



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YANSITICI-DİZİ ANTEN KAVRAMI KULLANARAK 2.4 GHZ
İÇİN AKILLI YANSITICI YÜZEY TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Mohammed ALHENNAWI

Danışman
Doç. Dr. Hülya GÖKALP CLARKE

SAMSUN
2021

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**YANSITICI-DİZİ ANTEN KAVRAMI KULLANARAK 2.4 GHZ
İÇİN AKILLI YANSITICI YÜZEY TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Mohammed ALHENNAWI

Danışman

Doç. Dr. Hülya GÖKALP CLARKE

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Mohammed ALHENNAWI tarafından, **Doç. Dr. Hülya GÖKALP CLARKE** danışmanlığında hazırlanan “**Yansıtıcı-Dizi Anten Kavramı Kullanarak 2.4 GHz İçin Akıllı Yansıtıcı Yüzey Tasarımı**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 12.11.2020 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı		
	Üniversitesi		
	Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Doç Dr. Ali Ekber ÖZDEMİR		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ordu Üniversitesi		Kabul
	Deniz Bilimleri ve Teknolojisi		<input type="checkbox"/>
	Mühendisliği		Ret
	Anabilim Dalı		
Üye (Danışman)	Doç. Dr. Hülya GÖKALP CLARKE		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği		<input type="checkbox"/>
	Anabilim Dalı		Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Seda ÜSTÜN ERCAN		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği		<input type="checkbox"/>
	Anabilim Dalı		Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığımı taahhüt ve beyan ederim.

İmza

01 / 07 / 2021

Mohammed ALHENNAWI

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : Yansıtıcı-Dizi Anten Kavramı Kullanarak 2.4 GHz İçin Akıllı Yansıtıcı Yüzey Tasarımı

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 27.04.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 4

Tek kaynak oranı : % 1 çıkmıştır.

İmza

30 / 06 / 2021

Hülya GÖKALP CLARKE

ÖZET

YANSITICI-DİZİ ANTEN KAVRAMI KULLANARAK 2.4 GHZ İÇİN AKILLI YANSITICI YÜZEY TASARIMI

Mohammed ALHENNAWI

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Haziran/2021

Danışman: Doç.Dr. Hülya GÖKALP CLARKE

Bu tez çalışmasında yansıtıcı yüzey tasarım kavramlarının kullanıldığı akıllı yansıtıcı yüzey tasarımı ve sonuçları sunulmaktadır. Yansıtıcı yüzeyler, alıcı ve verici arasındaki doğru görüşün engellendiği durumlarda iletişimin kalitesini iyileştirecek bir teknoloji olarak görülmektedir. Yansıtıcı yüzeyler çok sayıda küçük yansıtıcı elemanın yüzeye dizilmesi ile oluşan iki boyutlu düzlemsel yapılardır. Bu yüzeyler, yüzeydeki her bir elemanın yansıtma fazı ayrı ayrı denetlenerek gelen dalgayı istenen yöne yüksek kazançlı kalem ışın olarak yansıtılabilir. Bu özellik sayesinde, sinyalin ciddi ölçüde zayıfladığı bölgelere ulaşarak, kablosuz iletişim kanalı iyileştirilebilir.

Bu çalışmada yansıtma faz ayarı için değişken eleman boyutu ve elektronik denetim yaklaşımları kullanıldı; denetlenebilir faz değişim aralığı 310° 'den büyük olan yansıtıcı elemanlar yüzey tasarımında kullanıldı. Tasarım ve analizler için CST MicroWave Studio (CST MWS) yazılımı, yüzey üzerinde eleman konumlarına göre gerekli yansıma fazlarını hesaplamak için MatLab, ve simülasyonlarda kaynak anten olarak kullanılan boynuz antenin tasarımında Antenna Magus kullanıldı. İlk önce, 10 GHz'de gelen dalgayı düşeyde 30° yönünde yüksek kazanç ile yansıtan değişken yansıtıcı eleman boyutlarının kullanıldığı iki yansıtıcı yüzey tasarlandı. Yüzeylerden biri 3-katmanlı çokgen yama, diğeri bir katmanlı kare çevrim biçimli yansıtıcı elemanlardan oluşmaktadır. Üç-katmanlı yüzey ile 23.8 dBi kazanç ve yaklaşık %22 (8.9–11.1 GHz) bant genişliği; tek katmanlı yüzey ile 26.5 dBi kazanç ve %12 (9.5 – 10.7 GHz) bant genişliği elde edildi. Daha sonra 2.4 GHz için elektronik olarak yeniden yapılandırılabilir 11×11 'lik (121 elemanlı) bir yansıtıcı yüzey tasarlandı. Yüzey elemanlarının yansıtma fazlarını ayarlamak için öngerilim devresi ile denetlenen varaktörler kullanıldı. Öngerilim denetim devresi bir mikrodenetleyici, iki 64-kanallı çoklayıcı ve bir DC yükselteç içermektedir. Benzetim sonuçlarına göre yansıtılan ışın için tepe kazanç değeri 20.54 dBi'dir ve ışın yönü $\pm 55^\circ$ aralığında 2.5 dB kayıp ile değiştirilebilmektedir.

Anahtar Sözcükler: Yansıtıcı-dizi anten, Akıllı yansıtıcı yüzey

ABSTRACT

DESIGNING AN INTELLIGENT REFLECTIVE SURFACE FOR 2.4 GHZ USING THE CONCEPT OF REFLECTARRAY ANTENNA

Mohammed ALHENNAWI

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical-Electronic Engineering

Master, July/2021

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hülya GÖKALP CLARKE

This thesis presents a design of an Intelligent reflective surface (IRS) using the concept of design reflectarray surface. Reflective surfaces are seen as a technology that will improve the quality of communication when direct line-of-sight (LOS) between the receiver and the transmitter is blocked. The IRSs are two dimensional planar structures that consists of a large number of programmable passive reflector elements that have the ability to reflect the coming signals as a high-gain pencil beam in desired directions. This can be used to enhance the wireless environments by reaching places where LOS is blocked.

In this study, variable element size and electronic control approaches are used for controlling reflection phase. CST MicroWave Studio (CST MWS) software was used for design and analysis of reflective surfaces, MatLab for calculating required reflection phases based on element positions on the surface, and Antenna Magus for designing the horn antennas that were used as the feed antenna in simulations. First, by using variable element size, two reflective surfaces were designed that reflect the incoming wave at 10 GHz with high gain to the direction of 30° in the elevation plane. One of the surfaces consists of a 3-layer polygonal patch and the other a square-shaped reflective element. A gain of 23.8 dBi and a bandwidth of about 22% (8.9–11.1 GHz) were obtained with the three-layer surface, and 26.5 dBi gain and 12% (9.5 - 10.7 GHz) bandwidth with the single layer surface. Then, an electronically reconfigurable 11×11 (121 elements) reflective surface was designed for 2.4 GHz. Varactors were used to adjust the reflection phases of the elements on the surface, and a bias circuit was designed to control terminal voltages of the varactors. The bias control circuit includes a microcontroller, two 64-channel multiplexers and a DC amplifier. According to the simulation results, the peak gain for the reflected beam is 20.54 dBi and the beam direction can be changed with 2.5 dB loss in the $\pm 55^\circ$ range.

Keywords: Reflectarray antenna, Intelligent reflective surface

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Her şeyden önce, bana bereket verdiği ve bana bu işi yapıp tamamlama gücü verdiği için Yüce Allah'a şükranlarımı sunarım. Araştırmam boyunca değerli tavsiyeleri, rehberliği, faydalı tartışmaları ve teşvikleri için danışman hocam Doç Dr. Hülya GÖKALP CLARKE'ye son derece müteşekkirim. Değerli akademik tavsiyeleri ve yönlendirmelerinin yanı sıra, son derece nazik, arkadaş canlısı ve yardımcı oldu. Ayrıca tez komite üyeleri **Dr. Seda ÜSTÜN ERCAN**'a ve **Dr. Ali Ekber ÖZDEMİR**'e gösterdikleri özen, işbirliği ve yapıcı tavsiyelerinden dolayı çok müteşekkirim.

Anne babama, kardeşlerime ve arkadaşlarıma destekleri, sabırları ve sevgileri için özel teşekkürlerimi sunarım. Onların teşvikleri, motivasyonları ve anlayışları olmasaydı bu işi tamamlamam imkansız olurdu. Son olarak, bu çalışmayı tamamlamama destek olan herkese içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Mohammed ALHENNAWI

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Mikrodalga İletişimi ve Doğru Görüş Hattı	1
1.2. Neden Yansıtıcı Yüzey?	2
1.3. Literatür İncelemesi.....	2
1.4. Tez Motivasyonu	5
1.5. Teze Genel Bakış.....	6
2. ANTEN VE REFLECTARRAY YÜZEY TEORİSİ	8
2.1. Anten Teorisi	8
2.2. Maxwell Denklemleri.....	9
2.3. Anten Parametreleri.....	10
2.3.1. Işıma Örüntüsü	11
2.3.2. Işın Genişliği	12
2.3.3. Yönelme	13
2.3.4. Kazanç ve Anten Verimliliği.....	13
2.3.5. Bant Genişliği.....	14
2.4. Boynuz Anten.....	15
2.5. Yansıtıcı Dizi Anten Kavramı	16
2.5.1. Yansıtıcı Dizi Anten İncelemesi ve Tasarımı	16
2.5.2. Yansıtıcı Dizi Elemanları İçin Faz Ayarlama Yaklaşımları.....	18
2.5.3. Yansıtıcı Dizi Bant Genişliği	20
2.6. Akıllı Yansıtıcı Yüzey	21
2.6.1. Radyo Frekanslı MikroElektromekanik Sistem (RF MEMS) Anahtarı	22
2.6.2. PIN Diyot	23
2.6.3. Varaktör.....	24
3. YANSIMA YÜZEYLERİNİN TASARIMI VE SİMÜLASYONU	25
3.1. Giriş	25
3.2. Yansıtıcı Dizi Yüzeyinin Tasarımı ve Simülasyonu	25

3.2.1. Tasarımların Hedefleri	25
3.2.2. Simülasyon Yazılımı CST.....	25
3.2.3. Tasarımın Temelleri	26
3.2.4. Yansıtıcı Dizi Elemanı Tasarımı	27
3.2.5. Üçgen Birim Hücre Elemanları ile Yansıtıcı Yüzey Tasarımı	27
3.2.5.1. Üçgen Şekilli Birim Hücre Elemanının Yapısı.....	27
3.2.5.2. Üçgen Birim Hücre Elemanının Simülasyon Sonuçları.....	29
3.2.5.3. Besleme Anteninin Tasarımı ve Simülasyonu.....	33
3.2.5.4. Yansıtıcı Yüzeyin Uzak Alan Işıma Analizi.....	36
3.2.6. Kare Çevrim Birim Hücre ile Yansıtıcı Dizi Yüzey Tasarımı.....	39
3.2.6.1. Kare Çevrim Birim Hücre Elemanının Yapısı.....	39
3.2.6.2. Kare Çevrim Birim Hücre Elemanının Simülasyon Sonuçları.....	41
3.2.6.3. Yansıtıcı Dizinin Uzak Alan Işıma Analizi.....	45
4. AKILLI BİR YANSITICI YÜZEY TASARIMI VE SİMÜLASYONU	50
4.1. Giriş	50
4.2. Tasarımın Hedefleri.....	50
4.3. Birim Hücre Yapısının Tasarımı	50
4.4. Birim Hücre Yansıma Özellikleri.....	52
4.5. Tam Yansıtıcı Yüzey Tasarımı.....	54
4.6. Kaynak Anteninin Tasarımı ve Simülasyonu	55
4.7. Akıllı Yansıtıcı Yüzeyin Uzak Alan Işıma Analizi	59
4.8. Yeniden Yapılandırılabilir Yansıtıcı Yüzeyin Bant Genişliği	64
4.9. Öngerilim Devresi	65
4.10. Proteus Kullanılarak Tasarlanan Akıllı Yansıtıcı Yüzeyin Bir Prototipi	67
4.11. Performans Karşılaştırması	68
5. SONUÇ VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMA	69
5.1. Sonuç	69
5.2. Gelecek Çalışma İçin Öneriler	70
KAYNAKLAR.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

LOS	Line of Sight.
5N	Beşinci Nesil.
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface.
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio.
FNBW	First-Null Beamwidth.
HPBW	Half-Power Beamwidth.
AYY	Akıllı Yansıtıcı Yüzey.
LC	Liquid Crystal.
RF	Radio Frequency.
MEMS	Microelectromechanical Systems.
DC	Direct current.
IRS	Intelligent Reflective Surface.
CST	Computer Simulation Technology.
MCU	MicroController Unit.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum frekansları.....	1
Şekil 1.2. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeyler kullanma motivasyonu.....	6
Şekil 1.3. Tez yapısı.....	7
Şekil 2.1. Hertz'in 1887'deki deneyi.....	8
Şekil 2.2. Anteni iletmek ve almak için karşılıklı bir cihaz olarak anten.....	9
Şekil 2.3. Anten parametrelerinin bir özeti.....	10
Şekil 2.4. 3B ışınma örüntüsü.....	11
Şekil 2.5. 2B ışınma örüntüsü	12
Şekil 2.6. $P_{kayıp}$, $P_{ışı}$ ve P_{gir} arasındaki ilişki.....	14
Şekil 2.7. S11 ve anten bant genişliği.....	15
Şekil 2.8. Piramit boynuzlar ve konik boynuzlar.....	15
Şekil 2.9. Bir yansıtıcı yüzeyinin geometrisi.....	18
Şekil 2.10. Çeşitli yansıtıcı eleman şekilleri.....	19
Şekil 2.11. Yansıtıcı elemanları ile elde edilecek faz değişimler.....	20
Şekil 2.12. Akıllı yansıtma dizisi yüzeyinin geometrisi.....	21
Şekil 2.13. Yeniden yapılandırma mekanizmaları.....	22
Şekil 2.14. PIN Diyot Eşdeğer Devreler.....	23
Şekil 2.15. Varaktör diyotunun eşdeğer devresi.....	24
Şekil 2.16. Ters öngerilim voltajının değişimine karşılık gelen SMV1405 varaktörün değişken bağlantı kapasitansı.....	24
Şekil 3.1. Yansıtıcı dizi tasarım aşamaları.....	26
Şekil 3.2. Önerilen üçgen birim Hücre a) Birim hücrenin geometrisi; b) birim hücrenin üstten görünümü (sol) ve yandan görünümü (sağ).....	28
Şekil 3.3. Birim hücrenin Floquet portu ile uyarılması.....	29
Şekil 3.4. 10 GHz'de birim hücrenin yansıma katsayıları: (a) faz, (b) büyüklük.....	30

Şekil 3.5. Yansıtıcı yüzey tasarım aracı.....	31
Şekil 3.6. (a), (b), ve (c) – Yansıtılan ışının farklı doğrultma yönleri için yansıtıcı yüzey maskeleri, (d)- yansıtıcı yüzeyin katmanları.....	33
Şekil 3.7. Besleme antenin modelini.....	34
Şekil 3.8. Tasarlanan boynuz antenin geometrisi; a) yandan görünüm; b) arkadan görünüm.....	34
Şekil 3.9. Boynuz antenin S11'i.....	35
Şekil 3.10. Boynuz antenin simüle edilmiş ışınma örüntüleri, a) 2 boyutlu ışınma örüntüsü b) 3 boyutlu ışınma örüntüsü.....	36
Şekil 3.11 CST ortamında simülasyon kurulumu.....	37
Şekil 3.12. 10 GHz'de simülasyon ile elde edilmiş $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ yönlerinde ışınlar için 2 boyutlu ışınma örüntüleri.....	37
Şekil 3.13. Yansıtıcı dizinin 10 GHz'de simülasyon ile elde edilmiş 3 boyutlu ışınma örüntüleri.....	38
Şekil 3.14. Yansıtıcı yüzey kazancının frekansa göre değişimi.....	39
Şekil 3.15. Önerilen kare çevrim birim hücre a) Birim hücrenin geometrisi; b) birim hücrenin üstten görünümü (sol) ve yandan görünümü (sağ).....	40
Şekil 3.16. Floquet bağlantı noktası kurulumu.....	41
Şekil 3.17. 10 GHz'de kare çevrim birim hücrenin yansıtma katsayısı: a) Faz, b) Büyüklük.....	42
Şekil 3.18. (a), (b), (c) - Farklı doğrultularda yansıtma için tasarlanan yansıtıcı dizi maskeleri, (d)- yansıtıcı dizinin katmanları.....	44
Şekil 3.19. CST ortamında simülasyon kurulumu.....	45
Şekil 3.20. 10 GHz'de $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ doğrultma yönleri için simülasyon ile elde edilmiş 2 boyutlu ışınma örüntüleri.....	46
Şekil 3.21. Yansıtıcı dizinin 10 GHz'de simülasyon ile elde edilmiş 3 boyutlu ışınma örüntüleri.....	47
Şekil 3.22. Yansıtıcı yüzey kazancının frekansa göre değişimi.....	48
Şekil 4.1. Önerilen yeniden yapılandırılabilir birim hücre a) Birim hücrenin geometrisi; b) birim hücrenin üstten görünümü (sol) ve yandan görünümü (sağ).....	51
Şekil 4.2. Floquet bağlantı noktası $\lambda/2$ mesafesine yerleştirilmiştir.....	52

Şekil 4.3. Birim hücrenin yansıma katsayıları; a) Faz b) Büyüklük.....	53
Şekil 4.4. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir yüzeyin maskesi.....	54
Şekil 4.5. Yansıtıcı yüzey tasarımında kullanılan parametre değerleri.....	55
Şekil 4.6. 10 GHz için tasarlanan boynuz antenin geometrisi; a) Antenin yapısı; b) Son görünümü; c) Üstten görünüm; d) Yandan görünüm.....	56
Şekil 4.7. Boynuz antenin S_{11} 'i.....	57
Şekil 4.8. a) 2 boyutlu ve b) 3 boyutlu ışınma örüntüsü.....	58
Şekil 4.9. CST'de simülasyon kurulumu.....	60
Şekil 4.10. 2.4 GHz'de 2 boyutlu ışınma örüntüleri.....	61
Şekil 4.11. 2.4 GHz'de 3 boyutlu ışınma örüntüleri.....	64
Şekil 4.12. Yansıtıcı dizi kazancının frekansa bağlı değişimi.....	65
Şekil 4.13. Birim hücre, ve birim hücrede kullanılan varaktör ve öngerilim devresi...66	66
Şekil 4.14. Kontrol devresi tasarımı.....	66
Şekil 4.15. Tasarlanan akıllı yansıtıcı yüzey prototipi.....	67

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Maxwell yasalarının genelleştirilmiş biçimleri.....	9
Tablo 3.1. Birim hücrenin boyutları.....	28
Tablo 3.2. Boynuz antenin boyutları.....	34
Tablo 3.3. Birim hücrenin boyutları.....	40
Tablo 3.4. Tasarlanan yansıtıcı yüzeyler ile literatürde yayınlanan yüzeyler arasında karşılaştırma.....	49
Tablo 4.1. Birim hücrenin boyutları.....	52
Tablo 4.2. Boynuz antenin boyutları.....	57
Tablo 4.3. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey ile literatürde yayınlanan diziler arasında karşılaştırma.....	68

1. GİRİŞ

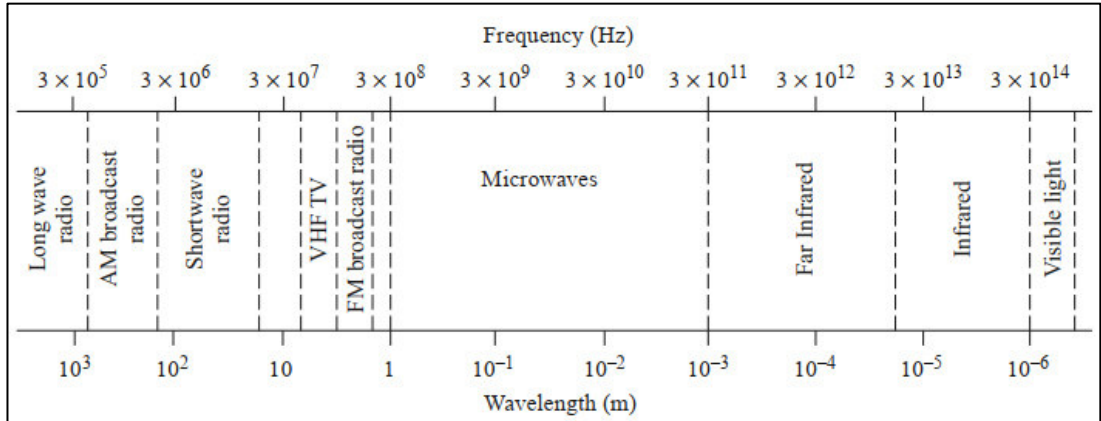
1.1. Mikrodalga İletişimi ve Doğru Görüş Hattı:

Mikrodalga iletişimi yüksek frekanslarda alıcı ve verici arasında görüş hattı gerektiren bir kablosuz iletişim teknolojisidir. Ses, video ve veri göndermek ve almak için yüksek hızlı kablosuz bağlantı sağlamak amacıyla tipik olarak 300 MHz ile 300 GHz arasında olan mikrodalga frekanslarını kullanır (David M Pozar, 2011). Şekil (1.1), elektromanyetik spektrumdaki mikrodalga frekansların yerini göstermektedir.

Mikrodalga spektrumunun yüksek frekanslarında iletişimin en önemli koşulu alıcı ve verici arasında doğru görüş hattı (LOS – line of sight) olmasıdır. Ancak uzun mesafe iletiminde dağlar, tepeler, binalar, duvarlar, gene kısa mesafe ve bina içi iletişimde mobilyalar ve insanlar gibi farklı engellerin varlığı nedeniyle bu koşul sağlanamayabilir. Bu durum elverişsiz yayını oluşturur, ve verici ve alıcı arasındaki iletişimin kalitesini kötüleştirir veya tamamen engelleyebilir.

Doğru görüş yokluğunun yol açtığı sorunların üstesinden gelmenin alışlagelmiş yollarından biri aktif tekrarlayıcı istasyon (al-ve-ilet istasyonları olarak da bilinirler) kullanmaktır. Aktif tekrarlayıcı bir alıcı anten, bir alıcı, bir verici ve verici anten içerir. Aktif tekrarlayıcı, alınan sinyali alır ve işler, daha sonra güçlendirir ve yeniden iletir. Bu yaklaşım, çok fazla güç tüketimi gerektirir.

Bu tez çalışması, verici ve alıcı arasındaki doğru görüş yokluğunun açacağı sorunların üstesinden gelebilecek yansıtıcı yüzey kavramını ele almaktadır. Yansıtıcı yüzeyler üzerlerine gelen dalgaları istenilen yöne yüksek güçte yansıtacak biçimde tasarlanabilir. Böylelikle iletişimin kalitesini, tayf (spektrum) etkinliği ve enerji etkinliğini iyileştirirler. Güç tüketmeyecek ya da çok az tüketecek biçimde tasarlanabilirler.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum frekansları (David M Pozar, 2011)

1.2. Neden Yansıtıcı Yüzey?

Uzun mesafelerde Mikrodalga İletişimi ve Beşinci Nesil (5N) kablosuz iletişim ile sunulan yeni özellik ve teknolojiler, yüksek kazançlı ve geniş açı üzerinde taranabilen bir ışın gerektirmektedir. Yeni hücreler kurmak veya al-ve-ilet (röle) istasyon sayılarını arttırmak yerine yansıtıcı yüzeyleri kullanarak iletişim ortamlarında kapsama alanını genişletmek ve engellerin varlığından kaynaklanan doğru görüş hattının kapanma sorunlarının üstesinden gelmek için yansıtıcı yüzeyler umut verici bir teknoloji olarak görülebilir. Bu nedenle, yansıtıcı yüzeyler bir iletişim ağındaki kullanıcı sayısını artırma önemli bir rol oynar ve bazı durumlarda yeni baz istasyonları kurulmasına gerek kalmadan sistemin kalitesini yükseltme imkanı sunar (Rajatheva et al., 2020; Zhao & Liu, 2019).

Yansıtıcı yüzeydeki yansıtıcı elemanların yansıtma fazının yeniden yapılandırılabilirliği için önemli çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel fazlı dizi anten, yüksek hızlı elektronik ışın taraması sağlayabilir, ancak uygulama maliyeti ve besleme şebekesinin yüksek kayıpları nedeniyle kullanımından kaçınılır. Öte yandan, yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeylerde birim yansıtıcı elemanlar ayarlama cihazları ile ayarlanabilir; böylece ayrık faz kaydırıcılar ve pahalı alıcı / verici modüllerine olan ihtiyacı ortadan kaldırılırlar. Dahası, yansıtıcı yüzey tasarımına özgü düşük ağırlık ve montaj kolaylığı, onu farklı uygulamalar için ideal hale getirir.

1.3. Literatür İncelemesi

Birkaç yıldır, yansıtıcı diziyi ve yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizi yüzeylerini inceleme ve tasarlama üzerine yapılan araştırmalarda artış olmuştur.

(Berry, Malech, Kennedy, 1963)'de, 60'lı yılların başında yapılan yansıtıcı-dizi anteninin ilk uygulaması sunuldu; yansıtıcı diziyi yapılandırmada ve çeşitli ışına örüntüsü üretmek için farklı uzunlukta dalga kılavuzu kullanılmıştır.

Mikroşerit teknolojisinin 80'lerin başında hızla gelişmesiyle, mikroşerit teknolojisi ile ilk yansıtıcı dizi tasarlandı (Munson, Haddad, & Hanlen, 1987). (Munson et al., 1987)'deki yansıma dizisinde, gerekli faz kaymalarını elde etmek için iletim hattı saplamaları kullanılmıştır. İletim hattı saplamaları sabit boyutlu yamalara eklenmiştir. 90'ların ortasında, mikroşerit teknolojisi kullanılarak tasarlanan ilk yansıma dizisinde aşamalı faz kaymalarını elde etmek için değişken boyutlu öğeler kullanılmıştır (Targonski & Pozar, 1994). Bu yöntem yansıtıcı anten veya yüzey tasarımı için kullanışlı bir yöntem olarak kabul edilir.

(Encinar, Zornoza, 2003)'de bir mikroşerit yansıtma dizisi sunulmaktadır. Mikroşerit yansıtıcı antenlerin bant genişliğini iyileştirmek için üç katlı devre levhası ile 1 metrelik bir yansıtıcı tasarlanmıştır. Yansıtıcı-dizi anten, 12 GHz frekansı için tasarlanmış ve %16'lık bir bant genişliği elde edilmiştir. Ancak, malzeme maliyeti yüksektir.

(Jamaluddin et al., 2010) ve (Abd-Elhady, Hong, Zhang, 2012)'de, 30 GHz için, iletken rezonatör kayıplarını azaltma amacıyla dielektrik alt dolgu tabakasının (substrate) kullanıldığı bir başka reflektörlü anten yapısı tasarlanmıştır. Gerekli faz aralığı, dielektrik alt dolgu (substrate) üzerindeki değişken çaplı hava delikleri ile gerçekleştirilir. Bununla birlikte, metal zemin düzlem , yansıma destekleyici tabaka olarak hala gereklidir.

(Lee, Yi, So, & Yoon, 2015)'de, 95 GHz için tasarlanan bir metal yansıtıcı antende, değişen yükseklikte metal iletken birim hücre elemanları kullanılmıştır. Birim hücre iletkeninin yüksekliği ayarlanarak gerekli yansıma fazı elde edilmiştir. Temel amacı, yansıma faz aralığını 360° 'lik tam faz döngüsüne yakın elde etmek, kazanç ve verimliliği artırmaktır. Bu tip yansıtıcı antenler, mikro seviyelerde üretim nedeniyle milimetre dalgasında çalışan uygulamalar için uygundur.

(Polenga et al., 2015)'de, 35 GHz için bir dalga kılavuzu yansıtıcı dizisi sunulmuştur; alüminyum alaşımından CNC makinesi ile üretilen dalga kılavuzu elemanları yansıtıcı birim hücresi olarak kullanılmıştır. Yansıma fazının gerekli aralığı, dalga kılavuzu elemanlarının derinliği değiştirilerek elde edilmiştir. Bu tür yansıtıcı dizi, yüksek doğrulukta bir imalat gerektirir.

(Li et al., 2009)'de, parazit çift kutuplu (dipol) bir mikroşerit yansıtıcı anten dizisi sunulmaktadır. Parazit dipoller, rezonant yapının bir parçası olarak değil, yalnızca yansıma fazı aralığını 360° 'den daha geniş yapmak için kullanılmıştır. Daha sonra parazit elemanların uzunluklarının değiştirilmesiyle bant genişliği artırılmıştır. Bu yüzey ile 2.05 GHz'de % 14.1 bant genişliği elde edilmiştir.

(Yoon, Yoon, Lee, So, 2015)'de, 15 GHz için bir mikro şerit yansıtıcı anten sunulmuştur. Antenin birim hücre elemanı beş paralel dipolden oluşmakta ve dipol uzunluğunu değiştirilerek gerekli yansıma fazı aralığı elde edilmiştir. Antenin bant genişliği %33.5 tur.

(Pattanayak, Rana, Duttagupta, Gandhi, & Deshmukh, 2018)'de, kare çevrim biçiminde birim hücre elemanları kullanan bir reflektörlü anten sunulmuştur, yansıma faz aralığı 360°'lik tam faz döngüsüne yakın olmadığı için başka bir birim hücre önerilmiştir. Bu, tasarımı daha karmaşık hale getirmiştir.

(Rengarajan, 2010)'te, mikro şerit yansıtıcı dizisinin beslemesini mekanik olarak hareket ettirerek yeniden yapılandırılabilirlik elde edildi. Bununla birlikte, üretilen yansıtıcı ışın birkaç açı ve bant genişliğiyle sınırlıydı. (X. Yang et al., 2018; X. Yang et al., 2017) 'da ışını istenen yöne yansıtmak için sunulan başka bir yaklaşımda, elemanlar mekanik olarak döndürülmekte veya yer değiştirilmektedir. Bu yaklaşım, yansıtıcı elemanın kaybını azaltmış ve geniş bir faz aralığı sağlamıştır, ancak bu yaklaşımın yavaş tarama hızı ve üretim karmaşıklığı gibi önemli dezavantajları vardır.

(Tan, Sun, Jornet, & Pados, 2016) 'de, 2.4 GHz çalışma frekansında 6 x 8 akıllı yansıtıcı yüzey tasarlandı. Yüzeyde varaktör ayarlama cihazları kullanıldı. Uzak alan davranışı ve Birim hücreler bağımsız olarak denetlendi. Denetimde 4 mikro denetleyici kullanılmış olması öngerilim devre tasarımını karmaşıktır.

(H. Yang, Yang, Xu, Mao, et al., 2016)'de, 12.5 GHz için 10 × 10 elemanlı elektronik olarak yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı anten sunulmuştur. Burada , anahtarlar olarak ayrı ayrı ayarlanabilen bir dizi PIN diyot kullanılmıştır. PIN-diyotlar AÇIK-KAPALI yapılarak anten kontrol edilir. PIN diyotlar, tipik olarak daha düşük kayıplıdır, kararlı faz durumları vardır, ve basit öngerilim devresi ile RF anahtar gibi kullanılabilirler. Bununla birlikte, gerçekleştirilen elemanlar, yalnızca ayrık değerli faz kaymaları sağlayabilir, ki bu faz hatalarına yolaçar, ve de elde edilebilecek faz aralığı 360° 'den daha azdır.

(Tian, Liu, & Li, 2017) 'da, 3.5 GHz çalışma frekansında yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı yüzey sunulmuştur. Bu yansıtıcı yüzeyde, sürekli yansıma faz ayarı sağlayan varaktör cihazları kullanılmıştır. Ancak elde edilen yansıma faz aralığı 275° 'den daha azdır. Öte yandan, 20 x 20 elemanlı olarak tasarlanan yüzeyde her bir elemanı ayrı ayrı kontrol etmek için gereken 400 adet öngerilimleme hattı yüzeyin üretimini karmaşık hale getirmiştir.

(Sean Victor Hum, Okoniewski, Davies, 2007) 'de, 5.5 GHz' için faz kayması elektronik olarak denetlenebilen 7 x 10 birim elemanlı bir yansıtıcı dizi sunulmuştur. Sunulan yüzeyin, ana ışının yönü bir eksen boyunca (yatayda veya düşeyde) -50° ile

+50° değiştirilebilmekte, ancak 5 dB'den büyük ışın tarama kaybı ve %1.3 ile sınırlı bant genişliği vardır.

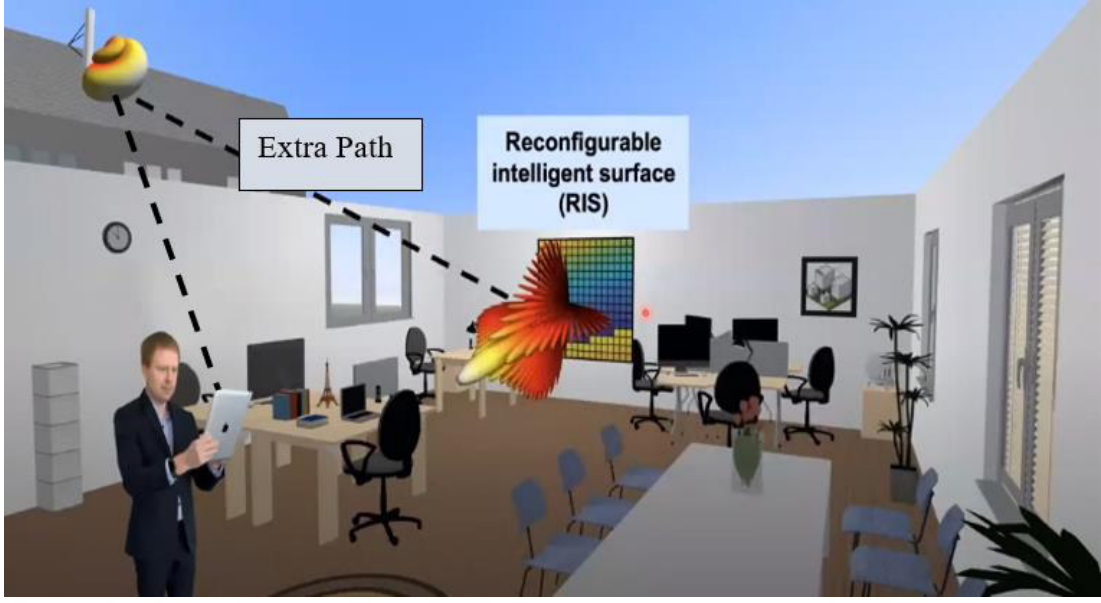
(Venneri, Costanzo, Di Massa, 2012)'de, elektronik olarak yeniden yapılandırılabilen 3 x 15 birim elemanlı bir yansıtıcı yüzey sunulmuştur. Varaktör ayarlı yansıtıcı elemanların kullanıldığı yüzey ile ana ışın yönünün $\pm 40^\circ$ aralığında sürekli biçimde değiştirilebildiği gösterilmiştir, ancak %7'den daha az bant genişliği elde edilmiştir.

1.4. Tez Motivasyonu

Uzun mesafeli mikrodalga iletişimi için doğru görüş hattı gereksinimi, bazen LOS yolunu engelleyebilen ve iletişimin kalitesini kötü bir şekilde etkileyerek sınırlı kapsama alanına yol açan birçok engelin varlığı nedeniyle karşılanamayabilir.

Yansıtıcı yüzeyler, üzerlerinde gelen sinyalleri belirli bir yöne doğrtulmuş yüksek kazançlı ışın olarak yansıtarak ve şekil (1.2) 'de gösterildiği gibi sinyalin ulaştırılması gereken yere doğru başka bir kablosuz iletim yolu sağlayarak bu zorlukların üstesinden gelebilir. Bu sinyallerin işlenmesine veya kodunun üzülmesine gerek olmadığından, kurulu iletişim sisteminde var olan cihazların donanım ve yazılımında herhangi bir değişiklik gerektirmezler.

Bu alışmada, 10 GHz için yansıtıcı yüzey tasarlamayı planlıyoruz. Yüzey, açık alanlarda duvara monte edilebilen mikro şerit teknolojisi kullanılarak tasarlanacak ve ardından bu tasarım kavramını, 2,4 GHz merkez frekansında elektronik olarak yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı yüzey tasarlamak için kullanacağız.



Şekil 1.2. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeyler kullanma motivasyonu (Björnson, Özdoğan, & Larsson, 2020)

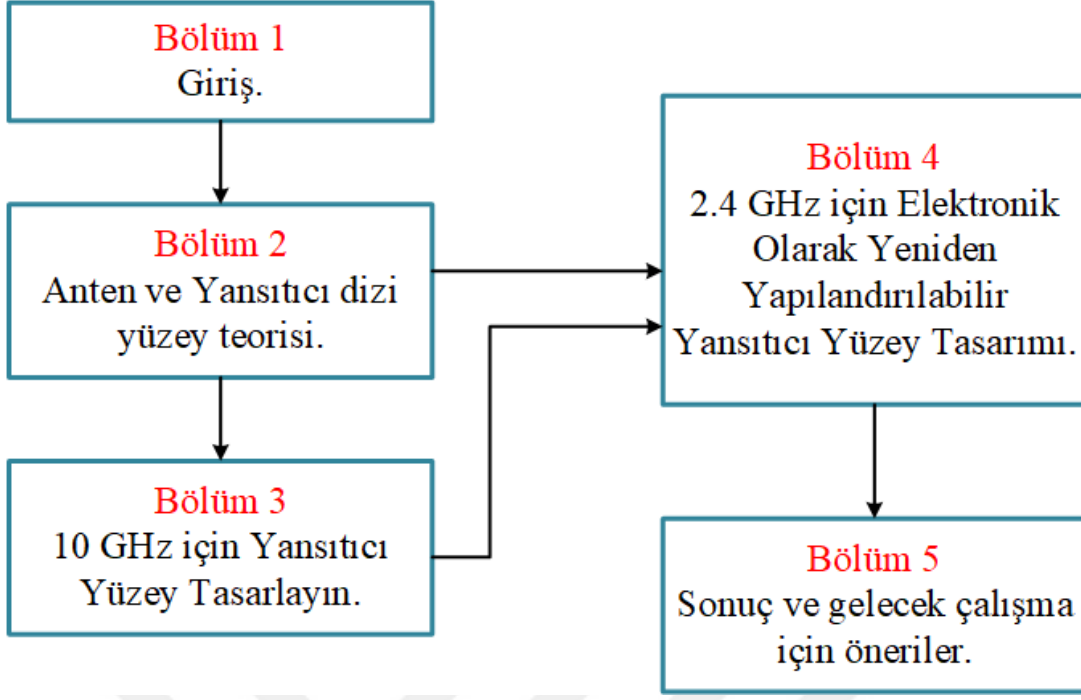
1.5. Teze Genel Bakış

Tez dört bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölüm, mikrodalga iletişimi ve frekans bantları hakkında giriş niteliğindedir. Bu araştırma konusu ile ilgili literatür taramasında yayınlanmış bazı araştırmalar ve tasarımlar tanıtılmaktadır.

İkinci bölüm anten teorisine genel bir bakış sağlar. Antenlerin yayılım özelliklerini belirleyen anten parametreleri sunulmuştur. Aynı bölümde boynuz anten ve yaygın biçimleri ele alınmakta, daha sonra yansıtıcı yüzey kavramı ve analizi sunulmaktadır. Ayrıca, tasarımı için gereken denklemler sunulmuştur.

Üçüncü bölüm, birim hücrenin iki farklı şeklini kullanarak 10 GHz'de yansıtıcı dizinin tasarımını sağlar. Bölüm 4'te, 2.4 GHz için yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeyin tasarımı ve uygulaması sunulmuştur. Son bölüm, mevcut çalışmadan elde edilen sonucu sunar ve ayrıca gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunur.

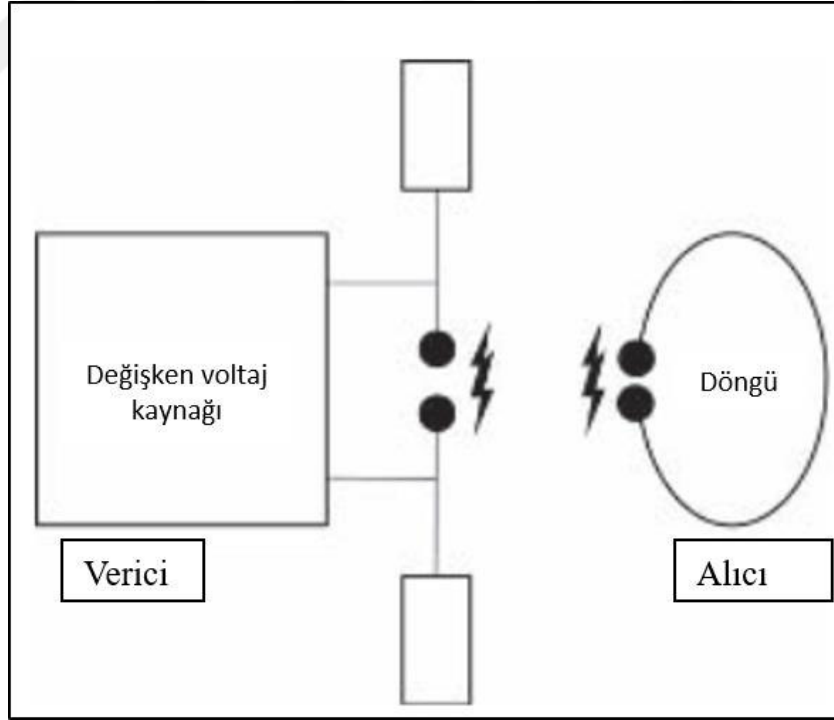


Şekil 1.3. Tez yapısı

2. ANTEN VE YANSITICI DİZİ YÜZEY TEORİSİ

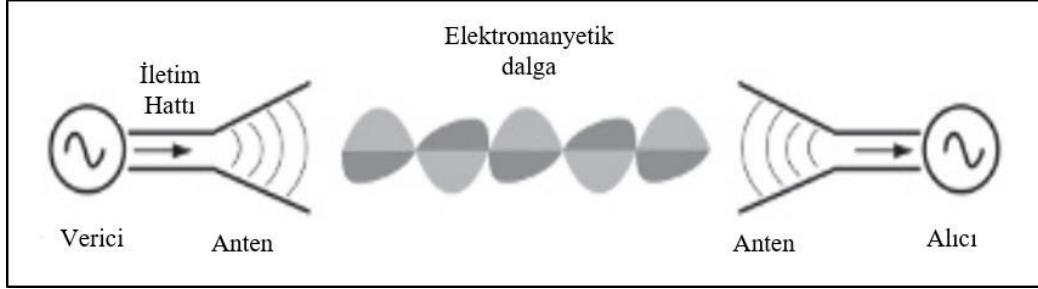
2.1. Anten Teorisi

Anten, " Boşlukta yayılan elektromanyetik dalgaları toplayarak bu dalgaların iletim hatları içerisinde yayılmasını sağlayan cihaz." olarak tanımlanır (Dictionary.com, 2020, Dec. 01). IEEE Standart Tanımlarında, anteni radyo dalgalarını yaymak veya almak için bir araç olarak tanımlar (Balanis, 2016). Antenin elektrik enerjisini elektromanyetik ışımaya çeviren bir dönüştürücü veya tam tersi iş gören bir geçiş cihazı olduğunu söyleyebiliriz (Y. Huang & Boyle, 2008). Antenlerle ilgili çalışmalar uzun zaman önce başladı. Antenle ilgili ilk çalışma Alman fizikçi Heinrich Rudolf Hertz tarafından yapıldı. Şekil (2.1), 1887'de kendisi tarafından radyo dalgalarını üretmek ve tespit etmek için tasarlanan bir sistemi göstermektedir. Deneyinin amacı elektromanyetik radyasyonun varlığını kanıtlamak ve göstermektir. Deneyinde, verici tarafında bir kıvılcım oluştuğunda yaklaşık aynı anda alıcı tarafında bir kıvılcım gözlemlendi. Bu deney, elektromanyetik dalgaların yayılımı ile bilginin bir yerden başka bir yere kablosuz olarak aktarıldığını gösterdi (Y. Huang & Boyle, 2008).



Şekil 2.1. Hertz'in 1887'deki deneyi (Y. Huang & Boyle, 2008)

Bir anten, verici veya alıcı anten olarak çalışabilir. Şekil (2.2) 'de gösterildiği gibi anten, elektromanyetik dalga ile elektrik sinyali arasındaki geçiş bölgesini temsil eder. Verici anten anten girişine beslenen sinyali elektromanyetik dalga şeklinde yayar; alıcı anten ise elektromanyetik dalgayı alır elektrik sinyaline dönüştürür ve ardından alıcıya besler (Y. Huang & Boyle, 2008).



Şekil 2.2. Anteni iletmek ve almak için karşılıklı bir cihaz olarak anten (Y. Huang & Boyle, 2008)

2.2. Maxwell Denklemleri

Elektromanyetik teori, antenlerin davranışını anlamak için önemlidir, elektromanyetik olaylar, 1873'te James Clerk Maxwell tarafından yayınlandığı şekliyle Maxwell denklemleri ile tanımlanır. Maxwell'in çalışmaları, Gauss, Ampere, Faraday ve diğerleri tarafından geliştirilen büyük bir teorik bilgiye dayanır. Maxwell'in elektromanyetizma yasalarının genelleştirilmiş biçimleri tablo (2.1) 'de vermiştir.

Tablo 2.1 Maxwell yasalarının genelleştirilmiş biçimleri.

Diferansiyel Biçim	Integral Biçim	Açıklamalar
$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_x D \cdot dS = \int_v \rho_v dv$	Gauss yasası
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_x B \cdot dS = 0$	İzole manyetik yükün yokluğu
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot dS$	Faraday yasası
$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_L H \cdot dl = \int_x \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$	Ampere yasası

Birinci ve ikinci Gauss'un elektrik ve manyetik alan yasaları, üçüncüsü Faraday'ın indüksiyon yasası, dördüncüsü, Maxwell tarafından yer değiştirme akımı $\partial D/\partial t$ 'yi içerecek şekilde geliştirilen Amper yasasıdır.

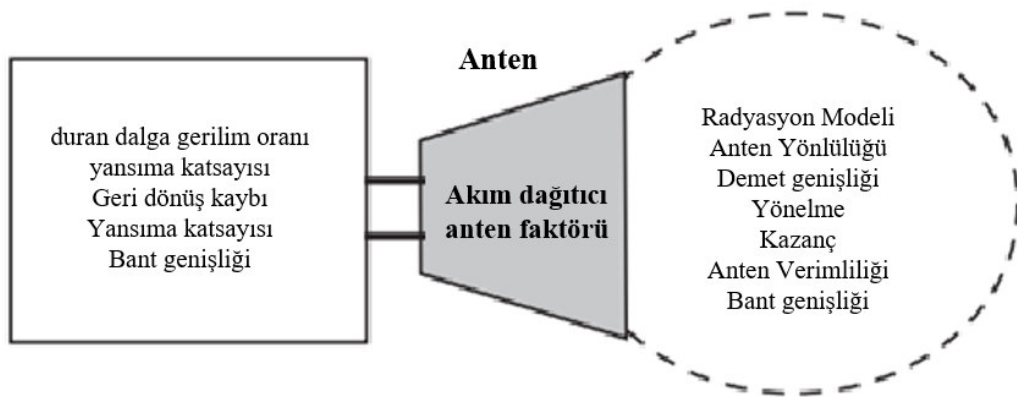
Ampere yasasındaki $\partial D/\partial t$ terimi, yayılan elektromanyetik dalgaların varlığını tahmin etmek için önemli olan yer değiştirme akımı terimidir. E ve H sırasıyla [volt / m] ve [amper / m] birimlerinde elektrik ve manyetik alan yoğunluklarını temsil eder.

D ve **B** sırasıyla birimleri [coulomb/m²] ve [Tesla] veya [weber/m²] olan elektrik ve manyetik akı yoğunluklarıdır.

ρ ve **J** miktarları, herhangi bir harici hacimsel yük yoğunluğu ve elektrik akımı yoğunluğudur. Sırasıyla [coulomb/m³] ve [ampere/m²] birimleriyle ölçülürler.

2.3. Anten Parametreleri

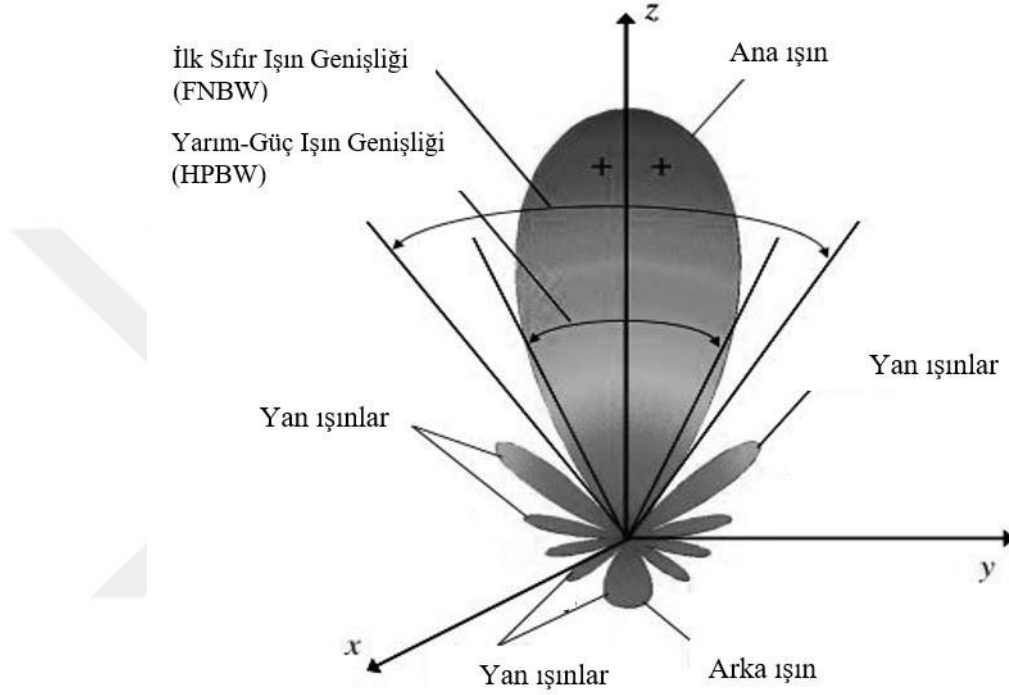
Bir antenin özelliklerini ve başarımını anlamak için farklı parametrelerin tanımlarını bilmek gerekir. Bu parametreler, tasarlanan antenleri test ederken ve ölçerken antenin özellikleri tanımlamak ve incelemek için kullanılır. Şekil (2.3), anten parametrelerinin bir özetini sunar. Bu parametreler iki sınıfa ayrılabilir; ilki alan bakış açısından anten parametrelerini (ışınma deseni, ışın genişliği, yönlülük, anten kazancı, anten verimliliği ve bant genişliğini) içerir ve ikinci sınıflandırma devre bakış açısından anten parametrelerini (giriş empedansı, ışınma direnci, yansımaya katsayısı, dönüş kaybı, duran dalga gerilim oranı (VSWR) ve bant genişliği) içerir (Y. Huang & Boyle, 2008).



Şekil 2.3. Anten parametrelerinin bir özeti (Y. Huang & Boyle, 2008)

2.3.1. Işıma Örüntüsü

Bir antenin ışımaya örüntüsü, antenin uzak alan bölgesinde, antene sabit uzaklıkta antenden yayılan alanının veya gücün açının bir fonksiyonu olarak gösterildiği bir grafikdir. Işıma örüntüsü, bir antenin herhangi bir yönde ne kadar güçlü dalga yaydığını tanımlar; antenin temel parametrelerinden biridir. Şekil (2.4), boş uzayda θ ve ϕ açısının bir fonksiyonu olarak yayılan alanın üç boyutlu modelini göstermektedir.



Şekil 2.4. 3B ışımaya örüntüsü (Balanis, 2016)

3B ışımaya grafiğine ek olarak, ana ışının en yüksek olduğu noktadan geçen ve birbirine dik iki düzlemde kesiler alınır ve kartezyen koordinatlar kullanılarak iki boyutlu grafikler olarak verilebilir. Örneğin şekil (2.5) 'de yatay eksen θ açısını ve dikey eksen dB cinsinden bağlı ışımaya gücünü temsil eder.

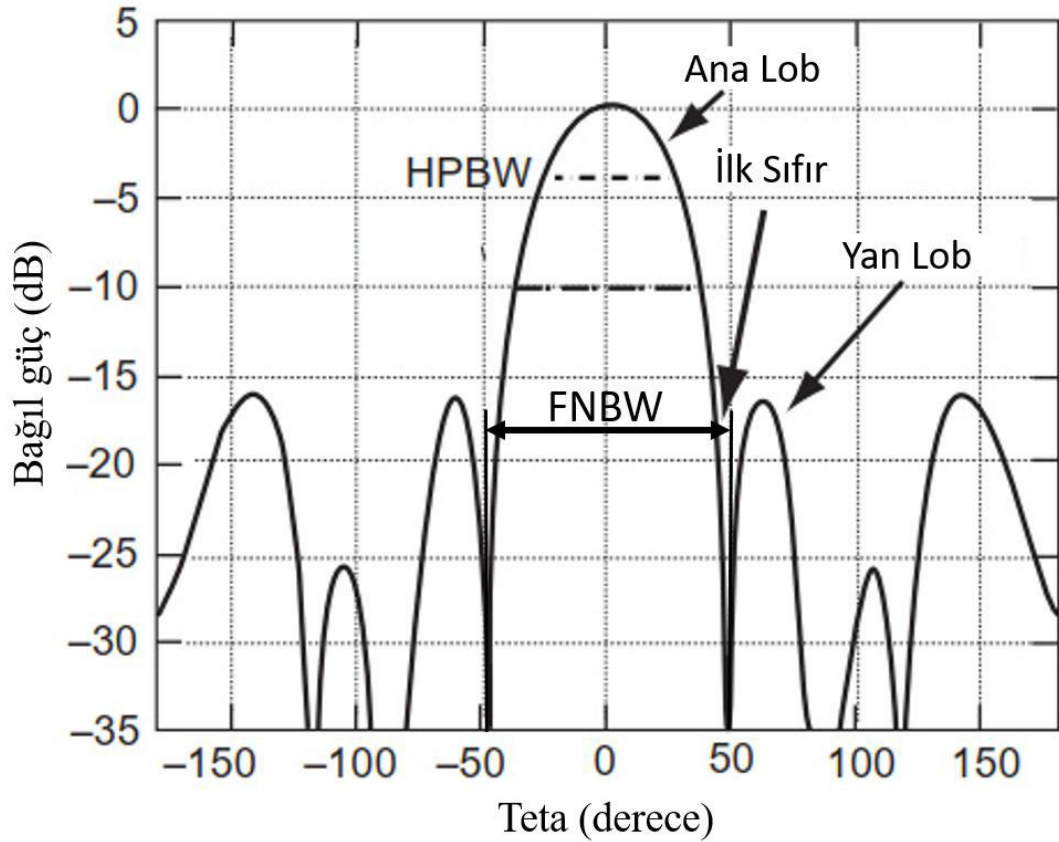
Işıma grafiği en yüksek alan değerine oranlanmış biçimde de ifade edilebilir

$$f(\theta, \phi) = \frac{E_{\theta}}{E_{\theta}(max)} \quad (2.1)$$

Burada, $f(\theta, \phi)$ en yükseğe oranlanmış alan desenidir ve $E_{\theta}(max)$, E_{θ} elektrik alanının büyüklüğünün maksimum değeridir.

Işıma örüntüsünün yuvarlakları, sırasıyla şekil (2.4) ve (2.5) 'de gösterildiği gibi iki türe ayrılır; en güçlü ışımaya olduğu yönünü içeren yuvarlak ana yuvarlak veya

ana ışın olarak tanımlanır; diğer yuvarlaklar ise arka veya yan yuvarlaklar (ışınlar) olarak bilinir.



Şekil 2.5. 2B ışınma örüntüsü (Y. Huang & Boyle, 2008). HPBW: yarım-güç ışın genişliği, FNBW: İlk sıfırlar arası ışın genişliği

2.3.2. Işın genişliği

Anten ışın genişliğinin tanımı, ışınma deseni maksimumunun iki tarafında ışınma şiddeti bakımından iki özdeş nokta arasındaki açıdır (Balanis, 2016). Yaygın kullanılan iki ışın genişliği vardır, bunlardan biri Yarım Güç Işın Genişliğidir (Half-power BeamWidth, HPBW), ve IEEE tarafından, ışınma şiddetinin yarıya düştüğü iki yön arasındaki açı olarak tanımlanır. Bir diğeri ışınma örüntüsünde ilk sıfırlar arasındaki açıdır ve ilk sıfırlar arası ışın genişliği (First-Null Beamwidth, FNBW), olarak bilinir. Bu ışın genişliklerinin her biri Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

2.3.3. Yönelme

Bir antenin yönlülüğü, yayılan gücün belirli bir yöne odaklanmasının bir göstergesidir. Antenden belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun tüm yönler için ortalama ışıma yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Işıma yoğunluğunun tüm yönler için ortalaması, toplam yayılan gücün 4π steradyana bölünmesi ile bulunur, $P_{ışl}/4\pi$. Steradyan üç boyutlu katı açının ölçü birimidir; r yarıçaplı küre yüzeyinde $1 r^2$ 'lik bir yüzeyi gören üç boyutlu açıya '1 steradyan' denir. Dolayısı ile tüm küre yüzeyini ($4\pi r^2$) gören, başka deyimle tüm yönleri kapsayan, katı açı 4π steradyandır. Yönelme matematiksel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$D = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{ort}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{ışl}} \quad (2.2)$$

Burada U ışıma yoğunluğu, U_{ort} ışıma yoğunluğunun yoğunluğunun tüm yönler için ortalaması ve $P_{ışl}$ toplam yayılan güçtür. Yön belirtilmemiş ise maksimum ışımının olduğu yön ima edilir, matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir (Balanis, 2016):

$$D_{maks} = D_0 = \frac{U_{maks}}{U_0} = \frac{4\pi U_{maks}}{P_{ışl}} \quad (2.3)$$

Burada:

D = yönlülük (boyutsuz)

D_0 = maksimum yönlülük (boyutsuz)

U = ışıma yoğunluğu (W / birim katı açı)

U_{maks} = maksimum ışıma yoğunluğu (W / birim katı açı)

U_0 = izotropik kaynağın ışıma yoğunluğu (W / birim katı açı)

$P_{ışl}$ = toplam yayılan güç (W)

2.3.4. Kazanç ve Anten Verimliliği

Bir antenin kazancı, antenin herhangi bir yöndeki ışıma yoğunluğunun bir ölçüsüdür. Bir antenin kazancı, yönelimle yakından ilişkilidir, ancak yönlülük, antenin verimini ve kayıplarını hesaba katmaz. Anteninin kazancı G, aşağıdaki denklemde verildiği gibi hem yönlülüğüne hem de verimliliğine bağlıdır (Kraus & Marhefka, 2002).

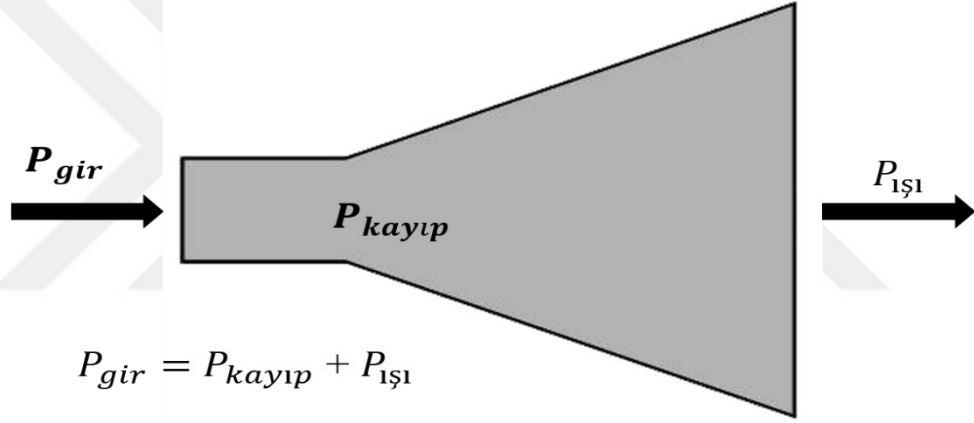
$$G = eD \quad (2.4)$$

Burada, e ($0 \leq e \leq 1$) toplam verimliliktir ve D antenin yönlülüğüdür.

Anten kazancı, antenden belirli bir yöndeki yayılan ışıma yoğunluğunun antene gelen toplam giriş gücünün 4π 'ye bölünmüşünün oranı olarak tanımlanır. Kazanç boyutsuzdur (birimsizdir) ve matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir (Y. Huang & Boyle, 2008):

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{gir}} \quad (2.5)$$

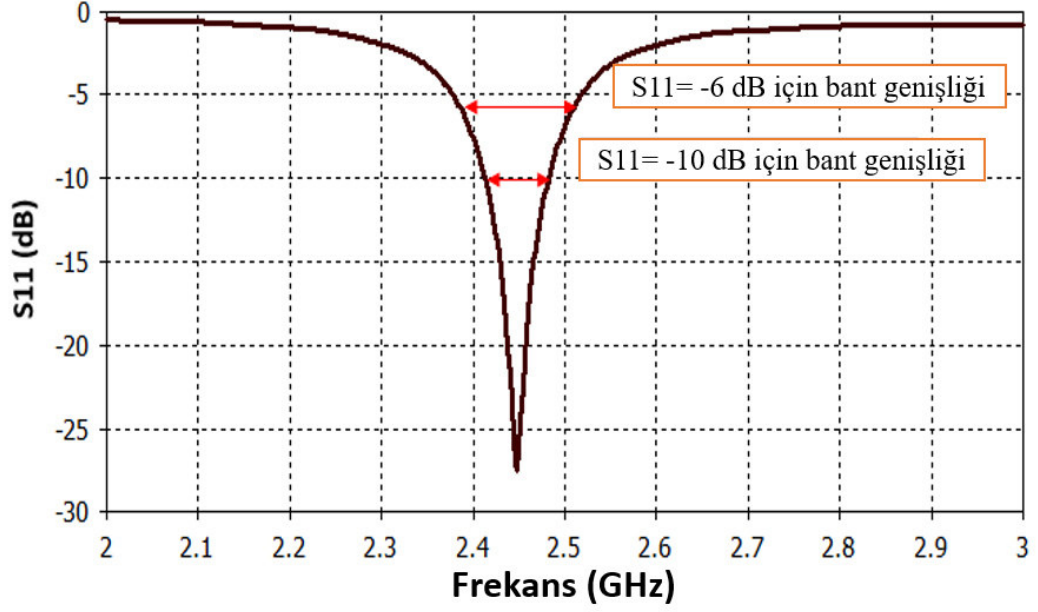
Burada, U yine ışıma yoğunluğunu ve P_{gir} antene giren toplam gücü gösterir. Antene giren güç P_{gir} , antende kaybolan güç (P_l) ve antenden yayılan gücün ($P_{ışl}$) toplamı olarak ifade edilir (Şekil (2.6)).



Şekil 2.6. $P_{kayıp}$, $P_{ışl}$ ve P_{gir} arasındaki ilişki

2.3.5. Bant genişliği

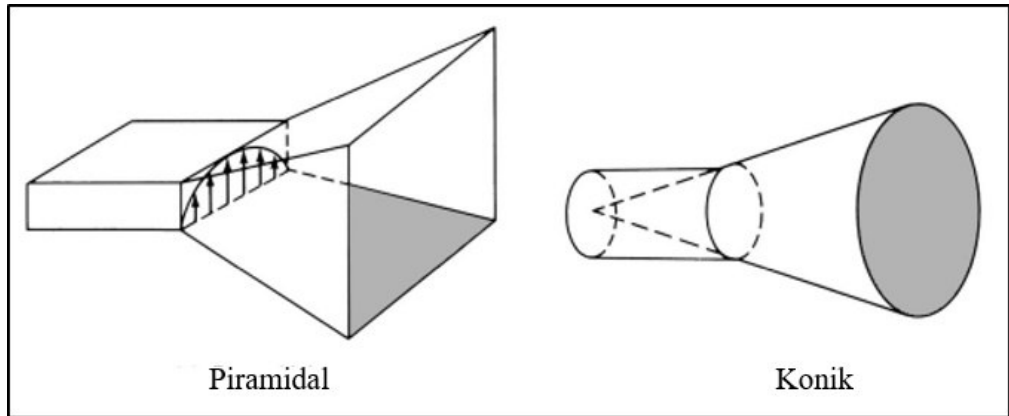
Anten parametrelerinin ve özelliklerinin (giriş empedansı, ışıma deseni, ışın genişliği, polarizasyon, yan yuvarlak seviyesi, kazanç ve ışın yönü) kabul edilebilir bir değerlerde olduğu frekans aralığı antenin bant genişliği olarak tanımlanabilir. Yansıma katsayısı ile ilgili S-parametresi (S_{11}), antenin bant genişliğini bulmada kullanılır. Şekil (2.7), $S_{11} = -10\text{dB}$ ve -6dB 'de bir anten için bant genişliğini göstermektedir.



Şekil 2.7. S11 ve anten bant genişliği

2.4. Boynuz Anten

Boynuz antenler mikrodalga frekanslarında yaygın kullanılan bir anten türüdür. Boynuz anten genellikle radyo astronomisi, uydu takibi ve çanak antenler gibi birçok mikrodalga iletişimi için bir besleme elemanı olarak kullanılır, ve ayrıca yansıtıcı antenler ve yansıtıcı yüzeyler için bir besleme elemanı olarak kullanılır (Y. Huang & Boyle, 2008). Boynuz antenin birçok farklı biçimi vardır: Şekil (2.8)'de gösterilen piramit boynuzlar ve konik boynuzlar en yaygın olanlarıdır.



Şekil 2.8. Piramit boynuzlar ve konik boynuzlar (Balanis, 2016).

2.5. Yansıtıcı Dizi Anten Kavramı

Uzun mesafeli iletişim ve radarlarda yüksek kazançlı antenlere ihtiyaç vardır (John Huang & Encinar, 2007). Yüksek kazançlı antenler için geleneksel yaklaşım yansıtıcı antenler (reflektörler) veya dizi antenlerdir. Yansıtıcı dizi antenler, hem reflektörlerin (yüksek kazanç) hem de dizi antenlerin özelliklerini (düşük profilli, düşük kütle) birleştiren yeni bir yüksek kazançlı anten biçimidir (Chen, Liu, Nakano, Qing, & Zwick, 2016).

Yansıtıcı anten, bir düzlemsel alt dolgu tabakası (substrate) üzerine inşa edilir ve baskılı devre teknolojisi kullanılarak imal edilir ve fazlı dizi antenler olarak belirli bir yönde yüksek kazançlı bir ışın yayar. Yansıtıcı antenlerin faz dizili antenlere göre avantajı besleme mekanizmasıdır; yansıtıcı anten, faz dizili antenlerde ihtiyaç duyulan iletim hattı besleme ağlarının dağıtım kayıplarını ve karmaşıklığını ortadan kaldırır.

Yansıtıcı dizi anteni, anten ışınını istenen yönde yönlendirmek için bir besleme anteniyle uyarılan, belirli biçimde düzenlenmiş çok sayıda yansıtıcı elemandan (faz elemanı veya birim hücre/eleman olarak da bilinir) oluşur. Bu yansıtıcı elemanlar, anten ana ışınını istenen yöne yönlendirmek için gelen dalgadaki sinyal kaynağına olan uzaklığa bağlı farklı gecikme fazlarını telafi etmek için farklı faz kaymaları ile yansıtacak biçimde tasarlanırlar.

2.5.1. Yansıtıcı dizi anten incelemesi ve tasarımı

Yansıtıcı anten tasarımında iki temel adım vardır: birim hücre (eleman) tasarımı ve tüm sistem tasarımı.

Yansıtıcı yüzey ile yüksek kazançlı bir ışını istenen yöne yönlendirmek için açıklık üzerindeki her bir elemanın yansıtma fazı ayrı ayrı ayarlanabilmelidir. Örneğin şekil (2.9) 'da gösterilen yansıtıcı yüzey açıklığı üzerindeki her bir eleman ile ilgili faz iki bileşeninden oluşur ve şu şekilde ifade edilir (Nayeri, Yang, & Elsherbeni, 2018):

$$\phi(x_i, y_i) = \phi_{spd} + \phi_{pp} \quad (2.6)$$

Bu denklemde, birinci terim, besleme anteni ile i^{inci} eleman arasındaki uzaklık ile orantılı faz gecikmesidir, ve matematiksel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\phi_{spd} = -k_0 R_i \quad (2.7)$$

Burada, k_0 , merkez frekanstaki dalga numarasıdır ve R_i , reflektör yüzeyi üzerindeki besleme merkezinden i^{inci} eleman konumuna olan uzaklıktır. Açıklık üzerindeki her birim eleman için, R_i uzaklığının farklı olması nedeni ile, bu faz gecikmesi farklı olacaktır. İstenilen yönde koşutlanmış bir ışın elde etmek için, yansıtıcı dizisinin her

elemanınin fazı, besleme merkezinden birim eleman konumuna uzamsal gecikme faz farklarını gidermelidir.

Denklem (2.6)'daki ikinci terim, koşutlanmış ışını istenen yönde yönlendirmek için yansıtıcı açıklığına eklenebilen ve bir elemandan diğerine değişen (aşamalı) fazı ifade eder. Vektör olarak şu şekilde ifade edilebilir (Nayeri et al., 2018):

$$\phi_{pp} = -k_0 \vec{r}_i \cdot \hat{r}_0 \quad (2.8)$$

Burada, \vec{r}_i , i^{inci} elemanın konum vektörüdür ve \hat{r}_0 , şekil (2.9) 'da gösterildiği gibi ana ışının yönüdür. Belirli yönde (θ_0, φ_0) bir ışın ve her bir elemanın Kartezyen koordinatlarda konumu (x_i, y_i) için yukarıdaki denklem (2.8) şu şekilde yazılabilir:

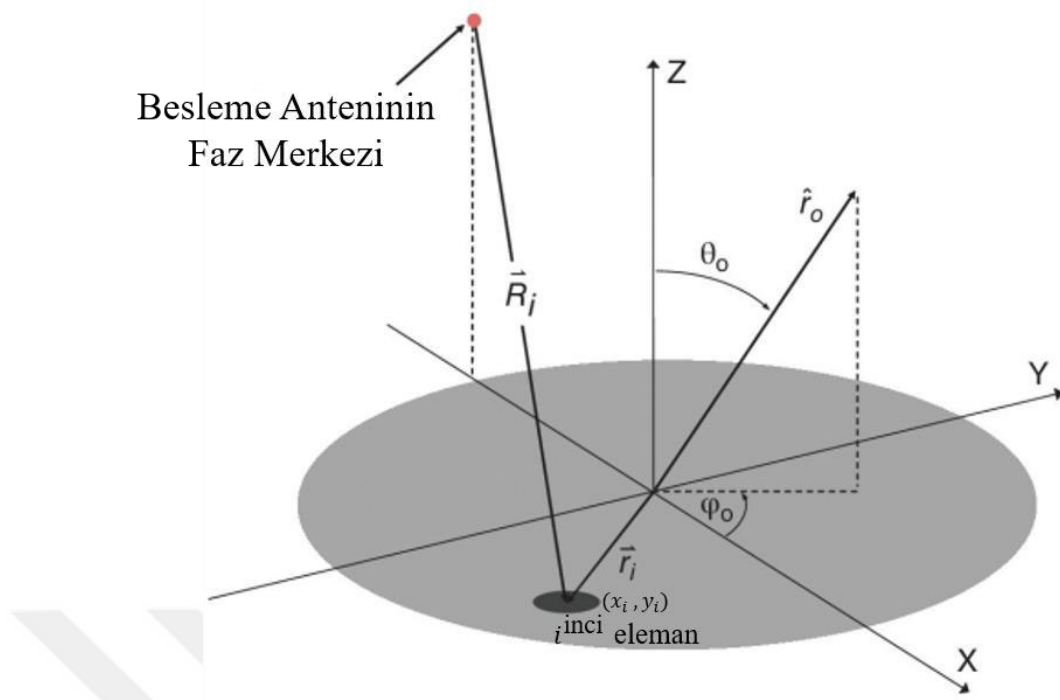
$$\phi_{pp} = -k_0(x_i \hat{x} + y_i \hat{y}) \cdot (\sin \theta_0 \cos \varphi_0 \hat{x} + \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \hat{y}) \quad (2.9)$$

$$\phi_{pp} = -k_0(x_i \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + y_i \sin \theta_0 \sin \varphi_0) \quad (2.10)$$

Bu nedenle, uzamsal gecikme fazını telafi etmek ve belirli yönde (θ_0, φ_0) koşutlanmış bir kalem ışını üretmek için yansıtıcı yüzey üzerindeki her bir elemana bir elemandan diğerine değişen aşamalı faz eklemesi gerekir. (2.10) da verilen ϕ_{pp} bağıntısı (2.6) da verilen $\phi(x_i, y_i)$ bağıntısında yerine konursa şu bağıntı elde edilir:

$$\phi(x_i, y_i) = k_0(R_i - \sin \theta_0 (x_i \cos \varphi_0 + y_i \sin \varphi_0)) \quad (2.11)$$

Burada, (x_i, y_i) , i^{inci} ögenin reflektör yüzeyi üzerindeki konumudur, (θ_0, φ_0) yansıtılan ışının yönünü temsil eden düşey ve yatay düzlem açılarıdır.



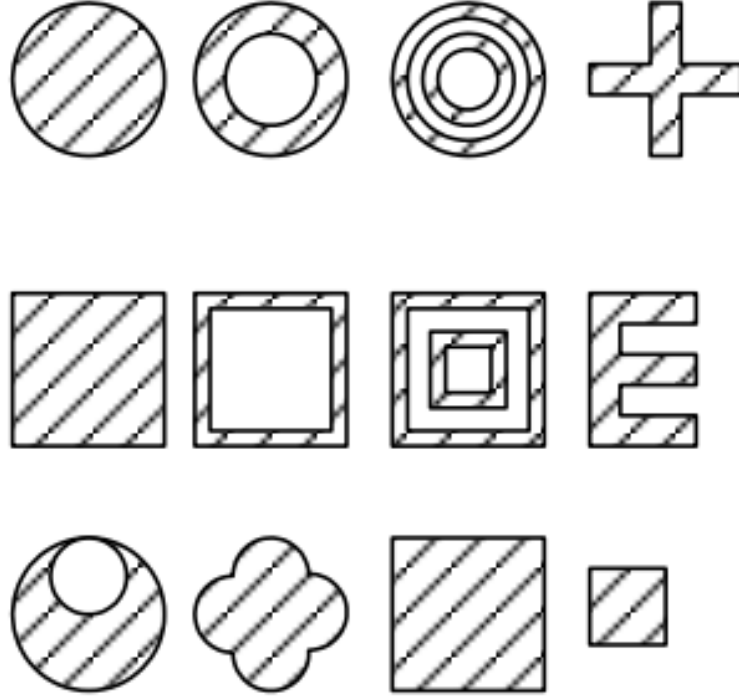
Şekil 2.9. Bir yansıtıcı yüzeyinin geometrisi (Nayeri et al., 2018)

2.5.2. Yansıtıcı dizi Elemanları için Faz Ayarlama Yaklaşımları

Daha önce bahsedildiği gibi, yansıtıcı yüzey açıklığı, belirli bir yöne odaklanmış bir kalem ışın örüntüsü oluşturmak için yansıtıcı yüzeyin farklı konumlarına yerleştirilmiş ve aşamalı faz kayması verecek biçimde tasarlanmış faz elemanlarından oluşur.

Yansıtıcı yüzey açıklığında bulunan birim elemanlarda farklı yansıma fazları elde etmek için iki yaklaşım kullanılmaktadır. İlk yaklaşımda birim elemanın boyutu değiştirilir ve ikinci yaklaşımda ise PIN diyotları, RF MEMS, sıvı kristal malzemeler veya varaktörler gibi elektronik cihazlar kullanılır.

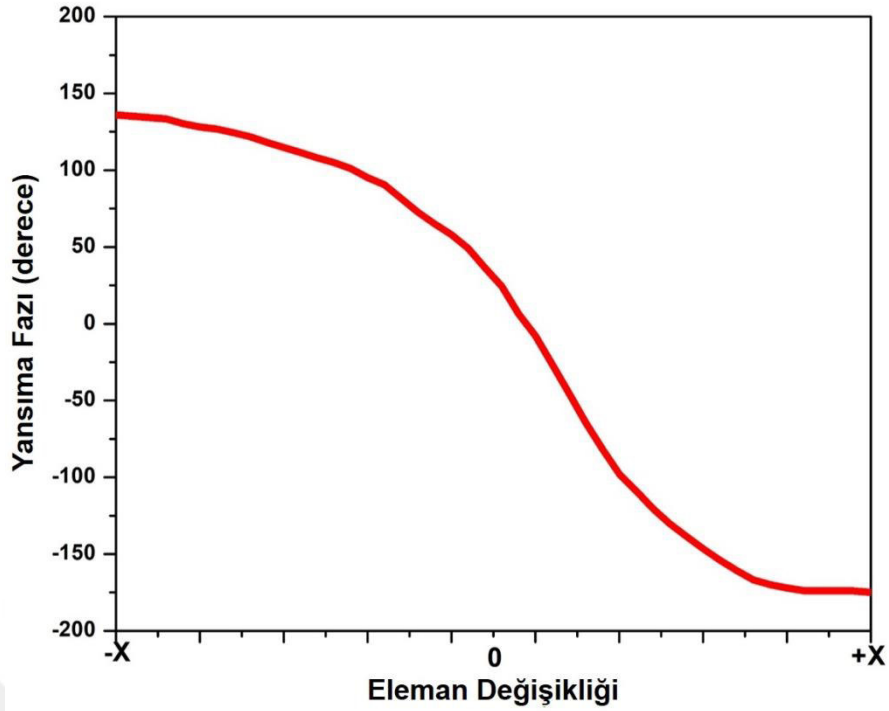
Eleman boyutu tekniğinde, farklı faz kaymaları elde etmek için elemanın fiziksel boyutu ayarlanır. Boyutun değişmesi verilen bir çalışma frekansı veya dar bir bant için farklı faz kaymasına neden olur. Bu, yamalar, halkalar, halkalar, kare şekiller ve benzeri temel şekiller kullanılarak gerçekleştirilebilir. Şekil (2.10) bu şekillerden birkaçını göstermektedir. Tasarlanıp gerçekleştirildiklerinde ışının yansıtılacağı yön bellidir, değiştirilemez.



Şekil 2.10. Çeşitli yansıtıcı eleman şekilleri (Üçüncü, 2013)

Diğer yaklaşımda, farklı faz kaymaları elektronik olarak elde edilir. Bu, PIN diyotları, RF MEMS anahtarları, varaktörler veya diğer elektronik ayar cihazları kullanılarak sağlanır. Böylece, besleme ağı ve pahalı faz değiştirici kullanmadan ve alıcı/verici bileşenleri kullanılmadan, akıllı yansıtıcı yüzeyler olarak bilinen elektronik olarak yeniden yapılandırılabilir yansıtıcılar elde edilir. Akıllı yansıtıcı yüzeyler ile istenen yönde yüksek kazançlı ışın elde edilir ve ışını yönü değiştirilebilir.

Faz ayarlama yaklaşımları ile yansıtıcı elemanın özelliği (boyutu veya varaktör kapasitansı gibi) değiştirilerek şekil (2.11) 'de gösterildiği gibi farklı faz kaymaları elde edilir. Yansıyan dalgaının yansıtma faz aralığı, 360° 'lik tam bir faz döngüsü sağlamalıdır. Ancak, bu fazların aralığı, devre levhasının dielektrik sabiti (ϵ_r), dielektrik kayıp tanjantı ($\tan\delta$) ve levhanın kalınlığı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler, aralığı 360° 'lik tam bir faz döngüsünden daha az yapar. Bununla birlikte, 300° 'nin üzerinde bir faz aralığı birçok yansıtıcı yüzey için yeterli kabul edilebilir (Nayeri et al., 2018)



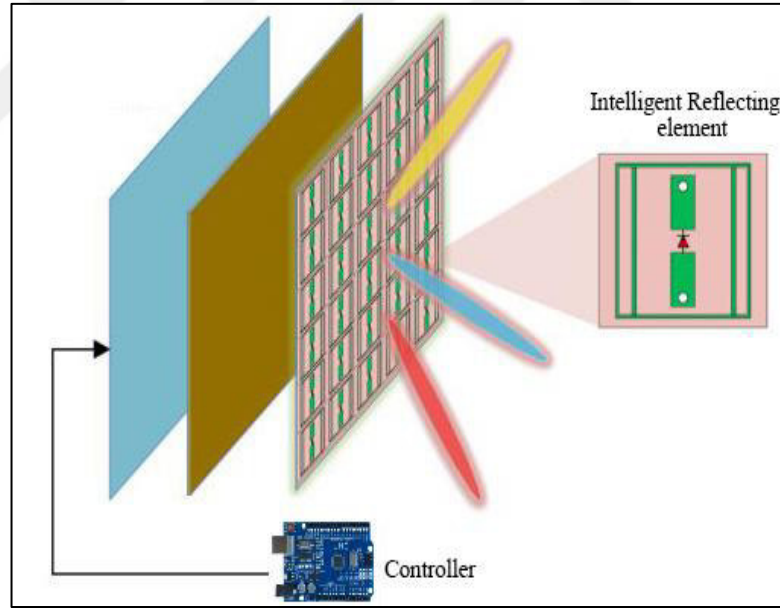
Şekil 2.11. Yansıtıcı elemanlar ile elde edilecek faz değişimleri

2.5.3. Yansıtıcı dizi Bant Genişliği

Bir mikroşerit yansıma dizisi yüzeyinin temel sınırlaması, dar bant genişliğidir (John Huang & Encinar, 2007). Bunun nedeni, mikro şerit yama elemanının normal olarak yaklaşık % (3-10) (orta frekansa göre) dar bir bant genişliği olmasıdır (John Huang, 1995; D.M. Pozar, 2007). Yansıtıcı bant genişliği ifadesi ikiye ayrılabilir; birim hücre elemanı için bant genişliği ve tam yansıtıcı yüzey için bant genişliği (D.M. Pozar, 2003). Tam yansıma dizisi için bant genişliği, kazanç-frekans eğrisinde 1-dB düşüş veya 3-dB düşüş değerinde ölçülür (Dahri, Jamaluddin, Abbasi, & Kamarudin, 2017); bu yaklaşım birim hücre ögesi bant genişliğini incelemek için kullanılabilir. Birim eleman faz değişim eğrisinde daha yumuşak geçişli faz değişimi daha geniş bir bant genişliği sağlayabilir. Bu, devre levhasında dielektrik kalınlığının artırılmasıyla elde edilebilir, ancak bu durum elde edilecek toplam faz aralığını daraltacaktır (Nayeri et al., 2018).

2.6. Akıllı Yansıtıcı Yüzey

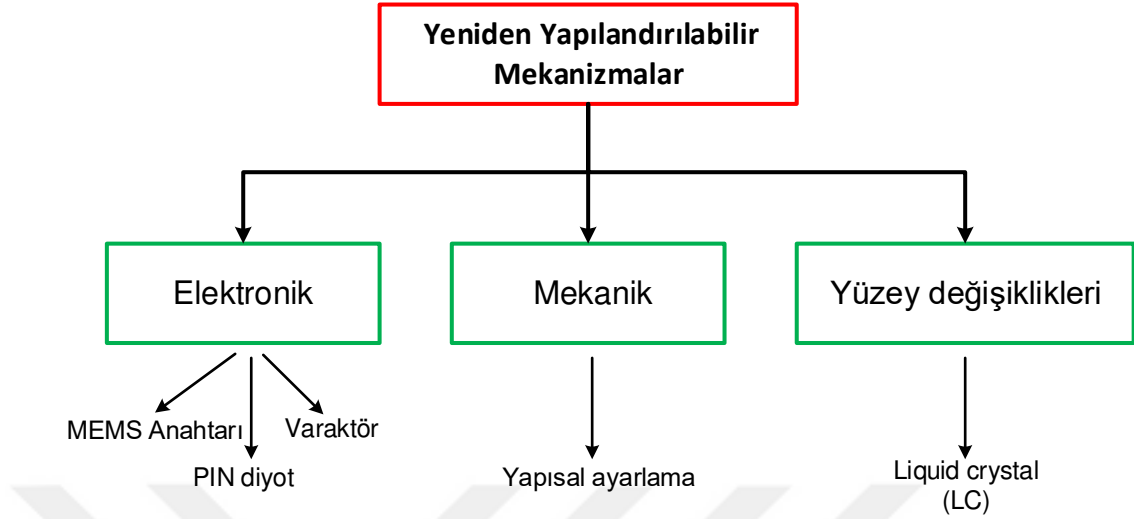
Literatürde bulunan yansıtıcı dizilerin çoğu için yansıtılan ışının yönü yüzeye göre sabittir, ışın yönünü değiştirmek için yüzey mekanik olarak döndürülebilir. Son zamanlarda, Akıllı Yansıtıcı Yüzey (AYY) olarak bilinen ışın yönünün elektronik olarak değiştirildiği yansıtıcı dizi (ışın yönlendirmeli dizi) tasarlama ve uygulamaya yönelik artan bir ilgi oluşmuştur. AYY, gelen sinyalleri elektronik olarak farklı yönlerde yansıtma özelliği olan, bir dizi programlanabilir pasif yansıtıcı elemandan oluşan iki boyutlu bir yapıdır. Elektronik olarak ışın yönünün değiştirildiği diziler, elemanın boyutunda herhangi bir değişiklik olmaksızın yansıtıcı birim elemanlardaki yansıma fazını kontrol etmek için yeniden yapılandırılabilir bileşenler veya malzemeler (ayarlanabilir dielektrik malzemeler, varaktörler, PIN diyotlar veya herhangi bir RF elektronik anahtar cihazı gibi) kullanılarak elde edilir (Chen et al., 2016). Bu yaklaşım ile birim hücre elemanının faz tepkisi değiştirilebilir, dolayısıyla şekil (2.12) 'de gösterildiği gibi ışın istenen bir yönde yönlendirilir.



Şekil 2.12. Akıllı yansıtma dizisi yüzeyinin geometrisi (Wu & Zhang, 2019)

Yansıtıcı yüzey tasarımlarda yeniden yapılandırılabilirlik için kullanılan çeşitli yöntemler şekil (2.13)'de sunulmuştur. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey teknolojisinde en yaygın olarak kullanılan geleneksel elektronik ve mekanik süreçler yoluyla yeniden yapılandırma mekanizmalarını ve de malzeme değişim mekanizmalarını içerir. Bu bölümde elektronik ayar yöntemleri bu tez konusu olduğu için daha detaylı anlatılacaktır. Elektronik yeniden yapılandırma yöntemleri, Radyo

Frekanslı MikroElektroMekanik Sistem (RF MEMS) anahtarları, PIN diyotları ve varaktörlerin kullanıldığı farklı anahtarlama yaklaşımlarını içerir.



Şekil 2.13. Yeniden yapılandırma mekanizmaları

Yansıtıcı dizi tasarımında elektronik yeniden yapılandırılabilirlik için, her bir dizi elemandan yansıyan dalganın fazının elektronik olarak ayarlanabilmesi gerekir. Elektronik ayarlanabilir yöntemler iki gruba ayrılır: ayırık ve sürekli ayar yöntemleri. Ayırık ayar yöntemleri mikroeletromekanik sistemler (MEMS'ler) ve PIN diyotlar gibi ayırık ayar cihazlarını kullanır. Ayırık ayar cihazlarının daha düşük kayıpları, kararlı faz durumları ve basit öngerilim devreleri vardır, ancak, bu cihazlar ile 360°'den daha düşük bir faz aralığı elde edilir ve bu da faz hatalarına yol açarak yansıtıcı yüzeyin yönlülüğünün azalmasına neden olur (H. Yang, Yang, Xu, Li, et al., 2016).

Varaktör gibi sürekli ayar cihazları niceleme (kuantalama) hatalarını önleyebilir ve iyi bir faz değişim aralığı sağlayabilir, ancak öngerilim voltajlarının doğru kontrolü zordur.

2.6.1. Radyo Frekanslı MikroElektromekanik Sistem (RF MEMS) anahtarı

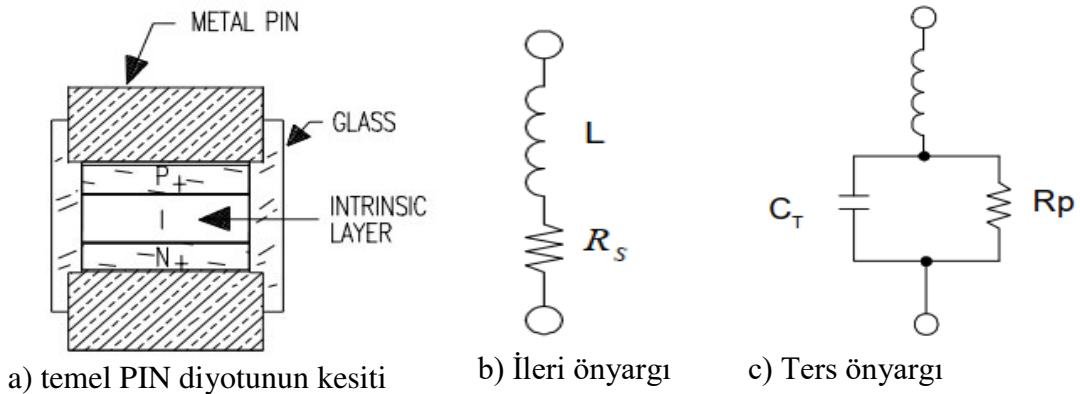
1998'den beri yeniden yapılandırılabilir antenlere entegrasyon için radyo frekanslı mikroeletromekanik sistemler (RF MEMS) önerilmiştir (Brown & techniques, 1998). Birçok tasarım, yeniden yapılandırma için RF MEMS'e başvurmuştur (Bayraktar, Civi, Akin, & Propagation, 2011; Sean V Hum, McFeetors, & Okoniewski, 2006; Legay et al., 2003). RF MEMS tabanlı deniden yapılandırmada anahtarların mekanik hareketi kullanılır. RF MEMS anahtarlarının tipik avantajları, düşük güç tüketimleri ve izolasyonlarının çok yüksek olması ve düşük maliyetli olmasıdır. Bununla birlikte, RF MEMS'in anahtarlama hızı 1–100 μ sn aralığındadır ki

bu, bazı uygulamalar için yavaş ve sürekli olmayan ayarlanabilirlik olarak düşünülebilir, ve "AÇIK" durumda yüksek DC öngerilim akımı gerektirirler (Legay et al., 2003).

2.6.2. PIN diyot

Bir PIN diyotu, bir iç bölge (I) ile ayrılmış P-tipi ve N-tipi bölgeleri içeren yarı iletken bir cihazdır. PIN diyotu, RF ve mikrodalga frekanslarında ideal bir anahtar olarak çalışır. Diyot ters öngerilimli (ters eğilimli) olduğunda, bir sığaç (kapasitör) gibi davranır; P ve N bölgeleri, sığacın pozitif ve negatif plakaları gibi iş görür ve iç bölge, plakalar arasındaki yalıtkan gibidir. Ters beslemede iç bölgenin genişliği, dolayısı ile P ve N bölgeleri arasındaki mesafe, artar. Bu aynı zamanda P ve N bölgeleri arasındaki kapasitansı azaltır ve izolasyon seviyesini artırır. Öte yandan, diyot ileri doğru eğilimli olduğunda, delikler ve elektronlar P ve N bölgelerinden iç bölgeye enjekte edilir ve bu da P ve N bölgeleri arasındaki mesafeyi azaltır ve direncinin düşmesine neden olur. PIN diyotu, düşük düzeyde DC öngerilim ile kontrol edilebilen iyi bir RF anahtarlama mekanizması gibi iş görebilir (Doherty & Joos, 1998). RF sinyallerinin geçmesine veya bloke edilmesine izin veren iki çalışma modunu destekler. Diyot, ileri öngerilim DC akımındayken "AÇIK" durumdadır ve diyot ters yönlü DC akımındayken "KAPALI" durumdadır. İki çalışma modundaki eşdeğer devreler şekil (2.14) 'de sunulmuştur.

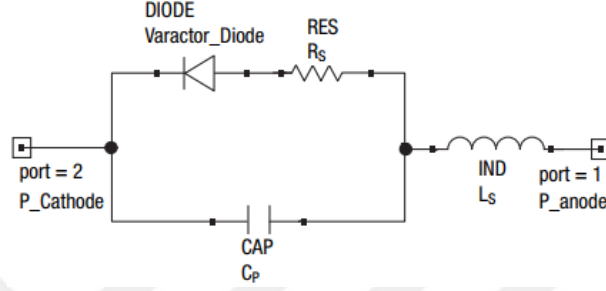
PIN diyotlarının avantajları, düşük güç tüketimi, yüksek ayarlama hızı ve hızlı tepki ve düşük üretim maliyetidir (Bill & Watertown). Bununla birlikte, PIN diyotunun ayarlanabilirliği sürekli değildir, bu da faz hatalarına neden olur.



Şekil 2.14. PIN Diyot Eşdeğer Devreler (Bill & Watertown)

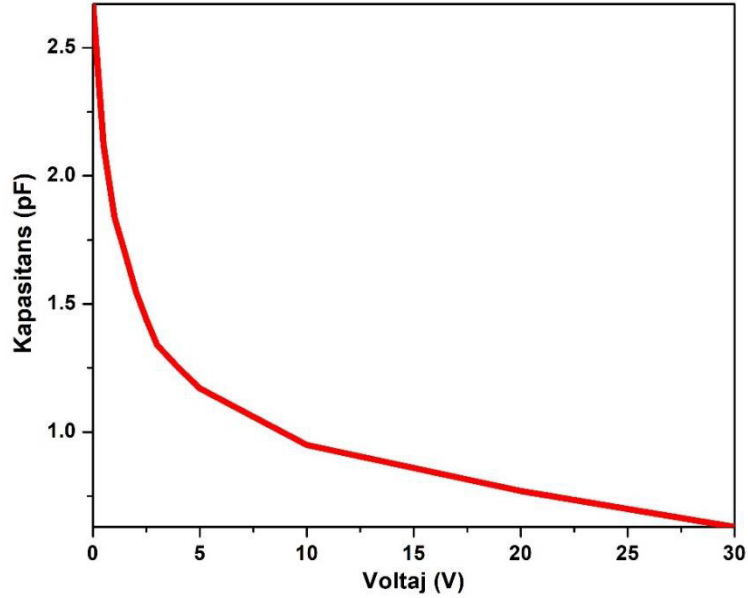
2.6.3. Varaktör

Bir varaktör diyot (bazen varikap diyot olarak da adlandırılır), normalde P-N bağlantısından oluşan bir yarı iletken bileşendir. Varaktör, terminalleri boyunca uygulanan voltaj ile kontrol edilen değişken kapasitans sağlayan özel bir diyot türüdür. Varaktörün değişken kapasitans olarak çalışması, ters eğimli durumunda gerçekleşir, ve bu durumda bileşenden neredeyse hiç DC akımı geçmez. Bir varaktör diyotunun eşdeğer devresi şekil (2.15) 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Varaktör diyotunun eşdeğer devresi (*DATASHEET SMV1405*)

Bu tez çalışmasında varaktör SMV1405 kullanılmıştır. SMV 1405-079 veri sayfasındaki bilgilere göre ters ön gerilim voltajı 0'dan 30 V'a değişirken varaktör kapasitansı $C(V)$ 2.67 ila 0.63 pF arasında değişmektedir (Şekil (2.7)). Varaktörlerin diğer anahtarlara göre avantajları, güç tüketiminin çok düşük olması ve sürekli ayarlanabilen kapasitans gerektiren tasarımlara uygun olmasıdır.



Şekil 2.16. Ters öngerilim voltajının değişimine karşılık gelen SMV1405 varaktörün değişken bağlantı kapasitansı (*DATASHEET SMV1405*).

3. YANSIMA YÜZEYLERİNİN TASARIMI VE SİMÜLASYONU

3.1. Giriş

Etkili bir yansıtıcı yüzey tasarımı, birim hücrenin ve birim hücreye ait farklı tasarım parametrelerinin toplam yüzeyin yansımaya performansını nasıl etkileyeceğinin iyi anlaşılmasını gerektirir. Bu parametreler birim hücrenin şekli, seçilen devre levhasının dielektrik sabiti (ϵ_r) ile kayıp tanjantı ($\tan\delta$) ve seçilen kalınlıktır. Bu bölüm, yansıtıcı yüzeylerin tasarım aşamalarını ele almakta ve birim hücreler kullanılarak elde edilen yansıtıcı yüzeyin simülasyon sonuçlarını sunmaktadır.

3.2. Yansıtıcı Dizi Yüzeyinin Tasarımı ve Simülasyonu

3.2.1. Tasarım hedefleri

Bu bölüm, 10 GHz frekansında gelen sinyalleri belirli doğrultuda yüksek kazanç ile yansıtan bir yansıtıcı yüzey tasarlamayı amaçlamaktadır. Bu bölümde ele alınan tasarım yöntemleri, bir sonraki bölümde (Bölüm 4) sunulan elektronik ışın yönlendirmeli yansıtıcı yüzeyi tasarlamak için kullanılacaktır.

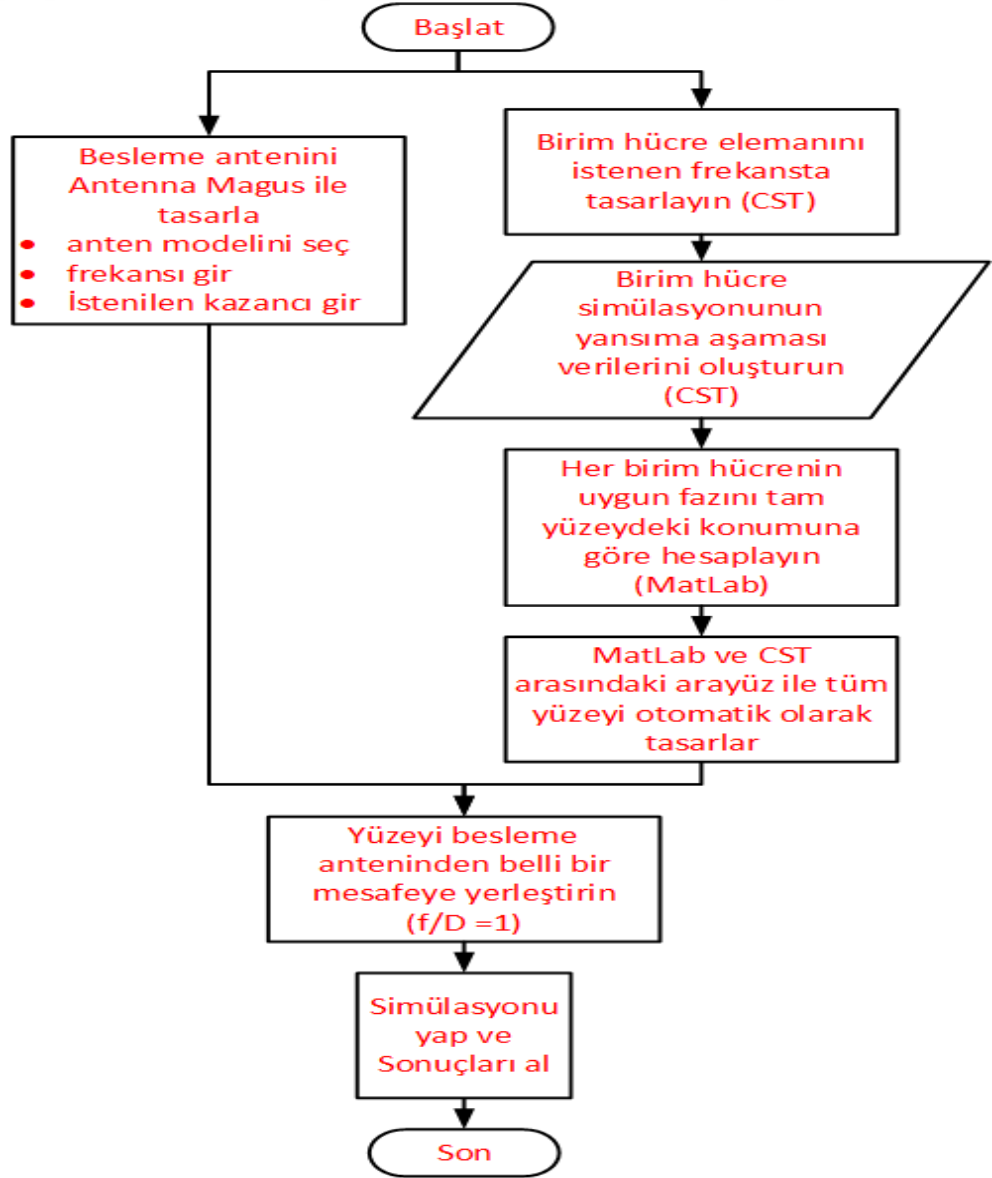
Yüzey, mikro şerit teknolojisi kullanılarak tasarlanacak ve simüle edilecek ve daha sonra devre kartına basılabilecektir.

3.2.2. Simülasyon Yazılımı CST

Bu projedeki tasarımlar ve simülasyonlar için, elektromanyetik simülasyonlarda yüksek başarımlı sergileyen Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi (CST) Mikrodalga Studio Suite ("CST STUDIO SUITE," ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE, 2020) kullanıldı. Tasarlanan birim hücre, gerekli ölçümler için birim hücrenin üst tarafında $\lambda/2$ mesafeye konulan bir Floquet bağlantı noktası ile uyartıldı. Floquet portu ile bir dizi Floquet modunu uyartılır; bu modlar temelde yayılma yönleri periyodik yapının frekansı ve geometrisi ile belirlenen düzlemsel dalgalardır. Bu, herhangi bir geliş açısı veya polarizasyon için periyodik bir dizi elemanın incelenmesinde kullanılan genel bir yaklaşımdır. Yansıyan alan ile ilgili bilgiler (yansımaya katsayısının değeri gibi) doğrudan Floquet uçtan elde edilebilir.

3.2.3. Tasarımın temelleri

Yansıtıcı yüzey tasarımı, istenen faz kayma aralığını verebilen birim hücrenin tasarımına dayanmaktadır. Birim hücre tasarlandıktan sonra, denklem (2.10) 'da verilen reflektör açıklığı üzerinde gerekli faz kaymalarına göre elemanlar yerleştirilerek, yansıtıcı yüzeyin tamamı tasarlanır. Bunu gerçeklemek için iki adet MatLab programı geliştirildi; programlardan biri istenen yönde ışın oluşturmak için yüzeyin her bir elemanının gerekli faz kaymasını hesaplamak için, diğeri ise CST ile MatLab arasında arayüz oluşturmak ve yansıtıcı yüzeyi gerekli faz kaymalarına göre otomatik olarak tasarlamak için geliştirildi. Yüzey tasarımı tamamlandığında, Antenna Magus ile tasarlanan kaynak anten ile birlikte CST ortamında simüle edildi. Şekil (3.1), akış şeması ile yansıtıcı dizisinin tasarım aşamalarını göstermektedir.



Şekil 3.1. Yansıtıcı dizi tasarım aşamaları

3.2.4. Yansıtıcı Dizi Elemanı Tasarımı

Reflektörlü anten tasarımında önemli bir aşama, farklı boyutlarda farklı elemanlar tasarlamaktır. Bu elemanlar, istenen yönde koşutlanmış bir ışın oluşturmak için farklı faz kaymaları sağlamalıdır. Bu çalışmada, ana ışını düşey düzlemde 30° yönüne doğrultan yansıtıcı dizi tasarımı amaçlanmıştır. Bunun için yansıtıcı yüzey açıklığındaki her bir birim eleman konumu için gerekli faz dağılımı MatLab kodu ile hesaplandı. Açıklık üzerindeki her bir eleman konumu için uygun eleman boyutunu seçerken birim hücre tasarımından hücre boyutuna karşılık gelen faz kayması bilgi ve veri tablosu kullanıldı.

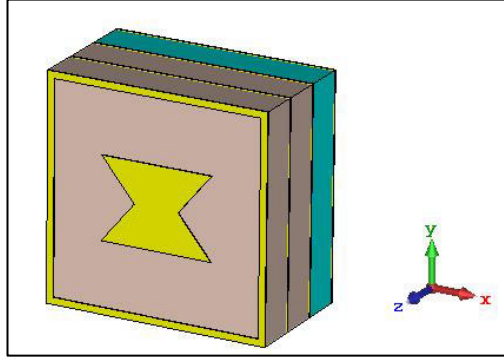
Bu bölümde, gerekli yansıma faz değişim aralığını sağlamak için birim elemanların boyutlarını değiştirme yöntemi ve iki farklı birim hücre şekli (üçgen şekil ve kare döngü) kullanarak iki farklı yansıma dizisi tasarlanacaktır.

3.2.5. Üçgen birim hücre elemanları ile yansıtıcı yüzey tasarımı

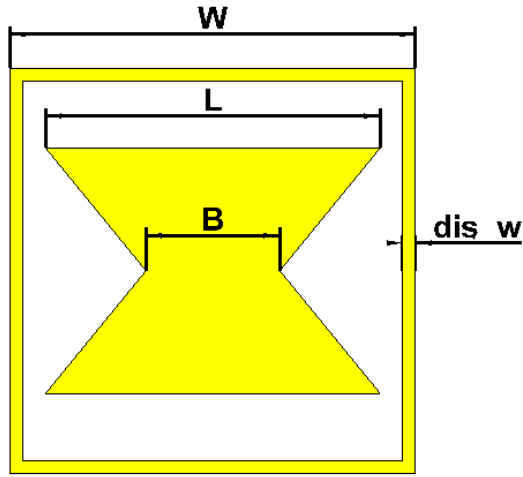
3.2.5.1. Üçgen şekilli birim hücre elemanının yapısı

Şekil (3.2-a), değişken üst kenar "L" ve orta uzunluğu "B" olan " $0.4 * L$ " olan birim hücre yapısını göstermektedir. Bağlı geçirgenliği $\epsilon_r = 1.37$ olan 1.5 mm kalınlığında köpük tabakası ile ayrılmış bir zemin düzlemi ile desteklenen üç metal yama tabaka arasına sıkıştırılmış iki FR-4 alt dielektrik dolgu (substrate) tabakasından oluşur. FR-4 levhasının kalınlığı 1.6 mm, bağlı geçirgenliği $\epsilon_r = 4.3$ 'ün ve kayıp tanjantı ($\tan \delta$) 0,025'tir. Yansıtıcı yüzeyin birim hücresi, CST MWS'nin 3D EM simülasyon yazılımı kullanılarak 10 GHz'de modellendi. Eleman, daha sonra, birim hücrenin üst tarafından belirli bir mesafeye yerleştirilen bir Floquet portu ile uyarıldı.

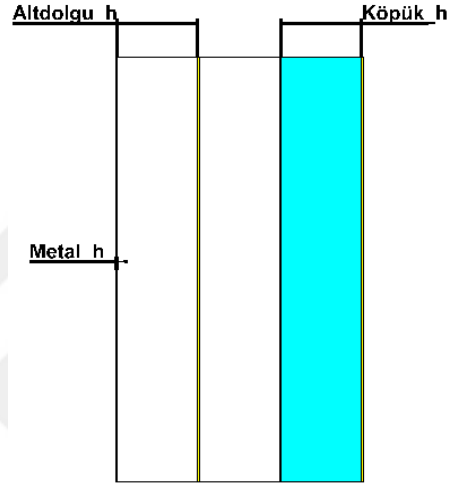
Birim hücrenin geometrisi ve boyutları sırasıyla şekil (3.2) ve tablo (3.1)'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



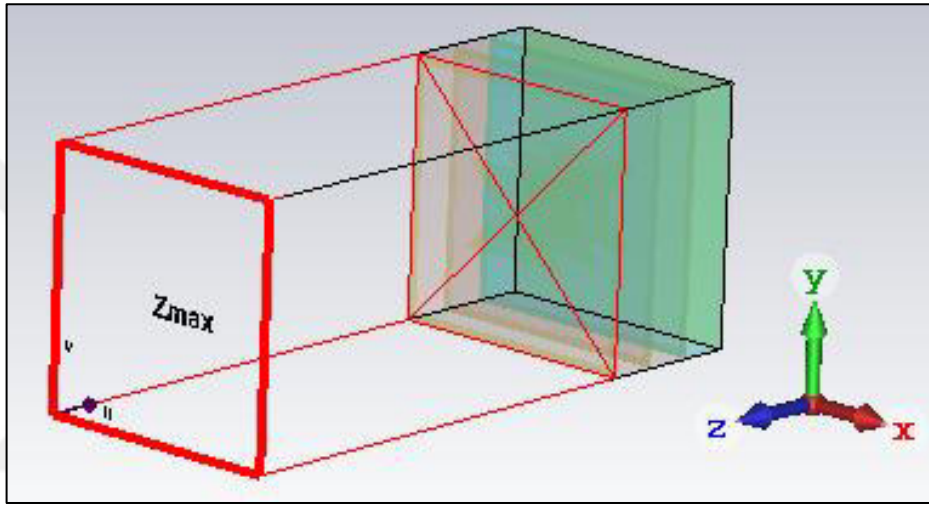
Şekil 3.2. Önerilen üçgen birim Hücre a) Birim hücrenin geometrisi; b) birim hücrenin üstten görünümü (sol) ve yandan görünümü (sağ).

Tablo 3.1. Birim hücrenin boyutları.

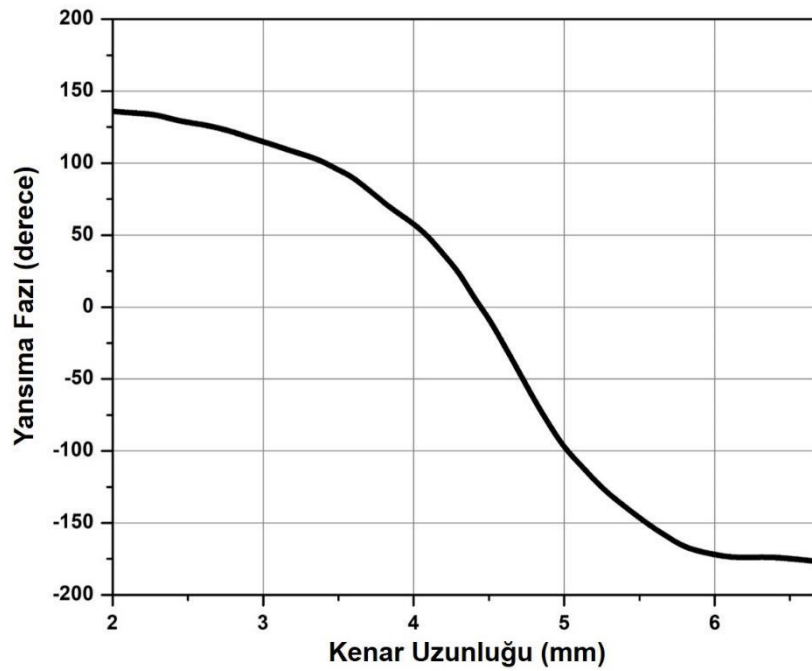
Parametre (Şekil 3.2)	Değer (mm)
W	8
B	$0.4 \cdot L$
dış_w	0.25
Altdolgu_h	1.6
Köpük_h	1.5
Metal_h	0.035

3.2.5.2. Üçgen birim hücre elemanın Simülasyon sonuçları

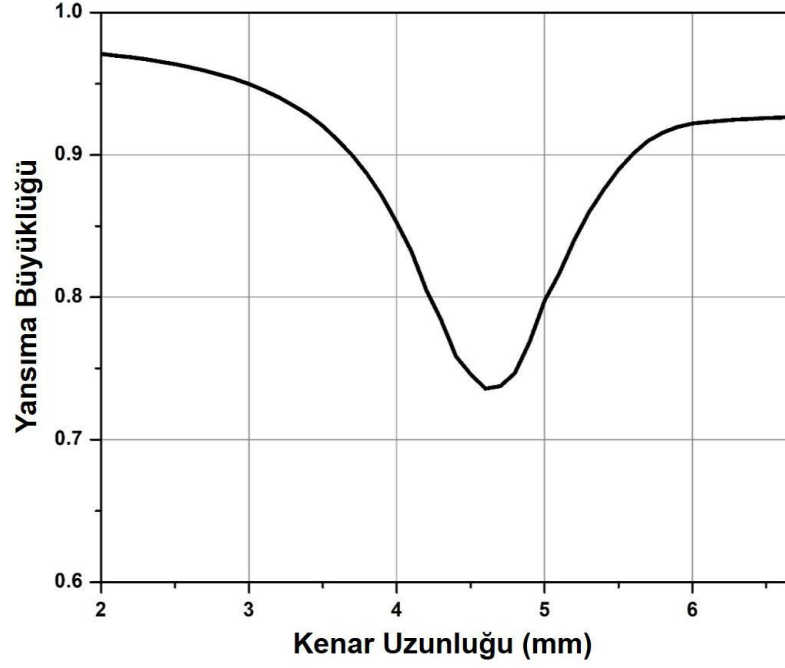
Önceki bölümde sunulan birim hücre, 10 GHz'de $\lambda/2$ mesafesine yerleştirilen bir Floquet portu ile uyarıldı. Yansıtıcı dizi tasarımlarında, yansıma aşamasının belirli bir referans düzleminde hesaplanması önemlidir. Mikro şerit yansıtıcılar için üst metal yüzey referans düzlem olarak kabul edilir. Dolayısıyla, referans düzlemde yansıma katsayısını elde etmek için Floquet portunun şekil (3.3) 'de gösterildiği gibi birim hücrenin üst yüzeyine gömülmesi gerekir. Şekil (3.4), birim hücrenin 'L' kenarının uzunluğu 2 mm'den 6.7 mm'ye değiştiğinde, yansıma katsayılarının faz ve büyüklüğündeki değişikliği göstermektedir.



Şekil 3.3. Birim hücrenin Floquet portu ile uyarılması



(a)



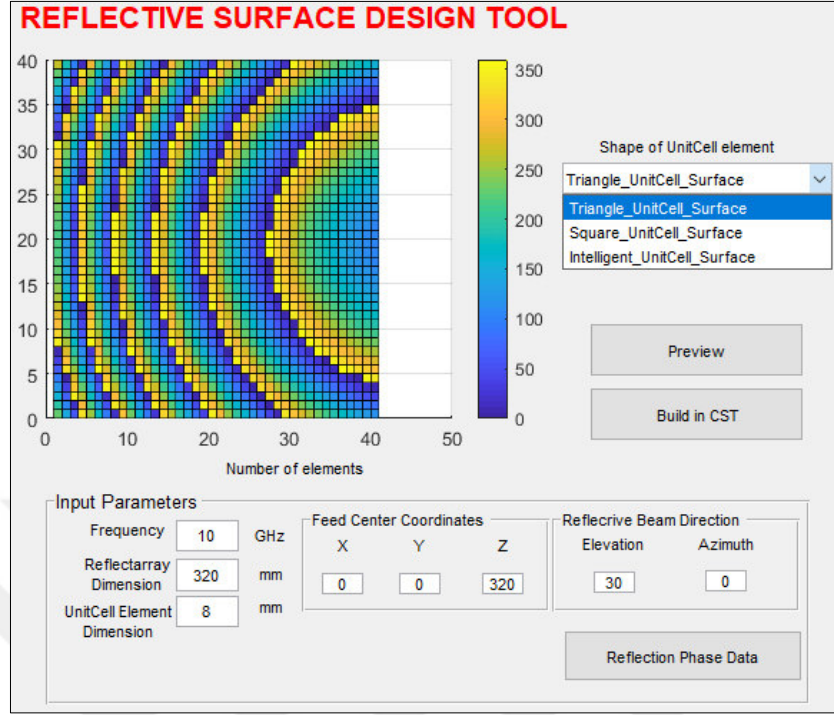
(b)

Şekil 3.4. 10 GHz'de birim hücrenin yansımaya katsayıları: (a) faz, (b) büyüklük.

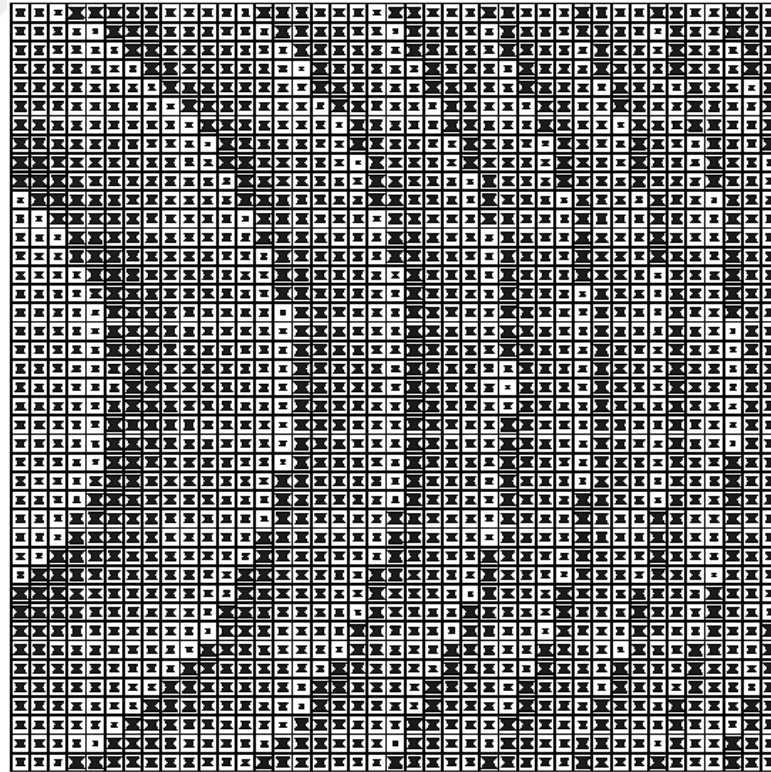
Reflektör açıklığına gelen tüm gücü yansıtılabilmek için, yansımaya katsayısının büyüklüğü birim hücrenin tüm geometri değişiklikleri için neredeyse bire eşit olmalıdır. Yansımaya katsayısının fazı, birim hücrenin tüm geometri değişiklikleri için 360 derece civarında bir faz değişimi sağlamalıdır. Birim hücrenin boyutları ve karşılık gelen faz kaymaları bir tabloya yazılır, daha sonra her bir öğenin açıklık üzerindeki konumu için gerekli öğe boyutunu seçmede kullanılır.

Yansıtıcı yüzey tasarım aracı olarak iş gören ve (2.10) denklemini hesaplayan MatLab kodu yazıldı. Bu MatLab kodu ile ana ışını istenilen doğrultuya (θ_0, φ_0) yönlendirmek için yansıtıcı yüzey açıklığına dizilen her bir birim eleman konumunda olması gereken faz kaymaları belirlendi. Dizideki eleman konumlarına göre faz dağılımları Şekil (3.5)'de gösterilmektedir; bu şekilde yatay ve dikey eksenler eleman sayısıdır. Daha sonra bu bilgi, bir önceki aşamada (birim hücre tasarım aşaması) elde edilen birim eleman eleman boyutuna göre faz değişim verileri (bakınız Şekil 3.4) ile birlikte kullanılarak yansıtıcı yüzey üzerindeki her bir birim elemana ait boyutlar belirlendi. Şekil (3.5)'te, ana ışını dikey düzlemde 30° yönünde bir kalem ışın biçiminde doğrultan 40×40 elemanlı kare yansıtıcı yüzey için gerekli faz dağılımını göstermektedir. Şekil (3.6), MatLab ile otomatik olarak tasarlanan, yansıtıcı yüzeye gelen sinyali farklı yönlerde yansıtmak için gereken faz dağılımları için maske çizimlerini ve üç katmanlı yüzeyin tamamı için maske çizimini göstermektedir. Gelen

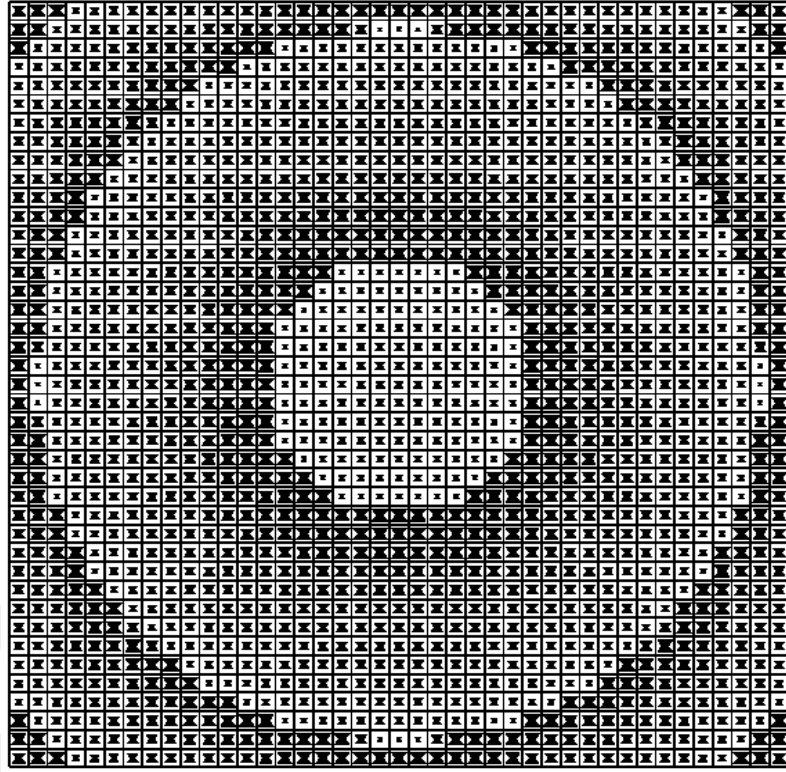
dalgayı yansıtmak için seçtiğimiz yönler, düşey düzlemde $\theta = -40^\circ$ (Şekil 3.6.a), $\theta = 0^\circ$ (Şekil 3.6.b) ve $\theta = 30^\circ$ (Şekil 3.6.c) yönleridir.



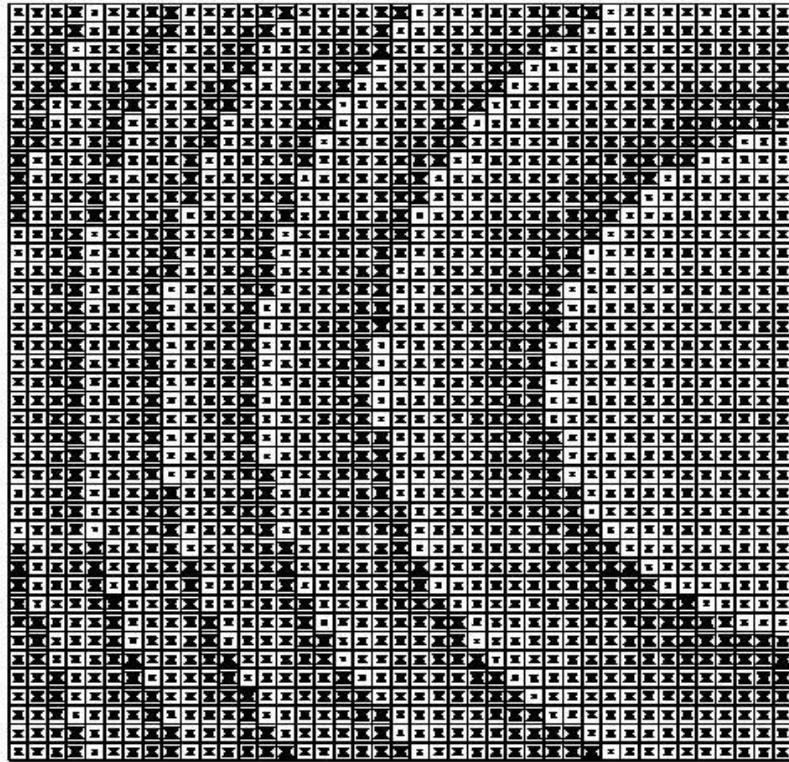
Şekil 3.5. Yansıtıcı yüzey tasarım aracı



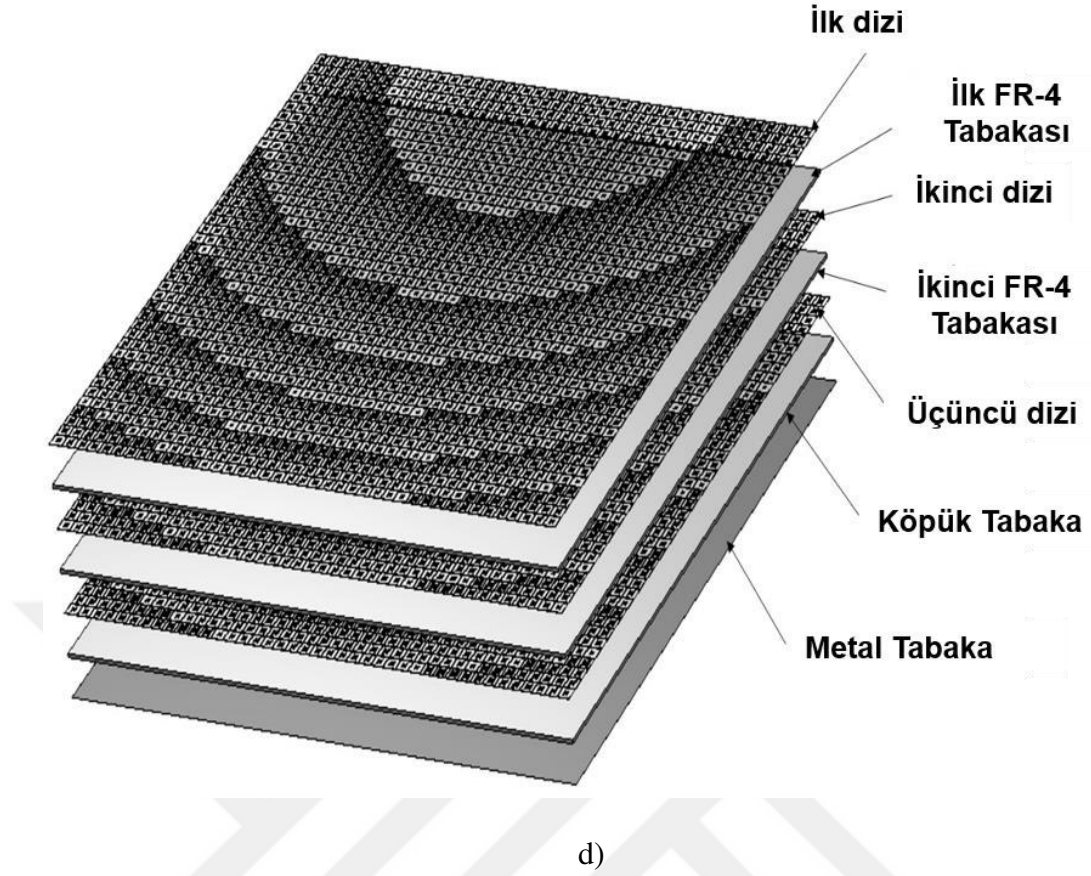
a) -40 derecelik yansıma yönü için yansıtıcı dizi maskesi



b) yansima maskesi 0 derecelik Yansıtma dizisi



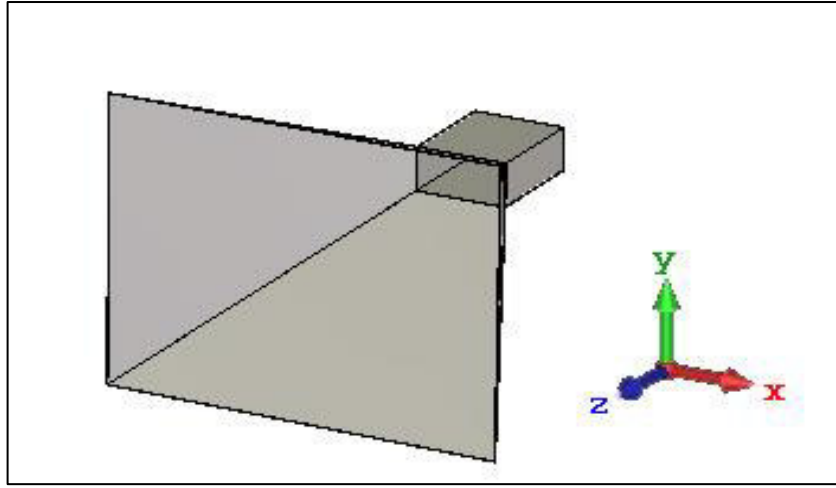
c) 30 derecelik yansima yönü için yansıtıcı dizi maskesi



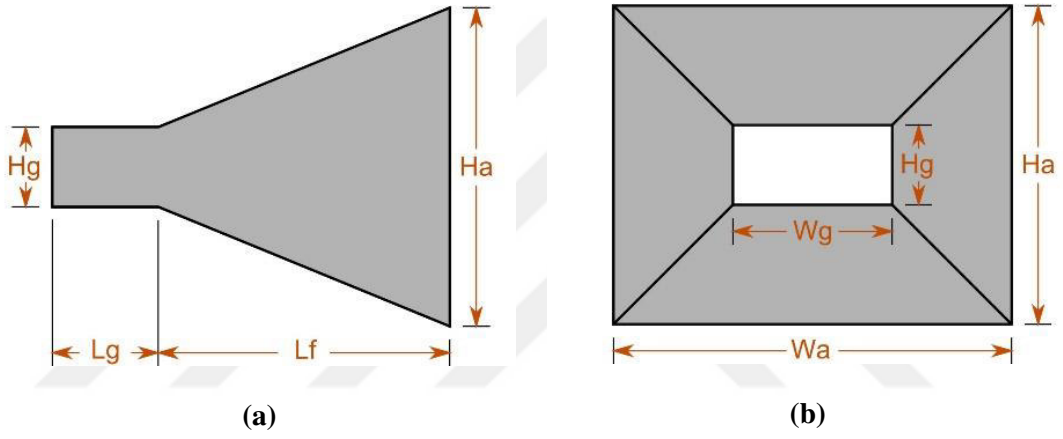
Şekil 3.6. (a), (b), ve (c) – Yansıtılan ışının farklı doğrultma yönleri için yansıtıcı yüzey maskeleri, (d)- yansıtıcı yüzeyin katmanları.

3.2.5.3. Besleme antenin tasarım ve simülasyonu

Yansıtıcı yüzey tasarımında, besleme antenin ışınma özellikleri tasarımdaki önemli aşamalardan bir tanesidir. 10 GHz frekansında yansıtıcı dizi ışınma özelliklerini elde etmek için kullanılacak boynuz anten Anten Magus Yazılımı ("Antenna MAGUS," ANTENNA DESIGN SOFTWARE TOOL, 2020) kullanılarak tasarlandı. Tasarlanan boynuz anten, CST ortamında simüle edildi. Bu boynuz antenin modeli ve boyutları sırasıyla şekil (3.7) ve şekil (3.8) 'de gösterilmiş ve tablo (3.2)'de listelenmiştir. Boynuz antene ait simülasyon ile elde edilen S11 parametresi Şekil (3.9) 'de sunulmuştur; 9 – 11 GHz aralığında S11'in değeri -20 dB'in altındadır. Şekil (3.10)'de gösterildiği gibi bu boynuz anten, girişine beslenen gücü, 17.6 dBi tepe kazanç ile yönlendirir. Tasarlanan boynuz anten 10 GHz'de çok düşük yansımaya ve yönlendirilmiş bir ışına sahiptir ve bu nedenle yansıtıcı yüzeyi beslemede kullanılabilir.



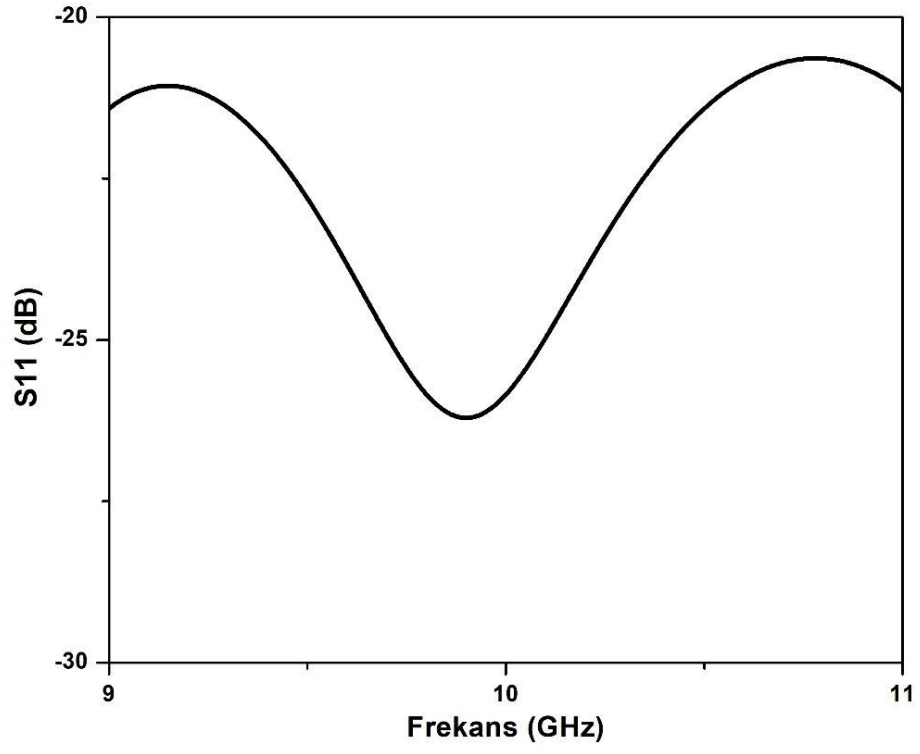
Şekil 3.7. Besleme antenin modeli



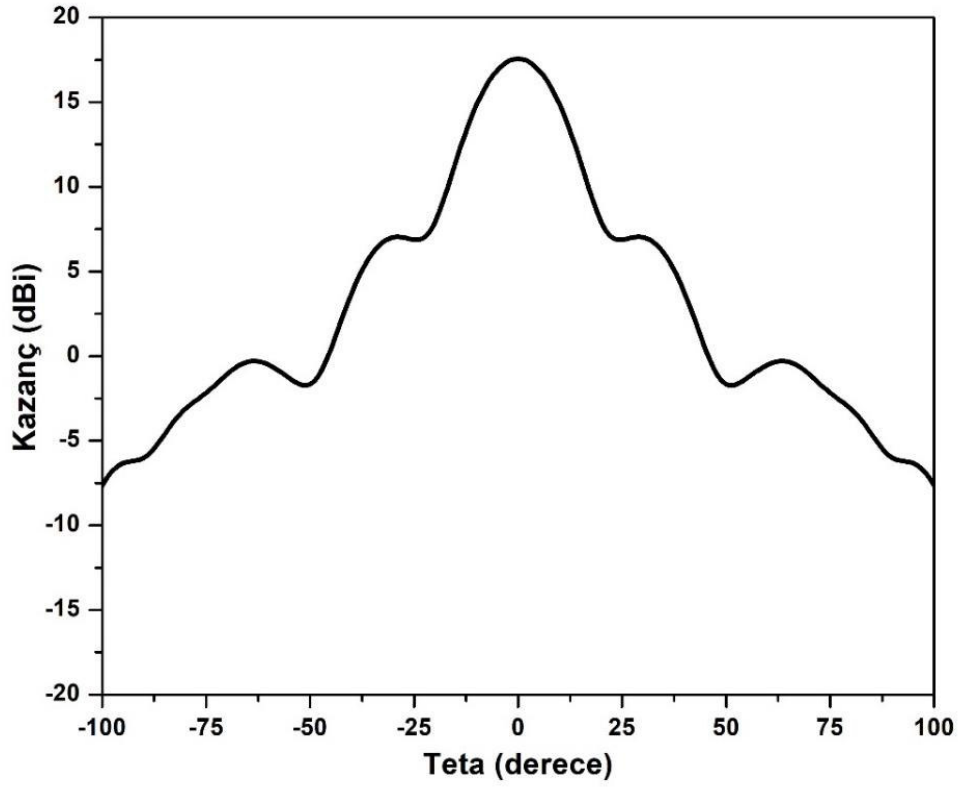
Şekil 3.8. Tasarlanan boynuz antenin geometrisi; a) yandan görünüm; b) arkadan görünüm.

Tablo 3.2. Boynuz antenin boyutları.

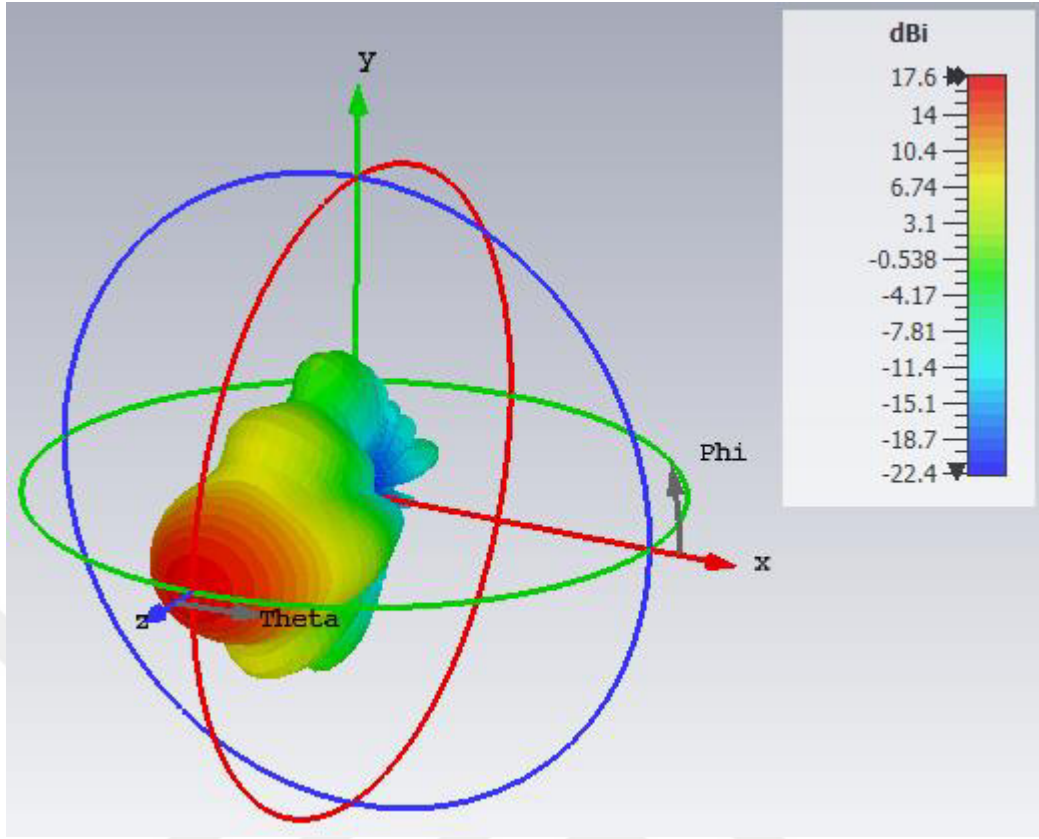
Parametre (Şekil 3.8)	Değer (mm)
H_g	11.76
W_g	23.53
L_g	29.97
L_f	79.96
H_a	78.19
W_a	102.01



Şekil 3.9. Boynuz antenin S11'i



(a)



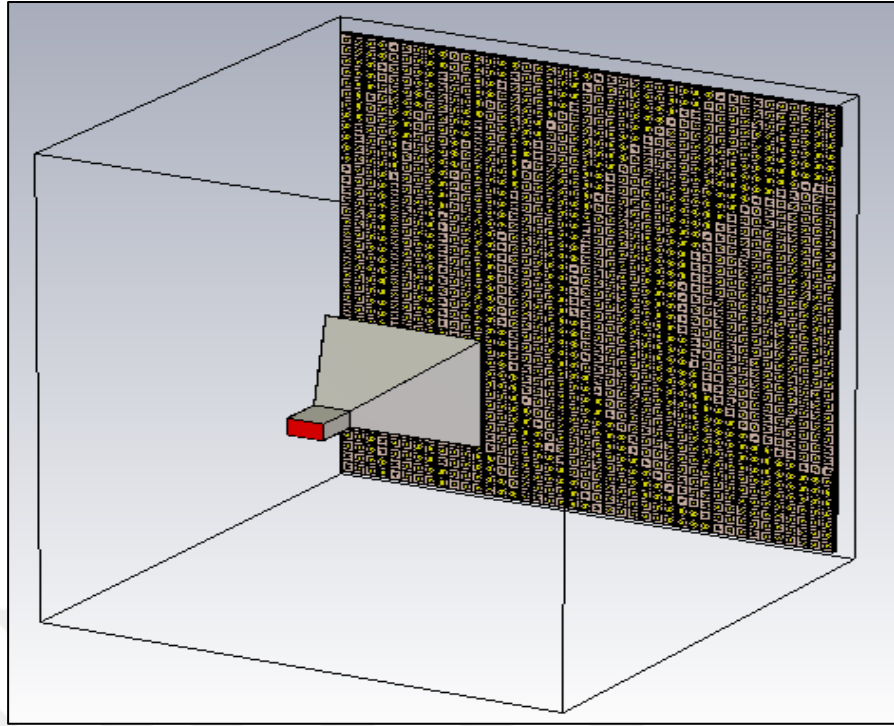
(b)

Şekil 3.10. Boynuz antenin simüle edilmiş ışınma örüntüleri, a) 2 boyutlu ışınma örüntüsü b) 3 boyutlu ışınma örüntüsü.

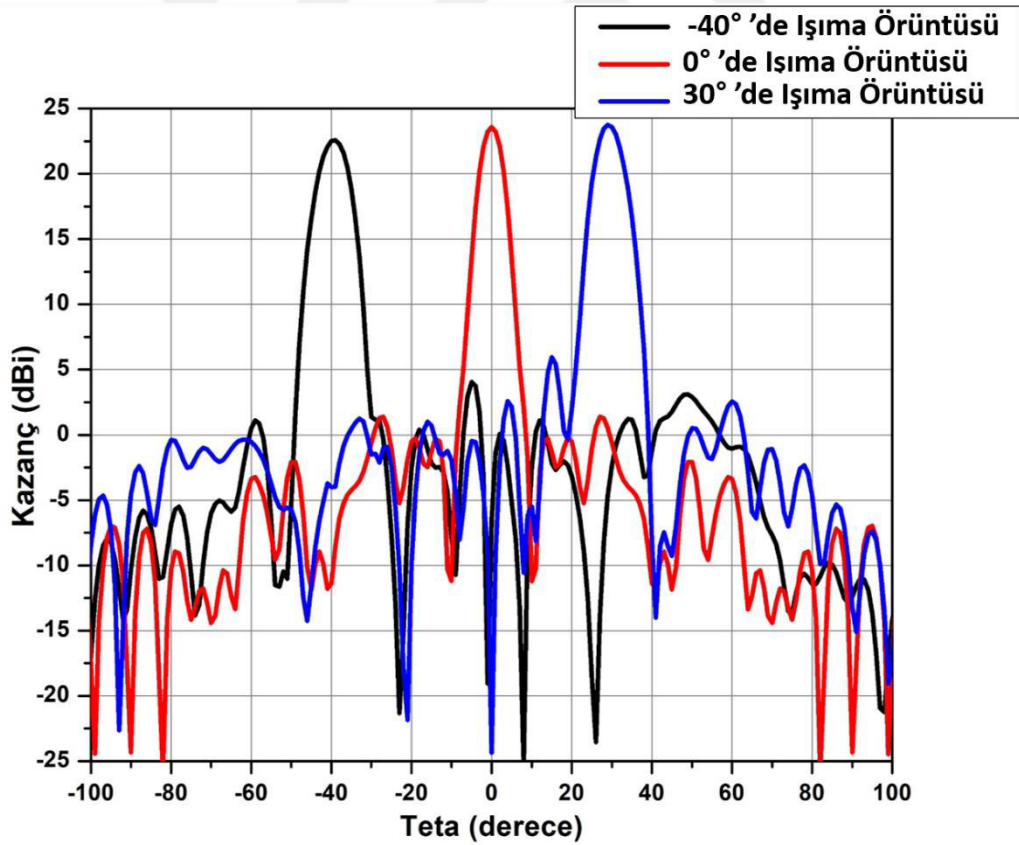
3.2.5.4. Yansıtıcı yüzeyin uzak alan ışınma analizi

Önceki aşamada MatLab kodu ile tasarlanan yansıma dizisi maskesi ile CST de oluşturulan yansıma dizisinin tamamı simüle edilerek, yansıma dizisinin ışınma örüntüsü bulunur. Yansıtıcı yüzey ($10\lambda \times 10\lambda$) olarak tasarlanmış ve $f/D=1$ 'e göre besleme boynuz anteninden belli bir mesafeye yerleştirilir; burada D , yansıtıcı yüzeyin tamamının boyutu ve f , besleme anteni ile yüzey arasındaki mesafedir.

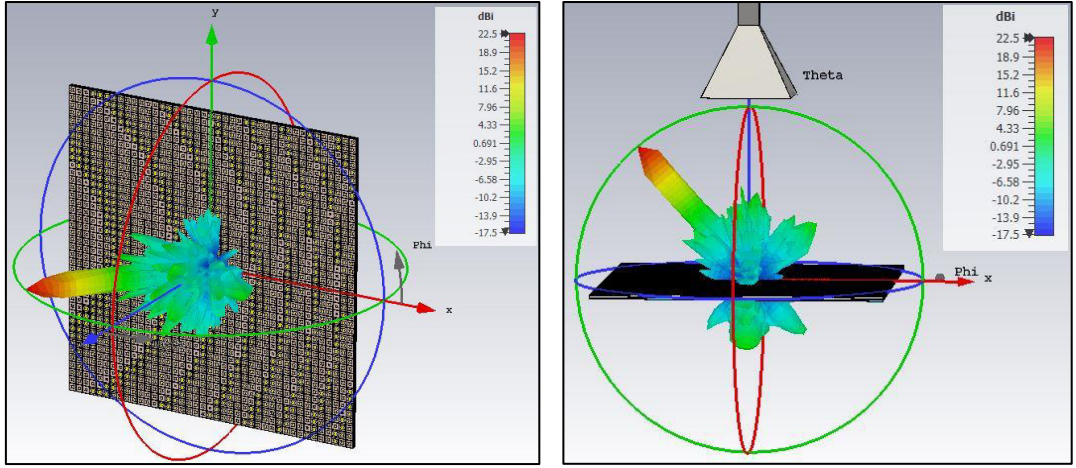
Tasarlanan yansıtıcı yüzey CST'de simüle edildi. Simülasyon kurulumunun resmi şekil (3.11) 'da verilmiştir. Önerilen yansıtıcı dizisinin simüle edilmiş 2B ve 3B ışınma örüntüleri, sırasıyla şekil (3.12) ve şekil (3.13) 'de gösterilmiştir. Bu şekillerden de görüleceği gibi, düşey düzlemde $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ yönlerinde yansıtma için tasarlanan yansıtıcı yüzeyler ile belirtilen yönlerde yüksek kazançlı (kalem ışın biçimli) yansıtma gerçekleştirilmektedir.



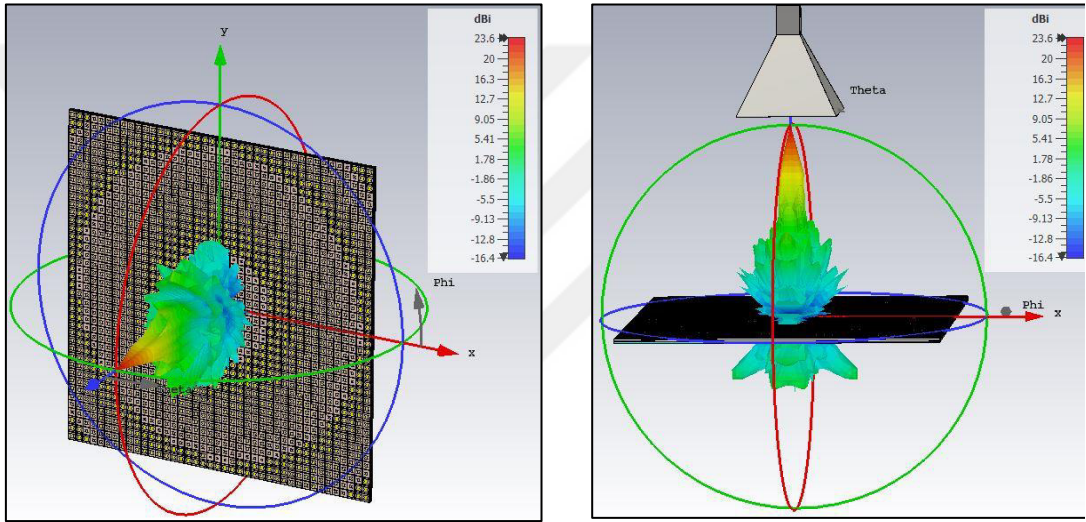
Şekil 3.11 CST ortamında simülasyon kurulumu



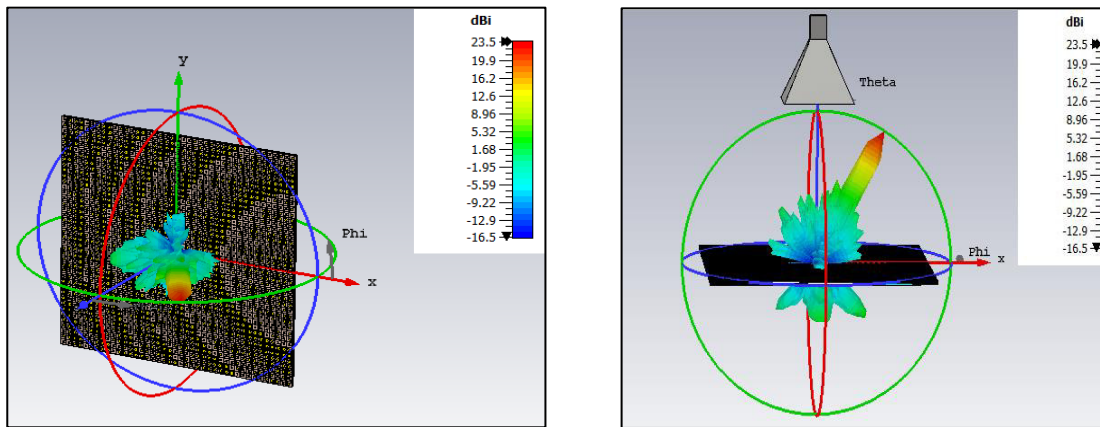
Şekil 3.12. 10 GHz'de simülasyon ile elde edilmiş $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ yönlerinde ışınlar için 2 boyutlu ışınma örüntüleri



a) $\theta = -40^\circ$ yönündeki 3 boyutlu ışınma örüntüleri



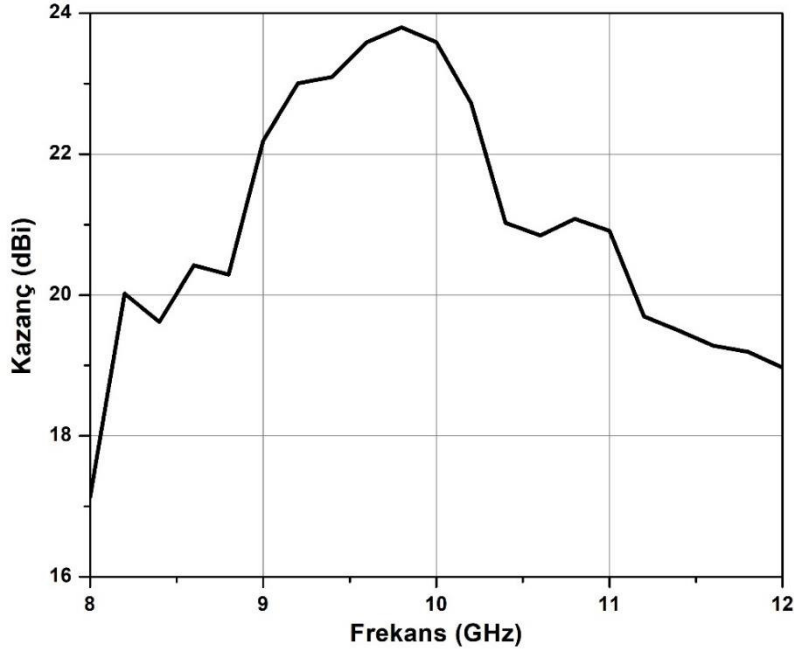
b) $\theta = 0^\circ$ yönündeki 3 boyutlu ışınma örüntüleri



c) $\theta = 30^\circ$ yönündeki 3 boyutlu ışınma örüntüleri

Şekil 3.13. Yansıtıcı dizinin 10 GHz'de simülasyon ile elde edilmiş 3 boyutlu ışınma örüntüleri.

Tasarlanan dizinin kazanç bant genişliğini belirlemek için farklı frekanslarda simülasyon yapıldı. Elde edilen kazancın frekansa bağlı değişimi Şekil (3.14) 'de sunulmuştur. En yüksek kazanç olan 23.8 dBi 9.8 GHz'de elde edilmiştir. 10 GHz'lik merkez tasarım frekansında elde edilen kazanç 23.6 dBi'dir. Şekil (3.14) 'den, yansıma dizisinin (8.9–11.1 GHz) 3 dB'lik kazanç bant genişliğinin yaklaşık % 22 olduğu ve 1 dB'lik kazanç bant genişliğinin yaklaşık % 10 olduğu görülebilir.



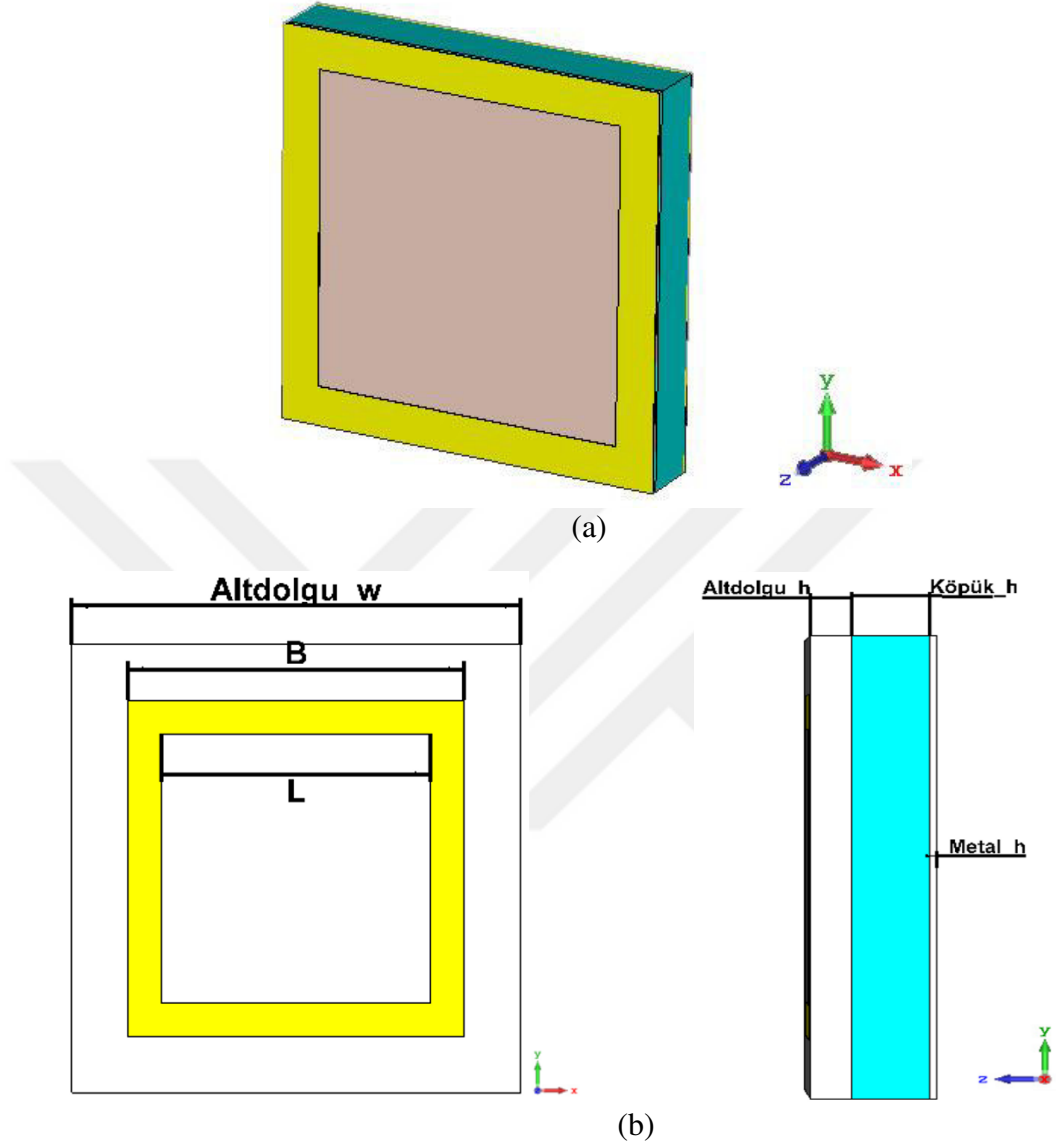
Şekil 3.14. Yansıtıcı yüzey kazancının frekansa göre değişimi

3.2.6. Kare çevrim birim hücre ile yansıtıcı dizi yüzey tasarımı

3.2.6.1. Kare çevrim birim hücre elemanının yapısı

Bu çalışmada tasarlanan diğer birim hücrenin yapısı şekil (3.15) 'de gösterilmiştir. İç uzunluğu 'L' ve dış uzunluğu '1.25 * L' olan, üstte bir Roger RT 5880 dielektrik alt dolgu malzemesi üzerine basılmış metal tabaka, ve Roger RT 5880 alt dolgusunun altında bağıl geçirgenliği $\epsilon_r = 1.37$ ve kalınlığı 1.5 mm olan bir köpük tabakası vardır. Roger substratının bağıl geçirgenliği $\epsilon_r = 2.2$, kalınlığı 1.6 mm ve kayıp tanjantı ($\tan\delta$) 0.0009'dur. Yansıtıcı yüzey için birim hücre, CST Microwave Studio'nun 3D EM simülasyon yazılımı kullanılarak 10 GHz çalışma frekansında tasarlanmıştır. Eleman daha sonra, birim hücrenin üst tarafına belirli bir mesafeye yerleştirilen bir Floquet portu ile uyartılarak yansıma katsayısının genlik ve fazına ilişkin simülasyonlar yapıldı.

Birim hücrenin boyutları sırasıyla şekil (3.15-b) ve tablo (3.3)'te gösterilmektedir.



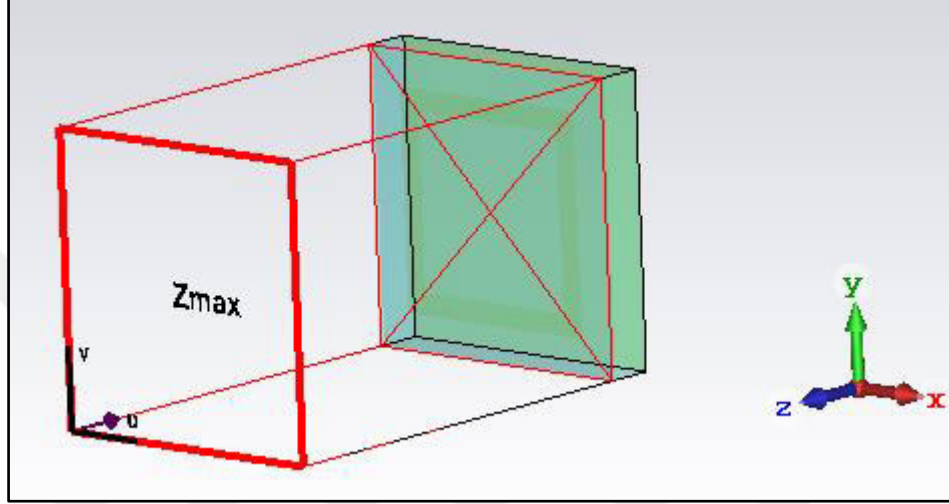
Şekil 3.15. Önerilen kare çevrim birim hücre a) Birim hücrenin geometrisi; b) birim hücrenin üstten görünümü (sol) ve yandan görünümü (sağ).

Tablo 3.3. Birim hücrenin boyutları.

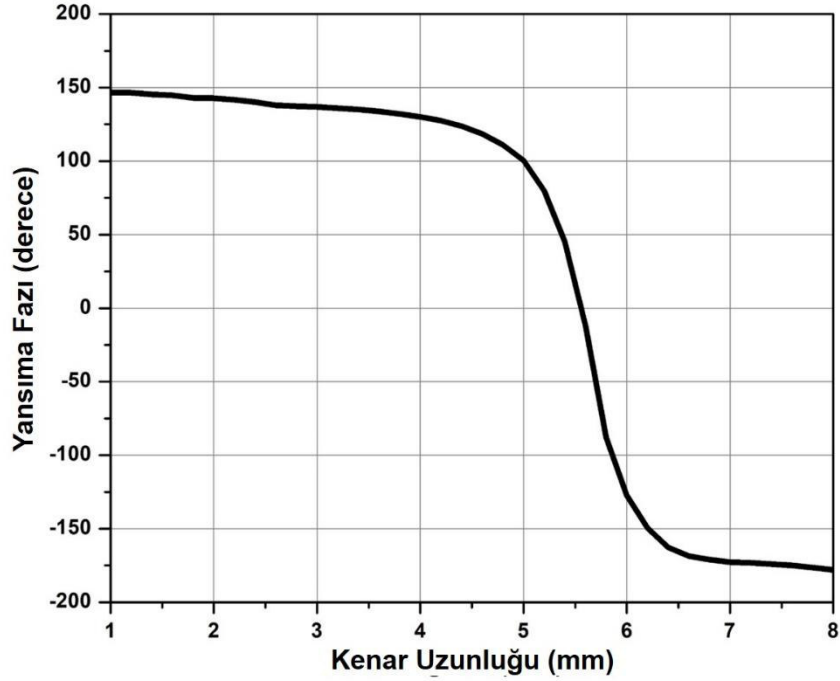
Parametre (Şekil 3.15)	Değer (mm)
altdolgu_w	10
B	1.25*L
Altdolgu_h	0.127
Köpük_h	1.5
Metal_h	0.035

3.2.6.2. Kare çevrim birim hücre elemanının Simülasyon sonuçları

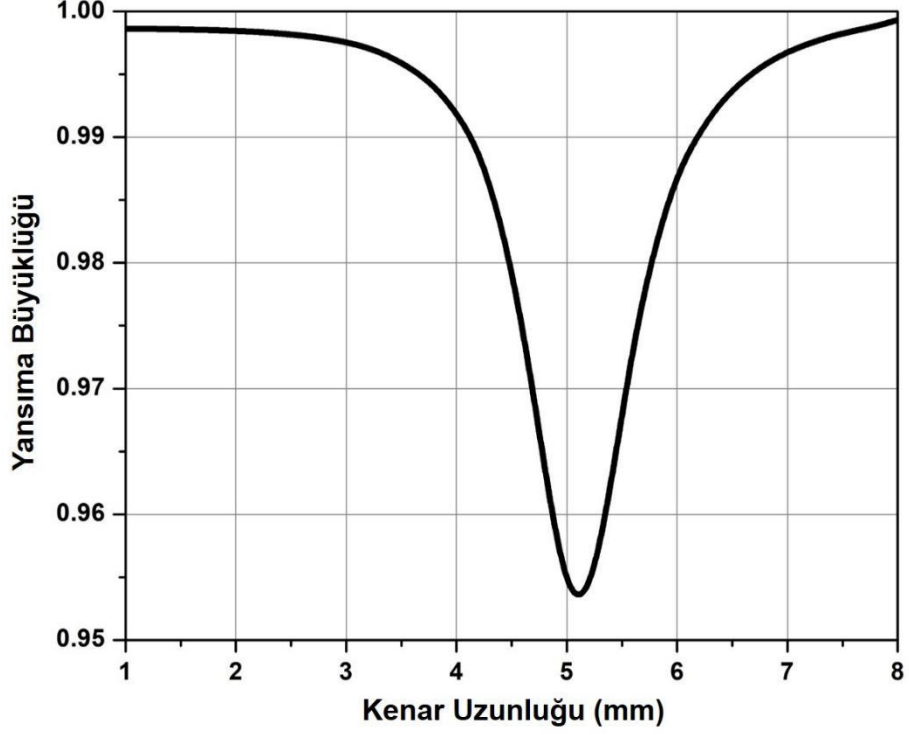
Daha sonra, tasarlanan birim hücre, şekil (3.16) 'de gösterildiği gibi referans olarak kabul edilen üst metal yüzeyden 10 GHz'de $\lambda/2$ 'lik mesafeye yerleştirilen bir Floquet portu kullanılarak uyarılır ve simüle edilir. Kare çevrimin dış uzunluğu 1 mm'den 8 mm'ye değiştirilerek referans düzlemde yansıma katsayısını ölçmeye yönelik simülasyonlar yapıldı. Şekil (3.17), kare çevrim boyutuna göre yansıma katsayısındaki (faz ve büyüklük) değişimi göstermektedir.



Şekil 3.16. Floquet bağlantı noktası kurulumu



(a)

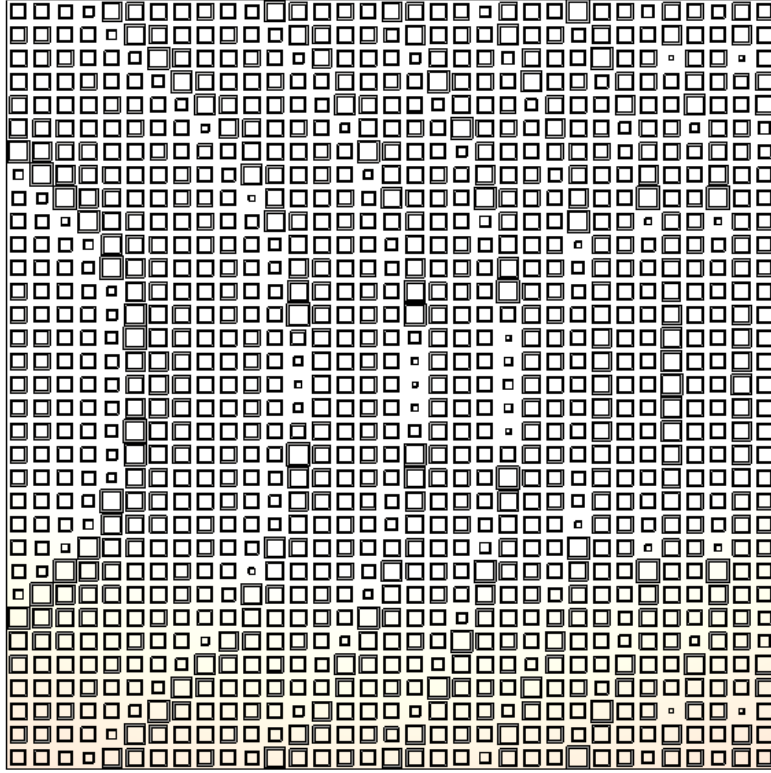


(b)

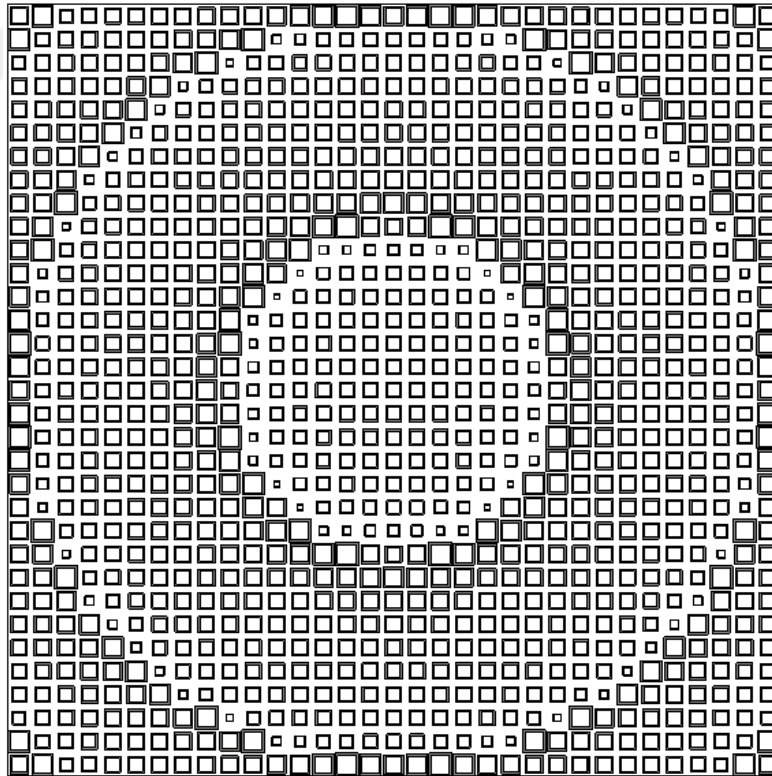
Şekil 3.17. 10 GHz'de kare çevrim birim hücrenin yansıtma katsayısı: a) Faz, b) Büyüklük.

Bu sonuçlar üçgen birim hücreden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, buradaki yansıtma büyüklüğünün birim hücrenin değişen kenar uzunluk değerleri için bire daha yakın ($|Γ| \cong 1$) olduğu görülür.

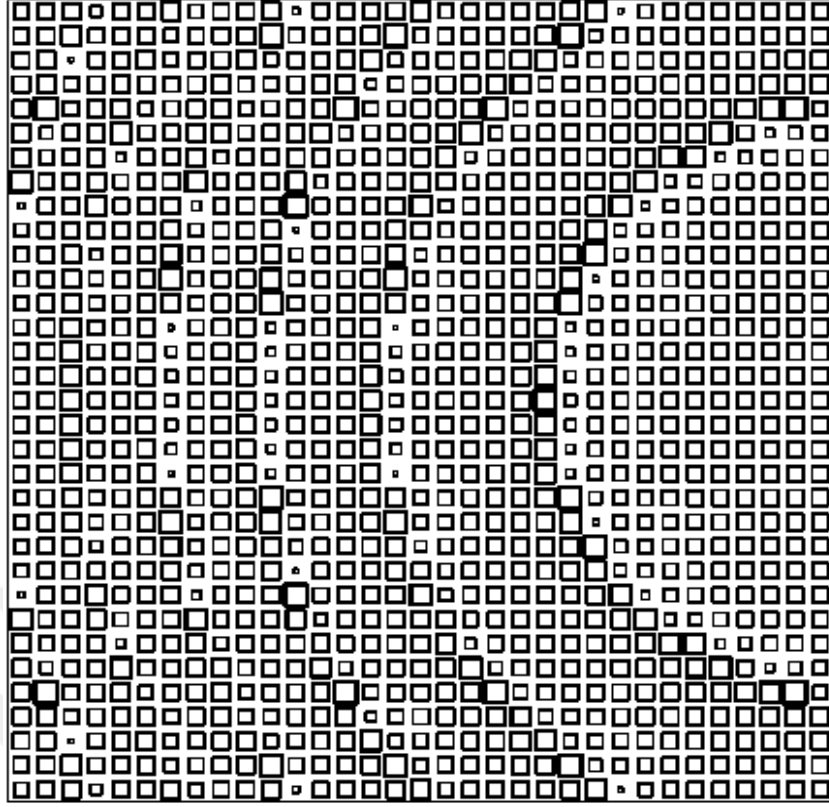
Değişen kenar uzunluğu ile elde edilen yansıtma fazı değişim aralığı yaklaşık 325 derecedir ve bu, yansıtıcı yüzey açıklığında istenen yansıtma fazını telafi etmek ve sağlamak için yeterlidir. Daha sonra, oluşturulan yansıtma fazı ve eleman boyutu veri tablosu, yansıtıcı yüzeye dizilen her bir birim hücrenin gerekli fazını (dolayısı ile boyutunu) hesaplayan MatLab kodu aracılığı ile yansıtıcı yüzeyin tamamını tasarlamak için kullanıldı. Bu yolla MatLab ve CST arasındaki bir arayüz aracılığıyla yansıtıcı yüzeyin tamamı otomatik olarak tasarlanır. Şekil (3.18), gelen sinyali düşey düzlemde $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ yönlerinde ışın olarak yansıtılmak üzere tasarlanmış tam yansıtıcı yüzeylere ait maske katmanlarına ait görsellerin sunmaktadır.



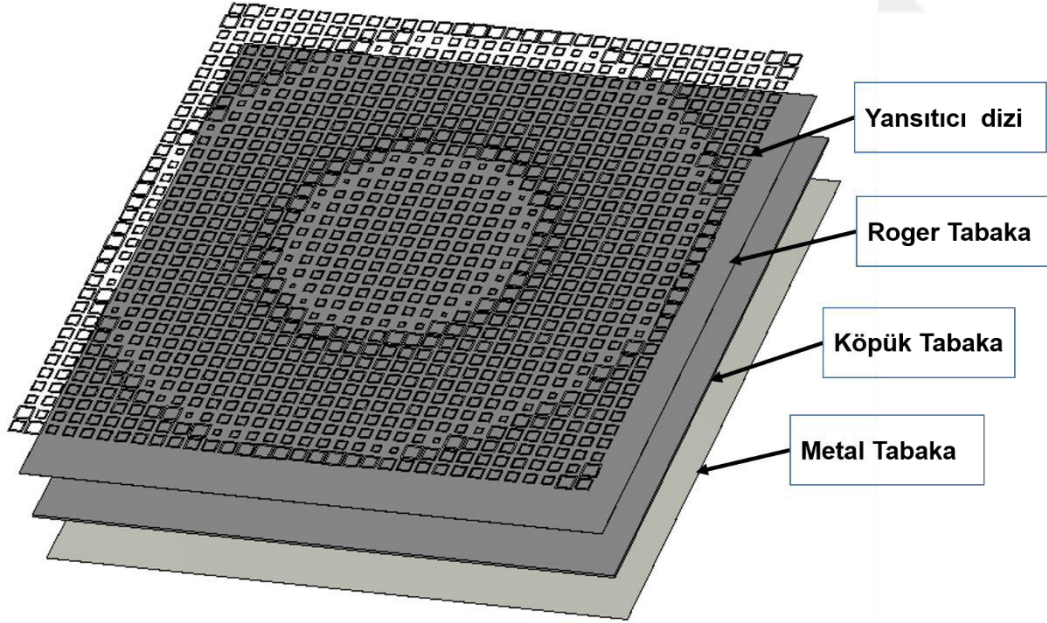
a) -40 derece yansımaya için yansıtıcı dizi maskesi



b) 0 derece yansımaya için yansıtıcı dizi maskesi



c) 30 derece yansıtma için derece için yansıtıcı dizi maskesi



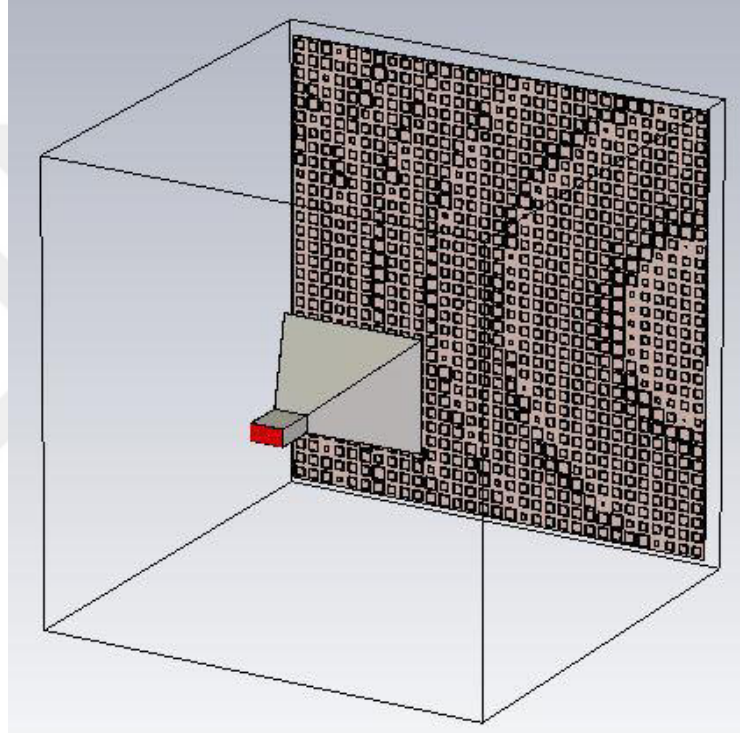
d)

Şekil 3.18. (a), (b), (c) - Farklı doğrultularda yansıtma için tasarlanan yansıtıcı dizi maskeleri, (d)- yansıtıcı dizinin katmanları.

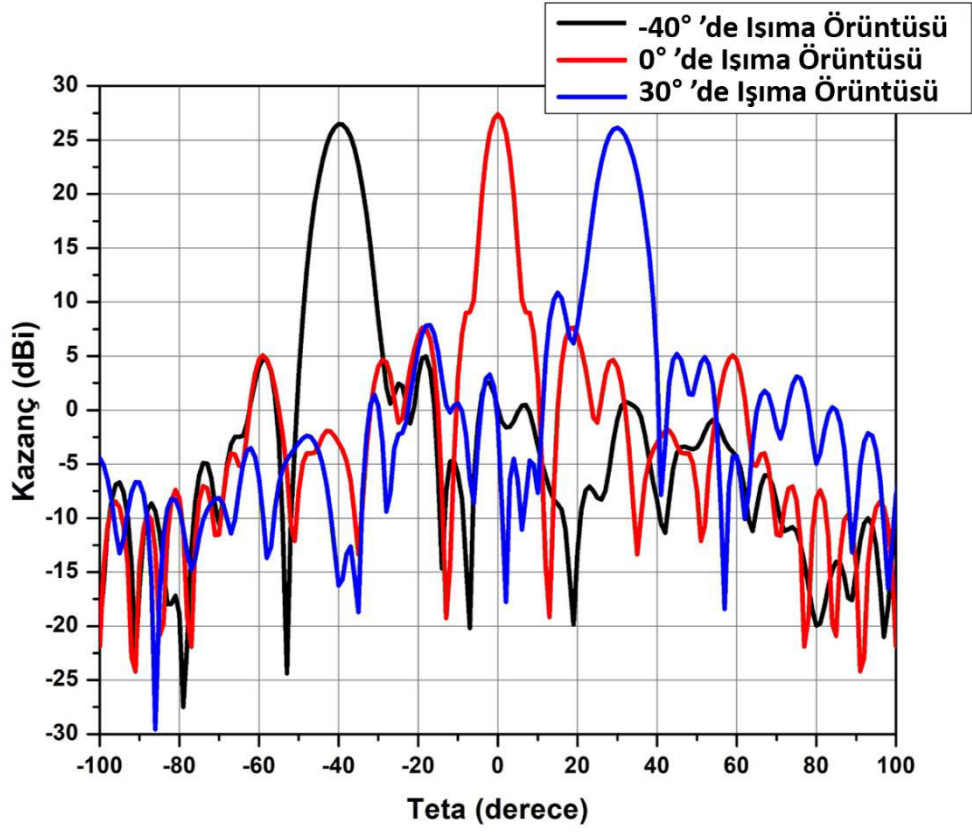
3.2.6.3. Yansıtıcı dizinin uzak alan ışınma analizi

Şekil (3.19), tasarlanan $(10\lambda \times 10\lambda)$ boyutundaki yansıtıcı yüzeyin, $f/D=1$ oranı (f kaynak antenine uzaklık, D yansıtıcı-dizi yüzeyinin boyutu) ile yerleştirildiği CST 'deki simülasyon kurulumunu göstermektedir.

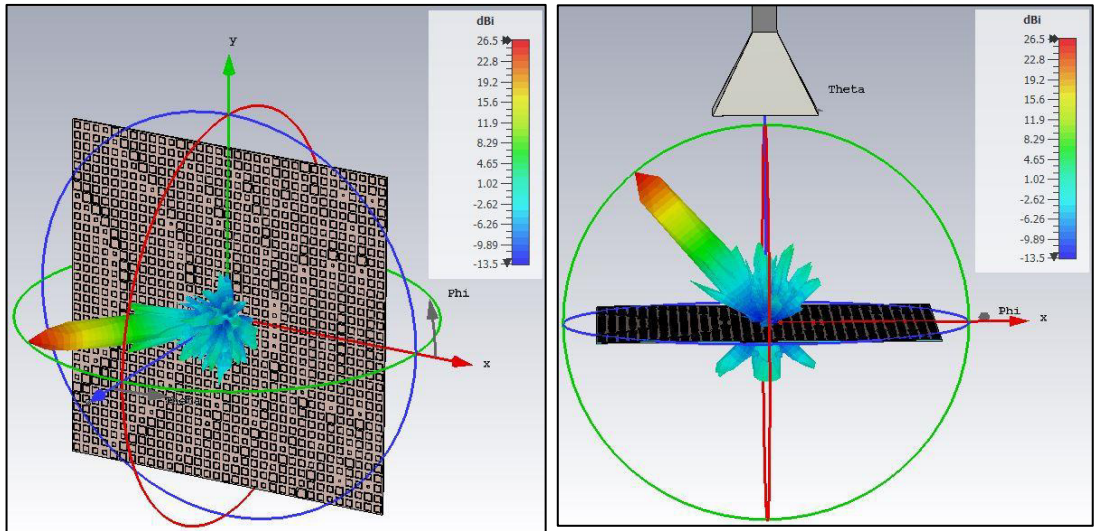
10 GHz için ana ışının düşey düzlemde $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ yönlerinde doğrultulduğu durumlar için simülasyon sonucunda elde edilen 2B ve 3B ışınma örüntüleri Şekil (3.20) ve şekil (3.21)'de gösterilmiştir. Bu üç doğrultuya yönlendirilen ışınların yüksek kazançlı (≥ 26.1 dBi) kalem ışınlar olduğu görülebilir.



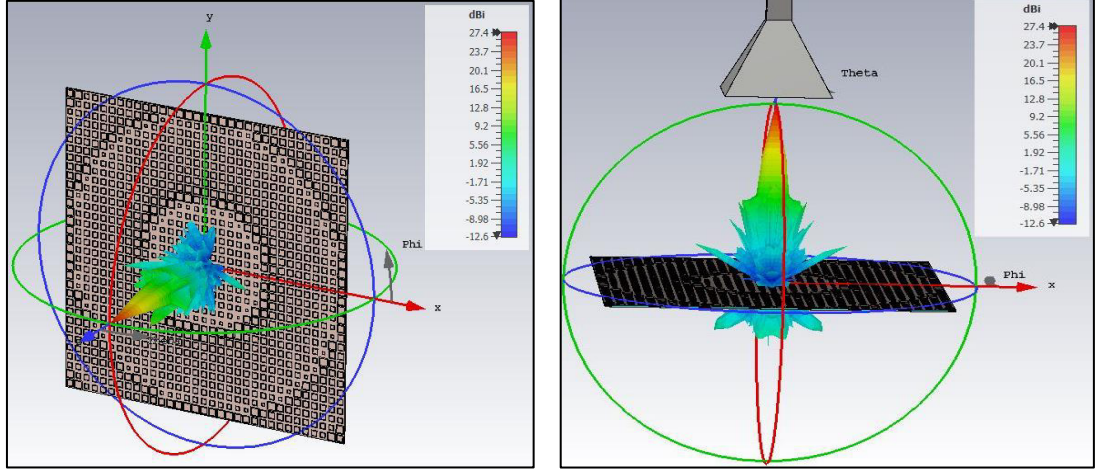
Şekil 3.19 CST ortamında simülasyon kurulumu



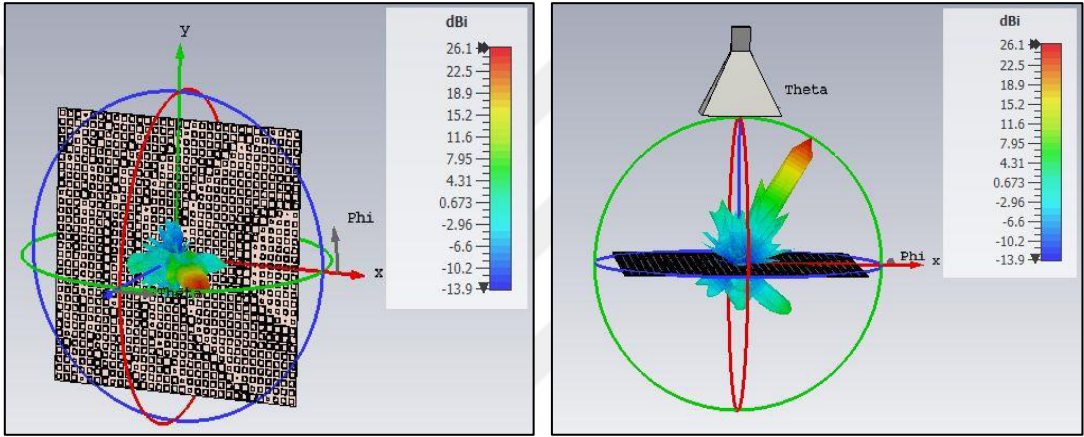
Şekil 3.20. 10 GHz'de $\theta = -40^\circ$, $\theta = 0^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ doğrultma yönleri için simülasyon ile elde edilmiş 2 boyutlu ışınma örüntüleri



a) $\theta = -40^\circ$ yönündeki 3 boyutlu ışınma örüntüsü



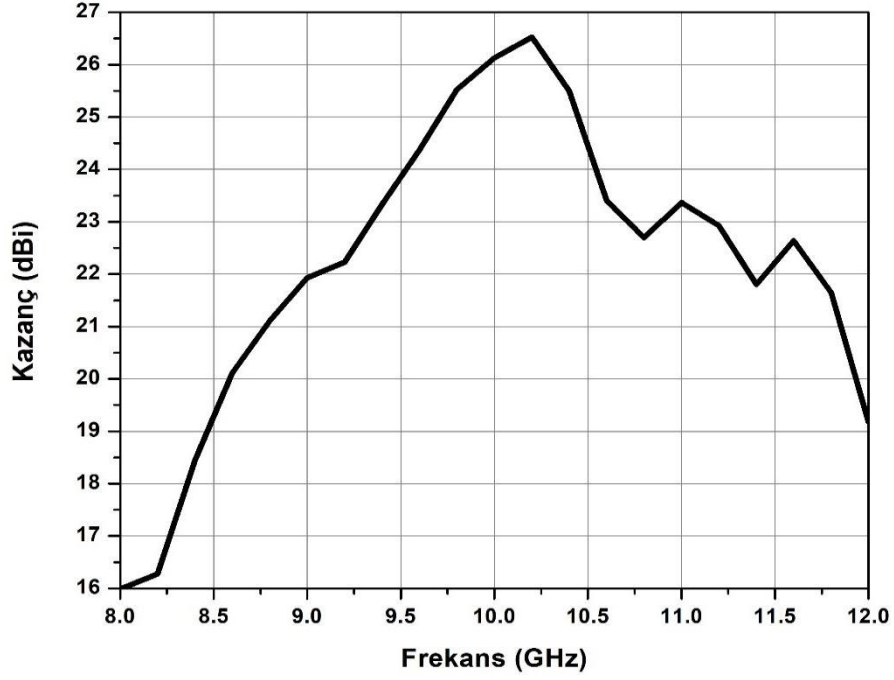
a) $\theta = 0^\circ$ yönündeki 3 boyutlu ışırma örüntüsü



d) $\theta = 30^\circ$ yönündeki 3 boyutlu ışırma örüntüsü

Şekil 3.21. Yansıtıcı dizinin 10 GHz'de simülasyon ile elde edilmiş 3 boyutlu ışırma örüntüleri.

Şekil (3.22)'de yansıtıcı dizi kazancının frekansa bağılı değişimi verilmiştir. Bu dizi için 26.5 dBi olan en yüksek kazancın 10.2 GHz'de olduğu görülebilir; 10 GHz merkez tasarım frekansı için kazanç 26.1 dBi'dir. Şekil (3.22) 'de görüldüğü gibi, yansıma dizisinin 3-dB'lik kazanç bant genişliği (9.5 - 10.7 GHz) yaklaşık % 12, ve 1-dB'lik bant genişliği (9.75 - 10.3 GHz) yaklaşık % 5.5 'dir.


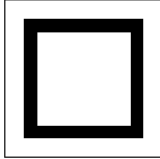

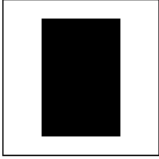


Şekil 3.22. Yansıtıcı yüzey kazancının frekansa göre değişimi

Üçgen yapılı birim hücre ve 3-katmanlı yansıtıcı yüzey sonuçları ile karşılaştırıldığında (Şekil 3.14), bu bölümde kullanılan kare çevrim geometrilili birim hücre ve toprak tabakasına göre yükseltilmiş bir katmanlı yapının daha dar bant genişliği verdiği söylenebilir. Üç katmanlı yapı için 3-dB ve 1-dB'lik kazanç bant genişlikleri yaklaşık olarak sırasıyla %22 ve %10'du; kare çevrim için karşılık gelen bant genişlikleri ise yalnızca %12 ve %5.5'dir. Dolayısı ile tasarlanan iki yapı karşılaştırıldığında, 3-katmanlı yapı ile her iki eşik seviyesi için yaklaşık iki kat daha büyük bant genişliği elde edilmiştir.

Bu çalışmada tasarlanan iki yansıtıcı yüzeyin ve literatürde sunulan diğer yansıtıcı yüzeylerin özelliklerini Tablo 3.4 'da özetlemektedir. Çok katmanlı yapılar (tasarım 1 ve (Encinar et al., 2003)) daha geniş kazanç bant genişlikleri vermiştir. Bu çalışmada önerilen 3-katmanlı, çokgen yama biçimindeki birim eleman yapısı ile %22'lik kazanç bant genişliği elde edilmiştir, ve bunu 12 GHz'de %16 bant genişliği ile 3-katmanlı dikdörtgen yama kullanan yapı (Encinar et al., 2003) izlemektedir. Bant genişliğinde iyileşme için parazit dipollerin kullanıldığı tek katmanlı yapı ile yalnızca %14'lük bir bant genişliği elde edilmiştir (Li et al., 2009).

Tablo 3.4. Tasarlanan yansıtıcı yüzeyler ile literatürde yayınlanan yüzeyler arasında karşılaştırma.

	Tasarım 1	Tasarım 2	(Li et al., 2009)	(Encinar et al., 2003)
Eleman yapısı	çokgen yama	kare çevrim	parazit dipol	dikdörtgen yama
tasarım				
Katman sayısı	3	1	1	3
Merkez Frekansı (GHz)	10	10	2.05	12
Dizi boyutu (λ^2)	10 x 10	10 x 10	4.51 x 2.05	40 x 39.76
Eleman sayısı	1600	1089	55	Uygulanmaz
Kazanç bant genişliği (3-dB)	%22	%12	%14.1	%16

4. AKILLI YANSITICI YÜZEY TASARIMI VE SİMÜLASYONU

4.1. Giriş

Önceki bölümde sunulan yansıma dizisi ile elde edilen ışının yönü sabittir, yüzey üretildikten sonra değiştirilemez. Bu sorunun üstesinden gelmek için, S-bandında (2 – 4 GHz) çalışan ışın yönü ayarlanabilir bir yansıtıcı dizi tasarlandı ve bu bölümde sunuldu. Yeniden yapılandırılabilirliği sağlamak için varaktör ile kapasitif olarak yüklenmiş iki yamadan oluşan birim hücre elemanı kullanıldı. Varaktörlerin geniş kapasitif ayar aralığı ile yeterince geniş yansıma fazı aralığı elde edilebilir.

Yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı dizinin gerçekleştirilmesi, her bir birim hücre elemanı için elektronik olarak kontrol edilebilen yansıtma aşamasını gerektirir. Bölüm 2.6 'da yansıtıcı yüzeylerin her birim hücre elemanında gerekli faz kaymasını elde etmek için ayar elemanları kullanılarak birim hücrelerin yüklenmesi için çeşitli teknikler tanıtılmıştır. Bu tezde varaktör tekniği kullanılmıştır.

4.2. Tasarımın hedefleri

Bu bölüm, yansıtıcı yüzeyin her bir birim hücre elemanına uygulanan gerilimi ayarlayarak diziye ait ışınma örüntüsünü değiştirme yetisi olan, ana ışının farklı doğrultularda yeniden yönlendirebilen bir yansıtıcı yüzey tasarlamayı amaçlamaktadır.

Yüzey, 2.4 GHz merkez frekansı için, mikro şerit teknolojisi ile bir devre kartına basılan, ve duvarlara ve binalara monte edilebilecek biçimde tasarlanacaktır.

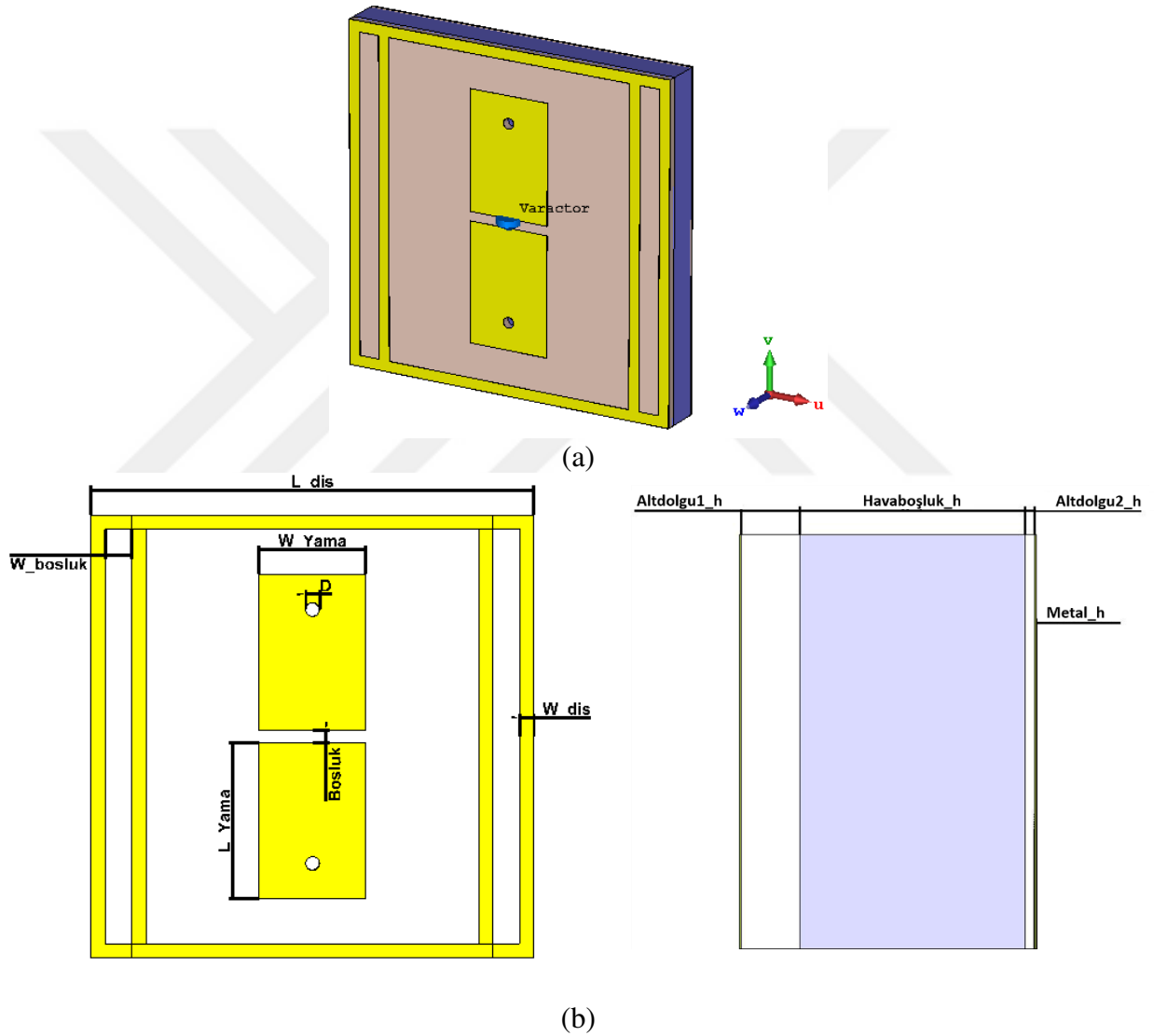
4.3. Birim hücre yapısının tasarımı

Şekil (4.1-a), yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey birim hücresinin yapısını göstermektedir. Birim hücre, hava boşluğu ile ayrılmış ve metal bir zemin düzlemi ile desteklenen iki alt dolgu tabakasından oluşur. Kare halka ile çevrili iki dikdörtgen yama, dielektrik alt dolgu (substrate) katmanının üstüne basılır.

Gerekli faz ayarını sağlamak ve ayarlarda en iyi başarıyı elde etmek için iki yamanın ortasına bir varaktör yerleştirilmiştir. Birim hücreyi çevreleyen kare çevrimin kenar uzunluğu $L_{dış} = 62.5$ mm olarak seçildi; bu uzunluk 2.4 GHz frekansında $\lambda/2$ 'ye karşılık gelir. Dikdörtgen yamalar, bağıl geçirgenliği $\epsilon_r = 2.2$ ve kayıp tanjantı ($\tan \delta$) 0.0009 ve kalınlığı 1.575 mm olan Rogers Duroid 5880 altdolgu (substrate) üzerine basılır; öngerilim devresi ise altta kalınlığı 0,254 mm olan Rogers Duroid 5880

üzerine basılır. Pratik bir varaktör tipi olarak, SKYWORKS'ten (*DATASHEET SMV1405*) bir SMV1405 modeli düşünülmektedir. Bu özel varaktör, 30V ila 0V arasında değişen bir ön gerilim voltajı için 0.63 pF ila 2.67 pF aralığında ayarlanabilen sığa (kapasite) değeri sağlar. Varaktörlerin sığası ön gerilim ile değiştirilir ve her bir birim hücrenin yansıtma fazı ayrı ayrı elektronik olarak ayarlanabilir, ve böylece yansıtıcı dizinin yansıtma yönü elektronik olarak yeniden yapılandırılır.

Birim hücrenin yapısı ve boyutları sırasıyla şekil (2-b) ve tablo (4.1)'de verilmiştir.

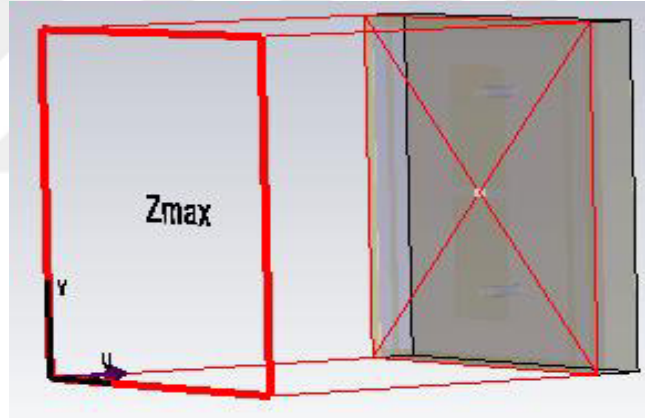


Şekil 4.1. Önerilen yeniden yapılandırılabilir birim hücre a) Birim hücrenin geometrisi; b) birim hücrenin üstten görünümü (sol) ve yandan görünümü (sağ).

Tablo 4.1. Birim hücrenin boyutları.

Parametre (Şekil 4.1)	Değer (mm)
L_dış	62.5
W_boşluk	3.77
W_dış	2
W_yama	15
L_yama	22
Boşluk	1.7
D	2
havaboşluk_h	6
altdolgu1_h	1.575
altdolgu2_h	0.254
Metal_h	0.035

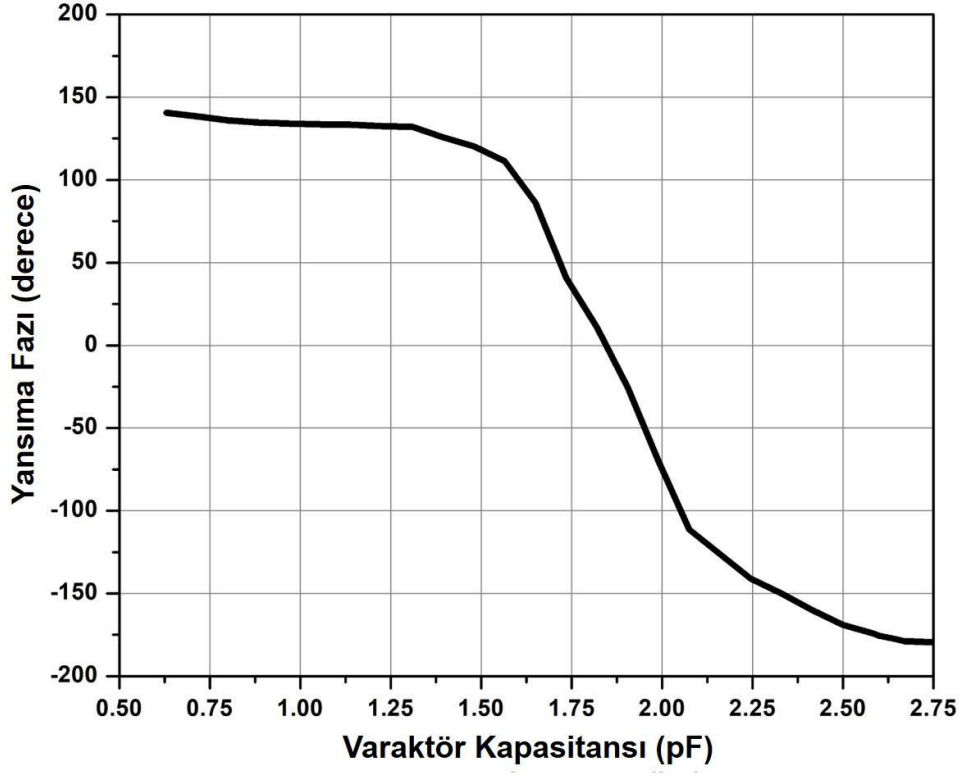
Yeniden yapılandırılabilir birim hücre, 2,4 GHz için CST’de sonsuz bir dizi ortamında Floquet analizi kullanılarak modellenmiştir. Floquet ucu, şekil (4.2) 'de gösterildiği gibi birim hücrenin üst yüzeyinden $\lambda/2$ uzağa yerleştirilir.



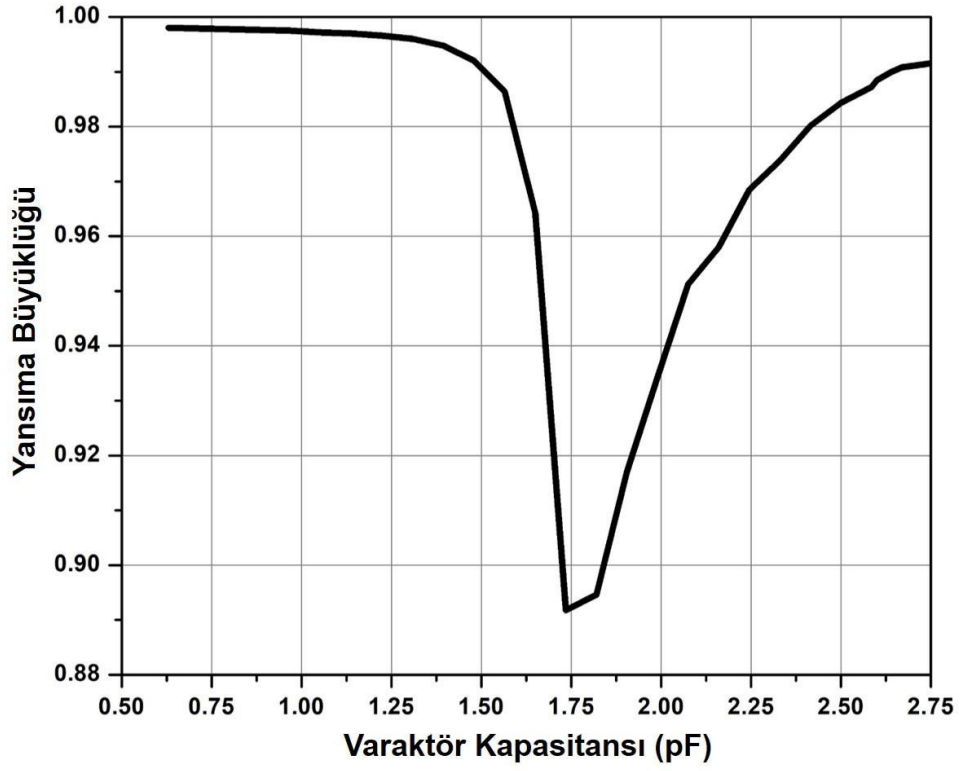
Şekil 4.2. Floquet bağlantı noktası $\lambda/2$ mesafesine yerleştirilir

4.4. Birim hücre yansımaya özellikleri

Bu bölüm, yeniden yapılandırılabilir birim hücre simülasyonundan yansımaya özelliklerine ilişkin sonuçları sunar. Yansımaya katsayısı, 2,4 GHz çalışma frekansında elde edildi. Varaktörün 0.63 pF ila 2.67 pF kapasitans aralığı için birim hücrenin yansımaya katsayısı şekil (4.3) 'de (faz ve genlik) sunulmuştur. Yansımaya fazı ayar aralığı, şekil (4.3-a) 'da gösterildiği gibi 320° civarındadır, ve bu genişlikte bir aralık çoğu yansıtıcı yüzey uygulaması için yeterlidir.



(a)

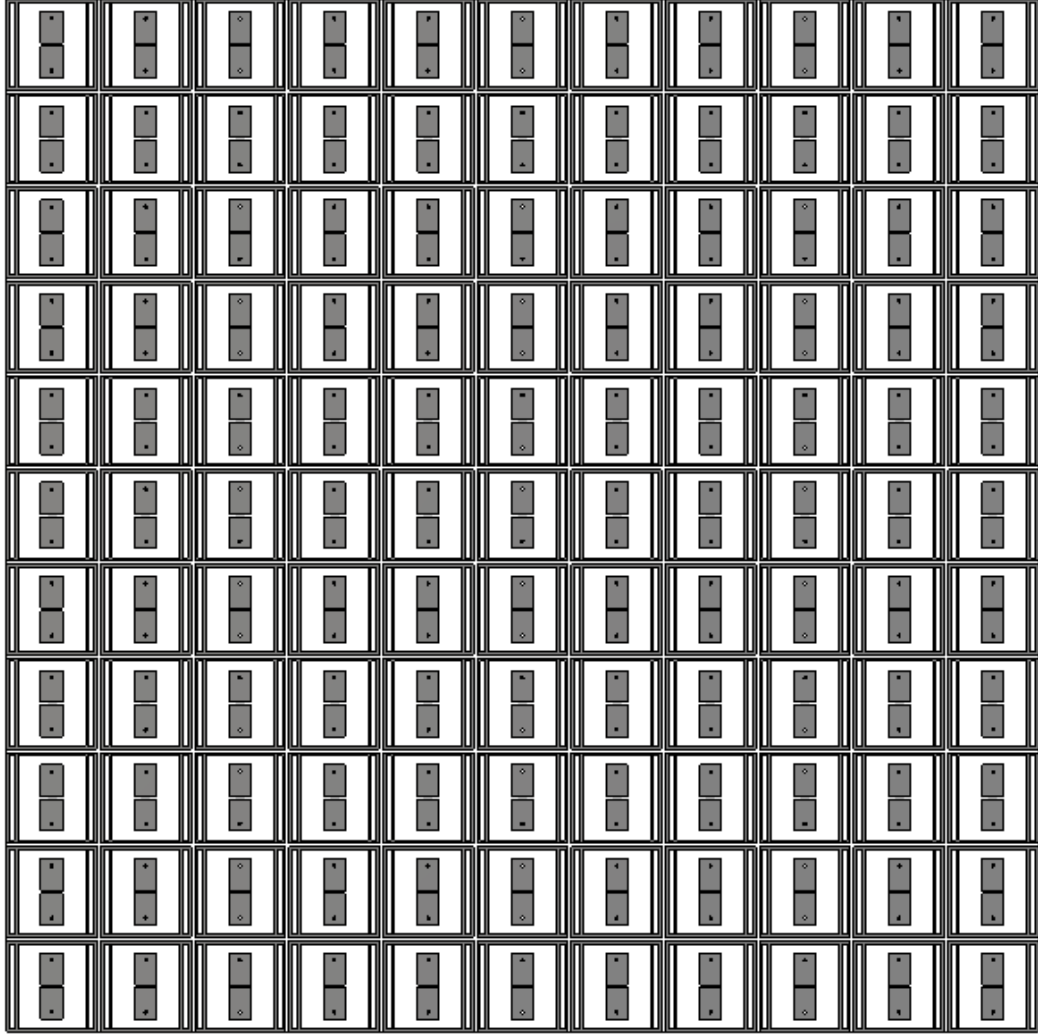


(b)

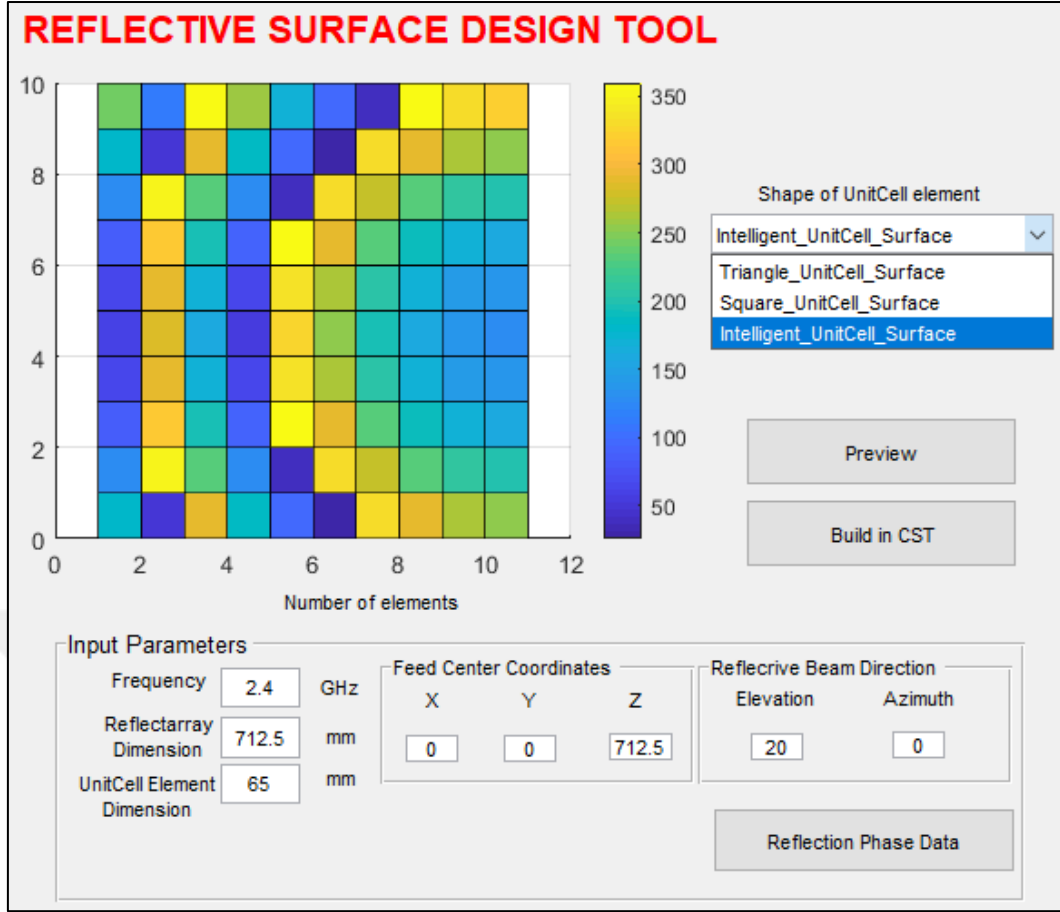
Şekil 4.3. Birim hücrenin yansıma katsayısı; a) Faz b) Büyüklük

4.5. Tam yansıtıcı yüzey tasarımı

Önerilen yeniden yapılandırılabilir birim hücre elemanının etkinliğini göstermek için 11 x 11 yansıtıcı dizi yüzeyi tasarlanmıştır. Komşu birim hücreler arası (birim hücreleri çevreleyen kare çevrimler arası) boşluk 2,4 GHz çalışma frekansında $0.02 \lambda_0$ ya ayarlandı. Tasarlanan 11 x 11 yeniden yapılandırılabilir reflektör yüzeyi Şekil (4.4)'de gösterilmektedir. Ana ışını belirli bir doğrultuya yönlendirmek için her bir birim eleman konumu için gerekli faz kayması dağılımını denklem (2.10) MatLab ile hesaplandı. Yüzey açıklığına dizilen elemanlar için hesaplanan faz dağılımı Şekil (4.5)'de gösterilmiştir. Bu faz dağılım bilgisi ve Şekil (4.3-a)'da verilen kapasitansa bağlı faz kayma verileri ile birlikte kullanıldı; yüzey açıklığındaki her bir birim hücreye ait varaktör kapasitansı bu elemanın yüzeydeki konumuna göre gerekli yansıma fazını verecek şekilde ayarlandı.



Şekil 4.4. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir yüzeyin maskesi

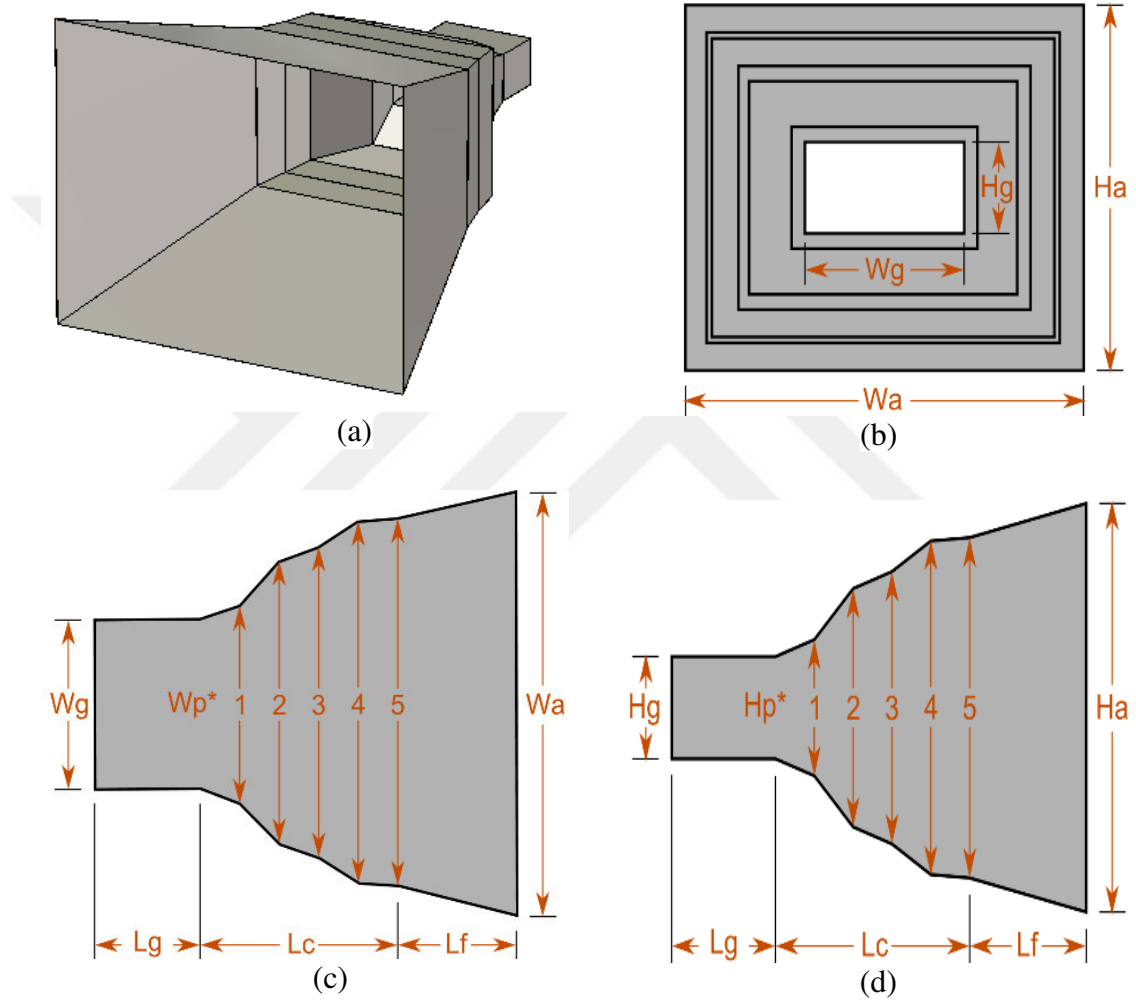


Şekil 4.5. Yansıtıcı yüzey tasarımında kullanılan parametre değerleri

4.6. Kaynak antenin tasarımı ve simülasyonu

Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey açıklığına sinyal göndermek için bir boynuz anten kullanıldı; bu anten kaynak ya da besleme anteni olarak bilinir. Bu bölümde, besleme antenin model tasarımı ve simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Besleme anteni, seçilen bir anten modeli için istenilen ışım özelliklerini sağlayacak şekilde tasarlanabilir. 2.4 GHz'de istenilen ışım özelliklerini ve kazancı sağlayan boynuz anten tasarımı için Antenna Magus Environment ("Antenna MAGUS," ANTENNA DESIGN SOFTWARE TOOL, 2020) kullanıldı. Akıllı yansıtıcı yüzey için seçilen frekans 2,4 GHz için sıradan boynuz anten modeli seçildiğinde anten boyutları (hem açıklık hem de yandan uzunluk) çok büyük oluyordu. O nedenle çalışma frekansında istenilen kazancı verecek daha küçük boyutta anten elde etmek için Antenna Magus ortamında hazır bulunan ve birden fazla genişleme aşaması içeren anten modeli seçildi. Tasarlanan antenin modeli ve boyutları sırasıyla Şekil (4.6) ve Tablo (4.2)'de gösterilmektedir. Daha sonra tasarlanan boynuz antenin, çalışma frekansındaki ışım özelliklerini test etmek için CST Mikrodalga Stüdyo ortamında

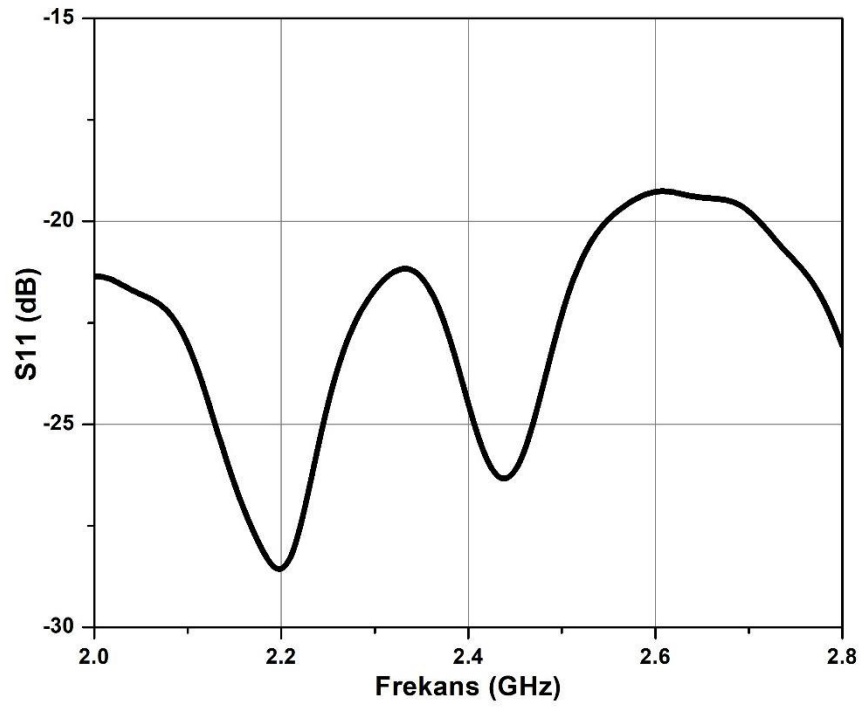
simüle edildi. Simüle edilen boynuz antenin geri yansımaya ilişkin S_{11} parametresi şekil (4.7) 'de gösterilmektedir. Anten 2.4 GHz'de çok düşük bir geri yansıma verir; bu çalışma frekansında girişine gelen gücün çoğunun antenden yayılacağı demektir, ve istenilen bir durumdur. 2B ve 3B ışınma örüntüleri şekil (4.8)'de sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarından boynuz antenin 16.8 dBi'lik tepe kazanç ile yönlendirilmiş ana ışını olduğu görülebilir, ki bu yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeyi beslemek için yeterli ve uygundur.



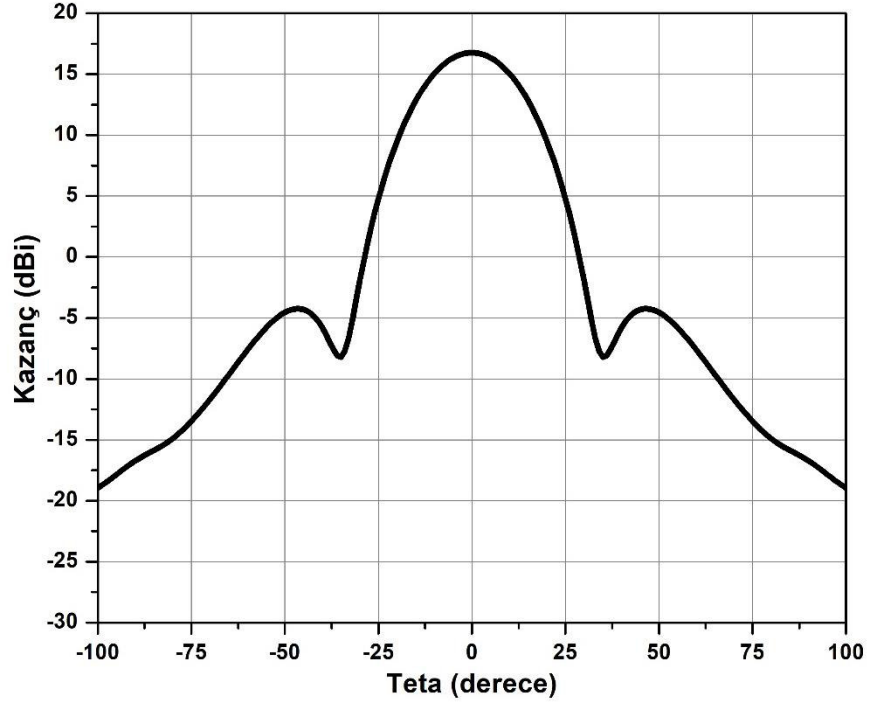
Şekil 4.6. 10 GHz için tasarlanan boynuz antenin geometrisi; a) Antenin yapısı; b) Son görünümü; c) Üstten görünüm; d) Yandan görünüm.

Tablo 4.2. Boynuz antenin boyutları.

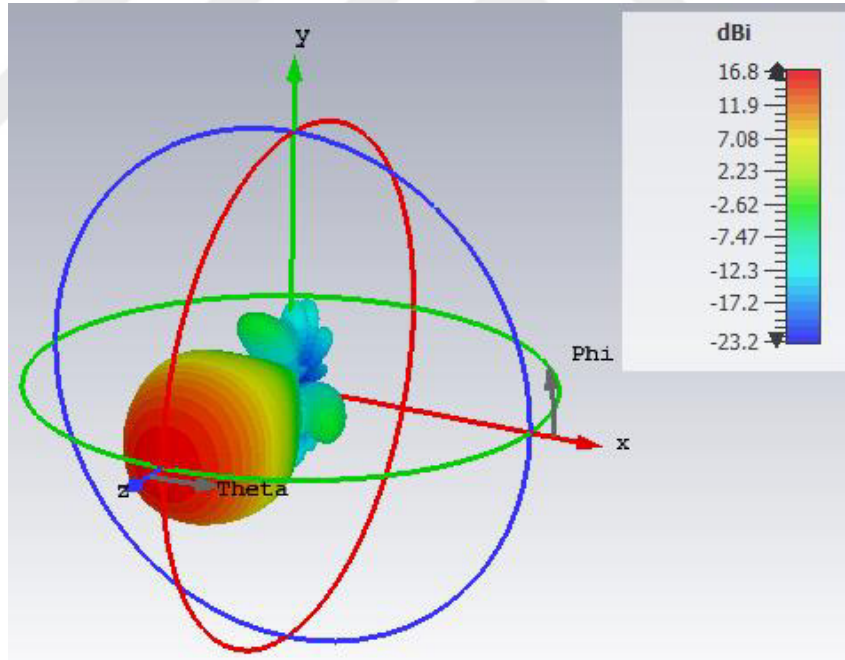
Parametre (Şekil 4.6)	Değer (mm)
W_g	109.22
W_a	309.32
W_{p1}	110.42
W_{p2}	119.91
W_{p3}	207.45
W_{p4}	222.84
W_{p5}	232.33
H_g	54.61
H_a	251.48
H_{p1}	68.95
H_{p2}	122.91
H_{p3}	149.64
H_{p4}	152.64
H_{p5}	162.88
L_g	62.45
L_c	207.35
L_f	77.29



Şekil 4.7. Boynuz antenin S11'i



(a)



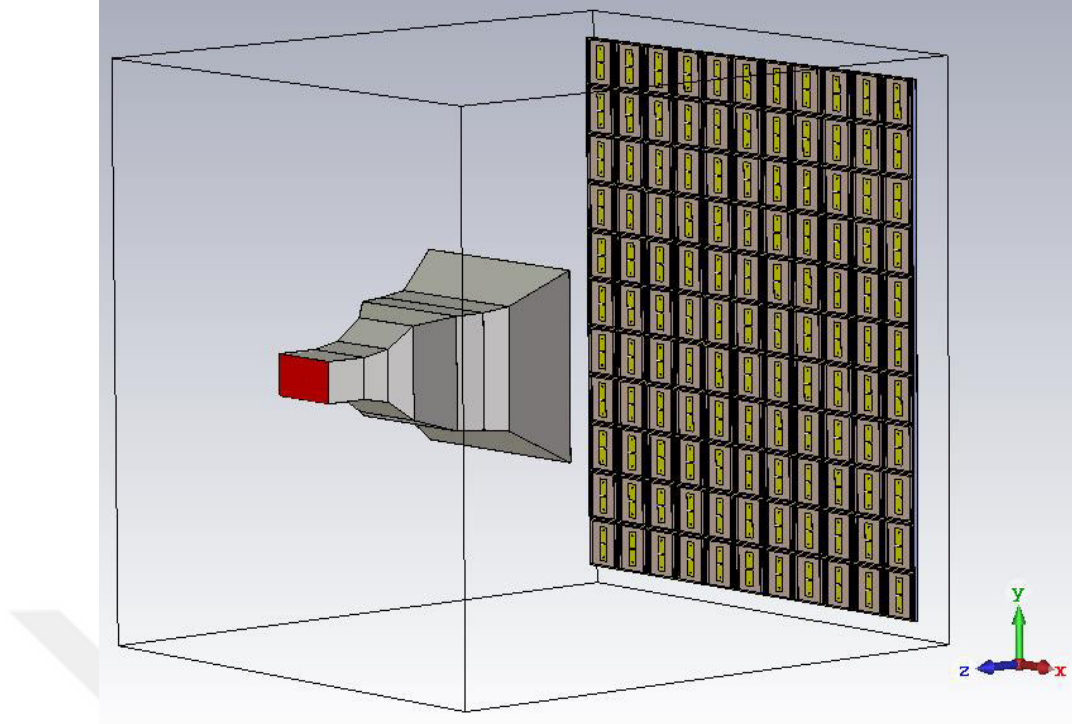
(b)

Şekil 4.8. a) 2 boyutlu ve b) 3 boyutlu ışınma örüntüsü

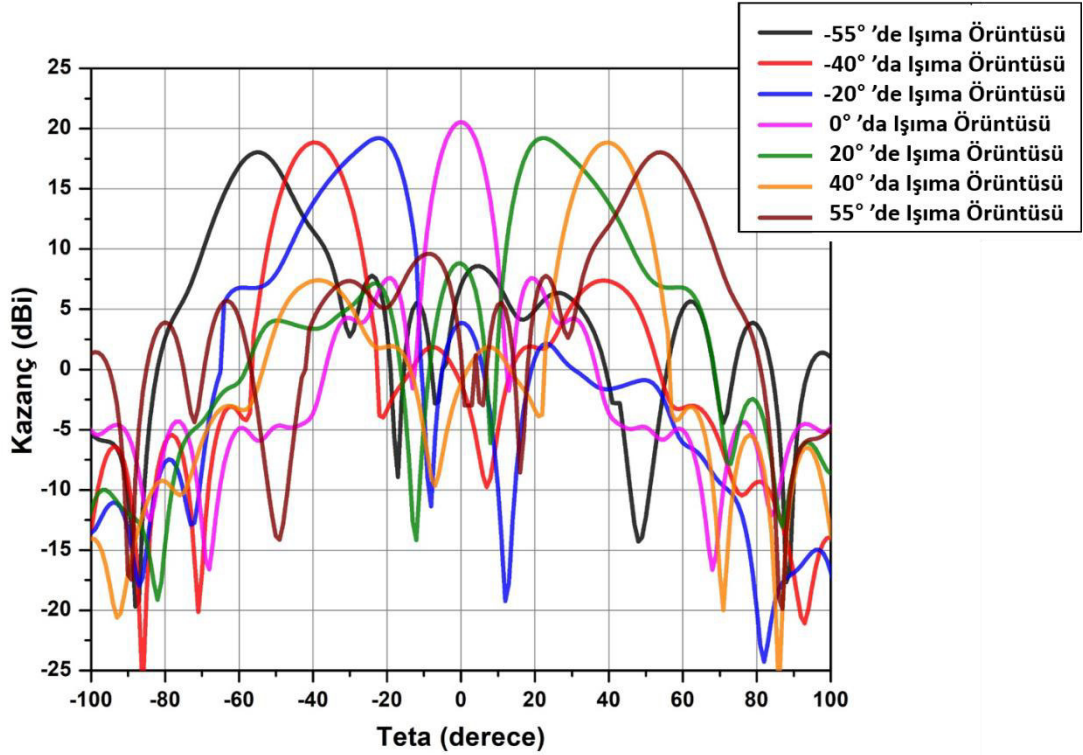
4.7. Akıllı yansıtıcı yüzeyin Uzak Alan ışın analizi

2.4 GHz çalışma frekansında $0.02 \lambda \times 0.02 \lambda$ eleman aralığı ile 11×11 yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey tasarlandı. Daha sonra CST ortamında yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeye ilişkin ölçümler yapıldı. Bunun için bir önceki bölümde (Bölüm 4.6) tasarlanan boynuz anten uygun bir f / D oranı ile belirlenen bir mesafeye yerleştirildi, ve yansıtıcı yüzeye sinyal gönderen kaynak anten olarak kullanıldı. CST'deki simülasyon kurulumu Şekil 4.9'da gösterilmiştir. CST yazılımı, ışın ortamı sınır koşullarının besleme anteni ve yansıtıcı yüzey için ayrı ayarlanmasına izin vermektedir. Bu sayede tasarlanan yüzeyin yankısız oda ölçümlerinin benzetimi CST ortamında yapılabilmektedir.

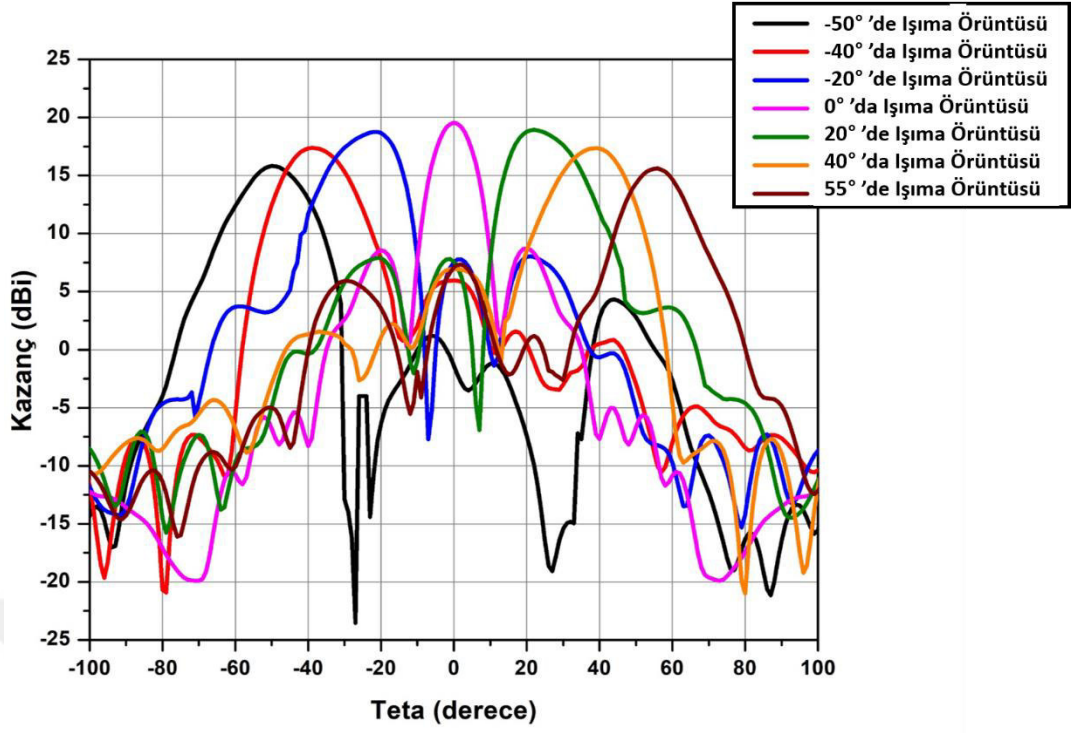
Şekil (4.10) (a)-(b), yüzeyin farklı yansıtma yönleri için sırasıyla $\varnothing=0^\circ$ ve $\varnothing=30^\circ$ düzlemlerinde farklı teta açıları $\theta \in \{0, \mp 20, \mp 50, \mp 55\}$ için 2B ışın örüntülerini göstermektedir. Şekil 4.10-a'dan, yüzeyin, $\varnothing=0^\circ$ düzleminde $\theta = -55^\circ$ ile $\theta = +55^\circ$ açıları arasında sırasıyla 2.51 ve 2.58 dB'ye varan kayıp ile ışın dönüşü (taraması) yapabildiği görülür. $\varnothing=30^\circ$ düzleminde teta yönünde -50° ile $+55^\circ$ arasında ışın dönüş aralığı için sırasıyla 3.75 ve 3.94 dB'ye varan tarama kayıpları verdiği görülür (Şekil 4.10-b); bu kayıplar $\varnothing=0^\circ$ düzleminde aynı tarama aralığı için elde edilen kayıplara göre fazladır. Fazla kaybın nedeni ışın dönüşünün iki boyutlu düzlem yerine üç-boyutlu uzayda yapılıyor olmasıdır; açık ifade ile $\varphi = 0^\circ$ yerine $\varphi = 30^\circ$ kullanımının getirdiği ek kayıplar vardır. Şekil (4.11), farklı dönüş açılarında yüzeyin 3 boyutlu ışın örüntülerini göstermektedir; bu şekilden de görüleceği gibi tasarlanan yansıtıcı yüzey ile gelen sinyal yüksek kazançlı bir ışın olarak istenen yönlere yansıtılabilir. Gelen ışındaki güç, yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey tarafından 20.54 dBi tepe kazanç ile yeniden yansıtılmaktadır.



Şekil 4.9. CST'de simülasyon kurulumu

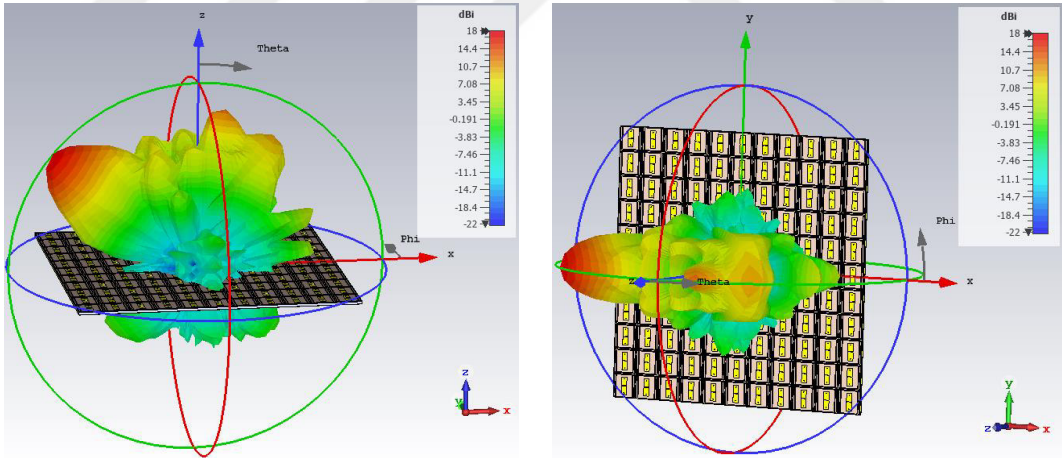


a) İki boyutlu ışıma örüntüleri (hepsi için phi = 0)

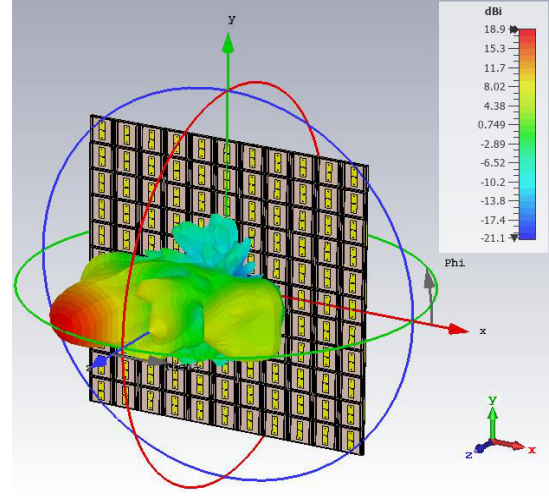
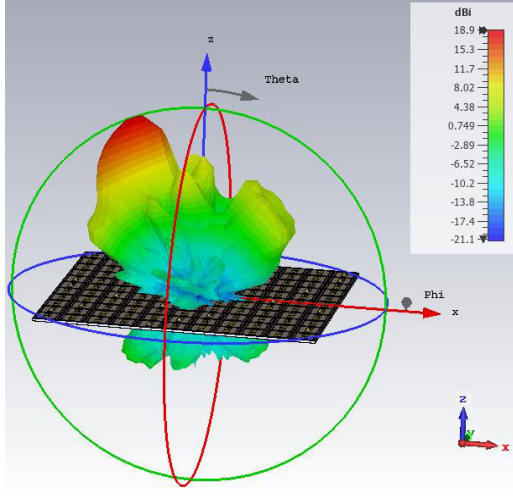


b) İki boyutlu ışınma örüntüleri (hepsi için phi = 30 derece)

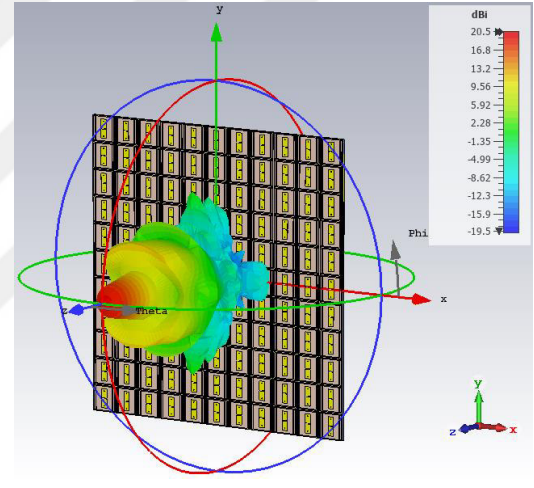
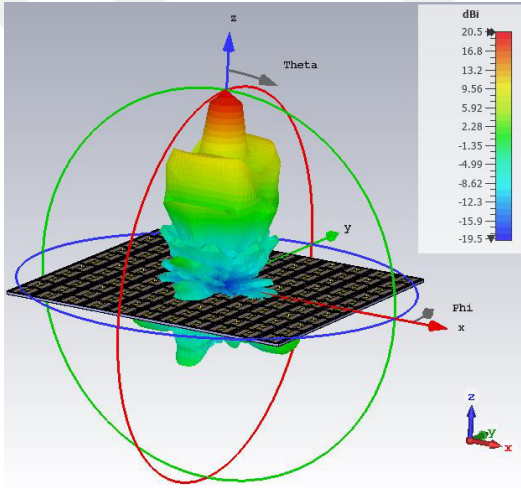
Şekil 4.10. 2.4 GHz'de 2 boyutlu ışınma örüntüleri



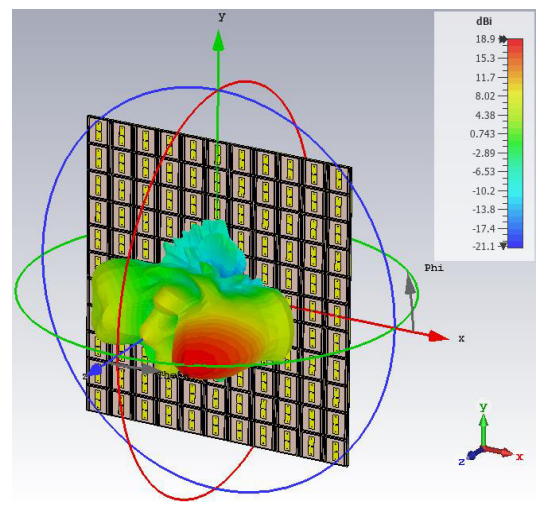
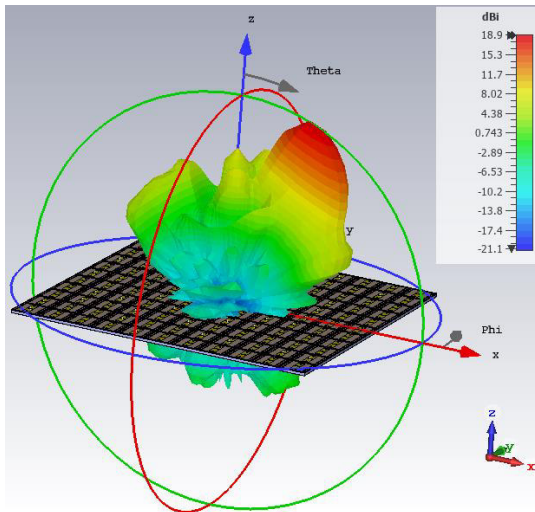
a) $\Theta=0^\circ$ düzleminde $\theta=-55^\circ$ için 3 boyutlu ışınma örüntüsü



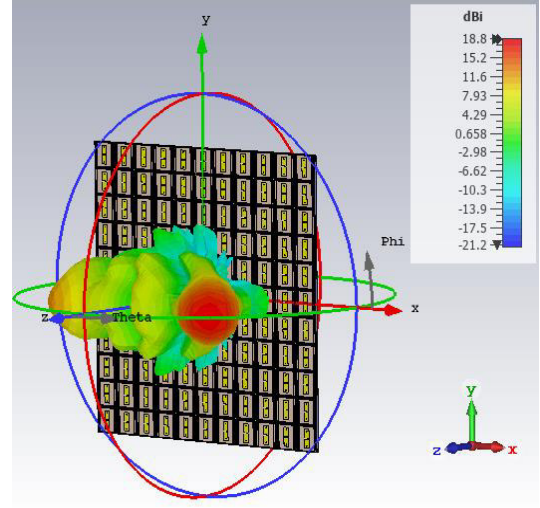
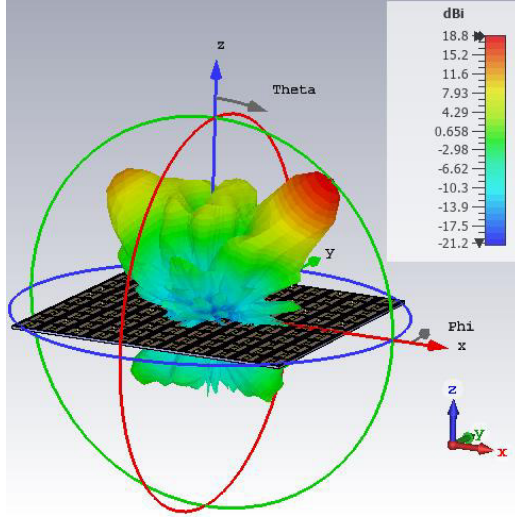
b) $\phi=0^\circ$ düzleminde $\theta = -20^\circ$ için 3 boyutlu ışınma örüntüsü



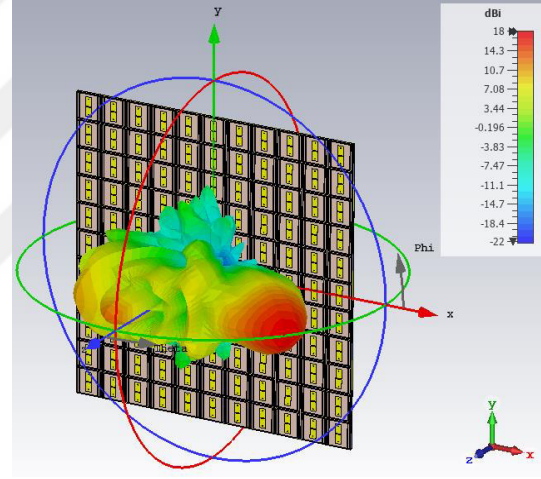
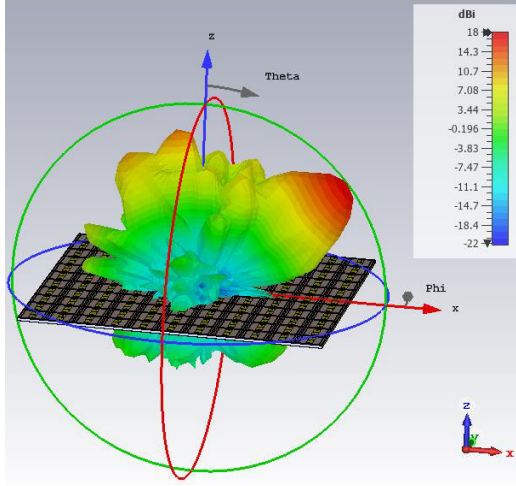
c) $\phi=0^\circ$ düzleminde $\theta = 0^\circ$ için 3 boyutlu ışınma örüntüsü



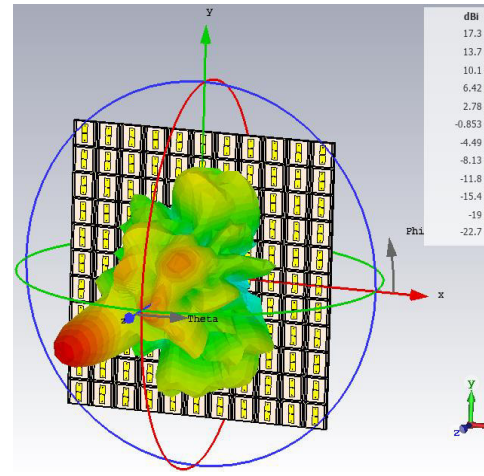
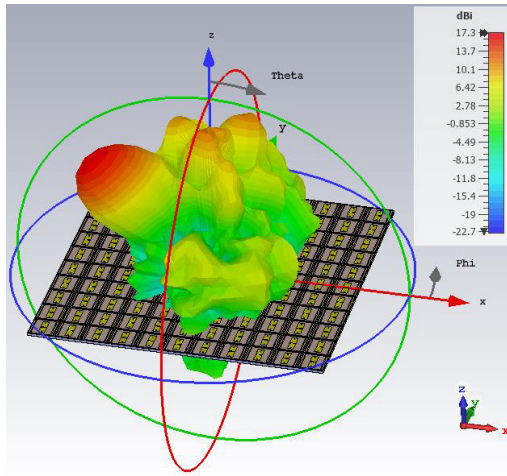
d) $\phi=0^\circ$ düzleminde $\theta = 20^\circ$ için 3 boyutlu ışınma örüntüsü



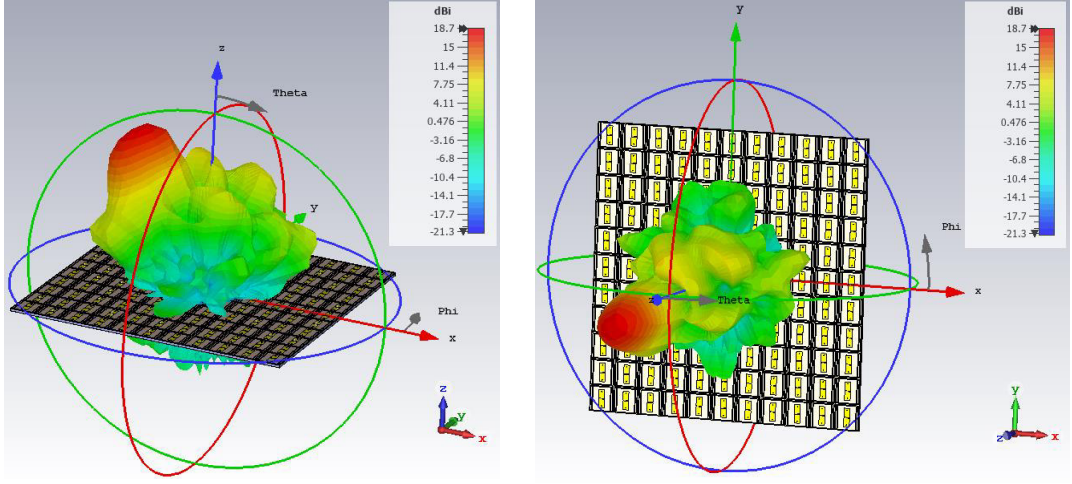
e) $\phi=0^\circ$ düzleminde $\theta =40^\circ$ için 3 boyutlu ışırma örüntüsü



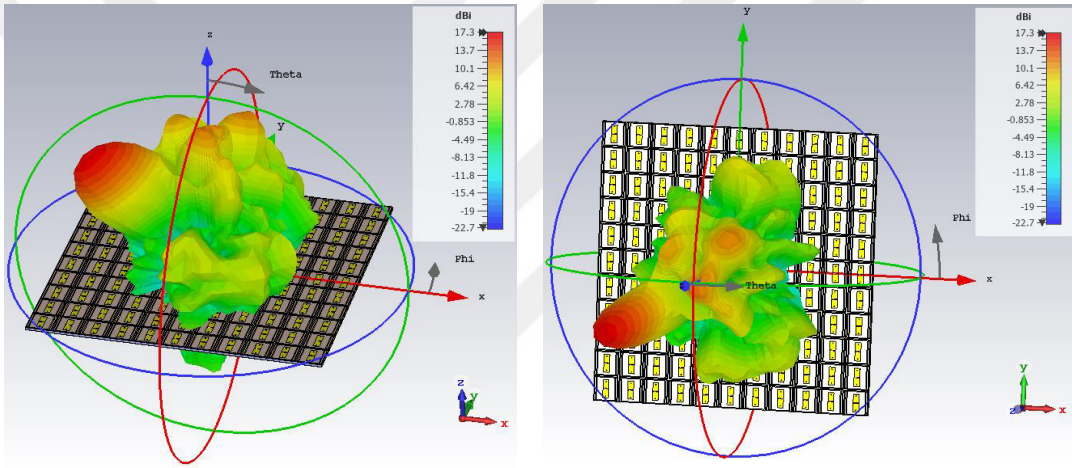
f) $\phi=0^\circ$ düzleminde $\theta =55^\circ$ için 3 boyutlu ışırma örüntüsü



g) $\phi=30^\circ$ düzleminde $\theta =-40^\circ$ için 3 boyutlu ışırma örüntüsü



h) $\Theta=30^\circ$ düzleminde $\theta = -20^\circ$ için 3 boyutlu ışınma örüntüsü

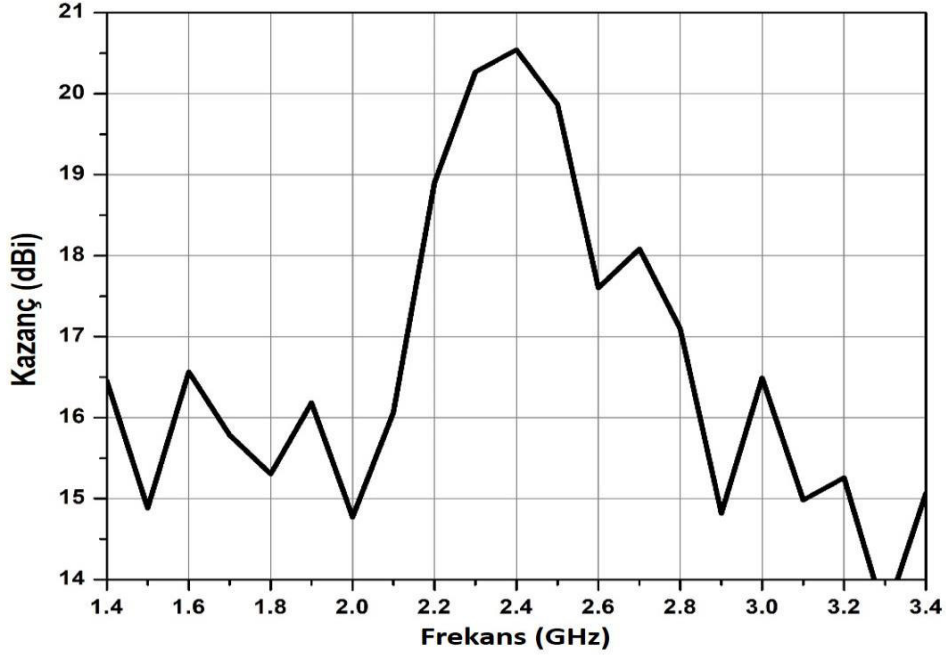


i) $\Theta=30^\circ$ düzleminde $\theta = -40^\circ$ için 3 boyutlu ışınma örüntüsü

Şekil 4.11. 2.4 GHz'de 3 boyutlu ışınma örüntüleri

4.8. Yeniden Yapılandırılabilir Yansıtıcı Yüzeyin Bant Genişliği

Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizi yüzey kazancının, frekansa bağlı değişimi şekil (4.12) 'de gösterilmektedir. Tepe kazanç değeri 20.54 dB'dir, ve 2.4 GHz merkez frekansta elde edilmiştir. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizisi yüzeyinin 1-dB kazanç bant genişliği (2.3-2.5 GHz) yaklaşık %8.33 iken, 3-dB kazanç bant genişliği (2.1-2.7 GHz) yaklaşık %25'tir.

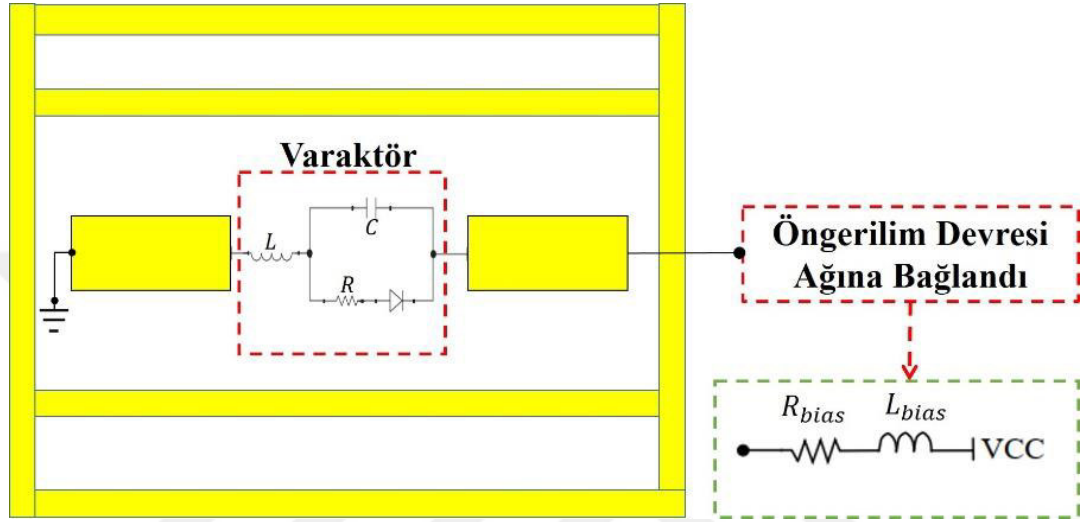


Şekil 4.12. Yansıtıcı dizi kazancının frekansa bağlı değişimi

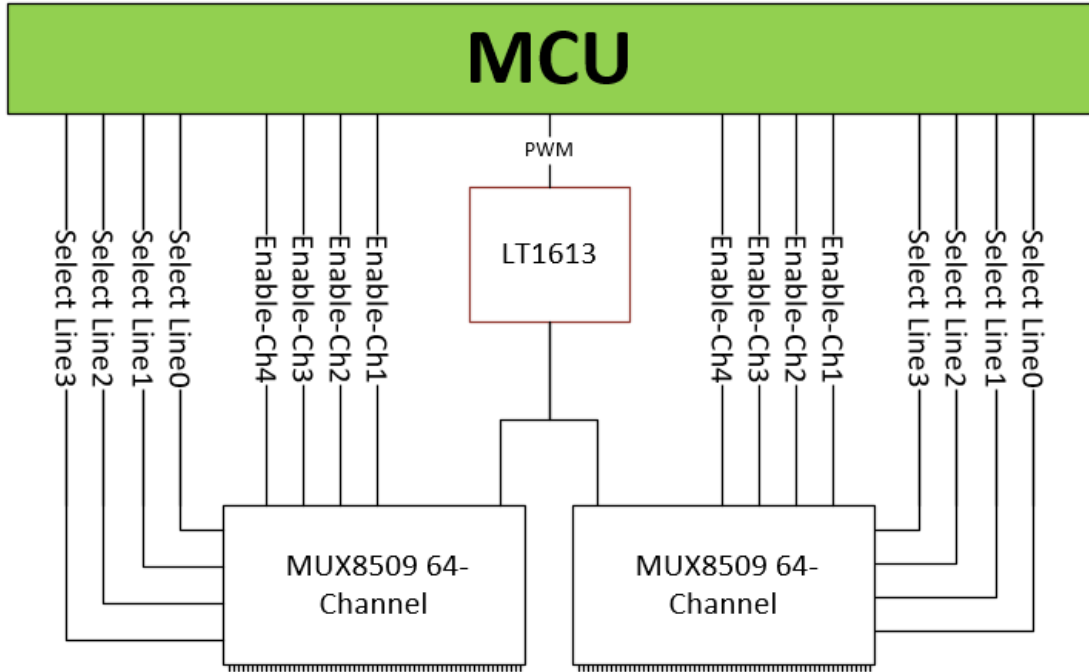
4.9. Öngerilim Devresi

Şekil (4.13) 'de gösterildiği gibi, iki mikro şerit yaması arasında bir varaktör yerleştirildi, ve terminalleri boyunca uygulanan voltajı kontrol ederek yeniden yapılandırılabilirlik sağlandı. Varaktör terminallerine uygulanan gerilim değiştirilerek kapasitansı değiştirmek için bir ön gerilim devresi aracılığıyla gerilim kaynağına bağlandı. Öngerilim devresi DC besleme direncinden (R_{bias}), ve DC voltajını AC devresinden izole etmek ve de RF sinyal sızıntısını azaltmak için kullanılan RF tıkama indüktöründen (L_{bias}) oluşur. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey 121 elemanlı birim hücreden oluşur; yeniden yapılandırılabilirlik için yüzey üzerine dizilen her bir birim hücrenin faz kaymasını ayrı ayrı ayarlanmalıdır. Bu nedenle her birim hücre için bir varaktör, ve toplamda 121 varaktör kullanılmıştır. Her varaktörün, terminallerine uygulanan voltajı ayarlamak için bir kontrol hattı vardır. Öngerilim kontrol devresini kolaylaştırmak için 11x11'lik diziye oluşturan elemanlar, dört adet 3x11 alt diziye ayrıldı. Alt dizinin her biri, şekil (4.15) 'de gösterildiği gibi 33 pinli bir konnektöre bağlandı, bu daha sonra bir sürücü ve çoklama devresi aracılığıyla bir mikro denetleyici birimine (MCU) bağlandı. Kontrol devresi, yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey tasarımlarında çok önemli bir bileşendir. Her varaktöre beslenen dc-öngerilim voltajı diğer varaktörlerden bağımsız ayarlanabilir, böylece yansıtıcı yüzey elektronik olarak yeniden yapılandırılabilir. Kontrol devresi

tasarımı şekil (4.14) 'de gösterilmiştir. Mikrodenetleyici ünitesi tek başına tüm bu elemanları kontrol edemediğinden ve kablolanmanın karmaşıklığını azaltmak için, iki MUX8509 64-kanal çoklayıcı (*DATA SHEET MUX8509 64-Channel Analog Multiplexer Module, AEROFLEX*), bir DC amplifikatör (LT1613) (*DATA SHEET LT1613 Single Cell DC/DC Converter, Linear Technology*) ile birlikte varaktörleri kontrol etmede kullanıldı.



Şekil 4.13. Birim hücre, ve birim hücrede kullanılan varaktör ve öngerilim devresi.

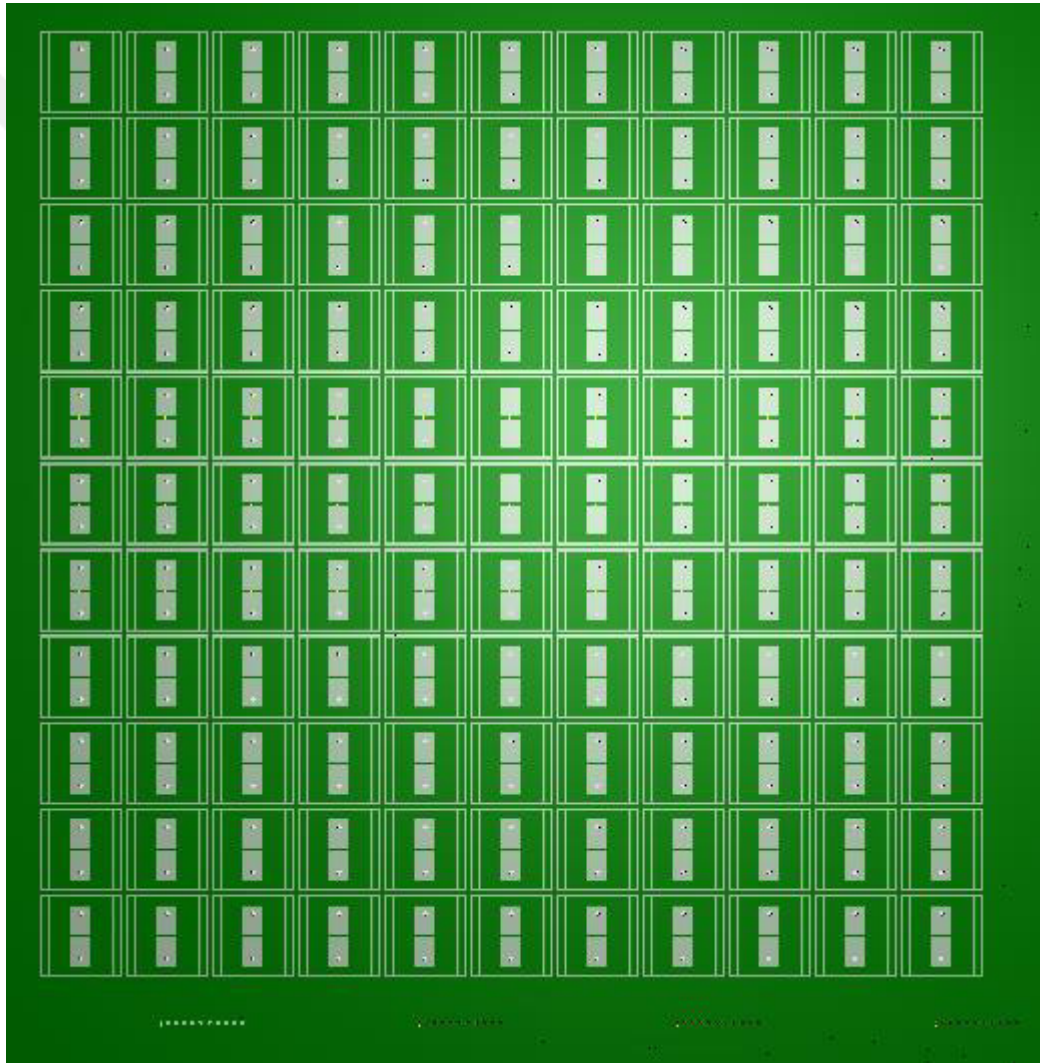


Şekil 4.14. Kontrol devresi tasarımı

4.10. Proteus kullanılarak tasarlanan akıllı yansıtıcı yüzeyin bir prototipi

Şekil (4.15), Proteus devre tasarım aracı kullanılarak 2.4 GHz için tasarlanmış varaktörlü, 11x11 birim elemanlı yeniden yapılandırılabilir akıllı yansıtıcı yüzey prototipini göstermektedir.

Öngerilim hatları, bir katmandan diğerine geçen hatlar yoluyla (via) bağlanır. Bu sayede, birim hücrelerin ayrı ayrı denetlendiği bir dizide kullanılan tüm öngerilim hatları yer düzleminin arkasına yerleştirilebilir ve çok sayıda birim hücrenin olduğu yansıtıcı yüzey tasarımları gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.15. Tasarlanan akıllı yansıtıcı yüzey prototipi

4.11. Performans karşılaştırması

Tablo 4.3, önerilen akıllı yansıtıcı yüzeyin literatürde sunulan diğer yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeylere göre performansını özetlemektedir. Önerilen yüzey, Tablo 4.3'de gösterilen birçok tasarıma kıyasla daha geniş bir elektronik tarama açısı aralığına ulaşır. (Tian et al., 2017)'da geniş bir tarama açısı elde edilir, ancak 4.8 dB olan büyük bir tarama kaybı vardır. Bu çalışmada, 2.5 dB düşük tarama kaybı ile geniş bir tarama açısı elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Tasarlanan yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzey ile literatürde yayımlanan diziler arasında karşılaştırma

	Bu Tasarım	(H. Yang, Yang, Xu, Mao, et al., 2016)	(Venneri et al., 2012)	(Sean Victor Hum et al., 2007)	(Bayraktar et al., 2011)
Ayar Teknolojisi	Varaktör	PIN Diyot	Varaktör	Varaktör	MEMS
Merkez Frekansı (GHz)	2.4 GHz	12.5 GHz	11.25 GHz	5.8 GHz	26.5 GHz
Dizi boyutu (λ^2)	5.7 x 5.7	5 x 5	2.1 x 10.5	5.8 x 4.06	5 x 5
Eleman sayısı	11x11	10x10	15x3	7x10	10x10
Işın yönlendirme yeteneği	2-D	1-D	1-D	1-D	1-D
Kazanç bant genişliği (3-dB)	%25	%32.5	%7	%1.3	%3.77
Işın tarama aralığı	$\pm 55^\circ$	$\pm 50^\circ$	$\pm 40^\circ$	$\pm 50^\circ$	0° or 40°
Tarama kaybı	2.5 dB	4 dB	Uygulanmaz	5 dB	Uygulanmaz

5. SONUÇ VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMA

5.1. Sonuç

Bu tez, yansıtıcı yüzey tasarım kavramlarını kullanarak akıllı yansıtıcı yüzey tasarımını ele almıştır.

Bölüm 2'de anten teorisine ve davranışına genel bir bakış sağlanmıştır. Ayrıca, yansıtıcı yüzey tasarım ve analiz kavramları sunulmuş, ve yeniden yapılandırılabilir yüzey için kullanılan yaklaşımlar tanıtılmıştır.

Bölüm 3'te, 10 GHz çalışma frekansında iki farklı birim eleman şekli kullanan iki yansıtıcı yüzey sunulmuştur. İlk yansıtıcı yüzey, üçgen şeklinde 40x40'lık birim eleman dizisi olarak tasarlanmıştır. Bir yansıtıcı dizi tasarlanmanın ilk adımı, birim yansıtıcı eleman tasarımıdır. Bu bölümde, birim elemanların yansıtımına fazını ayarlamak için değişken boyutlu birim eleman yaklaşımı kullanıldı, ve faz değişim aralığı 310 dereceden büyük olan birim elemanlar dizi yapımında kullanıldı. Üçgen biçimli birim hücrenin tüm boyut değişimleri için 320 derece civarında bir faz değişimi elde edildi. İkinci yansıtıcı yüzey $10\lambda \times 10\lambda$ boyutunda olup, kare çevrim biçiminde elemanlar ile tasarlandı. Kare çevrim biçimli birim hücrenin tüm kenar uzunluk değişimleri için 330 derece civarında bir faz değişimi elde edildi. Reflektörlü eleman birim hücrenin başarılı bir şekilde gösterilmesinden sonra, yansıtıcı yüzeyin tamamı MatLab ve CST arasında arayüz oluşturularak otomatik olarak tasarlandı. Böylelikle, tasarlanan yansıtıcı yüzey ile istenen yönlerde (düşey düzlemde -40° , 0° ve 30°) yüksek kazançlı bir hüzmleme gösterildi.

Bölüm 4'te, yansıyan bir dalgayı istenen yöne yönlendirmek için 2.4 GHz çalışma frekansında 11 x 11 elemanlı yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı dizi yüzeyi tasarlanmıştır. Bu amaca ulaşmak için, yansıtıcı dizisi, 320°'yi aşan bir faz değişim aralığı sağlayan birim elemanlar kullanarak istenen herhangi bir düzlemde sürekli taramayı mümkün kılacak şekilde yapılandırıldı. $\theta=0^\circ$ düzleminde -55° ile $+55^\circ$ arasında 2.58 dB'ye varan dönüş kaybı ile bir ışın yönlendirme gösterilirken, $\theta=30^\circ$ düzleminde -50° ile $+55^\circ$ arasında 3.94 dB'ye varan dönüş kaybı ile ışın yönlendirme yapılabildiği gösterildi. Elde edilen en yüksek kazanç değeri 20.54 dBi'dir. Kazanç bant genişliği 1-dB için yaklaşık %8.33(2.3-2.5 GHz) ve 3-dB için yaklaşık %25'tir (2.1-2.7 GHz) olarak belirlendi. Daha sonra, 11x11 elemanlı dizi, varaktör anahtarlı mikro şerit yama yansıtıcı dizi prototipi 2.4 GHz için tasarlandı ve Baskılı Devre Kartı

(PCB) teknolojisi ile üretime hazır hale getirildi. Ve son olarak, tasarlanan akıllı yansıtıcı yüzeyin başarımı, diğer yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeylerin başarımları ile karşılaştırıldı. Önerilen yüzeyin, diğer yüzeylere göre düşük ışın dönüş kaybı ile (2.5 dB) geniş bir tarama açısı ($\pm 55^\circ$) sağladığı görüldü.

5.2. Gelecek çalışma için öneriler

Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı yüzeyin önemli parametreleri, tarama açısı ve kazanç bant genişliğidir. Dolayısıyla, bu parametrelerin artırılması gelecekte yapılabilecek bir katkıdır. Dizi elemanlarının sayısının artırılması, yansıtıcı dizinin kazancını ve tarama açısı aralığını artıracaktır ki bu da iyi bir katkıdır. Ayrıca, bu tezde önerilen akıllı yansıtıcı yüzey, simülasyon sonuçlarını doğrulamak için üretilebilir ve test edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abd-Elhady, M., Hong, W., & Zhang, Y. (2012). A Ka-band reflectarray implemented with a single-layer perforated dielectric substrate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 600-603.
- Antenna MAGUS. (Antenna design software tool, 2020). www.antennamagus.com, (05.11.2020).
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design* (4th edition ed.): John Wiley & Sons.
- Bayraktar, O., Civi, O. A., & Akin, T. (2011). Beam switching reflectarray monolithically integrated with RF MEMS switches. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(2), 854-862.
- Berry, D., Malech, R., & Kennedy, W. (1963). The reflectarray antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 11(6), 645-651.
- Doherty, B. (2006). PIN diode fundamentals. *MicroNote Series*, 701, 1-2.
- Björnson, E., Özdoğan, Ö., & Larsson, E. G. (2020). Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions. *IEEE Communications Magazine*, 58(12), 90-96.
- Brown, E. R. (1998). RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 46(11), 1868-1880.
- Chen, Z. N., Liu, D., Nakano, H., Qing, X., & Zwick, T. (2016). *Handbook of Antenna Technologies*: Springer Singapore.
- CST Studio Suite. (Electromagnetic field simulation software, 2020). <https://www.cst.com/>, (01.10.2020).
- Dahri, M. H., Jamaluddin, M. H., Abbasi, M. I., & Kamarudin, M. R. (2017). A review of wideband reflectarray antennas for 5G communication systems. *IEEE Access*, 5, 17803-17815.
- Datasheet LT1613 Single Cell DC/DC Converter, Linear Technology.*
- Datasheet MUX8509 64-Channel Analog Multiplexer Module, AEROFLEX.*
- Datasheet SMV1405. to SMV1413, Varactors, Skyworks.*
- Dictionary.com. The definition of antenna in dictionary. <https://www.dictionary.com/browse/antenna?s=t>, (01.12.2020).
- Doherty, W. E., & Joos, R. D. (1998). The PIN diode circuit designers' handbook. Microsemi Corporation, 1, 1-137.
- Encinar, J. A., & Zornoza, J. A. (2003). Broadband design of three-layer printed reflectarrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(7), 1662-1664.
- Huang, J. (1995). *Bandwidth study of microstrip reflectarray and a novel phased reflectarray concept*. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1995 Digest*.
- Huang, J., & Encinar, J. A. (2007). *Reflectarray Antennas*: Wiley-IEEE Press.
- Huang, Y., & Boyle, K. (2008). *Antennas: from theory to practice*: John Wiley & Sons.
- Hum, S. V., McFeetors, G., & Okoniewski, M. (2006). *Integrated MEMS reflectarray elements*. First European Conference on Antennas and Propagation, 2006.
- Hum, S. V., Okoniewski, M., & Davies, R. J. (2007). Modeling and design of electronically tunable reflectarrays. *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, 55(8), 2200-2210.
- Jamaluddin, M. H., Sauleau, R., Castel, X., Benzerga, R., Le Coq, L., Gillard, R., & Koleck, T. (2010). Design, fabrication and characterization of a dielectric

- resonator antenna reflectarray in Ka-band. *Progress In Electromagnetics Research B*, 25, 261-275.
- Kraus, J. D., & Marhefka, R. (2002). *Antennas for All Applications*, 2002. In: McGraw-Hill Higher Education, 2002.
- Lee, W., Yi, M., So, J., & Yoon, Y. J. (2015). Non-resonant conductor reflectarray element for linear reflection phase. *Electronics Letters*, 51(9), 669-671.
- Legay, H., Pinte, B., Charrier, M., Ziaei, A., Girard, E., & Gillard, R. (2003). *A steerable reflectarray antenna with MEMS controls*. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003.
- Li, L., Chen, Q., Yuan, Q., Sawaya, K., Maruyama, T., Furuno, T., & Uebayashi, S. (2009). Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 881-885.
- Munson, R. E., Haddad, H. A., & Hanlen, J. W. (1987). Microstrip reflectarray for satellite communication and radar cross-section enhancement or reduction. In: Google Patents.
- Nayeri, P., Yang, F., & Elsherbeni, A. Z. (2018). *Reflectarray Antennas: Theory, Designs and Applications*: Wiley Online Library.
- Pattanayak, A., Rana, G., Duttagupta, S. P., Gandhi, P. S., & Deshmukh, A. A. (2018). Design of a 5 GHz Reflectarray with reduced size unit cell and extremely low phase sensitivity. *Radioengineering*, 27(3), 718-723.
- Polenga, S., Stankovsky, A., Krylov, R., Nemshon, A., Litinskaya, Y., & Salomatov, Y. P. (2015). *Millimeter-wave waveguide reflectarray*. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).
- Pozar, D. M. (2003). Bandwidth of reflectarrays. 39(21), 1490-1491.
- Pozar, D. M. (2007). Wideband reflectarrays using artificial impedance surfaces. 43(3), 148-149.
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave engineering* (4th edition ed.): John wiley & sons.
- Rajatheva, N., Atzeni, I., Bjornson, E., Bourdoux, A., Buzzi, S., Dore, J. B., & Xu, W. (2020). White paper on broadband connectivity in 6G. arXiv preprint arXiv:2004.14247.
- Rengarajan, S. R. (2010). Scanning and defocusing characteristics of microstrip reflectarrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9, 163-166.
- Tan, X., Sun, Z., Jornet, J. M., & Pados, D. (2016). *Increasing indoor spectrum sharing capacity using smart reflect-array*. IEEE International Conference on Communications (ICC).
- Targonski, S. D., & Pozar, D. M. (1994). *Analysis and design of a microstrip reflectarray using patches of variable size*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting.
- Tian, S., Liu, H., & Li, L. (2017). Design of 1-bit digital reconfigurable reflective metasurface for beam-scanning. *Applied Sciences*, 7(9), 882.
- Üçüncü, G. (2013). *X band two layer printed reflectarray with shaped beam*. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology.
- Venneri, F., Costanzo, S., & Di Massa, G. (2012). Design and validation of a reconfigurable single varactor-tuned reflectarray. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(2), 635-645.
- Wu, Q., & Zhang, R. (2019). Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Communications Magazine*, 58(1), 106-112.

- Yang, H., Yang, F., Xu, S., Li, M., Cao, X., Gao, J., & Zheng, Y. (2016). A study of phase quantization effects for reconfigurable reflectarray antennas. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 302-305.
- Yang, H., Yang, F., Xu, S., Mao, Y., Li, M., Cao, X., & Gao, J. (2016). A 1-bit 10 x10 reconfigurable reflectarray antenna: design, optimization, and experiment. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(6), 2246-2254
- Yang, X., Xu, S., Yang, F., Li, M., Fang, H., Hou, Y., Jiang, S., & Liu, L. (2018). A mechanically reconfigurable reflectarray with slotted patches of tunable height. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(4), 555-558.
- Yang, X., Xu, S., Yang, F., Li, M., Hou, Y., Jiang, S., & Liu, L. (2017). A broadband high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna using mechanically rotational elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(8), 3959-3966.
- Yoon, J. H., Yoon, Y. J., Lee, W. S., & So, J. H. (2015). Broadband microstrip reflectarray with five parallel dipole elements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1109-1112.
- Zhao, J., & Liu, Y. (2019). A survey of intelligent reflecting surfaces (IRSs): Towards 6G wireless communication networks. *arXiv preprint arXiv:1907.04789*.