

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN RADYAL
AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN VE FAZ DÜZELTİCİ YÜZEY
TASARIMI

Onur CUMURCU

DOKTORA TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Danışman

Doç. Dr. Hamid TORPİ

Eş Danışman

Dr. Alper ÇALIŞKAN

Ocak, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**5G HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN RADYAL AÇIKLIKLI
DİZİ ANTEN VE FAZ DÜZELTİCİ YÜZEY TASARIMI**

Onur CUMURCU tarafından hazırlanan tez çalışması 25.01.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Haberleşme Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hamid TORPİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Alper ÇALIŞKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sedef Kent PINAR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut KARTAL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Peyman MAHOUTI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Hamid TORPİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “5G haberleşme sistemleri için radyal açıklıklı dizi anten ve faz düzeltici yüzey tasarımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur CUMURCU

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Tezim ve tezimle alakalı yayınının hazırlanması sürecinde her zaman değerli fikirleriyle yanımda olan ve beni aydınlatan değerli danışmanım Doç. Dr. Hamid TORPİ'ye, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen değerli hocam Alper ÇALIŞKAN'a ve tez izleme dönemimde çalışmalarımda kıymetli yorumlarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Sedef KENT PINAR'a ve Doç. Dr. Umut Engin AYTEN'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmanın ve yayınının desteklenmesine olanak sağlayan TÜBİTAK BİLGEM yöneticilerimize teşekkür ederim. Özellikle çalışmamın gerçekleşmesi sürecinde verdikleri katkılardan dolayı Dr. Dağhan DOĞAN'a, Dr. Eren AKKAYA'ya ve Dr. Fatma ZENGİN'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak beni bugünlere hazırlayan, hayatım ve eğitimim süresince desteklerini her zaman yanımda hissettiğim aileme sonuz teşekkürler.

Onur CUMURCU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	17
1.1 Literatür Özeti	17
1.2 Tezin Amacı	18
1.3 Hipotez	18
2 RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI	19
2.1 Genel Bilgiler	19
2.2 Anten Bileşenleri	22
2.2.1 Yansıtıcı Plaka	22
2.2.2 Referans Plaka	22
2.2.3 Besleme Konnektörü	22
2.3 Anten Tasarımı	23
2.3.1 Tasarım Aşamaları	23
2.3.2 Birim Hücre Tasarımı	24
2.3.3 Açıklık Dağılımı	27
2.3.4 Plakalar Arası Tasarım	29
2.3.5 Besleme Konnektörü Tasarım	31
2.3.6 Simülasyon	32
2.3.7 Doğrulma	32
3 YÜKSEK VERİMLİ RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI	33
3.1 Klasik Tasarım	33
3.1.1 Birim Hücre ve Açıklık Dağılımı Tasarımı	33
3.1.2 Plakalar arası Tasarım	34
3.1.3 Besleme Konnektörü Tasarım	34
3.1.4 Simülasyon ve Doğrulama	35
3.2 Verimliliği Arttırılmış RADA Tasarımı	42

3.2.1 Simülasyon Sonuçları	43
3.2.2 Doğrulama	45
3.2.3 Ölçüm Sonuçları	49
4 GENİŞ BANT RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI	55
4.1 Çalışma Prensibi	55
4.2 Tasarım.....	56
5 IŞIMA ÖRÜNTÜSÜ DÖNDÜRÜLMÜŞ RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI	64
5.1 Çalışma Prensibi	64
5.2 Tasarım.....	66
6 FAZ DÜZELTİCİ YÜZEY TASARIMI	70
6.1 Giriş.....	70
6.2 Faz Kaydırıcı Yapılar.....	71
6.3 Birim Hücre Tasarımı	73
6.4 Parametrik Analiz	78
7 SONUÇ	81
KAYNAKÇA	84
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	88

SİMGELİSTESİ

S_ϕ	Birim hücrelerin merkezleri arasında ϕ yönündeki uzaklık
S_ρ	Birim hücrelerin merkezleri arasında ρ yönündeki uzaklık
k	Dalga numarası
ϵ_r	Dielektrik katsayısı
f	Frekans
c	Işık hızı
λ_g	Kılavuzlanmış dalga boyu
ρ	Radyal konum
λ_0	Serbest uzay dalga boyu
Γ	Yansıma katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

BDK	Baskı Devre Kartı
DP	Dairesel Polarizasyon
LP	Lineer Polarizasyon
RADA	Radyal Açıklıklı Dizi Anten
SMA	SubMiniature version A
VBA	Visual Basic
VNA	Vector Network Analyzer



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Detaylı RADA yapısı.....	19
Şekil 2.2	Uydu haberleşmesi için tasarlanmış RADA	20
Şekil 2.3	RADA tasarım aşamaları	23
Şekil 2.4	Birim hücre modeli	25
Şekil 2.5	Yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların yerleşimi	27
Şekil 2.6	Yansıtıcı plaka üzerindeki spiral hatların yerleşimi.....	28
Şekil 2.7	RADA enine kesit	30
Şekil 2.8	RADA besleme konnektörü.....	31
Şekil 3.1	Besleme konnektörü yapısı	34
Şekil 3.2	Plakalar arası boşlukta ilerleyen güç.....	37
Şekil 3.3	Tüm bileşenleriyle RADA yapısı.....	37
Şekil 3.4	Farklı açıklık uzunlukları için geri yansımaya sonuçları.....	38
Şekil 3.5	Farklı açıklık uzunlukları için anten yönlendiriciliği sonuçları	38
Şekil 3.6	Farklı kuplaj katsayıları için geri yansımaya sonuçları	39
Şekil 3.7	Farklı kuplaj katsayıları için anten yönlendiriciliği sonuçları	40
Şekil 3.8	Hatlara göre değişen açıklık uzunluklarının yansımaya etkisi	40
Şekil 3.9	Hatlara göre değişen açıklık uzunluklarının anten yönlendiriciliğine etkisi.....	41
Şekil 3.10	Önerilen yeni yöntemle göre dağılımı yapılmış açıklıklar.....	42
Şekil 3.11	Klasik tasarım RADA ve yeni metot RADA'nın geri yansımaya sonuçları	43
Şekil 3.12	Klasik tasarım RADA ve yeni metot RADA'nın ışıma örüntüleri	44
Şekil 3.13	Yeni metot RADA'nın yakın alan analizi.....	45
Şekil 3.14	Lazer kesim metodu ile açılmış yansıtıcı plakadaki açıklıklar	48
Şekil 3.15	Su jet kesim metodu ile açılmış yansıtıcı plakadaki açıklıklar	48
Şekil 3.16	Besleme konnektörü disk başlığı bağlantısı.....	48
Şekil 3.17	Prototip anten ölçüm düzeneği.....	49
Şekil 3.18	Prototip antenin geri yansımaya katsayısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları.....	49
Şekil 3.19	Prototip antenin ışıma örüntüsüne ait simülasyon ve ölçüm sonuçları ($\varphi=0^\circ$)	50
Şekil 3.20	Prototip antenin ışıma örüntüsüne ait simülasyon ve ölçüm sonuçları ($\varphi=90^\circ$)	50

Şekil 3.21	Prototip antenin eksensel oranına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları	51
Şekil 3.22	Prototip antenin frekansa göre kazancının değişimi	52
Şekil 4.1	Bant genişliğini arttırmak için oluşturulan hibrit yapı	56
Şekil 4.2	Çalışma frekansına (f_0) göre belirlenmiş S_p ve plakalar arası ilerleyen elektromanyetik dalga	57
Şekil 4.3	f_1 frekansına sahip elektromanyetik dalganın plakalar arasında ilerleyişi	57
Şekil 4.4	f_2 frekansına sahip elektromanyetik dalganın plakalar arasında ilerleyişi	57
Şekil 4.5	Yansıtıcı plaka altına konumlandırılan dielektrik malzemeler	59
Şekil 4.6	Klasik tarasım RADA ve bant genişliği arttırılmış RADA'nın frekansa göre kazanç değişimi.....	60
Şekil 4.7	Bant genişliği arttırılmış RADA'nın geri dönüş kaybı	61
Şekil 4.8	Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 24 GHz ışıma örüntüsü	61
Şekil 4.9	Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 25 GHz ışıma örüntüsü	62
Şekil 4.10	Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 26 GHz ışıma örüntüsü	62
Şekil 4.11	Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 26.5 GHz ışıma örüntüsü	63
Şekil 5.1	İşıma örüntüsünü döndürmek için tasarlanan birinci yansıtıcı plaka..	65
Şekil 5.2	İşıma örüntüsünü döndürmek için tasarlanan ikinci yansıtıcı plaka...	65
Şekil 5.3	İkinci yansıtıcı plaka kullanılarak ışıma örüntüsü döndürülmüş RADA'nın bileşenleri	67
Şekil 5.4	İkinci yansıtıcı plaka kullanılarak ışıma örüntüsü döndürülmüş RADA'nın geri dönüş kaybı	67
Şekil 5.5	Birinci ve ikinci yansıtıcı plakalara göre tasarlanmış RADA'ların ışıma örüntüleri.....	68
Şekil 5.6	İkinci yansıtıcı plakaya göre tasarlanmış RADA'nın uzak alan ışıma örüntüsü.....	68
Şekil 6.1	Dielektrik malzemeden ve baskı devre kartından oluşan birim hücre modelleri	71
Şekil 6.2	Faz düzeltici yüzey sistemi	56
Şekil 6.3	Tasarımı yapılan antenin $x = \lambda_0/4$ için yakın alan faz dağılımı	56
Şekil 6.4	Örnek birim hücrenin yandan ve üstten görünüşü	56
Şekil 6.5	Birim hücrelere bölünmüş örnek RADA yansıtıcı yüzeyi	56
Şekil 6.6	Tasarlanan RADA'nın yansıtıcı yüzeyinin yarısı için oluşturulmuş faz düzeltici yüzey modeli	56
Şekil 6.7	Tasarlanan birim hücrenin katmanları	56
Şekil 6.8	Tasarlanan birim hücrenin simülasyon ortamı.....	56

Şekil 6.9	Sabit x ve değişen g parametrelerine göre birim hücrenin kayıp değerleri	56
Şekil 6.10	RADA ve önüne konumlandırılan faz düzeltici yüzey modeli	79
Şekil 6.11	Faz düzeltici yüzeysiz ve faz düzeltici yüzeyli yapının yakın alan faz dağılımı karşılaştırılması ($x = \lambda_0/4$)	79
Şekil 6.12	Faz düzeltici yüzeysiz ve faz düzeltici yüzeyli RADA'nın uzak alan ışıma örüntüsü	56



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Besleme konnektörüne ait tasarım parametreleri.....	31
Tablo 3.1	Tasarımlarda kullanılan besleme konnektörüne ait parametrelerin sayısal değerleri	35
Tablo 3.2	26 GHz’ de farklı açıklık uzunluklarına göre elde edilen anten performansları	41
Tablo 3.3	Klasik tasarım RADA ve yeni metot RADA’nın performansları	44
Tablo 3.4	Yeni metoda göre tasarlanmış prototip antenin parametreleri	46
Tablo 3.5	Prototip antenin 26 GHz’deki ölçüm sonuçları	51
Tablo 3.6	Yeni metot ile tasarlanan antenin önceki tasarımlarla kıyaslanması ..	54
Tablo 4.1	Bant genişliği arttırılmış RADA’nın tasarım parametreleri.....	58
Tablo 4.2	Bant genişliği arttırılmış RADA’da kullanılan dielektrik malzemelere ait parametreler	60
Tablo 6.1	Örnek birim hücreye ait genel tasarım parametreleri.....	58
Tablo 6.2	Tasarlanan birim hücrenin parametreleri	58
Tablo 6.3	Tasarlanan birim hücrenin geometrik parametrelerinin değişim aralıkları	58

5G Haberleşme Sistemleri için Radyal Açıklıklı Dizi Anten ve Faz Düzeltici Yüzey Tasarımı

Onur CUMURCU

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Hamid TORPİ

Eş-Danışman: Dr. Alper ÇALIŞKAN

Radyal açıklıklı dizi antenler, küçük fiziksel boyutlarda yüksek yönlendiricilik, yüksek kazanç, düşük yan lob vb. teknik özellikleri sağlayabilme potansiyeline sahip yapılardır. Açıklık verimliliğini artırma, 3 dB kazanç bant genişliğini ve ışıma örüntü kalitesini iyileştirme, ışıma örüntüsünü belirli yönlere döndürme, empedans bant genişliğinin artırma üzerine son yıllarda ciddi çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 5G FR2 bandında çalışabilecek radyal açıklıklı dizi anten tasarımı yapılmıştır. Bu antenlerin 5G mikrodalga linklerinde, parabolik reflektör antenlere alternatif olarak kullanılabilmesi için açıklık verimini arttıracak yeni bir metot üzerinde çalışılmıştır. Klasik yöntemle tasarlanan radyal açıklıklı dizi antenlerde yüksek kazanç ve verimlilik elde edebilmek için açıklıkların boyları anten merkezinden uçlara doğru arttırılmaktadır. Bu çalışmada ise açıklıkların hem boyları merkezden anten uçlarına değişecek şekilde dağıtılmış, hem de anten uçlarında doğru yoğunluğu arttırılarak, plakalar arası boşlukta ilerleyen

elektromanyetik dalgadan maksimum verimli olacak şekilde yararlanılmaya çalışılmıştır. Simülasyon çalışmalarının ardından yapılan prototip üretimle gerekli doğrulamalar yapılış ve açıklık verimliliğinde yaklaşık olarak 10 % iyileşme sağlanmıştır.

Tez çalışmasının diğer bölümlerinde kazanç bant genişliğini artırma ve ışıma örüntüsünü döndürme konuları ele alınmıştır. Bu çalışmalar yapılırken tasarlanan anten üzerinde minimum değişiklikler yapılmış, elde edilen sonuçlar bölüm sonlarında çeşitli görsellerle sunulmuştur. Son bölümünde ise tasarlanan antenin yakın alan faz değişimi incelenmiş ve antenin hüzmeye tarama işlemine uygun hale gelebilmesi için faz düzeltici yüzey tasarımı yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Radyal açıklıklı dizi anten, açıklık verimi, 5G, ışıma örüntüsü döndürme, faz düzeltici yüzey.

Radial Line Slot Array Antenna and Phase Correcting Surface Design for 5G Communication Systems

Onur CUMURCU

Department of Electronics and Communication Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Dr. Hamid TORPİ

Co-supervisor: Dr. Alper ÇALIŞKAN

Radial line slot array antennas have attractive features including high directivity, high gain, and low side lobe level with a low planar profile. Serious studies have been carried out in recent years on increasing aperture efficiency, improving 3 dB gain bandwidth and radiation pattern quality, beam tilted in certain directions, and increasing impedance bandwidth.

In this thesis, a radial line slot array antenna that can operate in the 5G FR2 band has been designed. In order to use these antennas as an alternative to parabolic reflector antennas in 5G microwave links, a new method to increase the aperture efficiency has been studied. To achieve high gain and efficiency in radial line slot array antennas designed with the classical method, the lengths of the slots are increased from the center to the antenna ends. In this study, both the lengths of the slots are distributed in such a way that their lengths vary from the center to the antenna ends, and the slot density is increased at the ends of the antenna to utilize the electromagnetic wave travelling in space between the plates. After the simulations, the verifications were made with the prototype production and an increase of approximately 10 % in aperture efficiency was achieved.

In the other chapters of the thesis, gain bandwidth enhancement and radiation pattern tilting are discussed. While performing these studies, minimum modifications were made on the designed antenna and the results obtained are presented with various figures at the end of the chapters. In the last chapter, the near-field phase variation of the designed antenna is analyzed, and a phase correction surface is designed to make the antenna suitable for beam scanning.

Keywords: Radial line slot array antenna, aperture efficiency, 5G, beam tilted, phase correction surface.



1.1 Literatür Özeti

Radyal açıklıklı dizi antenler, (RADA) radyal formda paralel plakalardan oluşturulmuş dalga kılavuzu antenlerdir. Bu antenlerle ilgili araştırmalar 1950'li yıllarda Goebels ve Kelly'nin çalışmaları ile başlamıştır. Radyal dalga kılavuzu formundaki paralel plakalar üzerine oluşturulan halka açıklıklarla ilk konsept tasarım ortaya konulmuştur [1]. 1980'li yıllarda Ando ve Goto, Goebels ve Kelly'nin yapmış olduğu çalışmaları geliştirerek 12 GHz'de çalışan ve uydu haberleşmesi alanında kullanılabilecek RADA'yı tanıtmışlardır [2]-[4]. Tasarımı yapılan ilk RADA'lar, çift katmanlı yapıda olup lineer polarizasyona sahiptirler. RADA'ların geri dönüş kaybını iyileştirmek için hem Ando hem de Takada tarafından çeşitli yöntemler önerilmiştir. Takada'nın önerdiği yansıma engelleyici açıklık yöntemiyle, geri dönüş kaybı -2 dB'den -10 dB değerlerine düşmüş ve önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır [5]. 1990'lı yıllarda, Ando tarafından dairesel polarizasyona sahip tek katmanlı RADA anten çalışmaları yapılmıştır. Bu antenlerin tek katmanlı yapıda olması, üretim zorluğunu ortadan kaldırarak seri üretime daha elverişli olmalarını sağlamıştır. 1995'li yıllarda Avustralyalı araştırmacılar, polipropilen benzeri ürünler kullanarak anten maliyetini azaltmaya çalışmışlardır. Son yıllarda RADA'ların verimliliklerini arttırmak için birçok çalışma yapılmış, farklı metot ve teknikler kullanılmıştır. Verimlilik çalışmalarına ek olarak, antenlerin çalışma bant genişliğinin arttırıldığı, ışıma örüntüsünün iyileştirildiği ve hüzme yönünün değiştirilebildiği araştırmalar yapılmış ve bu araştırmalar prototip üretimlerle doğrulanmıştır.

Yapılan çalışmalar sayesinde performansı arttırılan RADA'lar uydu haberleşmesi, mikrodalga linkleri, RFID, Wimax, vb. alanlarda kullanılabilecek alternatif antenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektriksel performanslarının yanı sıra, fiziksel boyutlarının sağladığı avantajlar sayesinde özellikle alan sınırı olan uygulamalarda ve mobil platformlarda tercih edilebilecek antenler arasına girmişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında 5G FR2 bandında çalışabilen yüksek verimliliğe ve düşük maliyete sahip RADA tasarımı hedeflenmiştir. Verimlilik üzerine yapılan önceki çalışmalarda, RADA'nın üst plakasında bulunan açıklıkların boyları merkezden anten uçlarına doğru arttırılarak düzgün olmayan bir dağılım elde edilmiş ve anten verimliliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu çalışmada ise açıklıkların boylarının değişimine ek olarak, açıklıkların sıklığı da değiştirilerek düzgün olmayan dağılıma yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Bu bakış açısını doğrulamak için üç boyutlu elektromanyetik simülasyon programlarında gerekli tasarımlar yapılmış ve prototip anten üretilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmış, elde edilen verilerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, tezin diğer bölümlerinde tasarlanan anten üzerinde yapılacak minimum değişikliklerle kazanç bant genişliğinin arttırılabildiği ve ışıma örüntüsünün döndürülebildiği gösterilmiştir. Son bölümünde ise antenin yakın alan faz dağılımını düzeltmek için faz düzeltici yüzey tasarımı yapılmış ve antenin ışıma örüntü kalitesi arttırılmıştır.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasındaki amacımız, RADA'ların yansıtıcı yüzeyinde bulunan açıklıkların boylarının ve sıklıklarının değiştirilerek verimliliği ve ışıma örüntü kalitesi yüksek anten yapıları elde etmektir. Bu hedefi gerçekleştirebilmek için, anten verimliliğini ve ışıma örüntüsünü etkileyen önemli RADA parametreleri üzerine çalışmalar yapılmıştır.

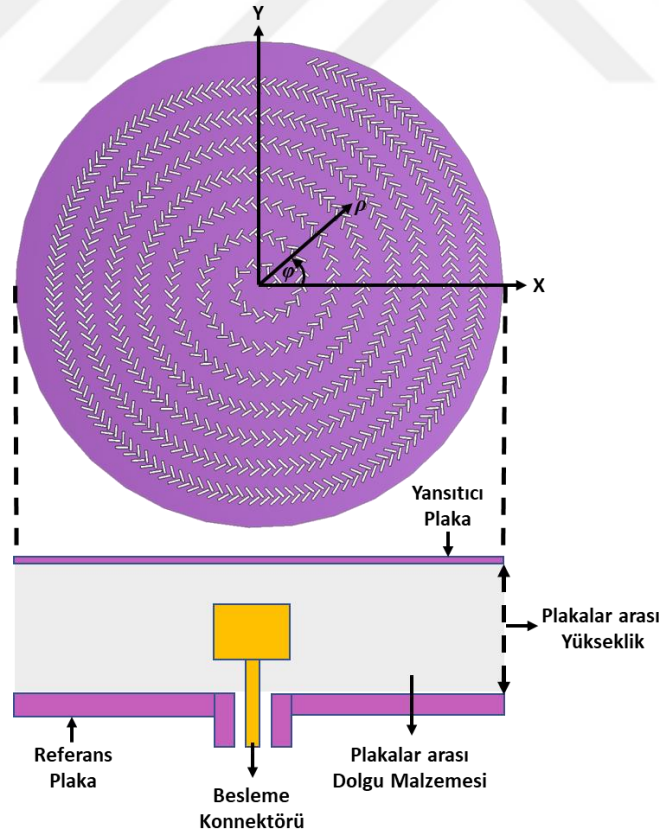
RADA'lar temelde üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler sırasıyla yansıtıcı plaka, referans plaka ve besleme konnektörüdür. Açıklıklar, yansıtıcı plaka üzerinde belirli bir düzen içerisinde dizi oluşturacak şekilde konumlandırılmaktadır.

Çalışmamızdaki hipotezimiz, RADA'ların yansıtıcı yüzeylerinde bulunan açıklıkların boyları ile birlikte sıklıkları da değiştiğinde hem verimliliğinin hem de ışıma örüntüsü kalitesinin iyileşeceğidir. Bu durumun ispatı için simülasyon ve prototip üretim çalışmaları yapılmış ve bu çalışmalarda yansıtıcı plaka dışındaki diğer anten bileşenleri aynı olacak şekilde tutulmuştur.

2 RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI

2.1 Genel Bilgiler

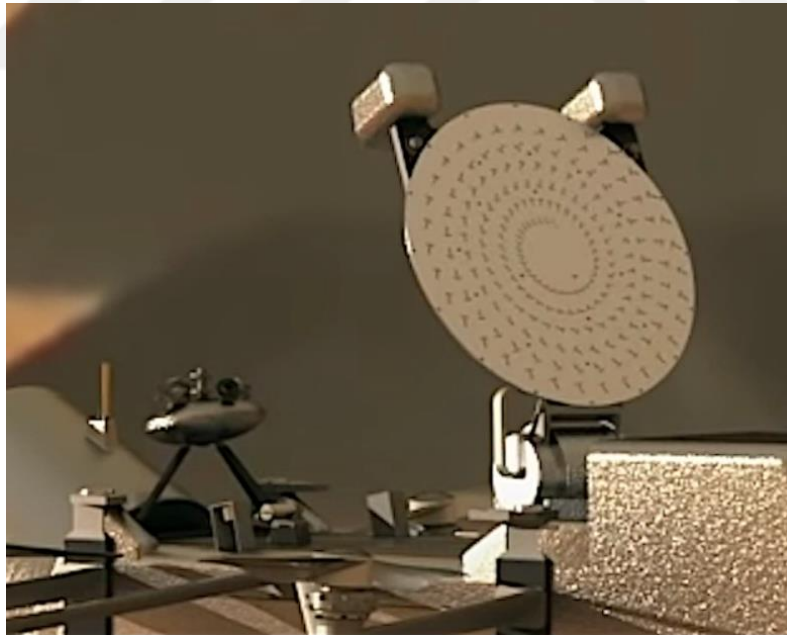
RADA, dairesel formda iletken plakalardan oluşturulmuş üzerinde geniş diziler halinde açıklıkların konumlandırıldığı antenlerdir. Şekil 2.1’de RADA’yı oluşturan bileşenler, yansıtıcı plaka, referans plaka ve besleme konnektörü, detaylı olarak gösterilmektedir. Bu bileşenlerden yansıtıcı plaka en üst yüzeyde olup spiral hatlar boyunca yerleştirilmiş açıklıklardan oluşmaktadır. Yansıtıcı plaka anten kazancı, antenin açıklık verimliliği, polarizasyon vb. anten parametrelerini doğrudan belirlemektedir. Referans plaka ise yansıtıcı plaka ve besleme konnektörünün montajının yapıldığı parça olup tüm sistemin toprağı olarak davranmaktadır. Son bileşen olan besleme konnektörü ise en alt yüzeyde bulunmakta olup maksimum güç transferinin gerçekleşmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.1 Detaylı RADA yapısı

RADA için ilk çalışmalar 1950’li yılların başında Goebels ve Kelly’nin tasarımları ile başlamıştır. Bu konsept tasarım daha sonraki yıllarda yapılacak çalışmalar için temel oluşturmuş ve üzerine birçok yapılmıştır. Bu çalışmalar anten kazancının ve verimliliğinin artırılması, anten çalışma frekans aralığının geliştirilmesi, yan lob seviyelerinin iyileştirilmesi gibi teknik özelliklerle kalmayıp bu antenlerin daha düşük maliyetlerde üretilmesini sağlayacak ilerlemeleri de kapsamaktadır. Ayrıca, RADA yapıları sadece metal plakalar üzerine yapılmayıp baskı devre kartları (BDK) kullanılarak da tasarlanabilmektedir ve bu durum hem kolay ve hızlı üretimi hem de düşük maliyet gibi avantajları beraberinde getirmektedir.

Bu antenlerin en dikkat çekici özelliği, sahip olduğu teknik özellikleri küçük boyutlarda sağlayabiliyor olmasıdır. Hem boyut avantajı ve beraberinde gelen kolay üretimi, hem de düşük maliyetli olması, bu antenleri askeri ve sivil uygulamalarda kullanılabilecek önemli bir aday haline getirmiştir. Günümüzde RADA yapıları uydu haberleşme uygulamalarında, mikrodalga linklerinde, RFID ve Wimax uygulamalarında kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de uydu haberleşmesi uygulaması için kullanılan RADA yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2 Uydu haberleşmesi için tasarlanmış RADA

Yüksek kazanç gerektiren uygulamalarda parabolik reflektör antenler çoğunlukla tercih edilmektedir. Ancak bu yapıların yan lob seviyelerinin yüksek olması, üretimlerinin maliyetli ve fiziksel boyutlarının büyük olması en büyük

dezavantajlarındandır [6], [7]. RADA yapıları ise sağladıkları teknik ve fiziksel özellikler sayesinde reflektör antenlere rakip olabilecek kapasiteye sahiptir. Ayrıca kolay montajı sayesinde hareketli platformlara da rahatlıkla entegre edilebilmektedir [8].

RADA'lar yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların dağılımına bağlı olarak, lineer polarizasyona (LP) veya dairesel polarizasyona (DP) sahip olacak şekilde çalışabilir. Ayrıca bu antenler tek yada çift katmanlı yapılardan oluşabilirler. Çift katmanlı yapılarda, üç adet iletken metal plaka ile iki katlı radyal dalga kılavuzu formu oluşturulmuştur. Tek katmanlı yapılar ise daha sade olup iki iletken metal plaka ve tasarım isterlerine göre arada dolgu malzemesinden oluşmaktadır [9]. Çift katmanlı yapılar açıklık verimi açısından daha performanslı yapılardır; ancak üretim maliyeti ve kolaylığı açısından bakıldığında, tek katmanlı yapılar daha çok tercih edilmektedir [10].

Modern haberleşme sistemleri, kablosuz haberleşme uygulamalarının zorlayıcı isterlerini karşılayabilmek için yüksek performanslı antenlere ihtiyaç duymaktadır. Yüksek kazanç, geniş bant, düşük yan lob vb. teknik özelliklerin yanı sıra kolay entegre edilebilir olma, küçük hacim kaplama gibi fiziksel özelliklere sahip antenler kritik sistem çözümlerinde önemli bir yer almaktadır. RADA yapılarının hem teknik hem de fiziksel özellikleri göz önünde alındığında, bu isterleri rahatlıkla karşılayabileceği ve kritik sistemlerde kullanılan maliyetli ve büyük hacimli antenlere rakip olabileceği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, 5G FR2 bandında çalışabilecek ve baz istasyonlarında kullanılabilecek RADA tasarımı üzerine çalışılmıştır. Yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların konfigürasyonu, verimliliğin daha da arttırılabildiği simülasyon ve üretim sonuçları ile gösterilmiştir. Ayrıca, son yıllarda popüler konular olan kazanç bant genişliğini arttırma ve ışıma örüntüsünü döndürme üzerinde de çalışmalar yapılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Tez çalışmanın son bölümünde ise tasarlanan antenin yakın alan faz dağılımı incelenmiştir. Antenin faz dağılımını düzeltmek için birim hücre tasarımları yapılmış ve bu birim hücrelerden faz düzeltici bir yüzey oluşturulmuştur. Bu faz düzeltici yüzey antenin yansıtıcı plakasından belirli bir uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilerek faz dağılımı iyileştirilmiştir.

2.2 Anten Bileşenleri

RADA yapıları yansıtıcı plaka, referans plaka ve besleme konnektörü olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Her bir bileşen tasarımı doğrudan etkilemekte olup aşağıda detayları ile açıklanmıştır.

2.2.1 Yansıtıcı Plaka

Yansıtıcı plaka, radyal açıklıklı dizi anten yapılarının en üst katmanını oluşturup, tasarlanacak antenin yönlendiricilik, kazanç, polarizasyon vb. parametrelerinin doğrudan belirlendiği kısımdır. Yansıtıcı plaka, birim hücre olarak adlandırılan açıklık çiftlerinden oluşmaktadır. Birim hücreleri oluşturan açıklıkların birbirlerine göre konumları anten polarizasyonun ve güç dağılımının belirlenmesinde en etkili faktördür. Bu çalışmada, tasarlanacak antenin dairesel polarizasyonlu olması hedeflendiğinden açıklıkların yerleşimi yapılırken bu faktör göz önüne alınmıştır.

2.2.2 Referans Plaka

Referans plaka yansıtıcı plakanın altında bulunup, yansıtıcı plaka ve besleme konnektörünün sabitlendiği bölümdür. Referans plaka tasarımı ile RADA yapılarının geri dönüş kaybı, bant genişliği vb. parametrelerinde çeşitli iyileştirmeler sağlanabilir. Ayrıca referans plakanın derinliği de sistem performansını doğrudan etkileyebilir. Yüksek modlu elektromanyetik dalgaların oluşumunu engellemek için, bu derinlik yarım dalga boyundan küçük olacak şekilde ayarlanmalıdır.

2.2.3 Besleme Konnektörü

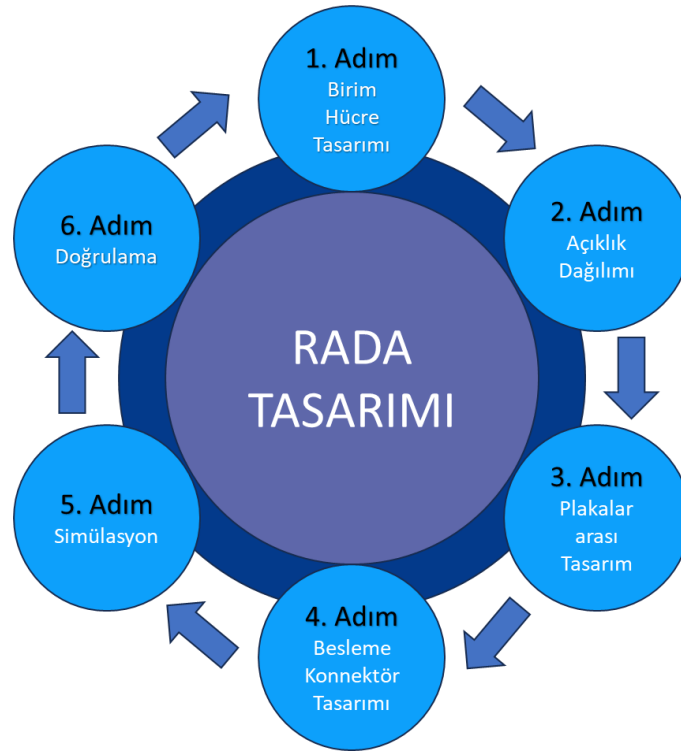
Besleme konnektörü referans plakanın merkezinde bulunup, antenin uyarıldığı yapıdır. Besleme konnektörü olarak, temini rahat 50Ω SubMiniature version A (SMA) konektörler kullanılabilir. RADA yapılarında maksimum güç aktarımı ve düşük geri dönüş kaybı elde edebilmek için doğru tasarlanmış besleme birimine ihtiyaç vardır. SMA konnektör ile anten arasındaki uyumlaştırmayı sağlamak için, konnektörün canlı ucununu sonlandığı yere disk şeklinde başlıklar konulmaktadır. Bu disk başlığının çapı, yüksekliği, referans plakaya olan uzaklığı vb. parametreleri anten performansını doğrudan etkilemektedir. Besleme konnektörü ve canlı ucuna yapılacak disk başlığı ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 2.3'te verilmiştir.

2.3 Anten Tasarımı

Bu bölümde RADA yapısının baştan sona tasarım aşamaları ele alınmış, önemli tasarım parametreleri görsellerle desteklenerek açıklanmıştır. Bölüm sonunda, tasarlanan antenin simülasyon ve ölçüm sonuçları verilmiş, elde edilen sonuçlara ilişkin gerekli değerlendirmelerde bulunulmuştur.

2.3.1 Tasarım Aşamaları

RADA yapılarının tasarımını genel hatlarıyla özetleyen akış Şekil 2.3'te görülmektedir. Öncelikli olarak, hedeflenen çalışma frekans bandına ve polarizasyona göre birim hücre tasarımı yapılmaktadır. Ardından bu birim hücreler belirli kurallar gözetilerek spiral hatlar oluşturacak şekilde yansıtıcı metal plakaya açılır. Referans plaka ve besleme konnektörü tasarımı ile RADA'nın ön tasarımı tamamlanır. Üç boyutlu elektromanyetik simülasyon programları yardımıyla, ön tasarım modellenir ve sonuçlar değerlendirilerek gerekli iyileştirmeler yapılır. Son olarak, elde edilen simülasyon sonuçlarını doğrulamak için prototip üretim yapılarak tasarlanan antenin ölçümleri alınır ve performans parametreleri değerlendirilir.



Şekil 2.3 RADA tasarım aşamaları

2.3.2 Birim Hücre Tasarımı

Yansıtıcı plaka, üzerinde spiral hatlar boyunca açılmış çok sayıda birim hücre ve sabitlenmesi için kenarlarında oluşturulmuş kulakçıklardan oluşmaktadır. Her birim hücre iki adet açıklık içermektedir. Bu açıklıkların birbirlerine göre konumları anten polarizasyonuna göre belirlenip, yansıtıcı plaka üzerinde diziler oluşturacak şekilde dağılımı sağlanır [11]. Bu tez çalışmasında dairesel polarizasyon hedeflendiğinden birim hücreyi oluşturan açıklıklar, aralarında 90° faz farkı olacak şekilde konumlandırılmıştır.

Anten polarizasyonu, ışıyan elektromanyetik dalganın karakteristiğine göre belirlenmektedir. Serbest uzayda $\hat{z}$ yönünde ilerleyen düzlem dalganın denklemi aşağıdaki gibi yazabilir.

$$\tilde{E}(z, t) = E_x(z, t)\hat{x} + E_y(z, t)\hat{y} \quad (2.1)$$

Alan bileşenleri detaylı olarak denklem (2.2)'de gösterilmektedir.

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz + \phi_x) \quad (2.2)$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \phi_y) \quad (2.3)$$

A_x ve A_y elektrik alan bileşenlerinin genliklerini ifade etmektedir. Elektromanyetik dalganın lineer polarizasyona sahip olabilmesi için, ortogonal bileşenler arasındaki faz farkının π nin tam katı olması gerekmektedir.

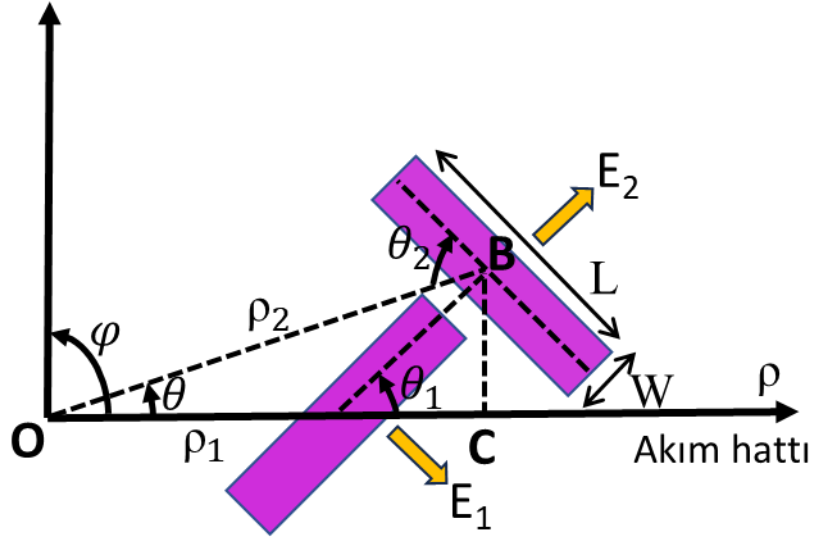
$$\Delta\phi = \phi_x - \phi_y = n\pi, n = 0, 1, 2, 3.. \quad (2.4)$$

Elektromanyetik dalganın dairesel polarizasyona sahip olabilmesi için, ortogonal bileşenlerin genlik seviyelerinin aynı, aralarındaki faz farkının ise $\pi/2$ nin tek tam katı olması gerekmektedir.

$$|E_x| = |E_y| \quad (2.5)$$

$$\Delta\phi = \phi_x - \phi_y = \frac{\pi}{2} + n\pi, n = 0, 1, 2, 3.. \quad (2.6)$$

RADA tasarımında ortogonal bileşenler birim hücreler aracılığıyla ışıma yapmaktadır. Dolayısıyla, birim hücre tasarımı ışıyan elektromanyetik dalganın karakteristiğini belirlediğinden, açıklık yerleşimi hedeflenen tasarım parametrelerine ulaşabilmek için kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.4 Birim hücre modeli

Şekil 2.4'te RADA yapılarında ϕ yönünde oluşturulmuş birim hücre modeli gösterilmektedir. Birim hücredeki açıklıklar, ortogonal alan bileşenleri elde edebilmek için birbirine dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Birim hücre modeline ait bazı önemli parametreler aşağıda açıklanmıştır.

ρ_1 : Birim hücreyi oluşturan 1. açıklığın merkeze olan uzaklığı.

ρ_2 : Birim hücreyi oluşturan 2. açıklığın merkeze olan uzaklığı.

L : Açıklıkların uzunluğu.

W : Açıklıkların genişliği.

θ_1 : 1. açıklık ile akım hattı arasındaki açı.

θ_2 : 2. açıklık ile akım hattı arasındaki açı.

Birim hücre içerisinde bulunan iki açıklığın merkez noktaya olan radyal uzaklıkları farkı $\rho_2 - \rho_1$ sonucu ile elde edilir. Bu yol fark iki açıklığın uyarılma zamanlarının aynı anda olmamasına ve aralarında faz farkı oluşmasına neden olur. İki açıklık arasında oluşan faz farkı aşağıdaki denklem aracılığıyla bulunabilir:

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda_0) \cdot (\rho_2 - \rho_1) \quad (2.7)$$

λ_0 : Serbest uzay dalga boyu.

Dairesel polarizasyon elde edebilmek için faz farkının denklem (2.6)'da belirtilen eşitliği sağlaması gerekmektedir.

$$\pi/2 + n\pi = (2\pi/\lambda_0)x(\rho_2 - \rho_1), n = 1,2,3.. \quad (2.8)$$

$n=0$ olarak alınırsa, açıklıklar arası yol farkı aşağıdaki gibi buluruz [12]:

$$(\rho_2 - \rho_1) = \lambda_0/4 \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'dan birim hücreyi oluşturan ortogonal açıklıkların, merkeze olan minimum radyal yol farkının çeyrek dalga boyu kadar olduğu görülmektedir. Birim hücre içerisindeki iki açıklık eşit büyüklükte ve 90° faz farkı oluşturulacak şekilde uyarılırsa, dairesel polarizasyona sahip bir birim ışıma elemanı elde edilir [13], [14].

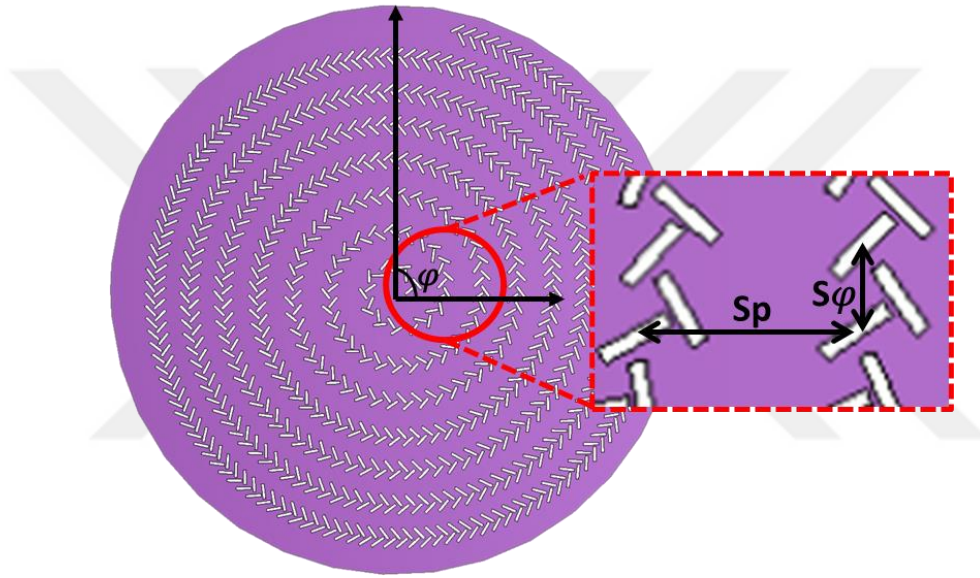
Birim hücre içerisindeki açıklıkların yerleşimi yapılırken çakışmalarına dikkat edilmelidir. Açıklıklar aynı radyal hatta aralarında çeyrek dalga boyu mesafe olacak şekilde yerleştirildiklerinde üst üste gelme durumu yaşanabilir. Bu durumun önlemek için, Şekil 2.4'te de görüldüğü gibi ikinci açıklık θ yönünde kaydırılarak farklı bir akım hattı üzerinde yer alması sağlanır. Birim hücre içerisindeki ikinci açıklığın yerleşimi yapılırken denklem (2.10) ve denklem (2.11) kullanılmaktadır [15]. Bu denklemlerdeki yerleşim parametreleri yaklaşık sonucu vermekte olup simülasyon aşamasında gerekli optimizasyonlar yapılabilir.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{\lambda_0}{4\sqrt{2}}}{\rho_1 + \frac{\lambda_0}{4\sqrt{2}}} \quad (2.10)$$

$$\rho_2 = \frac{\frac{\lambda_0}{4\sqrt{2}}}{\sin \theta} \quad (2.11)$$

2.3.3 Açıklık Dağılımı

Birim hücre tasarımının ardından yapılması gereken, birim ışıma elemanlarının tüm yansıtıcı plakaya geniş diziler halinde açılmasıdır. Bir önceki bölümde verilen denklemler kullanılarak tasarlanan birim hücreler, spiral form oluşturacak şekilde üst plakada konumlandırılır. Yerleşim sırasında dikkat edilmesi gereken ve anten performansını doğrudan etkileyen bazı fiziksel değişkenler vardır. Bu değişkenlerden S_p iki farklı birim hücrenin merkezleri arasındaki uzaklığı ρ yönünde, S_ϕ ise birim hücrelerin merkezleri arasındaki uzaklığı ϕ yönünde ifade eder [12], [15]. Bu önemli iki değişken Şekil 2.5'te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların yerleşimi

Şekil 2.5'te de görüldüğü gibi S_ϕ parametresi, yansıtıcı yüzey üzerindeki birim ışıma elemanlarının yoğunluğunu belirlemektedir. Bu parametre ayarlanırken birim ışıma elemanlarının çakışmamasına dikkat edilmelidir. S_ϕ parametresine küçük bir değer atanırsa açıklıkların üst üste çakışması durumu gerçekleşebilir, bu durumda anten parametreleri bozulabilir. Ayrıca S_ϕ belirlenirken üretim toleransları da göz önünde bulundurulmalıdır; aksi takdirde anten gerçekleştirileceği zaman hassasiyetle ilgili problemlerle karşılaşılabilir. S_p parametresinin belirlenmesinde ise antenin çalışma frekansı önemlidir ve genellikle serbest uzay dalga boyuna (λ_0) eşit olacak şekilde ayarlanır. S_p parametresine göre anten Ku, Ka, 5G vb. frekans bantlarında çalışacak şekilde tasarlanabilir. RADA tasarımı aşamasında özellikle bu iki parametrenin optimize edilmesiyle önemli performans iyileşmeleri sağlanabilir.

Birim hücrelerin yansıtıcı yüzey üzerinde dizi halinde dağılımını yapmak için Visual Basic (VBA) Macro kullanılabilir. Üç boyutlu simülasyon programının sunduğu bu özellik sayesinde, Şekil 2.6’da görünen spiral hatlar üzerinde açıklıklar hızlıca oluşturulup dağılımı yapılabilir. VBA ile yazılım tabanlı olarak yapılabilen bu dağılımda, açıklıkların konumlandırılabilmesi için denklem (2.12) ve denklem (2.13) kullanılmıştır.

$$\rho_n = \rho_1 + i \left(\frac{\lambda_0}{sn} \right) + (rn-1)\lambda_0 \quad (2.12)$$

$$\varphi_n = \cos^{-1} \frac{S_\varphi^2 - \rho_{n-1}^2 - \rho_n^2}{2(\rho_{n-1})(\rho_n)} \quad (2.13)$$

ρ_1 : İlk birim hücrenin merkeze olan uzaklığı.

ρ_n : n. birim hücrenin merkeze olan uzaklığı.

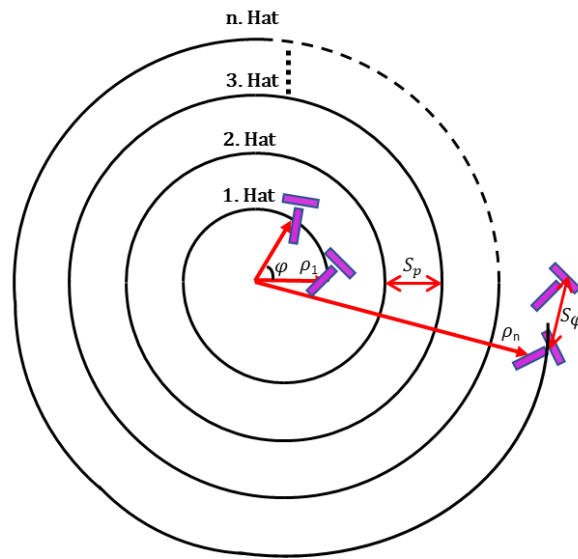
i : rn. hatta bulunan aktif birim hücre.

λ_0 : Serbest uzay dalga boyu.

sn : rn. hatta ait toplam açıklık sayısı

rn : Hat numarası

φ_n : rn. hatta bulunan n. açıklığa ait φ açısı.



Şekil 2.6 Yansıtıcı plaka üzerindeki spiral hatların yerleşimi

2.3.4 Plakalar Arası Tasarım

RADA tasarımındaki üçüncü adım yansıtıcı plaka ve referans plaka arasının tasarımıdır. Klasik RADA yapısının enine kesiti Şekil 2.7’de detaylı olarak gösterilmiştir. Plakalar arası mesafenin belirlenmesi ve arada kalan boşlukta kullanılacak dolgu malzemesi önemli tasarım parametrelerindendir.

Plakalar arası boşluk, tasarım isterlerine göre bazı çalışmalarda dielektrik vb. malzemelerle doldurulurken, bazılarında ise boş bırakılmaktadır. Plakalar arası boşluğun doldurulmasının bant genişliğini arttırma ve geri dönüş kaybını iyileştirme gibi pozitif etkileri olurken, üretimi zorlaştırma ve anten kazancını düşürme gibi durumları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle ara plakanın tasarımı tamamen anten isterlerine göre şekillenecek bir durumdur.

Plakalar arası yükseklik ise (h) serbest uzay dalga boyunun yarısından küçük olmalıdır ($h < \lambda_0/2$); aksi takdirde iki metal plaka arasında yüksek katsayılı modlar oluşabilir ve bu durum anten parametreleri negatif yönde etkileyebilmektedir. Ara plakanın yüksekliği serbest uzay dalga boyunun yarısından küçük seçildiğinde plakalar arasında oluşan manyetik alan denklem (2.14) yardımıyla bulunabilir [2].

$$H_\varphi(\rho) = H_1^{(2)}(k\rho) - \Gamma \frac{H_1^{(2)}(k\rho_{max})}{H_1^{(1)}(k\rho_{max})} H_1^{(2)}(k\rho) \quad (2.14)$$

ρ = Radyal konum

Γ = Yansıma katsayısı

$k = 2\pi/\lambda_0$ = Dalga numarası

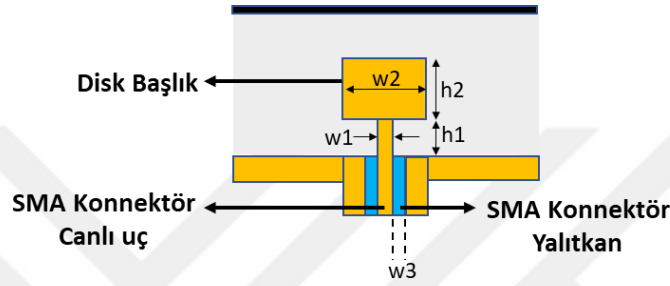
$H_1^{(1)}(k\rho)$ = Henkel fonksiyonunun 1. bileşeni

$H_1^{(2)}(k\rho)$ = Henkel fonksiyonunun 2. bileşeni

Denklem (2.14)’te görünen ilk terim besleme konnektörü tarafından üretilip antenin uç noktalarına doğru ilerleyen dalgayı, ikinci terim ise yansımalar sonucu oluşup içe doğru ilerleyen dalgaları göstermektedir. Açıklık dağılımı verimli yapılmış antenlerde uç kısımlara gidecek güç az olacağı için yansımalar da az olacaktır. Bu nedenle yansıma katsayısı ihmal edip denklem (2.14)’ü aşağıdaki gibi yeniden yazabiliriz [12].

2.3.5 Besleme Konnektörü Tasarım

RADA yapıları referans plakanın merkezine yerleştirilen SMA konnektör ile beslenmektedir. Bu aşamada önemli olan nokta, maksimum gücü konnektörden plakalar arası boşluğa aktarmaktır. Bunu sağlayabilmek için SMA konnektörlerin canlı uçlarına Şekil 2.8’de görünen disk başlıklar tasarlanmaktadır. Disk başlıklar, plakalar arası boşluk ile SMA konnektör arasında uyumlaştırıcı olarak çalışıp maksimum gücün antene aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.8 RADA besleme konnektörü

Tablo 2.1’de besleme konnektörüne ait bazı tasarım parametreleri açıklamalarıyla birlikte verilmiştir. Bu parametrelerden w_2 , h_2 ve h_1 çalışma frekansına göre değişebilen parametreler olup tüm sistemin geri dönüş kaybını doğrudan etkilemektedir.

Tablo 2.1 Besleme konnektörüne ait tasarım parametreleri

Açıklama	Sembol
SMA konnektör canlı uç çapı	w_1
Disk başlık çapı	w_2
SMA konnektör yalıtkan çapı	w_3
Disk başlık ile referans plaka arası boşluk	h_1
Disk başlık yüksekliği	h_2

2.3.6 Simülasyon

Açıklık dağılımı, plakalar arası tasarımı ve besleme konnektörü yapılan RADA için en önemli adımlardan biri de yapılan tasarımın üç boyutlu simülasyon programları aracılığıyla gerçekleşip sonuçların elde edilmesidir. Ayrıca bu adımda simülasyon programlarının sağladığı optimizasyon, parametrik tarama gibi özellikler sayesinde hızlıca sonuç alınıp gerekli iyileştirmeler yapılabilir.

RADA yapılarında simülasyon programları aracılığı ile geri dönüş kaybı, uzak alan ışıma örüntüsü, eksensel oran vb. sonuçlara bakılır. Bunlardan geri dönüş kaybı antenin hangi frekanslarda yüksek uyumlukta çalıştığını, uzak alan ışıma örüntüsü kazancı ve yan lobların seviyesini, eksensel oran ise polarizasyon hakkında bilgi vermektedir.

2.3.7 Doğrulma

Simülasyonu yapılan antenin prototip üretimi yapıp ölçülerek gerekli doğrulama işlemleri yapılmaktadır. Doğrulama sürecindeki en önemli nokta üretim aşamasıdır. Antenin tasarım ve simülasyonu aşamasında, üretim hassasiyeti düşünülerek bazı parametreleri belirlenmelidir. Aksi takdirde, üretimsel problemlerden kaynaklı ölçüm sonuçları ve simülasyon sonuçları arasında farklıklar yaşanabilir.

RADA yapılarının üretiminde farklı metotlar kullanılabilir. Özellikle yansıtıcı plakaların tasarımında yüksek hassasiyet gerektiği için lazer kesim yönteminden yararlanılabilir; ancak burada da dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Lazer kesim işlemi sırasında yüksek ısı girdisinden dolayı yansıtıcı plaka işlenirken üzerinde bazı deformasyonlar olabilir. Yansıtıcı plaka kalınlığı 1mm ve daha altında olduğu zaman bu tarz üretimsel problemlerle karşılaşmaktadır, bu nedenle çok ince plakalarda kullanılan malzeme değiştirilebilir ya da tasarım sırasında yansıtıcı plaka kalınlığı 1mm üzerinde tutulabilir. Başka bir üretim yöntemi de su jeti yardımıyla yansıtıcı plakanın işlenmesidir. Bu metotta lazer kesimden farklı olarak ısı girdisi olmayacağından deformasyonlar çok daha az görülebilir; ancak burada da hassasiyet kaybı olmaktadır ve aynı zamanda maliyet de çok fazla artmaktadır. Açıklıklar hassas olarak işlenemediğinden ölçüm sonuçlarında farklıklar görülebilir. Bu tez çalışmasında prototip antenin üretiminde lazer kesim metodu kullanılmış ve açıklıkların yüksek hassasiyet ile yansıtıcı plaka üzerinde konumlandırılması sağlanmıştır.

3

YÜKSEK VERİMLİ RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI

Tez çalışmasının bu bölümünde verimliliği ve kazancı yüksek 5G baz istasyonlarında kullanılabilecek RADA tasarımı yapılmış ve sonuçlar prototip üretim yapılarak doğrulanmıştır.

Öncelikle klasik RADA yapısı tasarımı yapılmış, simülasyon sonuçları ile performansı gösterilmiştir. Ardından verimliliği arttırmak için yeni bir yöntem önerilmiş ve yansıtıcı yüzey tasarımı buna göre tekrar yapılmıştır. Açıklık yoğunluğunun hatlara göre değişimini temel alan bu yeni yöntemle mevcut anten boyutları korunarak verimliliğin 10% civarında iyileştiği gözlemlenmiştir.

3.1 Klasik Tasarım

Bu bölümde klasik RADA tasarımı yapılmıştır. Klasik RADA yapılarında, yansıtıcı yüzeydeki açıklık dağılımı iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlardan birincisi açıklık boylarının sabit kaldığı düzgün dağılımlı durum, ikincisi ise açıklık boylarının antenin merkezinden uzaklaştıkça değiştiği düzgün dağılımlı olmayan durumdur.

3.1.1 Birim Hücre ve Açıklık Dağılımı Tasarımı

Tasarımı yapılacak antenin dairesel polarizasyona sahip olması hedeflendiğinden birim hücre içindeki açıklıklar Bölüm 2.3.2’de anlatıldığı gibi birbirine dik konumda ve aralarında çeyrek dalga boyu mesafe olacak şekilde konumlandırılmıştır.

Yansıtıcı yüzeyde açıklık dağılımı yapılırken, VBA macro kullanılarak birim hücrelerin radyal formda dizi halinde dağılımı sağlanmıştır. Anten çalışma frekansı 26 GHz olarak belirlenmiş, S_p ve S_ϕ gibi fiziksel değişkenler buna göre hesaplanmıştır. Ayrıca birim hücrelerin üzerine açılacağı hatların sayısı yedi (7) olarak belirlenmiştir. Hat sayısı, anten performansı için kritik öneme sahiptir. Hat sayısı gereğinden fazla olursa antenin açıklık verimi düşmektedir, az olması durumunda ise antenin uç noktalarında biriken güç miktarı fazla olacağından geri yansıma fazla olacaktır, sonuç olarak geri dönüş kaybı kötüleşecektir.

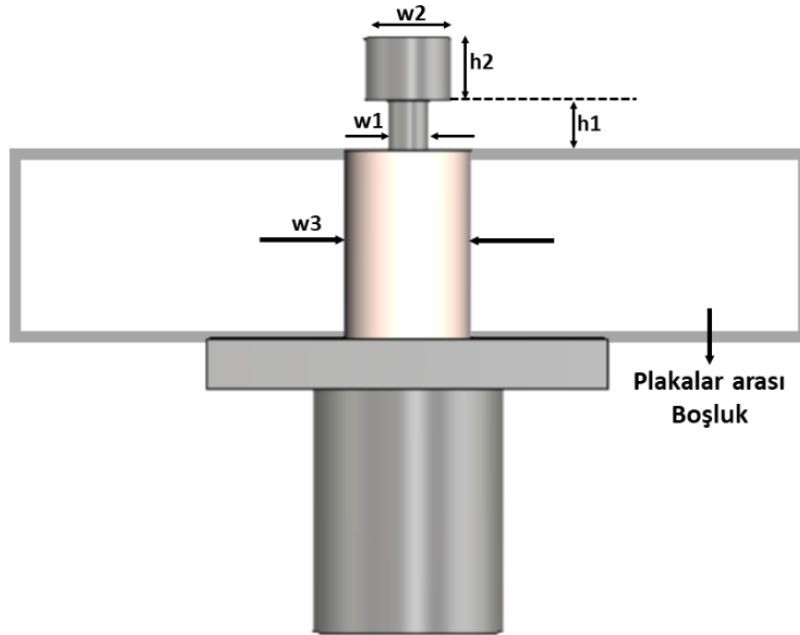
3.1.2 Plakalar arası Tasarım

Yansıtıcı metal plaka ile referans plaka arası tasarlanırken Bölüm 2.3.4 dikkate alınarak gerekli parametreler belirlenmiştir. Çalışma frekansı 26 GHz olduğu için serbest uzay dalga boyu yaklaşık olarak 11.5 mm olarak hesaplanmış, plakalar arası mesafenin, serbest uzay dalga boyunun yarısından küçük olmasına dikkat edilmiş ($h < \lambda_0/2$) ve 5 mm olacak şekilde gerekli simülasyonlar ve üretimler yapılmıştır.

Düşük maliyetli, üretimi kolay ve aynı zamanda yüksek performanslı bir RADA tasarımı hedeflendiğinden bu bölümde çalışılan antenin dolgu malzemesi olarak herhangi bir dielektrik malzeme kullanılmamıştır.

3.1.3 Besleme Konnektörü Tasarım

Klasik RADA ve verimliliği arttırılmış RADA tasarımlarında Şekil 3.1’de görünen besleme konnektörü kullanılmıştır. Besleme konnektörüne ait değişkenlerin değerleri ise Tablo 3.1’de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu değişkenlerin belirlenmesi için yansıtıcı plaka ve plakalar arası tasarımların öncelikli olarak yapılması gerekmektedir. Ardından üç boyutlu simülasyon programları ile geri dönüş kaybı sonuçlarına bakılıp, çalışma frekans bandında -10 dB ve altında elde edilen w_2 , h_2 ve h_1 değerlerinin tespit edilmesiyle doğrulama adımına geçilmelidir.



Şekil 3.1 Besleme konnektörü yapısı

Tablo 3.1 Tasarımlarda kullanılan besleme konnektörüne ait parametrelerin sayısal değerleri

Sembol	Değer (mm)
w1	1.3
w2	2.8
w3	1.4
h1	1.6
h2	2.4

3.1.4 Simülasyon ve Doğrulama

Bu bölümde açıklık dağılımının ışıma örüntü kalitesine etkisi simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmalı olacak şekilde incelenmiştir. RADA yapılarında, SMA konnektör aracılığıyla tetiklenerek plakalar arasında ilerleyen dalganın, açıklıklardan üç boyutlu uzaya yaptığı ışıma önemli bir performans göstergesidir. Yapılan ışımayla yansıtıcı plakanın ne kadar verimli kullanılabildiği ve ışıma örüntü kalitesi hakkında bilgi edinilmektedir.

RADA yapısında dalga kılavuzu içerisine ilerleyen elektromanyetik dalga, yansıtıcı plaka üzerinde yüzey akımları oluşturur ve böylece bu plaka üzerinde bulunan açıklıklar uyarılır. Yansıtıcı plaka yüzeyindeki açıklıklardan ışıyan toplam enerji açıklık sayısı, açıklık yoğunluğu, hat sayısı vb. parametrelere bağlıdır.

Yansıtıcı plaka üzerinde dağılım yapılırken ilk olarak açıklıkların aynı formda olmasının sonuçları gözlemlenmiştir. Açıklıkların aynı formda olmasından kasıt, uzunluklarının ve genişliklerinin spiral hatlar boyunca aynı olmasıdır. Bu durumda açıklıklardan yapılan ışıma radyal akımın sabit bir oranı kadar olacaktır. RADA yapıları merkezden besleneceği için merkeze yakın olan açıklıklardan, antenin uç noktalarına yakın olan açıklıklara nazaran daha fazla güç ışıyacaktır. Işıyan gücün merkez ve kenarlarda farklı seviyelerde olması, antenin ışıma örüntüsünde yan lob oluşumlarına neden olabileceği gibi kazanç seviyesini ve dolayısıyla verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple yansıtıcı plakanın daha verimli kullanılabilmesi için açıklık çiftlerinin dağılım analizinin yapılması gerekmektedir.

Yansıtıcı plaka üzerinde yapılan açıklık dağılımlarında ikinci olarak ise, açıklıkların düzgün dağılımlı olmadığı durum incelenmiştir. Herhangi bir açıklıktan ışıyan güç temelde iki ana parametreye bağlıdır, bu parametreler açıklık uzunluğu ve akım hattı ile yaptığı açıdır. Bu çalışma kapsamında yapılan anten dairesel polarizasyona sahip olacağı için, yansıtıcı yüzey üzerindeki açıklıkların akım hattı ile yapmış olduğu açı sabit tutulmuştur. Bu nedenle yansıyan gücün kontrolü, yansıtıcı yüzey üzerindeki açıklıkların boylarının değişimi ile sağlanmaktadır. Açıklık uzunluğu denklem (3.1)'de görüldüğü gibi radyal uzaklığın fonksiyonu olarak yazılabilir:

$$L_{açıklık} = \delta + (\rho * a) \quad (3.1)$$

$L_{açıklık}$: Açıklıkların uzunlukları

δ : Çalışma frekansına göre belirlenen sabit değer

ρ : Radyal uzaklık

a : elektromanyetik kuplaj katsayısı

Denklem (3.1)'de yer alan $(\rho * a)$ kuplaj faktörü olarak adlandırılmaktadır. Elektromanyetik kuplaj katsayısı yansıtıcı plaka üzerindeki güç dağılımını belirleyeceğinden, tasarım sırasında optimize edilerek en iyi değere ulaşılmalıdır. Radyal uzaklığın artması kuplaj faktörü arttıracığından, açıklıkların uzunlukları da artacaktır. Sonuç olarak, RADA yapısı içerisinde ilerleyen elektromanyetik enerjinin açıklıklara kuplaj olması değişen açıklık uzunlukları ile kontrol edilebilmektedir [13]-[15].

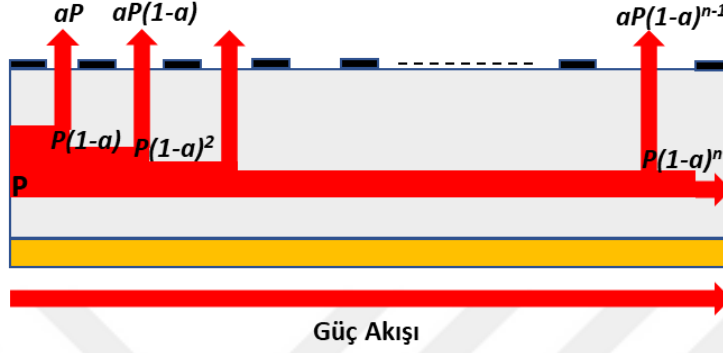
Denklem (3.2)'de P ile gösterilen güç, anten merkezinden uçlara doğru Şekil 3.2'de gösterildiği gibi ilerlemektedir. Besleme konnektöründen gelen güç, açıklıklardan ışıyarak plakalar arası boşlukta ilerler ve antenin uçlarına kadar gelir. Açıklıklardan ışıyarak ilerleyen elektromanyetik dalganın gücü, plakalar arası boşlukta gittikçe azalmaktadır. Denklem (3.2)'de, ışımalardan sonra plakalar arası boşlukta kalan güç matematiksel olarak gösterilmiştir [16].

$$P_r = P(1 - a)^n \quad (3.2)$$

P_r : Kalan güç

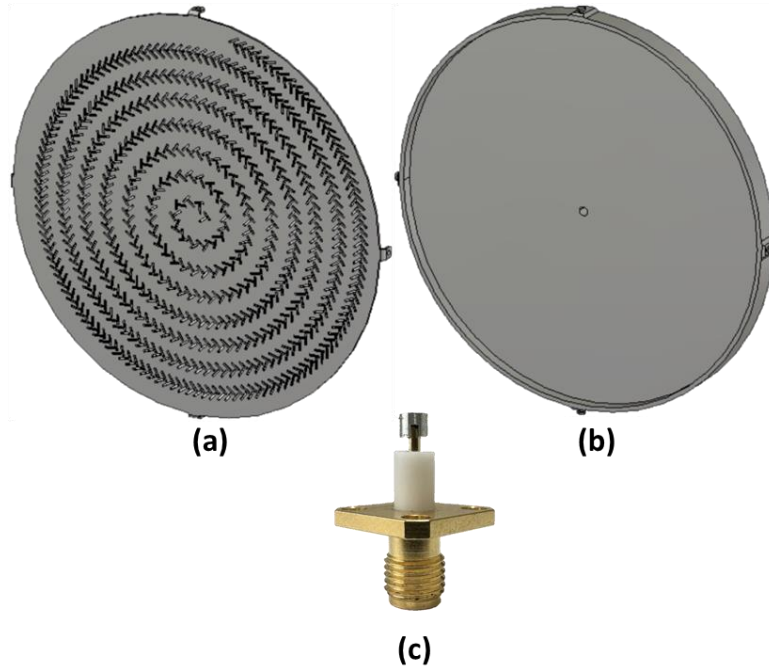
n : Hat numarası

P : Toplam güç

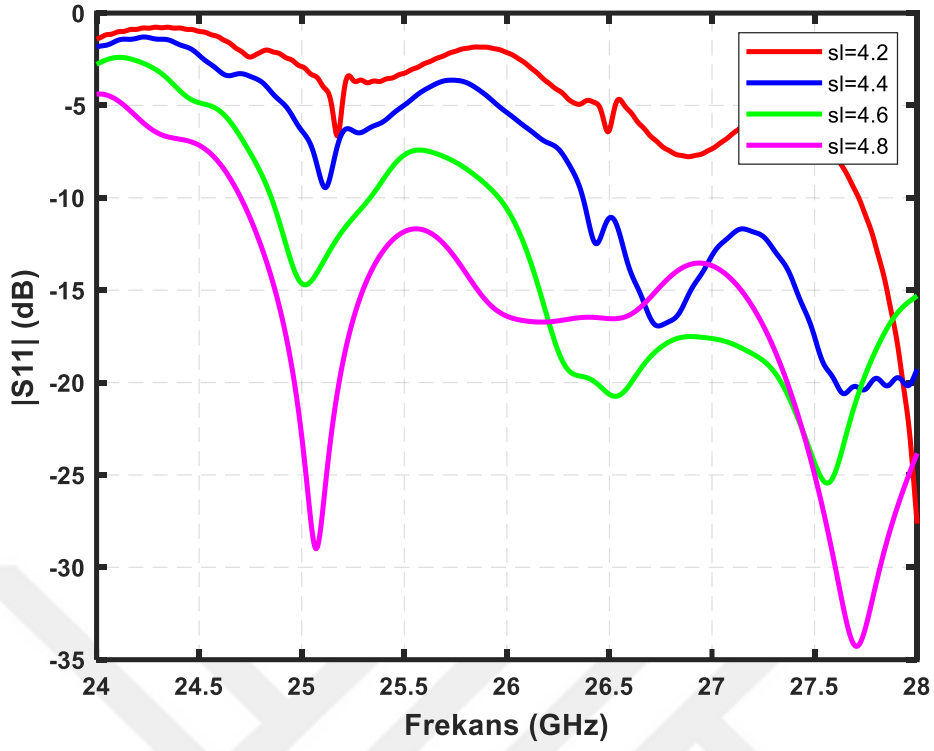


Şekil 3.2 Plakalar arası boşlukta ilerleyen güç

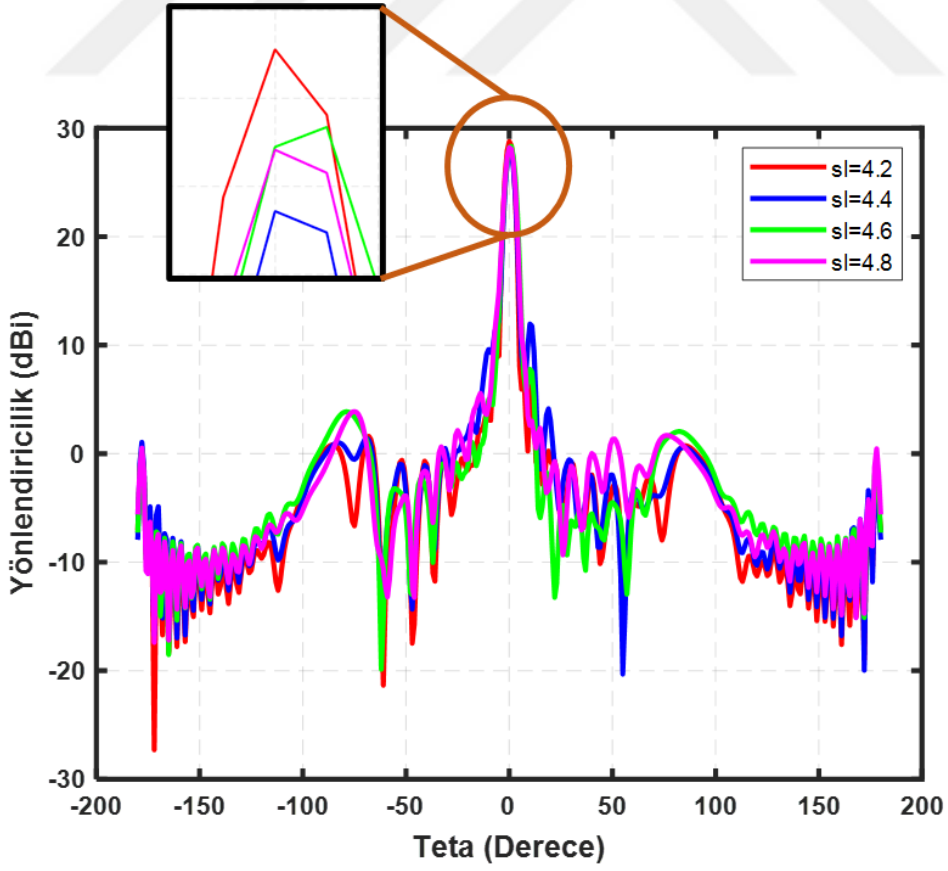
Antenin uç noktalarında biriken toplam enerji yansıtıcı plakanın ne kadar verimli kullanıldığına, hat sayısına ve antenin büyüklüğüne bağlıdır. Açıklık dağılımının iyi yapılmadığı bir yansıtıcı yüzeyde, gücün önemli bir kısmı antenin uç noktalarında toplanacağı için geri yansımalarla neden olacaktır, bu durum da antenin verimliliği düşürüp geri dönüş kaybını kötüleştirecektir.



Şekil 3.3 Tüm bileşenleriyle RADA yapısı



Şekil 3.4 Farklı açıklık uzunlukları için geri yansıma sonuçları

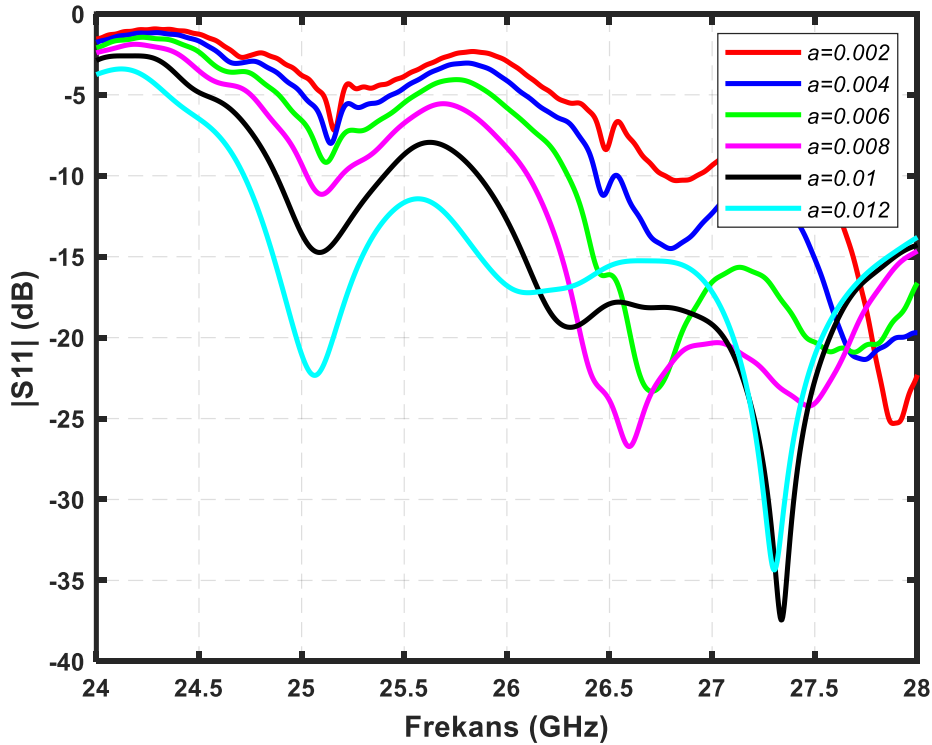


Şekil 3.5 Farklı açıklık uzunlukları için anten yönlendiriciliği sonuçları

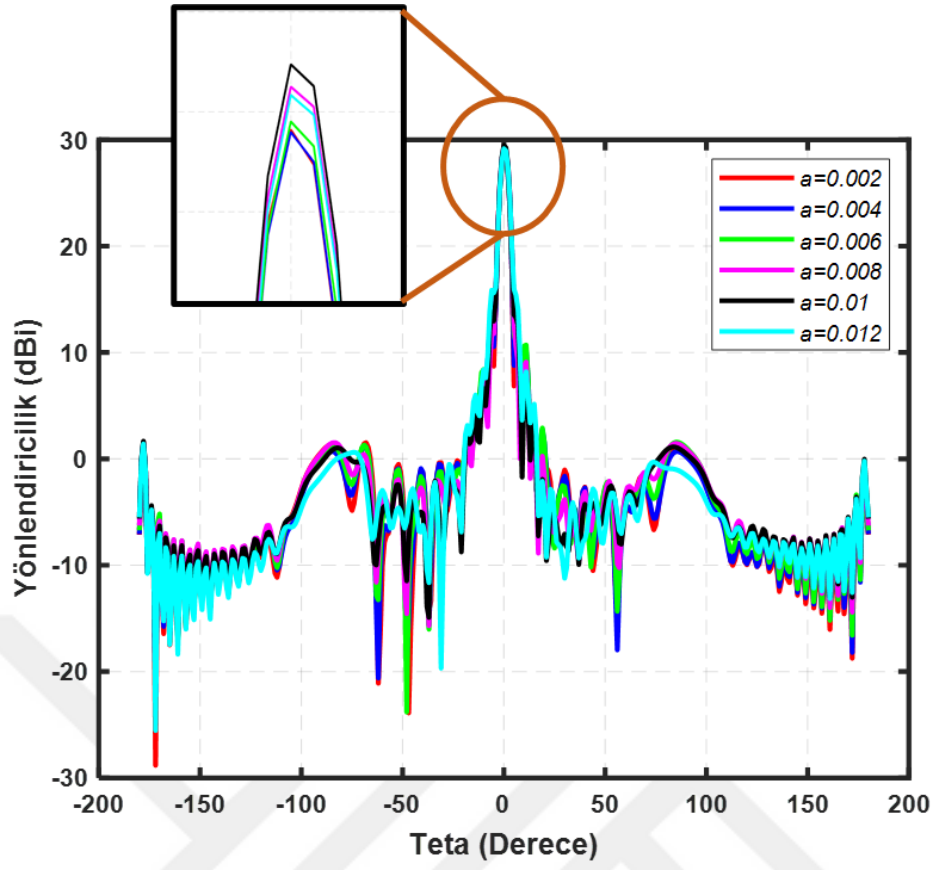
Şekil 3.3'te elektromanyetik tasarım programlarında kullanılan RADA yapısının tüm bileşenlerini göstermektedir. Yapılan tasarımlarda, referans plaka ve besleme konnektörü sabit tutulup iyileştirmeler yansıtıcı plaka üzerinde yapılmıştır.

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te S_p ve S_ϕ parametrelerinin sabit tutulduğu RADA yapısında, açıklık uzunluk (sl) değişimlerinin anten performansına olan etkisi görülmektedir. Grafiklerden de okunduğu gibi açıklıkların uzunluğu kısaldıkça geri dönüş kaybı gittikçe kötüleşmiştir, bunun nedeni yansıtıcı yüzeyin verimli kullanılamamasıdır. Yansıtıcı yüzey verimli kullanılamadığı için, antenin uç noktalarında çok fazla güç birikimi olmuş ve bunlar geri yansıma yaparak S_{11} performansını negatif yönde etkilemiştir.

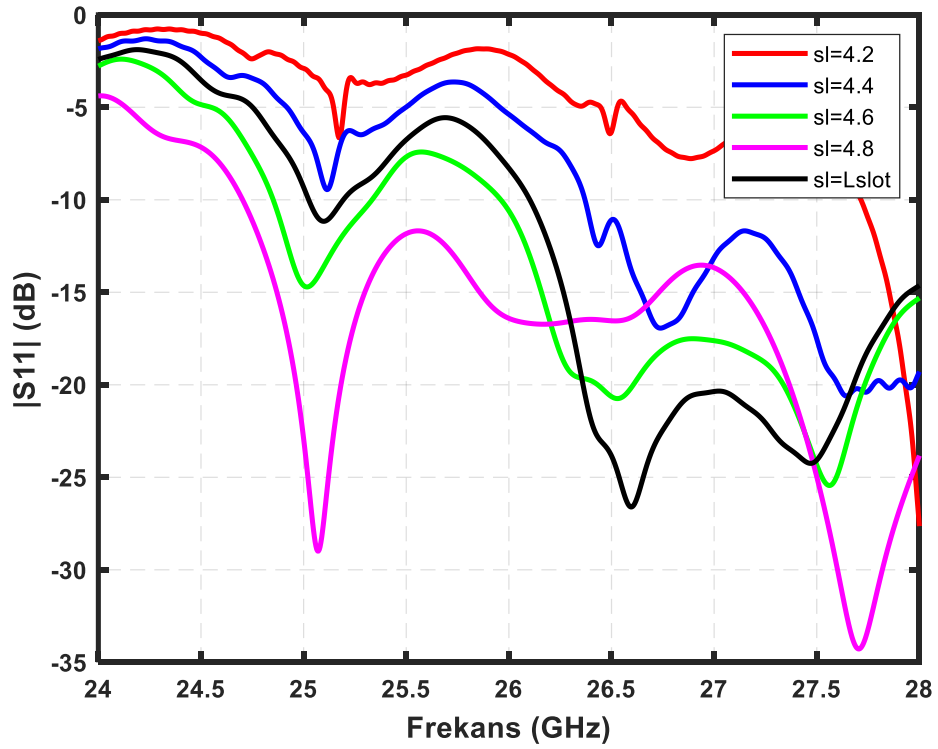
Yansıtıcı plakayı daha verimli kullanabilmek için açıklık dağılımı yapılırken denklem (3.1)'den yararlanılmıştır. Bunu için öncelikli olarak kuplaj katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Farklı kuplaj katsayılarına göre yapılmış olan simülasyonlar Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar yönlendiricilik, kazanç, yan lob seviyeleri vb. anten parametreleri ve üretim toleransları açısından değerlendirildiğinde kuplaj katsayısının 0.008 mm olarak alınmasına karar verilmiştir.



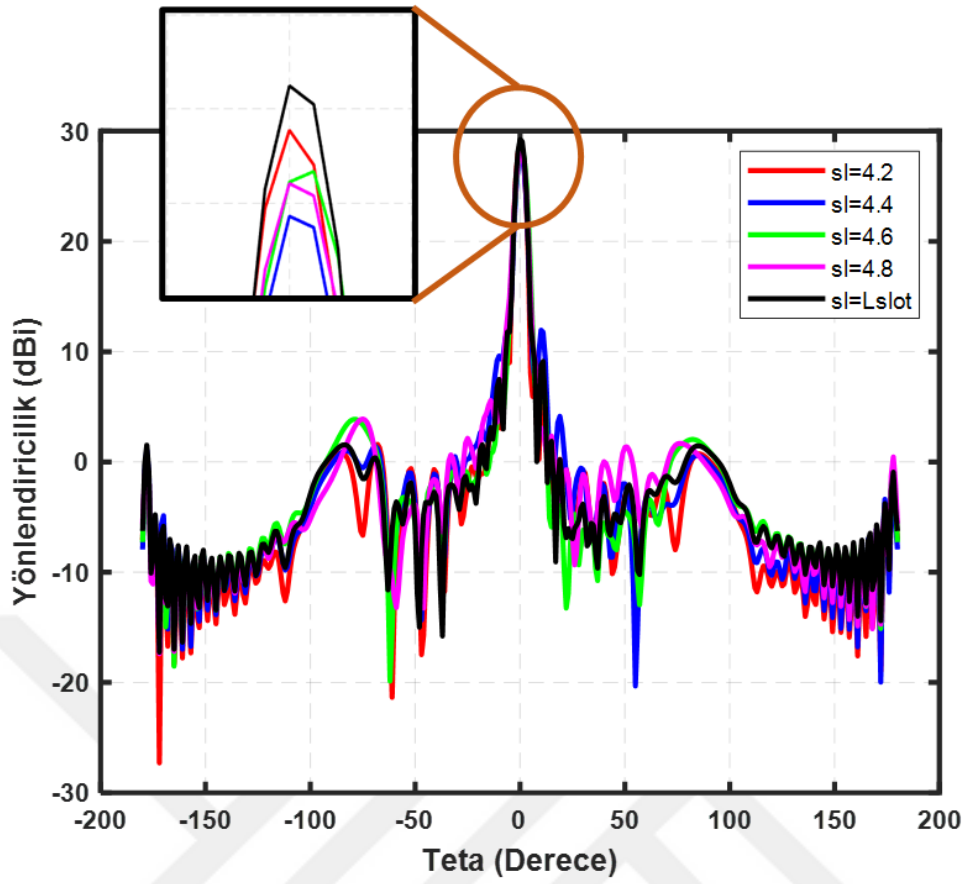
Şekil 3.6 Farklı kuplaj katsayıları için geri yansıma sonuçları



Şekil 3.7 Farklı kuplaj katsayıları için anten yönlendiriciliği sonuçları



Şekil 3.8 Hatlara göre değişen açıklık uzunluklarının yansıma katsayısına etkisi



Şekil 3.9 Hatlara göre değişen açıklık uzunluklarının anten yönlendiriciliğine etkisi

Tablo 3.2 26 GHz’ de farklı açıklık uzunluklarına göre elde edilen anten performansları

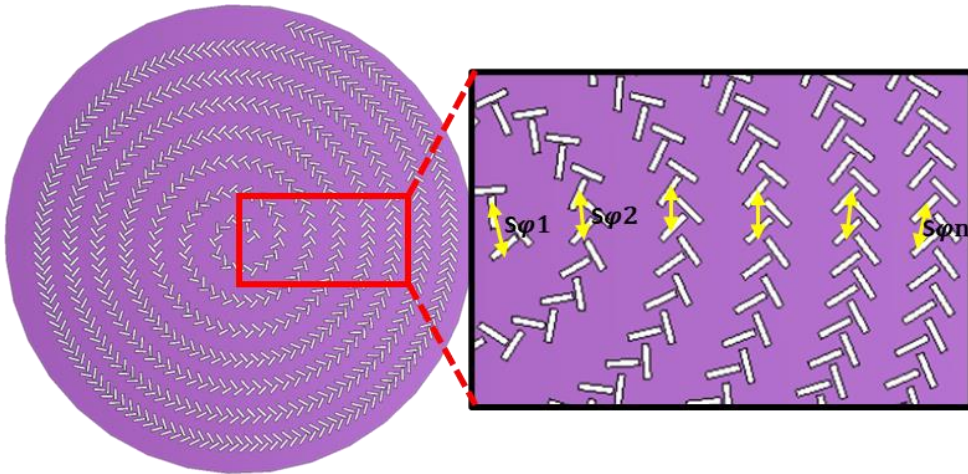
sl	S _φ	Yönlendiricilik	Yan Lob Seviyesi	S ₁₁	Açıklık Verimi
mm	mm	dBi	dB	dB	%
4.2	5	28.8	-19.5	-2.13	31.6
4.4	5	27.9	-15.9	-5.4	25.6
4.6	5	28.3	-20.6	-10.6	28.1
4.8	5	28.2	-22.6	-16.4	27.5
L _{açıklık}	5	29.2	-17.4	-8.3	34.6

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da, yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkları denklem (3.1)’e göre oluşturulmuş RADA yapısının diğer tasarımlarla olan karşılaştırılmaları verilmiştir. Bu tasarımlarda anten performansı ve üretim şartları göz önünde tutularak δ 4.2 mm, a ise 0.008 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece açıklık uzunlukları ($L_{\text{a açıklık}}$) ilk hatta 4.23 mm ile başlamış, son hatta 4.76 mm ile sonlanmıştır. Açıklıkların bu şekilde dağılımı ile yansıtıcı plaka daha verimli kullanılmış, bu da hem geri dönüş kaybına hem de anten yönlendiriciliğine olumlu olarak yansımıştır. Tablo 3.2’de elde edilen sonuçlar sayısal verilerle detaylı olarak verilmiştir.

3.2 Verimliliği Arttırılmış RADA Tasarımı

Tez çalışmasının bu bölümünde yeni bir yöntem önerilerek RADA yapısı daha kazançlı hale getirilmiş, açıklık verimi arttırılmıştır. Klasik tasarımda, yansıtıcı yüzey üzerindeki açıklık dağılımında yapılan iyileştirmelerle anten performansında belirli ölçüde arttırılmıştır; ancak yeterli değildir. Önerilen yeni yöntem ile açıklıkların sıklığı ($S\phi$), Şekil 3.10’de görüldüğü gibi antenin uç noktalarına doğru arttırılmış, oluşan yüzey akımından maksimum şekilde yararlanılmıştır. Ayrıca antenin kolay üretimi ve düşük maliyetli olması için plakalar arasında herhangi bir malzeme kullanılmamıştır.

Önerilen bu yeni yöntemin doğrulanması için simülasyonların ardından prototip anten üretimi yapılmıştır. Tasarlanan anten üretildikten sonra yansımatsız odada uzak alan ölçümleri, VNA yardımıyla da geri dönüş kaybı ölçümleri alınarak simülasyon sonuçlarıyla birlikte gösterilmiş ve gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

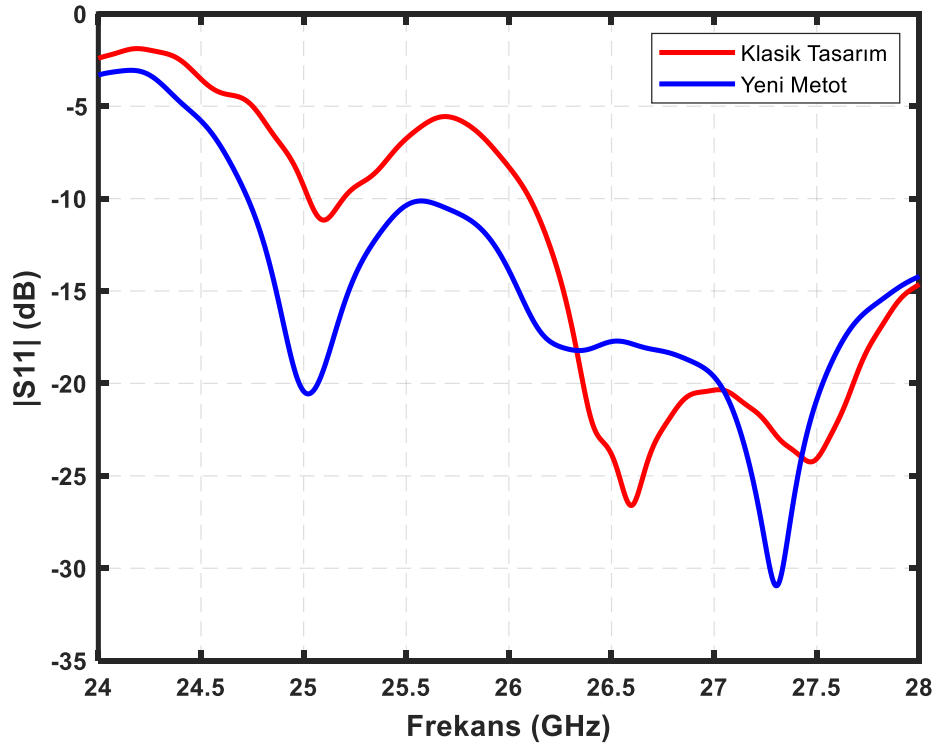


Şekil 3.10 Önerilen yeni yönteme göre dağılımı yapılmış açıklıklar

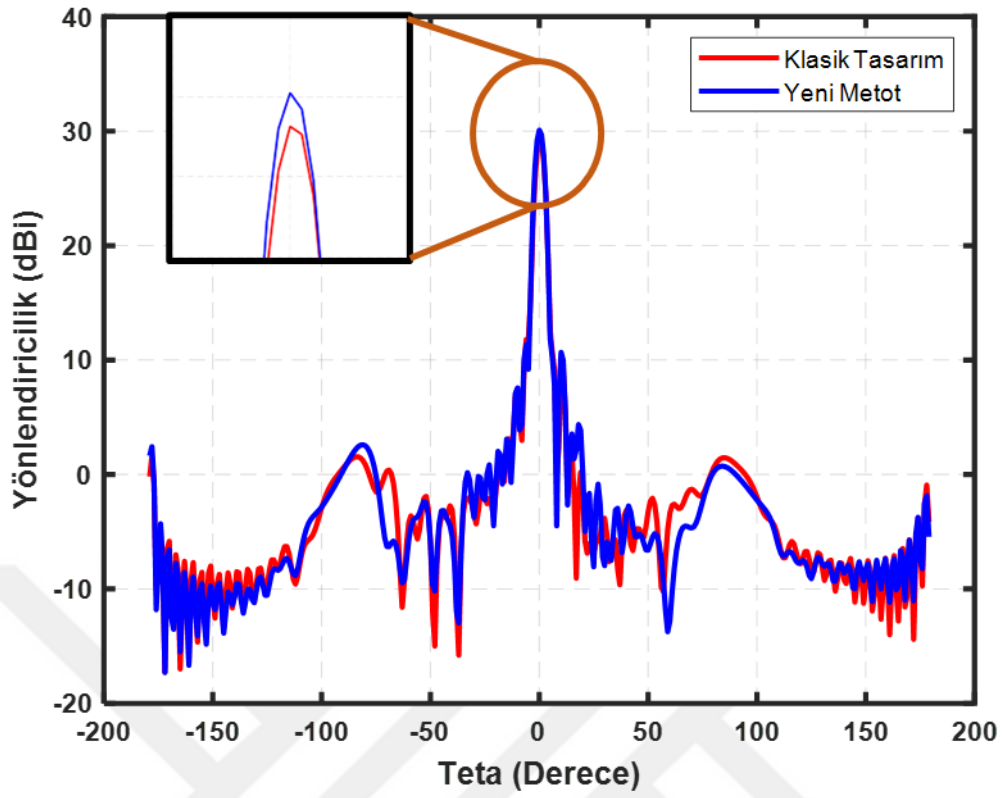
3.2.1 Simülasyon Sonuçları

Yapılan simülasyonlarda besleme konnektörü olarak Bölüm 3.1.3'te gösterilen SMA konnektör kullanılmıştır. Ayrıca plakalar arası tasarım yapılırken Bölüm 3.1.2'de belirtilen sayısal değerler aynı şekilde korunmuştur.

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de klasik yöntem ile tasarlanmış RADA ile yeni metoda göre tasarlanmış RADA'nın geri dönüş kaybı ve uzak alan ışıma örüntüsü karşılaştırılmaktadır. Özellikle yeni metoda göre yapılan tasarımda çalışma frekans bantlarında S_{11} değerlerinde ciddi iyileşmeler kaydedilmiştir. Tablo 3.3, klasik tasarım ve yeni metoda göre tasarlanmış RADA yapılarının önemli performans kriterlerini sayısal olarak vermektedir. Yeni metoda göre tasarımı yapılmış RADA yapılarında iyileşen bir başka özellikte açıklık verimidir. Açıklık veriminde görülen önemli iyileşme, yansıtıcı plakanın klasik yöntemle göre çok daha verimli kullanıldığının bir göstergesi olarak düşünülebilir. Ayrıca Tablo 3.3'te antenlerin eksensel oranları da verilmektedir. Bu değer dairesel polarizasyona sahip olan antenlerde 3 dB'nin altında olması gerekmektedir. Simülasyonu yapılan antenlerde bu değer yaklaşık olarak 0.9 dB elde edilmiştir ve bu sonuç antenlerin çalışma frekans bandında dairesel polarizasyona sahip olduğunu göstermektedir.



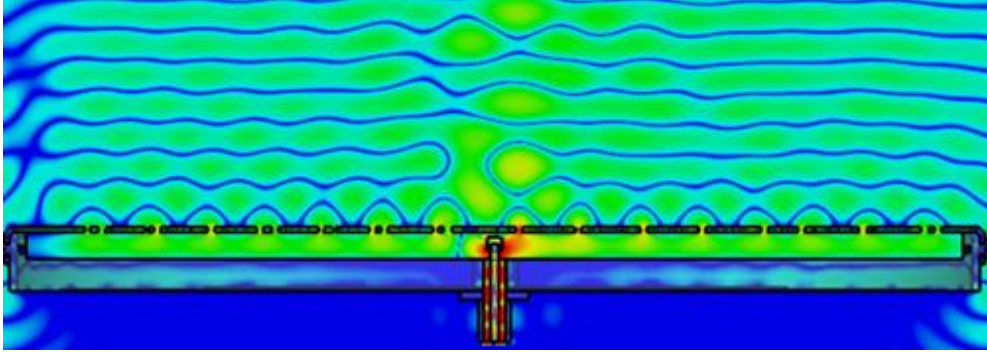
Şekil 3.11 Klasik tasarım RADA ve yeni metot RADA'nın geri yansıma sonuçları



Şekil 3.12 Klasik tasarım RADA ve yeni metot RADA'nın ışıma örüntüleri

Tablo 3.3 Klasik tasarım RADA ve yeni metot RADA'nın performansları

Çalışmalar	Yönlendiricilik	Yan Lob Seviyesi	S_{11}	Açıklık Verimi	Eksensel Oran
	dBi	dB	dB	%	dB
Klasik Tasarım	29.2	-17.4	-8.3	34.6	0.9
Yeni Metot	30.6	-18.7	-13.9	47.8	0.9



Şekil 3.13 Yeni metot RADA'nın yakın alan analizi

Şekil 3.13 tasarımı yapılan antenin yakın alan simülasyon sonucunu göstermektedir. Ölçüm yapılırken gözlem noktası anten yüzeyinden yaklaşık $3\lambda_0$ uzaklıkta olacak şekilde ayarlanmış Ex bileşenin değişimi incelenmiştir. Şekil 3.13'te de görüldüğü gibi tasarlanan çalışma frekans bandında yaklaşık olarak eş faz yüzeylerine sahiptir. Bu da antenin yansıtıcı yüzeyinin verimli kullanıldığını gösteren başka bir parametredir.

3.2.2 Doğrulama

Bu bölümde, anten verimliliğini arttırmak amacıyla ileri sürülen metodun doğrulanabilmesi için yapılan prototip anten üretimleri ve ölçümleriyle ilgili yapılan çalışmalar yer almaktadır. 7 spiral hattan oluşmakta olan prototip antenin çapı yaklaşık olarak $15.5\lambda_0$ 'dır. 26 GHz bandına çalışan antene ait tasarım parametreleri Tablo 3.4'te detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.4 Yeni metoda göre tasarlanmış prototip antenin parametreleri

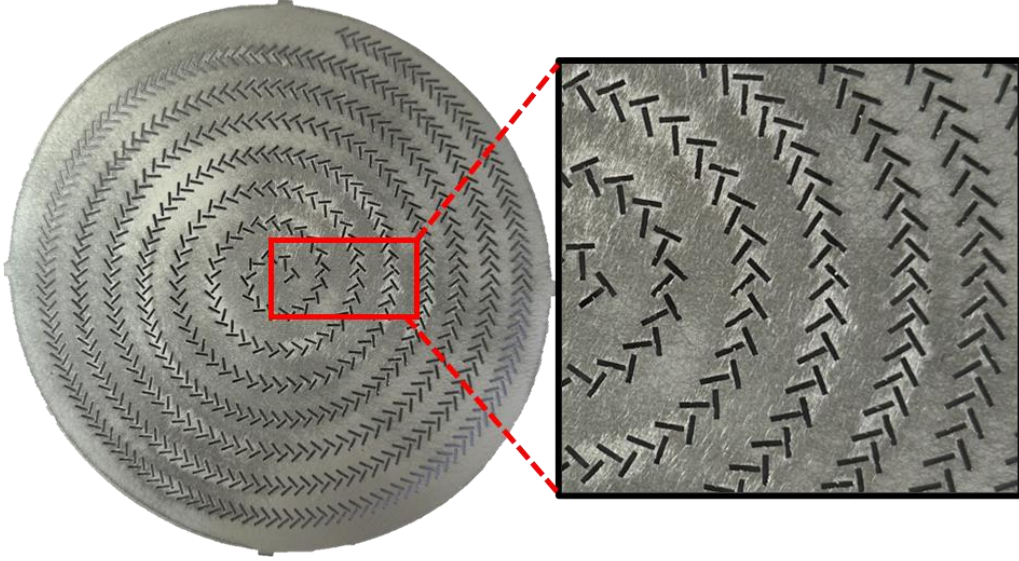
Parametre	Değer
Serbest Uzay Dalgaboyu (λ_0)	11.5 mm
Açıklık Uzunluğu (S_l)	4.23-4.76 mm
Açıklık Derinliği	1 mm
Açıklık Genişliği	0.88 mm
Birim hücrelerin merkezleri arasında ρ yönündeki uzaklık (S_ρ)	11.5 mm, λ_0
Birim hücrelerin merkezleri arasında ϕ yönündeki uzaklık (S_ϕ)	4.7-3.7 mm
Hat Sayısı	7
Anten çapı	180 mm
Plakalar arası mesafe (h)	5 mm

Prototip antenin üretim aşamasında lazer kesim ve su jet olmak üzere iki farklı metot kullanılmıştır. Her iki metotta da yansıtıcı plaka kalınlığı 1mm yapılmıştır. Bu metotların birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu noktalar bulunmaktadır. Lazer kesim yönteminin en önemli avantajı sağlamış olduğu hassasiyettir. Lazer kesim metodu kullanılarak işlenen yansıtıcı plakada, açıklıkların boyutu simülasyonda kullanılan değerlere çok yakın olacak şekilde açılmıştır; ancak bu yöntemin dezavantajı yüksek ısı girdisi olmasıdır. Yüksek ısı girdisi ve işlenen plakanın kalınlığının az olması (1mm), açıklıkların açılması sırasında yansıtıcı plaka üzerinde bazı deformasyonlara neden olmuştur.

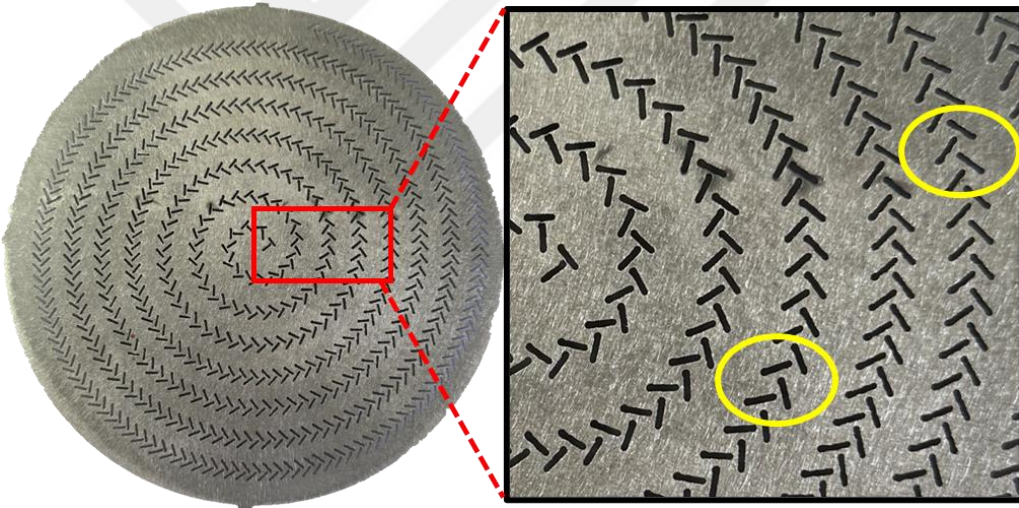
Bu deformasyonları azaltmak için ikinci olarak su jet kesim yöntemi denenmiştir. Bu yöntemle, yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların işlenmesi sırasında ısı girdisi olmadığı için plaka yüzeyinde herhangi bir deformasyon yaşanmamıştır; ancak bu metodun bazı kritik dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan birincisi hassasiyetin lazer kesime göre çok daha az olmasıdır. Hassasiyet az olduğu için açıklıkların boyutları hem simülasyondaki değerlerden çok farklı hem de kendi içinde tutarsız olmuştur. Diğer bir dezavantajı ise lazer kesime göre çok daha fazla maliyetli olmasıdır.

Bu çalışmada üretim yöntemi olarak lazer kesim kullanılmıştır. Su jet metodunun hassasiyetinin kötü olması ve ölçülen geri dönüş kaybı değerinin simülasyondan çok farklı çıkması lazer kesim yönteminin tercih edilmesinin başlıca nedenlerdir. Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te her iki metot ile üretimi yapılmış yansıtıcı plakalar detaylı olarak gösterilmektedir. Lazer kesim metodunda karşılaşılan deformasyonun düzeltilebilmesi için yansıtıcı yüzey üzerinde montaj kulakçıkları, referans plaka üzerinde ise vida delikleri açılmıştır. Yansıtıcı plaka, üzerinde bulunan kulakçıklar yardımıyla referans plakaya sabitlendiğinde ve iletken bant ile desteklendiğinde deformasyonların büyük ölçüde azaldığı görülmüştür.

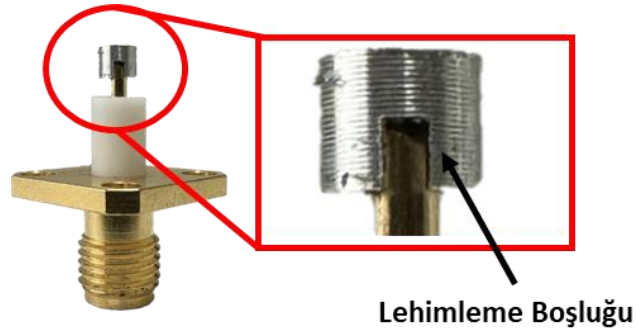
Besleme konnektörü tasarımında kullanılan disk başlığının SMA'nın canlı ucu ile bağlantısı oldukça önemlidir. Bu bağlantının tam olarak sağlanabilmesi ve mukavemetinin iyi olması için Şekil 3.16'da görüldüğü gibi disk başlık üzerine küçük bir boşluk açılmıştır. Disk başlık SMA'nın canlı ucuna oturtulduktan sonra bu boşluk aracılığıyla lehimlemiştir.



Şekil 3.14 Lazer kesim metodu ile açılmış yansıtıcı plakadaki açıklıklar



Şekil 3.15 Su jet kesim metodu ile açılmış yansıtıcı plakadaki açıklıklar



Şekil 3.16 Besleme konnektörü disk başlığı bağlantısı

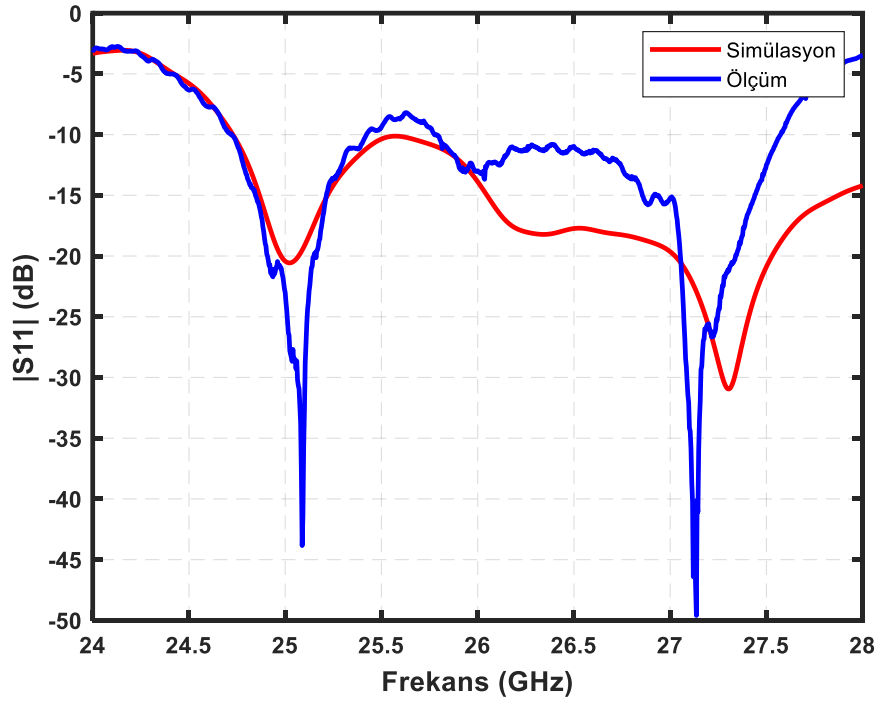
3.2.3 Ölçüm Sonuçları

Bu bölümde doğrulama için üretilen prototip antenin ölçüm sonuçları yer almaktadır. Antenin uzak alan ölçüm sonuçları Tübitak Bilgem Anten Test ve Araştırma Laboratuvarlarında (ATAM) yapılmıştır. Şekil 3.17’de prototip anten ve yansımatsız odada kurulan ölçüm düzeneği görülmektedir.

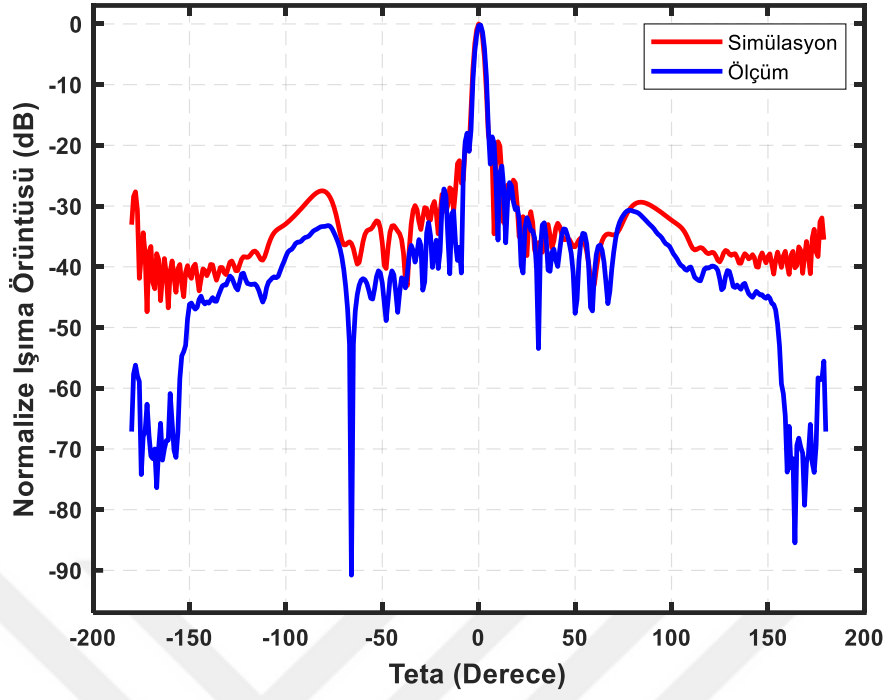


Şekil 3.17 Prototip anten ölçüm düzeneği

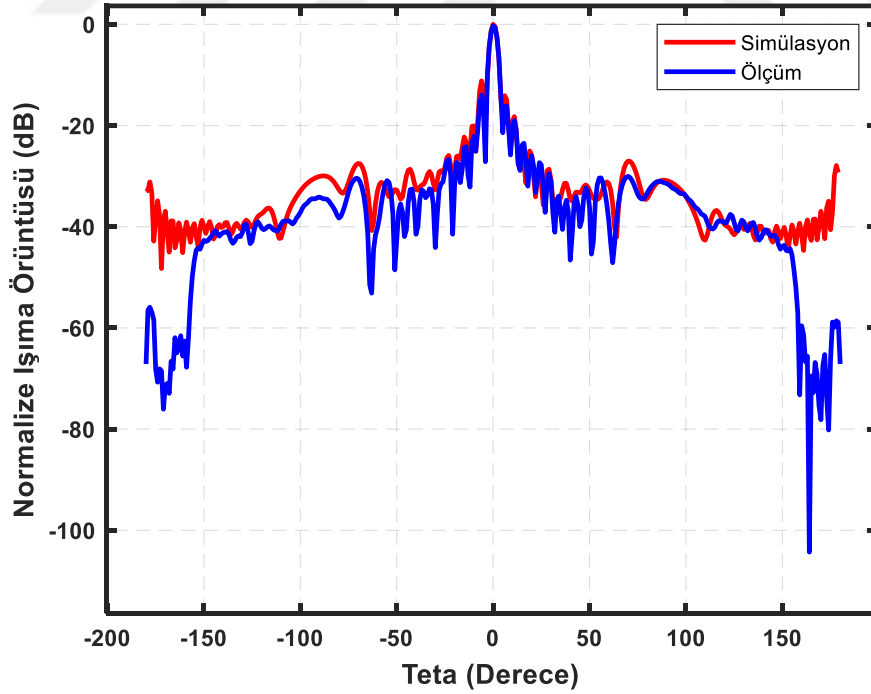
Şekil 3.18’de prototip antenin geri dönüş kaybına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları üst üste çizdirilerek gösterilmiştir. Geri dönüş kaybının, çalışma frekans bandında 10 dB’nin altında ve simülasyon sonucu ile büyük ölçüde benzer karakteristikte olduğu görülmektedir.



Şekil 3.18 Prototip antenin geri yansımaya katsayısına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları

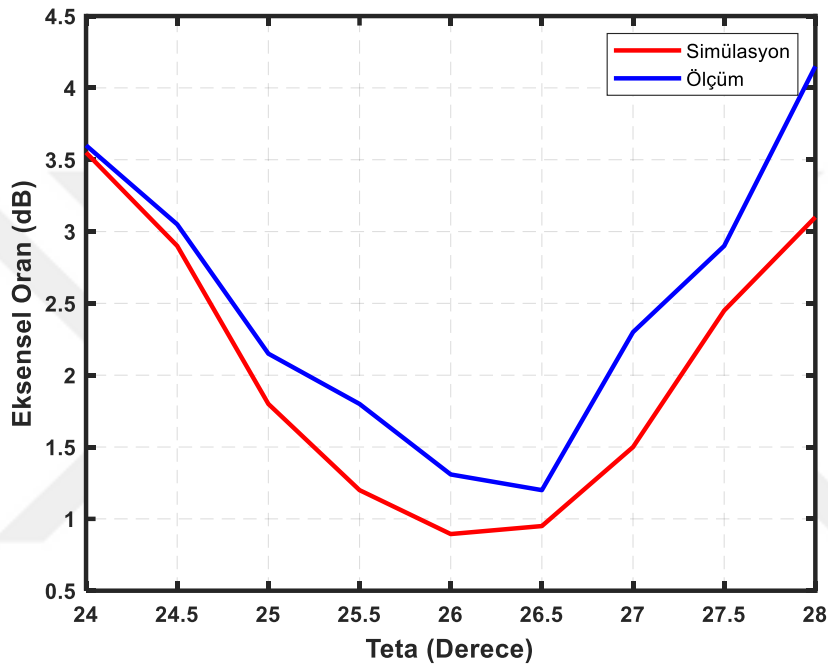


Şekil 3.19 Prototip antenin ışıma örüntüsüne ait simülasyon ve ölçüm sonuçları
($\varphi=0^\circ$)



Şekil 3.20 Prototip antenin ışıma örüntüsüne ait simülasyon ve ölçüm sonuçları
($\varphi=90^\circ$)

Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de prototip antenin uzak alan ışıma örüntüsüne ait simülasyon ve ölçüm sonuçları üst üste çizdirilmiştir. Uzak alan ölçümleri incelendiğinde, simülasyon ve ölçüm sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.21’de ise prototip antene ait eksensel oran grafiği verilmiştir. Antenin çalışma frekans aralığında eksensel oran, simülasyon sonucuna benzer nitelikte olup 3 dB seviyesinin altında elde edilmiştir ve bu sonuç antenin dairesel polarizasyona sahip olduğunu göstermektedir.

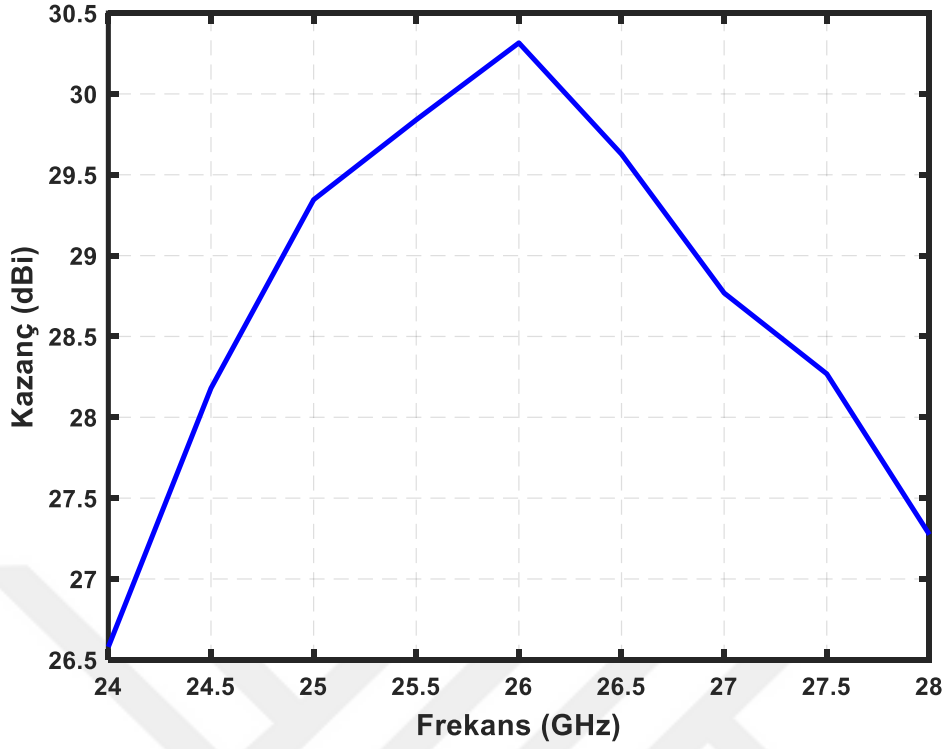


Şekil 3.21 Prototip antenin eksensel oranına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları

Tablo 3.5’te, prototip antenin uzak alan ışıma örüntüsüne ait ölçüm sonuçlarından elde edilen bazı önemli değerler detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 3.5 Prototip antenin 26 GHz’deki ölçüm sonuçları

	Kazanç	Yönlendiricilik	Yan Lob Seviyesi	3 dB Hüzme Genişliği
	dBi	dBi	dB	(°)
phi=0°	30.3	30.6	-18	4.2
phi=90°	30.3	30.6	-14	3.8



Şekil 3.22 Prototip antenin frekansa göre kazancının değişimi

Prototip anten için yapılan ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile büyük ölçüde benzerlik taşımaktadır, bu durum da RADA yapılarının açıklık verimini arttırmak için önerilen yeni metodu doğrulamaktadır. Bu metot ile açıklık verimi 5G FR2 bantlarında çalışan RADA yapısı için yaklaşık olarak 10% oranında arttırılarak 45% civarına ulaşmıştır. Ölçülen anten kazancı 26 GHz’de 30.3 dB seviyelerinde olup, antenin uzak alan ışıma örüntüsü simülasyon sonuçları ile paralellik göstermektedir. Antene ait 3 dB kazanç bant genişliği Şekil 3.22’de gösterilmiş ve yaklaşık 3 GHz’lik bir değer elde edilmiştir. Ayrıca ölçüm sonuçlarından yan lob seviyelerinin 18 dB civarında olduğu görülmektedir. Hem yan lob, hem de arka lob seviyesinin yeterince düşük olması sayesinde antenin ışıma örüntü kalitesinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu teknik özelliklerin yanı sıra, tasarımı yapılan anten kompakt bir yapıya da sahiptir. Özellikle plakalar arasında herhangi bir dielektrik malzeme kullanılmaması hem kolay üretilebilir olmayı hem de düşük maliyeti beraberinde getirmektedir. Ayrıca, önerilen RADA yapısı sadece 2 adet alüminyum plakadan oluştuğundan oldukça hafif olup hava platformları için de uygundur.

Bu tez çalışmasında tasarlanan RADA yapısı birbirine paralel metal plakalardan oluşmaktadır. Son yıllarda anten maliyetlerini daha da düşürmek ve üretimi kolaylaştırmak için BDK yöntemi anten çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır [17]. BDK teknolojisini kullanan bu çalışmalarda bant genişliği arttırma, yan lob seviyesi düşürme gibi uygulamalar yapılmaktadır [10], [18], [19].

Tasarımı yapılmış antenin ve daha önce çeşitli makalelerde yer alan benzer antenlere ait bazı fiziksel ve teknik özellikler Tablo 3.6'da özetlenmektedir. Tablodan da görüldüğü gibi tez çalışmamızda yer alan anten daha önceki çalışmalara kıyasla en iyi açıklık verimi yüzdesine sahiptir. Ölçülen kazanç değerleri karşılaştırıldığında, çalışmamızın boyut olarak daha büyük olan önceki çalışmaların çoğundan daha, iyi bazılarıyla ise rekabet edebilecek düzeyde olduğu görülmektedir [10], [20], [21]. Ayrıca, ölçülen kazanç değerleri boyut olarak daha küçük yada yakın olan çalışmalarla kıyaslandığında da üretilen prototip antenin iyi sonuçlar verdiği Tablo 3.6'da verilmiştir [17]-[19], [22], [23].

Tablo 3.6'ya RADA yapılarına ek olarak, çalışma frekans aralıkları yakın olan bazı reflektör anten makaleleri de eklenerek performans karşılaştırılması yapılmıştır. Tez çalışmamızda yaptığımız prototip antenin kendisinden daha büyük reflektör antenlerden daha verimli çalıştığı ve bunlarla rekabet edebilecek teknik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [24]-[26].

Tablo 3.6 Yeni metod ile tasarlanan antenin önceki tasarımlarla kıyaslanması

Ref.	Tür	Frekans	Kazanç	Açıklık Verimi	Yan Lob	Eksensel Oranı	Çap
		GHz	dBi	%	dB	dB	mm
Tez	RADA	26	30.3	45	-18	1.2	180
[17]	RADA	28	21.7	12	-17	-	120
[19]	RADA	28	20	-	-	-	130
[22]	RADA	34.4	27	43	-8	0.3	100
[23]	RADA	11	22.1	40	-20.8	0.7	180
[18]	RADA	28	23.3	24.8	-17.5	-	100
[21]	RADA	12.5	31	24.6	-	-	550
[10]	RADA	10.4	27.3	28.3	-7.4	<1	400
[20]	RADA	9.42	29	28	-9	1.12	540
[24]	Reflek tör	26.5-29.5	30	-	-	-	250
[25]	Reflek tör	28	48.5	25.4	-24	-	1800
[26]	Reflek tör	28	32.1	47	-13.6	-	200

4

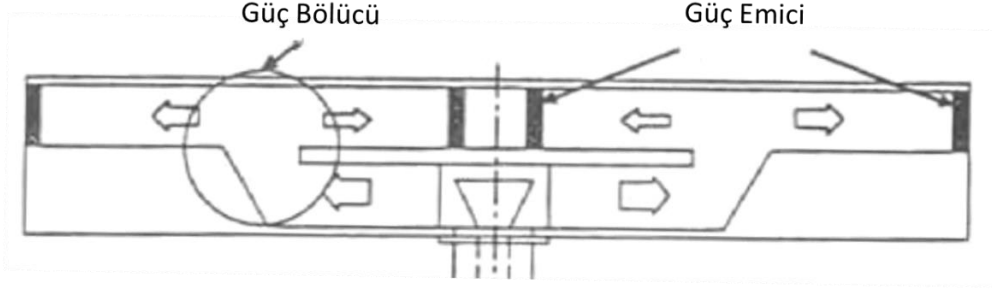
GENİŞ BANT RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI

4.1 Çalışma Prensibi

RADA'lar sahip olduğu yüksek yönlendiricilik kabiliyeti, düşük yan lob seviyesine sahip ışıma örüntüsü, yüksek verimliliği ve bu özellikleri fiziksel olarak küçük boyutlarda sağlayabiliyor olması ile öne çıkmaktadır. Ancak bu antenler sahip olduğu yüksek kazancı çalışma frekans aralığının tamamında sağlayamayabilirler.

RADA yapılarının en önemli dezavantajı, kazanç bant genişliklerinin dar olmasıdır. Bu dezavantaj, yüksek kazanç elde etmek için yansıtıcı plaka üzerinde yapılan açıklık dizilimi ile ilgilidir. Birim hücreler arasındaki radyal uzaklığın tek bir frekansa bağlı olarak belirlenmesi ($S_p = \lambda_0$) diğer frekansların ışıma karakteristiğini etkilemektedir, bu sebeple çalışma aralığı dışında kalan frekanslarda anten kazancı düşüp ışıma örüntüsü bozulabilmektedir [10], [27]-[30]. Ayrıca RADA yapılarının boyutunun artırılması, ilerleyen dalganın daha fazla kayba uğramasına ve açıklıkları uyaracak gücünün azalmasına sebep olacağı için bant genişliğini ve anten verimini düşürmektedir.

RADA'ların bant genişliklerini arttırmak için birçok farklı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu ilerleyen dalganın hat uzunluğunun azaltılmasını temel almıştır. Bunu gerçekleştirebilmek için hem tek katmanlı hem de çift katmanlı yapı, tek bir RADA'da birleştirilerek hibrit bir yapı oluşturulmuştur. Besleme konnektörü aracılığıyla RADA uyarıldıktan sonra içeride oluşturulan güç bölücü ile ilerleyen dalga ikiye bölünür, böylece yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıklar hem ileri yöndeki hem de geri yönde oluşan elektromanyetik dalgalarla uyarılırlar, böylece uzun yol etkisi yarıya indirilerek bant genişliği arttırılır. Şekil 4.1, bant genişliğini arttırmak için yapılan hibrit tasarımı göstermektedir.

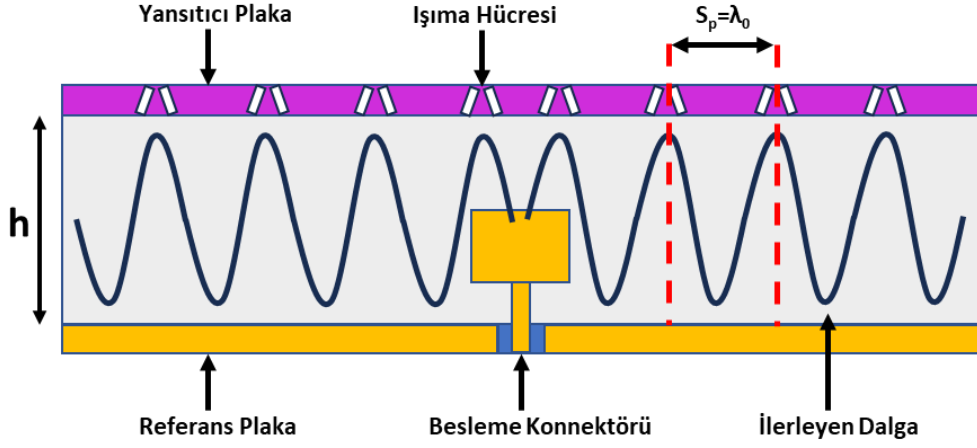


Şekil 4.9 Bant genişliğini arttırmak için oluşturulan hibrit yapı

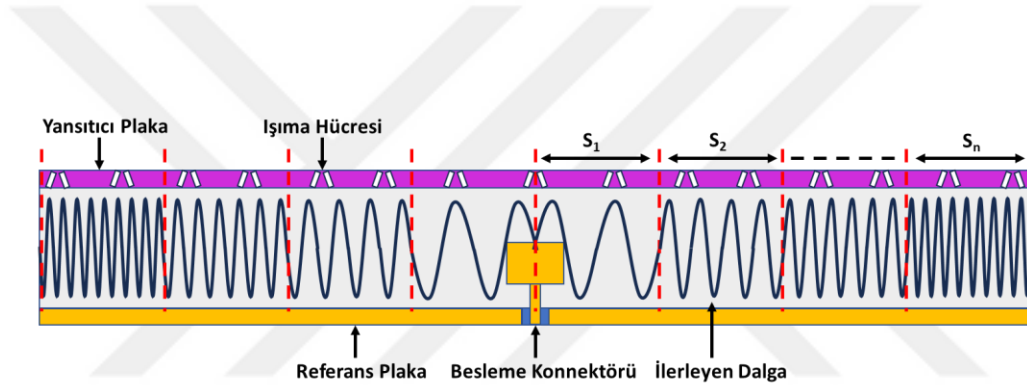
Tez çalışmasının bu bölümüne uygulanabilirliği daha rahat olan bir metot ile önceki bölümde tasarımı yapılan RADA'nın bant genişliği arttırılmaya çalışılmıştır. Bu metot, düzgün dağılımlı olmayan radyal dalga kılavuzunu temel alıp dalga kılavuzu içerisinde farklı dalga boyları oluşturarak bant genişliğini arttırmayı hedeflemektedir.

4.2 Tasarım

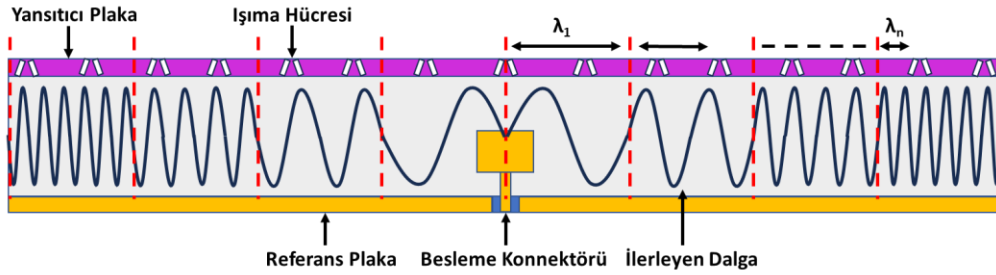
Elektromanyetik dalganın klasik RADA yapısında plakalar arası boşlukta ilerleyişi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Klasik RADA yapılarında dielektrik katsayısı ve dalga boyu, dalga kılavuzu içerisinde sabit olacak şekilde kalır, herhangi bir değişikliğe uğramaz. S_p parametresi serbest uzay dalga boyu (λ_0) ya da kılavuzlanmış dalga boyuna (λ_g) eşit olacak şekilde ayarlanmaktadır. Diğer frekans bileşenlerinin dalga boyu farklı olacağından, önceden belirlenmiş S_p değeri ile uyumsuz olacaktır ve bu durumda diğer frekansların açıklıklardan ısımasını olumsuz yönde etkileyecektir. Şekil 4.1'de klasik RADA yapısı içerisindeki elektromanyetik dalganın ilerleyişi görülmektedir. Burada ilerleyen elektromanyetik dalganın dalga boyu ile açıklıklar arası radyal uzaklık aynı olduğu için herhangi bir uyumsuzluk yaşanmamaktadır.



Şekil 4.2 Çalışma frekansına (f_0) göre belirlenmiş S_p ve plakalar arası ilerleyen elektromanyetik dalga



Şekil 4.3 f_1 frekansına sahip elektromanyetik dalganın plakalar arasında ilerleyişi



Şekil 4.4 f_2 frekansına sahip elektromanyetik dalganın plakalar arasında ilerleyişi

Bant genişliğini arttırmak için RADA yapısındaki plakalar arası boşluk düzgün dağılımlı olmayacak şekilde kurgulanmıştır. Burada düzgün dağılımlı olmamaktan kasıt, dalga kılavuzu içerisindeki dalga boyunun değişmesidir. Dalga boyunun değişimi normalde çok sık aralıklı olacak şekilde yapılmalıdır; ancak bu geçişi gerçek hayatta doğrulamak bir hayli zor olabilir. Bu sebeple buradaki çalışmada bu geçişler kademeli olarak yapılmıştır.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te düzgün dağılımlı olmayan radyal dalga kılavuzu içerisinde ilerleyen elektromanyetik dalga görülmektedir. İlerleyen dalga S_1 , S_2 ve S_n ile gösterilen bölgelerden geçtikçe ortamın dielektrik katsayısı ve dalga boyu değişmektedir. S_1 , $S_2 \dots S_n$ bölgelerinin dielektrik katsayıları ilgili frekans bileşeninde maksimum ışımayı sağlayacak şekilde seçilmelidir. Örneğin S_1 bölgesi f_1 frekansı için ayarlandıysa $S_p = \lambda_1(f_1)$ olacak şekilde S_1 bölgesinin dielektrik katsayısı belirlenmeli, aynı şekilde S_2 bölgesi f_2 frekansı için ayarlandıysa $S_p = \lambda_2(f_2)$ olacak şekilde S_2 bölgesinin dielektrik katsayısı belirlenmelidir.

Tablo 4.1 Bant genişliği arttırılmış RADA’nın tasarım parametreleri

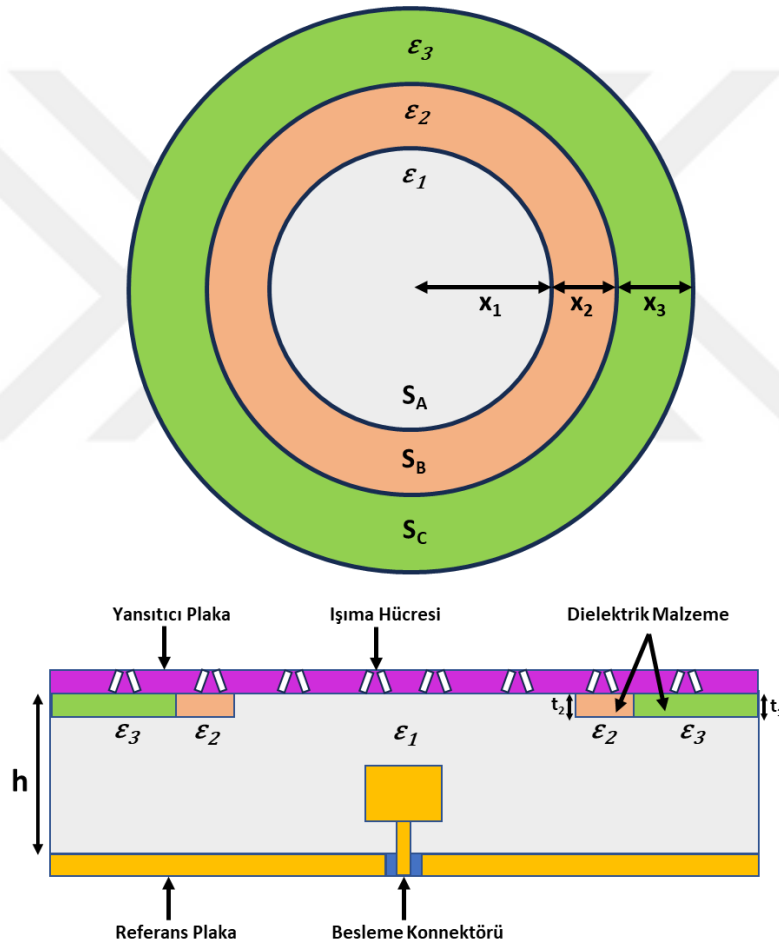
Merkez Frekansı	Serbest Uzay Dalga Boyu	Radyal Uzaklık (S_p)	Dielektrik Katsayısı	Bölge Numarası
GHz	mm	mm	-	-
24	12,5	11	1.3	S_5
25	12	11	1.2	S_4
26	11,5	11	1.09	S_3
27	11,1	11	1.02	S_2
28	10,7	11	0.9	S_1

Tablo 4.1’de, merkez frekansı ve birim hücreler arası radyal uzaklığa göre bulunan bölgelere ait dielektrik katsayıları verilmiştir. Dielektrik katsayıları bulunurken denklem (4.1)’den yararlanılmıştır.

$$\varepsilon = \left(\frac{\lambda_0}{S_p} \right)^2 \quad (4.1)$$

Tablo 4.1’de yer alan dielektrik katsayı değerleri birbirlerine çok yakın olup, bu değerlere sahip malzemeleri birebir bulup gerçekleştirme yapmak zor olabilir. Bu sebeple bölge sayısı azaltılıp, bulunan dielektrik katsayılarına yakın, bulunması kolay malzemeler referans alınarak gerekli simülasyonlar yapılmıştır.

RADA yapısında, plakalar arası boşluk içerisinde detayları Şekil 4.5’te gösterilen üç farklı dielektrik katsayısına sahip bölge düşünülmüştür. Bu bölgeler sırasıyla hava ($\epsilon_1=1$), Rogers 5880 ($\epsilon_2=2$) ve Rogers 4350B ($\epsilon_3=3,66$) olacak şekilde ayarlanmış ve detaylı parametreler Tablo 4.2’de verilmiştir.

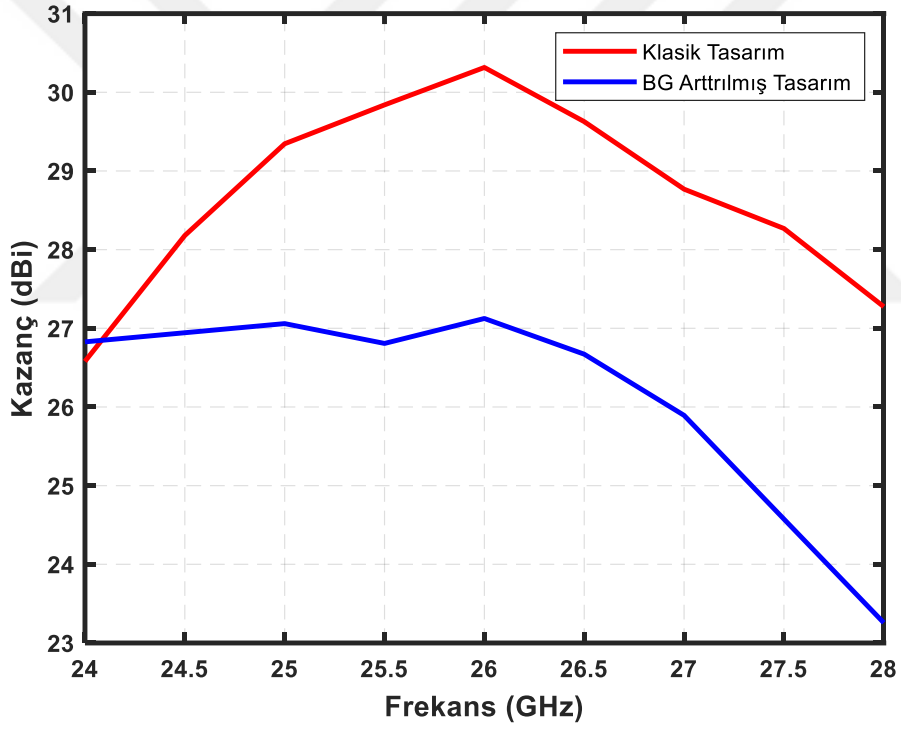


Şekil 4.5 Yansıtıcı plaka altına konumlandırılan dielektrik malzemeler

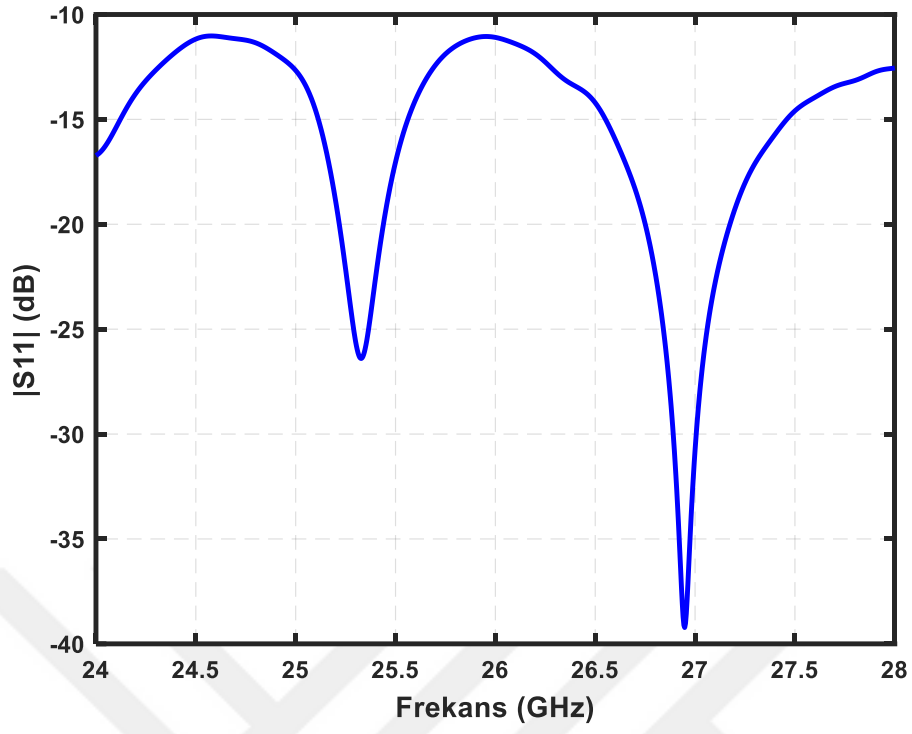
Şekil 4.5’te RADA içerisinde konumlandırılan dielektrik malzemelerin yükseklikleri t_1 ve t_2 ile, S_A , S_B ve S_C ile gösterilen bölgelerin yarıçap ve çap gibi diğer fiziksel boyutları da sırasıyla x_1 , x_2 ve x_3 olacak şekilde gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Bant genişliği arttırılmış RADA’da kullanılan dielektrik malzemelere ait parametreler

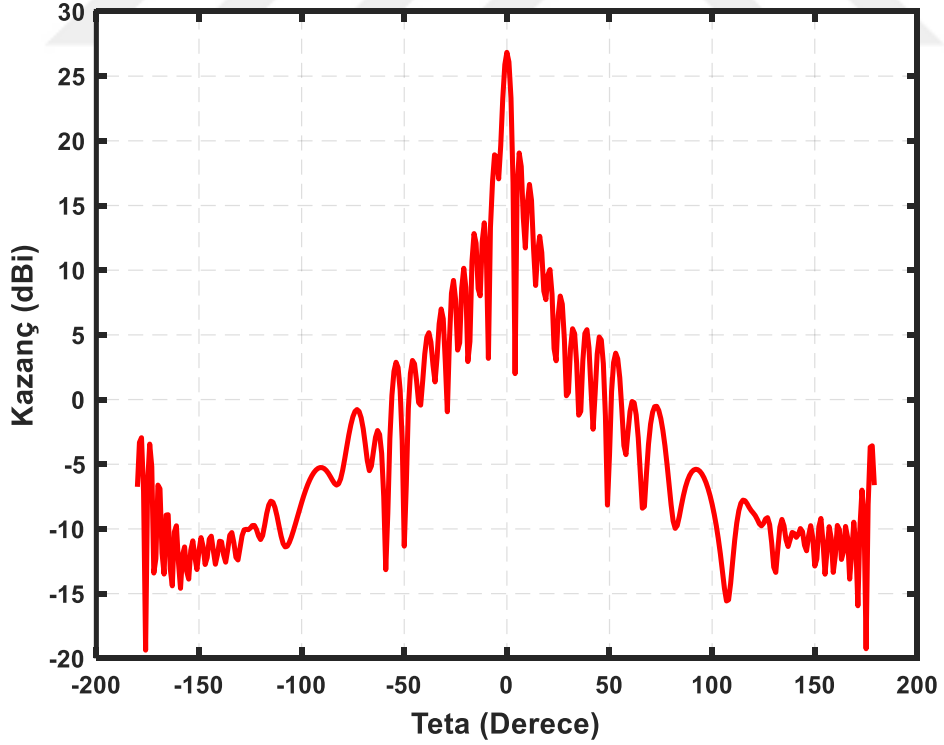
Bölge	Malzeme	Dielektrik Sabiti	Tanjant Kaybı	Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)
S _A	Hava	1	-	58 (x ₁)	-
S _B	Rogers 5880	2	0.0009	10 (x ₂)	0.25 (t ₂)
S _C	Rogers 4350B	3.66	0.0034	20 (x ₃)	0.25 (t ₁)



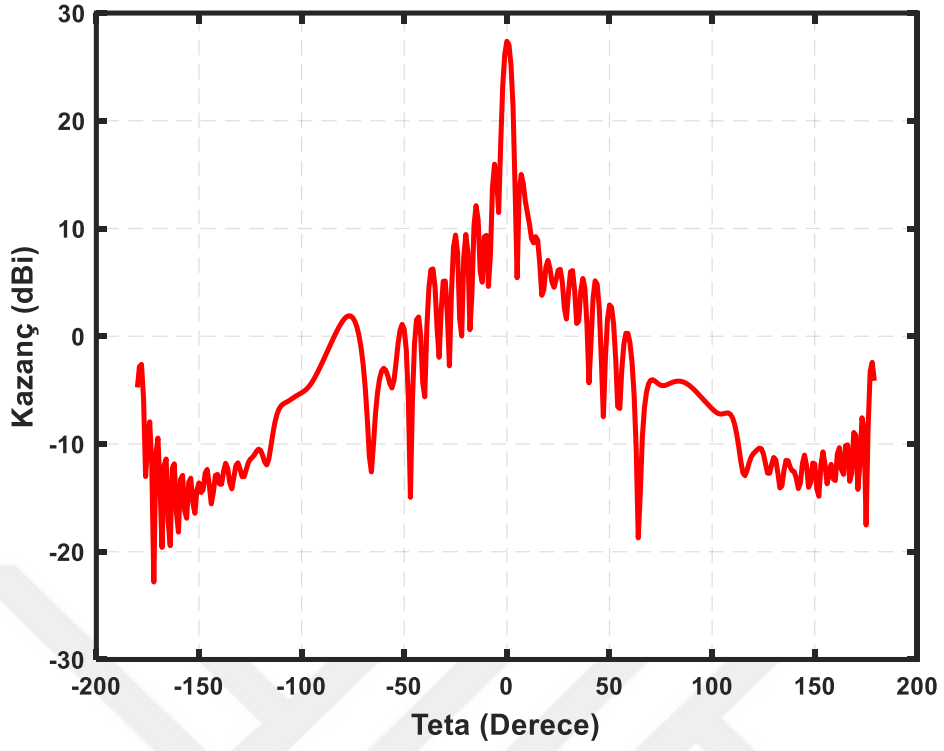
Şekil 4.6 Klasik tarasım RADA ve bant genişliği arttırılmış RADA’nın frekansa göre kazanç değişimi



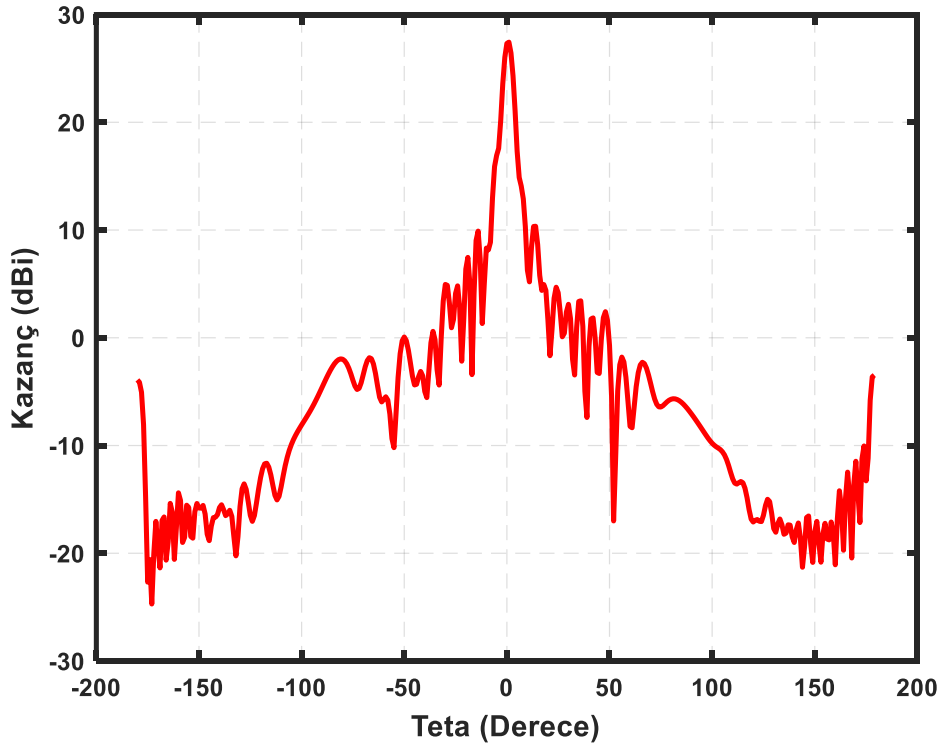
Şekil 4.7 Bant genişliği arttırılmış RADA'nın geri dönüş kaybı



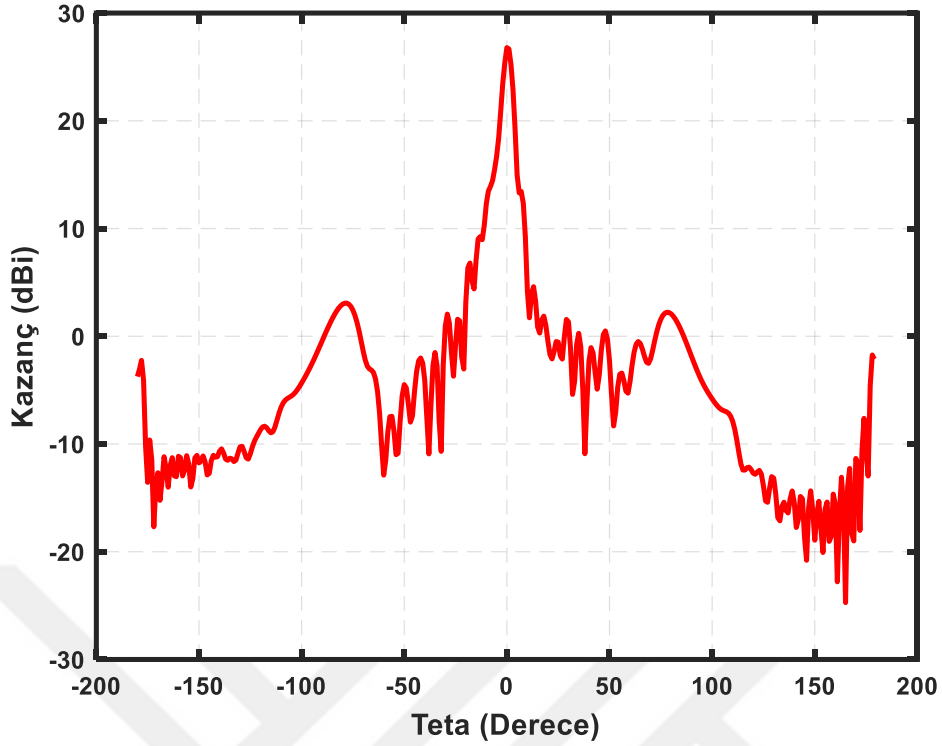
Şekil 4.8 Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 24 GHz ışıma örüntüsü



Şekil 4.9 Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 25 GHz ışıma örüntüsü



Şekil 4.10 Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 26 GHz ışıma örüntüsü



Şekil 4.11 Bant genişliği arttırılmış RADA'nın 26.5 GHz ışıma örüntüsü

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de bant genişliği arttırılmış RADA'nın frekansa göre kazanç değişimi ve geri dönüş kaybı performansı verilmiştir. Özellikle frekansa göre kazanç değişiminin olduğu grafik dikkatle incelendiğinde, bir önceki tasarıma göre kazanç bant genişliğinde ciddi iyileşmeler kaydedildiği görülmektedir. Şekil 4.8'den Şekil 4.11'e kadar olan uzak alan ışıma örüntülerinde de görüldüğü gibi, 24 GHz'den itibaren 26.5 GHz bantlarına kadar kazanç değerlerinde çok az sapmalar olmuştur, bu da yapılan tasarımın özellikle bu bantlarda başarıyla çalıştığının bir göstergesidir. Ancak aynı durum 26.5 GHz - 28 GHz arasında tam olarak gerçekleşmemiştir. Bunun sebebi olarak yansıtıcı plakanın ve yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların fiziksel boyutlarının bu frekans aralığını karşılayamadığı düşünülmektedir. Aynı zamanda diğer anten yapılarında olduğu gibi RADA yapılarında da dielektrik malzemeler kullanılarak bant genişliği arttırıldığında, anten kazancında ve açıklık veriminde düşüşler görülmektedir.

Ayrıca antene ait geri dönüş kaybı performansı incelendiğinde, 24 GHz -28 GHz aralığında -10 dB'nin altında olduğu ve bant genişliğini arttırmak için kullanılan yöntemin S_{11} değerinde herhangi bir olumsuz sonuca neden olmadığı görülmektedir.

5

İŞIMA ÖRÜNTÜSÜ DÖNDÜRÜLMÜŞ RADYAL AÇIKLIKLI DİZİ ANTEN TASARIMI

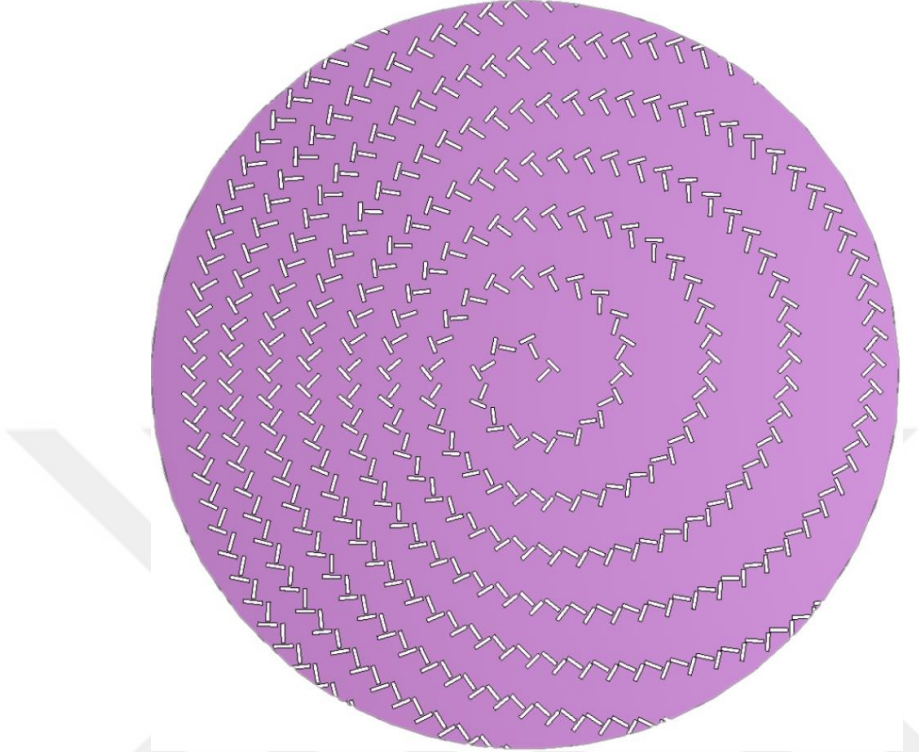
Tez çalışmasının bu bölümünde RADA yapılarındaki ışıma örüntüsünün belirli yönlere döndürülmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Literatürde kullanılan yöntemler tüm yönleriyle incelenmiş ve Bölüm 2’de tasarlanan antene uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik ve tablolarla detaylı olarak verilmiştir.

5.1 Çalışma Prensibi

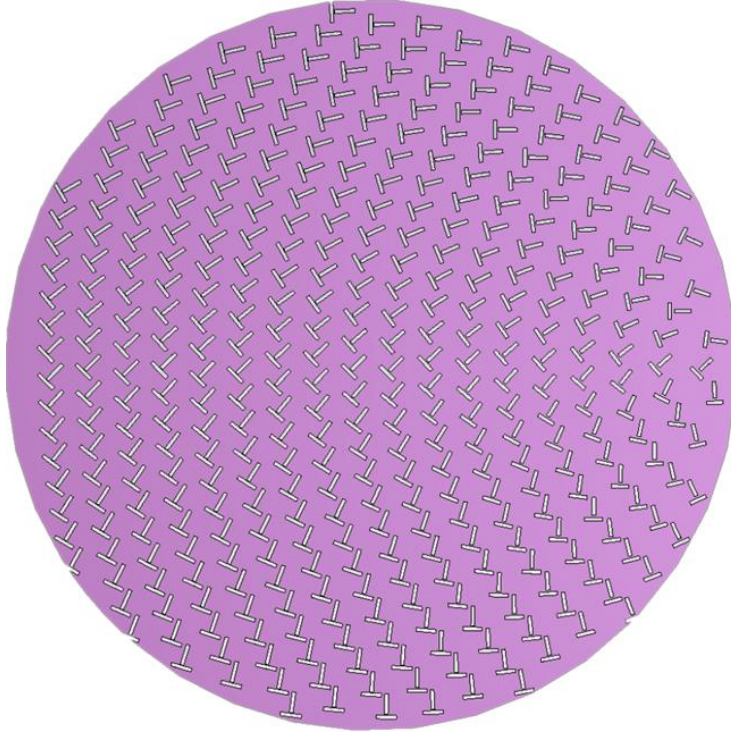
RADA yapılarında ışıma örüntüsü yansıtıcı plaka üzerinde bulunan açıklıkların konumlandırılmasına bağlıdır. Işımanın yatay ve düşeyde ekseninde yönlendirileceği yere göre birim ışıma hücresinin tasarımı ve açıklıkların yerleşimi yapılmaktadır [31]-[33]. Bu tez çalışmasında ışıma örüntüsünü döndürmek için, farklı RADA yapılarında da kullanılan, önemli bir metot üzerine çalışılmıştır. Bu metot, kendi içerisinde iki farklı yansıtıcı plaka tasarımından oluşmaktadır. Birinci yansıtıcı plaka tasarımında, spiral hatlar arasındaki mesafe plakanın bir yarısında azalırken diğer yarısında artmaktadır. Hatların birbirine yaklaştığı bölgelerde açıklıkların yoğunluğu da artmaktadır. Bu yaklaşım ile yapılan tasarımda, antenin yansıtıcı yüzeyinde kullanılmayan boşluklar kalmaktadır, bu durum da anten kazancını azaltıp, açıklık verimini düşürmektedir. Ayrıca açıklıkların dağılımından kaynaklı ışıma örüntüsünün kalitesi düşmekte ve yan loblar oluşmaktadır.

İşıma örüntüsünü döndürmek için kullanılan ikinci yansıtıcı plaka tasarımı ise anten performans parametreleri açısından daha verimlidir. Bu tasarım ile daha kazançlı, açıklık verimi yüksek ve yan lob seviyeleri daha düşük ışıma örüntüsüne sahip belirli bölgeye yönlendirilmiş RADA yapıları elde edilebilir. Bu yaklaşımda ilk olarak, yansıtıcı yüzeyden daha çok yararlanılacak şekilde açıklık dağılımı yeniden düzenlenir. Böylece ilk yaklaşımda görünen yansıtıcı plaka üzerindeki kullanılmayan alanlar azaltılarak verimlilik artırılır. İkinci olarak, besleme konnektörünün yeri merkezden anten köşesine doğru kaydırılır. Üçüncü olarak ise antenin besleme konnektörüne yakın olan kenarına metal bir plaka yerleştirilir,

böylece besleme konnektöründen yayılan elektromanyetik dalganın anten köşesinden sızması engellenir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2, ışıma örüntüsünü döndürmek için tasarlanan yansıtıcı plakaları göstermektedir.



Şekil 5.1 Işıma örüntüsünü döndürmek için tasarlanan birinci yansıtıcı plaka



Şekil 5.2 Işıma örüntüsünü döndürmek için tasarlanan ikinci yansıtıcı plaka

5.2 Tasarım

Bu tez çalışmasında, yüksek verimlilik ve yüksek ışıma örüntü kalitesi sunduğu için Şekil 5.2’de görünen yansıtıcı plaka kullanılmıştır. Işıma örüntüsünün döndürülmesinde birim hücreler arası radyal mesafe önemli kriterlerdendir. Bu radyal mesafenin doğruluğu ışıma örüntü kalitesini ve anten yönlendiriciliğini doğrudan etkilemektedir.

$$S_p = \frac{\lambda_g}{1 - \varepsilon \sin \theta_t \cos(\varphi - \varphi_t)} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (5.2)$$

S_p : Birim hücrelerin merkezleri arasında ρ yönündeki uzaklık.

λ_g : Kılavuzlanmış dalga boyu.

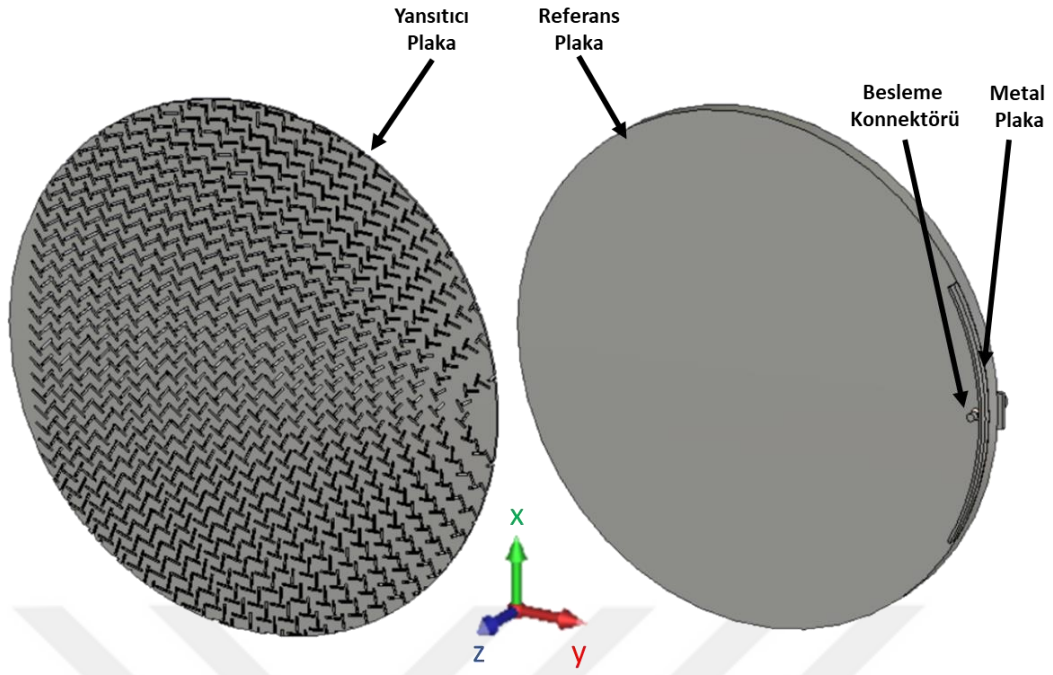
ε : Radyal dalga kılavuzu içerisindeki malzemelerin dielektrik katsayılarının ağırlıklı toplamı.

θ_t : Teta yönünde ışıma örüntüsünün döndürüleceği açı.

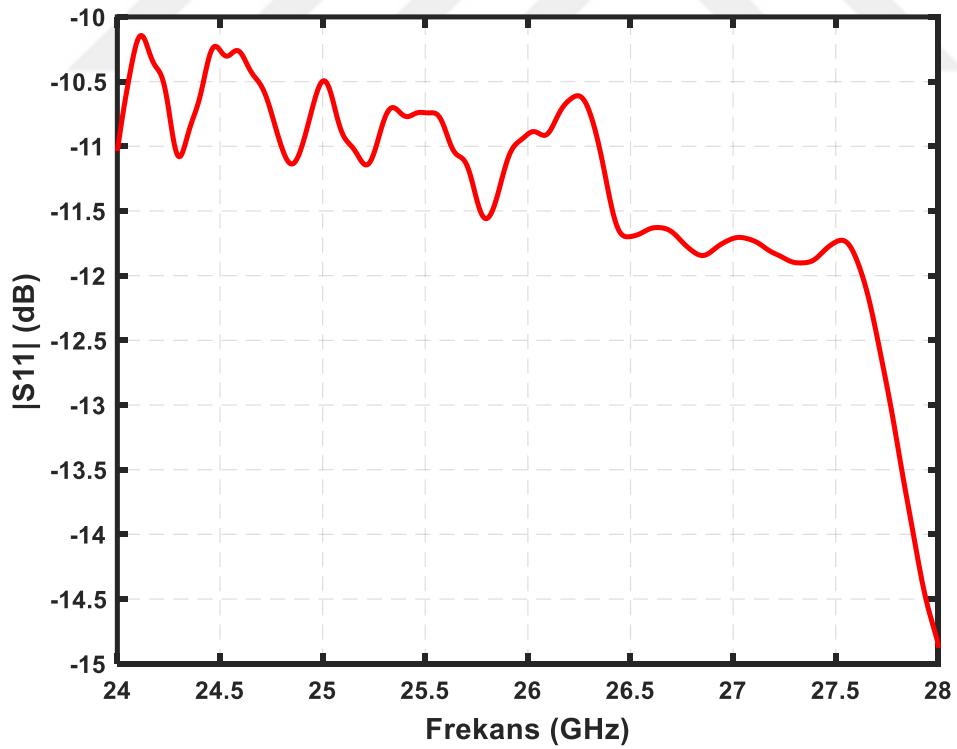
φ_t : Phi yönünde ışıma örüntüsünün döndürüleceği açı.

Tasarlanan yapının 26 GHz bandında çalışması, ışıma örüntüsünün teta yönünde 25°, phi yönünde ise 0°’ye yönlendirilmesi hedeflenmiştir. Birim ışıma hücreleri arasındaki mesafenin belirlenmesinde denklem (5.1) kullanılmış, açıklıkların yansıtıcı plaka üzerine yerleşimi için simülasyon programındaki VBA Macro’dan yararlanılmıştır. Açıklıkların fiziksel boyutları, Bölüm 2’de kullanılan yapı ile birebir aynı tutulmuştur.

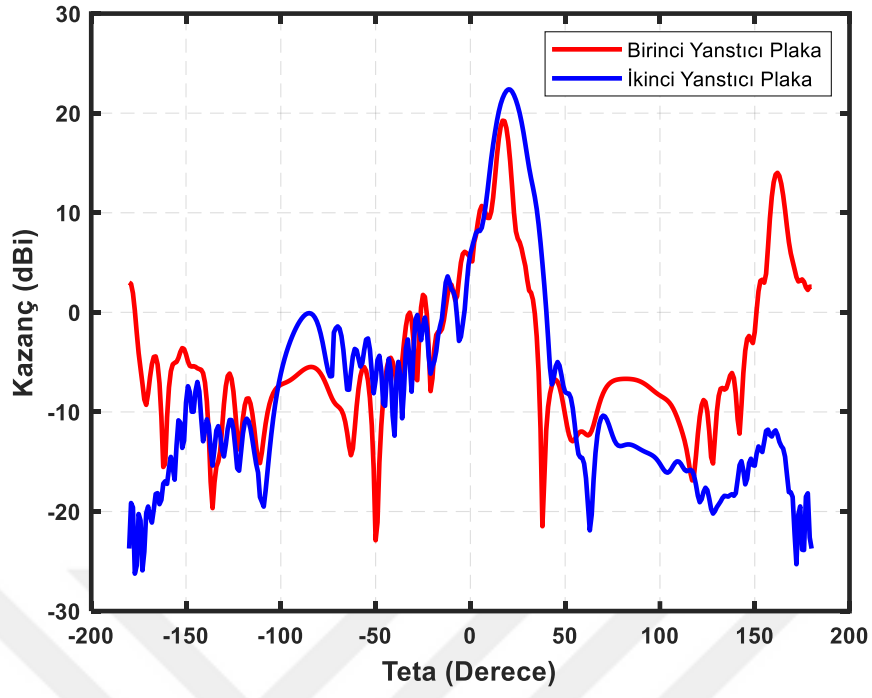
Tasarımı yapılan antenin bileşenleri Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Bu tasarımda besleme konnektörü anten ucuna yakın konumlandırıldığından, hem yayılan güçten daha fazla yararlanmak ve hem de yüksek kazanç elde etmek için antenin konnektöre yakın köşesine metal şerit çekilmiştir.



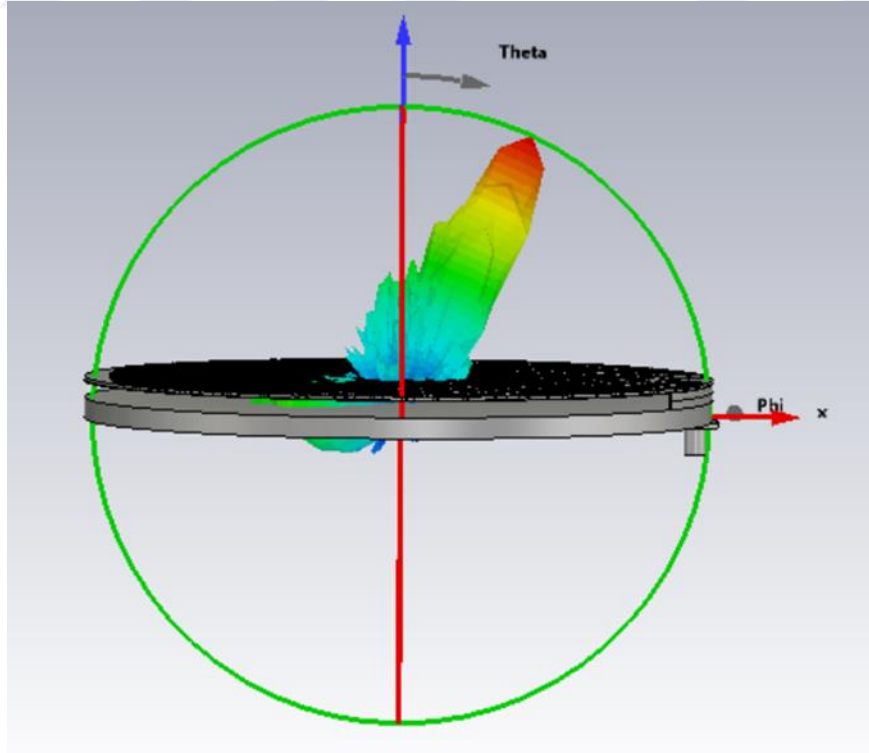
Şekil 5.3 İkinci yansıtıcı plaka kullanılarak ışıma örüntüsü döndürülmüş RADA'nın bileşenleri



Şekil 5.4 İkinci yansıtıcı plaka kullanılarak ışıma örüntüsü döndürülmüş RADA'nın geri dönüş kaybı



Şekil 5.5 Birinci ve ikinci yansıtıcı plakalara göre tasarlanmış RADA'ların ışıma örüntüleri



Şekil 5.6 İkinci yansıtıcı plakaya göre tasarlanmış RADA'nın uzak alan ışıma örüntüsü

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te tasarımı yapılan antene ait performans grafikleri verilmiştir. S_{11} grafiği incelendiğinde antenin çalışma frekans bandında geri dönüş kaybının -10 dB'nin altında olduğu ve antenin besleme konnektörü ile uyumlu çalıştığı görülmektedir. Uzak alan ışıma örüntüsü incelendiğinde ise antenin istenen teta (25°) açısına döndürüldüğü ve yaklaşık olarak 25 dB kazaca sahip olduğu görülmektedir.



FAZ DÜZELTİCİ YÜZEY TASARIMI

Tez çalışmasının bu kısmında Bölüm 2’de tasarlanan antenin yakın alan analizi yapılmış ve faz dağılımı çıkarılmıştır. Bu faz dağılımını düzeltmek için antenin yansıtıcı plakasından belirli bir yükseklikte olacak şekilde faz düzeltici yüzey tasarımı yapılmıştır.

6.1 Giriş

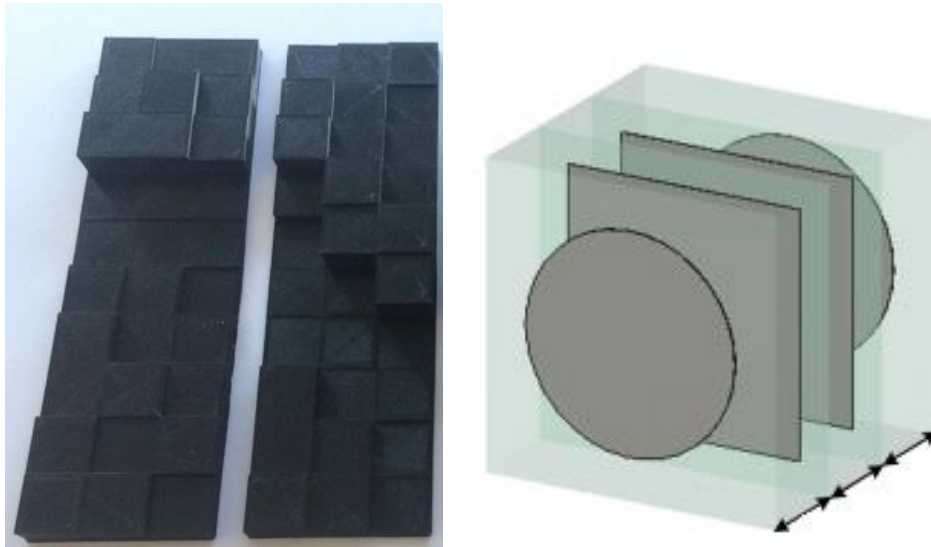
Huzme taraması yapabilen dairesel polarizasyona sahip yüksek kazançlı antenler mobil platformlarda kesintisiz bilgi aktarımı için gereklidir [34]-[36]. Huzme taraması yapan antenlerden düşük güç tüketimi, yüksek verimlilik, düşük maliyet, kolay üretilebilirlik vb. özelliklere de sahip olması istenmektedir. Parabolik reflektör antenler gibi klasik yüksek kazançlı antenler, fiziksel olarak döndürülerek huzme taraması yapılmaktadır. Bu antenlerin hem ağırlıklarının fazla olması hem de fiziksel olarak döndürülebilmesi için geniş alana ihtiyaç duyulması huzme tarama işini zorlaştırmaktadır. Fiziksel olarak antenlerin döndürülmesi dışında, dizi antenlerle gerçekleştirilebilen elektronik huzme tarama işlemi de literatürde sıklıkla çalışılan konulardan olmuştur [37]-[39]. Bu metot, özellikle 20 GHz üstünde çalışan yüksek kazançlı antenler istendiğinde besleme devrelerindeki kayıplardan dolayı verimsiz olmaktadır.

RADA’lar sahip oldukları fiziksel ve teknik özellikler sayesinde huzme taraması konusunda literatürde çalışılan antenlere alternatif olabilirler; ancak klasik RADA’ların ışınma örüntülerinin sabit olması ve sürekli döndürülememesi huzme taraması için dezavantaj oluşturmaktadır. Klasik RADA yapılarında, sürekli huzme yönlendirilmesinin yapılabilmesi için yansıtıcı plakanın üzerinde konumlandırılabilen ve dönüş açısına bağlı huzmenin de dönebileceği yapılar üzerine çalışılmaktadır. Bu yapılar antenin yakın alanı bölgesine yerleştirilen metamalzeme olarak adlandırılabilir. Bu yöntem ile anten huzmesini sürekli olacak şekilde, ışınma örüntüsü bozmadan yönlendirebilmek için temel antenin yakın alan faz dağılımının olabildiğince düzgün dağılımlı olması gerekmektedir.

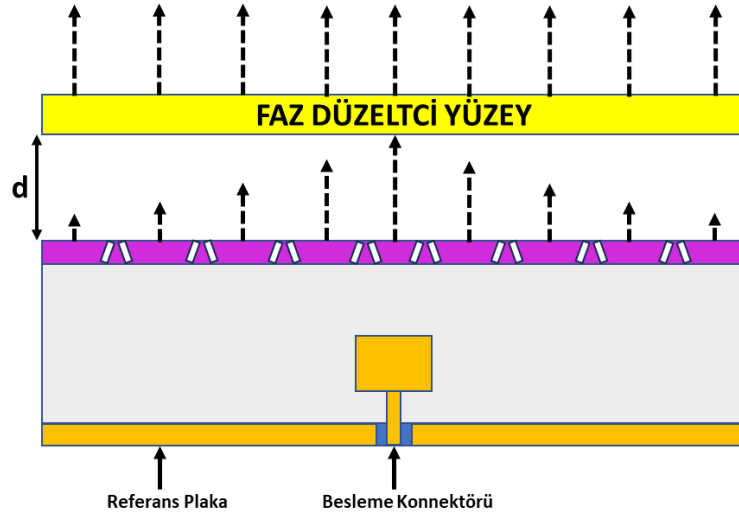
6.2 Faz Kaydırıcı Yapılar

Temel antenin faz dağılımının düzgün değiştiği durumunu sağlamak çoğu anten için zorlayıcı bir ister olabilir ve bu durum RADA için de geçerlidir. Antenin faz dağılımı düzgün olmadığı takdirde, metamatzemelerle yapılacak faz değişimi sırasında huzme kalitesinde düşme, yan lob seviyesinde artma vb. anten performansını düşürücü durumlar yaşanabilir. RADA'nın sürekli huzme taraması amacıyla kullanılabilmesi için öncelikle yakın alan faz dağılımı incelenmeli ve gerekli düzeltmeler yapılmalıdır.

Faz dağılımını düzetmek için literatürde kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları farklı yüksekliklerde dielektrik malzemeler kullanarak temel antenden gelen faz bilgisini değiştirmeyi hedeflerken, bazıları da baskı devre kartları ile birim hücreler oluşturarak faz değişimi yapmayı hedeflemektedir. Sadece dielektrik malzemelerle yapılan faz değişimleri uygulama açısından ve üretim süreçleri açısından zorlayıcı olup istenen faz değişimlerini de tam olarak sağlayamayabilir. Bu çalışmada, birim hücre modeli üzerinden gidilerek uygun faz değişimi, farklı özelliklere sahip birim hücrelerin baskı devre kartı üzerine modellenmesi ile sağlanmıştır. Şekil 6.1'de farklı yükseklikteki dielektrik malzemelerle ve baskı devre kartı ile oluşturulmuş birim hücre modelleri gösterilmiştir.

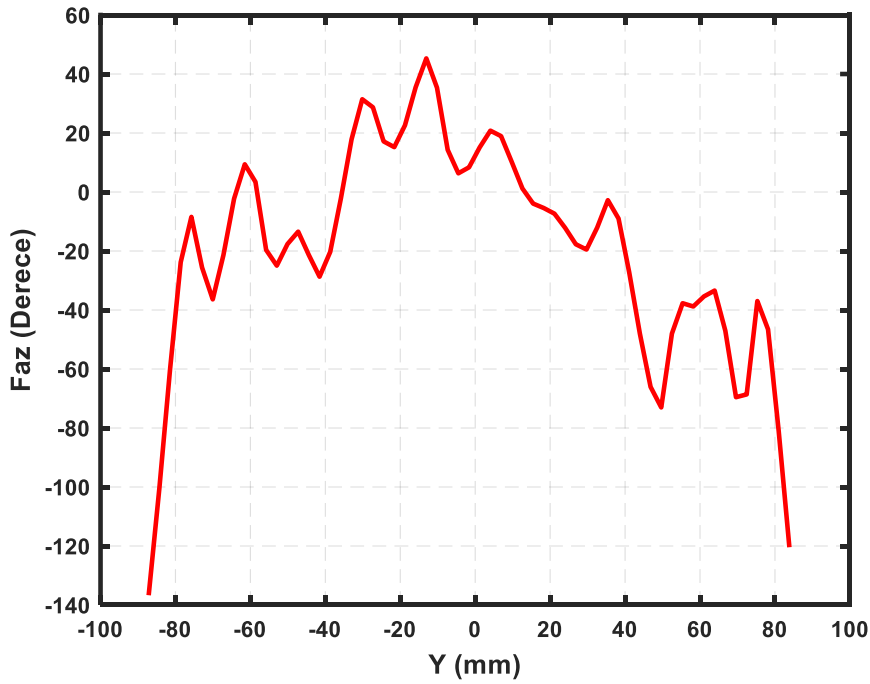


Şekil 6.1 Dielektrik malzemenin ve baskı devre kartından oluşan birim hücre modelleri



Şekil 6.2 Faz düzeltici yüzey sistemi

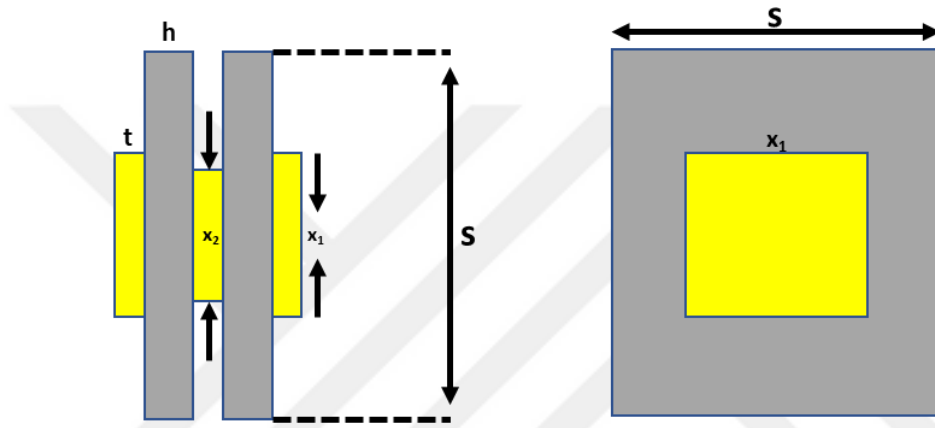
Şekil 6.2 önerilen faz düzeltici sistemi gösterilmektedir. Faz düzeltici yüzey antenin yakın alanı içerisine konumlandırıldığında (d) girişine gelen ve düzgün dağılımlı olmayan faz bilgisini doğru birim hücre konfigürasyonu ile düzeltebilmektedir. Bunun için öncelikle antenin yakın alan faz değişiminin bilinmesi gerekmektedir. Antenin faz dağılımı elde edildikten sonra, bu faz dağılımını düzeltecek yüzeyin de faz değişim eğrisi belirlenebilir. Şekil 6.3 tasarlanan antene ait faz değişimi göstermektedir.



Şekil 6.3 Tasarımı yapılan antenin $x = \lambda_0/4$ için yakın alan faz dağılımı

6.3 Birim Hücre Tasarımı

Faz düzeltici yüzey modeli, temel antenin faz dağılımı dikkate alınarak oluşturulmuş birim hücrelerden oluşmaktadır. Her birim hücre, temel antenden gelen elektromanyetik dalganın fazını belirli dereceler arasında kaydırabilecek bir yapıya sahiptir. Faz kaydırma derecesi birim hücre modelinde kullanılan yapının geometrik değişkenlerine, birim hücrede kullanılan malzemenin dielektrik katsayısına, birim hücre modelinin yüksekliği gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir.



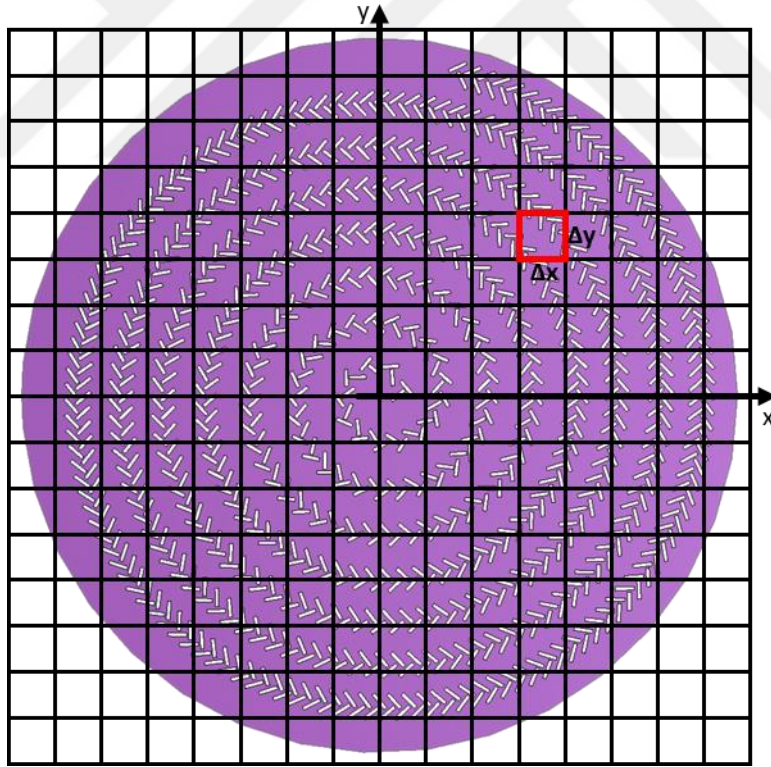
Şekil 6.4 Örnek birim hücrenin yandan ve üstten görünüşü

Tablo 6.1 Örnek birim hücreye ait genel tasarım parametreleri

Açıklama	Sembol
Birim hücrenin birinci katında bulunan iletken malzemenin yüksekliği	x_1
Birim hücrenin ikinci katında bulunan iletken malzemenin yüksekliği	x_2
Birim hücredeki dielektrik malzemenin yüksekliği	h
Birim hücredeki iletken malzemenin yüksekliği	t
Birim hücrenin genişliği	s

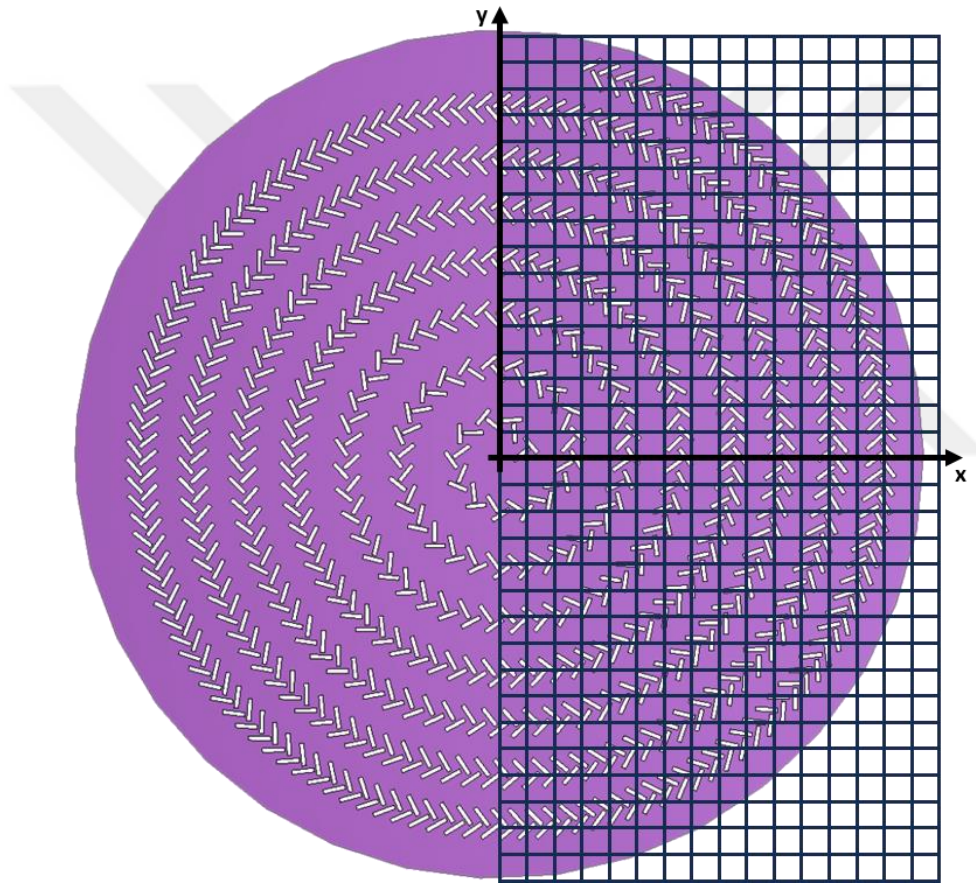
Şekil 6.4'te örnek bir birim hücrenin bazı geometrik parametreleri gösterilmiş ve Tablo 6.1 aracılığıyla da detaylı olarak açıklanmıştır. Birim hücreyi oluşturan iletken malzemenin geometrisi faz isterlerine göre değişiklik gösterebilir. Elektromanyetik simülasyon programları ile elde edilen faz değişimi, geri yansım vb. sonuçlar, birim hücredeki geometrinin belirlenmesinde oldukça önemlidir.

Faz değişimini belirleyebilmek için RADA yüzeyinde ayrı noktalar tanımlanabilir. Bunun için Şekil 6.5'te de görüldüğü gibi, yüzey üzerinde hücreler oluşturulur ve her bir hücrenin merkezinden üç boyutlu simülasyon programları yardımıyla faz ölçümü alınır. Hücrelerin boyutları doğru sonuca ulaşmak için oldukça önemlidir. Hücreler çok büyük yapılırsa, anten yüzeyi üzerindeki bazı noktalar kaçırılacağı için istenilen faz düzeltilmesi sağlanamaz. Hücreler çok küçük yapıldığında ise, üretim aşamasında bazı tolerans değerlerinden dolayı tasarlanan modeller üretilmeyebilir. Bu çalışmada hücrelerin boyu $\Delta x = \Delta y = \lambda_0/2$ olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 6.5 Birim hücrelere bölünmüş örnek RADA yansıtıcı yüzeyi

RADA yapılarında yansıtıcı yüzeyler üzerindeki açıklıklar olabildiğince birbirine simetrik şekilde konumlandırılmaktadır. Bu simetriklik sayesinde, yansıtıcı yüzeyin yarısı için alınacak faz bilgisi değeri yeterli olacaktır. Şekil 6.6’da RADA yapısının yarısı için oluşturulmuş birim hücreler detaylı olarak verilmiştir. Her hücre, kare olacak şekilde oluşturulmuş ve kenar boyu $\lambda_0/2$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Buna bağlı olarak, yansıtıcı yüzey dört parça olarak düşünüldüğünde her bir parça 16x16’lık kare birim hücreden oluşmaktadır. Şekil 6.6’da görüldüğü gibi bazı birim hücreler yansıtıcı yüzeyin dışına doğru taşmıştır, bunların faz düzeltmeye katkısı olmayacağı için faz düzeltici yüzey üzerinden kaldırılabilir.

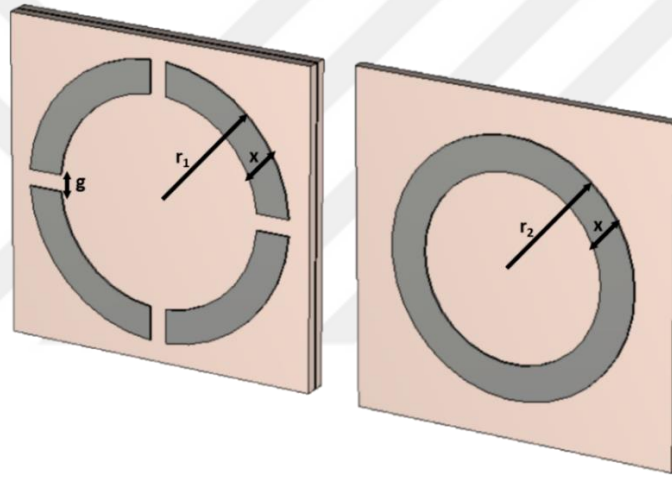


Şekil 6.6 Tasarlanan RADA’nın yansıtıcı yüzeyinin yarısı için oluşturulmuş faz düzeltici yüzey modeli

Birim hücrelere ait faz bilgileri bulunurken her bir birim hücrenin merkezinin koordinatları hesaplanmış ve ayrıık noktalar halinde faz değerleri kaydedilmiştir. Elde edilene sonuçlar, faz değişiminin lineer olmadığını ve 50° ile -150° arasında değiştiğini göstermektedir.

RADA'nın yansıtıcı yüzeyinden λ_0 kadar uzaklıkta alınan faz değişimi sonuçlarına göre gerekli birim hücre tasarımı yapılmıştır. Birim hücre tasarımı yapılırken hem faz düzeltme derecesini karşılamasına, hem de az kayıplı olup anten kazancını minimal düzeyde etkilemesi durumuna dikkat edilmiştir.

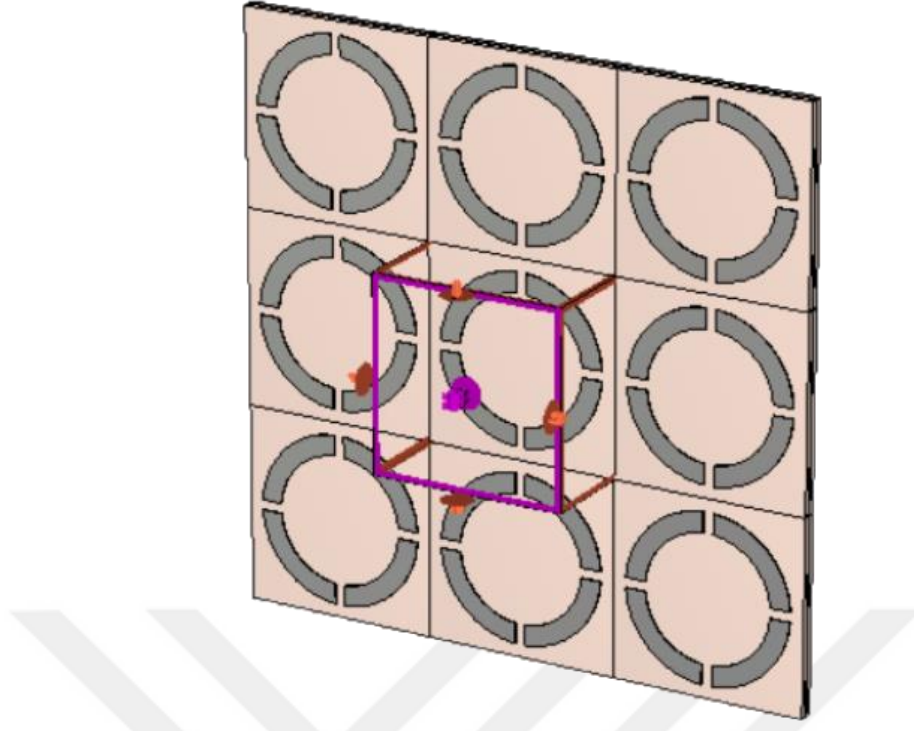
Şekil 6.7 tasarlanan birim hücre modelini detaylı olarak göstermektedir. Tasarımı yapılan birim hücre modeli iki adet dielektrik katman ile üç adet iletken katmandan oluşmaktadır. Birim hücrenin en üst ve en alt katmanındaki iletken desenler birbirinin aynısı, olup orta katmanda bulunan iletken desen ise bunlardan farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Birim hücrede kullanılan malzeme 0.25 mm kalınlığa sahip Rogers 4003C olup, birim hücrenin önemli geometrik parametreleri Tablo 6.2'de açıklamalarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 6.7 Tasarlanan birim hücrenin katmanları

Tablo 6.2 Tasarlanan birim hücrenin parametreleri

Açıklama	Sembol
Üst ve alt iletken katmanda bulunan halkaların arasındaki mesafe	g
Üst ve alt iletken katmanda bulunan halkanın yarıçapı	r_1
Orta iletken katmanda bulunan halkanın yarıçapı	r_2
İletken katmanlardaki halkaların genişliği	x

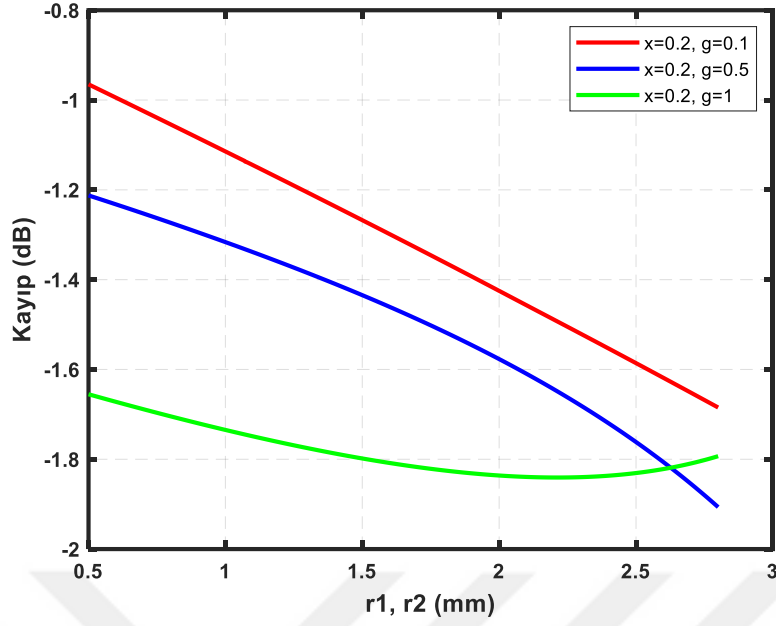


Şekil 6.8 Tasarlanan birim hücrenin simülasyon ortamı

Şekil 6.8’de faz düzeltici yüzey olarak kullanılan birim hücrenin üç boyutlu simülasyon programında analiz edildiği durum gösterilmiştir. Birim hücrenin faz değişimine olan etkisi ve kaybı üzerine yapılan simülasyonlarda, kuplaj etkisini de değerlendirmek ve doğruluğu yüksek sonuçlar almak için floquet port modeli kullanılmıştır.

Birim hücre gelen dalganın fazını belirli dereceler arasında değiştirirken, gelen dalganın gücünü en az seviyede etkilemelidir, böylece faz değişimi olurken anten kazancı da minimum seviyede etkilenmektedir. Yapılan simülasyonlarda, halka genişliği parametresindeki (x) değişimin gelen dalganın kazancını çok fazla değiştirdiği ve bu değişimin de lineer olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle birim hücrenin parametrik analizi yapılırken x parametresi sabit tutulmuştur.

Şekil 6.9 birim hücrenin sabit x parametresine karşı r_1 , r_2 ve g parametrelerindeki değişimin, gelen dalganın kaybını nasıl değiştirdiğini göstermektedir. Bu grafiklerden yararlanarak, birim hücrenin r_1 , r_2 ve g parametrelerindeki değişimin, gelen dalganın kaybı üzerinde çok fazla baskın olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, birim hücrenin geometrik değişkenlerinin parametrik analizine x parametresi dahil edilmemiş, analiz daha rahat hale gelmiştir.



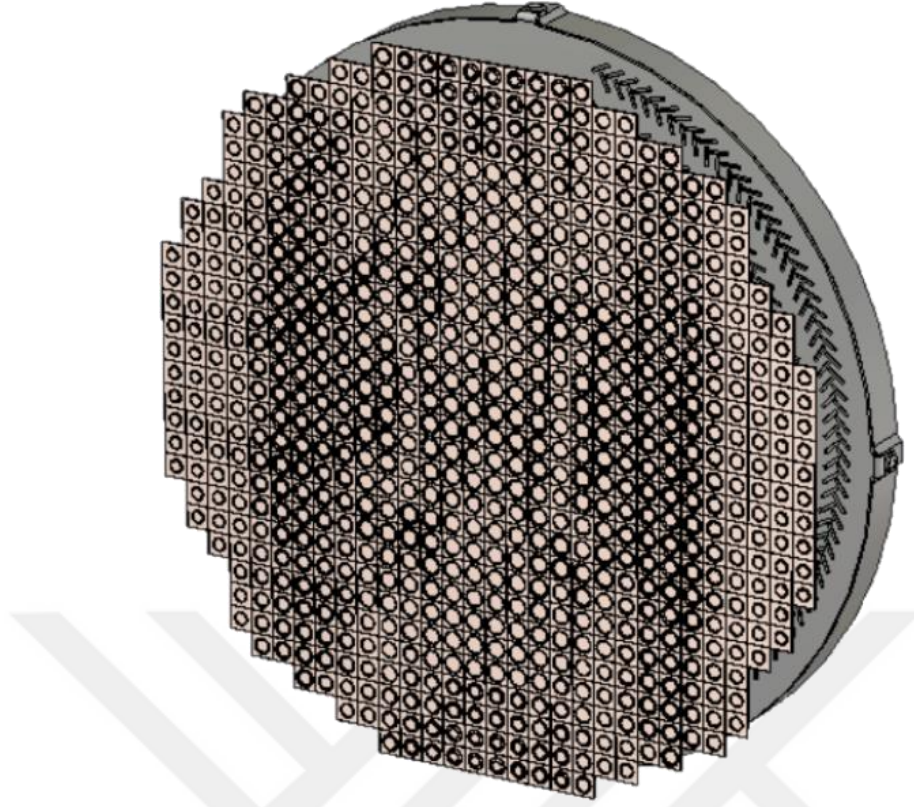
Şekil 6.9 Sabit x ve değişen g parametrelerine göre birim hücrenin kayıp değerleri

6.4 Parametrik Analiz

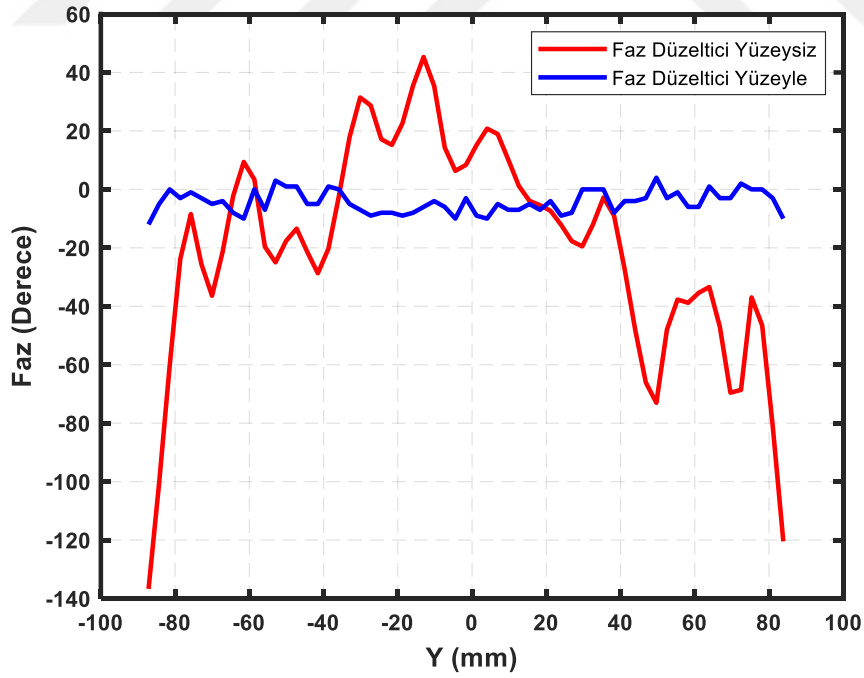
Bu bölümde, birim hücrenin geometrik parametreleri üç boyutlu simülasyon programı aracılığı ile belirli sınır koşulları altında ve belirli adımlarla taranarak veri seti oluşturulmuştur. Tablo 6.3'te detayları verilen bu veri seti aracılığıyla, uygun faz değişimini sağlayan geometrik parametreler tespit edilmiş ve birim hücrelerden oluşan faz düzeltici yüzey Şekil 6.10'da görüldüğü gibi antenin yansıtıcı plakasının önüne konumlandırılmıştır.

Tablo 6.3 Tasarlanan birim hücrenin geometrik parametrelerinin değişim aralıkları

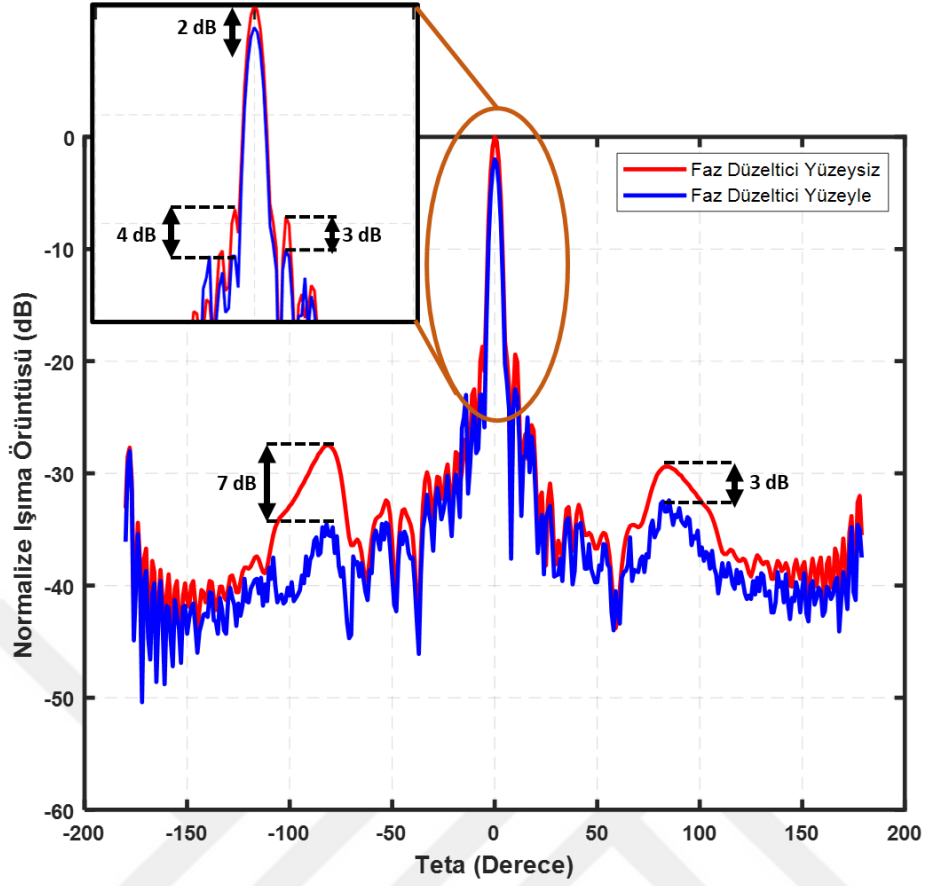
Parametre	Tarama Aralığı	Tarama Adımları
r_1	0.5-2.8	0.1
r_2	0.5-2.8	0.1
g	0.1-1	0.1
Toplam	5760	



Şekil 6.10 RADA ve önüne konumlandırılan faz düzeltici yüzey modeli



Şekil 6.11 Faz düzeltici yüzeysiz ve faz düzeltici yüzeyli yapının yakın alan faz dağılımı karşılaştırılması ($x = \lambda_0/4$)



Şekil 6.12 Faz düzeltici yüzeysiz ve faz düzeltici yüzeyli RADA'nın uzak alan ışıma örüntüsü

Şekil 6.11'de faz düzeltici yüzeysiz ve faz düzeltici yüzeyli RADA yapısının yakın alan faz dağılımı verilmiştir. Buradan, faz düzeltici yapının antenin yakın alan faz dağılımını büyük ölçüde iyileştirdiği ve faz değişiminde yaşanan büyük değişimleri önlediği görülmektedir.

Şekil 6.12'de ise faz düzeltici yüzeysiz ve faz düzeltici yüzeyli RADA yapısının uzak alan ışıma örüntüsü verilmiştir. Faz düzeltici yapının anten kazancını yaklaşık 2 dB kadar azalttığı; ancak yan lob seviyelerinde önemli iyileştirme sağlayarak 22 dB seviyelerine çektiği görülmektedir. Özellikle, faz dağılımının düzelmesiyle yan loblarda düşüşler elde edilmiş ve bu düşüşler sayesinde ışıma örüntü kalitesi ciddi oranda iyileştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında 5G FR2 bantlarında çalışması hedeflenmiş radyal açıklıklı dizi anten tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antenin, özellikle 5G mikrodalga hatlarında kullanılabilecek maliyet ve fiziksel boyut açısından da rekabetçi bir yapı olması hedeflenmiştir. Çalışma frekansı olarak 26 GHz belirlenmiş ve daha önce bu anten üzerine yapılan çalışmalar dikkatle incelenerek gerekli literatür araştırmaları yapılmıştır.

Bu antenlerin sahada kullanılan muadil antenlerle rekabet edebilmesi için verimliliklerinin geliştirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada da bunun üzerine gidilmiş ve açıklık veriminde ciddi iyileşmeler sağlanmıştır. Öncelikle 26 GHz frekansında çalışan, önceki yayınlara konu olan ve farklı frekanslarda tasarlanmış radyal açıklıklı dizi anten tasarım metotları kullanılarak klasik tasarım yapılmıştır. Klasik metot ile tasarlanmış RADA yapısında ve bu metodu kullanan önceki çalışmalarda antenin yansıtıcı plakasının düzgün kullanılmadığı, güç dağılımının verimli yapılamadığı ve antenin uç noktalarında çok fazla gücün olduğu tespit edilmiştir. Bunun üzerine öncelikli olarak yansıtıcı plakanın daha verimli kullanılması hedeflenmiştir.

Elektromanyetik dalga plakalar arasında ilerlerken, iletilen güç miktarı merkezden anten uçlarına doğru radyal uzaklığa bağlı olarak azalmaktadır. Bu nedenle açıklıklardan yansıyacak güç miktarında da azalma olur. Yansıtıcı plaka üzerindeki açıklıkların dağılımı yapılırken bu durum göz önünde bulundurularak açıklıkların uzunluğu merkezden anten uçlarına doğru belli kurallar çerçevesinde arttırılmadadır. Açıklık dağılımının bu şekilde yapılması hem yönlendiricilik hem de açıklık verimi açısından olumlu sonuçlar vermektedir. Bu tez çalışmasında, yansıtıcı plaka üzerinde oluşan yüzey akımından daha fazla yararlanabilmek için açıklıkların dağılımında kullanılan bu yöntem bir adım daha ileri götürülmüş, açıklıkların radyal hatlar üzerindeki yoğunluğunda da benzer bir yaklaşım yapılmıştır.

Yeni önerilen metot ile, açıklık uzunluklarına ek olarak açıklıkların yoğunluğu da anten merkezinden uç noktalarına doğru arttırılmıştır. Sadece açıklık boylarının antenin uç kısımlarında daha da arttırılması bir noktadan sonra bozulmalara sebep

olmaktadır. Bu bozulmaların nedeni açıklıkların üst üste çakışmasından kaynaklanmakta olup, tüm antenin geri dönüş kaybını ve eksensel oranı olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada önerilen metotla, hem bu olumsuz durumun önüne geçilmiş hem de ilerleyen güçten daha çok ve daha verimli şekilde yararlanılmıştır. Yapılan simülasyonlar ile yeni metot ve eski metot karşılaştırılmış ve açıklık verimliliği yaklaşık olarak 10% arttırılarak 45% civarında olmuştur. Simülasyonları doğrulamak için prototip anten üretimi yapılmış, ölçüm sonuçlarından elde edilen verilerle simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında birbirine yakın veriler elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları daha önce RADA tasarımı üzerine yayımlanan makalelerle karşılaştırılmış ve tez çalışmasında yapılan antenin diğer tasarımlarla rekabet edebildiği ve çoğu parametrede daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, yakın frekanslarda çalışan reflektör antenlerde karşılaştırma tablosuna eklenmiş ve burada da tez çalışmasında yapılan antenin reflektör antenlere yakın ve çoğu parametrede daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının diğer bölümlerinde ise anten kazanç bant genişliği arttırma ve ışıma örüntüsü döndürme üzerine araştırmalar yapılmış, bunlar simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir. Kazanç bant genişliği arttırmak için antenin yansıtıcı ve referans plakalarına herhangi bir müdahalede bulunulmamış, sadece yansıtıcı plakanın altına dielektrik malzemeler yerleştirilmiştir, bu sayede minimum müdahale ile aynı antenin kazanç bant genişliği önemli oranda iyileştirilmiştir. Işıma örüntüsü döndürmek için ise literatürde kullanılan önemli metotlar araştırılmış ve bunlardan RADA yapısına en uygun olanı, tasarlanan anten üzerinde farklı yansıtıcı plakalarla uygulanmıştır. Işıma örüntüsünün $\varphi=0^\circ$ ve $\theta=25^\circ$ 'ye yönlendirilmesini sağlayacak yansıtıcı plaka tasarımları yapıp, VBA Macro aracılığıyla dizi haline getirilmiştir. Ardından yapılan simülasyonlar ile ışıma örüntüsünün yatayda ve düşeyde hedeflenen açılara yönlendirilebildiği gösterilmiştir.

Son bölümde ise RADA'nın yakın alan faz dağılımını düzeltmek için faz düzeltici yüzey tasarımı yapılmıştır. Öncelikle, antenin faz dağılımı çıkarılmış ve buna uygun birim hücre tasarımları yapılmıştır. En uygun birim hücre modeli, üç boyutlu simülasyon programı aracılığıyla belirlenmiş ve birim hücrenin geometrik değişkenlerinin parametrik analizi yapılmıştır. Bu parametrik analiz sonucu, yansıtıcı plaka boyutları civarında bir faz düzeltici yüzey tasarlanmış ve antenle

beraber performansına bakılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda, faz düzeltici yüzeyin antenin yakın alan faz dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiği ve bu iyileştirme sonucunda antenin ışıma örüntü kalitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda, ışıma örüntüsünün birim hücreler kullanılarak oluşturulan faz çevirici yüzeylerle döndürülmesi ve bu faz çevirici yüzeylerin yapay zeka algoritmaları kullanılarak tasarlanması konusu üzerine araştırmalar yapılacaktır. Özellikle, RADA'nın yansıtıcı ve referans plakasına müdahale edilmeden, açıklıkların önüne yerleştirilecek ve basit bir düzenele hareket ettirilebilecek bir yapı ile ışıma örüntüsünün sürekli olarak belirlenen açılara döndürülmesi hedeflenmektedir.



- [1] K. Kelly and F. Goebels, "Annular slot monopulse antenna arrays," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 12, no. 4, pp. 391-403, July 1964.
- [2] M. Ando, K. Sakurai, N. Goto, K. Arimura and Y. Ito, "A radial line slot antenna for 12 GHz satellite TV reception," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 33, no. 12, pp. 1347-1353, December 1985.
- [3] M. Ando, K. Sakurai and N. Goto, "Characteristics of a radial line slot antenna for 12 GHz band satellite TV reception," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 10, pp. 1269-1272, October 1986.
- [4] M. Ando, "New DBS receiver antennas," 1993 23rd European Microwave Conference, Madrid, Spain, 1993, pp. 84-92.
- [5] J. Takada, M. Ando and N. Goto, "A reflection cancelling slot set in a linearly polarized radial line slot antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 4, pp. 433-438, April 1992, doi: 10.1109/8.138845.
- [6] A. Harmouch, K. Mawass, F. Shakra and C. El Mouccary, "Enhancement of directional characteristics of circularly polarized dish parabolic Antennas using metallic scatters," *The 2nd Middle East Conf. Antennas Propag.*, Cairo, Egypt, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/MECAP.2012.6618197.
- [7] P. Lam, Shung-Wu Lee, K. Lang and D. Chang, "Sidelobe reduction of a parabolic reflector with auxiliary reflectors," in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 35, no. 12, pp. 1367-1374, December 1987, doi: 10.1109/TAP.1987.1144056.
- [8] T. Purnamirza, "Radial line slot array (RLSA) antennas," in *Telecommunication Systems*, I. A. Alimi, P. P. Monteiro, and A. L. Teixeira, Eds. Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2019, ch. 10.
- [9] T. S. Lim and K. G. Tan, "The development of radial line slot array antenna for direct broadcast satellite reception," *Int. J. Electron.*, vol. 94, no. 3, pp. 251–261, Mar. 2007, doi: 10.1080/00207210601108471.
- [10] N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle, "Significant Bandwidth Enhancement of Radial-Line Slot Array Antennas Using a Radially Nonuniform TEM Waveguide," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 6, pp. 3193–3203, June 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3037689.
- [11] N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle, R. M. Hashmi and M. Z. Islam, "A Low-profile and Efficient Front-End Antenna for Point-to-Point Wireless Communication Links," 2020 14th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135440.
- [12] P. W. Davis and M. E. Bialkowski, "Experimental investigations into a linearly polarized radial slot antenna for DBS TV in Australia," in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, no. 7, pp. 1123-1129, July 1997, doi: 10.1109/8.596903.

- [13] M. N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle and R. M. Hashmi, "A Radial Line Slot-Array Antenna With Low Side Lobes and a Uniform-Phase, Tapered-Amplitude Aperture Field Distribution," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208532-208542, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038759.
- [14] M. N. Y. Koli, M. U. Afzal and K. P. Esselle, "Increasing the Gain of Beam-Tilted Circularly Polarized Radial Line Slot Array Antennas," in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 6, pp. 4392-4403, June 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3140490.
- [15] M. N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle and R. M. Hashmi, "An All-Metal High-Gain Radial-Line Slot-Array Antenna for Low-Cost Satellite Communication Systems," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 139422-139432, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012787.
- [16] M. E. Bialkowski, P. W. Davis, "Linearly polarized radial-line slot-array antenna with a broadened beam," *Microw. and Opt. Technol. Letters*, October 2000, 98-101, doi: 10.1002/1098-2760(20001020)27:2<98::AID-MOP5>3.0.CO;2-Y.
- [17] R. Kamaruddin, I. Ibrahim, M. Rahim, Z. Zakaria, N. A. Shairi, and T. Rahman, "Radial Line Slot Array (RLSA) Antenna Design at 28 Ghz Using Air Gap Cavity Structure," *J. Telecommun., Electron. Comput. Eng.*, vol. 9, p. 2289, Oct. 2017. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:116603641>
- [18] I. Maina, T. A. Rahman, and M. Khalily, "Bandwidth enhanced and sidelobes level reduced radial line slot array antenna at 28 GHz for 5G next generation mobile communication," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, pp. 5752–5757, Aug. 2015. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73648002>
- [19] H. Alwareth, I. Ibrahim, Z. Zakaria, A. Gburi, T. Purnamirza, M. H. Jamaluddin and L. Lau, "Enhanced Radial Line Slot Array Antenna (RLSA) integrated with Circular Ring Resonator (CRR) for 5G mm-wave applications," 2022 *IEEE Int. RF Microw. Conf. (RFM)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/RFM56185.2022.10065191.
- [20] C. -W. Yuan, S. -R. Peng, T. Shu, Z. -Q. Li and H. Wang, "Designs and Experiments of a Novel Radial Line Slot Antenna for High-Power Microwave Application," in *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 10, pp. 4940-4946, Oct. 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2273214.
- [21] P. W. Davis and M. E. Bialkowski, "Linearly polarized radial-line slot-array antennas with improved return-loss performance," in *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 41, no. 1, pp. 52-61, Feb. 1999, doi: 10.1109/74.755027.
- [22] N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle, L. Matekovits, and Z. Islam, "Highly Efficient and Wideband Millimeter-Wave Slotted-Array Antenna Technology for 5G Communications," 2022 16th *Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Madrid, Spain 2022, pp. 1–4, doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769012.

- [23] N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle, L. Matekovits and Z. Islam, "Investigating Small Aperture Radial Line Slot Array Antennas for Medium Gain Communication Links," 2019 Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. (ICEAA), Granada, Spain, 2019, pp. 0613-0616, doi: 10.1109/ICEAA.2019.8879073.
- [24] G. Mishra and S. K. Sharma, "Ka-Band Offset Spherical Reflector Antenna Fed by Dual-CP Horn Array with Switched Multiple-Beams," 2021 IEEE Radio Wireless Symp. (RWS), San Diego, CA, USA, 2021, pp. 36-38, doi: 10.1109/RWS50353.2021.9360369.
- [25] S. Chakrabarti, "A Shared Aperture S/Ka-Band Antenna for Polarization Diversity," 2018 IEEE Indian Conf. Antennas Propag. (InCAP), Hyderabad, India, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/INCAP.2018.8770938.
- [26] J. Wu, C. Wang and Y. X. Guo, "A Compact Reflector Antenna Fed by a Composite S/Ka-Band Feed for 5G Wireless Communications," in IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 68, no. 12, pp. 7813-7821, doi: 10.1109/TAP.2020.3000858.
- [27] A. Mazzinghi, M. Albani, and A. Freni, "Double-spiral linearly polarized RLSA," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 9, pp. 4900–4903, Sep. 2014.
- [28] M. Takahashi et al., "Dual circularly polarized radial line slot antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 43, no. 8, pp. 874–876, Aug. 1995.
- [29] J. M. F. Gonzalez, P. Padilla, G. Exposito-Dominguez, and M. Sierra-Castaner, "Lightweight portable planar slot array antenna for satellite communications in X-band," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 10, pp. 1409–1412, 2011.
- [30] M. Takahashi et al., "Dual circularly polarized radial line slot antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 43, no. 8, pp. 874–876, Aug. 1995.
- [31] T. Yamamoto, M. Takahashi, M. Ando, and N. Goto, "Measured performances of a wide band radial line slot antenna," in Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. URSI Nat. Radio Sci. Meeting, Jun. 1994, pp. 2204–2207.
- [32] N. Y. Koli, M. U. Afzal, K. P. Esselle, R. M. Hashmi, and M. Z. Islam, "A beam squinted linearly polarised radial line slot array antenna with improved return loss bandwidth," in Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. North Amer. Radio Sci. Meeting, Jul. 2020, pp. 411–412.
- [33] J. I. Herranz, A. Valero-Nogueira, E. Alfonso, and V. M. Rodrigo, "Optimized design of beam-tilted linearly-polarized radial-line slot-array antennas," in Proc. IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp., Jul. 2010, pp. 1–4.
- [34] P. W. Davis and M. E. Bialkowski, "The performance of a linearly polarised RLSA antenna for different beam squint angles," in Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., vol. 2, Dec. 1997, pp. 653–656.
- [35] F. Silvestri et al., "DragOnFly—Electronically steerable low drag aeronautical antenna," in Proc. 11th Eur. Conf. Antennas Propag. (EUCAP), Mar. 2017, pp. 3423–3427.
- [36] D. Comite, P. Burghignoli, P. Baccarelli, and A. Galli, "2-D beam scanning with cylindrical-leaky-wave-enhanced phased arrays," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 67, no. 6, pp. 3797–3808, Jun. 2019.

- [36] K. Tekkouk, J. Hirokawa, R. Sauleau, and M. Ando, “Wideband and large coverage continuous beam steering antenna in the 60-GHz band,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 9, pp. 4418–4426, Sep. 2017.
- [37] F. Diaby, A. Clemente, R. Sauleau, K. T. Pham, and L. Dussopt, “2 bit reconfigurable unit-cell and electronically steerable transmitarray at K a-band,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 6, pp. 5003–5008, Jun. 2020.
- [38] F. F. Manzillo, M. Smierzchalski, A. Clemente, and R. Sauleau, “p-i-n diode based electronically steerable transmitarrays for SOTM at Ka-band,” in *Proc. 14th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Mar. 2020, pp. 1–5.
- [39] J. Wang and Y. Rahmat-Samii, “Development of novel K-band beam steerable reflectarray for CubeSat internet of space,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. North Amer. Radio Sci. Meeting*, Jul. 2020, pp. 1779–1780.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. O. Cumurcu, H. Torpi and A. Caliskan, "Radial Line Slot Array Antenna For Microwave Links," 11. ULUSLARARASI MÜHENDİSLİK MİMARLIK VE TASARIM KONGRESİ, pp. 1146-1151, 2023.

Makaleler

1. O. Cumurcu, H. Torpi and A. Caliskan, "Highly Efficient Circularly Polarized Radial Line Slot Array Antenna Using Non-Uniform Slot Density for 5G Communication System," in IEEE Access, vol. 11, pp. 115688-115698, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3325193.

