemleri

Mikroşerit yama antenlerin performansı ve verimliliği, kullanılan besleme yöntemi ile doğrudan ilişkilidir. Antenin uygun şekilde uyarılması için farklı besleme teknikleri geliştirilmiş olup, her bir yöntemin kendine özgü avantajları ve uygulama alanları bulunmaktadır. Bu bölümde, mikroşerit yama antenlerin yaygın olarak tercih edilen besleme teknikleri detaylı olarak incelenecektir. En yaygın olarak kullanılan dört temel teknik şunlardır (Singh & Tripathi, 2011):

Koaksiyel prob:

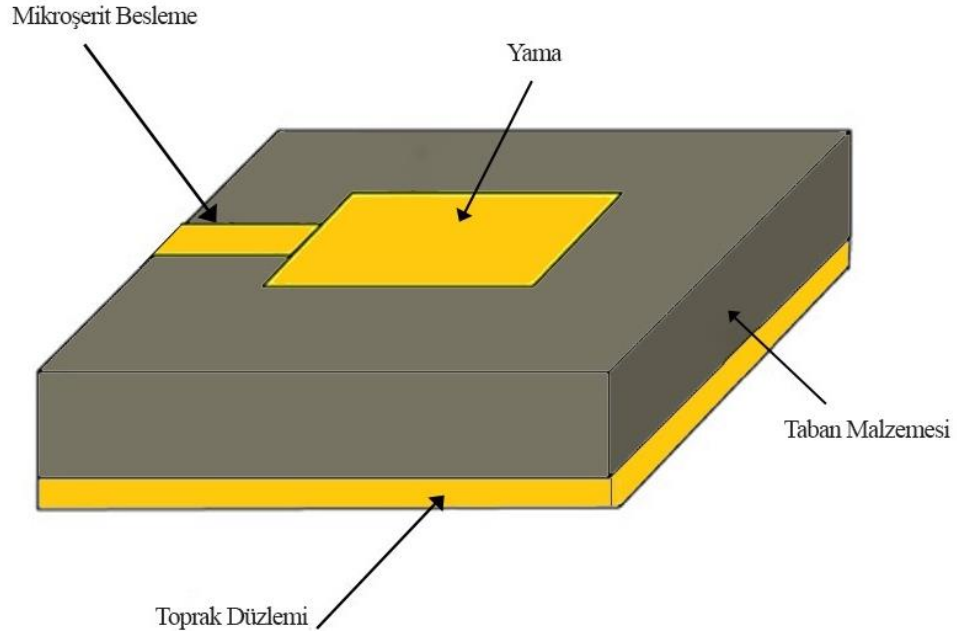
Koaksiyel prob beslemesi, koaksiyel kablunun iç iletkeninin doğrudan antenin radyasyon yapan yamasına, dış iletkeninin ise toprak düzlemine bağlandığı bir besleme yöntemidir. Şekil 9’da koaksiyel beslemeli yama anten gösterilmektedir.



Şekil 9. Koaksiyel besleme

Mikroşerit hattı:

Mikroşerit hat beslemesi, üretim kolaylığı ve entegrasyona uygun yapısı sayesinde sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, yamaya doğrudan bağlanan iletken bir şerit kullanılır ve bu yapı, yamanın bir uzantısı olarak değerlendirilebilir. Şekil 10’da mikroşerit beslemeli yama anten gösterilmektedir.



Şekil 10. Mikroşerit besleme

Açıklık bağlaşım:

Açıklık bağlaşım (aperture coupled) besleme yöntemi, elektromanyetik bağlaşım prensibine dayalı olarak tasarlanmıştır. Bu yöntemde, iki farklı dielektrik alt tabaka ve arada yer alan bir toprak düzlemi kullanılır. Alt tabakanın alt yüzeyinde yer alan mikroşerit hat, toprak düzleminde açılan bir yarık aracılığıyla üst tabakadaki yama antene enerji iletir.

Yakınlık bağlaşım:

Bu yöntem, mikroşerit bir iletkenin doğrudan yamanın altına yerleştirildiği ve iki eleman arasında elektromanyetik bağlaşım yoluyla enerji transferinin sağlandığı bir besleme mekanizmasıdır. Bu yapı genellikle iki dielektrik alt tabakadan oluşur. Alt tabakada mikroşerit besleme hattı yer alırken, üst tabakada ise yama anten bulunur. Her iki alt tabaka arasında doğrudan bir iletken bağlantı yoktur; enerji iletimi tamamen elektromanyetik alanların bağlaşımıyla gerçekleşir.

Bu besleme teknikleri, anten tasarımında kullanılan farklı yöntemler olup, her biri belirli uygulamalara ve performans gereksinimlerine göre tercih edilebilir (Ramesh vd., 2001).

1.4.2. Mikroşerit Yama Antenlerin Avantajları ve Dezavantajları

Mikroşerit yama antenler, sahip oldukları yapısal ve işlevsel özellikler sayesinde çeşitli haberleşme sistemlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle modern sistemlerle uyumlu çalışabilmeleri, bu anten tipini öne çıkaran önemli bir faktör olmuştur. Ancak her teknolojik bileşende olduğu gibi, mikroşerit antenlerin de beraberinde getirdiği bazı avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır (Reddy & Panicker, 2019).

Mikroşerit yama antenlerin avantajları:

1. Küçük ve hafif
2. Düşük profil
3. Düz veya pürüzlü yüzeylere uyumluluk
4. Düşük maliyet
5. Kolay üretim
6. Dual veya çoklu band operasyon yetenekleri

Mikroşerit yama antenlerin dezavantajları:

1. Düşük verimlilik
2. Dar bant genişliği
3. Düşük RF gücü

1.4.3. Mikroşerit Yama Antenlerin Kullanım Alanları

Bu antenler, birçok farklı alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanıldığı bazı uygulamalar aşağıda sıralanmıştır (Singh & Tripathi, 2011):

1. Mobil ve uydu iletişim uygulaması
2. Küresel konumlandırma sistemi uygulamaları
3. Radyo Frekansı Tanımlama (RFID)
4. Radar uygulaması
5. Tıbbi uygulamaları

1.5. Dizi Antenler

Birçok uygulamada, tek antenler belirli özellikleri veya belirli bir radyasyon modelini sağlamakta yetersiz kalabilir. Özellikle uzun mesafeli iletişim gibi uygulamalarda, antenin yüksek kazanç sağlaması gerekebilir. Yüksek kazanç çeşitli yöntemlerle elde edilebilse de en yaygın yöntemlerden biri dizi anten kullanımıdır (Balanis, 2016).

Dizi anten, birden fazla anten elemanının belirli bir düzen içinde fiziksel olarak yerleştirildiği ve her bir elemanın birbirine belirli bir mesafeyle yerleştirildiği bir yapıdır. Bu anten yapısı genellikle doğrusal ya da düzlem şeklinde tasarlanır. Anten elemanlarının yerleşim düzeni, antenin performansını, kazancını ve yönlülüğünü etkileyen önemli bir faktördür.

1.5.1. Dizi Antenlerin Kullanım Alanları ve Türleri

Dizi antenler, birden fazla anten elemanının birlikte çalışmasıyla yüksek kazanç ve yönlülük sağlayan yapılardır. Bu özellikleri sayesinde, aşağıda belirtilen çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Reddy & Panicker, 2019).

1. Yüksek kazançlı anten gerektiren uygulamalar

2. Kontrol edilebilir bir radyasyon düzenine sahip antenlerin gerekli olduğu uygulamalar (radar sistemleri, uydu iletişimi, hava trafik kontrolü, savunma sistemleri ve 5G haberleşme altyapıları)

Yapısal özelliklerine ve çalışma prensiplerine göre dizi antenler çeşitli türlere ayrılmaktadır. Bunlar arasında (Balanis, 2016; Reddy & Panicker, 2019):

1. Yagi-Uda anteni
2. Mikroşerit yama dizisi anteni
3. Açıklık dizisi anteni
4. Yarıklı dalga kılavuzu dizisi anteni yer almaktadır.

Her bir anten türü, kullanım amacı ve sistem gereksinimlerine bağlı olarak farklı avantajlar sunmakta olup, ilgili uygulama alanına göre en uygun yapı tercih edilmektedir.

1.5.2. Mikroşerit Yama Anten Dizileri

Mikroşerit yama anten dizileri, birden fazla yama anten elemanının belirli bir düzen içinde yerleştirilmesiyle oluşturulan yapılar olup, tekil antenlerin yetersiz kaldığı durumlarda daha yüksek kazanç ve yönlendirme kabiliyeti gibi gelişmiş performans gereksinimlerini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Daha sonra geliştirilen besleme ağları sayesinde kazanç artırımı ve hüzme kontrolü gibi ileri düzey özellikler sağlanabilmektedir (Balanis, 2016; Hamieh, 2012).

1.5.3. Anten Dizi Faktörü

Dizi faktörü, elemanların kendi anten özelliklerinden bağımsız olarak anten dizisinin yönlü davranışını belirleyen matematiksel bir ifadedir. Bu ilişki, aşağıda verilen denklemle gösterilmektedir.

$$E(\text{Toplam}) = E(\text{referans noktasında tek eleman}) \times \text{dizi faktörü} \quad (1.7)$$

Tek boyutlu anten dizi faktörü AF, denklem 1.8 ile hesaplanmaktadır (Balanis, 2016).

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (1.8)$$

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \quad (1.9)$$

β : Elemanlar arasındaki faz farkı

d : Elemanlar arasındaki mesafe

k : Faz sabiti

θ : Anten dizisi ana kulak açısı

1.5.4. Mikroşerit Yama Anten Dizilerinde Besleme Yöntemleri

Mikroşerit yama anten dizilerinde sinyalin anten elemanlarına iletilme biçimi, sistem performansını belirleyen kritik bir faktördür. Bu kapsamda en yaygın olarak kullanılan iki temel besleme yöntemi; seri besleme ve paralel (toplu) besleme olarak sınıflandırılmaktadır (Balanis, 2016; Satılmış & Güneş, 2018).

1. Seri besleme: Sinyal, bir anten elemanından diğerine sırasıyla iletilir. Yapısı basit ve maliyeti düşüktür. Ancak, eleman sayısı arttıkça sinyal kaybı yaşanabilir.
2. Toplu besleme: Tüm anten elemanları aynı anda, merkezi bir noktadan sinyal alır. Daha dengeli bir performans sağlar fakat tasarımı daha karmaşıktır.

Her yöntemin avantajları ve sınırlamaları vardır. Uygulama amacına göre uygun yöntem tercih edilmelidir.

1.6. Anten Yeniden Yapılandırma Yöntemleri

Bu bölümde, antenlerin veya mikrodalga elemanlarının yeniden yapılandırılmasına yönelik önerilen bazı yöntemler incelenecektir.

1.6.1. Elektronik Yeniden Yapılandırma

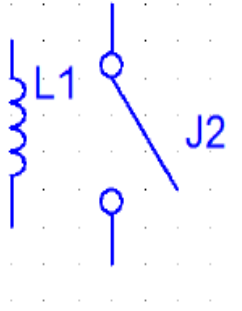
Yeniden yapılandırılabilir anten sistemlerinde en uygun maliyetli çözüm yöntemlerinden biri PIN diyotların kullanılmasıdır. Özellikle düşük akım değerleriyle yüksek frekanslı sinyallerin anahtarlamasına imkan tanıyan farklı firmaların ürettiği diyotlar, bu amaç için oldukça uygundur. Şekil 11’de, söz konusu PIN diyodun fiziksel paketleme yapısı şekilde sunulmuştur.



Şekil 11. PIN diyodun fiziksel paketleme yapısı

1.6.2. Elektromekanik Yeniden Yapılandırma

Elektromekanik yöntemle antenin yeniden yapılandırılabilmesi için, milimetrik boyutlara sahip röle sistemlerinin doğrudan anten yapısına entegre edilmesi gerekmektedir. Ancak mevcut rölelerin boyutsal ve yapısal sınırlamaları nedeniyle, optik ya da PIN diyot tabanlı sistemlerin bu tür uygulamalarda daha verimli ve etkili çözümler sunduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, sinyal kontrolü amacıyla geliştirilen minyatür röleler kullanılarak, hızlı geçiş gerektirmeyen sinyallerin anahtarlanması mümkündür. Ancak, bu bileşenlerin sınırlı ömürleri, mekanik yüzeylerdeki aşınma ve kirlenme gibi dezavantajları, tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörler arasında yer almaktadır. Elektromekanik anahtarların eşdeğer devre modeli Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Elektromekanik anahtar eşdeğeri

1.6.3. Optik Yeniden Yapılandırma

Optik yeniden yapılandırma yöntemlerinde, yarı iletken malzemeler uygun dalga boyundaki ışık ile aydınlatıldığında, fotonlar tarafından oluşturulan enerji sayesinde elektron-delik çiftleri meydana gelir. Bu süreç sonucunda, yarı iletkenin elektriksel iletkenliği artış gösterir (Sze & Kwok, 2006).

1.7. 5G Teknolojisi

5G (Beşinci Nesil Mobil İletişim), mobil iletişim teknolojisinin en son evrimidir ve önceki nesillere göre çok daha hızlı, daha güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim sunmaktadır. 5G, yalnızca cep telefonlarında veri iletimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda nesnelerin interneti (IoT), otonom araçlar, akıllı şehirler ve sanayi 4.0 gibi bir dizi yeni uygulama ve teknolojinin temelini oluşturmaktadır.

5G Temel Özellikleri:

1. Yüksek veri hızı: kullanıcıların daha hızlı internet bağlantısı ve daha verimli veri iletimi deneyimlemelerini sağlar. Bu teknoloji, saniyede gigabitler düzeyinde veri hızlarına ulaşabilmektedir. Bu hız, video akışı, sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) gibi uygulamalar için kritik önem taşır.
2. Düşük gecikme süresi: 5G, daha düşük gecikme süreleri sunar; bu da sinyallerin ağ üzerinden daha hızlı iletilmesi anlamına gelir. Gecikme süresi 1 milisaniyeye kadar düşürülebilir, bu da özellikle gerçek zamanlı uygulamalar (örneğin otonom araçlar, uzaktan cerrahi operasyonlar) için büyük bir avantaj sağlar.

3. Yüksek bağlantı yoğunluğu: 5G, aynı anda çok daha fazla cihazı ağı bağlama kapasitesine sahiptir. Bu özellik, IoT cihazlarının yoğun bir şekilde kullanılacağı akıllı şehirler ve endüstriyel uygulamalar için çok önemlidir.

1.7.1. n 28 Frekans Bandı

n28 frekans bandı, 5G'nin düşük bant spektrumu kapsamında yer almakta olup, aşağıdaki frekans aralıklarında çalışmaktadır:

Uplink :703–748 MHz

Downlink:758–803 MHz (yaklaşık 780 MHz merkez frekansındadır)

n28 bandı, özellikle kırsal bölgelerde, iç mekanlarda ve sinyal penetrasyonunun kritik olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Bu bant, LTE teknolojisi ile geriye dönük uyumluluğu sayesinde, mevcut altyapı üzerinden 5G hizmetlerinin hızlı ve maliyet etkin bir şekilde sunulmasına olanak tanımaktadır. n28 frekans bandı, Avrupa, Asya ve Afrika başta olmak üzere birçok bölgede aktif olarak kullanılmakta ve 5G hizmetlerinin yaygınlaştırılmasında önemli rol oynamaktadır. Bazı avantajları ve kullanım alanları aşağıda listelenmiştir:

1. Düşük frekanslı sinyaller, binaların içinden geçişte ve uzun mesafeli iletişimde yüksek verimlilik sağlar.
2. Geniş kapsama alanı sunar ve daha az sayıda baz istasyonu ile daha fazla bölgeye hizmet verilebilmesini mümkün kılar.
3. İç mekan kapsamı açısından yüksek performans gösterir; düşük frekansların duvar, zemin ve diğer fiziksel engelleri aşma kabiliyeti daha yüksektir.
4. Enerji verimli haberleşme yetenekleri sayesinde, 5G tabanlı IoT uygulamaları için uygundur.
5. Kırsal ve banliyö alanlar: Daha geniş alanlara daha az altyapı ile hizmet verilebilmesi açısından avantaj sağlar.
6. İç mekan çözümleri: Ofisler, alışveriş merkezleri ve ev içi kapsamada sinyal kalitesini artırır.
7. IoT uygulamaları: Düşük bant genişliği ve düşük güç tüketimi gerektiren sensör ağları ve akıllı cihaz sistemleri için idealdir.

1.7.2. 780 MHz Frekansının Seçilme Gerekçesi

Bu çalışmada antenin merkez frekansı olarak 780 MHz seçilmiştir. Bu seçim, 5G mobil haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan n28 bandı ile doğrudan ilişkilidir. n28 bandı, özellikle 758 MHz ile 803 MHz frekans aralığını kapsamakta olup, 5G ağlarında geniş kapsama alanı ve yüksek iç mekân penetrasyonu avantajları sayesinde tercih edilmektedir. 780 MHz merkez frekansı, bu bant aralığının tam ortasında yer almakta ve antenin, downlink taraflarında optimum performans göstermesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu frekans aralığı düşük frekanslı olduğundan, dalga boyu daha uzundur; bu da sinyallerin engel aşma yeteneğini artırarak, kırsal ve yapı yoğunluğu yüksek bölgelerde daha kararlı bağlantı imkanı sunar. Bu doğrultuda, 5G baz istasyonlarında etkin kullanımın sağlanması ve geniş kapsama alanı amacıyla n28 bandının downlink kısmı için, 780 MHz merkez frekansı, tercih edilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, anten tasarımı ve analizi, dünya literatüründe elektromanyetik tasarımlar için yaygın olarak kullanılan profesyonel bir simülasyon yazılımı olan CST Studio Suite kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CST yazılımı, anten tasarım sürecinin her aşamasında son derece hassas sonuçlar sunabilen gelişmiş simülasyon yeteneklerine sahip olup, antenin karmaşık dizi yapılarında da deneysel sonuçlara oldukça yakın değerler üretmektedir.

Çalışmada paterni yeniden yapılandırılabilen bir dizi anten, iki farklı teknik ile tasarlanmıştır. Bu iki tasarımda, besleme için farklı yöntemler kullanmıştır. İlk yöntemde, besleme ağı, bir dielektrik alt tabaka (Rogers) üzerine yerleştirilen mikroşerit hatlar ile gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntemde ise, yedi adet 2x1 güç bölücü tasarlanmış ve koaksiyel besleme yöntemi uygulanmıştır. İkinci yöntemde üç adet geleneksel ve dört adet geliştirilmiş güç bölücü kullanılmıştır.

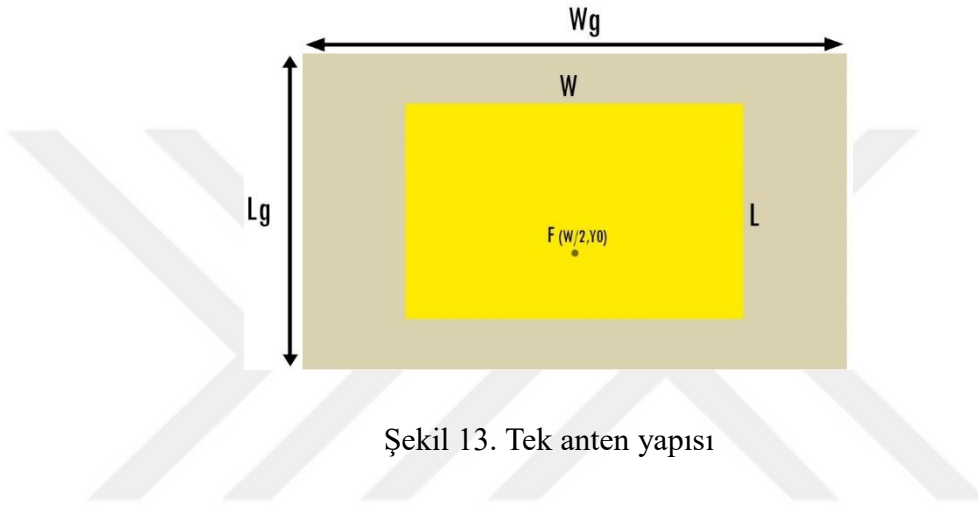
Tasarım sürecinin ilk aşamasında, tek anten elemanının boyutları hesaplanmış ve gerekli yapısal parametreler belirlenmiştir. Bu temel verilere dayalı olarak, ikinci aşamada 1x8 doğrusal dizi antenin tasarımı için gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Tasarımın son aşamasında ise, yeniden yapılandırılabilir anten dizisi için düzenlemeler ve eklemeler gerçekleştirilmiştir.

Tasarım tamamlandıktan sonra, oluşturulan anten modeli CST ortamında simüle edilmiş ve performans analizi yapılmıştır. Bu analiz, antenin kazancı, bant genişliği, S11 ve radyasyon paterni gibi temel performans parametrelerini detaylı bir şekilde incelemeyi içermektedir. Elde edilen veriler, tasarımın verimliliğini değerlendirmek ve olası iyileştirme alanlarını belirlemek için kullanılmıştır.

Ayrıca, CST yazılımında gelişmiş bir güç bölücüsü tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen güç bölücünün performansı da detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tek bir anten tasarımında, frekansı (f), alt tabaka dielektrik sabiti (ϵ_r) ve alt tabaka kalınlığı (h_s) gibi bir dizi önemli parametre belirlenmiştir. Bu parametreler, antenin verimliliğini ve genel performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu parametrelerin seçimi, hedef uygulama ve istenen çalışma frekans bandına göre belirlenmiştir. Antenin geometrik yapısı Şekil 13'te gösterilmektedir. Seçilen parametreler aşağıda listelenmiştir.

1. Anten tasarımı yama için kullanılan dielektrik malzeme hava ($\epsilon_{r1} = 1$) tercih edilmiştir.
2. Anten tasarımı besleme hattı için kullanılan dielektrik malzeme olarak Rogers RO4003C ($\epsilon_{r2} = 3.55$) tercih edilmiştir.
3. Çalışma frekansı $f = 780$ MHz olarak belirlenmiştir.
4. Alt tabaka yüksekliği $h = 1.6$ mm olarak seçilmiştir.
5. Taban yüksekliği $h_s = 8,13$ mm olarak seçilmiştir.



Şekil 13. Tek anten yapısı

Aşağıda, anten tasarım sürecine ilişkin adımlar ve parametre hesaplamalarına dair detaylı açıklamalar sunulmuştur.

1. Yama boyutları (Balanis, 2016):

Genişlik (W):

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

Uzunluk (L):

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.3)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff}+0.3)(\frac{W}{h}+0.264)}{(\epsilon_{eff}-0.258)(\frac{W}{h}+0.8)} \quad (2.4)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.5)$$

2. Toprak düzleminin boyutlarının hesaplanması:

Uzunluk (L_g):

$$L_g = 120 + L \quad (2.6)$$

Genişlik (W_g):

$$W_g = 2 * W \quad (2.7)$$

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak, anten tasarımına yönelik gerekli parametreler hesaplanmıştır. Tablo 1, çalışmada kullanılan tek anten elemanına ait temel tasarım parametrelerini içermektedir. Bu parametreler, antenin fiziksel boyutları, kullanılan dielektrik malzeme ve çalışma frekansı gibi, anten performansını doğrudan etkileyen yapısal değişkenleri kapsamaktadır. Elde edilen bu veriler, antenin elektromanyetik davranışının doğru şekilde modellenebilmesi ve sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek dizi anten tasarımı için sağlam bir temel oluşturmuştur.

Tablo 1. Tek anten parametreleri

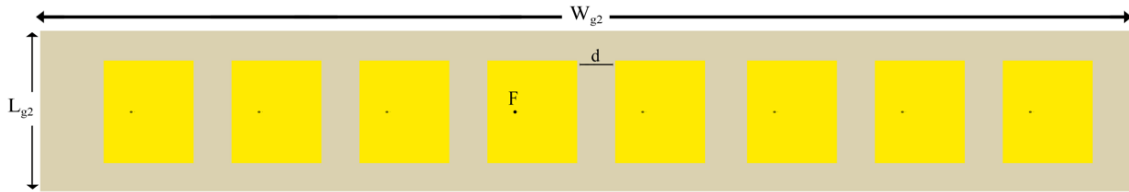
Parametre	Değer
f	780 MHz
ϵ_{r1}	1
ϵ_{r2}	3,55
h_s	8,13 mm
h	1,6 mm
L	180,8 mm
W	192,3 mm
L_g	300 mm
W_g	384,6 mm

Anten yapısı, Tablo 1’de sunulan veriler ve önceki bölümlerde elde edilen tasarım kriterleri temel alınarak oluşturulmuştur. Yama ile toprak düzlemi arasında anten dielektrik tabakası olarak hava boşluğu bulunmaktadır. Besleme yapısı ise Rogers-4003C yalıtkan malzemeden oluşan bir alt tabaka üzerine entegre edilmiş mikroşerit hat kullanılarak tasarlanmıştır. Anten yaması, koaksiyel pim şeklindeki probalar aracılığıyla alttaki mikroşerit hattın beslenmiştir. Mikroşerit hatlar ise toprak düzlemi üzerinden doğrudan tel yöntemiyle yamalara bağlanmıştır.

Tasarım dört temel bileşenden oluşmaktadır:

1. Yama: Antenin üst kısmında yer almaktadır.
2. Toprak düzlemi: Besleme hattını taşıyan tabakanın üst kısmında yer almakta olup yama için ortak bir referans düzlemi olarak görev yapmaktadır.
3. Besleme hattı: Mikroşerit hattını taşıyan alt tabaka üzerinde yer almaktadır.
4. Taban malzemesi: Yama ile Toprak düzlemi arasında hava dielektriği kullanılmıştır. Ayrıca, yamanın alt kısmında bulunan mikroşerit hattından enerji aktarımını sağlamak üzere dikey pim çubuğu kullanılmıştır.

Tasarım sürecinin ikinci aşamasında, Şekil 14’te gösterildiği üzere 1x8 boyutlarında doğrusal bir anten dizisi oluşturulmuştur. Bu aşamada, anten elemanları belirli bir doğrusal düzen içerisinde konumlandırılarak, hedeflenen yönlülük ve kazanç değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.



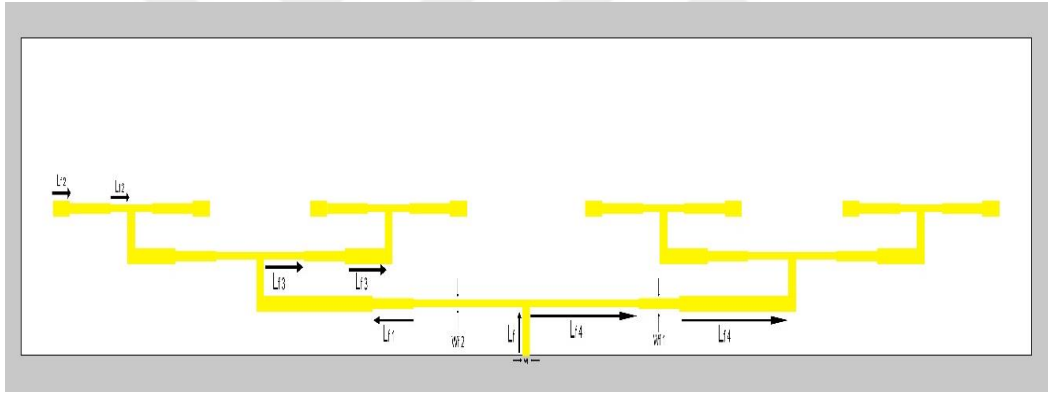
Şekil 14. 1x8 dizi anten yapısı

Dizi antenin beslenmesi için, mikroşerit hat temelli ortak (toplu) besleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yapı, Şekil 15’te şematik olarak sunulmakta olup, tüm anten elemanlarının tek bir besleme noktası üzerinden etkin şekilde uyarılmasını sağlamaktadır. Dizi anten besleme yapısı, T-bağlantılı bir besleme hattı aracılığıyla birbirine bağlanan iki ayrı parçadan oluşmaktadır. Dizinin besleme giriş hattı 50 Ω empedansa sahiptir. Besleme

hattı ile anten elemanları arasında iyi bir empedans uyumu sağlamak amacıyla, çıkış hatlarının empedansı 100Ω olarak tasarlanmıştır. Bu empedans uyumunu optimize etmek için, 100Ω çıkış hatları ile anten yamaları arasında çeyrek dalga dönüştürücü kullanılmıştır. Söz konusu çeyrek dalga empedans dönüştürücünün karakteristik empedansı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Mansour & Nugoolcharoenlap, 2020):

$$Z_1 = \sqrt{Z \times Z_2} \quad (2.8)$$

Burada Z_1 dönüştürücünün empedansıdır, Z ve Z_2 eşleştirilecek iki iletim hattının empedanslarıdır. Burada $Z = 50 \Omega$ ve $Z_2 = 100 \Omega$ olduğu durum için tasarımlar yapılmıştır. Besleme hatlarına ilişkin temel tasarım parametreleri ve bu parametre ait hesaplama detayları aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 15. 1x8 dizi anten için besleme yapısının şematik gösterimi

Besleme Hattının Genişliği (W_{f0} , W_{f1} and W_{f2}) (Pozar, 2011):

$$\frac{W_f}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2} & \frac{W_f}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right] & \frac{W_f}{h} > 2 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (2.10)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

Besleme Hattının Uzunluğu (L_{f1}) (Balanis, 2016):

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.12)$$

$$L_{f1} = \frac{\lambda_g}{4} \quad (2.13)$$

Önceki denklemler kullanılarak, besleme hatları için temel tasarım parametreleri hesaplanmıştır. Anten elemanları arasındaki d mesafesi belirlenmiştir. Tasarlanan 1x8 doğrusal dizi antene ait temel tasarım parametrelerini Tablo 2’de sunulmaktadır.

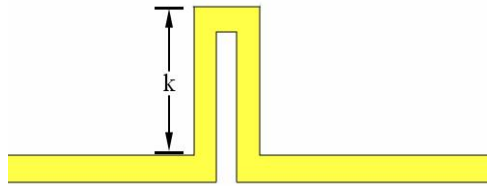
Tablo 2. 1x8 Dizi anten parametreleri

Parametre	Değer (mm)
L_f	40
L_{f1}	51,4
L_{f2}	69,6
L_{f3}	167,046
L_{f4}	359,36
W_f	1,784
W_{f1}	0,9
W_{f2}	0,4
F	($W/2, Y_0$)
d	$\lambda/2 = 192,3$
L_{g2}	240
W_{g2}	3076,80

Bu parametreler, elemanlar arası mesafe, besleme yapısı ve diğer yapısal özellikleri kapsamakta olup, antenin performansını doğrudan etkileyen kritik tasarım değişkenlerini içermektedir. Söz konusu veriler, antenin tasarım sürecinde temel referans olarak kullanılmıştır. Dizi anten tasarımı, yukarıda sunulan bilgiler ile birlikte Tablo 1 ve Tablo 2’de yer alan verilere dayanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tasarım sürecinin son aşamasında, yeniden yapılandırılabilir bir anten dizisi oluşturulmuştur. Kullanılan temel yeniden yapılandırma tekniği, her bir anten elemanının uyarma fazının, besleme hatlarının uzunluklarının ayarlanması yoluyla değiştirilmesine dayanmaktadır. Bu amaçla tasarlanan besleme ağı, dallanma noktalarının öncesine stratejik olarak entegre edilmiş kontrol anahtarlarına sahip, uzatılmış besleme hatlarından oluşmaktadır. Söz konusu anahtarlar, her bir besleme yolunun elektriksel uzunluğunu dinamik olarak değiştirerek anten elemanlarının fazlarını kontrol etme olanağı sunmaktadır. Böylece, antenin ışıma paterni gerçek zamanlı olarak yeniden yapılandırılabilir hale gelmekte, yönlülük ve tarama kapasitesi artırılmaktadır.

Yeniden yapılandırma işlemi, dizideki her bir anten elemanı için besleme hattı uzunluğunun kademeli olarak artırılması esasına dayanmaktadır. Bu amaçla gerekli olan besleme hattı uzunluğu artışı K ile ifade edilmekte olup, bu değer Denklem (2.14) kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen K değeri, her bir anten elemanına karşılık gelen ardışık tam sayılarla (1, 2, ..., N) çarpılarak her elemana özgü toplam besleme hattı uzunluğu belirlenmektedir. Burada N , dizideki toplam anten elemanı sayısını ifade etmektedir. Örneğin, Şekil 16'da gösterildiği üzere, birinci anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artışı $1 \times K = K$ olarak belirlenmiştir. İkinci eleman için bu artış $2 \times K$, üçüncü eleman için $3 \times K$ şeklinde devam etmektedir. Bu doğrultuda, n . anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artışı genel olarak $n \times K$ şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 16. İlk anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artışı

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ \cdot d \cdot \sin \theta_s}{\lambda} \quad (2.14)$$

$\Delta\varphi$: Ardışık iki ışıyım yapan eleman arasındaki faz farkı.

θ_s : Işıyım açısı.

d : Işıyım yapan elemanlar arasındaki boşluk.

Bu yöntemde hesaplanan besleme hattı uzunluğu farkları, bitişik anten elemanları arasında kontrollü bir faz kaymasına neden olur. Söz konusu faz kaymalarının kümülatif etkisi, anten dizisinin yönlü radyasyon örüntüsünü, herhangi bir mekanik hareket ya da harici faz kaydırıcı kullanmaksızın, istenilen yöne doğru elektronik olarak yönlendirmeyi mümkün kılar. Bu yaklaşım, ışın yönünün yüksek hassasiyetle kontrol edilmesini sağlayarak dizinin ışın oluşturma (beamforming) yeteneklerini önemli ölçüde geliştirir.

Tablo 3'te, 1×8 doğrusal anten dizisinin her bir elemanı için uygulanan besleme hattı uzunluğunun artış miktarları gösterilmektedir. Bu artışlar, anten elemanları arasında istenilen faz farklarının oluşturulmasını sağlamak amacıyla belirlenmiştir.

Tablo 3. Her anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artış miktarları (Mikroşerit hat beslemeli tasarım)

Parametre	Değer (mm)
K	8
K ₁	8
K ₂	16
K ₃	24
K ₄	32
K ₅	40
K ₆	48
K ₇	56
K ₈	64

Anahtar elemanlar, Şekil 17 ve 18'de gösterilen PIN diyotunun elektriksel davranışını temsil eden bir RLC devresi aracılığıyla modellenmiştir. Bu modelde, PIN diyotun iletken (açık) ve yalıtkan (kapalı) durumları farklı devre bileşenleriyle temsil edilmiştir. Açık durumda devre, bir endüktör (L) ile düşük değerli bir direnç (R) seri bağlanarak modellenmekteyken, kapalı durumda ise, endüktör (L) ile seri bağlı yüksek değerli bir direnç (R) ve bu bileşenlere paralel bağlanmış bir kapasitans (C) kullanılır.

Her iki çalışma durumunda da endüktans sabit tutulmuş olup $L = 0,6 \text{ nH}$ olarak belirlenmiştir. Açık konumda direnç değeri $R = 1,5 \Omega$, kapalı konumda ise $R = 5 \text{ k}\Omega$ olarak tanımlanmıştır. Kapalı durumdaki kapasitans değeri ise tipik olarak $C = 0,3 \text{ pF}$ olarak kabul edilmiştir.

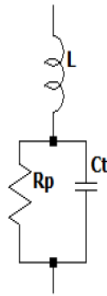
Bu modelleme yaklaşımı, PIN diyotunun iki farklı durumda gösterdiği elektriksel özelliklerin doğru ve sade bir biçimde temsil edilmesini sağlamaktadır. Açık durumda, düşük direnç ve endüktif karakter, sinyalin etkin şekilde iletilmesine olanak tanıyan yüksek

iletkenlikli bir yol sunmaktadır. Buna karşılık, kapalı durumda yüksek direnç ve kapasitif karakter, sinyal iletimini sınırlandırarak düşük iletkenlikli bir yapı oluşturmaktadır.

Bu tür bir davranış, RF ve mikrodalga uygulamalarında sinyallerin yönlendirilmesi ve kontrolü açısından kritik öneme sahiptir. PIN diyotun bu iki durum arasında hızlı ve güvenilir geçiş yapabilme yeteneği, yeniden yapılandırılabilir anten sistemlerinde ve çeşitli anahtarlama uygulamalarında etkin performans sağlamaktadır.

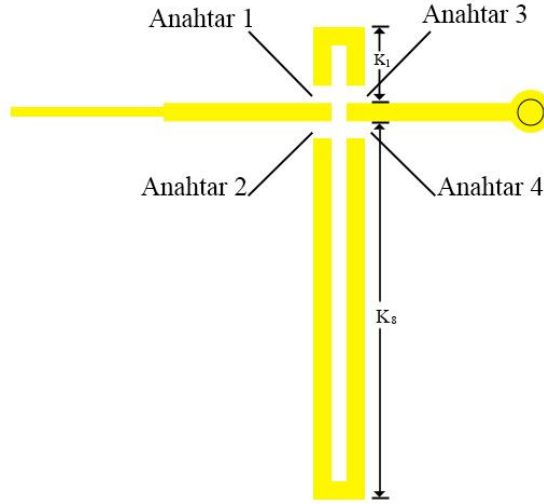


Şekil 17. PIN diyot eşdeğer devresi: Açık durum



Şekil 18. PIN diyot eşdeğer devresi: Kapalı durum.

Şekil 19, antenin besleme yapısındaki uzatılmış bölümlerin konumlarını ve anahtarların yerleşim düzenini örneklemektedir. Besleme hattı bu şekilde yapılandırılmış olup, sadece iletim hattı uzunluklarındaki artış miktarları değişkenlik göstermektedir. Bu tasarım, anten dizisinin yönünü yüksek hassasiyet ve hızla elektronik olarak ayarlayabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 19. Besleme hattındaki uzunluk artışları ve anahtar yerleşimlerine ilişkin örnek yapı

Çalışmada her bir anten elemanının önüne, iki farklı uzunluk artışı eklenmiştir: biri $+4^\circ$ ışın yönlendirmesi, diğeri ise -4° için tasarlanmıştır. Bu uzunluk farklarının kontrolü, besleme yapısında konumlandırılmış anahtarlar aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Yerleşim düzeni şu şekilde kurgulanmıştır: En sağdaki anten elemanının önüne iki uzunluk artışı (K_1 ve K_8) ve dört adet anahtar yerleştirilmiştir. Şekil 19’de bu durum gösterilmiştir. İkinci anten için de benzer şekilde K_2 ve K_7 numaralı uzunluk artışları ve dört anahtar kullanılmıştır. Aynı yerleşim mantığı tüm anten elemanları boyunca simetrik biçimde uygulanmıştır.

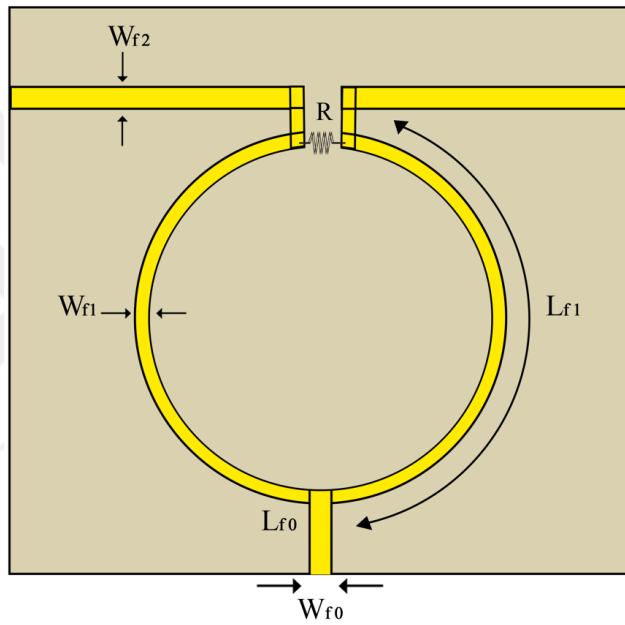
Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’te sunulan veriler ile önceki tasarım adımlarında elde edilen bilgiler doğrultusunda, Şekil 14’te gösterildiği üzere, $\pm 4^\circ$ ve 0° ışın yönlendirme açılarını sağlayabilen 1×8 yeniden yapılandırılabilir doğrusal anten dizisi tasarlanmıştır. Bu kapsamda, her bir anten elemanına ait besleme hattı uzunluğu belirli bir miktarda artırılmış ve ışın yönünün istenilen açıya yönlendirilebilmesi amacıyla, besleme hattı dallanma noktalarına yaklaşık 32 adet kontrol anahtarı entegre edilmiştir.

Bu yapılandırma, anten sisteminin paternin istenen yöne yüksek hassasiyetle odaklamasına olanak tanımaktadır. Radyasyon örüntüsüne yapılan bu hassas ayar, anten dizisinin genel yönlülüğünü ve patern yönlendirme doğruluğunu önemli ölçüde artırmakta ve aynı zamanda performansın da iyileştirilmesini sağlamaktadır.

Bu anten yapısının saha uygulamasına uygun hale getirilmesi amacıyla, mikroşerit besleme mekanizması, koaksiyel besleme yapısıyla değiştirilmiştir. Dizide yer alan her bir anten elemanının doğru ve eşit şekilde uyarılabilmesini sağlamak için, sistemde bir güç

bölücü (power divider) kullanılmıştır. Bu bileşen, giriş gücünü tüm ışıyan elemanlar arasında eşit şekilde dağıtarak, dizi antenin genel performansının tutarlı kalmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, dizinin besleme ağının temel yapı taşı olarak 2×1 yapıdaki güç bölücü tasarlanmış ve uygulanmıştır. Tasarlanan sistemde, üçü geleneksel (standart) ve dördü gelişmiş olmak üzere toplam yedi adet güç bölücü kullanılmıştır. Şekil 20, giriş sinyalinin bir sonraki aşamalara yönlendirilmeden önce iki eşit parçaya nasıl bölündüğünü gösteren geleneksel Wilkinson güç bölücünün şematik yapısını sunmaktadır.



Şekil 20. Standart 2×1 güç bölücü yapısı

Çalışmada kullanılan güç bölücünün boyutları, önceki bölümlerde verilen Denklemler 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 ve 2.13 esas alınarak hesaplanmıştır. Tablo 4, standart 2×1 güç bölücünün tasarımında kullanılan ve hesaplamalarla belirlenen temel fiziksel ve yapısal parametreleri göstermektedir. Bu parametreler arasında iletim hatlarının uzunluğu ve genişliği, dielektrik malzeme olarak kullanılan FR-4'ün dielektrik sabiti ve alt tabaka (substrate) yüksekliği yer almaktadır. Söz konusu veriler, güç bölücünün belirli bir frekans aralığında uygun empedans eşleşmesi ve verimli güç iletimi sağlayacak şekilde optimize edilmesi amacıyla dikkate alınmıştır. Bunun ardından, geliştirilmiş 2×1 güç bölücü tasarlanmıştır. Her bir anten elemanına uygulanan ek besleme hatlarının uzunlukları, Denklem (2.14) kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 5, 1×8 doğrusal anten dizisindeki her bir

elemana uygulanan besleme hattı uzunluklarındaki farkları ayrıntılı olarak göstermektedir. Bu uzunluk farkları, anten elemanları arasında gerekli faz farklarını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Hesaplanan bu ek uzunluklar, geliştirilen güç bölücülere entegre edilmiştir.

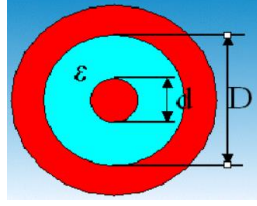
Tablo 4. Standart 2x1 güç bölücünün parametreleri

Parametre	Değer
ϵ_r	4,3
R	100 Ω
h_{sp}	1,6 mm
W_{f0}	3,1 mm
W_{f1}	1,7 mm
W_{f2}	3,1 mm
L_{f0}	20 mm
L_{f1}	47 mm

Tablo 5. Her anten elemanı için besleme hattı uzunluğu artış miktarları (Koaksiyel hat beslemeli tasarım)

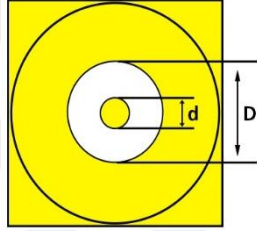
Parametre	Değer (mm)
K	7,4
K_1	7,4
K_2	14,8
K_3	22,2
K_4	29,6
K_5	37
K_6	44,4
K_7	51,8
K_8	59,2

Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulan verilere dayanarak dört adet geliştirilmiş 2×1 güç bölücü tasarlanmıştır. Bu tasarımlarda, besleme hattı uzunlukları artan şekilde yapılandırılmış ve radyasyon yönünün kontrol edilebilmesi amacıyla anahtar elemanlarla

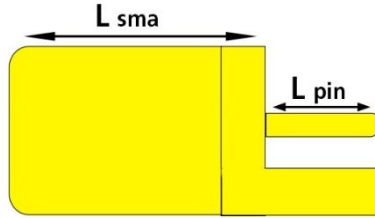


Şekil 22. Dizi anten için tasarlanan koaksiyel besleme yapısı

Güç bölücüsünün koaksiyel güç besleme hattına bağlantısı, standart bir SMA (SubMiniature version A) konnektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantı, düşük kayıplı iletim sağlaması açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 23 ve 24'te, bir SMA konnektörünün temel boyutları ve yapısal özellikleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 23. SMA Yapısı – Ön Görünüm



Şekil 24. SMA Yapısı – Yan Görünüm

Tablo 6'da koaksiyel besleme hattı ve SMA (SubMiniature version A) konnektörüne ait temel elektriksel ve fiziksel parametreler verilmiştir. Koaksiyel yapı için iletken çapı, dielektrik sabiti ve dış kılıf boyutları gibi kritik tasarım değişkenleri belirtilmiştir. SMA konnektörü için ise iç ve dış iletken çapları ve bağlantı boyutları gibi yüksek frekans uygulamalarında performansı doğrudan etkileyen parametreler verilmiştir. Bu değerler, hem güç iletimindeki kayıpların en aza indirilmesi hem de empedans uyumunun sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 6. Koaksiyel ve SMA Parametreleri

Parametre	Değer
ϵ	2,1
D	4 mm
d	1,2 mm
L_{pin}	4,7 mm
L_{SMA}	7,6 mm

Tablo 1, Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6’da sunulan veriler ile önceki tasarım adımlarında elde edilen bilgiler doğrultusunda, $\pm 4^\circ$ ve 0° ışın yönlendirme açılarını sağlayabilen yeniden yapılandırılabilir 1×8 doğrusal anten dizisi tasarlanmıştır.

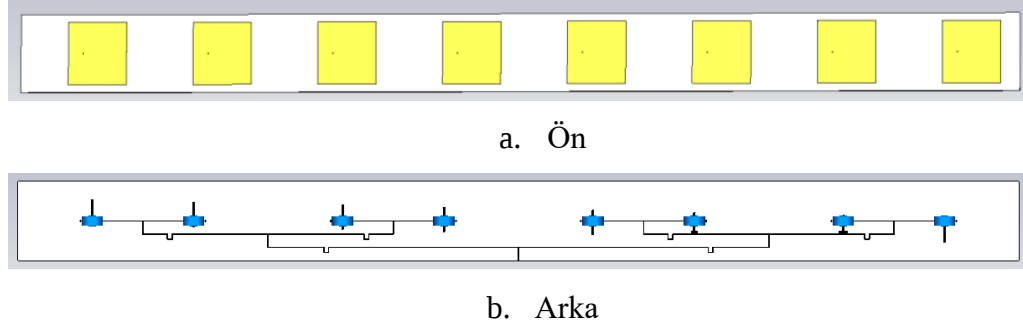
Özetle, yukarıda sunulan çalışmalar doğrultusunda, yeniden yapılandırılabilir bir dizi anten iki farklı yapıda tasarlanmıştır. Bu tasarımlarda iki farklı güç besleme yöntemi kullanılmıştır. İlk yöntemde, güç şebekesi mikroşerit teknolojisi kullanılarak bir dielektrik alt tabaka üzerine basılmıştır. İkinci yöntemde ise koaksiyel besleme yöntemi tercih edilmiş ve bu yapıda üçü standart dördü de geliştirilmiş güç bölücü olmak üzere toplamda yedi adet 2×1 güç bölücü kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarım bölümünde sunulan bilgiler doğrultusunda, iki adet yönlendirilebilir dizi anten yapısı tasarlanmış ve CST Studio Suite yazılımı aracılığıyla simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Her iki antenin performansı; yönlülük, kazanç, S11 ve radyasyon paterni gibi temel anten parametreleri açısından değerlendirilmiş olup, elde edilen simülasyon sonuçları aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

3.1. Mikroşerit Hat Beslemeli Tasarım

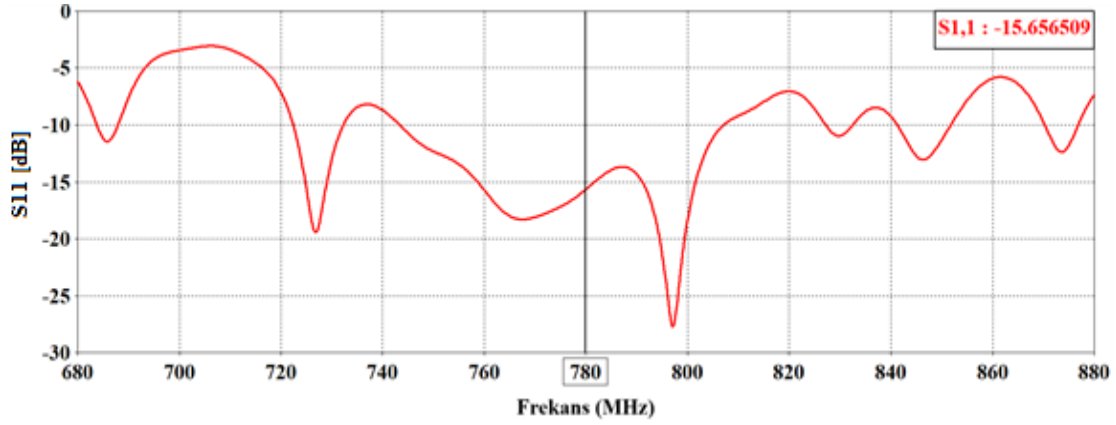
Şekil 25, CST ortamında tasarlanan 1x8 yönlendirilebilir dizi anten yapısını ve bu antene ait besleme yapısını göstermektedir. İlk anten tasarımında, besleme yapısı olarak mikroşerit (microstrip) hattı yöntemi tercih edilmiştir. Mikroşerit hatlar, anten elemanlarına eşit olmayan fazlarda güç iletimi sağlamak üzere tasarlanmış ve yönlendirme yeteneği elde edilmiştir. Şekillerde hem antenin genel geometrisi hem de sinyalin anten elemanlarına dağıtıldığı iletim hattı topolojisi açıkça görülmektedir.



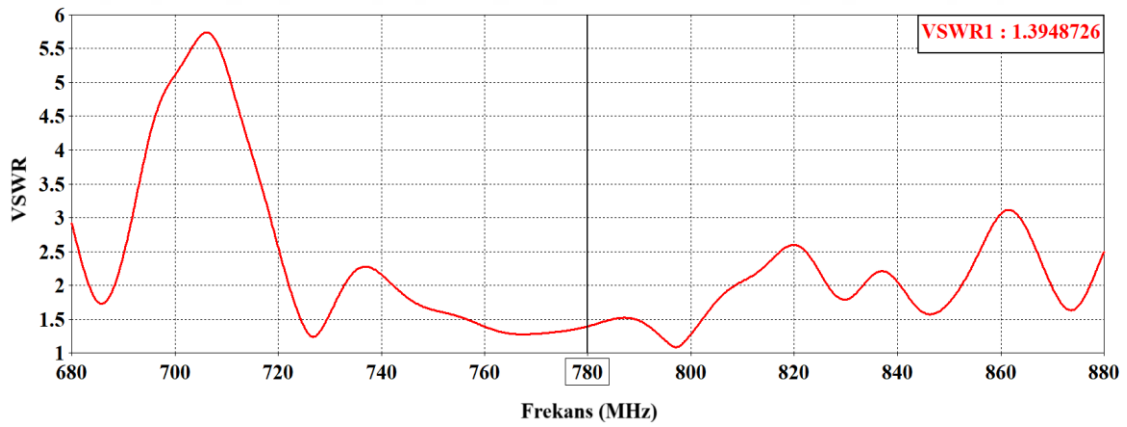
Şekil 25. CST ortamında tasarlanan 1x8 yönlendirilebilir dizi anten (Mikroşerit hat beslemeli tasarım)

+4° faz durumu: Simülasyonda, +4° ışın yönü için 16 anahtar aktif edilmiştir. Bu senaryoda, bu anahtarlar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Soldan başlayarak, ilk anten elemanına K_1 , ikincisine K_2 , üçüncüsüne K_3 , dördüncüsüne K_4 , beşincisine K_5 , altıncısına K_6 , yedincisine K_7 ve son olarak en sağdaki anten elemanına K_8 uygulanmıştır. Böylece anten dizisinde istenilen faz farkları oluşturularak ışın yönlendirmesi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon, çeşitli performans parametrelerine ilişkin önemli sonuçlar üretmiştir. Bu sonuçlar aşağıdaki

şekilde özetlenmektedir: Şekil 26, S-parametrelerinin frekansa bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Anten, 780 MHz frekansında çalışmakta olup, bu frekansta $-15,65$ dB’lik bir minimum S11 değerine sahiptir. Ayrıca, antenin etkin çalışma frekans bandı, 743,5 MHz ile 807 MHz aralığı olarak belirlenmiştir. Şekil 27’de antenin frekansa bağlı VSWR değişimi gösterilmekte olup, anten için elde edilen minimum VSWR değeri 1,39’dur.

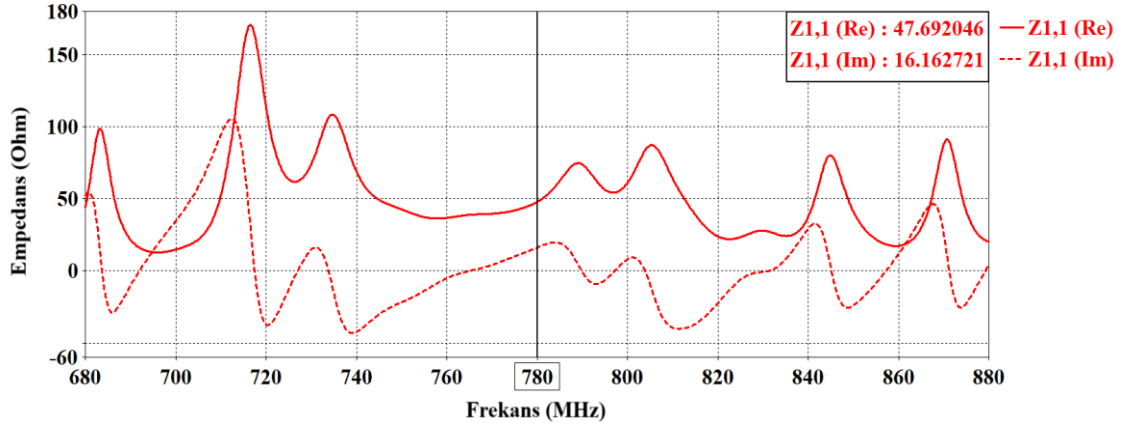


Şekil 26. +4 derece için S11 değişimi– Mikroşerit hat beslemeli tasarım



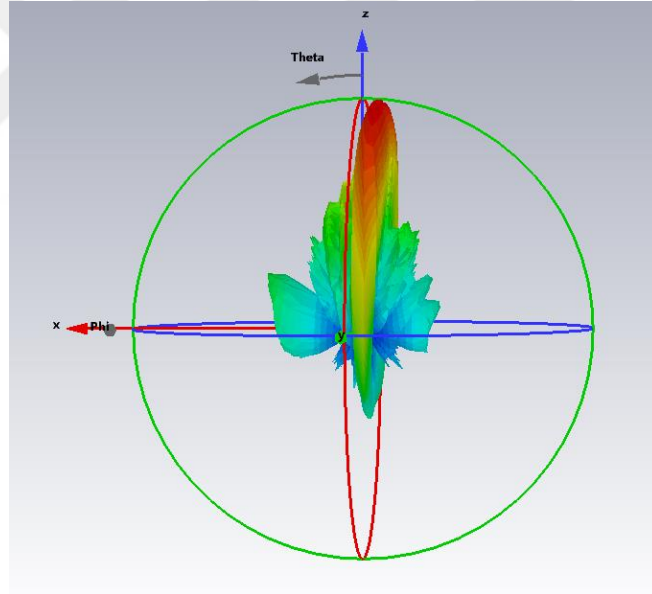
Şekil 27. +4 derece için VSWR – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

Şekil 28’de ise antenin empedansı, $Z = 47,69 + j16,16 \Omega$ olarak gösterilmiştir. Bu değer, antenin giriş empedansının, yaygın olarak kullanılan 50Ω empedansa oldukça yakın olduğunu ve bu nedenle empedans uyumunun başarılı bir şekilde sağlandığını ortaya koymaktadır.



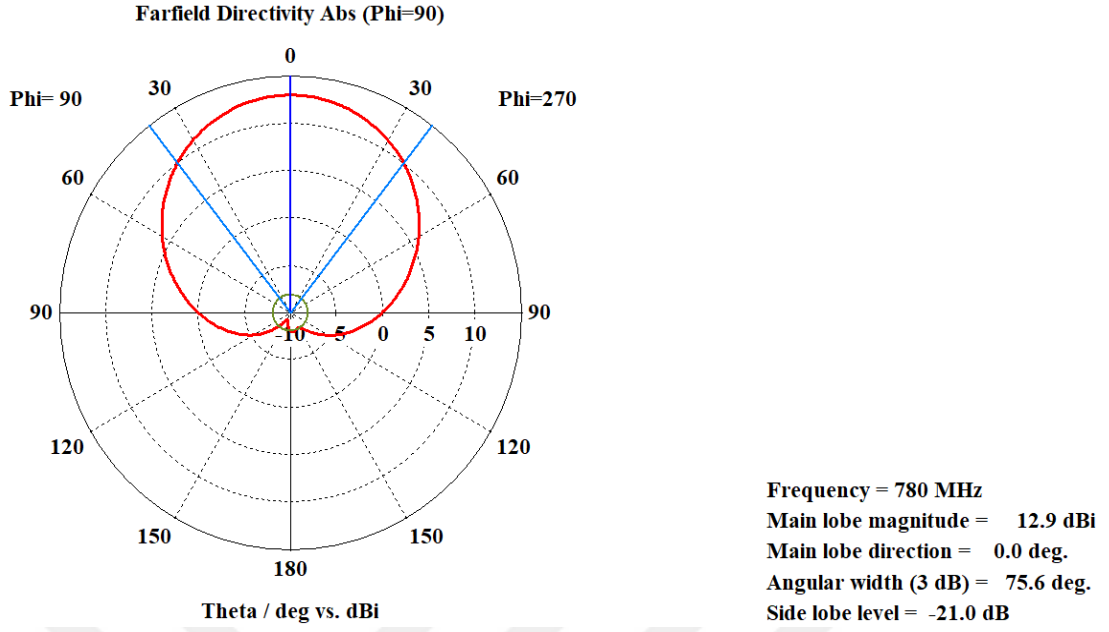
Şekil 28. +4 derece için giriş empedansı – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

Şekil 29, 17,9 dB'lik yönlülük değerine sahip anten uzak alan ışıma diyagramını göstermektedir ve antenin 16,4 dB kazanç (gain) değeri sunulmaktadır.



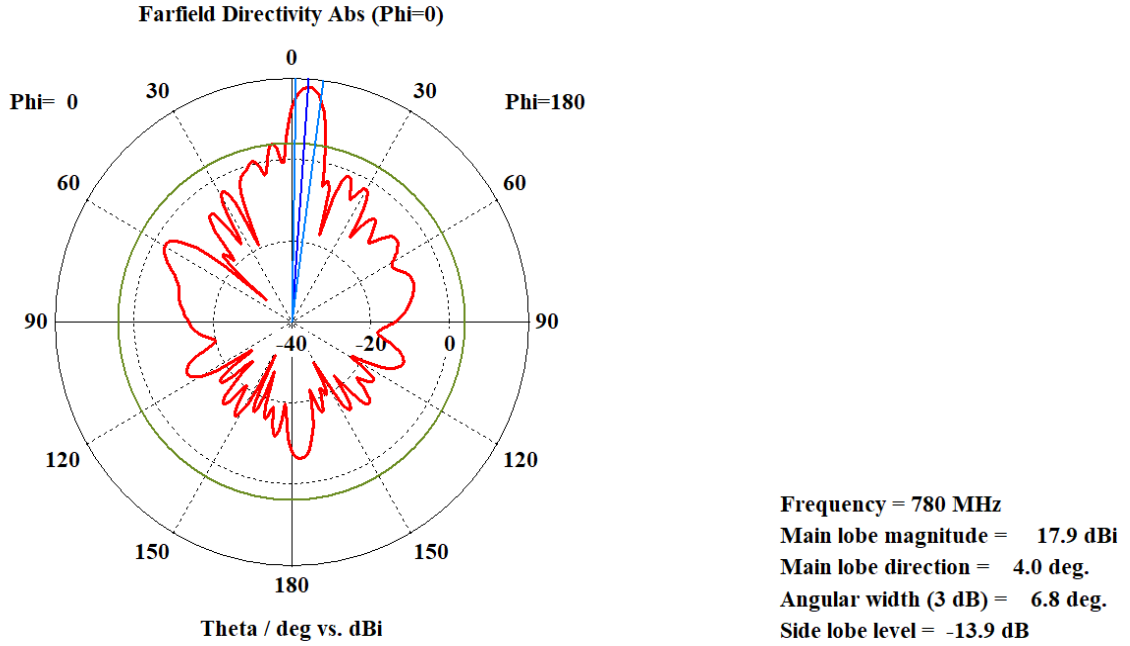
Şekil 29. +4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,9$ dB, $G = 16,4$ dB – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

Phi = 90° düzlemine ait ışıma paterni Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. +4 derece için ışıma paterni (Phi = 90°) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

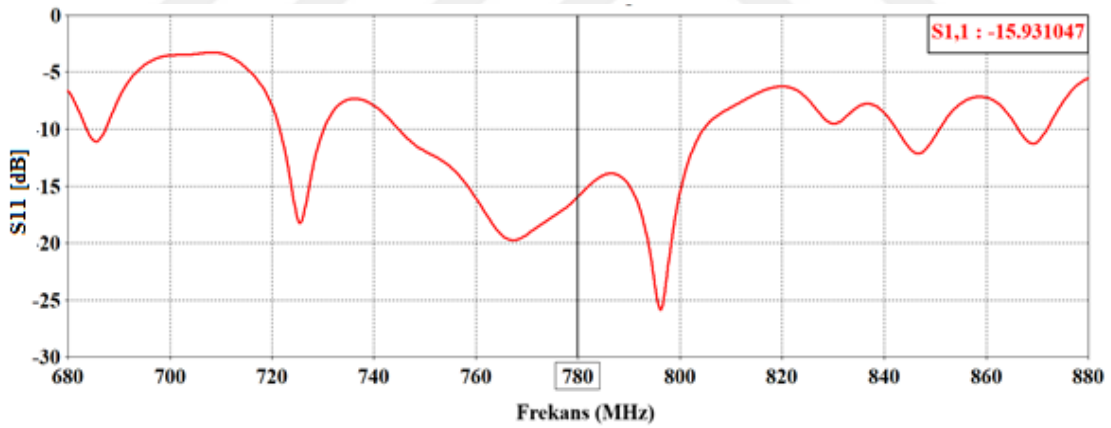
Şekil 31, Phi = 0° düzlemine ait antenin ışıma paternini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre, ana kulağın yönü +4° açısında konumlanmaktadır. Ayrıca, radyasyon deseninde gözlemlenen yan kulak seviyesi -13,9 dB olarak belirlenmiştir.



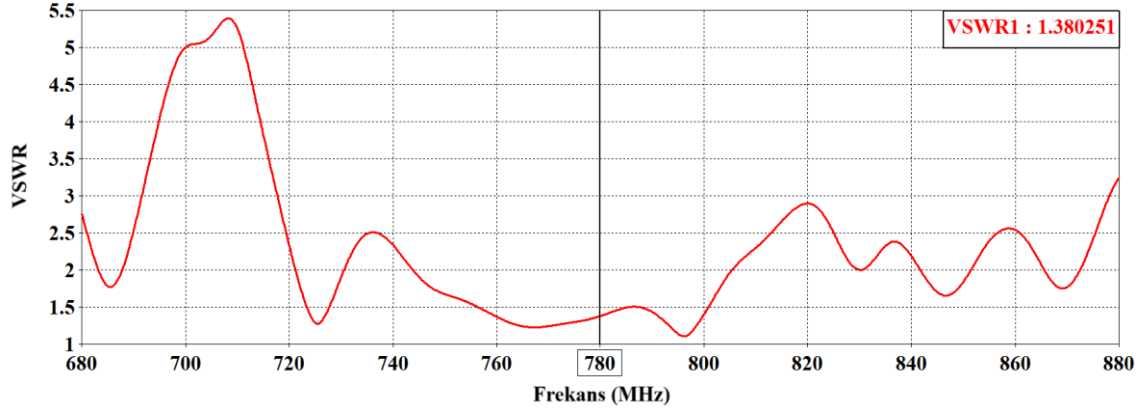
Şekil 31. +4 derece için ışıma paterni (Phi = 0°) - Mikroşerit hat beslemeli tasarım

-4° faz durumu: Simülasyonda, -4° ışın yönü için 16 anahtar aktif edilmiştir. Bu senaryoda, bu anahtarlar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Sağdan başlayarak, ilk anten elemanına K_1 , ikincisine K_2 , üçüncüsüne K_3 , dördüncüsüne K_4 , beşincisine K_5 , altıncısına K_6 , yedincisine K_7 ve son olarak en soldaki anten elemanına K_8 uygulanmıştır. Böylece anten dizisinde istenilen faz farkları oluşturularak ışın yönlendirmesi sağlanmıştır.

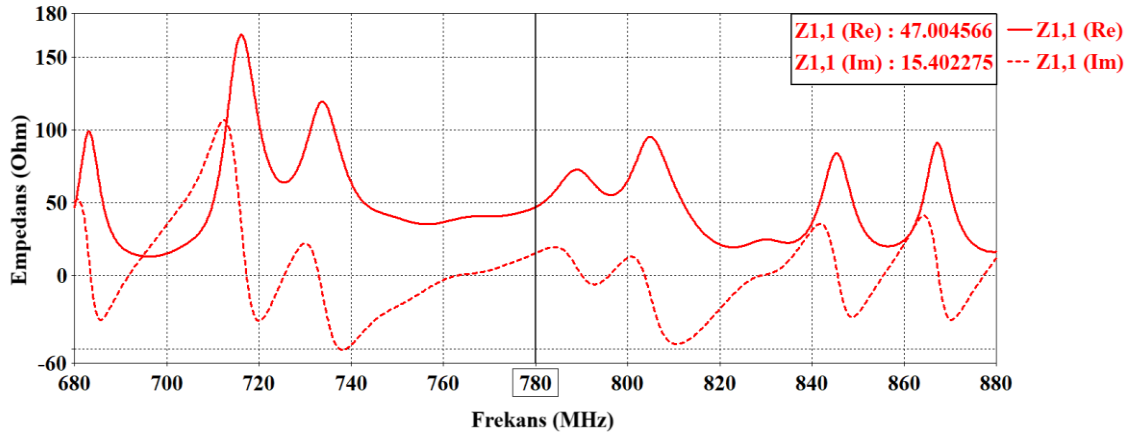
Yürütülen simülasyon çalışması, antenin performansına ilişkin çeşitli temel parametreler açısından önemli bulgular sunmuştur. Bu sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir: Şekil 32, S-parametrelerinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Anten, 780 MHz merkez frekansında çalışmakta olup, bu noktada elde edilen minimum S11 değeri -15,93 dB'dir. Ayrıca, antenin etkili çalışma frekans bandı 745 MHz ile 804,5 MHz arasında belirlenmiştir. Şekil 33'te antenin frekansa bağlı VSWR değişimi verilmiş olup, antenin minimum VSWR değeri 1,38 olarak elde edilmiştir. Şekil 34 ise antenin empedansını göstermektedir. Elde edilen empedans değeri $Z = 47 + j15,4 \Omega$ olup, 50Ω hat emepdansı ile iyi bir uyum sergilediği görülmektedir.



Şekil 32. -4 derece için S11 değişimi– Mikroşerit hat beslemeli tasarım

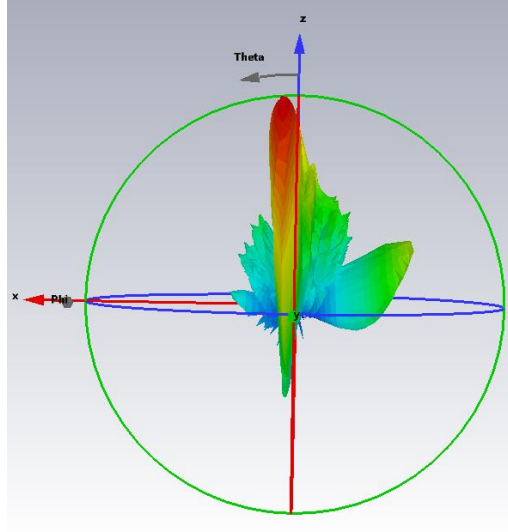


Şekil 33. -4 derece için VSWR – Mikroşerit hat beslemeli tasarım



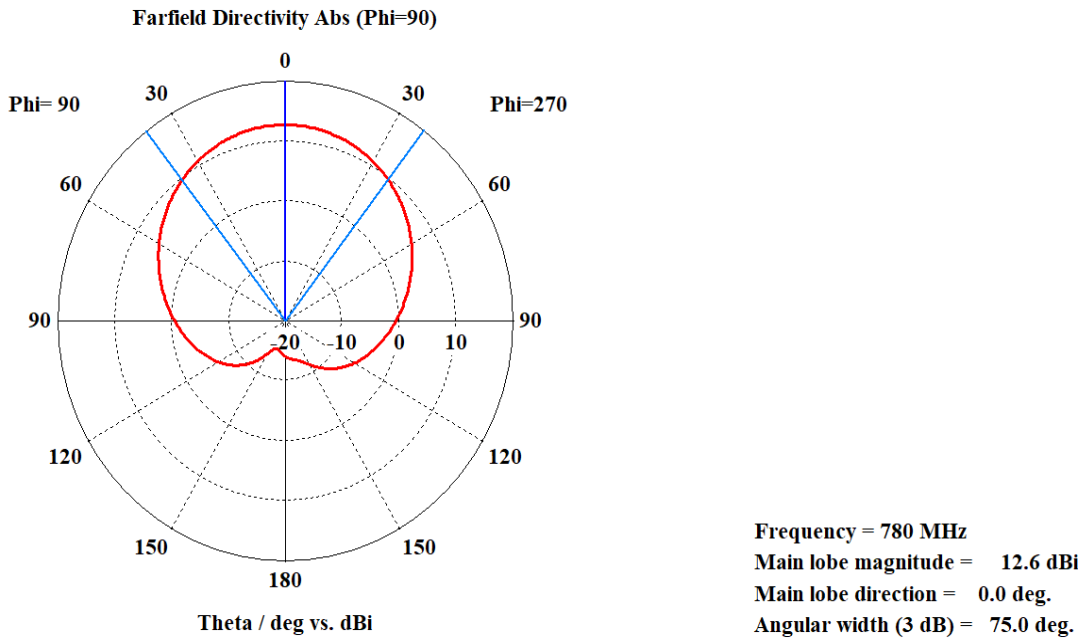
Şekil 34. -4 derece için giriş empedansı – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

Şekil 35, antenin 17,65 dB yönlülük (directivity) değerine sahip uzak alan ışıma diyagramını göstermektedir ve antenin 16,15 dB kazanç (gain) değerini ortaya koymaktadır.

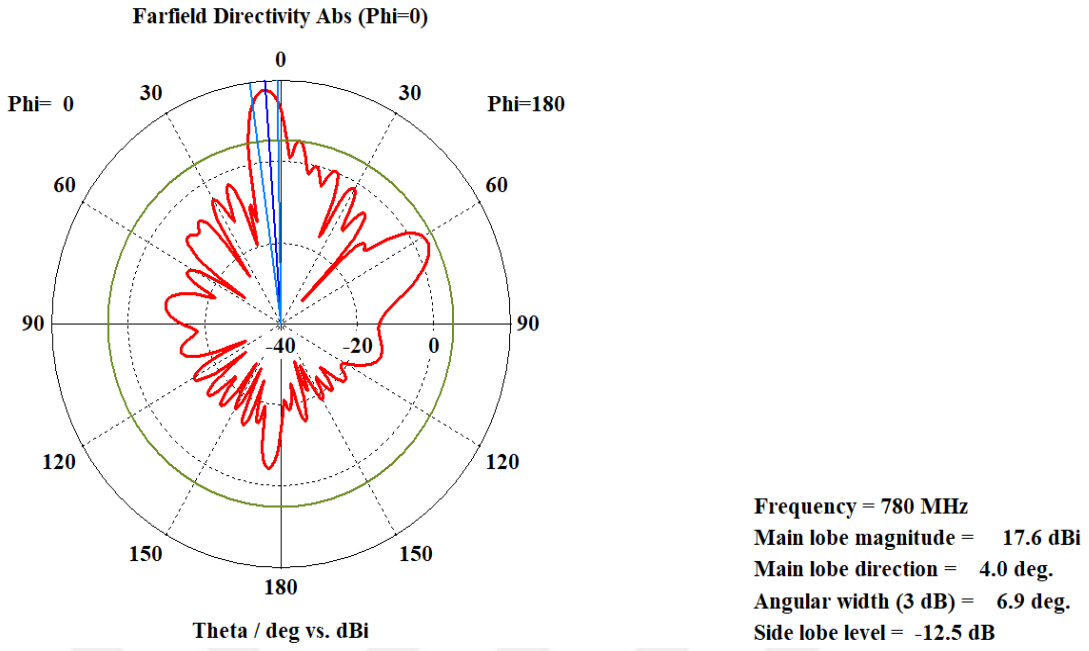


Şekil 35. -4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,65$ dB, $G = 16,15$ dB – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

Şekil 36, $\Phi = 90^\circ$ düzlemine ait antenin ışıma (radyasyon) paternini göstermektedir. Şekil 37 ise $\Phi = 0^\circ$ düzlemindeki radyasyon desenine (ışıma paterni) ilişkin verileri sunmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, ana kulak yöneliminin ideal eksenden -4° sapma gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, söz konusu radyasyon deseninde gözlemlenen yan kulak seviyesi $-12,5$ dB olarak ölçülmüştür.



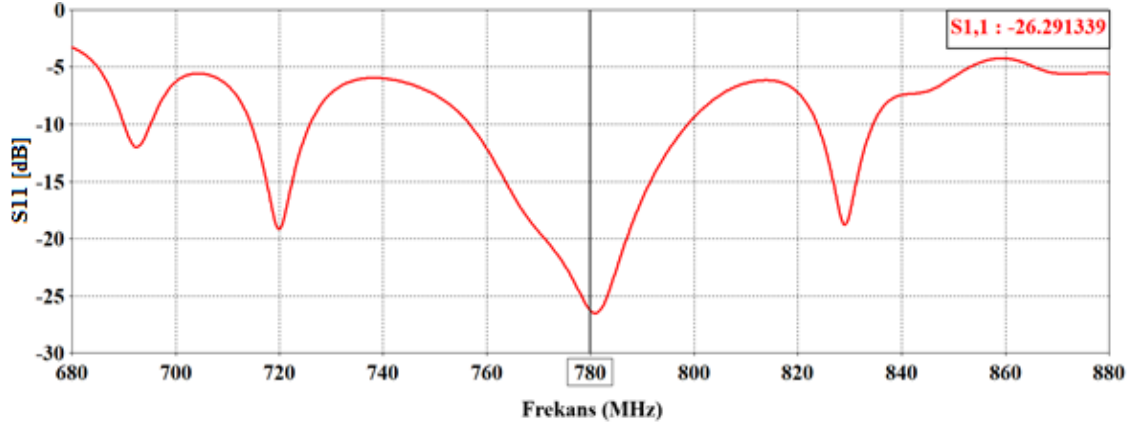
Şekil 36. -4 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım



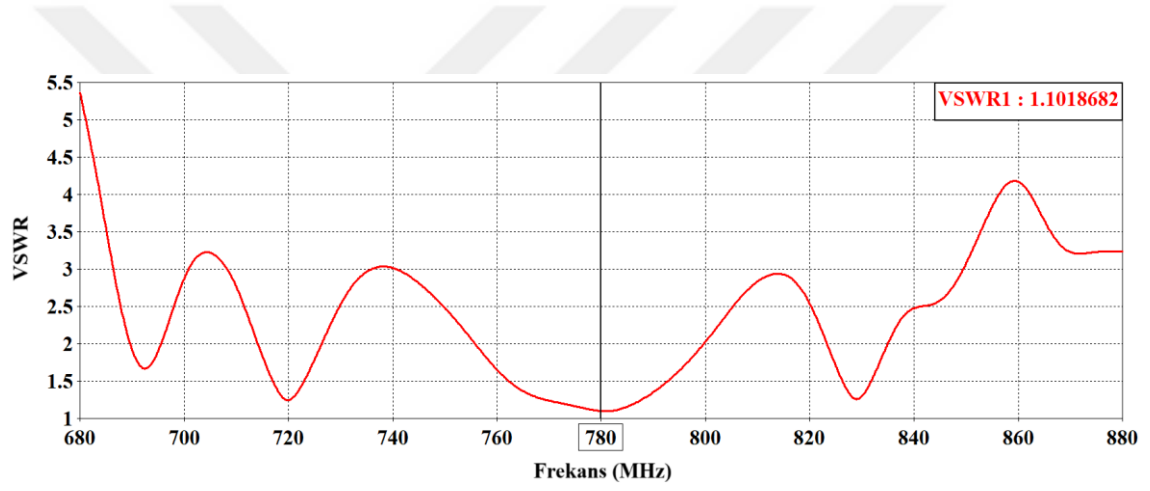
Şekil 37. -4 derece için ışıma paterni (Phi = 0°) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

0° faz durumu: 0° ışın açısı durumu için gerçekleştirilen simülasyonda, besleme yapısı içerisinde 16 anahtar aktif hâle getirilmiştir. Bu senaryoda, bu anahtarlar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Sağdan başlayarak, ilk anten elemanına K₈, ikincisine K₇, üçüncüsüne K₆, dördüncüsüne K₅, beşincisine K₅, altıncısına K₆, yedincisine K₇ ve son olarak en soldaki anten elemanına K₈ uygulanmıştır ve bu sayede anten dizisi elemanları arasında gerekli faz farkları oluşturularak ışının doğrudan (0° yönünde) yönlendirilmesi sağlanmıştır.

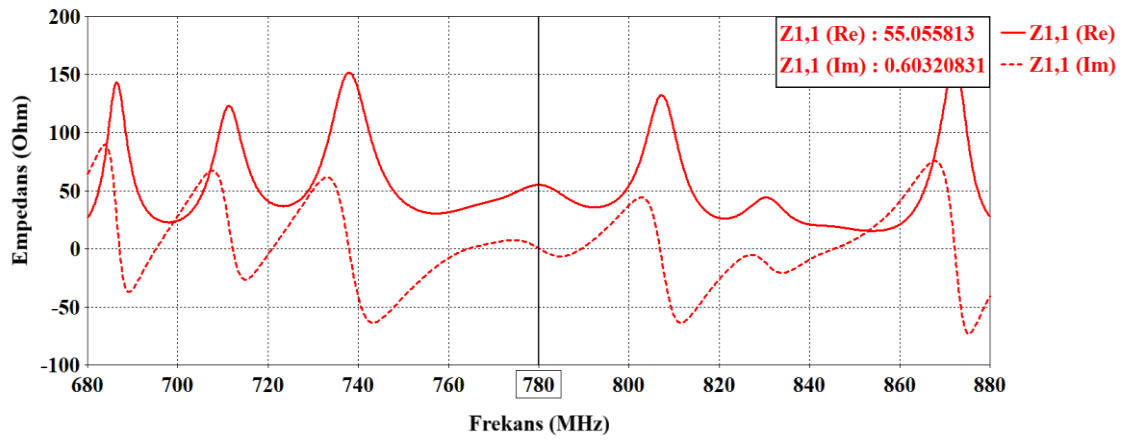
Gerçekleştirilen simülasyon çalışması, antenin performansını değerlendirmeye yönelik çeşitli önemli parametreler hakkında kapsamlı sonuçlar sunmuştur. Şekil 38'de, S-parametrelerinin frekansa bağlı değişimi verilmekte olup, antenin 780 MHz frekansında -26,29 dB ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Bu da antenin bu frekansta oldukça iyi bir empedans uyumu sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, antenin etkin çalışma frekans aralığı 757 MHz ile 798,5 MHz arasında olup, bu bantta S11 değeri -10 dB'nin altında kalmaktadır. Şekil 39, antenin frekansa göre değişen VSWR değişimini göstermekte olup, antenin elde edilen minimum VSWR değeri 1,1 olarak belirlenmiştir. Şekil 40'ta antenin giriş empedansı $Z = 55,05 + j0,6 \Omega$ olarak belirlenmiştir ve bu değer, 50 Ω hat empedansına yakın bir uyum göstermektedir.



Şekil 38. 0 derece için S_{11} değişimi– Mikroşerit hat beslemeli tasarım

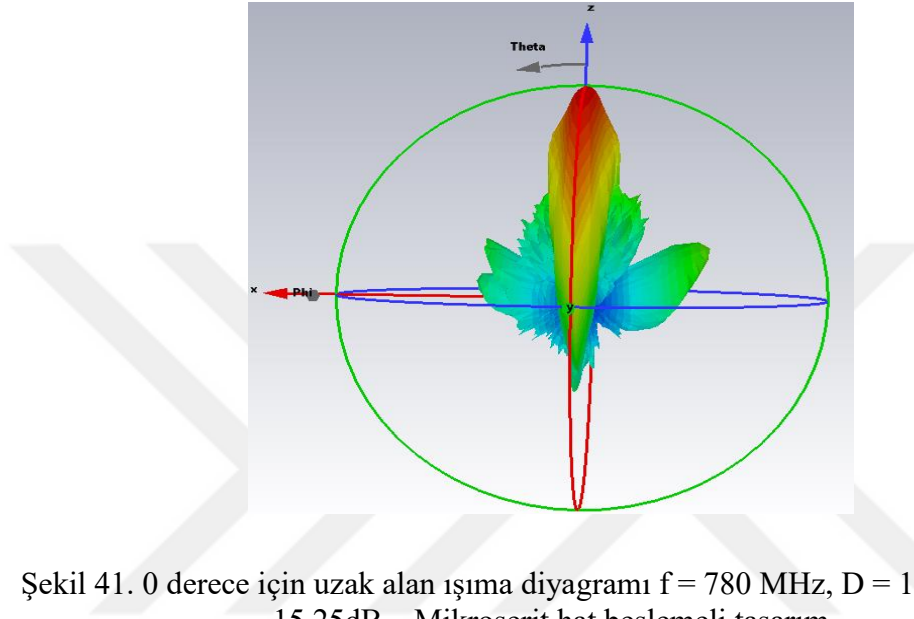


Şekil 39. 0 derece için VSWR – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

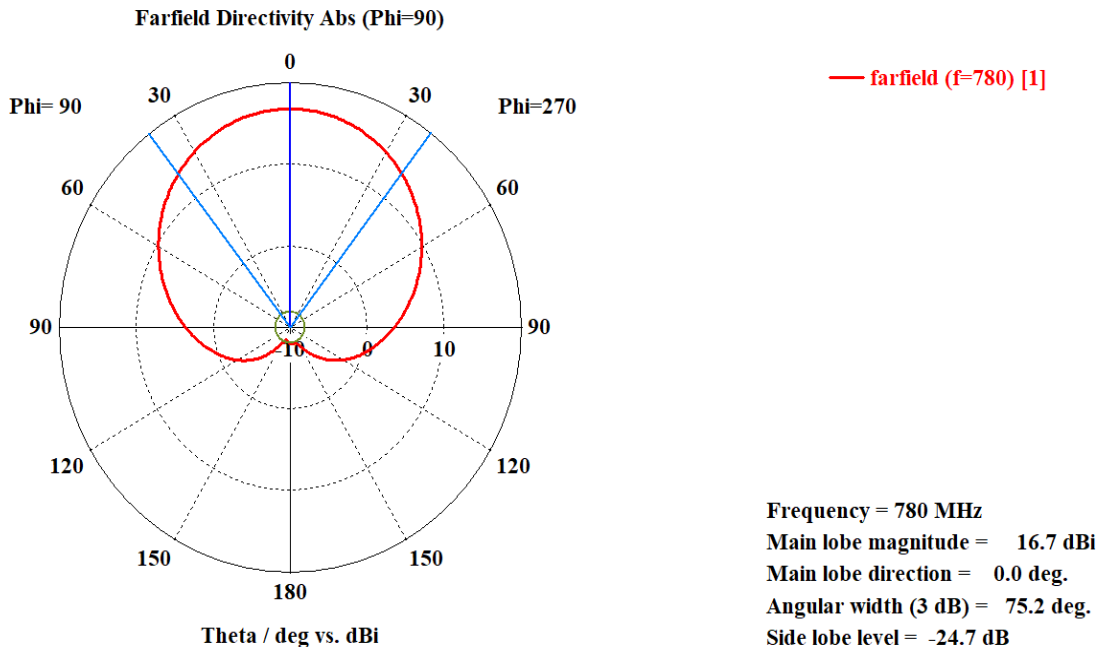


Şekil 40. 0 derece için giriş empedansı – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

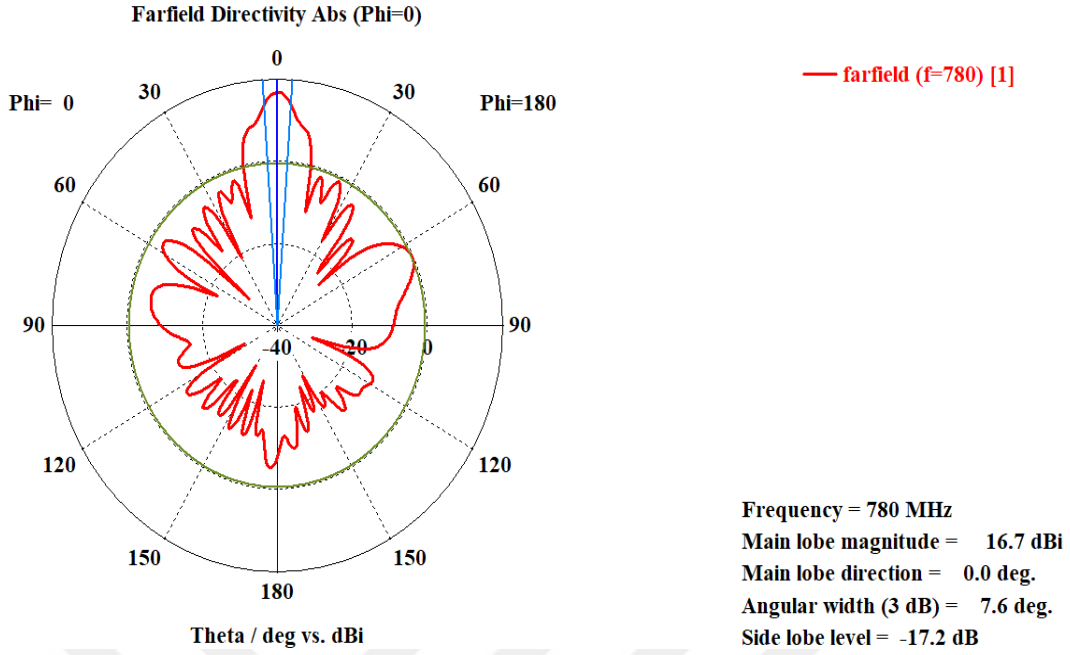
Şekil 41’de antenin 16,74 dB yönlülüğe sahip uzak alan ışıma diyagramı sunulurken, antenin 15,25 dB kazanç değeri verilmiştir. Işıma paternlerine ilişkin olarak, Şekil 42’de $\Phi = 90^\circ$ düzlemine ait ışıma paterni sunulurken, Şekil 43’te $\Phi = 0^\circ$ düzlemindeki ışıma paterni verilmektedir. Bu düzlemde, ana kulak yöneliminin 0° açısında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yan kulak seviyesi -17,2 dB olarak ölçülmüş göstermektedir.



Şekil 41. 0 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 16,74$ dB, $G = 15,25$ dB – Mikroşerit hat beslemeli tasarım



Şekil 42. 0 derece için ışıma paterni ($\Phi = 90^\circ$) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım



Şekil 43. 0 derece için Işıma paterni (Phi = 0°) – Mikroşerit hat beslemeli tasarım

Tablo 7, ilk anten tasarımına ait +4°, -4° ve 0° olmak üzere üç farklı yönelim açısında elde edilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir.

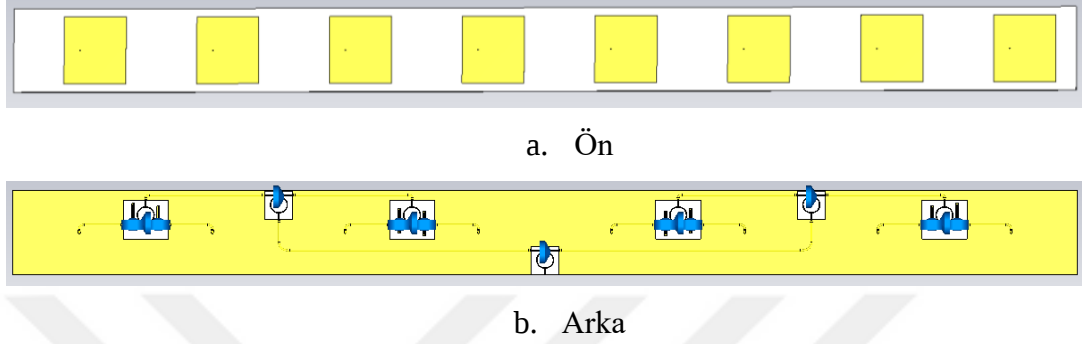
Tablo 7. Mikroşerit hat beslemeli tasarımın sonuçları

Parametreler	+4°	-4°	0°
S-Parametreleri	- 15,65 dB	- 15,93 dB	- 26,29 dB
VSWR	1,39	1,38	1,1
Giriş empedansı	47,69 + j16,16 Ω	47 + j15,4 Ω	55,05 + j0,6 Ω
Yönlülük	17,9 dB	17,65 dB	16,74 dB
Kazanç	16,4 dB	16,15 dB	15,25 dB
Yan kulak (Phi = 0°)	- 13,9 dB	- 12,5 dB	- 17,2 dB
Bant genişliği	63,5 MHz	59,5 MHz	41,5 MHz
Bant aralığı	743,5 – 807 MHz	745 – 804,5 MHz	757 – 798,5 MHz

3.2. Koaksiyel Hat Beslemeli Tasarım

Şekil 44, CST ortamında tasarlanan 1x8 yönlendirilebilir anten dizisinin yapısını ve besleme sistemini göstermektedir. Antenin Koaksiyel hat beslemeli tasarımında, besleme yapısı olarak koaksiyel kablo tercih edilmiştir. Güç dağıtımını sağlamak amacıyla üçü geleneksel ve dördü geliştirilmiş olmak üzere toplam yedi adet güç bölücü tasarlanmıştır.

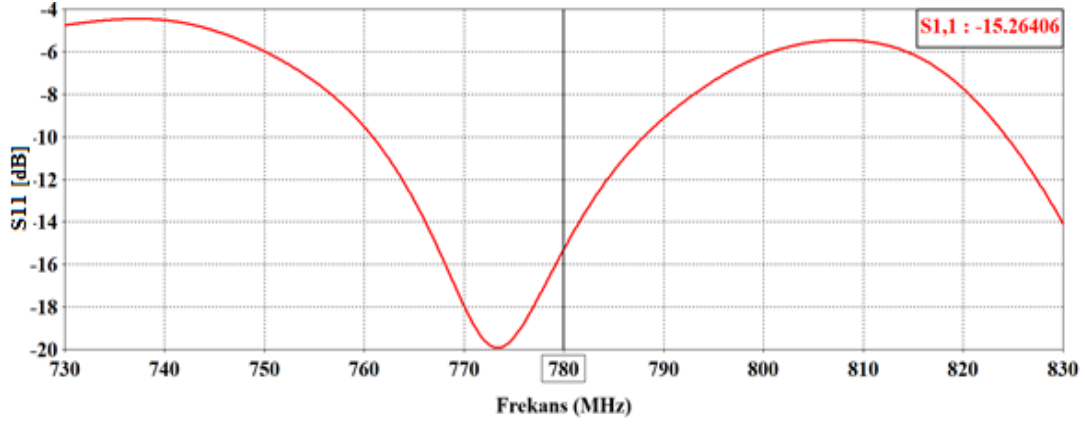
Bu bölücüler, anten elemanları arasında eşit olmayan faz farkları oluşturacak şekilde yapılandırılarak antene ışın yönlendirme yeteneği kazandırmıştır. Şekillerde hem antenin genel geometrisi hem de sinyalin anten elemanlarına dağıtıldığı iletim hattı topolojisi açık bir şekilde sunulmaktadır.



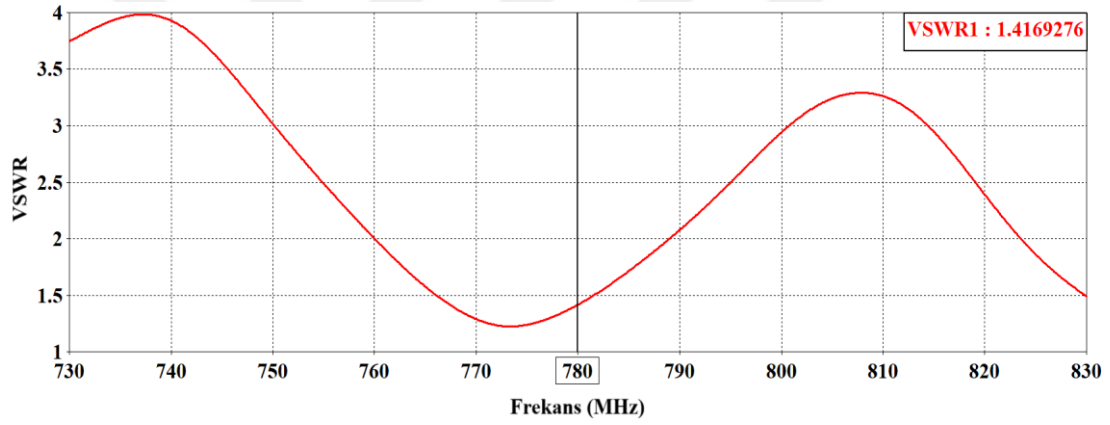
Şekil 44. CST ortamında tasarlanan 1×8 yönlendirilebilir dizi anten (Koaksiyel hat beslemeli tasarım)

Birinci durumda, simülasyon $+4^\circ$ ışın yönü hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, toplam 32 adet anahtardan 16'sı aktif, kalan 16 anahtar ise pasif (kapalı) konumda tutulmuştur. Paternin $+4^\circ$ yönüne yönlendirilmesi amacıyla, besleme hattındaki dallanma noktalarında aşağıdaki şekilde anahtarlar etkinleştirilmiştir: Soldan sağa doğru, birinci anten elemanına K_1 , ikinciye K_2 , üçüncüye K_3 , dördüncüye K_4 , beşinciye K_5 , altıncıya K_6 , yedinciye K_7 ve sekizinci (en sağdaki) anten elemanına K_8 anahtarları uygulanmıştır. Bu yapılandırma sayesinde, anten elemanları arasında gerekli faz farkları sağlanarak ışının istenilen yöne ($+4^\circ$) sapması mümkün kılınmıştır.

Birinci durum için gerçekleştirilen simülasyon çalışması, anten performansına ilişkin çeşitli sonuçlar ortaya koymuştur. Şekil 45, S11 parametresinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Anten, 780 MHz merkez frekansında çalışmakta olup, bu noktada elde edilen minimum S11 değeri $-15,26$ dB olarak elde edilmiştir. Ayrıca antenin etkili çalışma frekans bandı 761 MHz ile 787,9 MHz arasında olmaktadır. Şekil 46, antenin frekansa göre değişen VSWR değişimini göstermekte olup, antenin elde edilen minimum VSWR değeri 1,41 olarak belirlenmiştir.

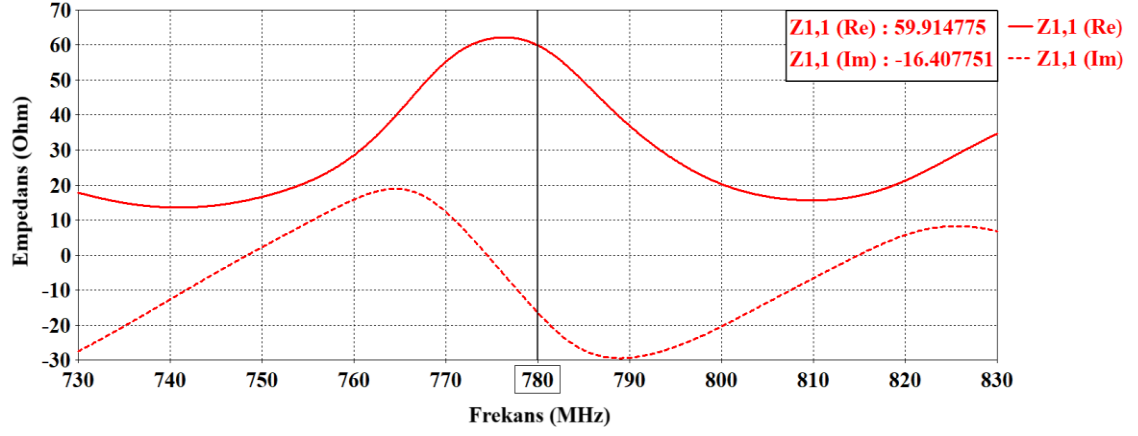


Şekil 45. +4 derece için S_{11} değişimi – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

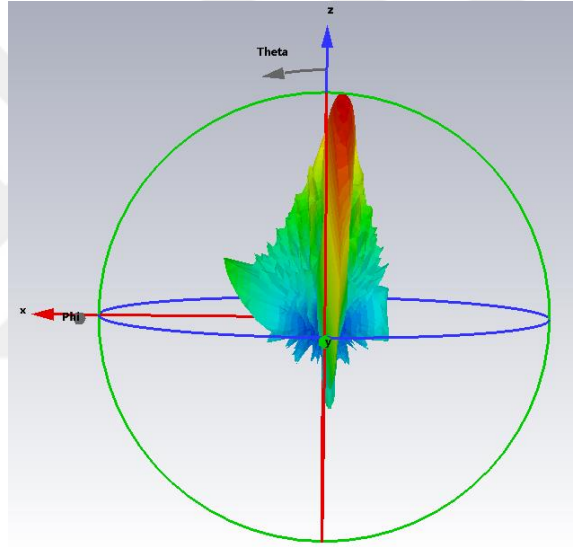


Şekil 46. +4 derece için VSWR – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

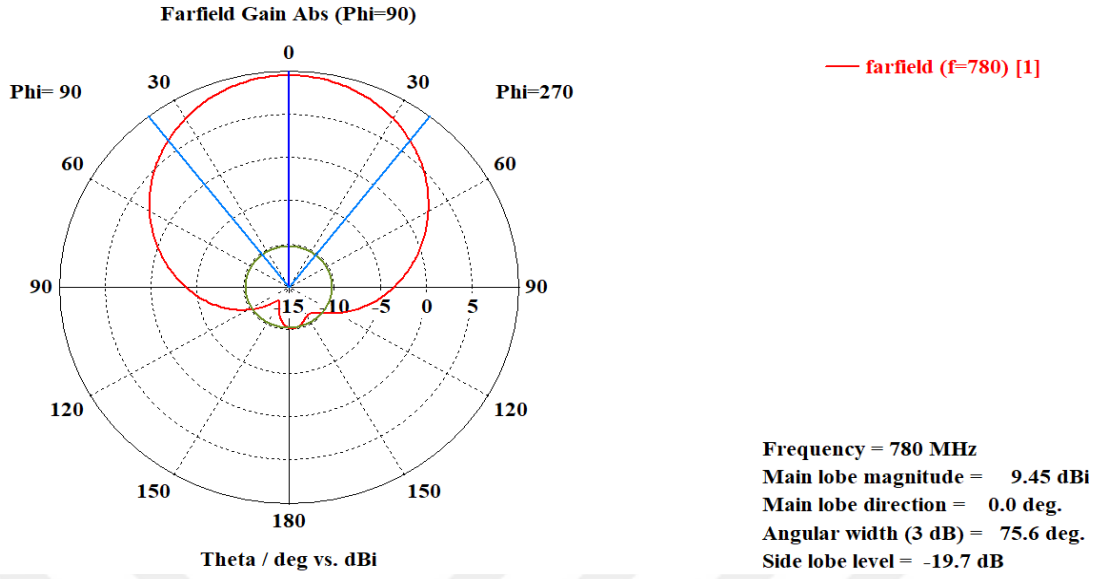
Şekil 47’de, antenin giriş empedansı $Z = 59,91 - j16,4 \Omega$ olarak ölçülmüştür. Şekil 48, antenin 18,26 dB yönlülük (directivity) değerine sahip olduğunu göstermektedir ve anten kazancı 15,87 dB olarak elde edilmiştir. Ek olarak, antenin ışıma paternleri iki farklı düzlemde analiz edilmiştir. Şekil 49, $\Phi = 90^\circ$ düzlemine ait ışıma paternini sunarken; Şekil 50, $\Phi = 0^\circ$ düzlemindeki radyasyon desenini (ışıma paterni) göstermektedir. Bu düzlemde yan kulak seviyesi -12,7 dB olarak gösterilmiştir.



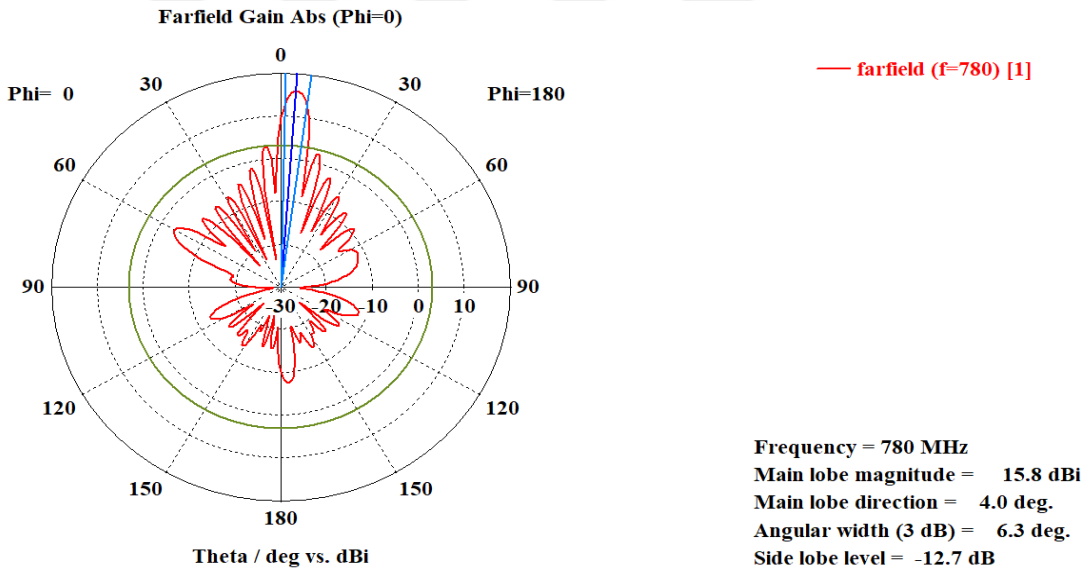
Şekil 47. +4 derece için giriş empedansı – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



Şekil 48. +4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780 \text{ MHz}$, $D = 18,26 \text{ dB}$, $G = 15,87 \text{ dB}$ – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



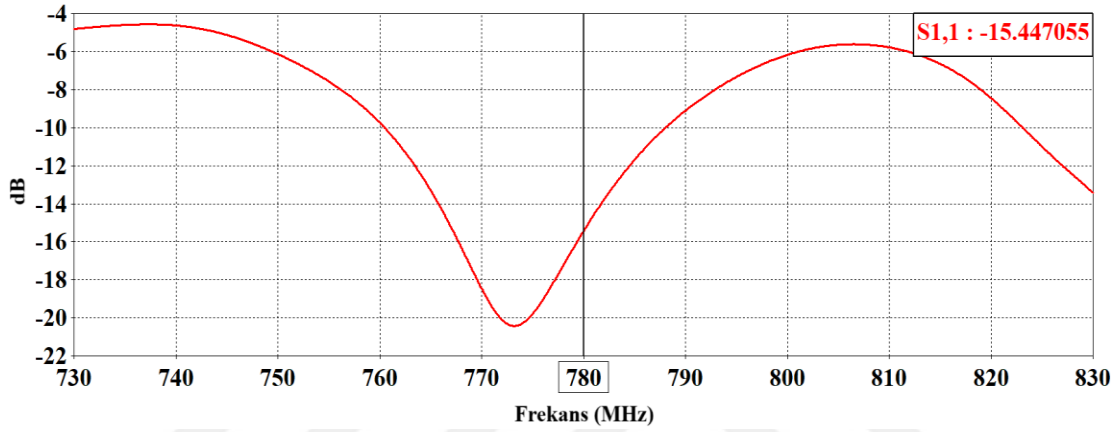
Şekil 49. +4 derece için ışıma paterni (Phi = 90°) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



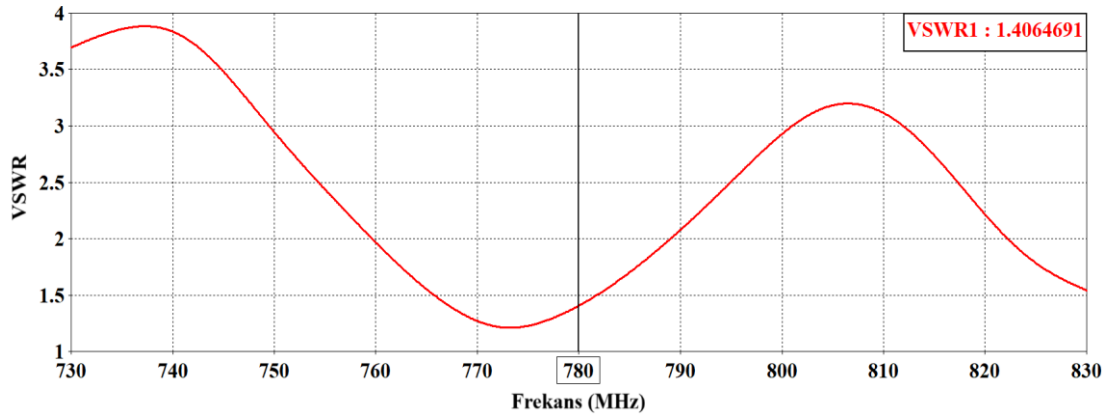
Şekil 50. +4 derece için ışıma paterni (Phi = 0°) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

İkinci durumda, simülasyonda, -4° ışın yönü için 16 adet anahtar aktif edilmiştir. Bu senaryoda, bu anahtarlar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Sağdan başlayarak, ilk anten elemanına K_1 , ikincisine K_2 , üçüncüsüne K_3 , dördüncüsüne K_4 , beşincisine K_5 , altıncısına K_6 , yedincisine K_7 ve son olarak en soldaki anten elemanına K_8 uygulanmıştır. Böylece anten dizisinde istenilen faz farkları oluşturularak ışın yönlendirmesi sağlanmıştır.

İkinci duruma ilişkin elde edilen sonuçlar, antenin performansı hakkında çeşitli bilgiler sunmaktadır. Şekil 51, antenin S11 değerinin frekansa göre değişimini göstermektedir. Anten, 780 MHz merkez frekansında çalışmakta olup, bu frekansta elde edilen minimum S11 -15,44 dB olarak ölçülmüştür. Ayrıca, Şekil 51 incelendiğinde antenin etkili çalışma frekans aralığının 760,5 MHz ile 788 MHz arasında olduğu görülmektedir. Şekil 52, antenin frekansa bağlı VSWR değişimini göstermekte olup, antenin elde edilen minimum VSWR değeri 1,4 olarak elde edilmiştir.

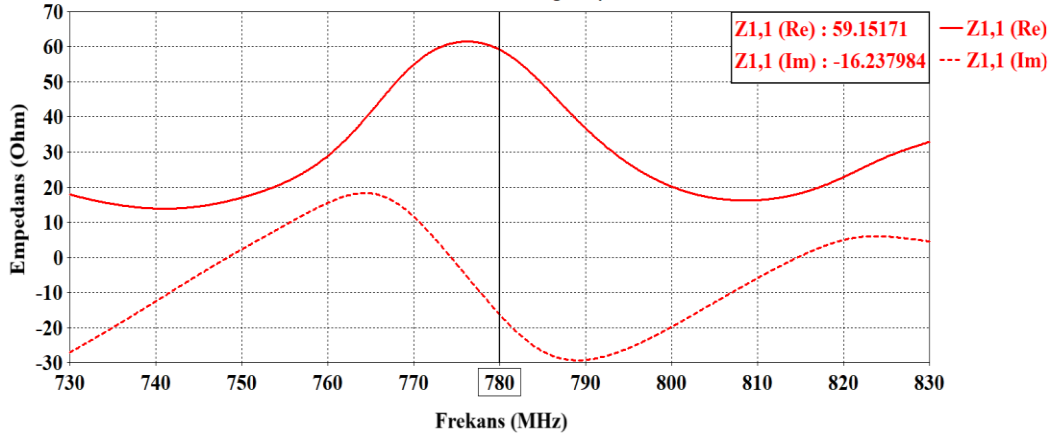


Şekil 51. -4 derece için S11 değişimi– Koaksiyel hat beslemeli tasarım



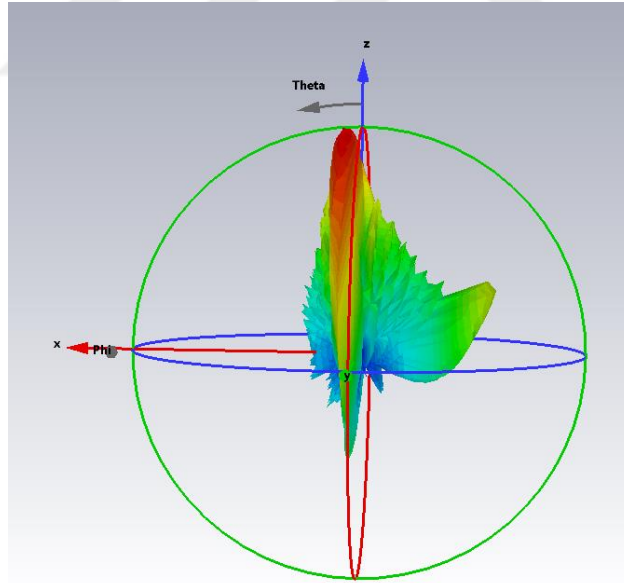
Şekil 52. -4 derece için VSWR – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

Şekil 53'te, ise antenin giriş empedansının $Z = 59,15 - j16,23 \Omega$ olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum 50 Ohm olan hat empedansına yakındır.



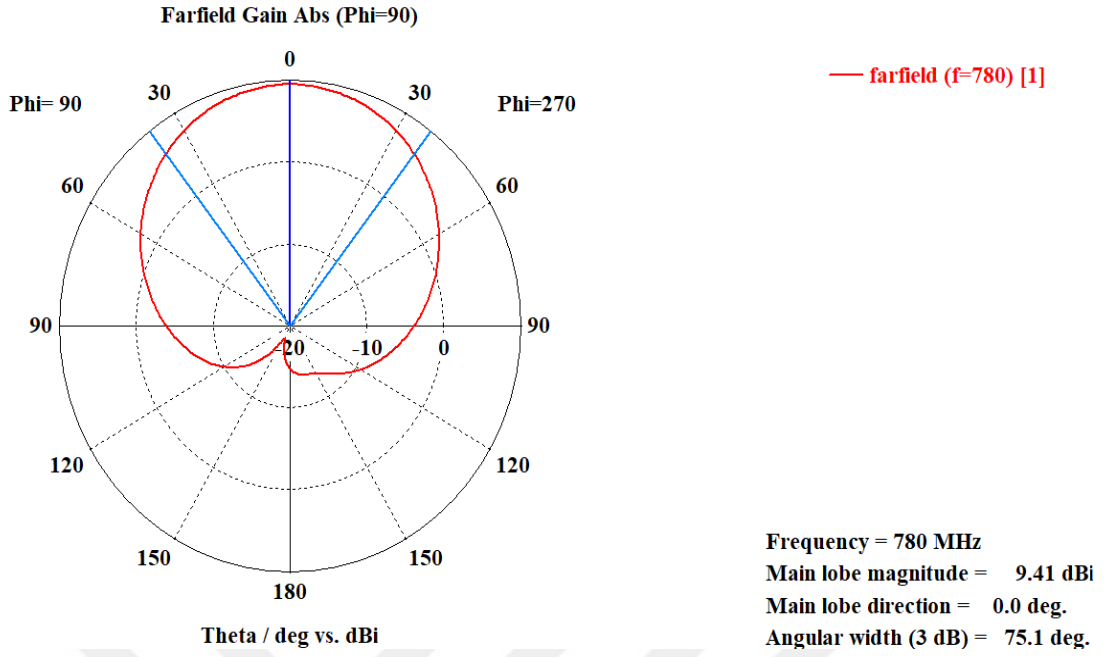
Şekil 53. -4 derece için giriş empedansı – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

Şekil 54, antenin 17,93 dB yönlülük (directivity) değerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, antenin elektromanyetik enerjiyi belirli bir yönde odaklama yeteneğinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, antenin kazancı 15,55 dB olarak elde edilmiştir.

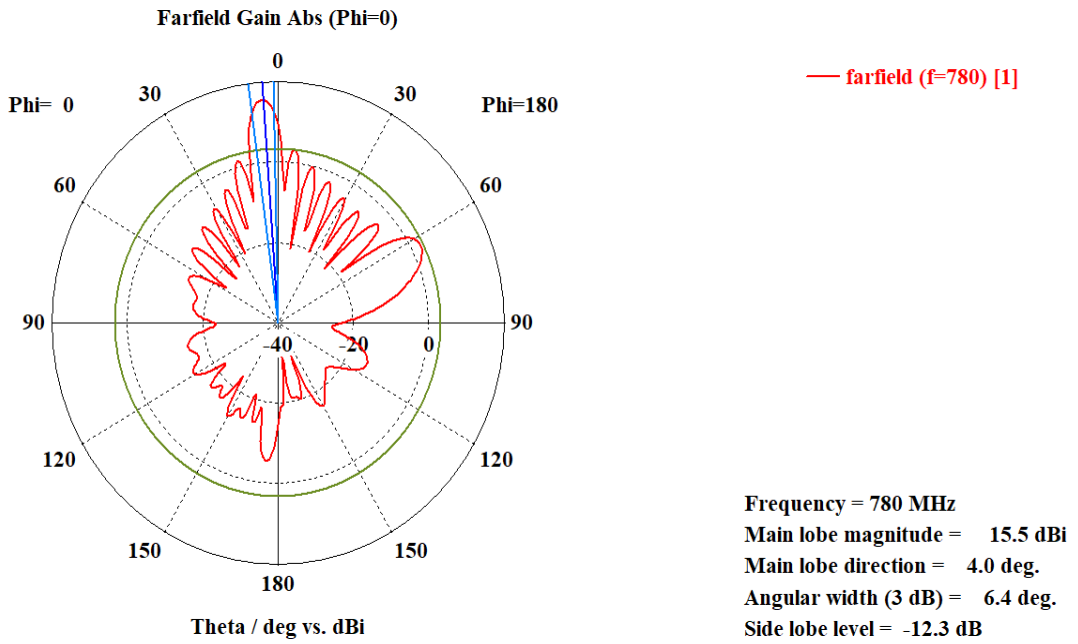


Şekil 54. -4 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,93$ dB, $G = 15,55$ dB – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

Son olarak, Şekil 55, antenin $\Phi = 90^\circ$ düzlemine ait ışıma paternini sunarken, Şekil 56 ise $\Phi = 0^\circ$ düzlemindeki ışıma paternini göstermektedir. $\Phi = 0^\circ$ düzleminde gözlemlenen yan kulak seviyesi -12,3 dB olarak elde edilmiştir.



Şekil 55. -4 derece için ışıma paterni (Phi = 90°) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

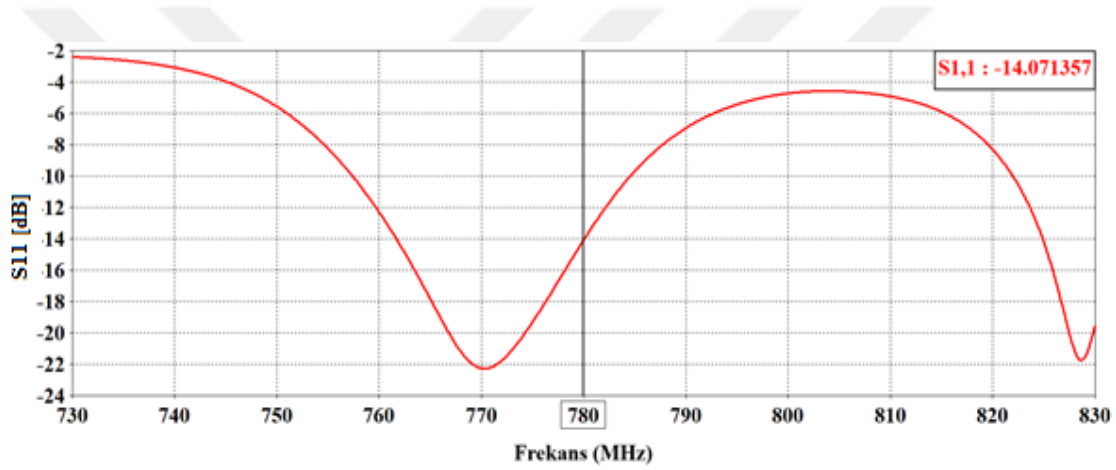


Şekil 56. -4 derece için ışıma paterni (Phi = 0°) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

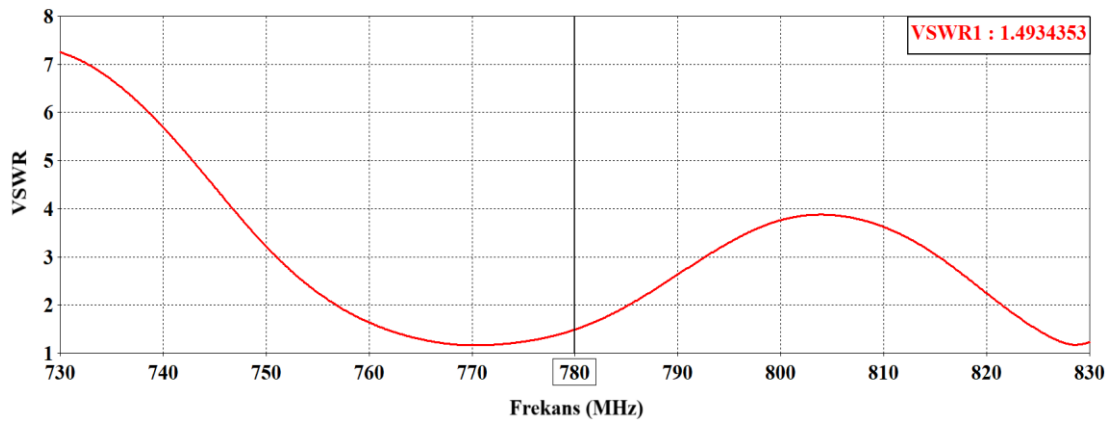
0° ışın açısı durumu için gerçekleştirilen simülasyonda, besleme yapısı içerisinde 16 adet anahtar aktif hâle getirilmiştir. Bu senaryoda, anahtarlar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Sağdan başlayarak, ilk anten elemanına K₁, ikincisine K₂, üçüncüsüne K₃, dördüncüsüne K₄, beşincisine K₄, altıncısına

K_3 , yedincisine K_2 ve son olarak en soldaki anten elemanına K_1 uygulanmıştır. Bu sayede anten dizisi elemanları arasında gerekli faz farkları oluşturularak paternin 0° yönüne yönlendirilmesi sağlanmıştır.

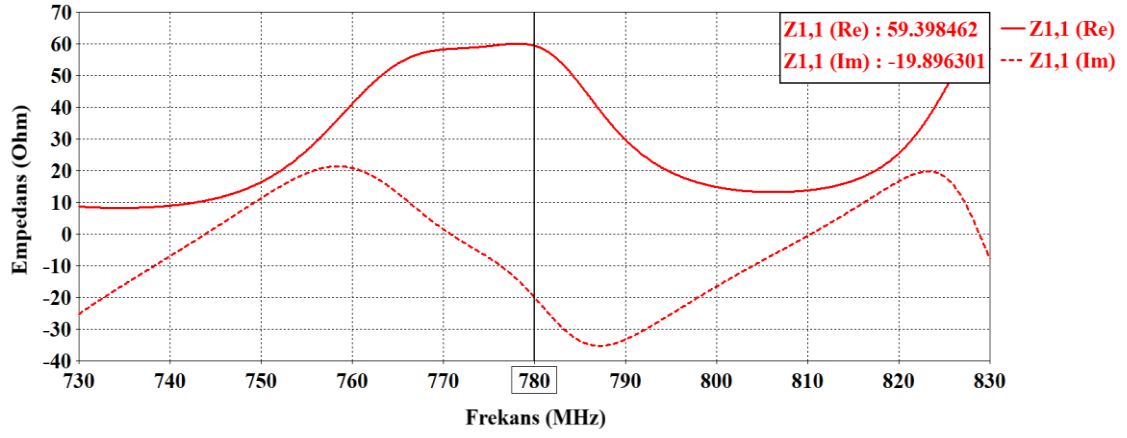
Simülasyon sonucunda çeşitli performans parametrelerine ilişkin önemli bulgular elde edilmiştir. Bu sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir: Şekil 57, S-parametrelerinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Şekil 58, antenin frekansa göre değişen VSWR değişimini göstermektedir. Şekil 59'da giriş empedansı (Z) sunulmuştur. Antenin yönlülük ve kazanç değerleri Şekil 60'ta verilmiştir. Ayrıca, antenin ışıma paternleri iki farklı düzlemde analiz edilmiştir: $\Phi = 90^\circ$ düzlemine ait ışıma paterni Şekil 61'de, $\Phi = 0^\circ$ düzlemine ait patern ise Şekil 62'de gösterilmektedir.



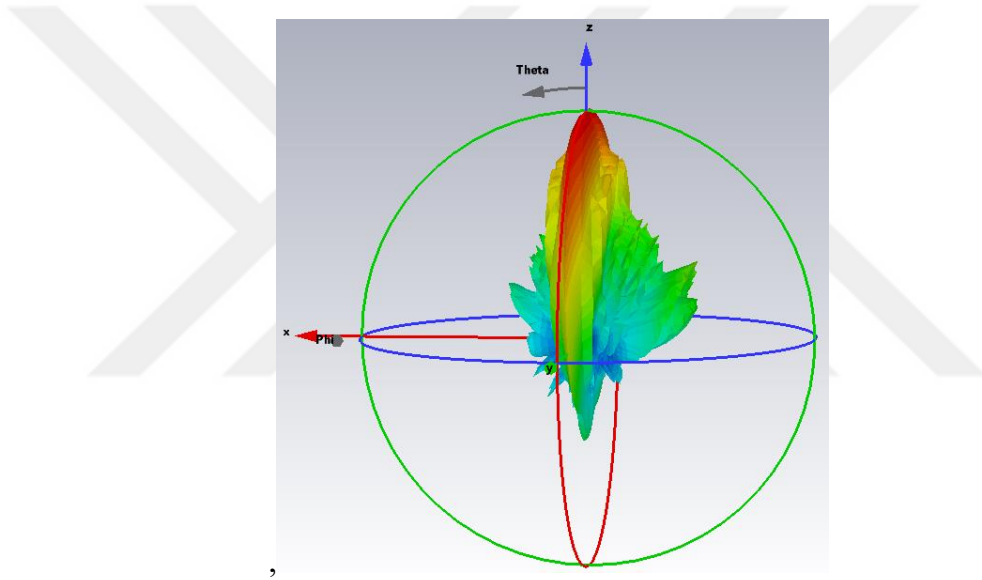
Şekil 57. 0 derece için S11 değişimi– Koaksiyel hat beslemeli tasarım



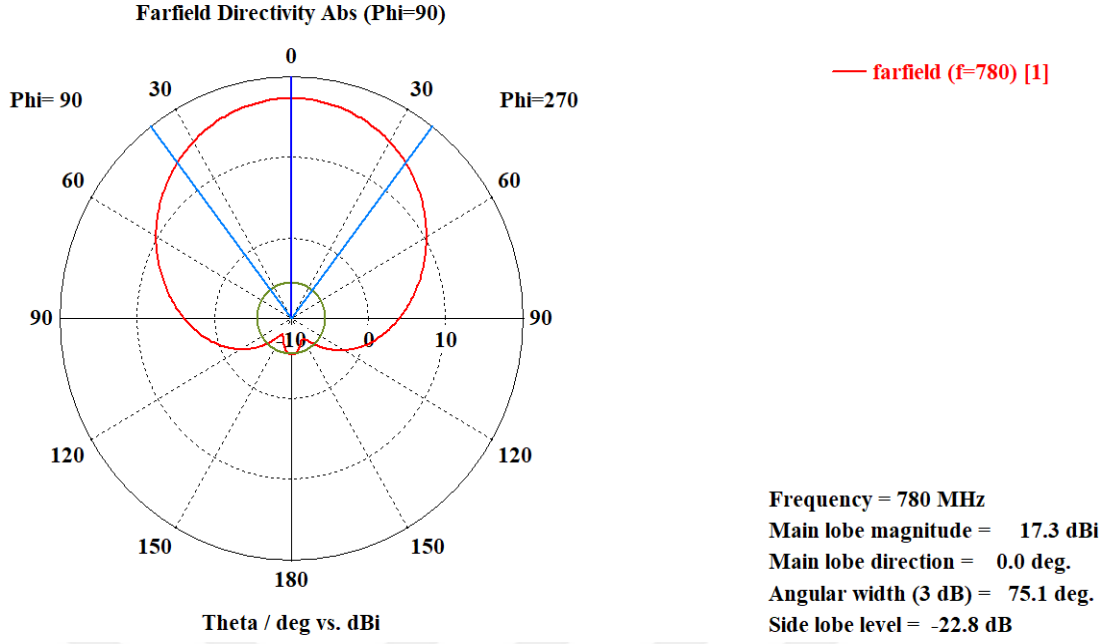
Şekil 58. 0 derece için VSWR – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



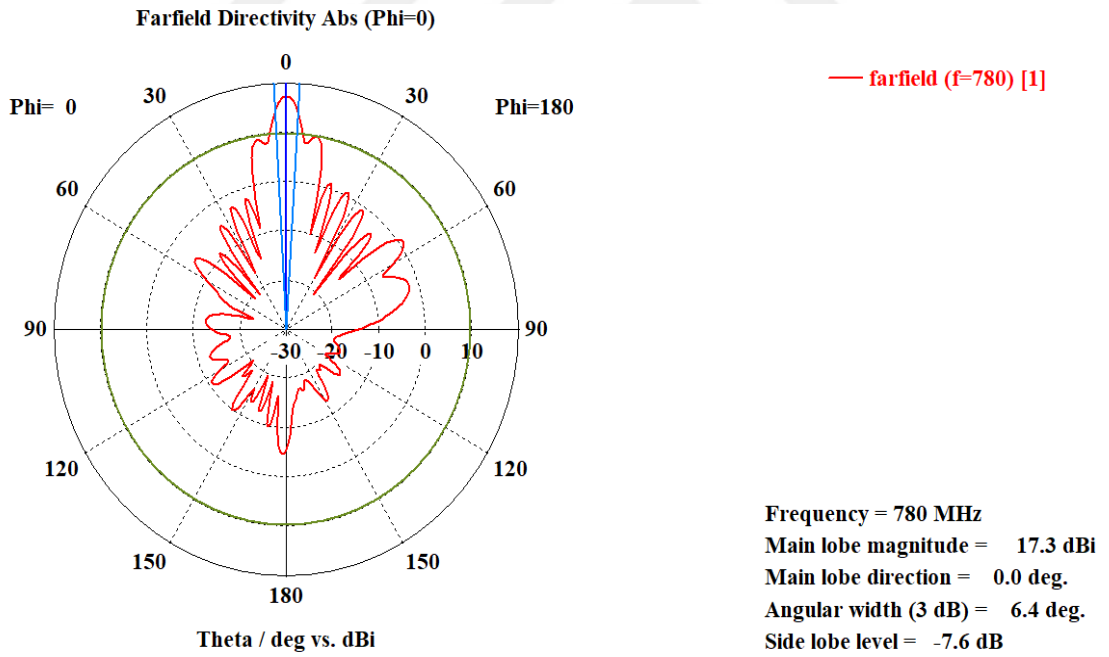
Şekil 59. 0 derece için giriş empedansı – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



Şekil 60. 0 derece için uzak alan ışıma diyagramı $f = 780$ MHz, $D = 17,27\text{dB}$, $G = 14,97\text{dB}$ – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



Şekil 61. 0 derece için ışıma paterni (Phi = 90°) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım



Şekil 62. 0 derece için ışıma paterni (Phi = 0°) – Koaksiyel hat beslemeli tasarım

Tablo 8, koaksiyel hat beslemeli anten tasarımının 0°, +4° ve -4° olmak üzere üç farklı durumda elde edilen temel performans kriterlerini özetlemektedir.

Tablo 8. Koaksiyel hat beslemeli tasarımın sonuçları

Parametreler	+4°	-4°	0°
S-Parametreleri	-15,26 dB	-15,44 dB	-14,07 dB
VSWR	1,41	1,4	1,49
Giriş empedansı	59,91 – j16,4 Ω	59,15 – j16,23 Ω	59,39 – j19,89 Ω
Yönlülük	18,26 dB	17,93 dB	17,27 dB
Kazanç	15,87 dB	15,55 dB	14,97 dB
Yan kulak (Phi = 0°)	-12,7 dB	-12,3 dB	-7,6 dB
Bant genişliği	26,9 MHz	27,5 MHz	27 MHz
Bant aralığı	761 – 787,9 MHz	760,5 – 788 MHz	757,5 – 784,5 MHz

Antenin giriş uyumu ve empedans karakteristikleri, S11 değişimi ve VSWR üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca yönlülük ve kazanç değerleri kullanılarak antenin genel verimliliği analiz edilmiştir. Yan kulak seviyeleri, Phi = 90° ve Phi = 0° düzlemlerinde ayrı ayrı incelenmiş; bu sayede istenmeyen yönlerdeki radyasyon miktarı gözlemlenmiştir. Bant genişliği ile bant aralığına dair elde edilen veriler ise antenin çalışabileceği frekans aralığını ve spektral performansını ortaya koymaktadır. Tüm bu bulgular, koaksiyel hat beslemeli tasarımın genel performansına dair kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

3.3. Yönlendirilebilir Dizi Anten İçin Gelişmiş 2x1 Wilkinson Güç Bölücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi

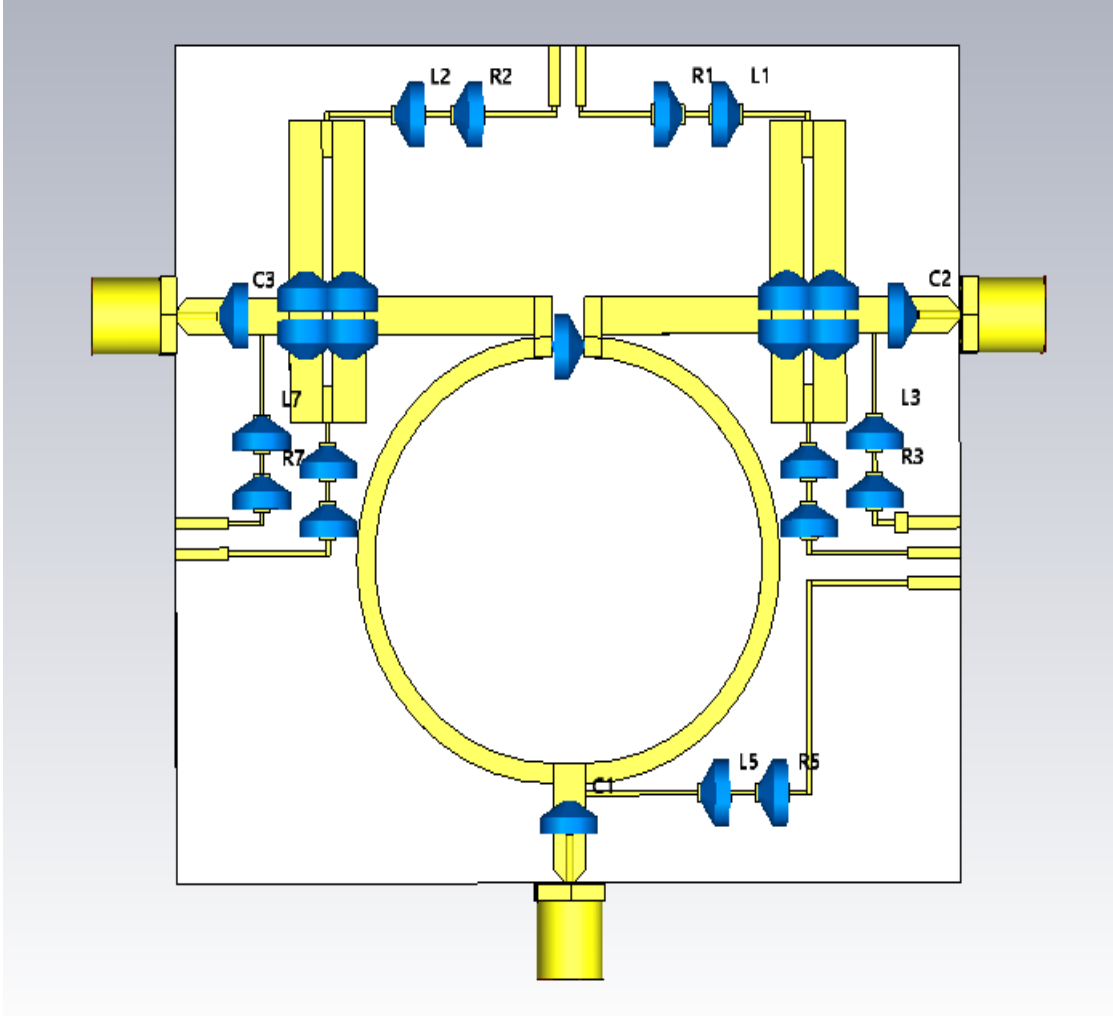
Tasarım aşamasında elde edilen bilgi ve verilere dayanarak, bir adet 2×1 güç bölücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu tasarım sürecinde Tablo 9’da sunulan veriler kullanılmış, modelleme ve analiz işlemleri CST Studio Suite ortamında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 9. R, L ve C Değerleri

Parametreler	Değer
R	100 Ω
L	10 μ H
C	4,7 μ F

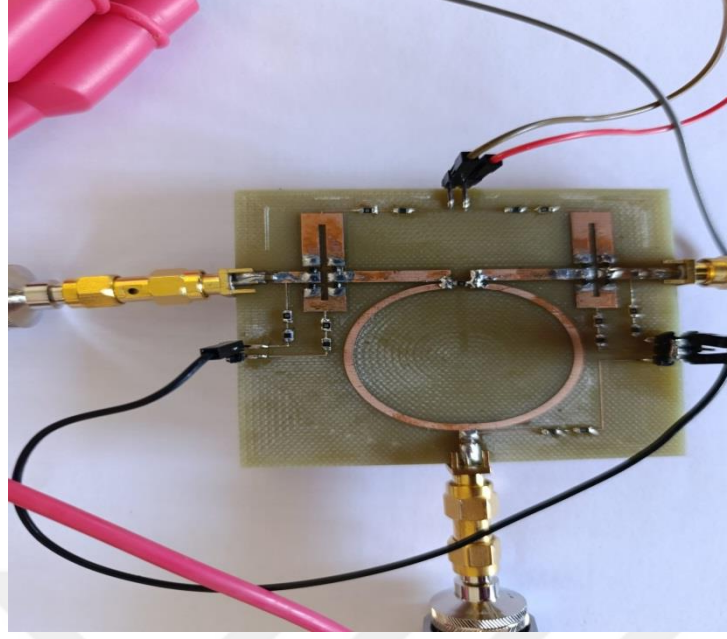
Gerçek ortamda uygulanabilirliği sağlamak amacıyla, anahtarlama elemanı olarak yüksek hızlı PIN diyotlar tercih edilmiştir. Bu kapsamda BAR8802 PIN diyotu kullanılmıştır. Giriş sinyalini korumak ve istenmeyen etkileşimleri azaltmak amacıyla, önceki tasarıma ek olarak girişlere kapasitörler (C) entegre edilmiştir.

Ayrıca, diyotların iletim ve kesim durumlarını kontrol edebilmek için tasarıma doğru akım (DC) beslemesi uygulanmış, bu akımın istenilen yolda yönlendirilmesini sağlamak için uygun değerlerde dirençler (R) ve endüktörler (L) yerleştirilmiştir. Şekil 63, söz konusu güç bölücünün CST Studio Suite ortamında oluşturulan tasarımını göstermekte, Şekil 64 ise bu tasarımın sahada uygulanmış fiziksel prototipine ait görseli göstermektedir.



Şekil 63. Gelişmiş 2x1 Güç Bölücü - CST

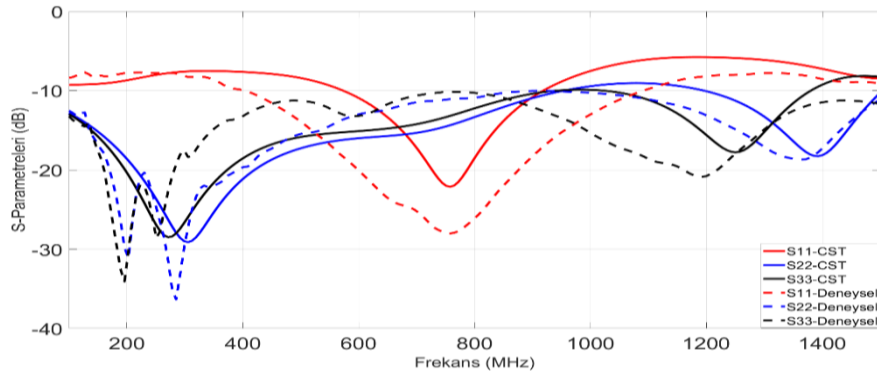
Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılmasında, CST Studio Suite yazılımından elde edilen sonuçlar ile vektör ağ analizörü (VNA) aracılığıyla yapılan ölçümler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla MATLAB yazılımı kullanılmış, her iki veri seti ortak bir frekans ekseninde analiz edilerek grafiksel olarak görselleştirilmiştir.



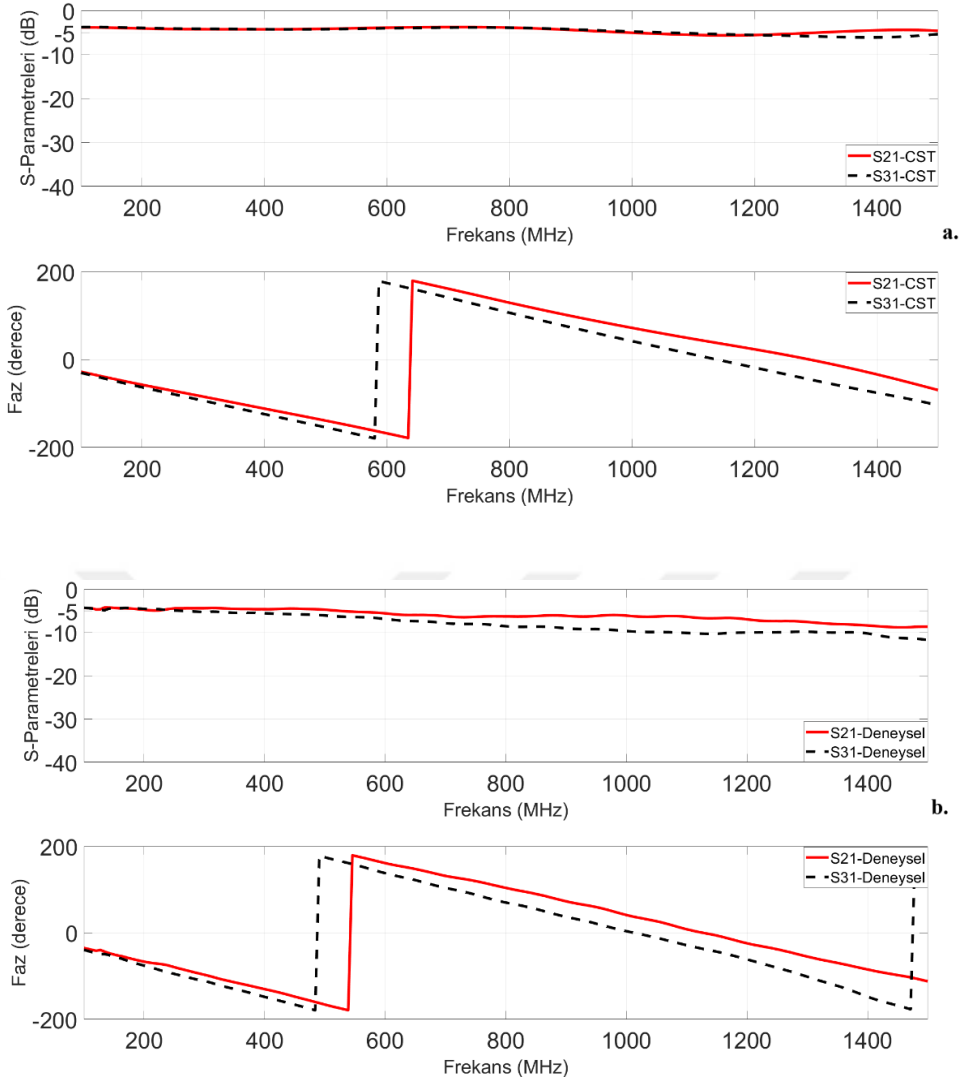
Şekil 64. Gelişmiş 2x1 Güç Bölücü - Deneysel

Bu tasarımda 4 farklı durum bulunmaktadır:

$+4^\circ$ faz durumu: Bu durumda, 4 adet anahtar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Soldan başlayarak, K_1 , ikinci çıkışa uygulanmış, K_2 ise üçüncü çıkışa uygulanmıştır. Bu düzenleme, gerekli faz farklarını sağlamıştır. Şekil 65, VNA ve CST sonuçları için S11, S22 ve S33 parametrelerini göstermektedir. Şekil 66(a), CST simülasyon verilerine dayanarak S21 ve S31 parametrelerine ait genlik ve faz değerlerini göstermektedir. Şekil 66(b) ise VNA ölçüm verilerine dayalı olarak aynı parametreler için elde edilen genlik ve faz bilgilerini sunmaktadır.

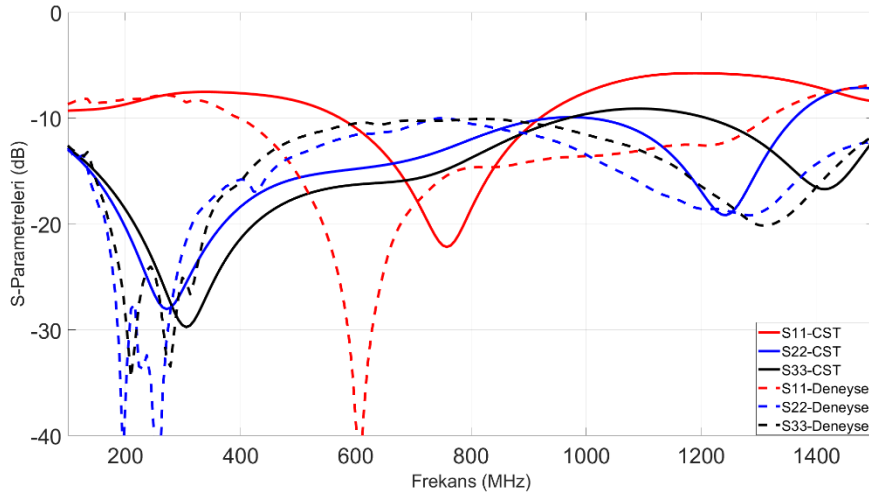


Şekil 65. $+4^\circ$ için S11, S22 ve S33 değişimleri

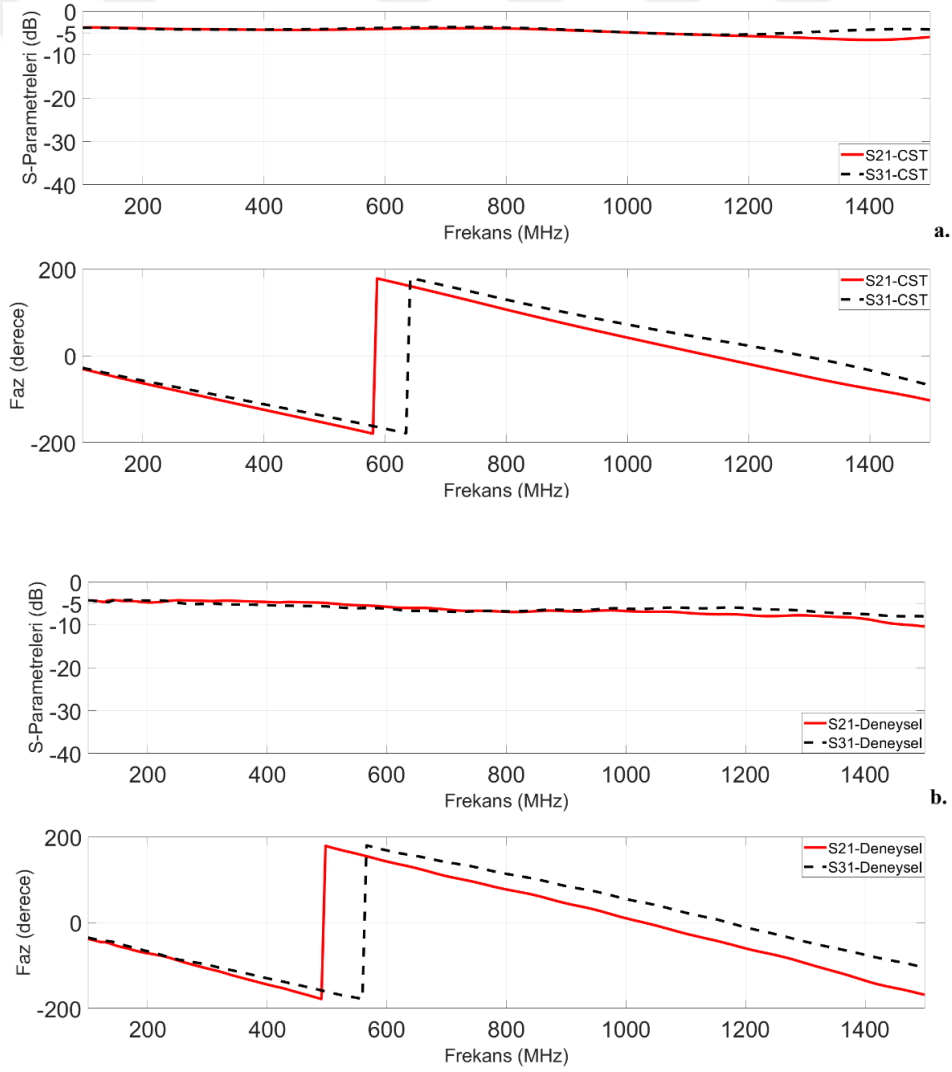


Şekil 66. +4° için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz

-4° faz durumu: Bu durumda, 4 adet anahtar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Soldan başlayarak, K_2 ikinci çıkışa uygulanmıştır, K_1 , üçüncü çıkışa uygulanmıştır. Bu düzenleme gerekli faz farklarını sağlamıştır. S11, S22 ve S33 parametrelerine ait VNA ve CST simülasyon sonuçları Şekil 67’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 68(a)’da, CST programından elde edilen veriler kullanılarak S21 ve S31 parametrelerine ait genlik ve faz değişimleri sunulmaktadır. Buna karşılık, Şekil 68(b) ise VNA ölçüm sonuçlarına dayalı olarak aynı parametrelerin genlik ve faz bilgilerini göstermektedir.

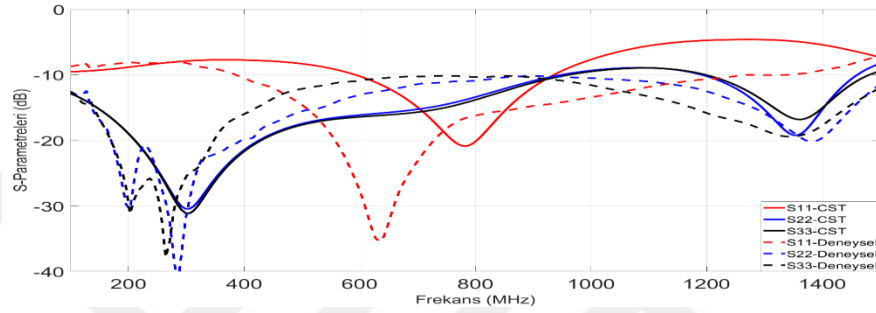


Şekil 67. -4° için S11, S22 ve S33 değişimleri

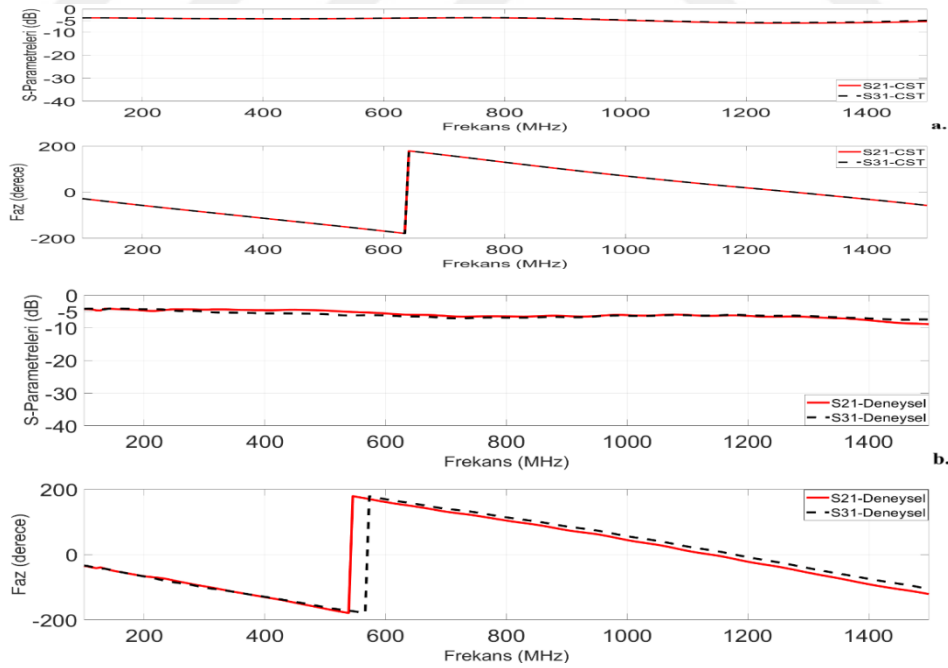


Şekil 68. -4° için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneyssel için genlik ve faz

İlk 0° Durumu: Bu durumda, 4 adet anahtar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Soldan başlayarak, K_1 , ikinci çıkışa uygulanmış, K_1 ise üçüncü çıkışa uygulanmıştır. Bu düzenleme, faz eşitliğini sağlar ve kapasiteyi korur. VNA ile yapılan ölçümler ile CST simülasyonları karşılaştırıldığında, S11, S22 ve S33 parametrelerine ilişkin veriler Şekil 69’da sunulmaktadır. Şekil 70(a), CST simülasyon sonuçlarına dayalı olarak S21 ve S31 parametrelerinin genlik ve faz değerlerini gösterilmektedir. Buna karşılık, Şekil 70(b), VNA ölçümlerinden elde edilen genlik ve faz değerlerini göstermektedir.

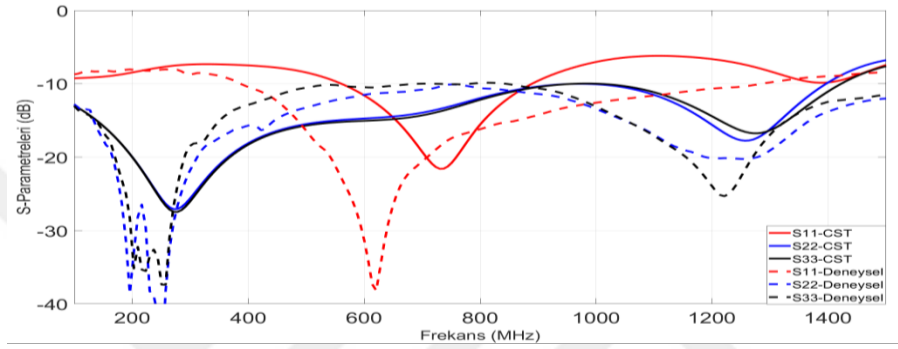


Şekil 69. İlk 0° durumu için S11, S22 ve S33 değişimleri

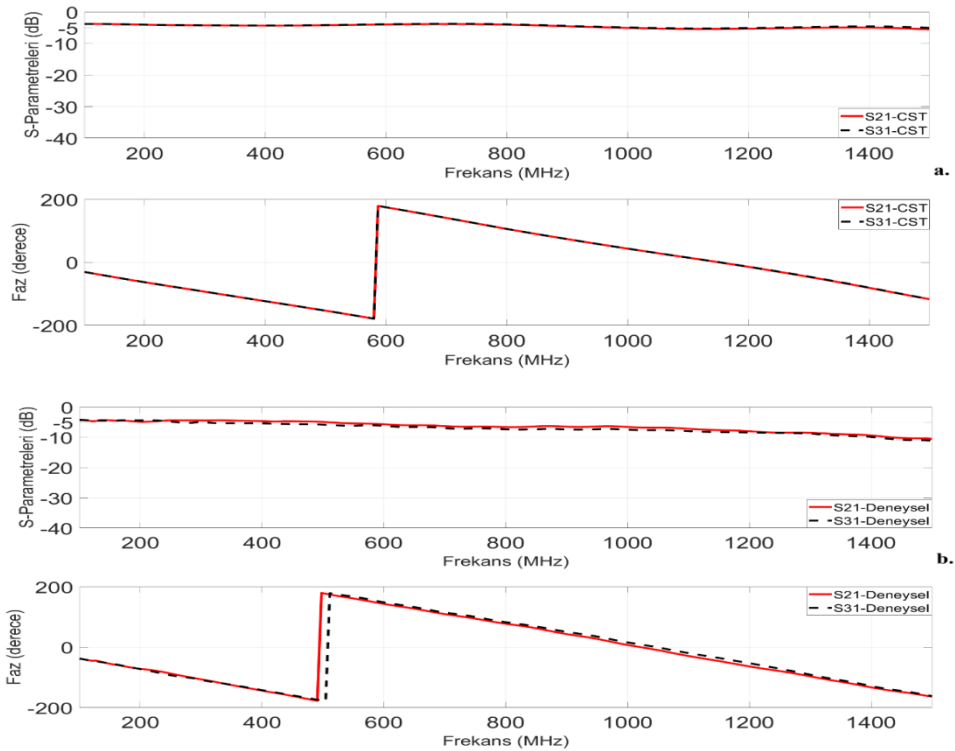


Şekil 70. İlk 0° durumu için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz

İkinci 0° Durumu: Bu durumda, 4 adet anahtar açıldığında, besleme hattındaki dallanma artışları şu şekilde sıralanmıştır: Soldan başlayarak, K_2 , ikinci çıkışa uygulanmış, K_2 ise üçüncü çıkışa uygulanmıştır. Bu düzenleme da faz eşitliğini sağlamakta ve kapasiteyi korumaktadır. VNA ile yapılan ölçümler ile CST simülasyonları karşılaştırıldığında, S11, S22 ve S33 parametrelerine ilişkin veriler Şekil 71’de sunulmaktadır. Şekil 72(a), CST simülasyon sonuçlarına dayalı olarak S21 ve S31 parametrelerinin genlik ve faz değerlerini göstermektedir. Buna karşılık, Şekil 72(b), VNA ölçümlerinden elde edilen genlik ve faz değerlerini ortaya koymaktadır.



Şekil 71. İkinci 0° durumu için S11, S22 ve S33 değişimleri



Şekil 72. İkinci 0° durumu için S21 ve S31 değişimi: a. CST için genlik ve faz b. Deneysel için genlik ve faz

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, beşinci nesil (5G) baz istasyonlarında kullanılmak üzere pattern yapılandırılabilir yüksek kazançlı anten dizisinin tasarımı sunulmuştur. Özellikle, geniş kapsama alanı ve yüksek veri iletim kalitesi sağlayabilecek, patterni yapılandırılabilen 1x8 mikroşerit yama anten dizileri tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Bu kapsamda, faz kaydırma tekniği kullanılarak anten patterninin istenilen doğrultuya yönelmesi sağlanmıştır. Simülasyonlar sonucunda, antenin $+4^\circ$, -4° ve 0° doğrultularına başarıyla yönlendirilebildiği ve her durumda benzer performans değerleri elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu özellik, antenin dinamik ortam koşullarına uyum sağlama ve veri iletim kalitesini optimize etme kabiliyeti açısından büyük önem taşımaktadır.

Çalışma kapsamında, iki farklı besleme yöntemi kullanılarak iki ayrı anten dizisi tasarlanmıştır.

- Mikroşerit hat beslemeli tasarımda, güç dağıtımı, dielektrik tabanın üzerine mikroşerit hatlarla entegre edilen bir besleme ağı ile sağlanmıştır. Bu yapıda, yüksek frekanslı performans için Rogers RO4003C dielektrik malzemesi tercih edilmiştir.
- Koaksiyel hat beslemeli tasarımda ise, daha kompakt ve uygulanabilir bir yapı elde etmek amacıyla koaksiyel besleme tekniği kullanılmış ve bu yapı, üçü klasik ve dört gelişmiş güç bölücüsü olmak üzere toplam yedi adet 2x1 güç bölücü ile beslenmiştir. Güç bölücüler FR-4 malzemesi üzerine entegre edilmiştir.

Bu çalışmada, anten ışınının istenilen yöne yönlendirilmesi amacıyla faz kaydırma (phase shifting) tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde, her bir anten elemanına uygulanan besleme hattının uzunluğu belirli bir oranda artırılmış ve bu sayede pattern yapılandırması sağlanmıştır. Ayrıca, besleme yapısına entegre edilen anahtarlama elemanları aracılığıyla pattern yönü kontrol edilebilmiş, böylece farklı kapsama alanlarına yönelik elektronik olarak yeniden yapılandırılabilme ve dinamik yönlendirme imkanı sağlanmıştır.

Her iki yapı, CST Studio Suite yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu program, yüksek frekanslar alanında en önemli üç boyutlu elektromanyetik simülasyon araçlarından biridir. CST Studio Suite, antenler, yönlendiriciler ve radyo frekanslı (RF) bileşenlerinin tasarımı ve analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Program, karmaşık yapılarıdaki elektromanyetik dalgaların davranışlarını son derece hassas şekilde modelleyebilme yeteneğiyle öne çıkmaktadır.

Geliştirilmiş bir 2x1 güç bölücü, CST programı kullanılarak tasarlanmış ve sahada fiziksel olarak üretilmiştir. Üretim sürecinden sonra, gerçek ölçümler Vektör Ağ Analizörü (VNA) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar, CST'den elde edilen benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Farklılıkların ayrıntılı bir şekilde analiz edilebilmesi için hem VNA hem de CST verileri MATLAB programı aracılığıyla içe aktarılmış ve aşağıdaki parametreler için grafiksel ve analitik karşılaştırmalar yapılmıştır:

- S11, S22 ve S33
- S21 ve S31 (Genlik ve faz değerleri)

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, deneysel ve teorik sonuçlar arasında küçük sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu sapmaların büyük ölçüde, FR-4 yalıtkan malzemesinin yüksek kayıp katsayısından ve muhtemel üretim toleranslarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, faz kaydırma tekniği kullanılarak yönü yeniden ayarlanabilen dizi antenlerin, özellikle yüksek spektral verimlilik ve geniş kapsama alanı gerektiren 5G iletişim ortamlarında, modern haberleşme sistemlerinin performansını artırmak için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Geliştirilen anten dizisinin çalışma frekansı 780 MHz olarak belirlenmiştir. Mikroşerit hat beslemeli tasarımın 803–757 MHz aralığında başarılı bir şekilde çalışarak, 5G sistemlerinde yaygın olarak kullanılan n28 frekans bandını (703–803 MHz) kapsadığı gösterilmiştir. Bu durum, antenin hem hedeflenen bantta çalışabildiğini hem de pratik uygulamalar açısından uygunluk taşıdığını göstermektedir. Her iki tasarım da yönlendirme kabiliyeti açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Mikroşerit hat beslemeli tasarım, yüksek performansı ve düşük kayıpları sayesinde daha üstün sonuçlar üretmiştir. Buna karşılık, Koaksiyel hat beslemeli tasarım kompakt yapısı ve uygulama kolaylığı açısından avantaj sağlasa da kullanılan FR-4 malzemesinin yüksek dielektrik kayıpları nedeniyle performans açısından sınırlamalar ortaya koymuştur. Ayrıca, CST Studio Suite yazılımının kullanımı, fiziksel prototip ihtiyacını azaltarak tasarım sürecini hızlandırmış, MATLAB ile yapılan analizler ise deneysel ve teorik verilerin doğrulanmasında önemli rol oynamıştır. Sonuç olarak, geliştirilen paten yapılandırılabilir anten dizisi 5G için hem performans hem de uygulama açısından umut vaat eden bir çözüm sunmaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmanın bulgularına dayanarak, gelecekteki çalışmalarda anten performansının artırılması adına daha düşük kayıplı dielektrik malzemelerin kullanılması ve tüm anten dizisinin fiziksel olarak üretilerek saha testlerinin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, anten yönlendirmesinin yapay zeka destekli algoritmalarla optimize edilmesi ve dizinin daha büyük yapılara ölçeklenerek kazanç ile kapsama alanının artırılması, 5G sistemlerinin gereksinimlerine daha iyi cevap verecek yapılar geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Aataş, İ., Abbasov, T., & Kurt, M. B. (2018). Doğrusal ve düzlemsel mikroşerit dizi antenlerin tasarımı ve kazanç yönünden karşılaştırılması. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(2), 617–624.
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065–1082.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Bayer Keskin, S. E., Güler, C., Aymaz, R. B., Gürsoy, G. S., & Özbey, E. (2019). 2.4 GHz geniş bant mikroşerit anten tasarımı. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 5(1), 1–14.
- Bronk, K., Lipka, A., & Niski, R. (2018). The technical concept of using the 700 MHz band as a base for 5G smart cities networks in Poland. In *2018 Baltic URSI Symposium (URSI)* (pp. 269–272).
- Casu, G., Moraru, C., & Kovacs, A. (2014). Design and implementation of microstrip patch antenna array. In *2014 10th International Conference on Communications (COMM)* (pp. 1–4). IEEE.
- Chen, L., Liu, W., Lin, H., Zhao, Y., & Ge, L. (2024). Beam downtilt reconfigurable linear antenna array for 5G/6G macro base stations. *Electronics Letters*, 60(24), 1–4.
- Cheng, K. K. M., & Wong, F. L. (2007). A new Wilkinson power divider design for dual band application. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 17(9), 664–666.
- Dolph, C. L. (1946). A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beam width and side-lobe level. *Proceedings of the IRE*, 34(6), 335–348.
- Erdoğan, K. (1993). *Antenler I: İnce antenler*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon.
- Fernandez, M. D., Herraiz, D., Herraiz, D., Alomainy, A., & Belenguer, A. (2022). Design of a wide-bandwidth, high-gain and easy-to-manufacture 2.4 GHz floating patch antenna fed with the through-wire technique. *Applied Sciences*, 12(11), 5630.
- Hamdoun, A., Himdi, M., Lafond, O., & Roy, L. (2017). Switched beam patch array antenna using SPDT GaN HEMT switches. In *2016 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, (pp. 1558–1562).
- Hamieh, I. A. (2012). *A 77 GHz reconfigurable micromachined microstrip antenna array* (Master's thesis). University of Windsor, Ontario, Canada.

- Harvey, J. F., Steer, M. B., & Rappaport, T. S. (2019). Exploiting high millimeter wave bands for military communications, applications, and design. *IEEE Access*, 7, 52350–52359.
- Jamshidi, M. B., Roshani, S., Talla, J., Roshani, S., & Peroutka, Z. (2021). Size reduction and performance improvement of a microstrip Wilkinson power divider using a hybrid design technique. *Scientific Reports*, 11, Article 7773.
- King, R. W. P., Mimno, H. R., & Wing, A. H. (1945). *Transmissions lines antennas and wave guides*. McGraw-Hill.
- Kraus, J. D., & Marhefka, R. J. (2002). *Antennas for all applications*. McGraw-Hill.
- Larsson, C. (2018). Access networks. In 5G networks (pp. 203–222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812707-0.00014-0>.
- Mansour, G., & Nugoolcharoenlap, E. (2020). Microstrip array antennas for point-to-point WLAN links. *The International Journal of Engineering and Information Technology (IJEIT)*, 6(2), 197–201.
- Matin, M. A., & Sayeed, A. I. (2010). A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna. *WSEAS Transactions on Communications*, 9(1), 63–72.
- Munson, R. (1974). Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 22(1), 74–78.
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering*. John Wiley & Sons.
- Ramesh, G., Prakash, B., Inder, B. & Apisak, I. (2001). *Microstrip antenna design handbook*. Artech House.
- Reddy, D., Reddy, R., Mohith, & Shilpa, B. (2023). Design of 4x1 circular microstrip patch array antenna for WLAN applications. *E3S Web of Conferences*, 391, 01068.
- Reddy, M. S., & Panicker, R. (2019). Antenna and wave propagation [Lecture notes]. Malla Reddy College of Engineering & Technology.
- Reis, J. R., Vala, M., Oliveira, T. E., Fernandes, T. R., & Caldeirinha, R. F. S. (2021). Metamaterial-inspired flat beamsteering antenna for 5G base stations at 3.6 GHz. *Sensors*, 21(23), 8116.
- Satılmış, G., & Güneş, F. (2018). Mikroşerit dizi anten için besleme ağı tasarımı ve uygulanması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 32–38.
- Semkin, V., Ferrero, F., Bisognin, A., Ala-Laurinaho, J., Luxey, C., Devillers, F., & Raisanen, A. V. (2015). Beam switching conformal antenna array for mm-wave communications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 28–31.

- Shaikh, F. A., Khan, S., Alam, A. Z., Habaebi, M. H., Khalifa, O. O., & Khan, T. A. (2018). Design and analysis of 1-to-4 Wilkinson power divider for antenna array feeding network. In *2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*. IEEE.
- Siddiqui, S. I., Bashir, S., Khan, A., Ghafoor, S., & Aziz, I. (2024). A dual-band high-gain beam steering antenna array for 5G sub-6 GHz base station. *Scientific Reports*, 14, Article 26517.
- Singh, I., & Tripathi, V. S. (2011). Microstrip patch antenna and its applications: A survey. *IJCTA*, 2(5), 1595–1599.
- Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons.
- Sze, S. M., & Kwok K. N. (2006). *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Wu, L., Sun, Z., Yilmaz, H., & Berroth, M. (2006). A dual-frequency Wilkinson power divider. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(1), 278–284.
- Yazgan, A. (2013). Antenna reconfiguration controller for 5G communication systems. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, 4(Special Issue), 334–337.
- Yazgan, A. (2015). *RoF tabanlı çok bandlı bilişsel radyo için yeniden yapılandırılabilir Sierpinski fraktal anten sistemi tasarımı* (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- 3GPP. (2022). *TS 38.521-1 V17.5.0* (p. 28). European Telecommunications Standards Institute.

ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini 2013'te Alamal Lisesi'nde tamamladı. 2014 yılında İstanbul Üniversite'deki Dil Merkezinde Türkçe dili eğitimi aldı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nden Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümü'nden mezun oldu. 2023 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Kabul Edilen

Bildiriler:

Kayalı, H. D. and Yazgan, A., Reconfigurable Power Divider Design for Beam Switchable Antennas, 21th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture and Mathematical Sciences, 2025, İstanbul, Türkiye.