

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK VERİ HIZLI KA-BANT UYDU HABERLEŞMESİ  
İÇİN YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI

Ahmet Hulusi GÜLSEREN

DOKTORA TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Danışman

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Eş Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Aytaç ALPARSLAN

Haziran, 2024

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

**YÜKSEK VERİ HIZLI KA-BANT UYDU HABERLEŞMESİ**  
**İÇİN YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI**

Ahmet Hulusi GÜLSEREN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Haberleşme Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALPARSLAN  
Trakya Üniversitesi  
Eş-Danışman

**Jüri Üyeleri**

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

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut KARTAL, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Pınar ÖZTÜRK ÖZDEMİR, Üye  
Milli Savunma Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Yüksek Veri Hızlı Ka-Bant Uydu Haberleşmesi İçin Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet Hulusi GÜLSEREN

İmza



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FBA-2021-4493 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



*Aileme*

## TEŞEKKÜR

---

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında her zaman yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, yolumu kaybettiğim her anda yolumu aydınlatan, akademik çalışmalarımızın her basamağında bana yol gösteren, öğrencisi olmaktan mutluluk ve gurur duyduğum danışmanım Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN'a teşekkür eder şükranlarımı sunarım.

Akademik bilgi ve birikiminden her zaman yararlandığım, tecrübesiyle bana yol gösteren eş danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Aytaç ALPARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yıldız Teknik Üniversitesi bünyesinde yapılan ölçümlerde desteğini esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Ramazan DAŞBAŞI'na teşekkürlerimi sunarım.

Sadece bu süreçte değil hayatımın her anında bana destek olan dostum Taha Yasin VELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, akademik çalışmalarımı destekleyen, motivasyon kaynağım olan babam Muhiddin GÜLSEREN'e, annem Müzehher GÜLSEREN'e, ablam Pınar KARAKAŞ'a ve yeğenim Süeda KARAKAŞ'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ahmet Hulusi GÜLSEREN

# İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>v</b>
<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xiii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2 YANSITICI DİZİ ANTENLER</b>	<b>6</b>
2.1 Adım Adım Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı .....	6
2.1.1 Birim Hücre Analizi.....	7
2.1.2 Faz Dağılımı.....	11
2.1.3 Yansıtıcı Yüzey Tasarımı.....	13
2.2 Açıklık Verimlilik Analizi .....	15
2.3 Yansıtıcı Dizi Antenlerde Işıma Analizi .....	21
2.3.1 Dizi Teorisi.....	22
2.3.2 Açıklık Teorisi.....	24
2.3.3 Tam Dalga Analizi .....	25
<b>3 YÜKSEK VERİ HIZLI UYDULAR İÇİN DUAL-POLARİZE YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI</b>	<b>26</b>
3.1 Önerilen Birim Hücre.....	27
3.1.1 18 GHz için Birim Hücre.....	27
3.1.2 19.7 GHz için Birim Hücre .....	30
3.2 Merkezden Beslemeli Dual Polarize Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı .....	30
3.2.1 Besleme Anteni .....	30
3.2.2 Yansıtıcı Yüzey Tasarımı .....	31
3.2.3 Açıklık Verimlilik Analizi .....	32
3.2.4 Benzetim Sonuçları .....	34

3.2.5	Sonuç .....	35
3.3	Eksen Dışı Besleme Durumunda Dual Polarize Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı .....	36
3.3.1	Açıklık Verimlilik Analizi.....	36
3.3.2	Yansıtıcı Yüzey Tasarımı.....	36
3.3.3	Analiz Sonuçları.....	37
3.3.4	Analiz Sonuçları.....	39
<b>4</b>	<b>MİKROŞERİT BİRİM HÜCRELERLE DUAL BANTLI LİNEER POLARİZE YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI</b>	<b>44</b>
4.1	FSY Birim Hücresi.....	46
4.2	Yansıtıcı Dizi Birim Hücre Analizi .....	47
4.3	Yansıtıcı Yüzey Tasarımı.....	49
4.4	Benzetim Sonuçları .....	52
4.5	Sonuç.....	54
<b>5</b>	<b>YÜKSEK VERİ HIZLI KA BANT UYDULARI İÇİN DUAL BANTLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLİ YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI</b>	<b>56</b>
5.1	Birim Hücre Tasarımı .....	57
5.2	Çift Bantlı Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı .....	61
5.2.1	Açıklık Verimlilik Analizi.....	61
5.2.2	20/30 GHz için Yansıtıcı Yüzey Tasarımı.....	62
5.3	Analiz Sonuçları.....	63
5.4	Deneysel Sonuçlar.....	66
5.5	Sonuç.....	70
<b>6</b>	<b>SONUÇ</b>	<b>72</b>
	<b>KAYNAKÇA</b>	<b>75</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

$\eta_a$	Açıklık verimliliği
$\eta_i$	Aydınlatma verimliliği
$\lambda$	Dalga boyu
$k_0$	Dalga sayısı
$E$	Elektrik Alan
$\Psi_0$	Faz sabiti
$\phi_{pp}$	İlerleyen faz
$A_0$	Kompleks sabit
$H$	Magnetik Alan
$D$	Periyodiklik
$\vec{P}$	Poynting vektör
$\eta_s$	Taşma Verimliliği
$\Gamma_{mn}$	Yansıma katsayısı

## KISALTMA LİSTESİ

---

Rx	Alma
FDTD	Finite Diffrence Time Domain
FIT	Finite Integration Technic
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
FSS	Frequency Selective Surface
FSY	Frekans Seçici Yüzey
Tx	Gönderme
IoT	Internet of Things
MEMs	Micro-Electromechanics
MoM	Method of Moment
PRUC	Polarization Rotate Unit Cell
SatCom	Satellite Communication
SD	Spectral Domain

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Yansıtıcı dizi anten bileşenleri.....	6
Şekil 2.2	Yansıtıcı yüzey üzerinde yer alan birim hücreler.....	8
Şekil 2.3	Sonsuz dizi yaklaşımı ile birim hücre analizindeki yapı.....	8
Şekil 2.4	Üç dipolden oluşan birim hücrenin perspektif görünüşü.....	9
Şekil 2.5	Orta dipolün uzunluğunun ( $a$ parametresi) değişimi ile elde edilen faz grafiği.....	10
Şekil 2.6	Birim hücrenin (a) Perspektif, (b) Önden görünüşü.....	10
Şekil 2.7	Birim hücrenin $b$ parametresine bağlı olarak (a) genlik; (b) faz değişimi.....	11
Şekil 2.8	Yansıtıcı dizi anten konfigürasyonu.....	12
Şekil 2.9	50x50 elemanlı yansıtıcı dizinin merkezden beslemeli durumda ana hüzmeyi yönlendirmesi için faz dağılımı (a) $\theta=0^\circ$ ; (b) $\theta=20^\circ$ .....	13
Şekil 2.10	Yansıtıcı dizinin (a) faz dağılımı; (b) önden görünüşü.....	14
Şekil 2.11	Yansıtıcı antende aydınlatma verimliliğinin gösterimi.....	15
Şekil 2.12	Yansıtıcı antende taşma verimliliğinin gösterimi.....	15
Şekil 2.13	$q$ parametresi ile yönlendiriciliğin değişimi.....	16
Şekil 2.14	Farklı $q$ değerleri için normalize güç seviyesi.....	16
Şekil 2.15	$f/D$ oranının değişimi ile açıklık veriminin değişimi.....	17
Şekil 2.16	$q$ parametresinin değişimi ile açıklık verimlilik analizi.....	17
Şekil 2.17	Yansıtıcı dizi antenlerde blokaj etkisi.....	19
Şekil 2.18	Eksen dışı besleme durumu için açıklık verimlilik analizi.....	20
Şekil 2.19	$H=276$ için açıklık verimlilik analizi.....	20
Şekil 2.20	Yansıtıcı dizi anteninin koordinat sistemi.....	22
Şekil 2.21	Dizi teorisi ile elde edilen ışınma paterni.....	24
Şekil 3.1	Çift polarizasyonlu yansıtıcı antenin birim hücresi (a) Üstten görünüm; (b) Perspektif görünüm.....	28
Şekil 3.2	$L_a$ parametresinin fonksiyonu olarak birim hücrenin 18 GHz'deki faz özellikleri (a) Farklı hava boşluğu değerleri ( $H_a$ ); (b) Farklı alt tabaka kalınlığı değerleri ( $H_s$ ) için.....	29
Şekil 3.3	$D=7,5$ mm iken $L_a$ parametresinin fonksiyonu olarak birim hücrenin 19,7 GHz' deki faz özellikleri.....	30
Şekil 3.4	Çift yarıklı horn antenin yansıma katsayısının frekansla değişimi.....	31
Şekil 3.5	Besleme antenin 18 GHz'deki üç boyutlu uzak alan ışınma paterni.....	31
Şekil 3.6	Yansıtıcı dizi antenin (a) Faz Dağılımı; (b) Yansıtıcı Yüzeyi.....	32

<b>Şekil 3.7</b>	Beslenen horn antenin ışınma karakteristiğinin $\cos^q$ modeli ile gösterimi ( $q=6.8$ ) .....	33
<b>Şekil 3.8</b>	Açıklık verimliliğinin değişimi (a) $q$ parametresine göre; (b) $f/D$ oranına göre .....	33
<b>Şekil 3.9</b>	Yansıtıcı dizinin yansıma katsayısının frekansla değişim.....	34
<b>Şekil 3.10</b>	3 boyutlu ışınma paternleri (a) TE Mod; (b) TM Mod.....	35
<b>Şekil 3.11</b>	19.7GHz'de TE ve TM polarizasyon için kazanç paternleri.....	35
<b>Şekil 3.12</b>	Eksen dışı beslemeli yansıtıcı dizi antenin verimlilik grafiği.....	36
<b>Şekil 3.13</b>	Yansıtıcı dizinin yansıtıcı yüzeyi (a) Yüzeydeki faz dağılımı; (b) Birim hücrelerden oluşan yansıtıcı yüzey.....	37
<b>Şekil 3.14</b>	Normalize ışınma paternleri (a) TE Modu; (b) TM Modu.....	38
<b>Şekil 3.15</b>	Yansıtıcı antenin TE modunda üç boyutlu ışınma örüntüsü .....	39
<b>Şekil 3.16</b>	Üretilen yansıtıcı dizi sistemi (a) Yansıtıcı dizi prototipi; (b) Yansıtıcı dizi sistemi .....	40
<b>Şekil 3.17</b>	Çift polarizasyonlu Ka-bant yansıtıcı sisteminin ölçüm düzeneği .....	40
<b>Şekil 3.18</b>	Yansıtıcı dizi antenin yansıma katsayısının frekans ile değişimi .....	41
<b>Şekil 3.19</b>	Yansıtıcı dizi sisteminin $\phi = 90^\circ$ düzlemindeki ölçüm paternleri .....	42
<b>Şekil 3.20</b>	Ölçülen kazanç ve çapraz polarizasyon seviyesi değişimleri.....	42
<b>Şekil 4.1</b>	FSY birim hücresi (a) Üstten görünüş; (b) Perspektif görünüşü.....	47
<b>Şekil 4.2</b>	FSY birim hücresinin saçılma parametreleri.....	47
<b>Şekil 4.3</b>	24 GHz yansıtıcı dizideki birim hücre yapısı (a) Perspektif görünümü (b) FSY birim hücresi ile birlikte birim hücrenin perspektif görünümü.....	48
<b>Şekil 4.4</b>	$L_a$ parametresinin değişimiyle elde edilen faz eğrisi.....	48
<b>Şekil 4.5</b>	30 GHz yansıtıcı dizideki birim hücre yapısı (a) Perspektif görünümü; (b) FSY birim hücresi ile birlikte birim hücrenin perspektif görünümü.....	49
<b>Şekil 4.6</b>	$L_b$ parametresinin değişimiyle elde edilen faz eğrisi.....	49
<b>Şekil 4.7</b>	Besleme anteninin normalize güç paterni (a) 24 GHz; (b) 30 GHz.....	50
<b>Şekil 4.8</b>	Açıklık verimlilik analizleri (a)24 GHz; (b) 30 GHz.....	51
<b>Şekil 4.9</b>	Yansıtıcı yüzeyler (a) 24 GHz yansıtıcı yüzey; (b) 24 GHz için faz dağılımı; (c) 30 GHz yansıtıcı yüzey; (d) 30 GHz için faz dağılımı.....	52
<b>Şekil 4.10</b>	Yansıtıcı dizi anten konfigürasyonu.....	52

<b>Şekil 4.11</b>	Yansıtıcı dizi antenlerin üç boyutlu paternleri (a) 24 GHz; (b) 30 GHz.....	53
<b>Şekil 4.12</b>	$\phi = 180^\circ$ düzleminde normalize ışımaya paterni.....	53
<b>Şekil 4.13</b>	Yansıtıcı dizi antenlerin 3B paternleri (a) 24 GHz; (b) 30 GHz.....	54
<b>Şekil 4.14</b>	$\phi = 180^\circ$ düzleminde normalize ışımaya paterni.....	54
<b>Şekil 5.1</b>	Birim Hücre (a) 30 Ghz için; (b) 20 GHz için.....	58
<b>Şekil 5.2</b>	FSY saçılma parametreleri.....	59
<b>Şekil 5.3</b>	Önerilen birim hücrelerin a ve b parametresine bağlı olarak değişimi (a) 20 GHz; (b) 30 GHz.....	60
<b>Şekil 5.4</b>	Açıklık verimliliği (a) 20 GHz ve (b) 30 GHz.....	62
<b>Şekil 5.5</b>	Faz dağılımı ve ilgili yansıtıcı yüzeyler (a) 20 GHz; (b) 30 GHz .....	63
<b>Şekil 5.6</b>	Yansıtıcı dizilerin $\phi = 0^\circ$ düzlemindeki normalize edilmiş ışımaya paternleri (a) 20 GHz yansıtıcı dizisi; (b) 30 GHz yansıtıcı dizisi .....	64
<b>Şekil 5.7</b>	Çift bantlı FSY destekli yansıtıcı dizi anten sistemi.....	65
<b>Şekil 5.8</b>	Yansıtıcı dizi anten sisteminin yönlendiricilik paternleri (a) 20 GHz; (b) 30 GHz.....	65
<b>Şekil 5.9</b>	Çift bantlı FSY destekli yansıtıcı dizi anten sisteminin $\phi = 0^\circ$ düzlemindeki normalize ışımaya paternleri.....	66
<b>Şekil 5.10</b>	Üretilen yansıtıcı dizi anten baskı devre kartları (a) 30 GHz yansıtıcı dizinin üst tarafı; (b) 30 GHz yansıtıcı dizinin alt tarafı (FSY yüzeyi); (c) 20 GHz yansıtıcı dizinin üst tarafı; (d) 20 GHz yansıtıcı dizinin alt tarafı.....	67
<b>Şekil 5.11</b>	Yansıtıcı dizi anten sistemi için üretilen tutucu.....	68
<b>Şekil 5.12</b>	Yansıtıcı dizi anten ölçüm düzeneği.....	68
<b>Şekil 5.13</b>	Yansıtıcı dizi antenin ölçülen yansıma katsayısı.....	69
<b>Şekil 5.14</b>	Çift bantlı yansıtıcı dizinin ölçülen normalize kazanç paternleri (a) 20 GHz; (b) 30 GHz.....	70
<b>Şekil 5.15</b>	Ka-Bant uydu aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekanslarında dual bantlı yansıtıcı dizinin ölçülen kazanç değişimi.....	70

## TABLO LİSTESİ

---

**Tablo 3.1** Birim hücrenin parametreleri.....28

**Tablo 3.2** İlgili faz aralıkları ve karşılık gelen birim eleman boyutları .....32



## **Yüksek Veri Hızlı Ka-Bant Uydu Haberleşmesi İçin Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı**

Ahmet Hulusi GÜLSEREN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Haberleşme Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Eş-Danışman: Dr. Aytaç ALPARSLAN

Uydu ve uzay iletişim teknolojileri, yüksek veri hızına sahip 5G/6G sistemlerindeki talebi karşılamada kritik bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında yüksek veri hızlı 5G/6G uydularında kullanılmak üzere 3 farklı yansıtıcı dizi anten önerilmiştir.

İlk çalışmada Ka-Bant alma frekansında çalışan 5G uyduları için çift polarize yansıtıcı dizi anten tasarımı paylaşılmıştır. Bu çalışmada yeni bir birim hücre önerilmiştir. Merkezden beslemeli durum için yapılan tasarımda  $\phi = 90^\circ$  düzleminde  $\theta = 20^\circ$ 'ye hem TE hem de TM modu için yönlendirmenin olduğu ve yansıtıcı antenin çift polarize olarak çalıştığı görülmüştür. Bu çalışmanın devamında aynı birim hücre kullanılarak blokaj etkisinden kaçınmak için eksen dışı beslemeli, çift polarize yansıtıcı dizi anten tasarımı yapılmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yansıtıcı anten, 18-20 GHz aralığında çift polarizasyonlu çoklu hüzmeleri kararlı bir kazanç davranışı ile desteklemeyi mümkün kılmıştır.

İkinci çalışmada ise Ka-Bant yüksek hızlı uydu sistemlerinde kullanılması için geleneksel kare mikroşerit birim hücreler kullanılarak 24/30 GHz frekansında çalışan çok huzmeli çift polarize Frekans Seçici Yüzey (FSY) destekli yansıtıcı dizi anten tasarlanmıştır. Eş zamanlı olarak 24/30 GHz için  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = 20^\circ$  ye ışınım yapacak şekilde tasarlanan bu yapıda elemanlar arasındaki karşılıklı kuplaj etkisini azaltmak ve frekans bantları arasında izolasyon sağlamak için çift ekranlı FSY kullanılmıştır.

Son çalışmada 20/30 GHz eş zamanlı çalışan, 5G yüksek hızlı uydular için çift-bantlı, çift-polarizasyonlu FSY destekli yansıtıcı dizi anten tasarımı yapılmıştır. Ara katmanda yer alan FSY yapısı üst katmanda yer alan yansıtıcı yüzey toprak düzlemi işlevi görürken her iki frekans için de filtreleme işlemi yapmaktadır. Tasarım sonuçları tam dalga analiz ve dizi teorisi yöntemleri ile elde edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir. Hedeflenen tasarımın kompakt bir yapıdadır ve çalıştığı her iki frekansta 20 dB üzerinde anten kazancı elde edilmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları, önerilen yansıtıcı dizinin yüksek hızlı Ka-bant uydular için uygun olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Birim hücre, Dizi Teorisi, Yansıtıcı dizi anten, 5G, yüksek veri hızlı uydular, frekans seçici yüzey.



## **Multi-Beam Reflect Array Design for Ka-Band Satellite Communication**

Ahmet Hulusi GÜLSEREN

Department of Electronic and Communication Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nurhan TÜRKER TOKAN

Co-supervisor: Dr. Aytaç ALPARSLAN

Satellite and space communication technologies play a critical role in meeting the demand for high data rate 5G/6G systems. In this thesis study, 3 different reflectarray antennas are proposed for use in high data rate 5G/6G satellites.

In the first study, a dual polarized reflectarray antenna design for 5G satellites operating at Ka-Band downlink frequency is shared. In this study, a new unit cell is proposed. In the design made for the center-fed case, it is seen that there is a directivity in the  $\phi = 90^\circ$  plane to  $\theta = 20^\circ$  for both TE and TM modes, and the reflector antenna operated as dual polarized. In the continuation of this study, an off-axis fed, dual-polarized reflectarray antenna is designed and produced to avoid the blocking effect using the same unit cell. The proposed reflector antenna made it possible to support dual polarization multiple beams in the range of 18-20 GHz with a stable gain behavior.

In the second study, a multi-beam dual-polarized Frequency Selective Surface (FSS) supported reflectarray antenna operating at 24/30 GHz is designed using traditional square microstrip unit cells for use in Ka-Band high-speed satellite

systems. In this structure, which is designed to simultaneously radiate to  $\theta = 20^\circ$  in the  $\phi = 0^\circ$  plane for 24/30 GHz, a double-screen FSS is used to reduce the mutual coupling effect between the elements and to provide isolation between frequency bands.

In the last study, a dual-band, dual-polarization FSS-supported reflectarray antenna design is designed for 5G high-speed satellites operating simultaneously at 20/30 GHz. The FSS structure located in the intermediate layer performs filtering for both frequencies while the reflective surface in the upper layer functions as the ground plane. Design results are obtained by full wave analysis and array theory methods. It is observed that the analysis results obtained coincide with the experimental results. The targeted design has a compact structure and an antenna gain of over 20 dB is achieved at both frequencies it operates. Simulation and measurement results show that the proposed reflectarray is suitable for high-speed Ka-band satellites.

**Keywords:** Unit cell, Array theory, Reflectarray, 5G, High throughput satellite, Frequency selective surface.

# 1 GİRİŞ

IoT (nesnelerin interneti) kavramının gelişmesi ve teknolojinin hızla ilerlemesi nedeniyle iletişim sistemlerinde yüksek hızlı internet ağları vazgeçilmez bir hale gelmiştir. Bu talebi karşılamak amacıyla 5G/6G yüksek hızlı uydu sistemleri faydalı bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Mobilite ve kapsama alanı açısından 5G iletişim taleplerini sürdürmek için uydular ve uzay teknolojileri kritik bir rol oynamaktadır [1]. Uzak ve yetersiz hizmet alan bölgelerde bile yüksek hızlı internet kapsamı sağlamak ve kesintisiz, yüksek verimli, kesintisiz küresel bağlantı gibi benzersiz avantajlar elde etmek için uydular 5G ağları için bir omurga görevi görmektedir [2]. Uydu ve fırlatma teknolojisindeki ilerlemeler, gömülü fiber optik kablolarla dayanan karasal iletişim ile karşılanması teknik ve ekonomik olarak mümkün olmayan bu taleplerin önünü açmaktadır. Ka-bant uydu sistemleri, küçük alıcı antenler kullanarak yüksek hızlı hizmetler sağlayan kanıtlanmış teknolojilerdir [3,4]. Antenler uydu haberleşme sistemlerinde kritik bir rol oynadığından, Ka-bantının (20/30 GHz) alma ve gönderme frekanslarında aynı anda çalışabilmek için yüksek kazançlı antenler gereklidir.

Son yıllarda 5G yüksek veri hızlı uydu sistemlerinde yüksek performanslı ve kolay üretim tekniğine sahip yansıtıcı dizi sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Yansıtıcı dizi antenler, çok bantlı çalışma ve çift polarizasyon gibi ümit verici özelliklerinden dolayı muadilleri olan reflektör antenlere göre belirgin üstünlüklere sahiptir [5]. Günümüzde 5G Ka-bantlı yüksek verimli uydu sistemlerinde ağırlığın ve maliyetin düşük olması ve üretim kolaylığı nedeniyle yansıtıcı dizi antenler kullanılmaktadır. Yeni nesil yüksek kazançlı antenler olarak, düzlemsel iletken eleman dizilerinden oluşan yansıtıcı antenler, kavisli ve hantal yansıtıcı sistemlere alternatif olarak geliştirilmiştir [6].

Yansıtıcı dizi anten sistemleri 1960'larda literatüre kazandırılmasına karşın verimlilik düzeylerinin düşük olması sebebiyle tercih edilmemiştir. Baskı devre teknolojisinde yaşanan gelişmelerle birlikte, 1980'li yıllarda, yansıtıcı mikroşerit antenler önem kazanmıştır [7]. Modern baskı devre teknolojileri ile gerçekleştirilen kolay ve düşük maliyetli üretim, uydu sistemlerinde de düzlemsel antenlerin kullanımına olanak sağlamıştır. Uydu sistemlerinde yaygın olarak kullanılırken

parabolik reflektör antenler yerine yansıtıcı dizi antenler tercih edilmektedir. Yansıtıcı dizi antenlerin kullanımı uydu üzerindeki anten sayısının azalmasına olanak sağlar. Ayrıca yansıtıcı dizilerde pahalı ve karmaşık besleme devrelerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu devreleri tasarlamak için harcanan iş gücü ve zaman konusunda avantaj sağlanmış olur. Böylece uydu sistemlerinde maliyet, hacim ve ağırlık kalemlerinde avantaj sağlanır. Yansıtıcı diziler fiziksel olarak düşük profilli, daha az hacim ve ağırlığa sahip yapılardır. Yansıtıcı diziler baskı devre tekniği ile üretilirken parabolik reflektör yapıları kalıp tekniği ile üretilmektedir. Kalıp tekniği yerine baskı devre tekniği kullanılması üretim ve tasarım kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca tasarımda güncellemeye gidilmesi durumunda, yeni tasarım için tekrardan kalıp oluşturulmasına gerek duyulmaması yansıtıcı dizilerin bir diğer avantajıdır. Parabolik reflektörler ve yansıtıcı dizinin performansları kıyaslandığında, parabolik yansıtıcılar ile daha yüksek kazanç değerleri elde edilebildiği görülmektedir. Uydu sistemlerinde kullanılacak yansıtıcı dizi antenlerin kazancını iyileştirmek üzerine yapılan çalışmalar ile yansıtıcı dizilerin performanslarının parabolik yansıtıcılara yaklaştırıldığı görülmektedir [8].

Yansıtıcı diziler, üstün fiziksel özelliklerinin yanı sıra, faz dizilerin ve yansıtıcıların avantajlarını bir araya getirir. Yansıtıcı elemanların ayrı ayrı kontrol edilebilen fazları ile yansıtıcı dizinin hüzmesi önceden tanımlanmış kriterlere göre oluşturulabilmektedir. Yansıtıcı dizi antenler birim hücrelerden oluşmaktadır. Birim hücre modellerinde formülasyona bağlı şekiller (kare, dikdörtgen, altıgen vb.), dairesel şekiller veya herhangi bir kurala bağlı olmayan yapılar kullanılabilir [7]. İyi performans göstermeleri ve analizlerinin daha kolay yapılması sebebiyle kurallara bağlı geometrik şekiller daha yaygın kullanılmaktadır. Dairesel şekillerde ise uzunluk ve döndürme açıları ile faz aralıkları belirlenebilmektedir. Kurallara bağlı olmayan şekillerin ise performansları belirsizdir. Çok iyi sonuçlar verebileceği gibi çok kötü sonuçlar da verebilir. Bu yüzden çok fazla tercih edilmemektedir [8].

Yansıtıcı dizi antenler, reflektör antenlere kıyasla daha dar bant genişliğine sahiptir. Yansıtıcı dizi antenler tek bantlı olarak çalışabildiği gibi çok bantlı olarak da çalışabilmektedir [8-13]. Bir yansıtıcı dizinin çok bantlı karakteristiği geniş bantlı elemanlar [14-17], çok katmanlı birim elemanlar [18,19], aralıklı dizi ızgaraları [20,21] veya yığılmış diziler [22] kullanılarak elde edilebilir. Yansıtıcı dizi antenin

çift bantlı veya çoklu bantlı olması sayesinde birden çok yansıtıcı yüzey kullanmak yerine tek bir yansıtıcı dizi anten kullanmak yeterli olacaktır. Bu sayede maliyet, ağırlık, hacim, üretim kolaylığı gibi birçok kalemde tasarruf sağlanırken kullanıldığı sistemlerde fonksiyonelliği artırdığı için verimlilik artacaktır.

Çok bantlı yansıtıcı dizi antenler tek katmanlı ve çok katmanlı olabilmektedir. Tek katmanlı yapılar maliyet, hacim ve ağırlık kriterlerinde avantaj sağlamasına karşın karşılıklı kuplaj etkisi ve frekans bantları arasında izolasyonu sağlamak kriterlerinde dezavantajlıdır [23]. Çok katmanlı yapılar ayrıca frekans seçici yüzeyler ile birlikte çalışarak frekans bantları arasında izolasyonu sağlamakta ve karşılıklı kuplaj etkisini düşürmektedir [24-27].

Son yıllarda yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizi antenler popülerlik kazanmıştır. Geleneksel yansıtıcı dizi antenlerin yüzeyleri belli açı veya açılara hüzmeyi yönlendirecek şekilde tasarlanmaktadır. Hüzmeyi başka bir doğrultuya yönlendirmek için kriterlerle uyumlu yüzey oluşturmak gerekir. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizi antenler ile bu işlem yüzeyde değişiklik yapılmaksızın gerçekleştirilebilmektedir [28-33]. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizilerde hüzmelerin farklı bir doğrultuya yönlendirilmesi, birim hücrenin mekanik olarak döndürülmesiyle [29], sıvı kristalin varaktör olarak kullanılmasıyla [30], pin diyotların ve pin transistörlerin kullanılmasıyla oluşturulmaktadır [28,33]. Bu gibi sistemlerde faz aralığı FPGA, mikrodenetleyici gibi sistemleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı dizi sistemlerinin verimliliği pasif mikroşerit sistemlere göre daha düşüktür.

Bu tezde, Ka-bant yüksek veri hızlı uydu sistemleri için yansıtıcı dizi anten tasarımı üzerine çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle yansıtıcı dizi antenlerin temel özellikleri tanıtılmış, tasarım için gerekli olan faz değerlerinin elde edilmesi, açıklık verimlilik analizi, nümerik analiz yöntemleri gibi temel kavramlar anlatılmıştır. Yansıtıcı dizi tasarımında kullanılan temel kavramlar ve metotlar 2. Bölüm'de verilmiştir. İleriki bölümlerde ise yansıtıcı dizilerin çeşitli uygulamaları yer almaktadır.

İlk uygulamada, Ka-bant uydu iletişiminin (SaTCom) downlink frekanslarında kullanılmak üzere yansıtıcı dizili bir anten tasarlanması hedeflenmiştir. Ka-bant uydu iletişimi için çift polarizasyonlu bir yansıtıcı dizi önerilmiştir. Çapraz dipol ve L şekilli dipollerden oluşan yeni bir birim hücre tanıtılmıştır. Yeni birim hücre

yapısı ile oluşturulan yansıtıcı dizi, çift yarıklı horn anten ile merkezden (on-axis) aydınlatılmaktadır. Yansıtıcı dizinin açıklığı 19,7 GHz olarak tasarlanmış ve verimliliği incelenmiştir. Yansıtıcı dizi CST Microwave Studio'da simüle edilmiştir [34]. Simülasyon sonuçları, önerilen yeni birim hücreden oluşan yansıtıcı dizinin hem TE hem de TM modlarında verimli bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Simülasyon sonuçları, önerilen yansıtıcı dizi yapısının Ka-bant uydu downlink uygulamalarında başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu uygulamanın ikinci aşamasında, eksen dışı (off-axis) besleme durumu için birim hücre yeni bir taban malzemesi kullanılarak analiz edilmiş ve birim hücredeki elemanların boyutlarının değiştirilmesi ile elde edilen faz değişimleri verilmiştir. Burada birim hücrelerin geometrik parametreleri, düşük maliyetli ve küçük boyutlu imalat özelliklerine sahip Ka-bant 5G yüksek hızlı uydularda kullanılmak üzere optimize edilmiştir. Tasarlanan yansıtıcı anten CST Microwave Studio ve dizi teorisi yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Üretilen yansıtıcı antenin parametre ölçümleri paylaşılmıştır. 18 GHz için önerilen yapıda TE ve TM modları için çok benzer sonuçlar elde edilmiştir. Anten kazancı 18-22 GHz frekans bandında kararlı özellikler göstermektedir. İlk uygulama örneğinde tanıtılan yansıtıcı dizi anten, yüksek hızlı 5G uydu iletişim sistemlerinde kullanılmak için uygun bir antendir. Merkezden ve eksen-dışı yansıtıcı dizi anten uygulaması ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3'te yer almaktadır.

İkinci uygulamada 24/30 GHz frekans bantlarında çalışan çok katmanlı Frekans Seçici Yüzey (FSY) destekli bir yansıtıcı anten sunulmuştur. Üst ve alt katmanlardaki yansıtıcı antenlerde geleneksel kare yamalar kullanılmıştır. FSY birim hücresi çift ekranlıdır ve 30 GHz yansıtıcı yüzey için zemin düzlemi sağlar. Birim hücre analizleri hem 24/30 GHz birim hücreler için gerçekleştirilmiştir. FSY birim hücresi ve yansıtıcı dizi birim hücrelerinin analizi CST Microwave Studio ile gerçekleştirilmiştir. Yansıtıcı yüzeylerin boyutları açıklık verimliliği analizi ile belirlenmiştir. Her iki frekans için de  $\theta = 15^\circ$  yönüne doğru ışın yönlendirme  $\phi = 180^\circ$ 'de gerçekleştirilmiştir. Bu uygulama Bölüm 4'te tanıtılmıştır.

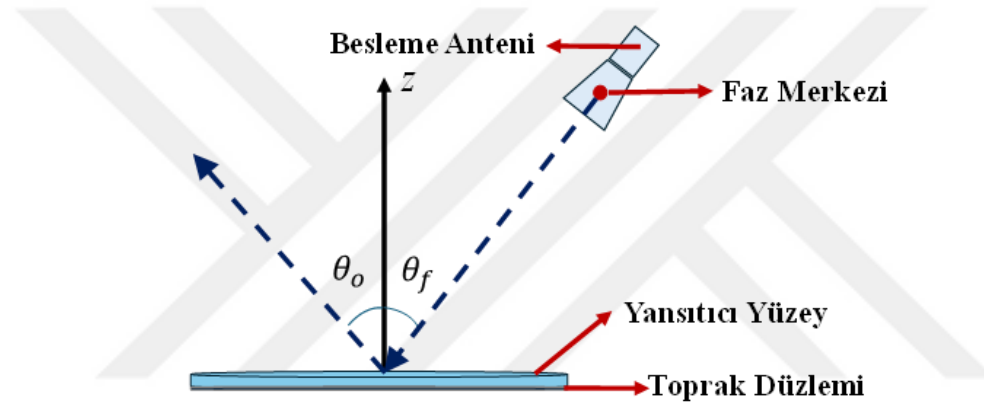
Son uygulamada ise Bölüm 4'te mikroşerit yama elemanları ile oluşturulan yansıtıcı dizi tasarım adımları özgün birim hücre içeren bir yansıtıcı dizi için tekrarlanmıştır. Ka-bant uydu sistemlerinin aşağı-bağlantı (downlink) ve yukarı-bağlantı (uplink) frekansında çalışmak üzere tasarlanan yansıtıcıları izole etmek

için FSY kullanılmıştır. Ka-bant uydularının aşağı-bağlantı frekansında düzlemsel bant geçiren filtre olarak çalışmak üzere tasarlanan basit bir halka rezonatörün kullanılmasıyla, hüzmeye iki farklı frekansta önceden belirlenmiş yöne doğru yönlendirilir. İki yansıtıcı dizinin elemanları nedeniyle oluşan karşılıklı kuplajın bastırılmasıyla iyileştirilmiş kazanç ve açıklık verimliliği elde edilir. FSY için ayrı bir baskı devre kartı kullanmak yerine, tek taraflı FSY'nin iletken şablonu 30 GHz'de çalışacak şekilde tasarlanan üst yansıtıcı yüzeyin alt tarafına kazınmıştır. Her iki durumda da FSY'lerin varlığı göz önüne alınarak 20/30 GHz yansıtıcılar için tasarlanan iki birim hücrenin fazları  $\theta = 20^\circ$  ışın yapacak şekilde hesaplanmıştır. Yansıtıcı antenlerin merkezine yönlendirilmiş çift yarıkli horn anten besleme anteni olarak kullanılmıştır. Yansıtıcı dizinin tam dalga analizi CST Microwave Studio ile nümerik olarak hesaplanmıştır. Bir prototip üretilmiş ve gönderme/alma işlemi için tasarlanan yansıtıcı antenin performansı deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu uygulamaya ait sonuçlar ve detaylı bilgi Bölüm 5'te yer almaktadır.

Son bölümde tezde elde edilen genel sonuçlar paylaşılmış ve yorumlanmıştır. Bu tez çalışmasında analitik ve nümerik sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar benzetim programından elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Her iki durum içinde elde edilen sonuçlara göre en iyi durum için prototip ölçümleri yapılmış ve bütün sonuçların tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

## YANSITICI DİZİ ANTENLER

Yansıtıcı dizi antenler, faz dizi antenleri ile yansıtıcının birleşmesiyle oluşturulan anten sistemleridir. Düzlemsel iletken eleman dizilerinden oluşan yeni nesil yüksek kazançlı yansıtıcı antenler parabolik yansıtıcılara alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Yansıtıcı dizi antenler Şekil 2.1’de görüldüğü üzere besleme anteni ile yansıtıcı yüzeyden oluşmaktadır. Besleme anteni olarak horn antenler yaygın olarak tercih edilmektedir. Yansıtıcı dizi antenler tek beslemeli kullanıldığı gibi birden çok besleme anteni ile birlikte de kullanılabilir. Yansıtıcı yüzeylerde en çok kullanılan form dairesel olmasına karşın kare form da tercih edilebilmektedir.



Şekil 2.1 Yansıtıcı dizi anten bileşenleri

Yansıtıcı dizi antenler besleme anteninden gelen hüzmeyi bir veya birkaç noktaya yönlendirebilmektedir. Besleme anteninden gelen elektromagnetik dalga belirli bir faz ile yansıtıcı yüzeye ulaşmaktadır. Yansıtıcı yüzeydeki birim hücrelerin sağladığı fazlar ile istenilen doğrultuda hüzmeye oluşturulmaktadır. Her bir birim hücreden elde edilen saçılmalar ile ana hüzmeye yönlendirilebilmektedir.

### 2.1 Adım Adım Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı

Yansıtıcı dizi anten tasarımı yapılırken ilk olarak yansıtıcı yüzey üzerinde kullanılacak olan birim hücre seçilmelidir. Sonrasında seçilen birim hücrenin analizi yapılarak faz dağılımı elde edilir. Kullanılacak olan besleme anteninin analizi ile elektrik alan ve manyetik alan paternlerinin  $\cos^q$  fonksiyonuna göre  $q$  parametresi belirlenir. Besleme anteni uzak alana konumlandırılacak şekilde açıklık verimlilik analizi yapılarak yansıtıcı yüzeyin boyutları belirlenir.



Yönlendirilmek istenen hüzmelerin yönünü de göz önünde bulundurarak yapılan açıklık verimlilik analizinden elde edilen boyutlarla birlikte faz tablosu oluşturulur. Faz tablosunda yer alan fazlara karşılık gelen birim hücreler yansıtıcı yüzeye yerleştirilerek antenin yansıtıcı yüzeyi tasarlanmış olur.

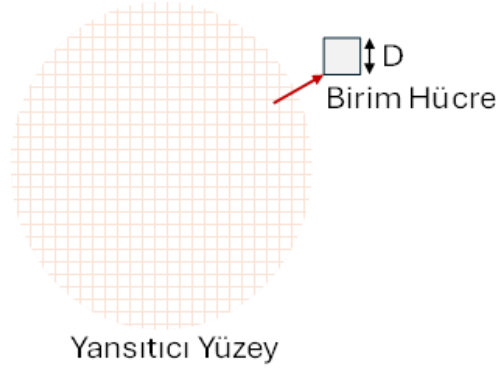
### 2.1.1 Birim Hücre Analizi

Besleme anteninden gelen elektromagnetik dalgalar yansıtıcı yüzeyi aydınlatıldığında birim hücrelerden belli bir faz açısıyla yansımaktadır. Birim hücre elemanlarının fiziksel uzunluklarının değişimiyle, birim elemanın açısal olarak döndürülmesi ile veya faz geciktirmeli hatlar ile faz aralığı belirlenir. En iyi durumda faz aralığının  $360^\circ$ 'ye yaklaşması beklenir. Bundan dolayı  $330^\circ$  veya daha büyük faz aralığı oldukça iyi sonuçlar vermektedir [8]. Belli bir yönde hüzmeler veya hüzmeler oluşturulmak istenildiğinde her bir birim hücreden farklı bir faz açısıyla yansıma olması arzu edilmektedir.

Birim hücreler içinde kullanılan elemanlar genellikle bir formülasyona bağlı yapılardan seçilir. Yansıtıcı yüzey üzerinde görülen periyodik kare yapılar Şekil 2.2'de birim hücreleri temsil etmektedir. Yansıtıcı yüzey üzerinde yer alan birim hücreler piksel görüntüsü oluşturur. Birim hücrenin periyodikliği  $D$  parametresi ile ifade edilir. Şekil 2.2'de gösterilen  $D$  parametresi birim hücrenin genişliğini temsil etmektedir ve Eşitlik 2.1 kullanılarak bulunur [35].

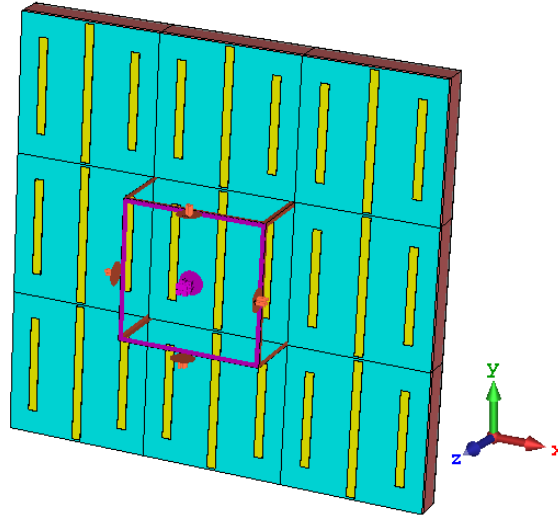
$$D \leq \frac{\lambda}{1 + \sin\theta} \quad (2.1)$$

Burada  $\lambda$  yansıtıcı dizi antenin çalıştığı frekansta serbest uzaydaki dalga boyu ve  $\theta$  hüzmelerin yönlendirilme açısını ifade eder.



**Şekil 2.2** Yansıtıcı yüzey üzerinde yer alan birim hücreler

Birim hücre analizi gerçekleştirilirken birim hücre dalga kılavuzu yaklaşımı, sonsuz dizi yaklaşımı veya dalga kılavuzu simülasyonu yaklaşımı kullanılabilir. Birim hücre analizi bir tam dalga analiz aracı kullanılarak gerçekleştirilebilir. Birim hücre analizi gerçekleştirilirken sonsuz dizi yaklaşımında floquet sınır koşulları uygulanır. Bu sınır koşulu ile birim hücre analizi yapılırken,  $\hat{z}$  doğrultusuna minimum ve maksimum portlarının yerleştirildiği durumda, x-y düzleminde birim hücrenin etrafında başka birim hücreler varmış gibi çözüm uygulanır.  $\hat{z}$  doğrultusu açık uzaydaymış gibi davranır. Bu sınır koşulları frekans domeninde çözüm sunar. Şekil 2.3'te birim hücre sınır koşulları uygulandığı durum için oluşan yapı gösterilmiştir.

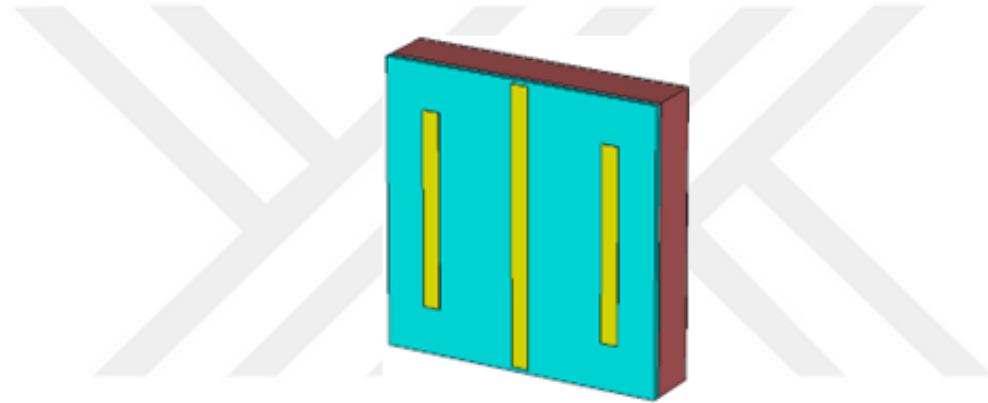


**Şekil 2.3** Sonsuz dizi yaklaşımı ile birim hücre analizindeki yapı

Yansıtıcı dizi anten tasarımında kullanılacak birim hücrenin faz aralığının geniş olması istenir. Ayrıca faz grafiğinin lineer bir şekilde olması beklenir. Faz grafiğinin ani düşüşe sahip olduğu durumda kullanılacak olan faz değerleri

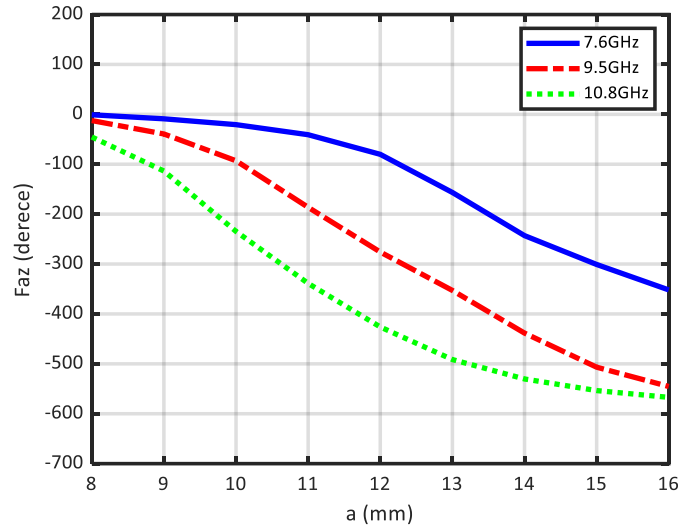
kısıtlanmış olur. Ayrıca üretim toleransı göz önünde bulundurulacak olursa bu durum yansıtıcı dizi antenin performansını düşürecektir.

Birim hücre analizini daha iyi anlamak adına literatürde yer alan yaygın kullanılan birim hücre yapıları incelenmiştir. İlk olarak birim hücrede yer alan dipolün uzunluğuna bağlı olarak faz aralığı elde edilen bir çalışma incelenmiştir [36]. Birim hücrede ortadaki dipolün uzunluğuna bağlı olarak yanındaki dipollerin uzunlukları belirlenir. Ortadaki dipolün uzunluğu değiştirilerek istenilen faz oluşturulmaya çalışılır. Burada dipollerin kalınlıkları ve uzunlukları SD-MoM (Spectral Domain Method of Moment) yöntemi ile belirlenmiştir. Tek katmanlı olan bu yapıda alttaş malzemesi ile toprak düzlemi arasında köpüğe benzer bir malzeme kullanılmıştır. Şekil 2.4'te üç dipolden oluşan birim hücrenin perspektif görünüşü verilmiştir.



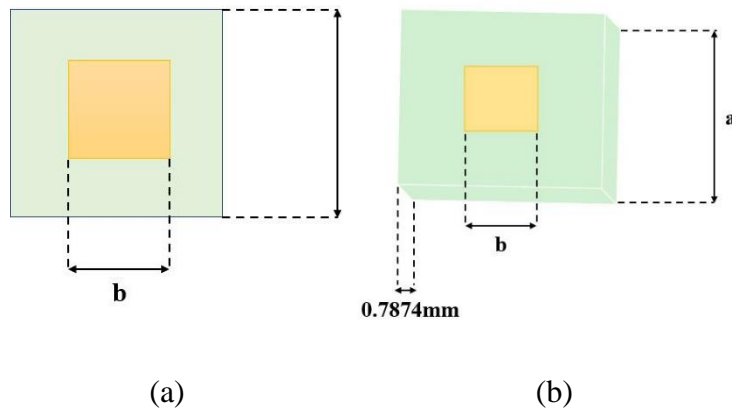
**Şekil 2.4** Üç dipolden oluşan birim hücrenin perspektif görünüşü

Ortadaki dipolün uzunluğunun değiştirilmesi ile 7,6 GHz için yaklaşık olarak  $360^\circ$ , 9.5 GHz için yaklaşık  $500^\circ$  ve 10.8 GHz için yaklaşık  $500^\circ$  faz aralığı elde edildiği Şekil 2.5'te görülmektedir. Faz aralığı elde edilirken eğer arka arkaya iki faz arasında faz  $360^\circ$ 'lik döngü tamamlanmışsa sonraki elde edilen fazlardan  $360^\circ$  çıkarılmaktadır. Bu sayede  $360^\circ$ 'nin üzerinde faz aralıkları oluşmaktadır. Şekil 2.5'te elde edilen faz aralığı yansıtıcı dizi anten tasarımı için yeterlidir. Ayrıca faz grafiğinin geçişleri lineere yakın olduğu için faz aralıkları tasarım için oldukça uygundur.

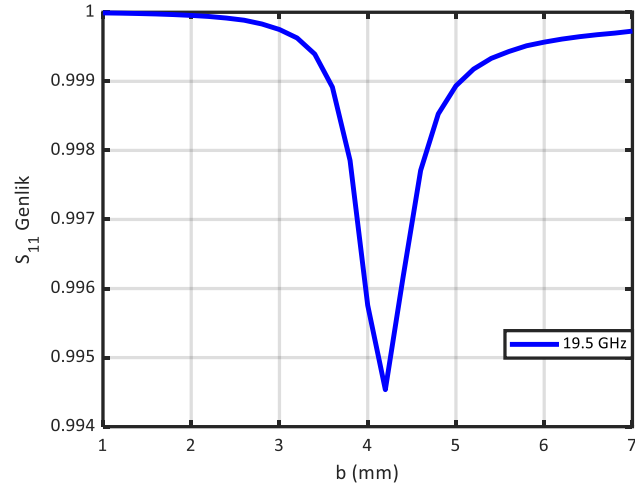


**Şekil 2.5** Orta dipolün uzunluğunun ( $a$  parametresi) değişimi ile elde edilen faz grafiği

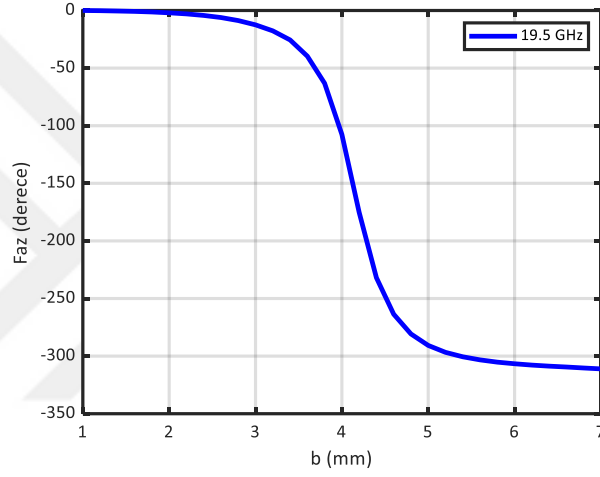
Şekil 2.6’da kare yama formunda bir birim hücrenin perspektif ve önden görünüşü verilmiştir. Birim hücre üst düzlemindeki geleneksel kare yamanın bir ayrıtı  $b$  olarak belirlenmiştir. Bu karenin ayrıtının uzunluğu olan  $b$  parametresi değiştirilerek faz aralığı elde edilmiştir. Birim hücrenin periyodikliği  $a = 7.5\text{mm}$  olarak kullanılmıştır. Alttaş malzemesi olarak Taconic TLX8 ( $\epsilon_r = 2.55$ ) kullanılmıştır. Alttaş malzemesinin yüksekliği  $0,7874\text{ mm}$  olarak alınmıştır. Şekil 2.7(a)’da her bir değer için  $S_{11}$  genlik değeri elde edilmiştir. Şekil 2.7(b)’de görüldüğü üzere  $b$  parametresinin değişimiyle  $300^\circ$  faz aralığı elde edilmiştir. Burada  $b$  parametresi  $1\text{ mm}$ ’den başlayarak  $7\text{ mm}$  ye kadar  $0,2\text{ mm}$  aralıklarla değiştirilerek CST Microwave Office programında benzetimi yapılmıştır.



**Şekil 2.6** Birim hücrenin a) Perspektif; b) Önden görünüşü



(a)

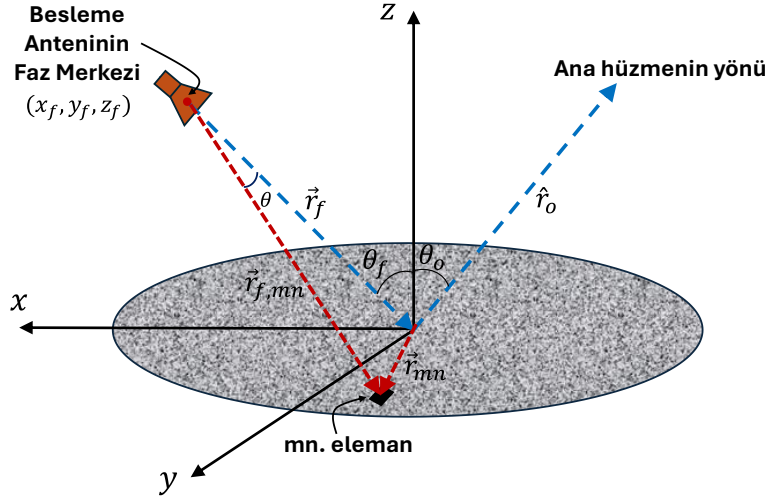


(b)

**Şekil 2.7** Birim hücrenin b parametresine bağlı olarak (a) genlik; (b) faz değişimi

### 2.1.2 Faz Dağılımı

Yansıtıcı dizi antenlerde gelen elektromagnetik dalganın birim elemanlardan saçılması önemlidir. Besleme anteninden gelen elektromagnetik dalga belirli bir yöne yönlendirilmek istendiğinde yansıtıcı yüzeyde yer alan birim hücreler kullanılır. Yansıtıcı dizi anten konfigürasyonu Şekil 2.8’de verilmiştir. Besleme antenin faz merkezi kartezyen koordinat sistemine göre  $(x_f, y_f, z_f)$  noktasında yer almaktadır.  $\hat{r}_0$  ile yönlendirilmek istenen hüzmelerin yönü yani ana hüzmelerin yönü ifade edilmiştir. Besleme anteninin faz merkezinden orijine olan vektör  $\vec{r}_f$  ile ifade edilirken, mn. birim hücreye giden vektör  $\vec{r}_{f,mn}$  ile ifade edilmiştir. Orijinden mn. birim hücreye olan vektör  $\vec{r}_{mn}$  ile ifade edilmiştir. İlerleyen fazın belirlenmesi için Eşitlik 2.2 ve 2.3’te yer alan matematiksel ifadeler kullanılmaktadır [8].



Şekil 2.8 Yansıtıcı dizi anten konfigürasyonu

$$\phi_{pp} = -k_0 \vec{r}_{mn} \cdot \vec{r}_o \quad (2.2)$$

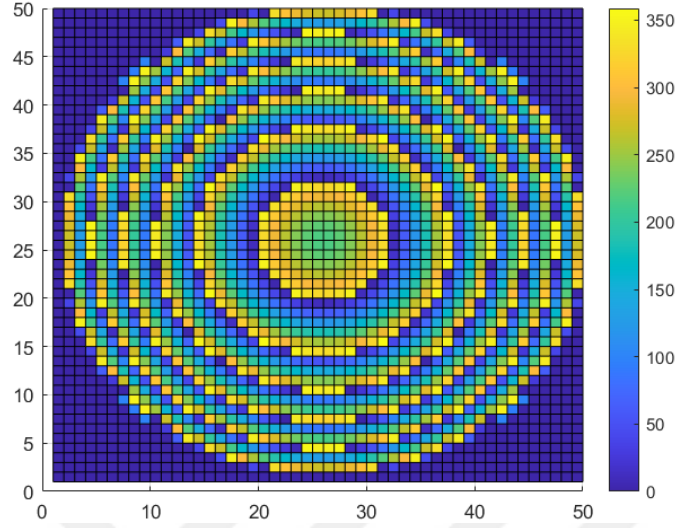
$$\phi_{pp} = -k_0 (x_i \sin \theta_0 \cos \phi_0 + y_i \sin \theta_0 \sin \phi_0) \quad (2.3)$$

Burada pp alt indisi ilerleyen fazı (progressing phase) ifade etmektedir. Her bir birim hücrenin merkez koordinatlarını  $x_i, y_i$  şeklinde gösterilmiştir.  $k_0$  serbest uzay dalga sayısını ifade ederken  $\theta$  ve  $\phi$  küresel koordinat sistemindeki açılardır. Besleme anteninden her bir birim hücreye olan uzaklık farklıdır. Bundan dolayı oluşacak olan gecikme ile hüzme belirli bir yöne gönderilebilir. Eşitlik (2.4)'te yer alan  $\Psi_0$  bağıl faz eklenmesi durumunda kullanılır.

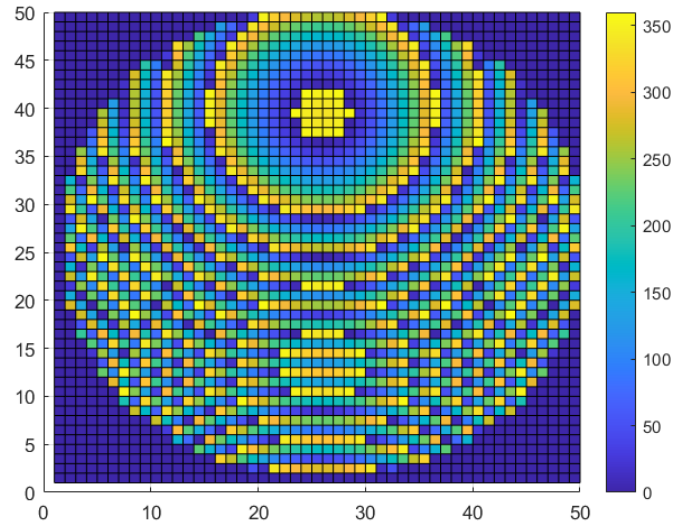
$$\Psi_i = k_0 (r_{f,mn} - \vec{r}_{mn} \cdot \vec{r}_o) + \Psi_0 \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4) kullanılarak yansıtıcı dizi anten için gerekli faz dağılımının elde edildiği MATLAB kodu yazılmıştır. Bu kod kullanılarak belirlenen yarıçap içerisinde konumlanan birim hücrelerin istenilen doğrultuda hüzme oluşturabilmesi için gerekli faz dağılımı elde edilmektedir. Birim hücre eleman sayısı, birim hücrelerin boyutları gibi değişkenler koda girdi olarak verilerek istenen kriterlerle uyumlu faz dağılımını elde edilmektedir. Şekil 2.9'da merkezden beslemeli ( $\theta = 0^\circ$ ) ve besleme anteninin faz merkezinin yüksekliği  $H = 276$  mm olduğu durumda,  $50 \times 50$  elemanlı yansıtıcı dizinin ana hüzmesinin  $\theta = 0^\circ$  ve  $\theta = 20^\circ$ 'ye yönlendirilmesi için gerekli faz dağılımları verilmiştir. Şekilde faz tablosunun yanında yer alan renk barı ile faz değerleri görülmektedir. Mavi renkten sarıya doğru faz değeri artmaktadır. Şekil 2.9'da istenilen doğrultunun  $\theta$  açısına bağlı

olarak faz dağılımı görülmektedir. Burada 7,5 mm uzunluğa sahip kare mikroşerit birim hücreler kullanılarak, 30 GHz frekansında  $50 \times 50$  adet elemanlı yansıtıcı dizinin analizi yapılmıştır. Bu durumda yansıtıcı dizi antenin yarıçapı 375 mm'dir.



(a)



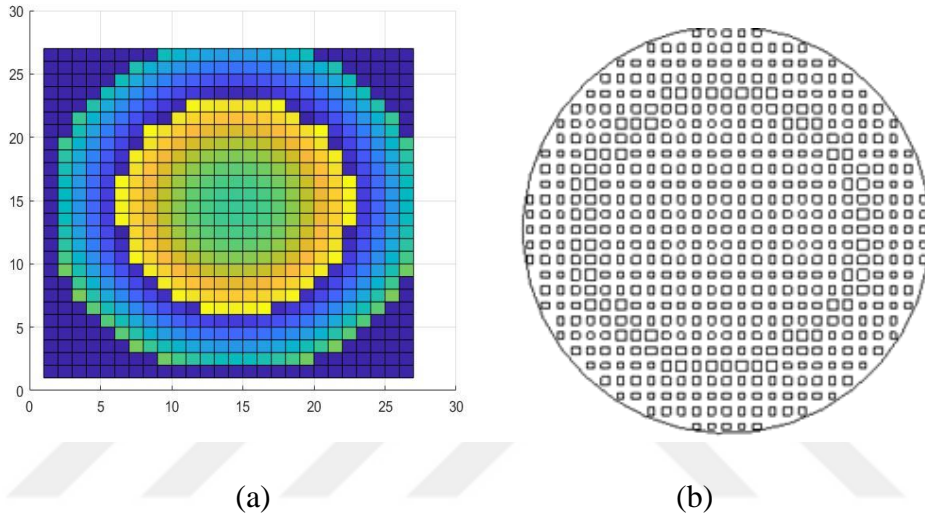
(b)

**Şekil 2.9** 50x50 elemanlı yansıtıcı dizinin merkezden beslemeli durumda ana hüzmeyi yönlendirmesi için faz dağılımı (a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 20^\circ$

### 2.1.3 Yansıtıcı Yüzey Tasarımı

Yansıtıcı yüzey tasarımında Bölüm 2.1.2'de elde edilen faz değerlerinin yer aldığı faz tablosu kullanılmaktadır. Birim hücre analizinden elde edilen faz değerleri kontrol edilir. Faz grafiği lineere yakın olmadığı durumda faz değerlerinin hızlı değiştiği kısımda daha küçük aralıklarla analiz yapılarak faz aralıkları

belirginleştirilebilir. Yansıtıcı yüzey tasarımında birim hücre analizinden elde edilen faz değerleri direkt kullanılabilceği gibi fazlar kuantalama işlemi yapılarak belirli aralıklara ayrılabilir. Faz tablosunda yer alan faz değerlerine karşılık gelen birim hücreler yansıtıcı yüzeye eklenerek tasarım tamamlanmış olur. Örnek olarak, besleme anteninin  $\varphi = 0^\circ$  düzleminde,  $\theta = 15^\circ$  açısında konumlandırıldığı,  $H$  yüksekliği 276 mm olarak belirlenen yansıtıcı dizi anteni ele alalım. Bu durumda besleme anteninin faz merkezi  $(73,95,0,276)$  koordinatına yerleştirilmiştir. Yansıtıcı dizi, merkezi orijinde olacak şekilde  $x$ - $y$  düzleminde konumlandırılmıştır.



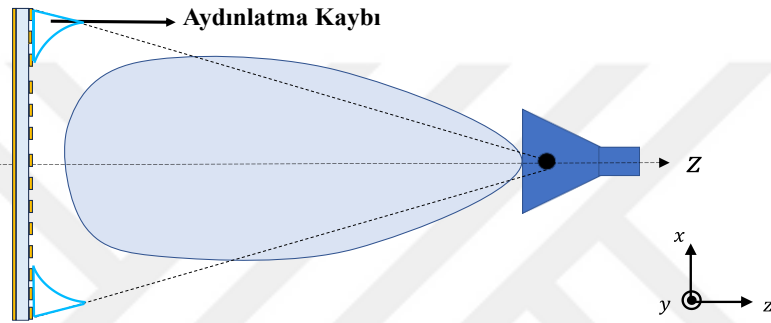
**Şekil 2.10** Yansıtıcı dizinin (a) faz dağılımı; (b) önden görünüşü

Yansıtıcı dizi tasarımında öncelikle faz dağılımının yapılması gerekir. Şekil 2.10(a)'da  $\varphi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  yönlendirmesi için gerekli faz dağılımı gösterilmektedir. Burada elde edilen faz dağılımına göre elemanlar yerleştirilecektir. Şekil 2.7'de yer alan birim hücre analizinden elde edilen fazlar kullanılmıştır. Birim hücrenin fiziksel boyutunun değiştirilmesi ile elde edilen faz aralığındaki boyutlar esas alınarak Şekil 2.10(a)'da elde edilen fazlara karşılık gelen birim hücreler kullanılarak Şekil 2.10(b)'deki yansıtıcı dizi elde edilmektedir. Besleme anteninin  $z$ -düzlemi ile yaptığı açı  $\theta_f = 15^\circ$  ve hüzmenin yönlendirilme açısı  $\theta_o = 15^\circ$  olarak seçilmiştir. Besleme anteni merkezden besleme şekilde yerleştirilmediği için blokaj etkisinden kaçınılmıştır.

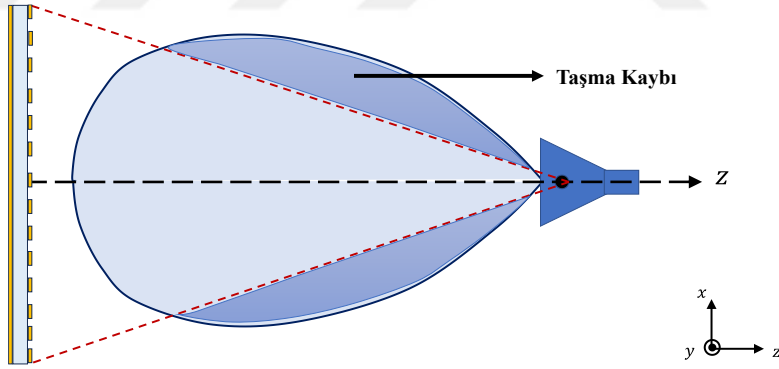


## 2.2 Açıklık Verimlilik Analizi

Açıklık verimliliği analizi, yansıtıcı yüzeyin fiziksel boyutunu ve besleme anteninin faz merkezinin yansıtıcı yüzeye olan uzaklığını belirlemek için yapılır. Yansıtıcı dizinin açıklık verimliliği,  $\eta_a$ , aydınlatma ve taşma verimliliklerinin çarpımı ile hesaplanır [37]. Aydınlatma verimliliği,  $\eta_i$ , alan genliğinin anten açıklığı üzerinde ne kadar düzgün dağıldığını ölçerken, taşma verimliliği,  $\eta_s$ , toplam yayılan güç ile yansıtıcı yüzey üzerine gelen güç arasındaki oran olarak tanımlanır [38]. Şekil 2.11’de Yansıtıcı antende aydınlatma verimliliğinin gösterimi verilirken Şekil 2.12’de taşma verimliliğinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.11 Yansıtıcı antende aydınlatma verimliliğinin gösterimi

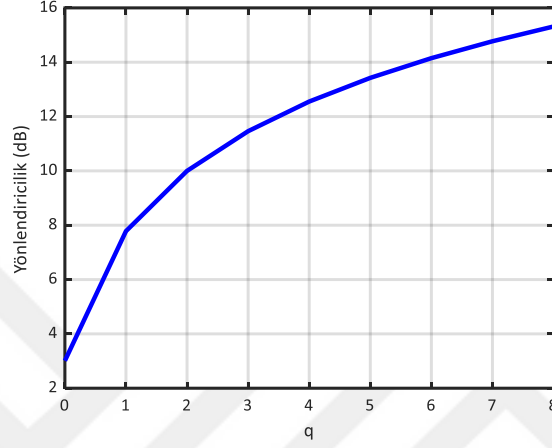


Şekil 2.12 Yansıtıcı antende taşma verimliliğinin gösterimi

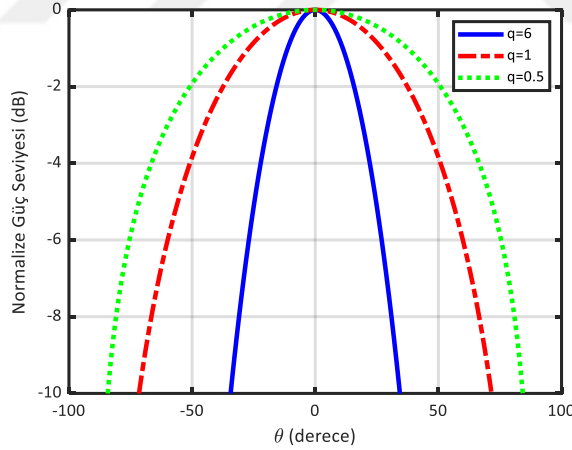
Açıklık verimliliği hesabı yapılırken merkezden beslemeli durum için analitik olarak da çözüm uygulanabilir. Besleme anteni ve saçılma elemanlarının ışınma özelliklerinin benzetimini yapabilmek adına en basit yöntem  $\cos^q$  modelidir [37]. Besleme antenin normalize ışınma paterni aşağıdaki gibi kabul edilir.

$$U_f(\theta, \varphi) = \begin{cases} \cos^{2q} \theta & 0 < \theta < \pi/2 \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (2.5)$$

Besleme anteninin yönlülüğü ve oluşturduğu hüzmeyi tek bir  $q$  parametresi belirler. Şekil 2.13'te  $q$  parametresinin değişimi ile yönlendiriciliğin değişimi verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere  $q$  parametresinin değeri ne kadar büyük olursa, yönlendiricilik o kadar yüksek olur. Şekil 2.14'te verilen farklı  $q$  değerleri için normalize güç seviyeleri,  $q$ 'nın değerinin arttıkça anten hüzmelerinin daraldığını göstermektedir.



Şekil 2.13  $q$  parametresi ile yönlendiriciliğin değişimi



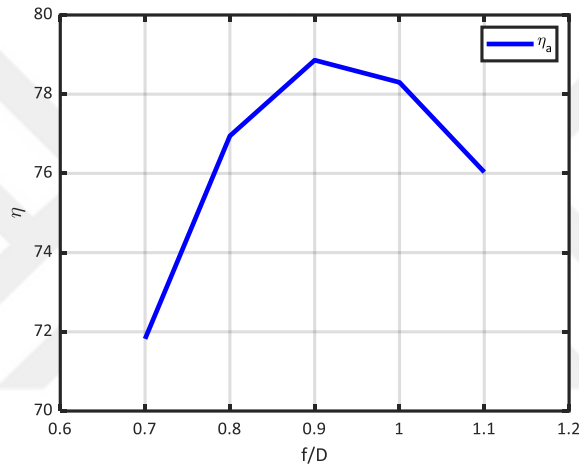
Şekil 2.14 Farklı  $q$  değerleri için normalize güç seviyesi

Eşitlik 2.6 ve 2.7'de analitik olarak sırasıyla yayılma kaybı ve aydınlatma kaybının formülleri verilmiştir [37].

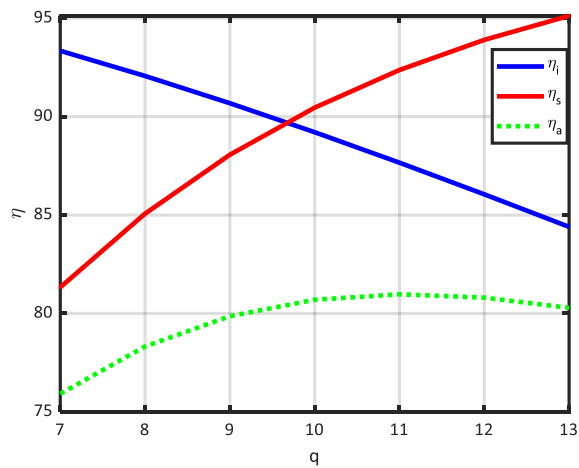
$$\eta_s = 1 - \cos^{2q+1} \theta \quad (2.6)$$

$$\eta_{ill} = \frac{\left[\left(\frac{1-\cos^{q+1} \theta}{q+1}\right) + (1-\cos^q \theta/q)\right]^2}{2 \tan^2 \theta [(1-\cos^{2q+1} \theta)/(2q+1)]} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.6 ve 2.7’de görüleceği üzere bütün eşitlik  $\theta$  değişkeni üzerine kurulmuştur. Bu eşitlik sadece dairesel yansıtıcı dizi anten sisteminde geçerlidir. Kare yansıtıcı dizi anten için kullanılacak olan formül farklı olmaktadır. Yansıtıcı yüzeyin şekli dairesel olmadığı durumda eşitliğin tekrar bulunması beklenilmektedir. Bu eşitliklerin eksen dışı analiz için sağlıklı sonuçlar vermeyeceği görülmektedir. Dairesel bir yansıtıcı dizi antenin yarıçapı 0,5m olsun.  $f$  parametresi besleme anteninin faz merkezinin yüzeye olan uzaklığını ifade ederken  $D$  yansıtıcı yüzeyin çapını ifade etmektedir. Bu anten 32 GHz frekansında çalışmakta olup  $f/D$  oranı 1 olarak belirlenmiştir. Ka bandında çalışan yansıtıcı dizi antenin  $q$  parametresinin değişimiyle açıklık verimliliği arasındaki ilişkisi Şekil 2.15’te yer almaktadır[37].



Şekil 2.15  $f/D$  oranının değişimi ile açıklık veriminin değişimi



Şekil 2.16  $q$  parametresinin değişimi ile açıklık verimlilik analizi

Açıklık verimliliği hesabında her iki durum için nümerik olarak da çözüm uygulanabilmektedir. Bu iki parametre, yansıtıcı dizinin ve besleme kaynağının

şeklinin bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.8'de gösterilen yansıtıcı dizi sistemi için yayılma verimliliği ( $\eta_s$ ), aşağıda verildiği gibi, besleme anteni tarafından yayılan toplam gücün yansıtıcı yüzeye gelen güce oranıyla hesaplanır:

$$\eta_s = \frac{\iint_A \vec{P}(\vec{r}_{f,mn}) \cdot d\vec{s}}{\iint_{sphere} \vec{P}(\vec{r}_{f,mn}) \cdot d\vec{s}} \quad (2.8)$$

Burada  $\vec{P}(\vec{r}_{f,mn})$  Poynting vektörünü temsil eder.  $H$  parametresi besleme anteninin faz merkezinin yansıtıcı yüzeye dik uzaklığını ifade eder. Nümerik bir yaklaşım kullanılarak, kartezyen koordinat düzlemindeki açıklık verimliliğini çözmek için aşağıdaki denklem kullanılabilir [38]:

$$\eta_s = \frac{2q+1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} (H/r_{f,mn}^3) \left( \frac{r_f^2 + r_{f,mn}^2 - r_{mn}^2}{2r_f r_{f,mn}} \right)^{2q} \rho d\rho d\varphi. \quad (2.9)$$

Aydınlatma verimliliği ( $\eta_i$ ) Eşitlik (2.10) ile hesaplanır:

$$\eta_i = \frac{1}{A_a} \frac{|\iint_A I(A') dA'|^2}{\iint_A |I(A')|^2 dA'}. \quad (2.10)$$

Burada  $I(A')$  yansıtıcı yüzey üzerindeki genlik dağılımını ifade eder ve bu dağılım anten besleme paternine ve yansıtıcı elemanın paternine bağlıdır. Alternatif olarak, kartezyen koordinat düzleminde dizi açıklıklarını nümerik olarak çözmek için aşağıdaki formül kullanılabilir [38]:

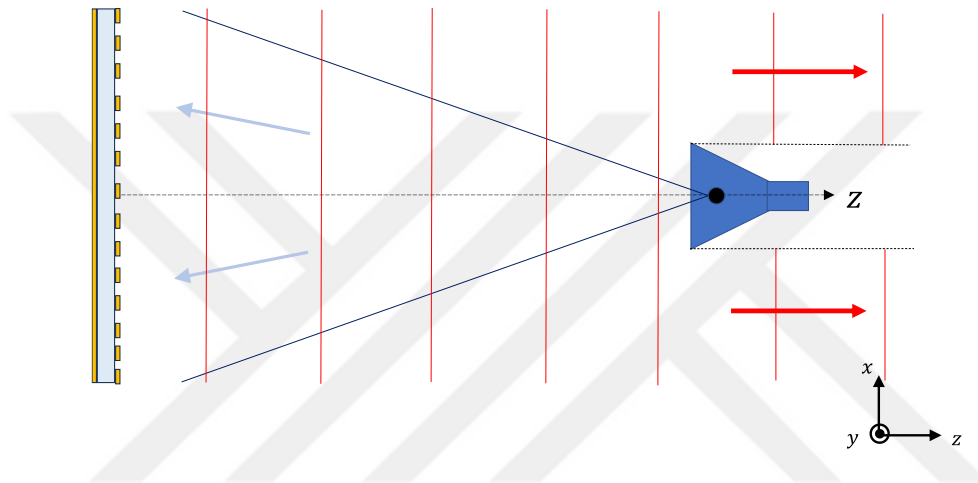
$$\eta_i = \frac{4}{\pi D^2} \frac{\left[ \int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \left( \frac{1}{r_{f,mn}^{1+q_e}} \right) \left( \frac{r_f^2 + r_{f,mn}^2 - r_{mn}^2}{2r_f r_{f,mn}} \right)^q \rho d\rho d\varphi \right]^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{D/2} \left( \frac{1}{r_{f,mn}^{2+2q_e}} \right) \left( \frac{r_f^2 + r_{f,mn}^2 - r_{mn}^2}{2r_f r_{f,mn}} \right)^{2q} \rho d\rho d\varphi} \quad (2.11)$$

Burada  $q_e$  eleman paternine aittir ve genellikle kullanım kolaylığı için 1 seçilir. Eşitlik 2.8-2.11'de verilen formülasyonlar dairesel açıklık için merkezden besleme durumunda kullanılabilir. Yansıtıcı sistemlerde besleme blokajını önlemek için çoğunlukla eksen dışı beslemeler tercih edilir. Ancak, eksen dışı besleme

durumunda, hüzme yansıtıcı yüzeyi eliptik olarak kesecektir. Bu nedenle, aşağıdaki sınır koşulu uygulanmalıdır [38]:

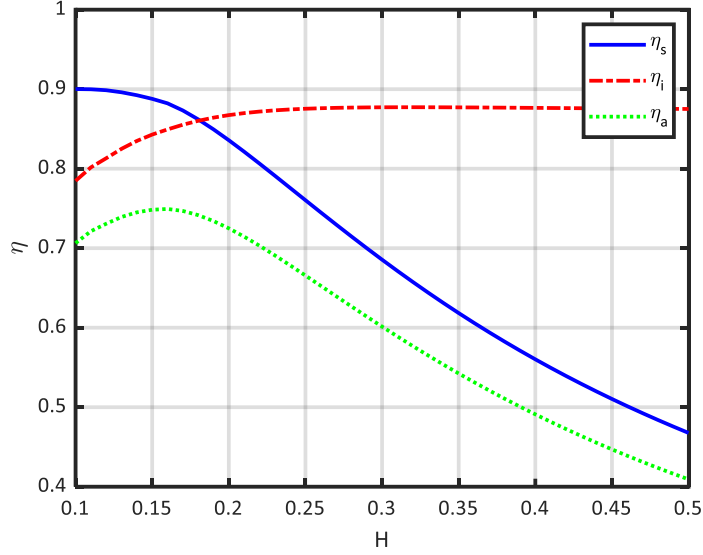
$$x^2 + (y \cos \theta_f)^2 = \left( y \sin \theta_f + \frac{H}{\cos \theta_f} \right)^2 \tan^2 \alpha \quad (2.12)$$

Burada  $\alpha$ , besleme hüzmesinin yarım güç açıklık açısını temsil eden açıdır. Merkezden besleme durumunda yönlendirilen hüzme besleme antenin üzerine doğru gelir. Besleme antenin fiziksel yapısı sebebiyle yansıyan hüzme engellemenine blokaj etkisi denir ve Şekil 2.17’de bu durum gösterilmiştir.



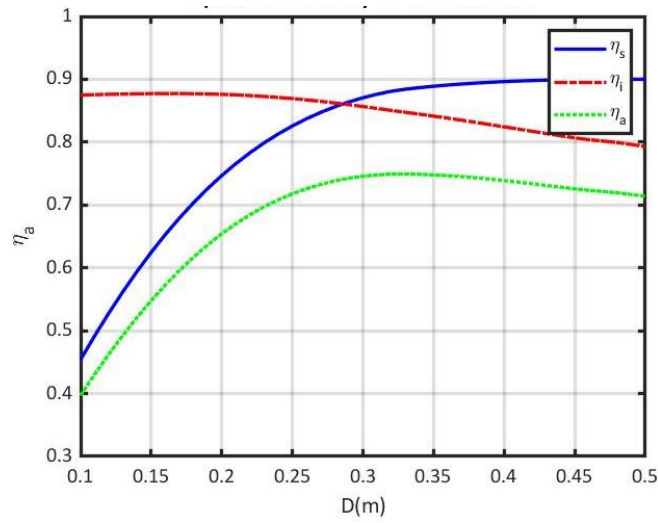
**Şekil 2.17** Yansıtıcı dizi antenlerde blokaj etkisi

Blokaj etkisi sebebiyle yansıtıcı dizi antende verimlilik düşecektir. Bu sebeple genel olarak yansıtıcı dizi anten tasarımlarında eksen dışı besleme tercih edilir. Yansıtıcı dizi anteninde blokaj etkisinden kaçınmak için besleme horn anteni  $\varphi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = -15^\circ$  açısına yerleştirilerek analiz yapılmıştır. Yönlendirilmek istenilen hüzmenin yönü  $\varphi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  olacak şekilde yansıtıcı dizi tasarlanmıştır. Besleme anteni analizinde 19,5 GHz frekansında,  $q$  parametresinin 6,3 olarak belirlendiği durum için Şekil 2.18’de yer alan sonuçlar elde edilmiştir. Açıklık verimlilik analizine göre yansıtıcı dizi antenin yarıçapı boyunca 25 birim hücreden oluşacaktır. Bir birim hücrenin boyutu 7,5 mm olduğu için açıklığın boyutu olan  $D$  parametresi 187,5 mm’dir. Besleme antenin ana hüzmesi yansıtıcı dizi antenin merkezine doğru ışına yapacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Bu parametreler ile açıklık verimlilik analizine göre besleme antenin yüksekliği belirlenir.



**Şekil 2.18** Eksen dışı besleme durumu için açıklık verimlilik analizi

Şekil 2.18'den en iyi sonucun yaklaşık 150 mm'de olduğu görülmektedir. Besleme anteni için  $H$  yüksekliği 150 mm olarak belirlenir. Ancak besleme anteninin uzak alan bölgesinin 19,5 GHz'de 267 mm'den başlaması sebebiyle bu mesafe seçildiğinde verimlilik kriterlerinden ödün verilmektedir. Şekil 2.19'da  $H = 276$  olduğu durumda elde edilen açıklık verimlilik analiz sonuçları verilmiştir. Şekil 2.19'da görüldüğü üzere besleme antenimizi uzak alan bölgesine yerleştirdiğimizde en uygun açıklık verimliliği yaklaşık 0,75 değerindedir. Optimum yansıtıcı yüzeyin çap uzunluğu  $D$ , 300mm olmalıdır.  $H$  uzunluğu 276 mm olarak seçilen durum için yansıtıcı yüzey yarıçapı boyunca 40 birim hücreden oluşacaktır.



**Şekil 2.19**  $H=276$  mm için açıklık verimlilik analizi

### 2.3 Yansıtıcı Dizi Antenlerde Işıma Analizi

Yansıtıcı dizi antenlerin ışımaya analizi için farklı metotlar mevcuttur. Bu yöntemler dizi teorisi, açıklık teorisi ve tam dalga çözüm yöntemidir. Dizi teorisi hızlı ve kesin bir çözüm sunarken tek düzlem üzerinde çözüm yapacağı için çapraz polarizasyon için çözüm vermez. Açıklık teorisi ile iki düzlem üzerinde çözüm üretilebilir fakat kodlaması dizi teorisine göre karmaşıktır. Açıklık teorisi çapraz polarizasyon için çözüm oluşturur. Tam dalga çözüm yöntemi olarak MOM, FDTD, FIT gibi çözüm metotları kullanılabilir. Burada elde edilen benzetim sonuçları üç boyutlu olarak elde edildiğinden çapraz polarizasyon gibi sonuçları da üretir. Ancak problem matrisinin boyutu büyük olduğu için çözüm uzun süre almaktadır. Problem uzayı büyük olduğu durumlarda bilinmeyen sayısı artacağından dolayı ancak işlem kapasitesi yüksek bilgisayarlar ile çözüm üretilebilir.

Işıma analizi yapılırken ilk olarak besleme anteninin ışımaya paterni ideal bir forma döndürülür. Bunun için en uygun form  $\cos^q$  modelidir [7].

$$E^{Fx} = A_0(\hat{\theta}C_E(\theta)\cos(\varphi) - \hat{\varphi}C_H(\theta)\sin\theta)\frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.13)$$

$$E^{Fy} = A_0(\hat{\theta}C_E(\theta)\sin(\varphi) + \hat{\varphi}C_H(\theta)\cos\theta)\frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.14)$$

$$E^{Fcp} = A_0e^{j\tau\varphi}(\hat{\theta}C_E(\theta) + \hat{\varphi}j\tau C_H(\theta))\frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.15)$$

$A_0$  kompleks bir sabittir.

$$C_E(\theta) = (\cos\theta)^{qE} \quad (2.16)$$

$$C_H(\theta) = (\cos\theta)^{qH} \quad (2.17)$$

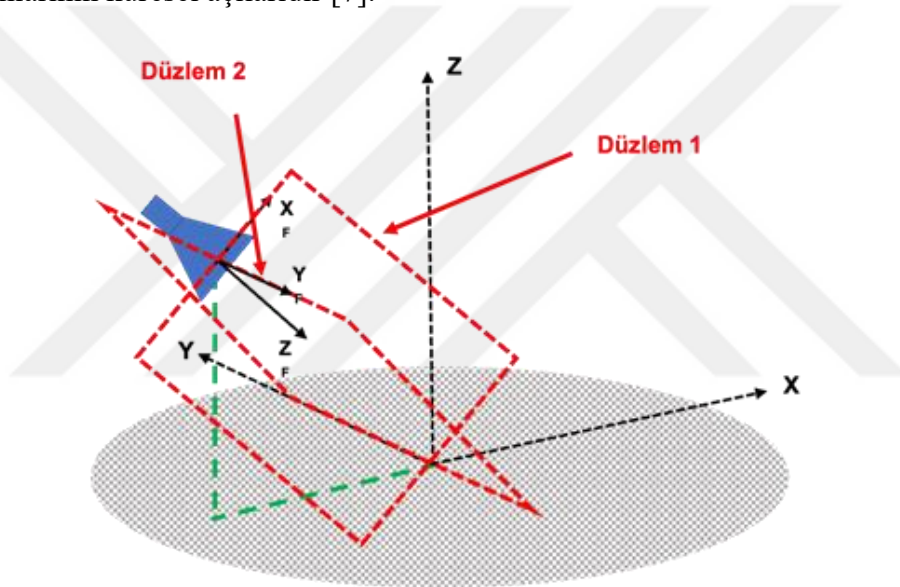
Eşitlik 2.12-2.15'te yer alan  $\tau$  parametresi polarizasyon duyarlılığını belirler. Eşitlik 2.16-2.17'de yer alan  $qE$  ve  $qH$ 'nin eşit olduğu durum dairesel polarizasyonu ifade ederken eşit olmadığı durum eliptik polarizasyonu ifade etmektedir. Besleme antenin  $q$  parametresi belirlenirken elektrik alan ve magnetik alanın normalize paternlerine bakılır. Her ikisine en yakın olan durumdaki  $q$  parametresi değeri kullanılır.

Işıma paterni analizi yapılırken yansıtıcı yüzeyde yer alan birim elemanlar ve besleme anteninin paterni aynı düzlem üzerinde yer almalıdır. Burada yer alan

eşitlikleri uygulayabilmek adına bütün bileşenlerin aynı koordinat sistemi ile ifade edilmesi gereklidir. Şekil 2.20’de yer alan konfigürasyonda görüldüğü üzere bütün yansıtıcı dizi anten sistemi tek bir kartezyen koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Gelen elektrik alan her bir birim hücrenin koordinatı farklı olduğundan birim hücrenin merkezinde hesaplanmalıdır. Eşitlik 2.18 kullanılarak kartezyen sistemi bileşenlerine dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} E^{Fx} \\ E^{Fy} \\ E^{Fz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta^F \cos\varphi^F & \cos\theta^F \cos\varphi^F & -\sin\varphi^F \\ \sin\varphi^F \sin\varphi^F & \cos\theta^F \sin\varphi^F & \cos\varphi^F \\ \cos\varphi^F & -\sin\varphi^F & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_\theta^F \\ E_\varphi^F \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Bu denklemde  $(\theta^F, \varphi^F)$ , besleme koordinat sistemindeki yansıtıcı dizi elemanlarının küresel açılarıdır [7].



Şekil 2.20 Yansıtıcı dizi antenin koordinat sistemi

### 2.3.1 Dizi Teorisi

Elektriksel olarak büyük antenler için güçlü bir analiz tekniği olan dizi teorisi diğer analiz yöntemlerine göre çok hızlı sonuçlar vermektedir. Özellikle üç boyutlu simülasyon programları uzun zaman alırken, dizi teorisi ile yansıtıcı antenin uzak alan ışınma paterni saniyeler içinde hesaplanabilmektedir.  $M \times N$  elemandan oluşan bir yansıtıcı antenin uzak alan ışınma paternini hesaplamak için aşağıda yer alan eşitlikler kullanılır [7].

$$E(\hat{r}) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \vec{A}_{mn}(\hat{r}) \cdot \vec{I}(\vec{r}_{mn}) \quad (2.19)$$

$$\hat{r} = \hat{x} \sin \theta \cos \varphi + \hat{y} \sin \theta \sin \varphi + \hat{z} \cos \theta \quad (2.20)$$



Burada  $\vec{A}_{mn}$ ,  $\vec{I}$  sırasıyla birim hücre paternleri, birim hücre uyarımları için tanımlanan vektör fonksiyonlarıdır ve denklemlerdeki geri kalan vektörler ve açılar Şekil 2.8’de tanımlanmıştır. Skaler eleman patern fonksiyonu  $\cos^q$  modeli ile Eşitlik (2.21)’deki gibi verilir:

$$A_{mn}(\theta, \varphi) \triangleq \cos^{qe} e^{jk(\vec{r}_{mn} \cdot \hat{r})} \quad (2.21)$$

Gelen alan ve eleman özelliği, eleman uyarma fonksiyonunu tanımlamak için kullanılır,  $I(r_{m,n})$  tarafından tanımlanır:

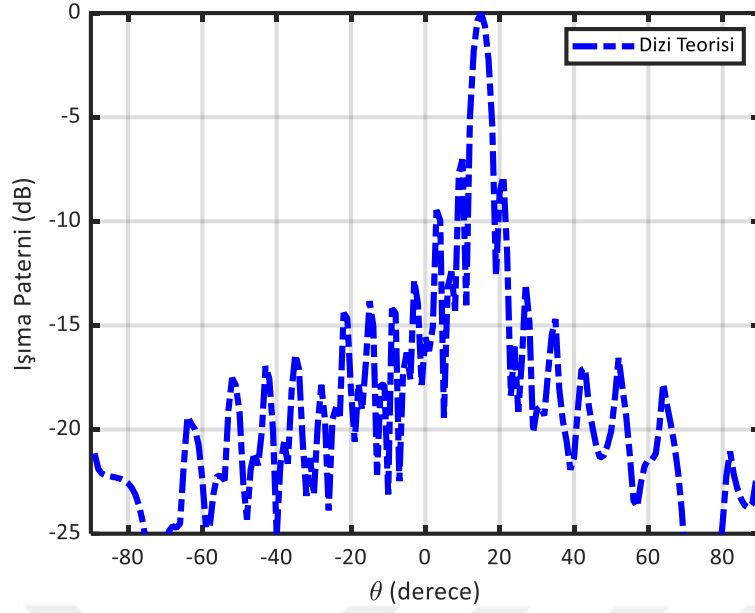
$$I(r_{m,n}) = \frac{\cos^q \theta_f(m, n)}{|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f|} \cdot e^{-jk(|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f|)} \cdot |\Gamma_{mn}| e^{j\phi_{mn}} \quad (2.22)$$

Burada  $|\Gamma_{mn}|$  doğrudan birim hücre analizinden elde edilir. Son olarak, yansıtıcı dizinin radyasyon paterni şu şekilde elde edilir:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \cos^{qe} \theta \frac{\cos^q \theta_f(m, n)}{|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f|} e^{-jk(|\vec{r}_{mn} - \vec{r}_f| - \vec{r}_{mn} \cdot \hat{r})} \cos^{qe} \theta_e(m, n) e^{j\phi_{mn}} \quad (2.23)$$

Genel patern yapısı göstergeleri, özellikle ana hüzme genişliği ve hüzme yönü dizi teorisi ile başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Ancak, antenin çapraz polarizasyon karakteristikleri, besleme polarizasyonları dahil edilmediğinden ve basitleştirilmiş bir  $\cos^q$  modeli kullanıldığından dizi teorisi tarafından hesaplanamaz.

Besleme anteninin 19.5 GHz için q parametresi 6,3, faz merkezinin yüksekliği 276 mm olduğu durumda besleme anteninin z-düzlemi ile yaptığı açı  $\theta_f = -15^\circ$  ve hüzmenin açısı  $\theta_o = 15^\circ$  olacak şekilde ayarlanmıştır. Yansıtıcı yüzey 7,5 mm birim hücrelerden oluşan 300 mm yarıçapa sahiptir. Şekil 2.6(b)’de verilen birim hücrenin saçılma parametreleri kullanılarak dizi teorisi ile analiz yapıldığında Şekil 2.21’de verilen normalize ışınma paterni elde edilir. Analiz için gerekli olan  $|\Gamma_{mn}|$  CST Microwave Office programı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 2.6(a)’da birim hücrenin  $|\Gamma_{mn}|$  değişimi incelendiğinde değerinin 1’e çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sebeple değeri 1 olarak kabul edilmiştir. Ana hüzmenin tam olarak  $\theta_o = 15^\circ$ ’ye yöneldiği görülmektedir.



Şekil 2.21 Dizi teorisi ile elde edilen ışım paterni

### 2.3.2 Açıklık Teorisi

Açıklık teorisinde yansıtıcı yüzey üzerindeki birim hücelere gelen elektrik alan birim hücre saçılma matrisleri kullanılarak yansıyan alanlar elde edilir [7].

$$\begin{bmatrix} E_x^{ref}(m, n) \\ E_y^{ref}(m, n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{xx} & \Gamma_{xy} \\ \Gamma_{yx} & \Gamma_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^{inc} \\ E_y^{inc} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Eşitlik (2.25) ve (2.26)'de verilen akım ifadeleri kullanılarak magnetik alanlar elde edilir [7].

$$J_{sx}(x, y) = H_y^i(x, y) \quad , \quad J_{sy}(x, y) = -H_x^i(x, y) \quad (2.25)$$

$$M_{sx}(x, y) = E_y^i(x, y) \quad , \quad M_{sy}(x, y) = -E_x^i(x, y) \quad (2.26)$$

Elektrik ve magnetik alan ifadelerini uzak alanda ifade edebilmek için Eşitlik 2.27-2.29 kullanılır.

$$E_r = 0, H_r = 0 \quad (2.27)$$

$$E_\theta = -\frac{jke^{jkr}(L_\theta - \eta N_\theta)}{4\pi r} \quad , \quad H_\theta = \frac{jke^{jkr}}{4\pi r} (N_\phi - L_\theta/\eta) \quad (2.28)$$

$$E_\phi = \frac{jke^{jkr}}{4\pi r} (+ - \eta N_\theta) \quad , \quad H_\phi = -\frac{jke^{jkr}}{4\pi r} (N_\theta - L_\phi/\eta) \quad (2.29)$$

Yansıtıcı yüzeyde teğet akımları kullanılarak  $N$  ve  $L$  fonksiyonları aşağıdaki şekilde elde edilir [7].

$$N_{\theta} = \iint (J_x \cos\theta \cos\varphi + J_y \cos\theta \sin\varphi) e^{jk(x'u+y'v)} ds' \quad (2.30)$$

$$N_{\varphi} = \iint (-J_x \sin\varphi + J_y \cos\varphi) e^{jk(x'u+y'v)} ds' \quad (2.31)$$

$$L_{\theta} = \iint (M_x \cos\theta \cos\varphi + M_y \cos\theta \sin\varphi) e^{jk(x'u+y'v)} ds' \quad (2.32)$$

$$L_{\varphi} = \iint (-M_x \sin\varphi + M_y \cos\varphi) e^{jk(x'u+y'v)} ds' \quad (2.33)$$

Buradaki hesaplamalar yansıtıcı yüzey üzerinde yapılacağından integralin sınırları yüzey ile sınırlıdır.  $N$  ve  $L$  birim hücre sayısı ile sınırlıdır.  $dx$  ve  $dy$  ise birim hücrenin sınırlarını ifade etmektedir [7]. Burada yer alan eşitlikleri sinc fonksiyonunu kullanarak daha kolay bir şekilde ifade edebiliriz. Bu yöntem ile dizi teorisinde ulaşamadığımız çapraz polarizasyon çözümüne ulaşabiliriz. Ancak hesaplamalar daha karmaşık olduğu için analiz için gereken süre artacaktır.

### 2.3.3 Tam Dalga Analizi

Bu tez çalışması kapsamında tam dalga analizi CST Microwave Office programı kullanılarak yapılmıştır. CST programı analiz için sonlu integrasyon tekniğini kullanmaktadır. Sonlu integrasyon tekniği Maxwell denklemlerinin integral formlarını ayrıklaştırarak matrisler oluşturmaktadır. Yaklaşıklık gerektirmeyen problemleri matrislere dönüştürerek ve numerik analiz metotlarını kullanarak sonuç üretmektedir. CST programı yansıtıcı dizi anten için 3 boyutlu çözüm üretmektedir. Saçılma parametreleri, yönlendiricilik, kazanç, çapraz polarizasyon gibi sonuçları elde etmemizi sağlamaktadır. Yansıtıcı dizi antenlerin çözümünü zaman domaininde yapmak gerekmektedir. Ayrıca yansıtıcı yüzey tasarımı yapılırken api kullanarak MATLAB ile bağlantı sağlanmaktadır. Bu bağlantı sayesinde tasarım parametreleri koda girdi olarak verilerek birim hücre analizinden elde edilen fazlar ile yansıtıcı yüzey tasarımı kolaylıkla gerçekleştirilmektedir.

## YÜKSEK VERİ HIZLI UYDULAR İÇİN DUAL-POLARİZE YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI

Yansıtıcı antenler 5G/6G uydu teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak popülerlik kazanmış ve daha düşük gecikmelerle daha hızlı iletişim standartlarının elde edilmesini mümkün hale gelmiştir [39-43]. Yansıtıcı antenler, farklı uydu türlerinde, çok çeşitli frekans bantlarında kullanılmaya uygundur. Örneğin, Güney Amerika'daki Doğrudan Yayın Sistemlerinin (DBS) Ku bandındaki kapsama gereksinimlerini karşılamak ve Gönderme (Tx) ve Alma (Rx) bantlarında farklı frekanslarda faz dağılımı elde etmek için örüntü sentezi yöntemi kullanılarak bir yansıtıcı anten tasarlanmıştır [44]. Bir başka çalışmada ise orta dünya yörüngesinde çalışan bir uzaktan algılama uydu sisteminde X-bandında Yagi-Uda dizisi besleme mekanizması olarak kullanılarak bir yansıtıcı anten kullanılmıştır [45]. Yansıtıcı antenler son zamanlarda düşük maliyet, üretim kolaylığı ve karmaşık besleme devrelerine ihtiyaç duyulmaması gibi özelliklerinden dolayı uydu haberleşme çalışmalarında da popülerlik kazanmıştır [46-47]. Bu özellikler, gönderme-alma yansıtıcı dizisi, yansıtma-iletim dizisi ve düzlem dalga üretici gibi uygulamalarda kullanılmak üzere diğer yapılarla birleştirilebilen çift polarize yansıtıcı antenler kullanılarak gerçekleştirilir [44,48,49]. Ayrıca, doğrusal polarizasyonlu bir yansıtıcı dizi ile dairesel polarizasyonlu bir verici dizi birleştirilerek her iki polarizasyon özelliğine sahip olunabilir [44,50,51,52]. Yukarıdaki uygulamalardan da anlaşılacağı üzere, yansıtıcı anten tasarımı ve üretimi havacılık ve uzay haberleşme sistemlerinde son zamanların en popüler araştırma konuları arasındadır.

Uydu haberleşmesi için anten sistemleri tasarlanırken performans, ağırlık, hacim, maliyet ve çok işlevlik göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, bu tür sistemlerde yansıtıcı antenlerin kullanılabilmesi için tasarımların çift polarizasyonlu olması, çoklu hüzmeyi desteklemesi, farklı frekanslarda çalışabilmesi, düşük maliyetli ve küçük boyutlu üretim özelliklerine sahip olması önemlidir. Çift polarizasyonlu yansıtıcı anten sistemlerinde genellikle simetrik yapılar tercih edilir. Bu tür antenlerde üretim kolaylığı ve maliyet açısından tek katmanlı yapılar tercih edilir [48,53,54]. Çift polarizasyon çalışmaları sadece doğrusal polarizasyonda değil dairesel polarizasyonda da yapılmaktadır [55-56].

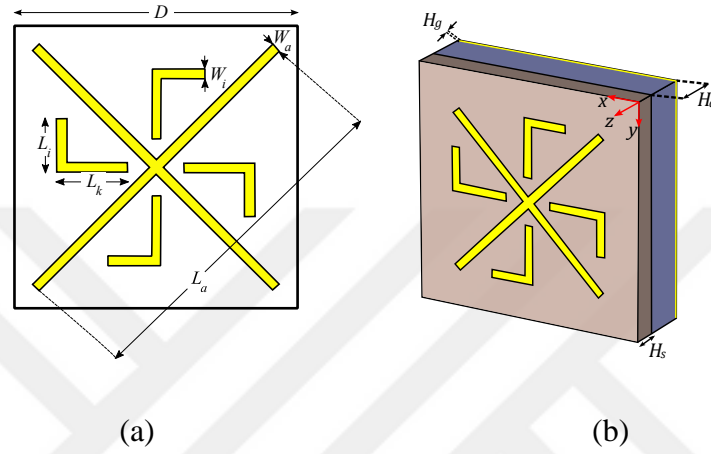
164 elemanlı yeniden yapılandırılabilir çift polarizasyonlu yansıtıcı anten, çapraz polarizasyon seviyelerini düşük tutmak için tek bantlı, simetrik olarak döndürülmüş bir alt dizi kullanılarak inşa edilmiştir [57]. Meta yüzey elemanlarına aktif bir bileşen olarak p-i-n diyotlar eklenerek elde edilen bağımsız faz kontrolü kullanılarak çift polarize yeniden yapılandırılabilir bir yansıtıcı anten tasarlanmıştır [57]. Yansıtıcı antenin birim hücresi tasarlanırken sıvı kristal tabakanın kalınlığı performans kaybı olmadan azaltılmıştır [58]. Bir başka çift polarizasyonlu uygulamada, x ve y polarizasyonlarına sahip birim hücrelerden oluşan, her polarizasyon için yansıtıcı yüzeyin farklı sayıda elemandan oluştuğu, sıkı bağlı bir yansıtıcı anten tasarlanmıştır [59]. Bir başka çalışmada, iki metal tabaka arasında sadece bir alt tabakaya sahip, paylaşımlı açıklık teknolojisini kullanan bir X-band çift polarizasyonlu yansıtıcı anten tasarlanmıştır [48]. Burada alt tabakanın üstündeki ve altındaki elemanların avantajları birleştirilerek alt tabaka sayısı azaltılmıştır. Çift polarizasyonlu ve çift hüzmeli geniş bantlı bir yansıtıcı anten tasarlamak için bir başka yöntem de 1-bit birim hücre kullanmaktır [53]. Yansıtıcı anten uygulamalarında besleme anteni olarak genellikle horn anten kullanılır, ancak diğer anten modelleri de kullanılabilir [44,52,60]. Ayrıca, yansıtıcı antenler iki [55,61,62,63] veya daha fazla frekansta bir veya daha fazla bant için aynı anda çalışabilir [46].

### 3.1 Önerilen Birim Hücre

#### 3.1.1 18 GHz için Birim Hücre

Bir yansıtıcı anten tasarlanırken, tüm sistemin performansı doğrudan birim hücre performansına bağlı olması sebebiyle, birim hücreler doğru bir şekilde analiz edilmelidir. Bu çalışmada, eksen dışı beslemeli çift kutuplu bir yansıtıcı anten için her iki düzlemde de simetriye sahip bir birim hücre yapısı kullanılmıştır. Bu yapı yakın zamanda merkezden besleme ile farklı bir ortamda sadece nümerik olarak analiz edilmiştir [65]. Önerilen birim hücre geometrisi Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekilde 3.1’de görüldüğü üzere, birim hücre yapısı L şeklindeki dört eleman ve çapraz dipolden oluşmaktadır. Önerilen birim hücre Arlon Diclاد 880 ( $\epsilon_r = 2.2$ ,  $H_s = 0,51$ ) alttaş üzerine basılmıştır. İstenen faz farkı karakteristiklerini elde etmek için, alttaş ile toprak düzlemi arasında  $H_a = 1$  mm kalınlığında bir boşluk bırakılmıştır. Üretimin kolay ve maliyetinin düşük olması sebebiyle birim hücre

tasarımında tek katmanlı bir yapı kullanılmıştır. Elemanın tasarım parametreleri şekilde gösterilmiş ve parametrelerin değerleri Tablo 3.1’de listelenmiştir. Birim hücre dikdörtgen olması ve  $x$ - $z$  ve  $y$ - $z$  düzlemleri boyunca aynı profile sahip olmasından dolayı, TE- ve TM-polarizasyonu için birim hücrenin fazı dipollerin uzunlukları tarafından kontrol edilir. Böylece,  $L_a$  parametresi değiştirilerek ilgili faz kayması karakteristiği elde edilir. Birim hücre analizleri CST Microwave Studio programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



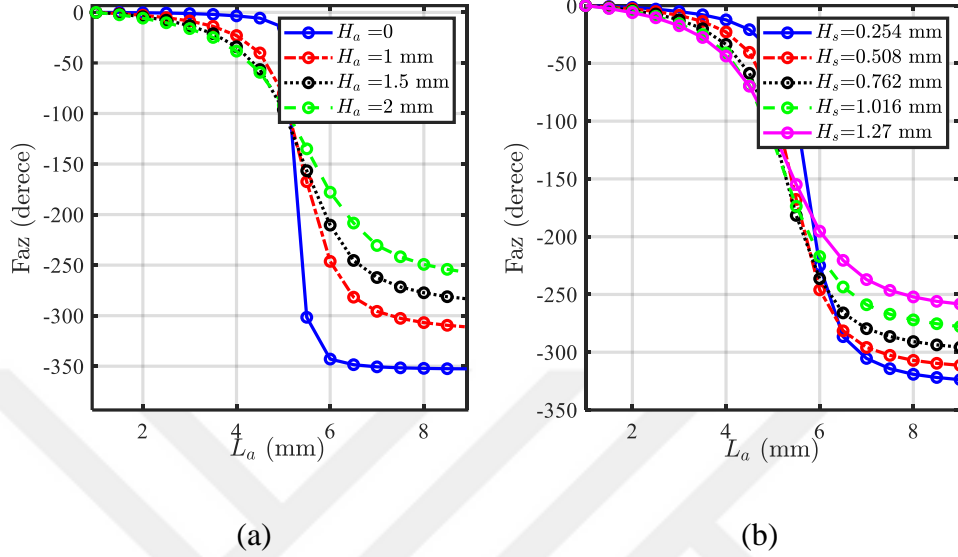
**Şekil 3.1** Çift polarizasyonlu yansıtıcı antenin birim hücresi (a) Üstten görünüm; (b) Perspektif görünüm

**Tablo 3.1** Birim hücrenin parametreleri

Parametreler	Değerler (mm)
$D$	7.5
$W_a$	0.25
$W_i$	0.25
$L_i$	1.4
$L_k$	1.86
$H_s$	0.51
$H_a$	1
$H_g$	0.035

Birim hücrenin periyodikliği (Şekil 3.1.a’deki  $D$  parametresi) çalışma bandında gerekli faz aralığı dikkate alınarak seçilmelidir. Eşitlik (2.1)’de verilen ifadeye göre, 18 GHz’de birim hücrenin yatay ve dikey boyutları  $\theta = 30^\circ$  için 11,1 mm’yi geçmemelidir. Önerilen birim hücrede  $D=7,5$  mm seçilerek ana hüzmelin daha büyük yansıma açılarına doğru yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Parametrelerin nihai değerleri bir optimizasyon süreci sonrasında belirlenmiştir. Birim hücre

parametrelerinin etkilerini gözlemek için kapsamlı bir parametrik analiz gerçekleştirilmiştir. Alttaş malzemesi, birim hücrenin faz özelliklerinde kritik bir rol oynamaktadır.  $L_a$  parametresinin fonksiyonu olarak farklı hava boşluğu ve alttaş kalınlıkları için birim hücrenin faz değişimi Şekil 3.2’de verilmiştir.

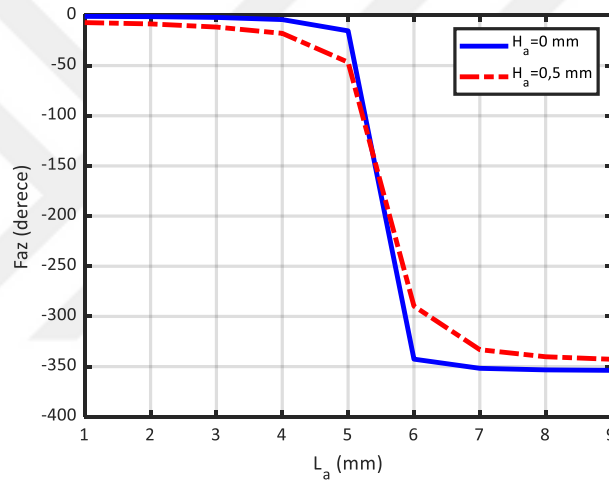


**Şekil 3.2**  $L_a$  parametresinin fonksiyonu olarak birim hücrenin 18 GHz’deki faz özellikleri (a) Farklı hava boşluğu değerleri ( $H_a$ ), (b) Farklı alt tabaka kalınlığı değerleri ( $H_s$ ) için

Şekil 3.2’ye göre, 18 GHz’de maksimum faz değişimi, Arlon alttaş malzemesi ile toprak düzlemi arasında hava tabakası olmadığı durumda ( $H_a = 0$ ) elde edilir. Ancak bu durumda ani bir düşüş gözlenmektedir. Yansıtıcı dizinin doğrusal olmayan S-şekilli faz eğrisine sahip elemanlarla tasarlanması, dar çalışma bandına ve farklı frekanslarda yüksek değişime neden olur. Bu nedenle, faz farkının daha fazla olması ve faz eğrisinin lineere daha yakın olması nedeniyle hava tabakası kalınlığı 1 mm olarak seçilmiştir.  $H_a = 1$  mm için yapının toplam faz değişimi yaklaşık  $320^\circ$ ’dir. Farklı alt tabaka kalınlığı değerleri için birim hücrenin faz karakteristikleri Şekil 3.2(b)’de gösterilmektedir. Faz değişimleri, alttaş kalınlığı arttıkça faz aralığı miktarının azaldığını ve faz eğrisinin lineere yaklaştığını ortaya koymaktadır. Maksimum faz değişimi  $H_s = 0.254$  mm için gözlemlenmiştir. Bu kalınlık çok ince olması sebebiyle üretim sürecindeki yüzey aşındırma aşamasında sorunlara neden olabileceğinden tercih edilmemiştir. Arlon Diclad 880 alttaşının diğer kalınlıkları arasından  $H_s = 0.508$  mm seçilmiştir.

### 3.1.2 19.7 GHz için Birim Hücre

Aynı birim hücre modeli kullanılarak 19.7 GHz frekansında merkezden beslemeli durum için faz aralığı elde edilmiştir. Faz aralıkları 19.7 GHz’de elde edilirken yansıma açısı  $\theta \geq 20^\circ$  olması hedeflenmektedir. Bu nedenle, Şekil 3.1’de verilen birim hücrede, Eşitlik (2.1) kullanılarak  $D \leq 11.17$  mm olacak şekilde belirlenmiştir. Yansıma açılarının daha yüksek olması adına  $D = 7,5$  mm olarak belirlenmiştir.  $L_a$ ’nın değişimine bağlı olarak alttaş ile toprak düzlemi arasındaki hava tabakasının farklı değerleri için elde edilen faz değişim grafiği  $f=19.7$  GHz ve  $D=7.5$  mm için Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi yapının toplam faz değişimi  $L_a$  parametresinin boyutunun 1mm’den 9mm’ye kadar değiştirilmesi durumunda yaklaşık  $340^\circ$  olarak elde edilmiştir.



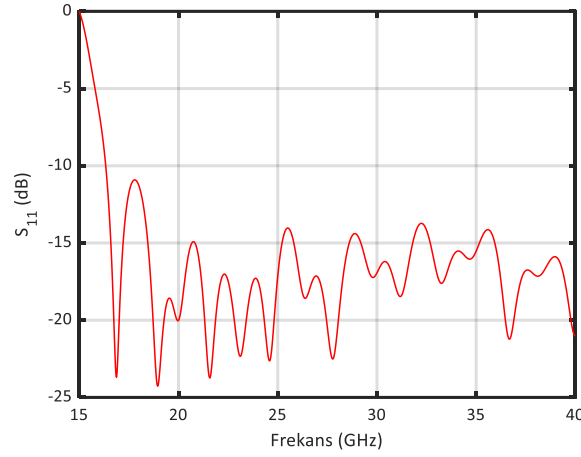
Şekil 3.3  $D=7,5$  mm iken  $L_a$  parametresinin fonksiyonu olarak birim hücrenin 19,7 GHz’deki faz özellikleri

## 3.2 Merkezden Beslemeli Dual Polarize Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı

### 3.2.1 Besleme Anteni

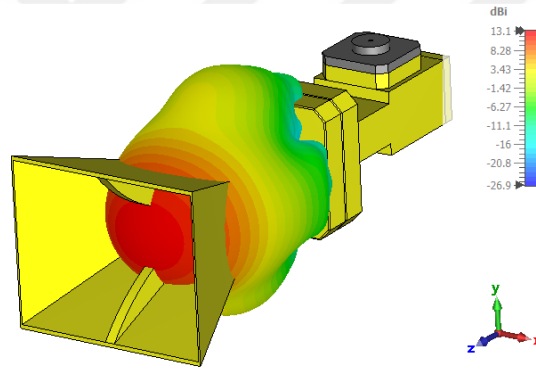
Sistemin besleme anteni olarak 18-40 GHz frekans bandında çalışan OBH180400-15 çift yarıkli horn anten kullanılmıştır. Geniş bant besleme anteni, doğrusal polarize olup yüksek polarizasyon saflığına sahiptir. Kablo bağlantısı için dik açılı çift yarıkli dalga kılavuzu (WRD180) koaksiyel adaptör (2,92 mm dışı) kullanılmıştır. Besleme anteninin simüle edilmiş yansıma katsayısı değişimi Şekil 3.4’te verilmiştir.





**Şekil 3.4** Çift yarıklı horn antenin yansımaya katsayısının frekansla değişimi

Horn antenin  $S_{11}$  değişimi, çift yarıklı dalga kılavuzunun kesim frekansının üzerinde iyi bir empedans uyumunun elde edildiğini göstermektedir. Besleme anteninin 18 GHz'deki üç boyutlu ışımaya paterni Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.5** Besleme antenin 18 GHz'deki üç boyutlu uzak alan ışımaya paterni

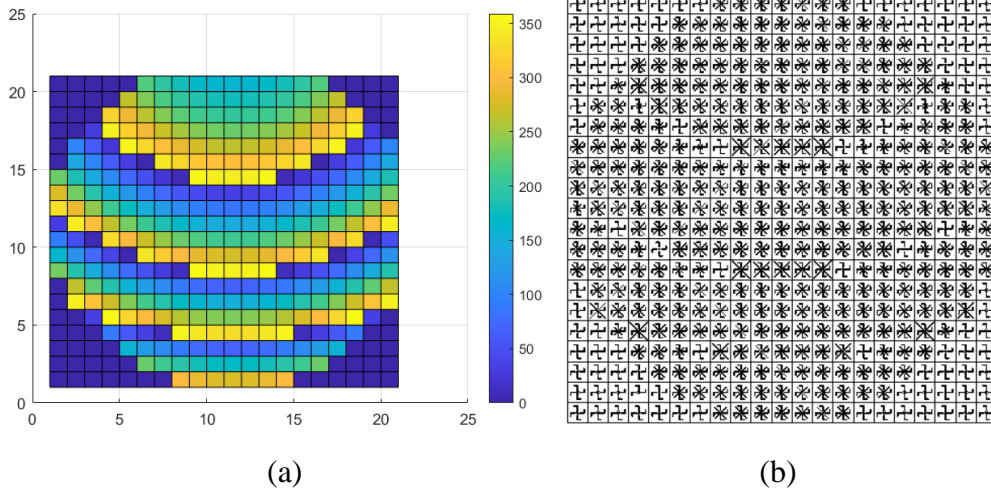
Horn antenin 18 GHz için kazancı ve faz merkezi, sırasıyla,  $z$ -ekseni boyunca horn açıklığının merkezinden içeriye doğru 13,1 dBi ve 13,84 mm'dir. Yansıtıcı dizi sisteminde, besleme antenin faz merkezi, açıklık verimliliği analizi ile önceden belirlenmiş besleme konumu ile çakışmalıdır. Besleme antenin kazancı ve konumu, açıklık verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için kritik faktörlerdir.

### 3.2.2 Yansıtıcı Yüzey Tasarımı

$L_a$  parametresi değişen değerlerine göre  $21 \times 21$  elemanlı bir yansıtıcı yüzey tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kuantalanmış faz aralığına göre  $L_a$  değerleri ve karşılık gelen faz aralıkları Tablo 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.6 (a)'da 19,7 GHz'de elde edilen birim hücre faz dağılımları ve Şekil 3.6 (b)'de tasarlanan yansıtıcı anten gösterilmiştir.

**Tablo 3.2** İlgili faz aralıkları ve karşılık gelen birim eleman boyutları

Faz Aralığı	$L_a$ (mm)
0 – (-15)	1
(-15) – (-25.7)	2.5
(-25.7) - (-56)	4
(-56) - (-102.4)	5.15
(-102.4) - (-133.3)	5.3
(-133.3) - (-173.4)	5.4
(-173.4) - (-223)	5.5
(-223) - (-259.5)	5.6
(-259.5) - (-286.7)	5.7
(-286.7) - (-311.4)	5.9
(-311.4) - (-345.2)	6.5
(-345.2) - (-354)	8
(-354) – (-360)	9

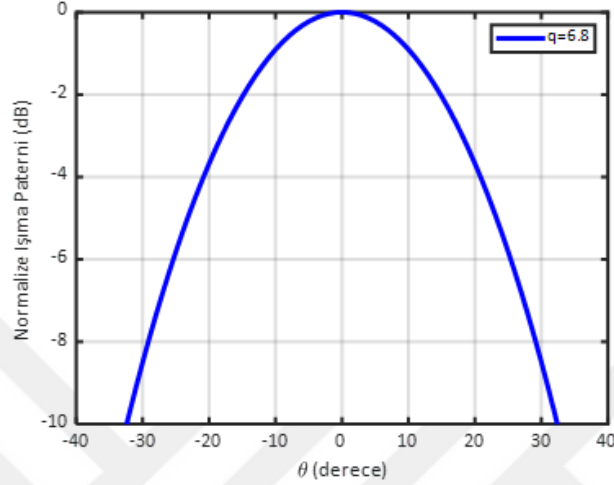


**Şekil 3.6** Yansıtıcı dizi antenin (a) Faz Dağılımı (b) Yansıtıcı Yüzeyi

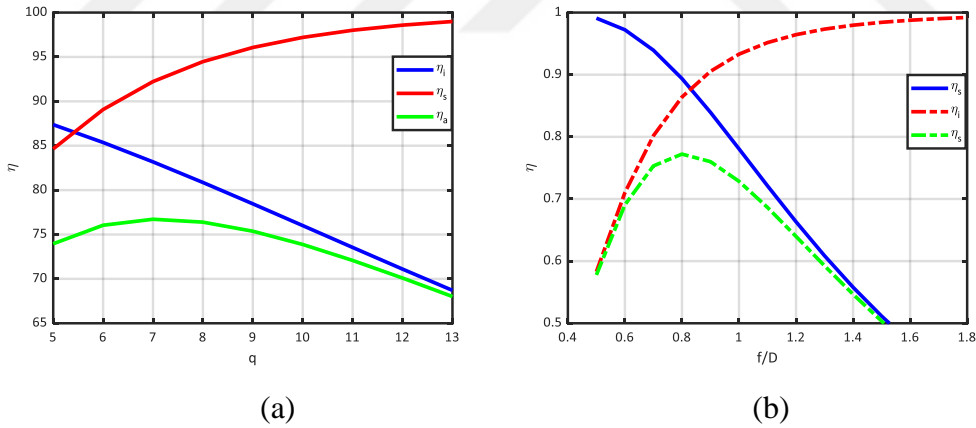
### 3.2.3 Açıklık Verimlilik Analizi

Açıklık verimlilik analizini yapabilmek için besleme antenin çalışma frekansındaki  $q$  parametresinin belirlenmesi gereklidir. Bölüm 3.2.1’de tanıtılan

besleme horn anteninin 19,7 GHz’de normalize güç seviyesi grafiği Şekil 3.7’de verilmiştir. Besleme anteninin ağız açıklığı kare şeklinde olmaması sebebiyle E ve H-düzlemi paternleri aynı değildir. Bundan dolayı bu iki paterne en yakın olan değer seçilecektir. Horn antenin ışınım karakteristiği,  $q$  değeri 6.8 olan  $\cos^q$  modeline eşdeğer olarak kabul edilmiştir.



**Şekil 3.7** Beslenen horn antenin ışınım karakteristiğinin  $\cos^q$  modeli ile gösterimi ( $q = 6.8$ )



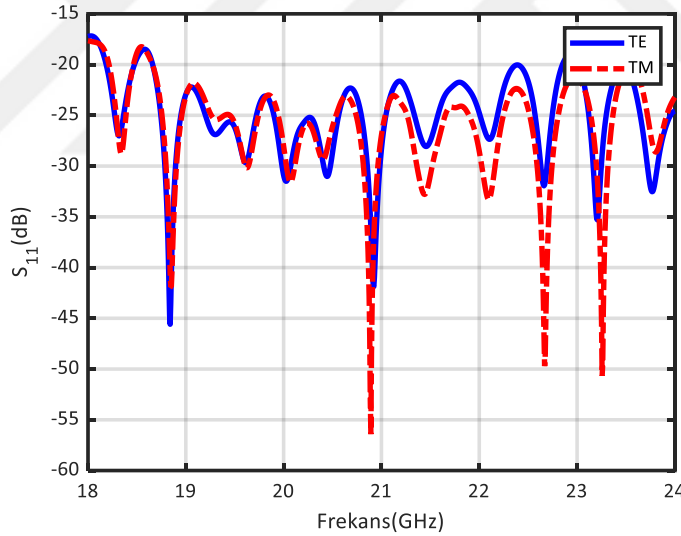
**Şekil 3.8** Açıklık verimliliğinin değişimi (a)  $q$  parametresine göre; (b)  $f/D$  oranına göre

Şekil 3.8(a) incelendiğinde en iyi açıklık verimini  $q$  değeri 7’ye eşit olduğunda elde edildiği görülmektedir. Yansıtıcı diziyi besleyen horn antenin uzak alan bölgesi 19,7 GHz çalışma frekansında 265 mm olarak hesaplanmıştır. Besleme horn antenin faz merkezinin yansıtıcı yüzeye uzaklığı ( $f$ ) 265 mm olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.8(b)’de en uygun açıklık verimini sağlayan  $f/D$  oranı değerinin 0,8 olduğu

görülmektedir. Dolayısıyla bu orana göre yansıtıcı antenin en uygun açıklık (D) 331,25mm seçilmelidir. Birim hücre boyutumuz 7,5mm olduğu için yansıtıcı dizinin 44x44 birim hücreden oluşması gerekmektedir. Ancak bilgisayarın RAM kapasitesi ve CPU bu boyutlarda bir yansıtıcı dizi anten analizini gerçekleştirmesi için yetersiz kalacağından 21x21 birim hücreli bir yansıtıcı dizinin simülasyonu yapılmıştır.

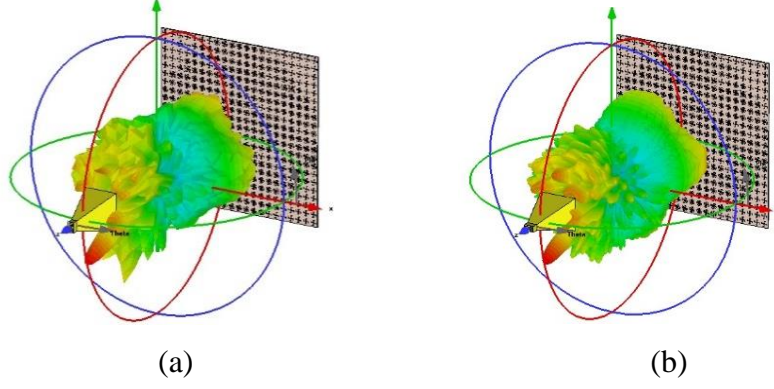
### 3.2.4 Benzetim Sonuçları

Yansıtıcı dizinin fiziksel boyutu besleme anteninin 3 dB hüzme genişliğini kapsamaktadır. Yansıtıcı anten yapısının çift polarizasyonla çalışmasından dolayı, CST programında hem TE hem de TM modu için analizler yapılmıştır. TM modu için, besleme anteni, yansıtıcı dizisi kurulumunu değiştirmeden döndürülür. Şekil 3.9, yansıtıcı anten yapısının Ka bandı aşağı bağlantı frekansını kapsayan 18-24 GHz aralığında hem TE hem de TM modlarında iyi bir empedans uyum performansına sahip olduğunu göstermektedir

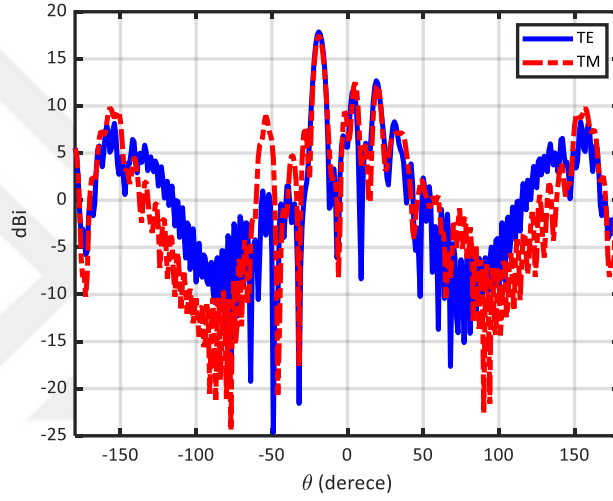


**Şekil 3.9** Yansıtıcı dizinin yansıtma katsayısının frekansla değişimi

TE ve TM modları için 19,7 GHz'deki üç boyutlu ışınma paternleri sırasıyla Şekil 3.10 (a) ve (b)'de verilmiştir. Her iki polarizasyonda da ana hüzmenin  $\theta = 20^\circ$ 'ye doğru yöneldiği görülmektedir. Düzlemdeki iki boyutlu kazanç paternleri kartezyen koordinatlarda Şekil 3.11'de verilmiştir. Bu şekilde de yansıtıcı antenin yüzeyinden yansıyan dalganın ana hüzmesinin  $\theta = 20^\circ$  yönüne doğru olduğu açıkça görülmektedir. Yönlendirme hem TE hem de TM modları için doğru bir şekilde sağlandığından yansıtıcı dizinin dual polarize olarak çalıştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.10 3 boyutlu ışınma paternleri a) TE Mod b) TM Mod



Şekil 3.11 19.7GHz'de TE ve TM polarizasyon için kazanç paternleri

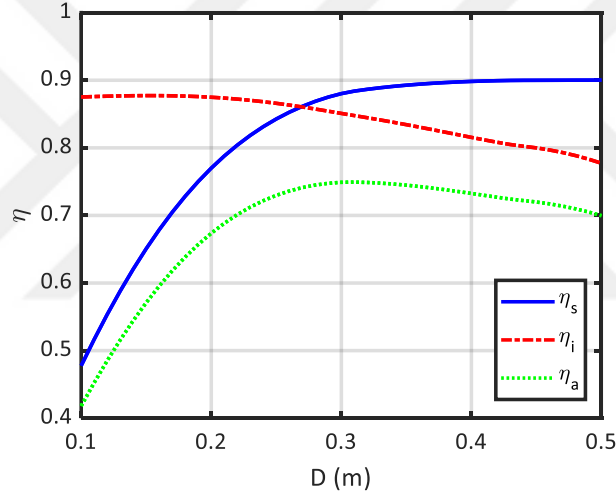
### 3.2.5 Sonuç

Ka-bandında 5G yüksek çıkışlı uydular ile büyük veri hızları beklenmektedir. Bu çalışmada, bu amaçla yeni bir birim hücreden oluşan bir yansıtıcı dizi önerilmektedir. Çift polarizasyonlu birim hücre tanımlanmış ve Ka-bant downlink frekansında merkezden beslemeli durumda belirli bir yöne ışınma yapması için fiziksel boyutları belirlenmiştir. Birim hücrenin fiziksel boyutları değiştirilerek faz farkı diyagramı elde edilmiştir. Faz dağılımına kuantalama işlemi uygulanmıştır. Reflectarray kurulumunun fiziksel boyutları verimlilik analizi ile belirlenmiştir. Çift polarizasyonlu birim hücre sayesinde yansıtıcı TE ve TM modlarında merkezden beslemeli durumda verimli bir şekilde çalışmaktadır.

### 3.3 Eksen Dışı Besleme Durumunda Dual Polarize Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı

#### 3.3.1 Açıklık Verimlilik Analizi

Eksen dışı besleme durumunda dual polarize yansıtıcı dizi anten tasarımı için öncelikle açıklık verimlilik analizi yapılmıştır. Tanıtılan özgün çift polarize birim hücre kullanılarak, beslemesi  $\theta = 15^\circ$ 'de (z-ekseni yansıtıcı yüzey normali boyunca) bulunan ve hüzmeyi  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = -15^\circ$ 'ye doğru yönlendirilen eksen dışı beslemeli bir yansıtıcı sistem tasarlanmıştır. Yansıtıcı sistemin yayılma ( $\eta_s$ ), aydınlatma ( $\eta_i$ ) ve açıklık ( $\eta_a = \eta_i \times \eta_s$ ) verim değerleri,  $H = 260$  mm yansıtıcı yüzeyden besleme antenine olan yükseklik değeri için, yansıtıcı çapı  $D$ 'nin bir fonksiyonu olarak Şekil 3.12'de verilmiştir.



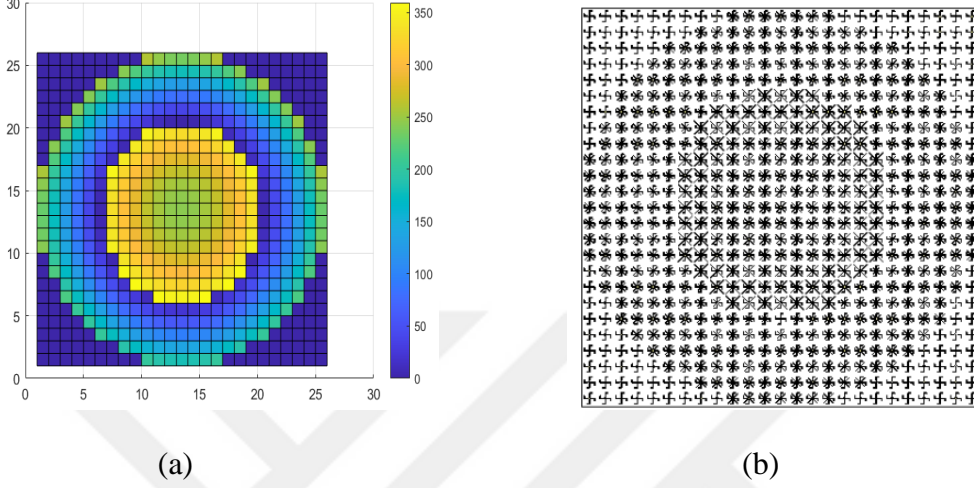
Şekil 3.12 Eksen dışı beslemeli yansıtıcı dizi antenin verimlilik grafiği

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi,  $\eta_a$  en yüksek değerine  $D = 300$  mm'de sahiptir. Bu durumda yansıtıcı yüzey  $40 \times 40$  hücreden oluşmalıdır. Simülasyonlar için kullanılan iş istasyonunun (2.4 GHz işlemcili ve 64 GB RAM'li HP Z820 Intel(R) Xeon(R) iş istasyonu) RAM ve işlemci kapasitesi bu işlem yükünü kaldıramayacağından, yansıtıcı yüzey verimlilikten ödün verilerek  $25 \times 25$  hücreye düşürülmüştür. Bu durumda, 0,65 açıklık verimliliği elde edilmesi beklenmektedir.

#### 3.3.2 Yansıtıcı Yüzey Tasarımı

Yansıtıcı antenin yansıtıcı yüzeyi tasarlanırken her bir birim hücre ayrı bir yansıtıcı olarak kullanılır. Eksen dışı beslenen yansıtıcı dizi tasarım çalışmasında maksimum

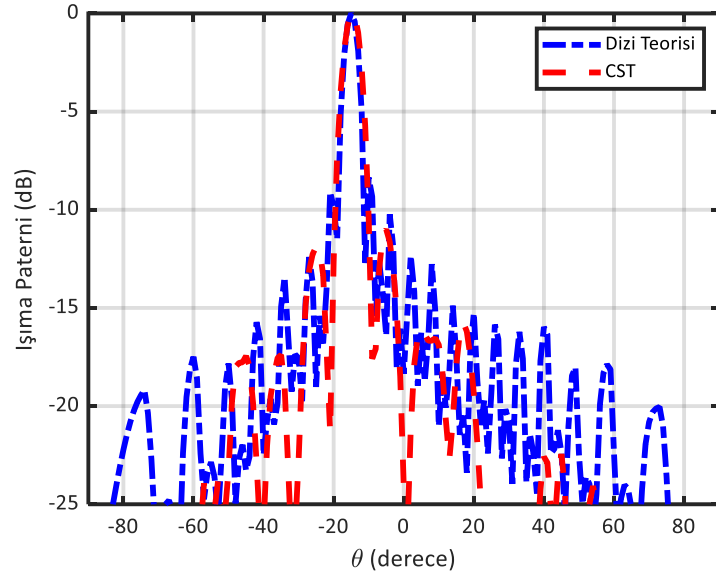
yönlendiriciliğe sahip bir yansıtıcı yüzey tasarlamak için, her bir birim hücre için gerekli faz kayması Bölüm 2.1.2’de yer alan eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.  $25 \times 25$  hücreden oluşan yansıtıcı yüzeyin birim hücre faz dağılımı Şekil 3.13(a)’da gösterilmektedir. Hesaplanan faz değerini veren ilgili birim hücre geometrisine sahip yansıtıcı dizinin üstten görünümü Şekil 3.13(b)’de verilmiştir.



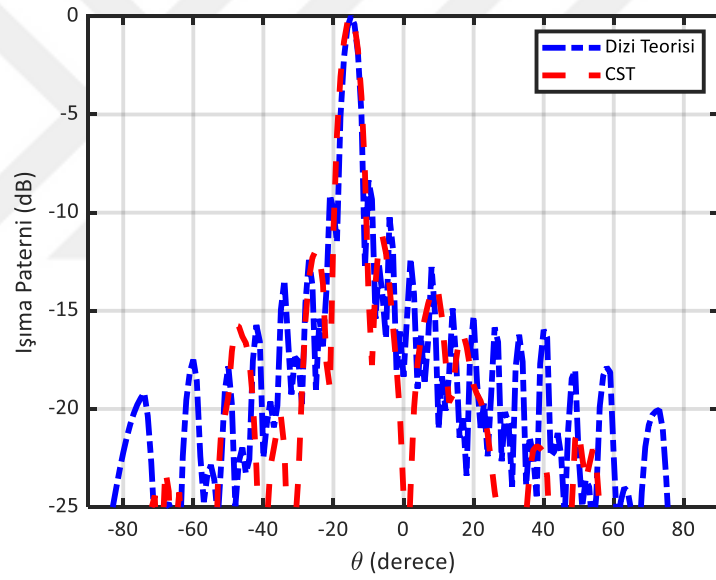
**Şekil 3.13** Yansıtıcı dizinin yansıtıcı yüzeyi (a) Yüzeydeki faz dağılımı; (b) Birim hücrelerden oluşan yansıtıcı yüzey

### 3.3.3 Analiz Sonuçları

Burada yapılan dizi teorisi hesaplamaları Bölüm 2.4’te yer alan denklemler kullanılarak yapılmıştır. Farklı polarizasyonlardaki tam dalga simülasyonları CST Microwave Studio kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızlı Ka-bant uydu haberleşmesi için tasarlanan çift polarizasyonlu yansıtıcı antenin normalize ışınma paternleri TE ve TM polarizasyonları için Şekil 3.14’te verilmiştir. Besleme faz merkezi yansıtıcı antenin merkezine göre (69.67 mm, 0, 260 mm) konumundadır. TE ve TM modlarında sırasıyla 21 dBi ve 21,6 dBi kazanç gözlemlenmiştir.



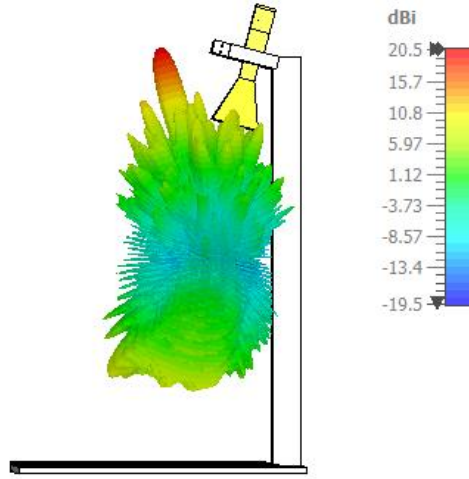
(a)



(b)

Şekil 3.14 Normalize ışımaları (a) TE Modu (b) TM Modu



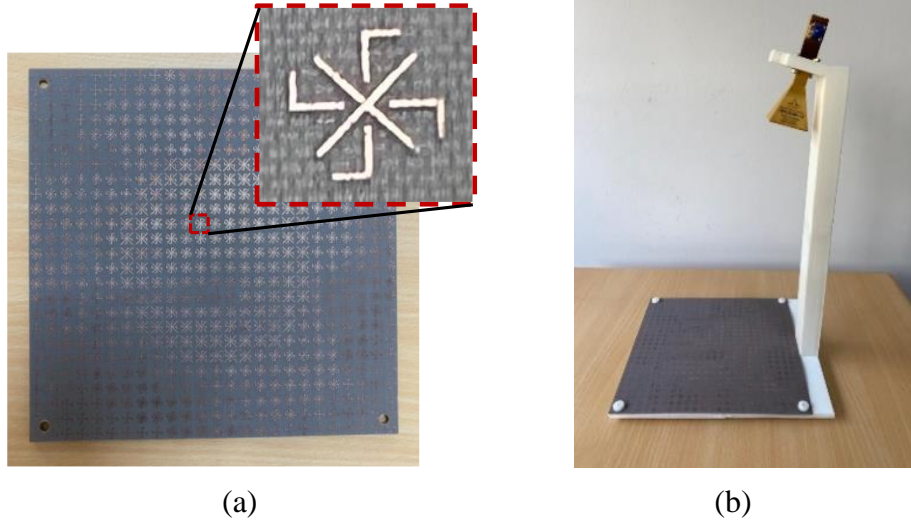


**Şekil 3.15** Yansıtıcı antenin TE modunda üç boyutlu ışınma örüntüsü

### 3.3.4 Analiz Sonuçları

#### 3.3.4.1 Üretim

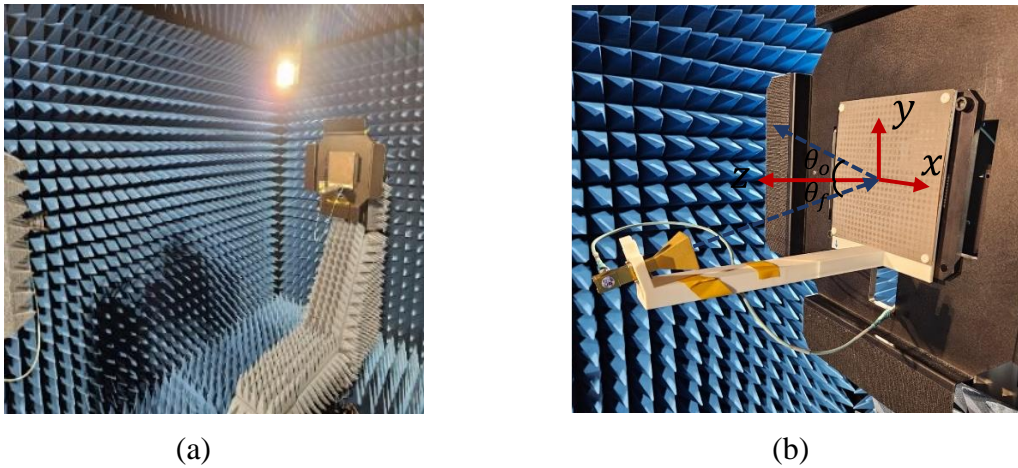
25x25 çift polarize birim hücreden oluşan yansıtıcı dizi anten prototipi kimyasal aşındırma tekniği ile üretilmiştir. Baskı devre kartı olarak Arlon DicLad 880 ( $\epsilon_r = 2.2$ ,  $t=0.51$  mm) kullanılmıştır. Fiziksel alanı 187,5 mm x 187,5 mm olan yansıtıcı dizi prototipi, bir birim hücrenin genişletilmiş görüntüsü ile Şekil 3.16(a)'da gösterilmiştir. Yansıtıcı dizinin toprak düzlemi, tutucu plakanın üst yüzeyinin iletken bantla kaplanmasıyla oluşturulmuştur. Alttaş ile toprak düzlemi arasında 1 mm kalınlığında bir hava tabakası 2 adet 0,5 mm kalınlığında polyamid somunlar kullanılarak sağlanır. Besleme anteni olarak 18-40 GHz frekans bandında çalışan horn anten (Ocean Microwave OBH180400-15) kullanılmıştır. Horn antenin 18 GHz'deki faz merkezi, yansıtıcı dizinin merkezine göre (69.67mm, 0,260 mm) koordinatlarına yerleştirilmiştir. Besleme antenini ve yansıtıcı diziyi belirlenen konumlarında sabit tutmak için tasarlanan bir tutucu, katmanlı üretim tekniği kullanılarak PLA (Polilaktik Asit) filamentini ile basılmıştır. Faz merkezinin doğru konumda yer alması ölçüm için çok önemlidir. Yansıtıcı dizinin köşelerine dört adet delik açılmış ve Şekil 3.16(b)'de gösterildiği gibi yansıtıcı diziyi tutucu mekanizmaya sabitlemek için 5M vidalar kullanılmıştır. Tutucunun kolu horn anteni bir kelepçe ile kavrar ve bu sayede besleme anteninin ana hüzmesi  $\theta = 15^\circ$  ile yansıtıcı dizinin merkezine doğru yönlendirilir.



**Şekil 3.16** Üretilen yansıtıcı dizi sistemi (a) Yansıtıcı dizi prototipi; (b) Yansıtıcı dizi sistemi

### 3.3.4.2 Ölçüm Sonuçları

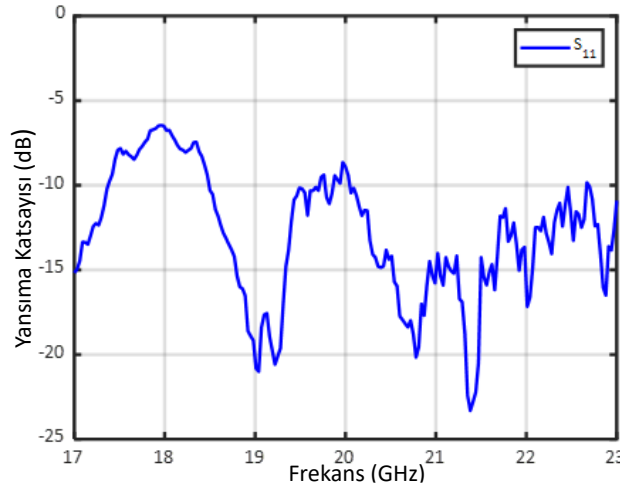
Yansıtıcı dizi anten sistemin eş ve çapraz-polarize ışınma paternleri, yansıma katsayısı ve anten kazancı 17-23 GHz frekansları arasında tam yansımaz odada ölçümleri gerçekleştirilmiştir. NSI-RF-SG42 horn anteni deneysel ölçümlerde referans anten olarak kullanılmıştır. Yapılan ölçümler, yansıtıcı dizi antenin yönlendirme düzlemindeki  $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  açısal aralıkta  $1^\circ$  hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneği Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



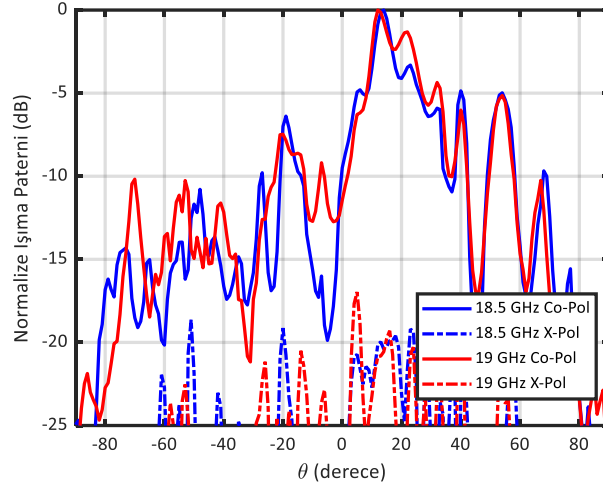
**Şekil 3.17** Çift polarizasyonlu Ka-bant yansıtıcı sisteminin ölçüm düzeneği

Yansıtıcı dizi sisteminin  $S_{11}$ 'in frekansla değişimi Şekil 3.18’te verilmiştir. Yansıtıcı dizi anten, 19,7-20,5 GHz bandındaki hafif yükselmeler haricinde, 18,5 GHz’in üzerindeki frekanslarda yansıma katsayısı -10 dB’den daha düşük olduğu görülmüştür. 18 GHz’de yaklaşık -7 dB yansıma katsayısı seviyesi

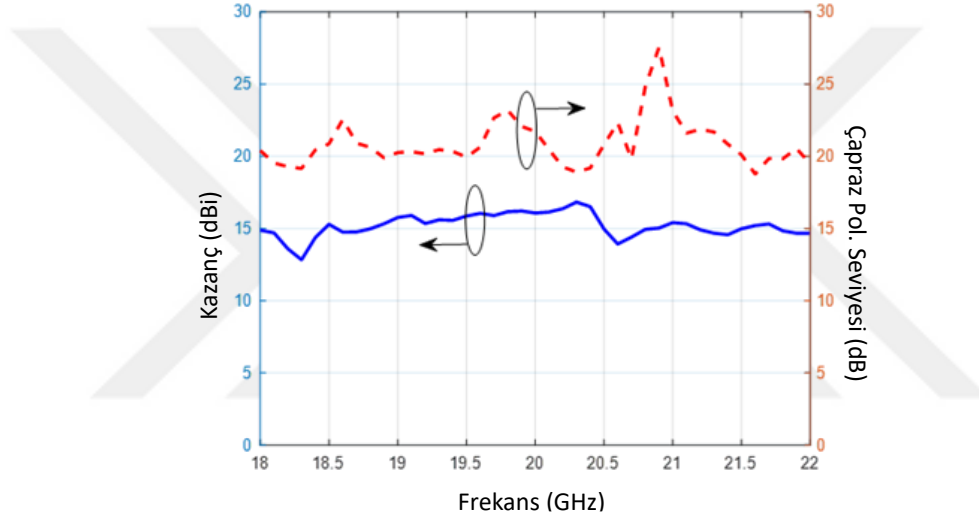
gözlemlenmiştir. Bu durum simülasyonlarda görülmemiştir. Ölçüm sonuçlarında elde edilen bu farklılık, konektörün eklenmesine bağlanmaktadır. Eş ve çapraz polarizasyon ışınım paternleri Şekil 3.19'da 18,5 ve 19 GHz frekanslarında gösterilmektedir. Düz çizgiler (-) ve tire noktalı çizgiler (-.) sırasıyla eş polarize ve çapraz polarize paternlere aittir. Ölçüm sonuçlarına göre yönlendirilmiş paternlerin ana hüzmelerinin  $\phi = 90^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$ 'ye doğru yönlendirildiği açıkça görülmektedir. Ölçüm sonuçlarının yan lob seviyeleri simülasyon sonuçlarının yan lob seviyelerine oranla daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Ölçüm sırasında, yansıtıcı dizi antenin etrafında yer alan soğurucular, yansıtıcı yüzeyin ölçüm tablasına yerleştirilebilmesi için çıkarılmıştır. Yansıtıcı dizinin alt kısmında yer alan iletkenlerden dolayı simülasyonlarda yer almayan daha yüksek yan loblar oluşmuştur. Şekil 3.20'de yansıtıcı dizi antenin ölçülen çapraz polarizasyon ve kazanç grafikleri yer almaktadır. Yansıtıcı dizi 18 GHz'de çalışmak üzere optimize edilmiş olmasına rağmen, anten kazancı tüm frekans aralığında kararlı karakteristikler gösterir. Ölçülen paternlerin çapraz polarizasyon seviyeleri düşük çıkmıştır. Çapraz polarizasyon seviyesi 18-22 GHz frekansları arasında 20 dB'nin üzerinde yer almaktadır. Yansıtıcı dizinin ışınım performansı, yan lob ve verimlilik açısından fiziksel yansıtıcı dizinin boyutu büyütülerek artırılabilir. Daha büyük boyutlar kenar kırınımı, speküler yansıma ve besleme blokajı gibi etkileri azaltmaktadır.



**Şekil 3.18** Yansıtıcı dizi antenin yansıma katsayısının frekans ile değişimi



Şekil 3.19 Yansıtıcı dizi sisteminin  $\phi = 90^\circ$  düzlemindeki ölçüm paternleri



Şekil 3.20 Ölçülen kazanç ve çapraz polarizasyon seviyesi değişimleri

### 3.3.4.3 Sonuç

5G'den 6G ağlarına geçişte, daha düşük gecikmelerle daha hızlı iletişim standartlarına sahip uydular, kapsama ve esneklik sağlamada kritik bir rol oynayacaktır. Yansıtıcı antenler, farklı uydu türlerinde kullanılan çok çeşitli frekans bantlarında kullanılmaya uygundur. Bu çalışmada, 5G/6G antenlerinde kullanılmak üzere SatCom Ka Bandı downlink frekanslarında çalışan çift polarizasyonlu merkez dışı beslemeli bir yansıtıcı dizi anten önerilmiştir. Dizide kullanılan birim hücre yapısı L şeklindeki dört eleman ve çapraz dipolden oluşmaktadır. Tasarlanan yansıtıcı dizi antenin 18 GHz için 21.72 dB yönlülük, 20.99 dBi kazanç ve %84.58 toplam verimliliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. TE ve TM modları için elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda çok benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yansıtıcı yüzey çapı boyunca 25 çift polarize birim hücreden oluşan bir prototip

Arlon DicLad 880 ( $\epsilon_r = 2.2$ ,  $t=0.51$  mm) alttaş malzemesi kullanılarak üretilmiş ve yansıtıcı sistem tam yansımaz odada ölçülmüştür. Anten kazancı 18-22 GHz frekans bandında kararlı karakteristik göstermektedir. Benzetim ve ölüm sonuçlarında, önerilen birim hücrelerden oluşan yansıtıcı dizinin  $\theta = 15^\circ$  yönelen kalem hüzmeler ürettiği gözlenmiştir. Sonuçlar, nerilen yansıtıcı sistemin yüksek hızlı 5G uydu haberleşme sistemlerinde kullanılabileceğini göstermektedir.



## MİKROŞERİT BİRİM HÜCRELERLE DUAL BANTLI LİNEER POLARİZE YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI

Yansıtıcı dizi antenler, çift polarizasyon ve çok bantlı çalışma gibi gelecek vaat eden özellikleri sayesinde benzerleri olan reflektör antenlere göre belirgin üstünlüklere sahiptir [5-66]. Çift bantlı yansıtıcı antenlerin kullanımı ile birden fazla sistem kullanmak yerine tek bir yansıtıcı yüzey ile farklı frekanslardaki hüzmeler birden fazla noktaya yönlendirilebilmektedir. Bu da hacim, ağırlık, maliyet ve üretim kolaylığı açısından avantaj sağlamaktadır.

Yansıtıcı antenlerde çift bantlı yapılar tek katmanlı ve çok katmanlı olmak üzere genellikle iki form ile elde edilmektedir. İlki tek katmanlı dual band yapılarıdır [11,13,67-78]. Tek katmanlı yapılar iki veya daha fazla bantta da çalışabilir [76]. Tek katmanlı yapıların üretim maliyeti çok katmanlı yapılara göre daha düşüktür. Ayrıca üretiminin çok katmanlı yapılara göre daha kolay olması sebebiyle tercih edilmektedir [73]. Tek katmanlı yapılar ile farklı frekans bantlarında çalışılabildiği gibi aynı frekans bandı içinde farklı frekanslarda da çalışılmaktadır [11,13,67,68,78]. Tek katmanlı yapıdan oluşan bir çalışma kare halka ve yama birim elemanlarını kullanarak boyut değiştirme tekniği ile X ve Ku frekans bantlarında çalışmaktadır [11]. Birim hücre çalışmalarında genellikle Malta çaprazı ve ayrık halka elemanları tercih edilir. Malta çaprazı elemanının boyutu değiştirilerek, ayrık halkanın ise döndürülmesi ile 20/30 GHz bandında hüzmeye yönlendirilebilmiştir [13]. İki ayrı yöntemin kullanılması ve elemanlarının fiziksel olarak etkileşimlerinin düşük olması sebebiyle, yapı tek katmanlı olmasına rağmen, Ka bandında yüksek verim elde edilmiştir. Yine çok kullanılan birim hücre elemanlarından olan Phoenix elemanı ile sadece metalden oluşan, X ve Ku frekans bantlarında çalışan yansıtıcı dizi tasarlanmıştır [68]. Ka frekans bandında çalışması için tasarlanan başka bir yansıtıcı dizi anten ise çift ayrık döngülerin farklı yönlere döndürülmesi ile oluşturulan birim hücrelerle tek katmanda dual band ve dairesel polarize olarak çalışmaktadır [69]. Ayrıca tek katmanlı dual band yansıtıcı dizi antenler farklı sistemler ile entegre olarak çalışabilir. [72]'de K ve Ka bantlarında çalışması için tasarlanan yansıtıcı dizi anten parabolik yansıtıcıya hüzmeleri gönderen alt yansıtıcı olarak çalışmaktadır. Tek katmanlı yapılarda iki ayrı frekans

bandı için oluşturulan birim hücrelerin ortak bir birim hücrede birleştirilmesi gereklidir. Bu yüzden elemanlar arasında karşılıklı kuplaj etkisi çok katmanlı yapılara göre daha yüksek olacaktır. Ayrıca iki ayrı frekans bandının birbirine olan etkileşimini izole etmek daha zor olacaktır. Bu yüzden tasarım yapılırken elemanların diğer frekanslardaki etkileşimi göz önünde bulundurularak tasarım yapılmaz. Elemanlar arasında karşılıklı kuplaj etkisinden kaçınmak ve fiziksel izolasyonu sağlamak için farklı metotları deneyen çalışmalar mevcuttur. X bandında çalışan elemanlara  $90^\circ$  eklenmesi ile K bandında çalışan elemanlar üretilmiş ve kuplaj etkisi azaltılmıştır [70]. Eş merkezli halkalar kullanılarak oluşturulan yansıtıcı dizi anten çalışmasında elemanlar arasındaki karşılıklı kuplajı bastırmak için fiziksel geometri değiştirilmiş ve optimizasyon uygulanmıştır [71]. X ve K bandında çalışması için tasarlanan yansıtıcı dizi antende Anka kare döngü ve kare şekilli faz gecikme hatları kullanılarak her iki bantta  $360^\circ$  faz aralığı elde edilmiştir [75]. Bu yapıdaki elemanların polarizasyonları birbirine dik olduğu için uzayda birbirini etkilemezler. Geleneksel kare yamalar kullanılarak komşu iki bantta çalışması için tasarlanan yapıda ise elemanların polarizasyonları birbirine dikey olarak tasarlanmış ve dalga boyunu artırabilmek için alt dalga boylu dikdörtgen ızgaralar kullanılmıştır [77].

Çok bantlı çalışma için bir başka yöntem de çok katmanlı yansıtıcı yüzeyler kullanmaktır [5,79,80]. X ve Ku frekans bantlarında çalışan bir yansıtıcı anten tasarımı için polarizasyon-dönen birim hücre (PRUC) tekniği kullanılmıştır [5]. Güney Amerika'yı kapsamak için her iki katmanda da dipol yapısı kullanan çift doğrusal polarizasyonlu bir yansıtıcı anten önerilmiştir [79]. Yüksek ve düşük frekanslı anten dizilerinin birleştirilmesiyle elde edilen ve düşük performans kaybına sahip bir yansıtıcı anten S ve Ka frekans bantlarında çalışmak üzere tanıtılmıştır [80].

Yansıtıcı dizi antenler frekans seçici yüzeyler ile çalışmaya uygun yapılardır. Bu sayede FSY yapılarını kullanarak dual bant yansıtıcı dizi antenler elde edilebilmektedir [81-84]. Yansıtıcı diziler arasında bir FSY yapısının kullanılması ile karşılıklı kuplaj azaltılmakta ve frekans bantları arasında izolasyon sağlanmaktadır. Ka bandı yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı frekanslarında çalışan FSY destekli yansıtıcı antende karşılıklı kuplaj etkisi önemli ölçüde bastırılmış ve böylece anten verimliliği artırılmıştır [82]. X ve Ka bant frekanslarında çalışan

yansıtıcı anten için FSY yer düzlemi olarak kullanılmış ve bu bantlar arasında izolasyon sağlanmıştır [85]. FSY kullanılarak oluşturulan çok katmanlı dual band yansıtıcı dizi anten tasarımında, düşük frekans için yansıtıcı anten bileşenleri alt katmanda yer alırken, yüksek frekans için yansıtıcı dizi anten FSY'nin üzerindeki katmana yerleştirilir [86]. Üst katmandaki çift bant yansıtıcı yüzey ile alt katmandaki çift polarizasyonlu Ku bant yansıtıcı yüzey arasına çift ekranlı bir FSY eklenerek dört bantlı bir yansıtıcı anten elde edilmiştir [46]. Burada çift ekranlı FSY kullanılması ile hem üst katman için hem de alt katman için izolasyon sağlanmış olur.

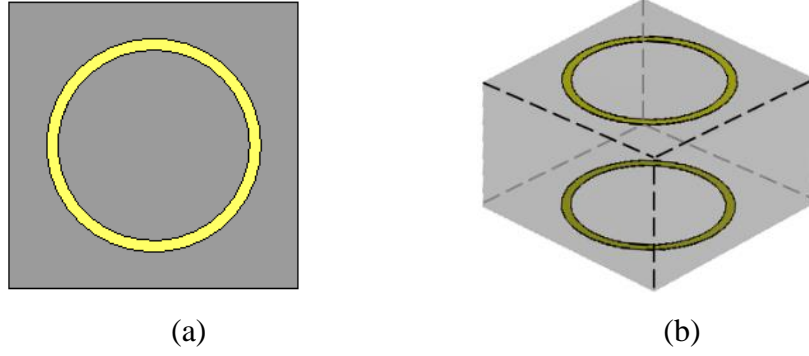
Bu çalışmada yansıtıcı dizi anten birim hücresi olarak klasik mikroşerit kare yamalar kullanılmıştır. Ayrıca frekans bantları arasında izolasyonu sağlamak ve birim hücreler arasında oluşabilecek olan karşılıklı etkileşimi azaltmak için FSY kullanılmıştır. Ka band 5G yüksek hızlı uydu sistemlerinde kullanılması için önerilen tasarımda 24 ve 30 GHz frekanslarında hüzmünün  $\phi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$ 'ye yönlendirilmesi hedeflenmiştir.

#### **4.1 FSY Birim Hücresi**

Çok katmanlı dual bant yansıtıcı dizi anten tasarımı yapılırken frekans bantları arasındaki izolasyonu sağlamak için FSY iki yansıtıcı yüzey arasında konumlandırılmıştır. En üst katmanda daha yüksek frekansa sahip yansıtıcı yüzey yer alır. FSY yapısı üst katmanda yer alan yansıtıcı yüzeyin toprak düzlemi gibi davranır. Bu yüzden üst katmanda yer alan yansıtıcı yüzeyin frekans aralığının alt katmana geçmemesi gereklidir. Alt katmanda yer alan yansıtıcı yüzeyin çalıştığı frekansın üst katmana geçmesi gereklidir.

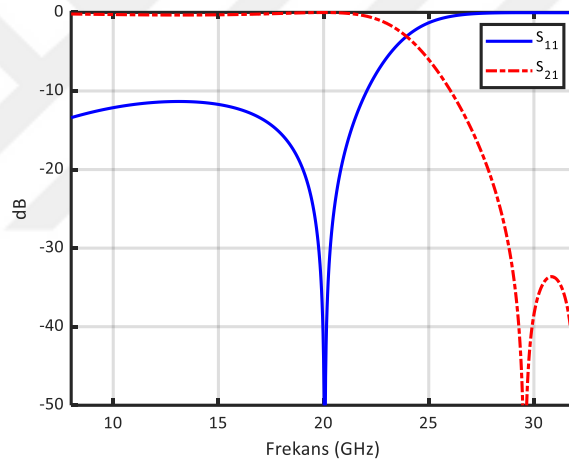
Kullanılan FSY birim hücresi her iki katman arasında izolasyon sağlaması için çift ekranlı tercih edilmiştir. FSY birim hücresi 3 mm hava katmanının her iki yüzeyine yerleştirilen bir halka yapısı ile tasarlanmıştır. Halka şeklindeki halka 1,66 mm yarıçapa ve 0,2 mm genişliğe sahiptir. Şekil 4.1'de FSY birim hücresini göstermektedir.





**Şekil 4.1** FSY birim hücresi (a)Üstten görünüş; (b) Perspektif görünüşü

FSY birim hücresinin saçılma parametreleri Şekil 4.2’de verilmiştir. FSY birim hücresi yaklaşık 25 GHz’e kadar bant geçiren bir filtre gibi davranırken, 25 GHz’den sonra bant durdurma özelliği gösterir.  $S_{21}$  30 GHz’de -40 dB seviyesinde olduğundan, 30 GHz çalışma için tasarlanan yansıtıcı dizinin toprak düzlemi olarak kullanılabilir.

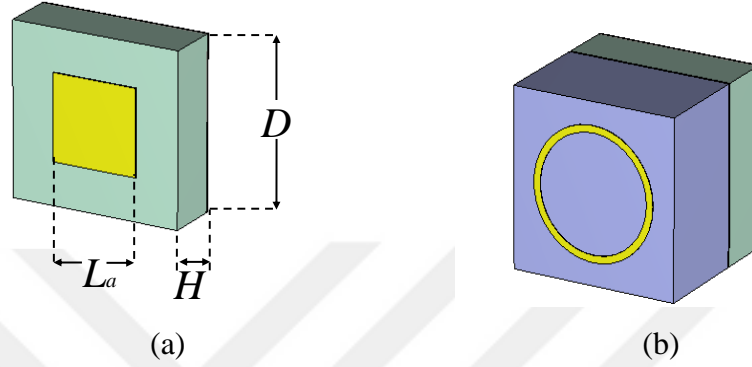


**Şekil 4.2** FSY birim hücresinin saçılma parametreleri

## 4.2 Yansıtıcı Dizi Birim Hücre Analizi

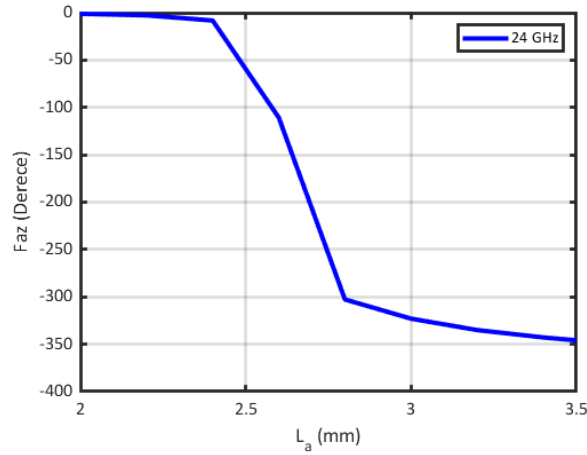
Birim hücrenin periyodikliğini belirlerken Bölüm 2.1.1’de yer alan Eşitlik (2.1) uygulanır. Eşitlik (2.1)’de  $\lambda$  dalga boyunu ve  $\theta$  gelme açısını temsil etmektedir.  $\theta = 30^\circ$  için 24 GHz’deki birim hücrenin boyutları 8,3276 mm’den küçük veya eşit olmalıdır. 30 GHz’deki birim hücrenin boyutları ise bu doğrultuya hüzmeyi yönlendirebilmesi için 6,667 mm’den küçük veya eşit olmalıdır. Birim hücre analizleri, hem 24 GHz hem de 30 GHz birim hücreleri için frekans seçici yüzey eklenerek gerçekleştirilir. Birim hücre analizi, yansıtıcı dizi ve FSY birim hücrelerinin merkezlerinin üst üste gelmesi sağlanarak gerçekleştirilir. Analizlerin

daha iyi sonuç vermesi için tüm katmanlardaki birim hücrelerin periyodikliği ( $D$ ) aynı seçilmiştir. Bu nedenle, 6.667 mm'den küçük olduğu için birim hücrenin periyodikliği  $D = 5\text{mm}$  olarak belirlenmiştir. Hem 24 GHz hem de 30 GHz yansıtıcılar için birim hücreler  $\epsilon_r = 2,2$  ve  $H = 0,79$  mm olacak şekilde Arlon Diclad880 üzerine basılmıştır. Şekil 4.3'te 24 GHz yansıtıcı için tasarlanan birim hücre görülmektedir.

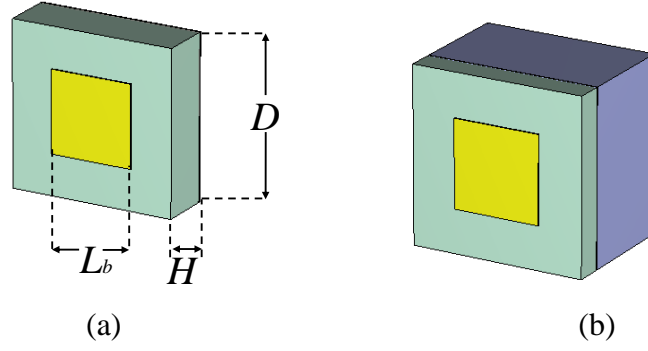


**Şekil 4.3** 24 GHz yansıtıcı dizideki birim hücre yapısı (a) Perspektif görünümü; (b) FSY birim hücresi ile birlikte birim hücrenin perspektif görünümü

Şekil 4.4'te ise  $L_a$  parametresinin değişmesiyle elde edilen faz aralığı görülmektedir. Yaklaşık olarak  $350^\circ$  faz aralığı elde edilmiştir.

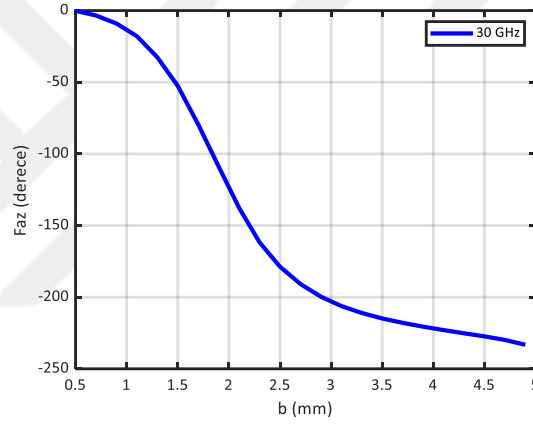


**Şekil 4.4**  $L_a$  parametresinin değişimiyle elde edilen faz eğrisi



**Şekil 4.5** 30 GHz yansıtıcı dizideki birim hücre yapısı (a) Perspektif görünümü; (b) FSY birim hücresi ile birlikte birim hücrenin perspektif görünümü

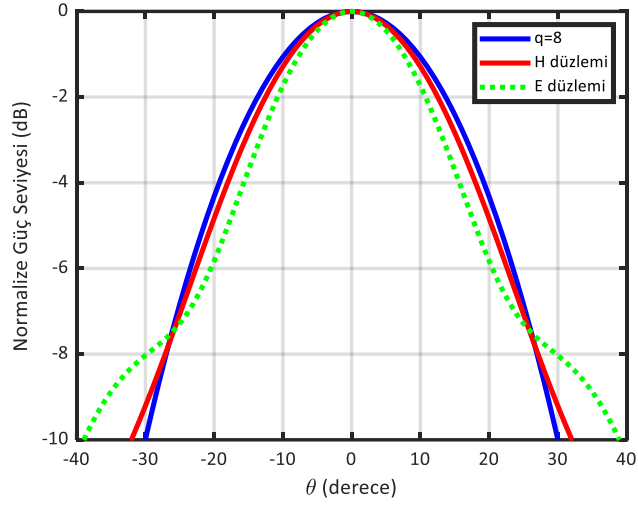
Şekil 4.5'te 30 GHz birim hücrenin yapısı görülmektedir.  $L_b$  parametresinin değişimiyle yaklaşık olarak  $250^\circ$  faz aralığı elde edilmiştir. FSY yapısı Şekil 4.5(b)'de görüldüğü üzere toprak düzlemi olarak kullanılmıştır.



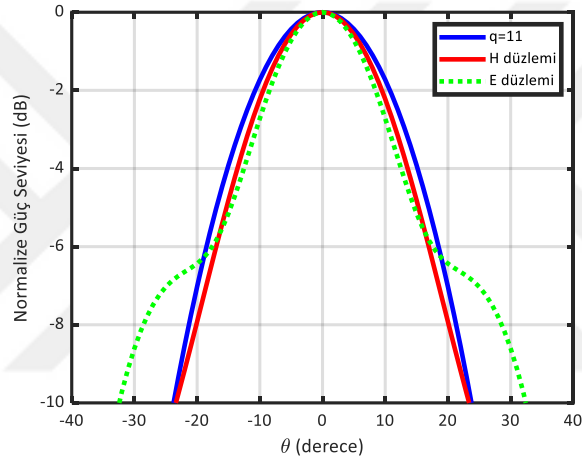
**Şekil 4.6**  $L_b$  parametresinin değişimiyle elde edilen faz eğrisi

### 4.3 Yansıtıcı Yüzey Tasarımı

Yansıtıcı yüzeyin boyutlarını belirlemek için ilk olarak verimlilik analizi yapılmalıdır. Açıklık verimlilik analizi yapabilmek için ilk olarak besleme anteninin  $q$  parametresi belirlenmelidir. Besleme anteni olarak geniş bant çift yarıklı horn anten (OBHL-180400) kullanılmıştır.

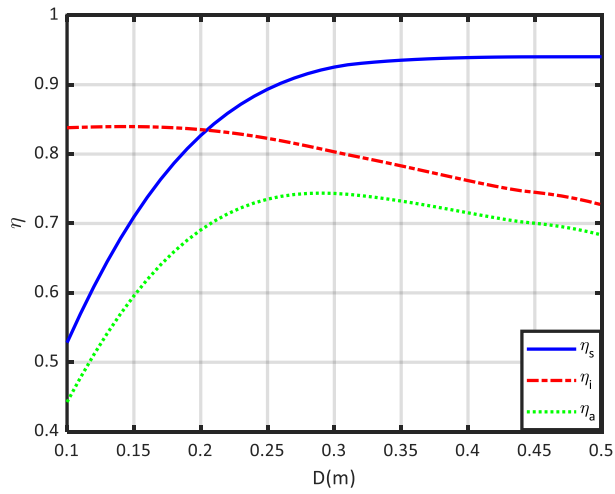


(a)

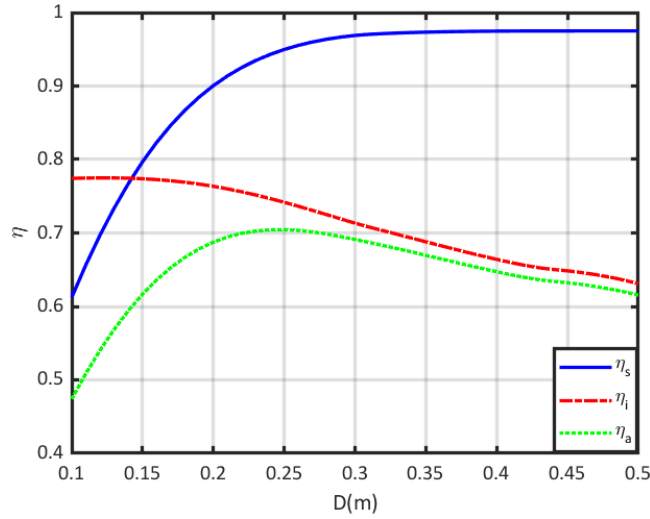


(b)

Şekil 4.7 Besleme antenin normalizasyon güç paterni (a) 24 GHz; (b) 30 GHz



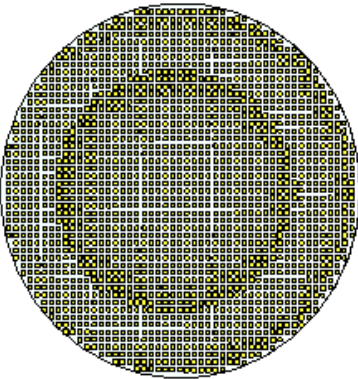
(a)



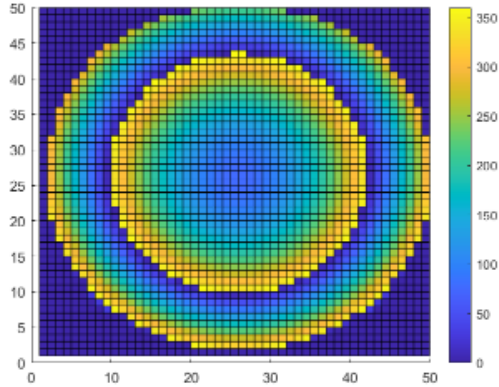
(b)

**Şekil 4.8** Açıklık verimlilik analizleri (a)24 GHz; (b) 30 GHz

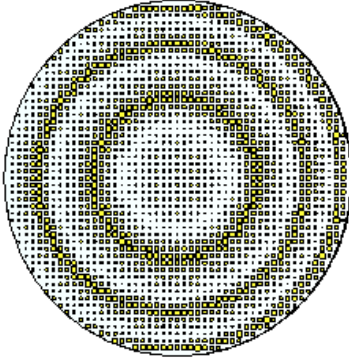
24 GHz için  $q$  değeri 8'e eşittir. 30 GHz için  $q$  değeri 11 değerini almaktadır.  $q$  değeri 8,  $H = 263.84$  mm olduğu durum için  $D = 280$ mm olmalıdır. Birim hücre boyutunun 5mm olmasından dolayı yansıtıcı dizi  $56 \times 56$  birim hücreden oluşmalıdır.  $q$  değeri 11 olduğu durumda ise  $H = 260$ mm için  $D = 250$ mm olmalıdır. Bu durumda da yansıtıcı dizi  $50 \times 50$  birim hücreden oluşmalıdır. Üst katmandaki yansıtıcı dizi antende  $D=250$ mm olduğu durumda çok küçük bir verimlilik farkı gözlemlendiği için üst katmanda  $50 \times 50$  birim hücreden oluşan yansıtıcı dizi kullanılmalıdır. Besleme anteni  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$ 'de yer almaktadır. Hem 24 GHz için oluşturulan yansıtıcı dizi anten hem de 30 GHz için oluşturulan yansıtıcı dizi anten ile hüzmenin  $\phi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  doğrultusuna yönlendirilmesi istenmektedir.



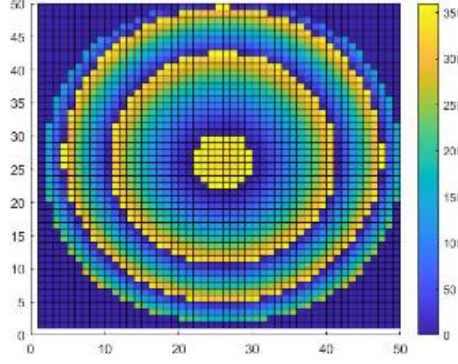
(a)



(b)



(c)

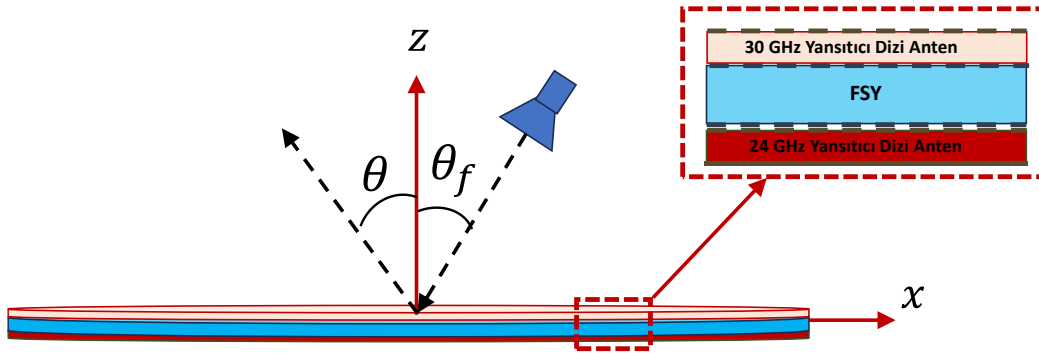


(d)

**Şekil 4.9** Yansıtıcı yüzeyler (a)24 GHz yansıtıcı yüzey; (b) 24 GHz için faz dağılımı; (c) 30 GHz yansıtıcı Yüzey; (d) 30 GHz için faz dağılımı

#### 4.4 Benzetim Sonuçları

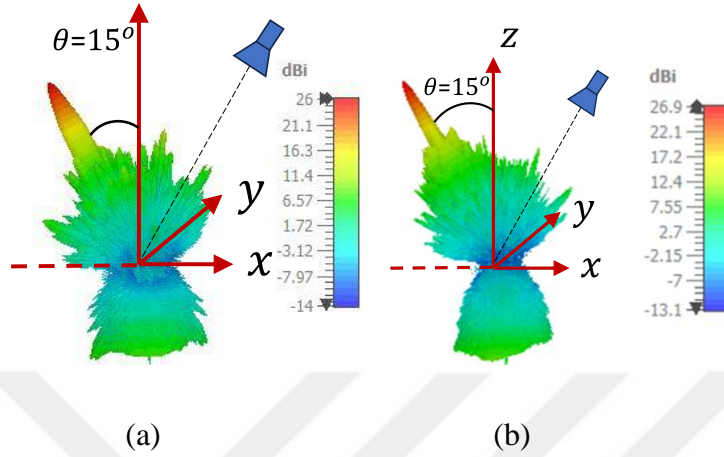
Besleme anteni  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$ 'da yer almaktadır. Kartezyen koordinat sisteminde besleme anteni  $(x, y, z) = (69.64\text{mm}, 0, 260\text{mm})$  koordinatlarına yerleştirilmiştir. Hem 24 GHz için oluşturulan yansıtıcı dizi anten hem de 30 GHz için oluşturulan yansıtıcı dizi anten hüzmeyi  $\phi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  doğrultusuna yönlendirmek istenmektedir. Şekil 4.10'da yansıtıcı dizi anten konfigürasyonu verilmiştir.



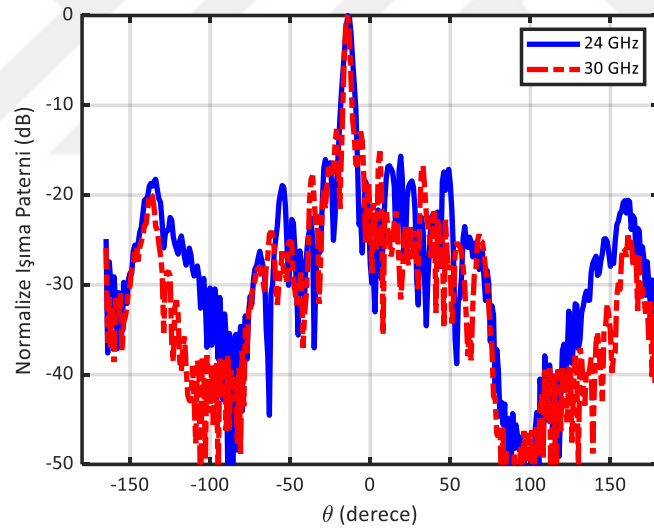
**Şekil 4.10** Yansıtıcı dizi anten konfigürasyonu

Benzetim çalışmalarında, ilk olarak 24/30 GHz için oluşturulan yansıtıcı dizi antenler ayrı ayrı analiz edilmiştir. Yansıtıcı antenlerin çalışma frekanslarında etkin bir şekilde çalıştığını göstermek için, 24/30 GHz'deki ışıma paternleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.11(a) ve (b)'de görüldüğü gibi, yansıtıcı diziler her iki frekans için hüzmeyi  $\phi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  doğrultusuna yönlendirmiştir. Yansıtıcı antenler ile 24 GHz'de 25,97 dB ve 30 GHz'de 26,9 dB yönlendiricilik

elde edilmiştir. Yansıtıcı dizi antenlerin normalize ışınma paternleri  $\phi = 180^\circ$  düzleminde kartezyen koordinatlarda Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Şekil 4.12’de her iki yansıtıcı dizi anten için de hüzmünün  $\theta = 15^\circ$  doğrultusuna yönlendirildiği açıkça görülmektedir.

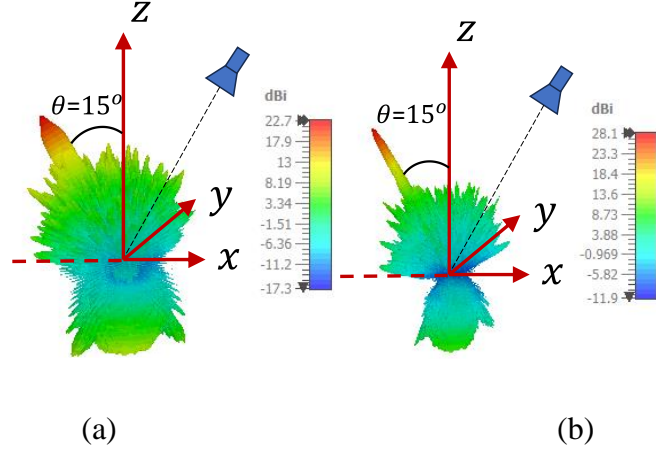


Şekil 4.11 Yansıtıcı dizi antenlerin üç boyutlu paternleri (a) 24 GHz; (b) 30 GHz

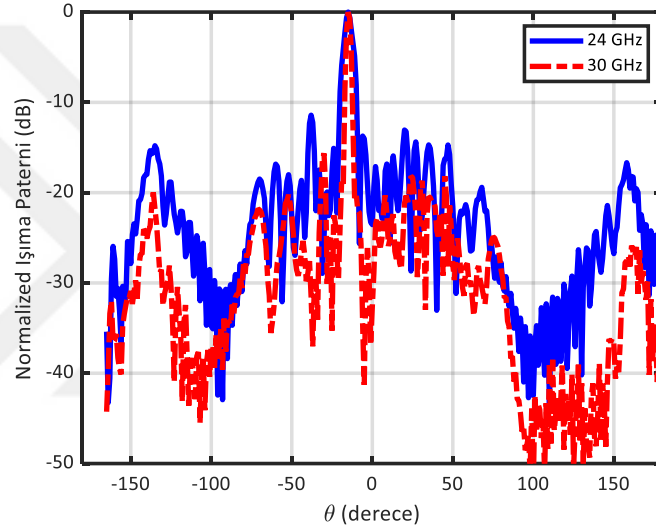


Şekil 4.12  $\phi = 180^\circ$  düzleminde normalize ışınma paterni

Her iki yansıtıcı dizinin ve FSY’nin birlikte kullanılması ile elde edilen çok katmanlı yansıtıcı dizi antenin, 24 GHz ve 30 GHz’deki üç boyutlu ışınma paternleri Şekil 4.13’te verilmiştir. Yönlülük 24 ve 30 GHz’de sırasıyla 22,7 dB ve 28,1 dB olarak gözlemlenmiştir. Tam dalga analiz sonuçları hüzmünün  $\theta = 15^\circ$  doğrultusuna yönlendirildiğini açıkça göstermektedir. Çok katmanlı yansıtıcı dizi antenin normalize ışınma paternleri Şekil 4.14’te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Yansıtıcı dizi antenlerin 3B paternleri (a) 24 GHz; (b) 30 GHz



Şekil 4.14  $\phi = 180^\circ$  düzleminde normalize ışıma paterni

Analiz çalışmalarında çok katmanlı yansıtıcı dizi antenin yönlendiriciliğinin 30 GHz frekansında artarken 24 GHz frekansında düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlarda FSY yapısının 30 GHz'deki olumlu etkisi görülmektedir. FSY yapıları karşılıklı kuplaj etkileşimini azaltmak ve bantlar arasında izolasyonu sağlamak için kullanılmaktadır ancak bu etkileşimleri tamamen yok edememektedir.

## 4.5 Sonuç

Bu tasarımda,  $\phi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  yönünde 24/30 GHz'de eşzamanlı hüzmeye yönlendirme yapabilen bir yansıtıcı dizi sistemi tasarlanmıştır. Bantlar arasındaki girişim ve karşılıklı kuplaj etkisini azaltmak için FSY yapısı kullanılmıştır. Ayrı ayrı çalıştırıldığında, 24 ve 30 GHz için sırasıyla 25,97 dB ve



26,9 dB yönlülük elde edilmiştir. İki yansıtıcı ve FSY birleştirildiğinde, 24 GHz için 22,7 dB ve 30 GHz için 28,1 dBi yönlendiricilik elde edilir. Tam dalga simülasyon sonuçları, hüzmünün  $\theta = 15^\circ$  yönüne doğru yönlendirildiğini açıkça göstermektedir. Üç boyutlu benzetim sonuçları, önerilen FSY destekli çift bantlı yansıtıcı dizi sisteminin Ka bant uydu sistemlerinde başarıyla uygulanabileceğini kanıtlamaktadır.



## YÜKSEK VERİ HIZLI KA BANT UYDULARI İÇİN DUAL BANTLI FREKANS SEÇİCİ YÜZEYLİ YANSITICI DİZİ ANTEN TASARIMI

5G iletişim sistemlerinin mobilite ve kapsama alanı taleplerini sürdürmek için uydular ve uzay teknolojileri kritik bir rol oynamaktadır [1]. Uydular, uzak ve yetersiz hizmet alan bölgelerde bile yüksek hızlı ve kesintisiz internet kapsamı sağlamak, yüksek verimli, kesintisiz küresel bağlantı sağlamada 5G ağları için bir omurga görevi görmektedir [2]. Uydu ve fırlatma teknolojisindeki ilerlemeler, gömülü fiber optik kablolarla dayanan karasal iletişim ile teknik ve ekonomik olarak mümkün olmayacak bu taleplerin önünü açmaktadır.

Ka-bant uydusu, daha küçük alıcı antenler kullanarak daha yüksek veri hızları ile hizmetler sağlayan kanıtlanmış bir teknolojidir [3,4]. Antenler uydu haberleşme sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Ka-bandının alma ve gönderme frekanslarında (20/30 GHz) aynı anda çalışabilen yüksek kazançlı antenler gereklidir. Son kullanıcıların giderek artan talepleri hem uzay hem de kullanıcı terminallerinde yenilikçi antenlerin geliştirilmesini tetiklemiştir. Yüksek kazançlı yansıtıcı antenler son on yılda bu alanda rağbet görmektedir. Yeni nesil yüksek kazançlı antenler olarak, düzlemsel iletken eleman dizilerinden oluşan yansıtıcı antenler, kavisli, hantal reflektör sistemlere alternatif olarak geliştirilmiştir [6]. Yansıtıcı diziler, üstün fiziksel özelliklerinin yanı sıra, faz dizilerin ve yansıtıcıların avantajlarını bir araya getirir. Yansıtıcı elemanların ayrı ayrı kontrol edilebilen fazları ile yansıtıcı dizinin hüzmesi önceden tanımlanmış kriterlere göre oluşturulabilir. Yansıtıcı dizi antenler, reflektörlere kıyasla daha dar bantlara sahip olmalarına rağmen, çok bantlı antenler için pratik bir çözüm sunarlar [8,9]. Bir yansıtıcı dizinin çok bantlı karakteristiği geniş bantlı elemanlar [14,15,16-87], çok katmanlı birim elemanlar [18,19], aralıklı dizi ızgaraları [20,21] veya yığılmış diziler [22] kullanılarak elde edilebilir.

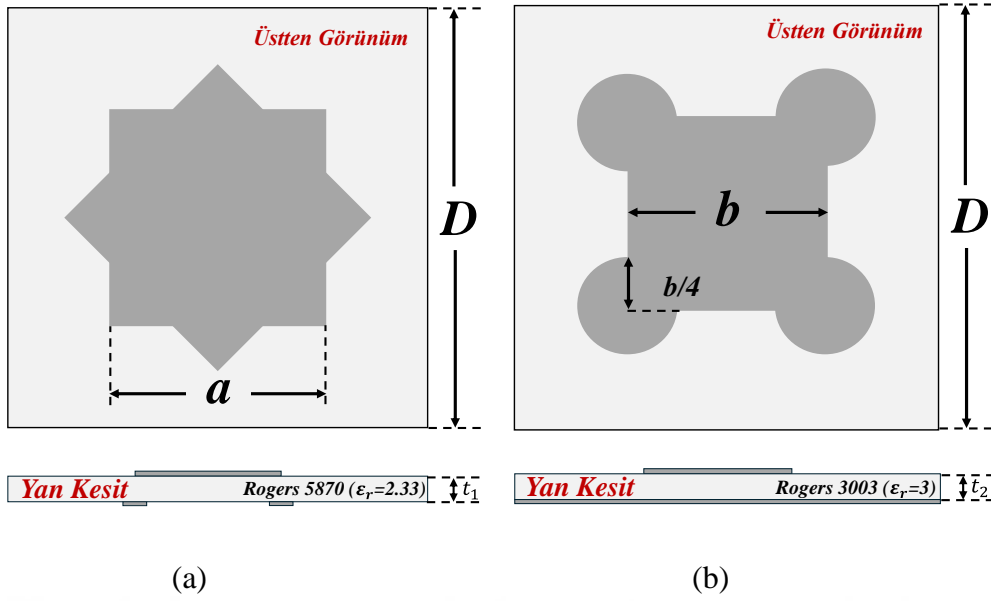
Uygulanacak yöntem çoğunlukla bantların ayırımına ve fiziksel yapıdaki özelliklere bağlıdır [25]. Tek katmanlı bir yansıtıcı dizi ile hem çok bantlı çalışma hem de çift doğrusal polarizasyon elde edilebilir [76]. Bununla birlikte, farklı bantlar için birim

elemanların fazının değiştirilmesi, tek bir açıklık üzerindeki bantların faz elemanları tarafından üretilen karşılıklı kuplaj nedeniyle verimliliğin ve bant genişliği performansının düşmesine neden olur [82]. Son yıllarda, çift bantlı ve/veya çift ortogonal polarizasyonun gerçekleştirilmesine yönelik olarak çalışmalar, FSY'lerin yansıtıcılarda kullanılmasına yol açmıştır [23,25,81,82,83,88,89,90]. FSY bir toprak düzlemi gibi davranır ve çalışma bantlarından birinde sinyali yansıtırken, sinyal diğer çalışma bandında alt yansıtıcıya iletilir.

Bu çalışmada, Ka-bant uydu sistemlerinin aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekansında çalışmak üzere tasarlanan yansıtıcıları izole etmek için bir FSY kullanılmıştır. Ka-bant uydularının aşağı bağlantı frekansında düzlemsel bant geçiren filtre olarak çalışmak üzere tasarlanan basit bir halka rezonatörün kullanılmasıyla, hüzmeye iki farklı frekansta önceden belirlenmiş yöne doğru yönlendirilir. İki yansıtıcı dizinin elemanları nedeniyle oluşan karşılıklı kuplajın bastırılmasıyla iyileştirilmiş kazanç ve açıklık verimliliği elde edilir. FSY için ayrı bir baskılı devre kartı kullanmak yerine, tek taraflı FSY'nin iletken deseni, 30 GHz'de çalışmak üzere tasarlanan üst reflektörün alt tarafına kazınmıştır. Her iki durumda da FSY'lerin varlığı göz önünde bulundurularak 20/30 GHz yansıtıcılar için tasarlanan iki birim hücrenin fazlarının ışınım yapacağı hesaplanmıştır. Besleme anteni olarak yansıtıcıların merkezine yönlendirilmiş çift yarık bir horn anten kullanılmıştır. Yansıtıcı dizinin tam dalga analizi CST Microwave Studio [34] ile nümerik olarak değerlendirilmiştir. Bir prototip üretilmiş ve gönderme/alma işlemi için tasarlanan yansıtıcı dizinin performansı deneysel olarak doğrulanmıştır.

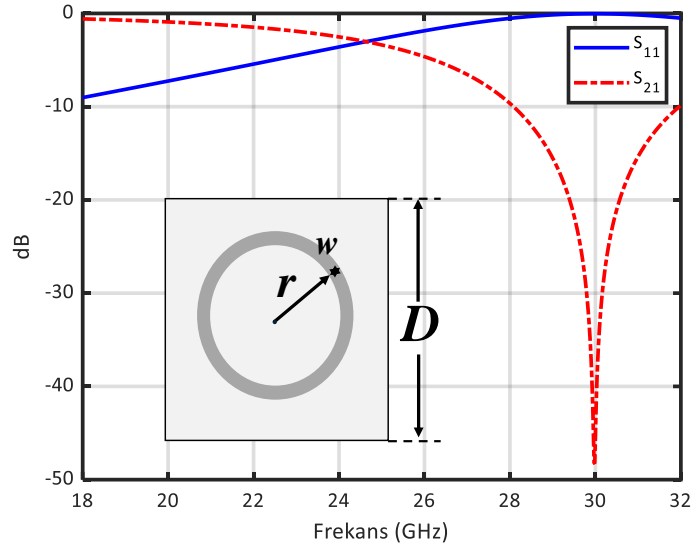
## 5.1 Birim Hücre Tasarımı

Ka-bant yüksek veri hızlı uyduların (HTS) çoğu, uplink için tipik olarak 27,5-31 GHz frekans aralığını, downlink için 17,7-21,2 GHz bandını kullanmaktadır. Bu çalışmada, 20 GHz ve 30 GHz, çift bantlı çalışan yansıtıcı dizinin tasarım frekansları olarak seçilmiştir. Birim hücrelerin periyodikliği Eşitlik (2.1) kullanılarak belirlenmiştir. Birim hücrelerin periyodikliği 20 ve 30 GHz için eşit seçilmelidir. Birim hücrelerin  $D$  'si 6 mm olarak seçilerek ana hüzmeye yönünün  $\theta = 42^\circ$ 'ye kadar yönlendirilmesini sağlanmıştır.



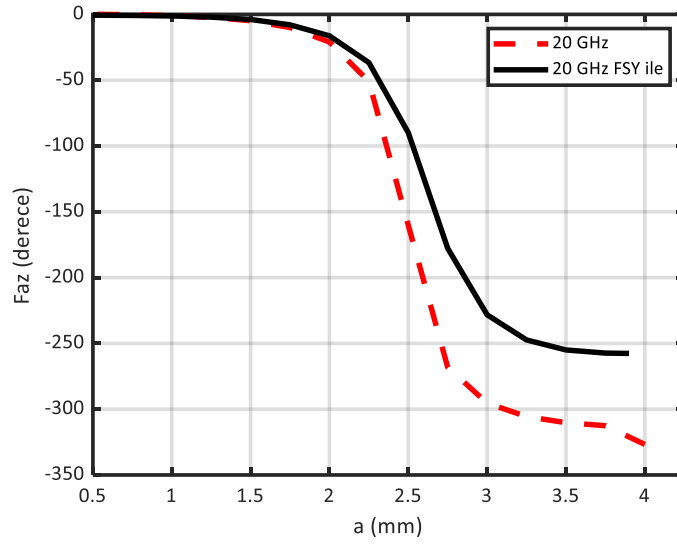
Şekil 5.1 Birim Hücre (a) 30 Ghz için (b) 20 GHz için

Şekil 5.1’de 20 GHz ve 30 GHz yansıtıcı dizileri için birim hücreler gösterilmektedir. Şekil 5.1(a)’da verilen 30 GHz birim hücreninin yıldız şekli,  $a$  genişliği olan bir kare ve onun  $45^\circ$  döndürülmüş versiyonunun kombinasyonu ile oluşturulmuştur. Alttaş malzemesi olarak  $\epsilon_r = 2,33$  dielektrik sabitine sahip ve  $t_1 = 0,79 \text{ mm}$  kalınlığında Rogers 5870 alttaş malzemesi seçilmiştir. FSY’nin iletkeni Rogers 5870 baskılı devre kartının arka tarafına kazınmıştır. Böylece, FSY ve 30 GHz birim hücrelerinin desenini oluşturmak için aynı alttaş malzemesinin iki yüzü kullanılır. Yansıtıcı 20 GHz için önerilen birim hücre Şekil 5.1(b)’de verilmiştir. Minkowski fraktalının ilk iterasyonunun bir türevi olarak tasarlanmıştır. Karenin dört köşesine eklenen çeyrek kare genişliğinde bir çapa sahip dört daireden oluşur. Birim hücrenin alttaş malzemesi olarak  $t_2 = 0,76 \text{ mm}$  kalınlığında Rogers 3003 ( $\epsilon_r = 3$ ) seçilmiştir.

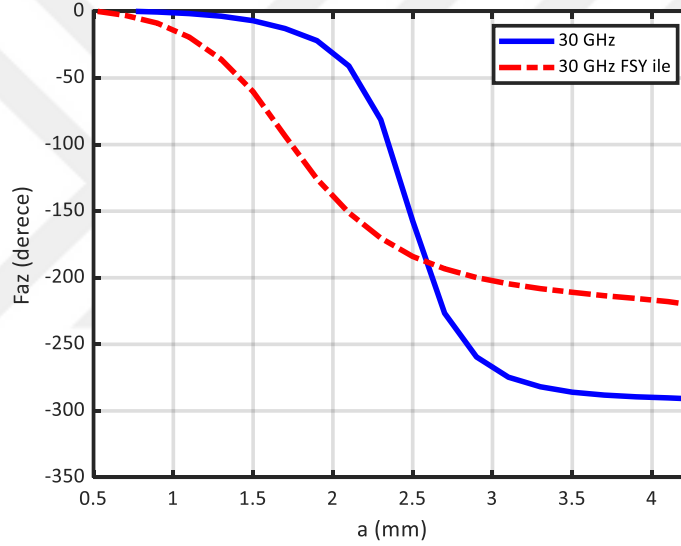


**Şekil 5.2** FSY saçılma parametreleri

FSY'nin birim hücre yapısında halka şeklinde iletken kullanılmıştır. FSY yapısı, genişliği  $w = 0,25$  mm , yarıçapı  $r = 2,02$  mm olan bir halkadan oluşur. İki baskılı devre kartı arasındaki 1 mm kalınlığındaki hava tabakası FSY'nin alt tabakası olarak görev yapar. FSY birim hücresi 20 GHz'de dalga yayılımını geçirecek ve 30 GHz bandını durduracak şekilde tasarlanmıştır. FSY birim hücresinin S-parametreleri Şekil 5.2'de gösterilmiştir. FSY'nin üstten görünümü şekil içinde ek olarak verilmiştir. Saçılma parametreleri, FSY birim hücresinin 24 GHz'e kadar bir bant geçiren filtre olarak çalıştığını ve sonrasında bant durdurucu filtre özellikleri gösterdiğini ortaya koymaktadır (-3dB kesim dikkate alınmıştır). FSY'li çift bantlı yansıtıcı dizisi, yüksek frekanslı yansıtıcı dizi üste ve düşük frekanslı yansıtıcı dizi alta yerleştirilerek oluşturulmalıdır [86]. FSY yüzeyi iki alt tabaka arasında konumlandırılmıştır. Bu durumda, 30 GHz için yansıtıcı yüzey üst katmanda, 20 GHz için yansıtıcı yüzey ise alt katmanda olacaktır. Aralarındaki FSY yapısı 30 GHz'de bir toprak düzlemi gibi ve 20 GHz'de bir geçiş bantı filtresi gibi davranacaktır.



(a)



(b)

**Şekil 5.3.** Önerilen birim hücrelerin a ve b parametresine bağlı olarak değişimi (a) 20 GHz; (b) 30 GHz

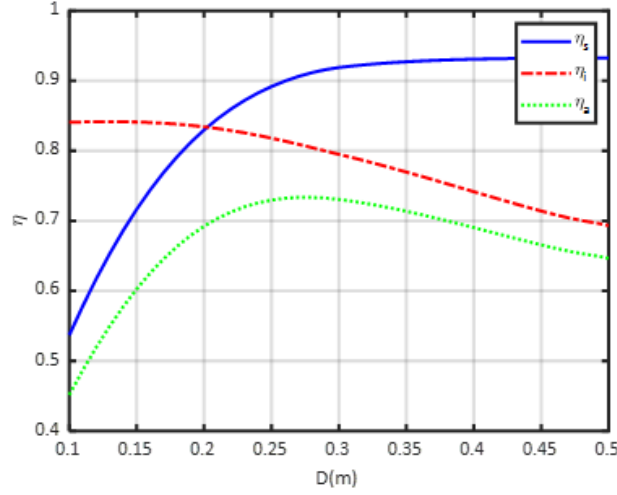
Yansıtıcı yüzey üzerindeki birim hücrelerin fazlarının dağılımı hüzmelin karakteristiğini belirler. Bu nedenle, yansıtıcı tasarımı için gerekli faz değerlerinin doğru bir şekilde elde edilmesi kritik önem taşır. Faz aralığını elde etmek için, birim hücrelerin parametreleri ilgili frekanslarda değiştirilir. FSY, 30 GHz yansıtıcı için toprak düzlemi görevi gördüğünden, birim hücre simülasyonlarına da dahil edilmiştir. Çok katmanlı yapının faz değişimi a parametresinin fonksiyonu olarak Şekil 5.3'te verilmiştir. Yıldız şeklindeki birim hücre ile 30 GHz'de yaklaşık 330° faz aralığı elde edilmiştir. Bu aralık FSY birim hücresi dahil edildiğinde

azalmaktadır. FSY birim hücresi faz aralığını azaltmasına rağmen, karşılıklı kuplaj etkisini azaltarak ve frekans bantları arasında izolasyon sağlayarak yansıtıcı anten performansını arttırdığı için tasarıma dahil edilmelidir. FSY dahil edilerek 20 GHz birim hücrenin faz analizi yapılmıştır. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, tek yansıtıcı birim hücrede  $b$  parametresi değiştirilerek 20 GHz'de  $330^\circ$  faz aralığı elde edilir. FSY içeren çok katmanlı birim hücre ile analiz yapıldığında da bu değer azalmaktadır. Önerilen birim hücrelerin küçük periyodiklik değeri ( $D = 6mm$ ) için bile yüksek bir faz aralığına ulaştığı görülmektedir. FSY'nin dahil edilmesi birim hücrelerin faz aralığını azaltsa da hala kabul edilebilir seviyelerdedir.

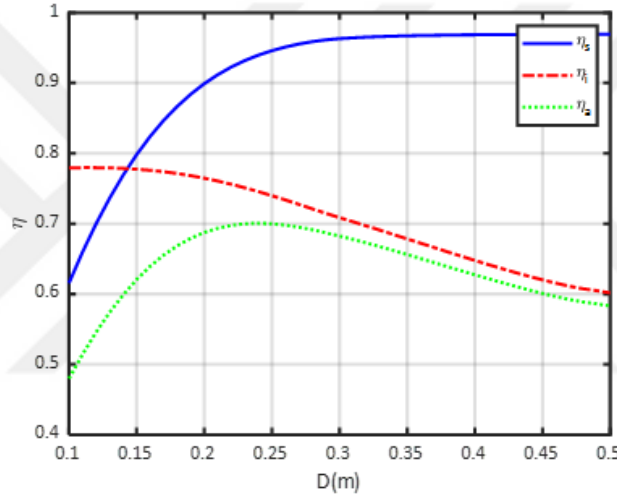
## 5.2 Çift Bantlı Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı

### 5.2.1 Açıklık Verimlilik Analizi

Yansıtıcı dizinin fiziksel boyutlarını belirlemek için bir açıklık verimliliği analizi gerçekleştirilmiştir. Yansıtıcı anten konfigürasyonu Şekil 2.8'de verilmiştir. Ölçümler sırasında 18-40 GHz frekans aralığında çalışan OBHL180400 çift yarıkli horn anten kullanılacaktır. Bu antenin karakteristikleri açıklık verimliliğini gözlemlemek için kullanılır. Besleme anteni  $\cos^q$  fonksiyonu, 30 GHz'de yaklaşık olarak  $q = 11$  değerini alır. Besleme anteninin uzak alan mesafesi 20 GHz'de 154 mm ve 30 GHz'de 231 mm olarak hesaplanır. Her iki durumda da besleme anteninin uzak alan bölgesine yerleştirilmesi gerektiğinden, faz merkezinin  $z$  yönündeki uzaklığı  $H = 250 mm$  olarak seçilmiştir. Yansıtıcı dizi tasarımında, yansıyan hüzenin  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta_o = 20^\circ$  yönüne doğru yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Önceden tanımlanmış besleme anteni ise  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta_f = -20^\circ$  yönüne yerleştirilmiştir. Açıklık verimliliği ( $\eta_a$ ), aydınlatma verimliliği ( $\eta_i$ ) ve taşma verimliliği ( $\eta_s$ ) Şekil 5.4'te yansıtıcı dizi yüzeyinin çapının fonksiyonu olarak verilmiştir. Aydınlatma ve taşma verimliliklerinin çarpımıyla hesaplanan açıklık verimliliği, 20 ve 30 GHz'de sırasıyla  $D = 250 mm$  ve  $D = 280 mm$ 'de en yüksek performansı göstermektedir. Laboratuvarımızdaki baskı devre alttaş malzemelerinin fiziksel boyutları göz önünde bulundurularak, prototip için yansıtıcı yüzeyin çapı  $D = 198 mm$  olarak seçilmiştir, bu da her iki bant için yaklaşık  $\eta_a = 0,69$  açıklık verimliliği ile sonuçlanmaktadır. Ortaya çıkan yansıtıcı yüzey, çapı boyunca 33 birim hücreden oluşmaktadır.



(a)



(b)

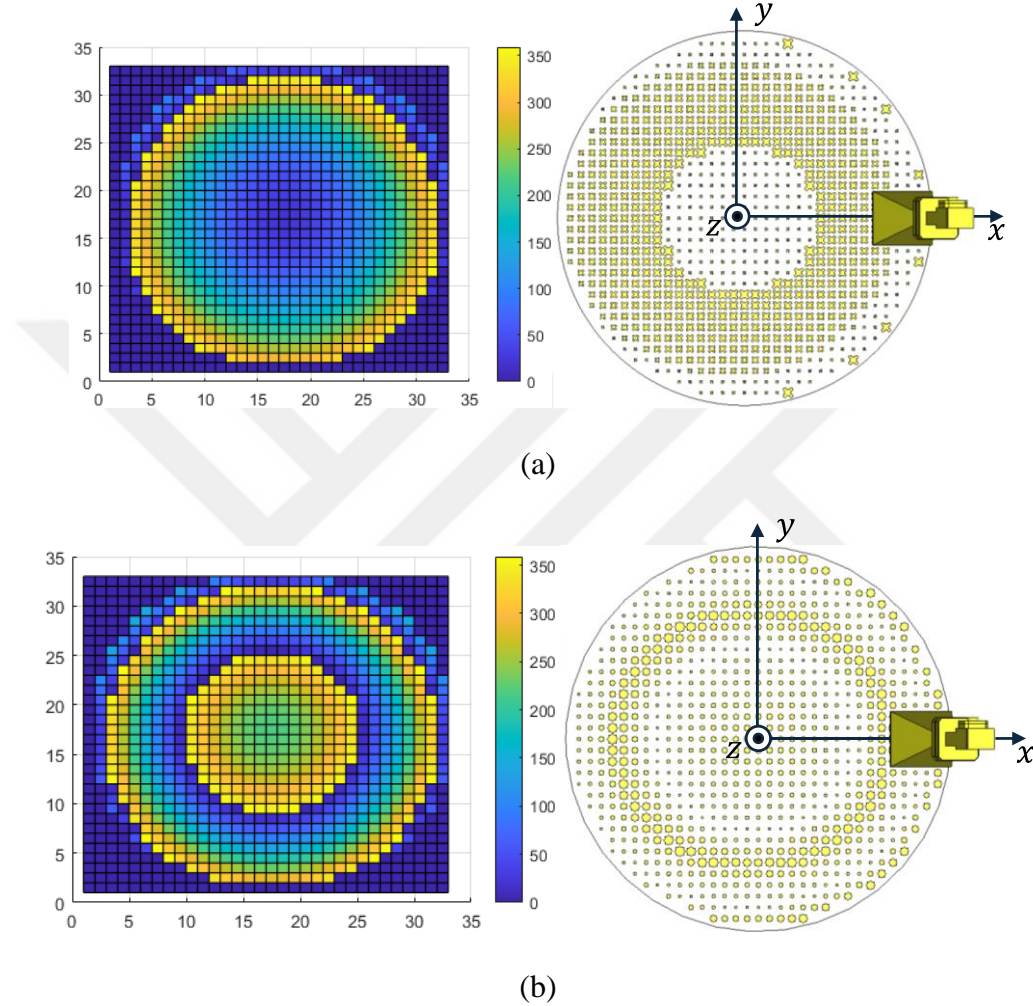
Şekil 5.4 Açıklık verimliliği (a) 20 GHz ve (b) 30 GHz

### 5.2.2 20/30 GHz için Yansıtıcı Yüzey Tasarımı

Yansıtıcı dizinin yüzeyinden yansıyan hüzmenin önceden belirlenmiş bir yöne yönlendirilmesi için yansıtıcı üzerindeki her bir birim hücrenin faz açısının hesaplanması gerekir. Bölüm 2.1.2 de verilen eşitlikler kullanılarak faz dağılımı elde edilir. Yansıtıcı yüzeyindeki faz dağılımı Şekil 5.2'de verilen birim hücre boyutu ile eşleştirilmiştir. Yansıtıcı yüzeydeki her bir birim hücre için, eleman boyutu Eşitlik (2.4) kullanılarak elde edilen faz değerini vermelidir.  $33 \times 33$  birim hücreden oluşan yansıtıcı dizinin faz dağılımı Şekil 5.5'te 20/30 GHz için verilmiştir. Yansıtıcı yüzey ile besleme anteninin faz merkezi arasındaki dikey mesafe 30 GHz için  $H = 250$  mm olarak ayarlanmıştır. Bir antenin faz merkezi



konumu frekansın fonksiyonu olarak değiştiğinden, besleme anteninun 20 GHz ve 30 GHz'deki faz merkezleri birbirinden farklı olacaktır. Faz merkezinin 20 GHz ve 30 GHz'deki konumu ve yansıtıcı yüzeye göre mesafesi göz önünde bulundurularak, 20 GHz yansıtıcı dizi antenin birim hücrelerin karşılık gelen fazlarının belirlenmesinde  $H$ 'ye 5.18 mm eklenmiştir.

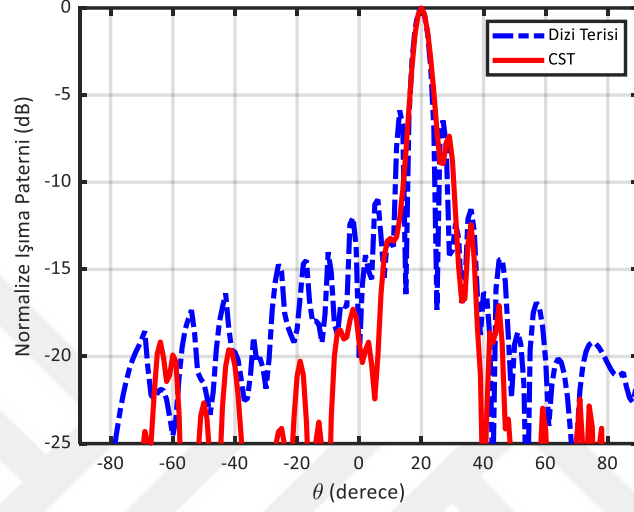


Şekil 5.5 Faz dağılımı ve ilgili yansıtıcı yüzeyler (a) 20 GHz; (b) 30 GHz

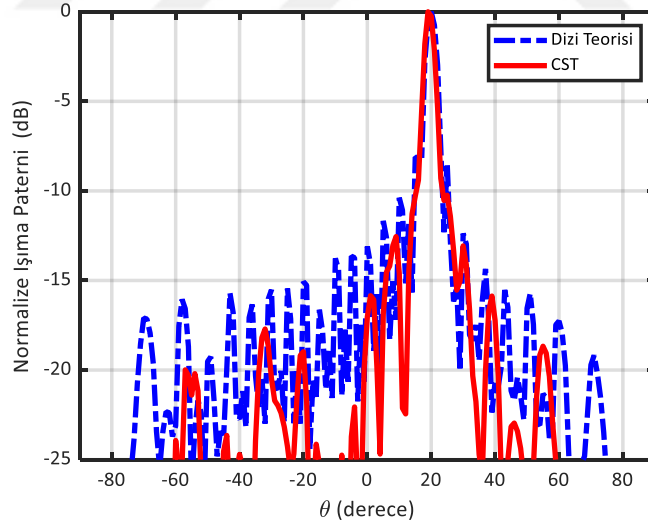
### 5.3 Analiz Sonuçları

Yansıtıcı dizi antenin ana hüzmeyi hem 20 GHz hem de 30 GHz frekanslarında  $\theta_o = 20^\circ$  doğrultusuna yönlendirmesi gerekmektedir. Besleme anteni koordinat sisteminin (91 mm, 0 mm, 250 mm) noktasına yerleştirilmiştir. Çalışmada öncelikli olarak, yansıtıcı antenlerin her biri ayrı ayrı simüle edilmiştir. Tek katmanlı yansıtıcı antenlerin performansları dizi teorisi kullanılarak analitik olarak da analiz edilmiştir. Şekil 5.6'da,  $\phi = 0^\circ$  düzleminde yansıtıcıların simüle edilmiş

ve hesaplanmış normalize ışınma paternini göstermektedir. Bu şekilde, 30 GHz'lik bir yansıtıcının tüm bakır zemin düzlemi ile simüle edildiğine dikkat edilmelidir (FSY ve 20 GHz yansıtıcı olmadan). Benzer şekilde, 20 GHz yansıtıcı, FSY ve 30 GHz yansıtıcı katmanları olmadan simüle edilmiştir. Ana hüzmeye her iki yansıtıcı ile  $\theta_0 = 20^\circ$  yönündedir. Tek katmanlı yansıtıcıların yönlülükleri 20 ve 30 GHz'de sırasıyla 22,5 dB ve 24,8 dB olarak elde edilmiştir.



(a)

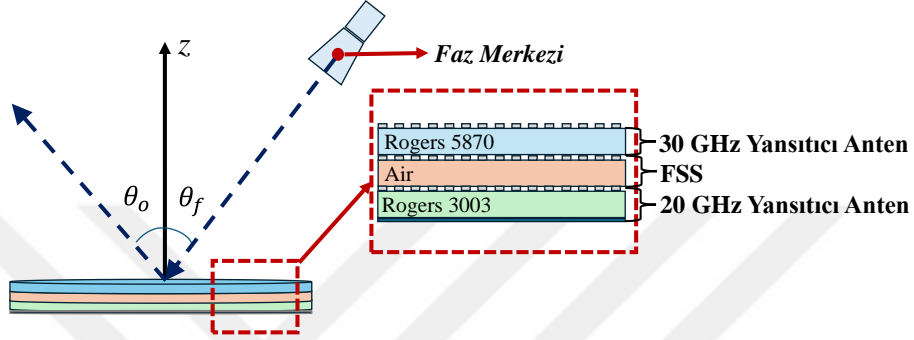


(b)

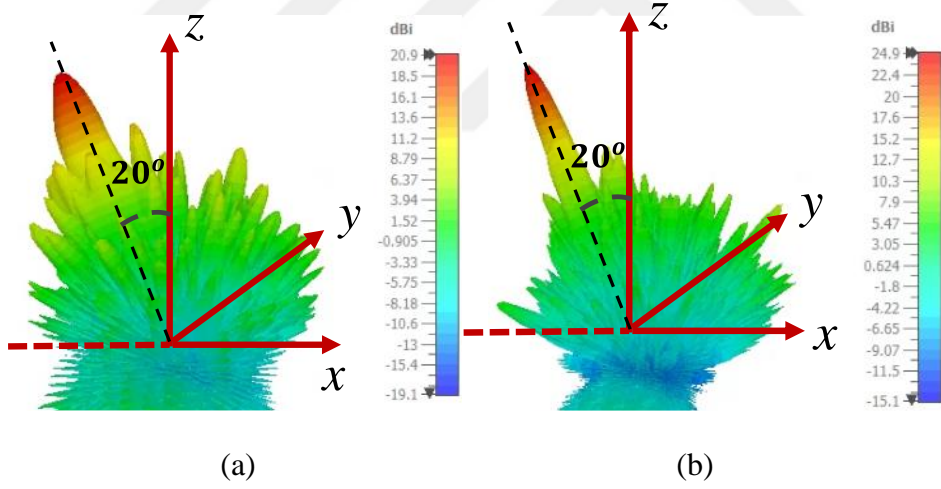
**Şekil 5.6.** Yansıtıcı dizilerin  $\phi = 0^\circ$  düzlemindeki normalize edilmiş ışınma paternleri (a) 20 GHz yansıtıcı dizisi; (b) 30 GHz yansıtıcı dizisi

Üstte 30 GHz yansıtıcı dizi, altta 20 GHz yansıtıcı dizi ve arada FSY'den oluşan çok katmanlı yansıtıcı dizi sistemi Şekil 5.7'de verilmiştir. Bu şekilde gösterildiği gibi, FSY yapısı iki yansıtıcı yüzeyi arasına yerleştirilmiştir. Yansıtıcı dizinin 20

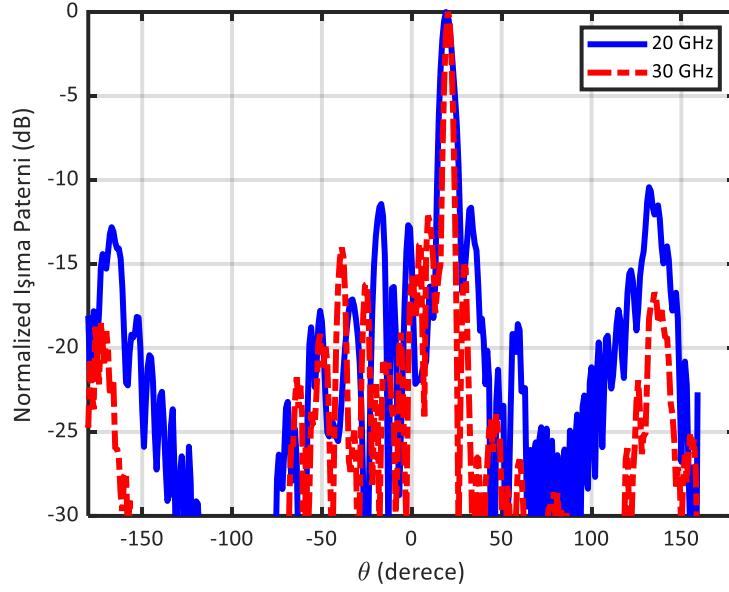
GHz ve 30 GHz’de simüle edilmiş üç boyutlu yönlülük paternleri Şekil 5.8’de verilmiştir. Yansıtıcı anten sisteminin maksimum yönlendiricilik 20 GHz’de 20,9 dBi, 20.9 GHz’de 21,8 dBi ve 30 GHz’de 24,9 dBi olarak elde edilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü gibi her iki hedef frekansta da hüzme  $\theta_o = 20^\circ$  doğrultusuna yönlendirilmiştir. Çift bantlı FSY destekli yansıtıcı sistemin  $\phi = 0^\circ$  düzlemindeki normalize edilmiş ışınım paternleri Şekil 5.9’da verilmiştir. 20 GHz’de daha yüksek yan loblar gözlenmektedir. Ancak, bunlar hala -10 dB seviyesinin altındadır.



Şekil 5.7 Çift bantlı FSY destekli yansıtıcı dizi anten sistemi



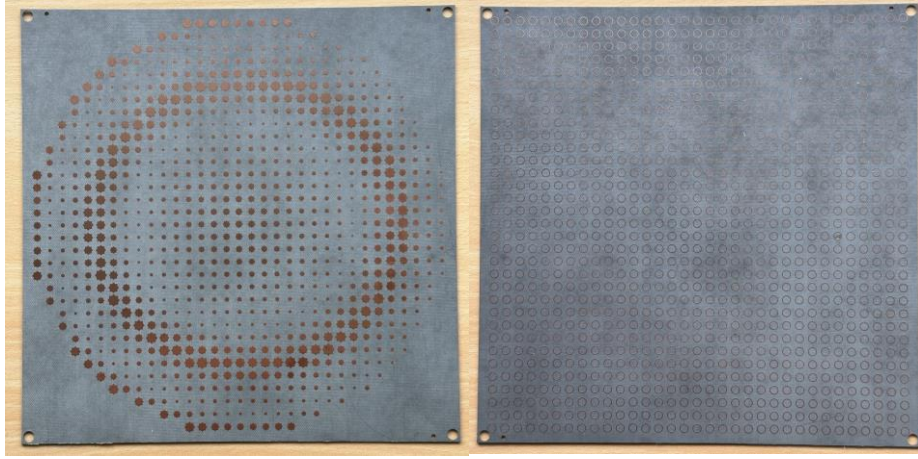
Şekil 5.8 Yansıtıcı dizi anten sisteminin yönlendiricilik paternleri (a) 20 GHz; (b) 30 GHz



**Şekil 5.9** Çift bantlı FSY destekli yansıtıcı dizi anten sisteminin  $\phi = 0^\circ$  düzlemindeki normalize ışınma patern

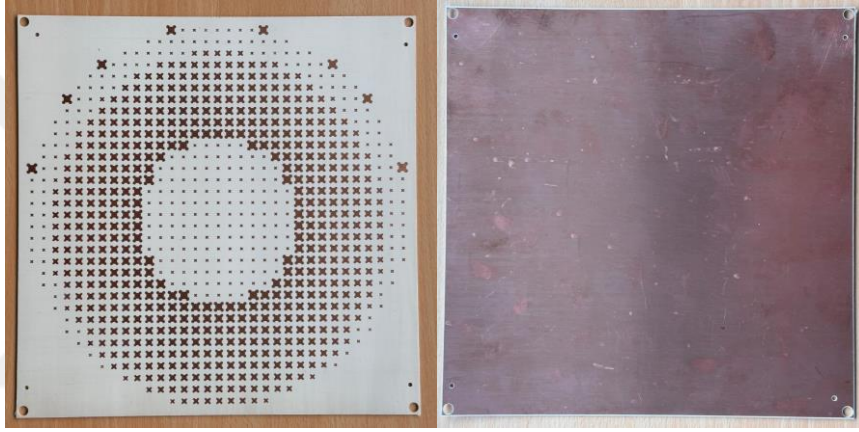
#### 5.4 Deneysel Sonuçlar

20 GHz ve 30 GHz’de çalışmak üzere tasarlanan yansıtıcı yüzeylerin baskısı yapılmıştır. 0.79 mm kalınlığa sahip Rogers 5870 ve 0.76 mm kalınlığa sahip Rogers 3003 alttaş malzemelerinin üzerine PE (photo etching) yöntemi ile iletken desenler basılmıştır. Şekil 5.10(a)’da görüldüğü üzere üst katmanda yer alan alttaş malzemesinin üst yüzeyine birim hücreler yerleştirilirken alt yüzeyine FSY birim hücreleri yerleştirilmiştir. FSY’nin alttaş malzemesi hava olarak seçilmiştir. Bu yüzden iletkenleri üst katmandaki alttaş malzemesinin alt katmanına yerleştirilmiştir. Şekil 5.10(c)’de görüldüğü üzere alt katmanda yer alan alttaş malzemesinin üst yüzeyine birim hücreler yerleştirilirken alt yüzeyinde toprak düzlemi yer almaktadır. Alttaş malzemelerinin bakır kalınlığı  $35\mu\text{m}$ ’dir. İki alttaş malzemesinin arasında hava katmanı yer almaktadır. 1mm hava kalınlığını sağlamak için havaya yakın dielektriksel özellik gösteren 1mm kalınlığında köpük kullanılmıştır. Ayrıca katmanlarda yer alan birim hücrelerin tam olarak hizalanabilmesi için köşelerden 1mm uzaklıkta 5mm çapında delikler üretim sürecinde prototipe eklenmiştir. 5 mm çapı olan plastik vidalar ile tüm yüzeyler birbirine sabitlenmiştir.



(a)

(b)



(c)

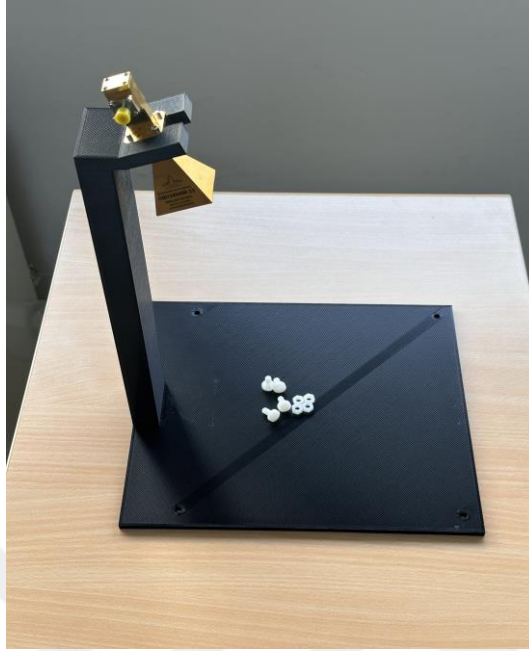
(d)

**Şekil 5.10** Üretilen yansıtıcı dizi anten baskı devre kartları (a) 30 GHz yansıtıcı dizinin üst tarafı; (b) 30 GHz yansıtıcı dizinin alt tarafı (FSS yüzeyi); (c) 20 GHz yansıtıcı dizinin üst tarafı; (d) 20 GHz yansıtıcı dizinin alt tarafı

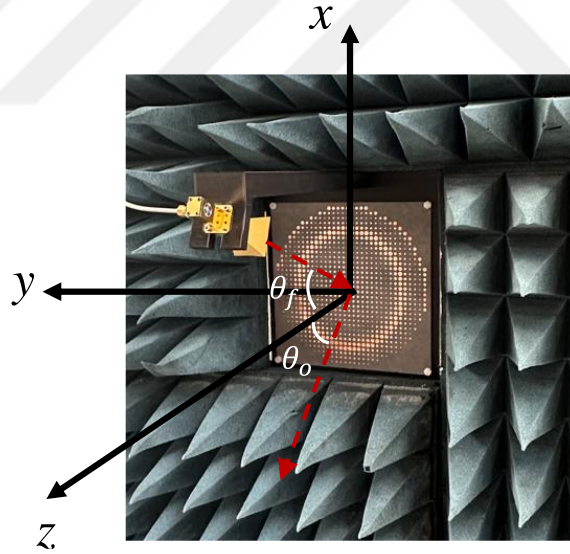
Besleme antenin ölçüm esnasında doğru konumda bulunması ve yansıtıcı yüzeylerin sabit kalabilmesi için tutucu kullanılmıştır. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi besleme antenin faz merkezinin 250 mm yükseklikte olacak ve  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = 20^\circ$  yer alacak şekilde tutucu tasarlanmıştır. Yansıtıcı yüzeylerde olduğu gibi tutucunun alt yüzeyine köşelerden 1mm uzaklıkta ve 5mm çapında delikler eklenmiştir. Tutucu 3B baskı makinesi ile üretilmiş olup PLA (Polilaktik asit) malzemesi kullanılmıştır. Ölçüm Anritsu markasının vektör network analizörü kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerde yüksek frekansla uyumlu RF kablolar kullanılmıştır. Şekil 5.12’de yansıtıcı dizi anten ölçüm düzeneği verilmiştir. Bu



şekilde yansıtıcı dizi anten, koordinat sistemi ve anten etrafına yerleştirilen soğurucular görülmektedir.



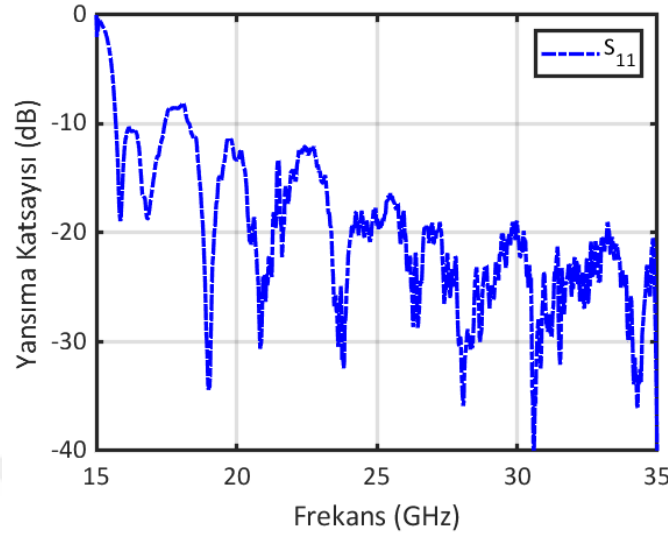
Şekil 5.11 Yansıtıcı dizi anten sistemi için üretilen tutucu



Şekil 5.12 Yansıtıcı dizi anten ölçüm düzeneği

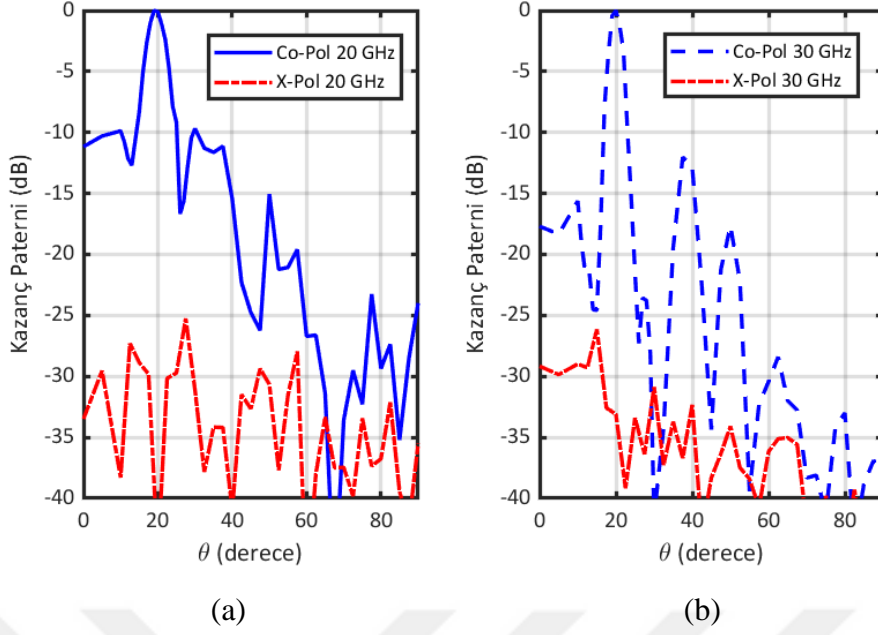
Çift bantlı yansıtıcı dizinin ölçülen yansıma katsayısı Şekil 5.13'te verilmiştir. Frekansın fonksiyonu olarak yansıtıcı dizideki  $S_{11}$  değişimi, 18 GHz'in üzerindeki frekanslar için empedans uyumluluğunun gözlemlendiğini göstermektedir. Bu sonuç, WR42 dalga kılavuzu-2,92 mm konektör adaptörlü horn antenin kesim frekansı nedeniyle beklenen bir sonuçtur. Ka-bant uydularının yukarı bağlantı ve aşağı

bağlantı frekansları göz önüne alındığında, sistemin empedans uyumu açısından düzgün çalıştığı sonucuna varılabilir.

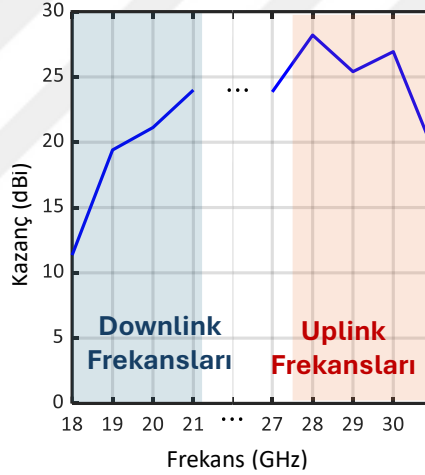


**Şekil 5.13** Yansıtıcı dizi antenin ölçülen yansıtma katsayısı

Çift bantlı yansıtıcı dizinin  $\phi = 0^\circ$  düzlemindeki normalize edilmiş ışıma paternlerinin ölçümleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Eş ve çapraz polarizasyon seviyeleri 20 ve 30 GHz'de  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  açısal aralığında gösterilmiştir. Simülasyon ve dizi teorisi sonuçlarıyla uyumlu olarak, her iki simülasyonda da  $\theta = 20^\circ$ 'ye doğru ışın yayılımı gözlemlenmiştir. Çapraz polarizasyon seviyesi hem 20 hem de 30 GHz paternlerinde yaklaşık -35 dB'dir. Yansıtıcı dizinin maksimum kazancı 20 ve 30 GHz'de sırasıyla 21,13 dBi ve 26,94 dBi olarak ölçülmüştür. Eş polarizasyonlu paternin 20 GHz'deki 3 dB hüzme genişliği  $5,3^\circ$  olarak gözlemlenirken, bu değer 30 GHz'de  $3,8^\circ$ 'ye düşmektedir. Ölçülen paternlerin 3 dB hüzme genişlikleri simüle edilen paternlerle neredeyse aynıdır. Açıklık verimliliği 30 GHz ve 20 GHz'de sırasıyla %55 ve %51 olarak elde edilmiştir. Üst ve alt bantlarda verimliliğin azalması, FSY yapısı nedeniyle daralan yansıtma faz aralığına bağlanmaktadır. Dual bantlı yansıtıcı dizinin Ka-Bant uydu aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekanslarında ölçülen kazanç değişimi Şekil 5.15'te verilmiştir. Mavi ve pembe gölgeli alanlar sırasıyla aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekans aralıklarını göstermektedir. Sonuçlar, önerilen çift bantlı FSY destekli yansıtıcı dizinin yüksek hızlı Ka-bant uydular için uygun olduğunu göstermektedir.



**Şekil 5.14** Çift bantlı yansıtıcı dizinin ölçülen normalize kazanç paternleri (a) 20 GHz; (b) 30 GHz



**Şekil 5.15** Ka-Bant uydu aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekanslarında dual bantlı yansıtıcı dizinin ölçülen kazanç değişimi

## 5.5 Sonuç

Bu çalışmada, Ka-band Tx-Rx frekanslarında (20/30 GHz) çalışan yüksek hızlı uydular için dual bantlı, dual doğrusal polarize yansıtıcı sistemi önerilmektedir. Halka elemanlardan oluşan bir FSY, 30 GHz'de toprak düzlemi görevi gören ve 20 GHz'de dalga iletimine izin veren düzlemsel filtre olarak kullanılmaktadır. Tek bir yansıtıcı yüzey üzerinde tasarlanan çift bantlı yansıtıcı dizi anten sistemi ile karşılaştırıldığında, iki yansıtıcı FSY destekli dizinin elemanları arasındaki



karşılıklı kuplajın bastırılmasıyla daha iyi kazanç ve açıklık verimlilik elde edildiği görülmüştür. Yansıtıcı diziler için dual polarize birim hücreler kullanılmıştır. Besleme anteninin  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = -20^\circ$ 'ye yerleştirildiği ve yansıyan dalganın  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = 20^\circ$ 'ye yönlendirildiği çift bantlı bir yansıtıcı sistem gösterilmiştir. Yansıtıcı dizinin performansı tam dalga analizi ve analitik yöntem ile analiz edilmiştir. Yansıtıcı anten sistemi ile 20 GHz'de 20,9 dB, 20,9 GHz'de 21,8 dB ve 30 GHz'de 24,9 dB maksimum yönlülük elde edilmiştir. Bir prototip üretilmiş ve gönderme/alma işlemi için tasarlanan yansıtıcı dizinin performansı deneysel olarak doğrulanmıştır. Sonuçlar, önerilen dual bantlı yansıtıcı anten sisteminin yüksek hızlı Ka-bant uydularda kullanılabileceğini göstermektedir.



Son yıllarda yüksek performans ve kolay üretim gibi avantajlarından dolayı yüksek veri hızlı uydu sistemlerinde yansıtıcı dizi sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Yansıtıcı dizi antenler, reflektör antenlere göre, çok bantlı çalışma ve çift polarizasyon gibi belirgin üstünlüklere sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında da yüksek veri hızlı 5G/6G uydularında kullanılmak üzere çok huzmeli yansıtıcı dizi antenlerin tasarlanması amaçlanmıştır. Öncelikle yansıtıcı dizi anten tasarımı yapabilmek için gerekli olan teorik alt yapının sağlanması hedeflenmiştir. Bu teorik alt yapı ile faz grafikleri, faz değerleri tablosu, yansıtıcı dizi antenin boyutlarını belirlemede kullanılan açıklık verimlilik analizi gibi konuların öğrenilmesi ve kodlamalarının yapılması hedeflenmiştir.

Tez kapsamında literatürde yer alan yansıtıcı dizi antenler incelenerek üç farklı çok huzmeli yansıtıcı dizi anten önerilmiştir. Birinci çalışmada, merkezden beslemeli ve eksen dışı beslemeli çift polarize yansıtıcı dizi anten çalışması yapılmıştır. Ayrıca 5G uydularında çalışabilir olduğu kanıtlanmıştır. Bu çalışmada, 5G/6G antenlerinde kullanılmak üzere SatCom Ka Bandı downlink frekanslarında çalışan çift polarizasyonlu bir yansıtıcı anten için yeni tasarlanan tek katmanlı çift polarizasyonlu bir birim hücre önerilmektedir. Tasarlanan yapı 18 GHz'de 21,72 dB yönlülük, 20,99 dBi kazanç ve %84,58 toplam verimliliğe sahiptir. Tasarlanan yapının merkezden beslemeli durum için TE ve TM modlarındaki paternlerinin tam olarak örtüştüğü ve eksen dışı beslemeli durum için yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı her iki tasarım çift polarize olarak adlandırılabilir. Bundan dolayı her iki tasarım çift polarize olarak adlandırılabilir.

Eksen dışı uygulama için yansıtıcı yüzeyin çapı boyunca 25 birim hücreden oluşan bu prototip, 0,51 mm dielektrik kalınlığına ve 35 µm bakır kalınlığına sahip Arlon DicLad 880 baskı devre kullanılarak üretilmiştir. Yansıtıcı dizi anten sisteminin ölçümü tam yansısız odada gerçekleştirilmiştir. Anten kazancı 18-22 GHz frekans bandında kararlı karakteristik göstermiştir. Benzetim ve ölçüm sonuçlarında, önerilen birim hücrelerden oluşan yansıtıcı dizinin  $\theta = 15^\circ$  yönelimli kalem hüzmeler ürettiği gözlemlenmiştir.

İkinci çalışma kapsamında geleneksel kare mikroşerit birim hücreler kullanılarak 24/30 GHz frekansında çalışan çok huzmeli çift polarize yansıtıcı dizi anten tasarlanmıştır.  $\phi = 180^\circ$  düzleminde  $\theta = 15^\circ$  yönüne eş zamanlı hüzmeyi yönlendirilebilen, 24/30 GHz frekanslarında çalışan FSY destekli çift bantlı yansıtıcı dizi anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bantlar arasındaki girişim ve karşılıklı kuplaj etkisini azaltmak için FSY yapısı kullanılmıştır. Aynı ayrı çalıştırıldığında, 24 ve 30 GHz için sırasıyla 25,97 dB ve 26,9 dB yönlendiricilik elde edilmiştir. Yansıtıcı yüzeyler ile FSY birleştirildiğinde, 24 GHz için 22,7 dB ve 30 GHz için 28,1 dB yönlendiricilik elde edilmiştir. Tam dalga simülasyon sonuçları, hüzmelerin  $\theta = 15^\circ$  yönüne doğru yönlendirildiğini açıkça göstermektedir. 3B simülasyon sonuçları, önerilen FSY destekli çift bantlı yansıtıcı sistemin Ka bant uydu sistemlerinde başarıyla uygulanabileceğini kanıtlamaktadır.

Son çalışmada ise Ka-band Tx-Rx frekanslarında (20/30 GHz) çalışan yüksek hızlı uydular için çift-bant çift doğrusal polarize yansıtıcı sistem önerilmiştir. Mikroşerit halka elemanlardan oluşan bir FSY, 30 GHz'de çalışan üst katman için toprak düzlemi görevi görmektedir. 20 GHz'de ise dalganın iletimine izin veren düzlemsel filtre gibi davranarak alt katmanda yer alan yansıtıcı dizi antenin çalışmasına izin vermektedir. Tek bir yansıtıcı yüzey üzerinde tasarlanan çift bantlı yansıtıcı dizi anten sistemi benzerleriyle karşılaştırıldığında, yansıtıcı dizilerin elemanları nedeniyle oluşan karşılıklı kuplajın bastırılmasıyla daha iyi kazanç değeri ve açıklık verimliliği elde edilmektedir. FSY iletkenleri üst katmanda yer alan alümin malzemesinin alt kısmına yerleştirilmiştir. FSY alümin malzemesi olarak da hava katmanı kullanılmıştır. Bu sayede maliyet, ağırlık ve hacimden kazanç sağlanmıştır. FSY yapısının alümin malzemesi olarak hava katmanı kullanılması ile verimlilikten ödün verilmemiştir.

Son çalışmada yer alan yansıtıcı dizi antenlerde de çift polarize birim hücreler kullanılmıştır. Çalışma kapsamında besleme anteninin  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = -20^\circ$ 'ye yerleştirildiği ve yansıyan dalganın  $\phi = 0^\circ$  düzleminde  $\theta = 20^\circ$ 'ye yönlendirildiği çift bantlı bir yansıtıcı sistem gösterilmiştir. Performansı tam dalga analizi ve analitik yöntem ile analiz edilmiştir. Yansıtıcı anten sistemi ile 20 GHz'de 20,9 dB, 20,9 GHz'de 21,8 dB ve 30 GHz'de 24,9 dB maksimum yönlendiricilik elde edilmiştir. Bu çalışmada yer alan yansıtıcı dizi anten prototipi üretilmiş ve gönderme/alma işlemi için tasarlanan yansıtıcı dizinin performansı

deneysel olarak doğrulanmıştır. Sonuçlar, önerilen çift-bantlı yansıtıcı anten sisteminin yüksek hızlı Ka-bant uydularda kullanılabileceğini göstermiştir.



- [1] M. Corici, K. Liolis, C. Politis, A. Geurtz, J. Cahill, S. Bunyan, T. Schlichter, F. Völk, Adam Kapovits, “Satellite is 5G: SATis5 "Whitepaper, November 2020.
- [2] Y. Rahmat-Samii and A. C. Densmore, “Technology Trends and Challenges of Antennas for Satellite Communication Systems”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 63, no. 4, pp. 1191–1204, Apr. 2015, doi: 10.1109/TAP.2014.2366784.
- [3] K. Singarajah, “Overview of Ka-band Satellite System Developments & Key Regulatory Issues". ITU Conference on Prospects for use of The Ka-Band by Satellite Communication Systems Almaty”, Kazakhstan, 5 - 7 September 2012.
- [4] Y. Yao, X. Q. Lin, T. Qin, Y. Su, and X. Yang, “Shared-Aperture Ka-Band Reflectarray and X-Band Phased Array for Broadband Inter-Satellite Communication”, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 11, pp. 11199–11204, Nov. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3209249.
- [5] Z. Zhang, H. Luyen, J. H. Booske, and N. Behdad, “A Dual-Band, Polarization-Rotating Reflectarray With Independent Phase Control at Each Band,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 69, no. 9, pp. 5546–5558, Sep. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3060923.
- [6] P. Nayeri, F. Yang, A. Z. Elsherbeni, “Reflectarray Antennas: Theory, Designs, and Applications”, John Wiley & Sons, 20 Feb. 2018 – 432.
- [7] P. Nayeri, “Advanced Design Methodologies and Novel Applications of Reflectarray Antennas Reflectarray Antennas”, University of Mississippi, Electronic Theses and Dissertations, 2012
- [8] J. Huang and J. A. Encinar, “Reflectarray Antennas”, Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2008.
- [9] D. M. Pozar, “Bandwidth of reflectarrays”, *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 21, pp. 1490–1491, 2003.
- [10] Z. Zhang, H. Luyen, J. H. Booske, and N. Behdad, “A Dual-Band, Polarization-Rotating Reflectarray With Independent Phase Control at Each Band,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 69, no. 9, pp. 5546–5558, Sep. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3060923.
- [11] Z. Hamzavi-Zarghani and Z. Atlasbaf, “A New Broadband Single-Layer Dual-Band Reflectarray Antenna in X- and Ku-Bands,” *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 602–605, 2015, doi: 10.1109/LAWP.2014.2374351.
- [12] S.-C. Tian, Y.-Y. Zhao, and L. Li, “A Novel Dual-Band and Dual-Polarized Reconfigurable Reflectarray Antenna Element,” in 2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Xuzhou: IEEE, Jul. 2018, pp. 1–2. doi: 10.1109/CSQRWC.2018.8455237.
- [13] R. Deng, Y. Mao, S. Xu, and F. Yang, “A Single-Layer Dual-Band Circularly Polarized Reflectarray With High Aperture Efficiency,” *IEEE Trans. Antennas*

- Propagat., vol. 63, no. 7, pp. 3317–3320, Jul. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2429684.
- [14] K. Mayumi, H. Deguchi, and M. Tsuji, “Wideband single-layer microstrip reflectarray based on multiple-resonance behavior”, in 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA: IEEE, Jul. 2008, pp. 1–4. doi: 10.1109/APS.2008.4619757.
- [15] A. Yu, F. Yang, A. Elsherbeni, and J. Huang, “Design and measurement of a circularly polarized Ka-band reflectarray antenna”, Proc. EuCAP, pp. 2769–2773, 2009.
- [16] M. M. Mohammadirad, N. Komjani, A. R. Sebak, and M. R. Chaharmir, “A Broadband Reflectarray Antenna using the Triangular Array Configuration”, ACES Journal, vol. 26, no. 8, pp. 640–650, May 2022.
- [17] S. H. Yusop, N. Misran, M. T. Islam, and M. Y. Ismail, “Design of High Performance Dual Frequency Concentric Split Ring Square Element for Broadband Reflectarray Antenna”, ACES Journal, vol. 27, no. 4, 2012.
- [18] D. I. Wu, R. C. Hall, and J. Huang, “Dual-frequency microstrip reflectarray”. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1995 Digest, Newport Beach, CA, USA: IEEE, 1995, pp. 2128–2131. doi: 10.1109/APS.1995.531015.
- [19] J. A. Encinar, “Design of a dual frequency reflectarray using microstrip stacked patches of variable size”, Electron. Lett., vol. 32, no. 12, p. 1049, 1996, doi: 10.1049/el:19960710.
- [20] M. R. Chaharmir, J. Shaker, N. Gagnon, and D. Lee, “Design of Broadband, Single Layer Dual-Band Large Reflectarray Using Multi Open Loop Elements”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 58, no. 9, pp. 2875–2883, Sep. 2010, doi: 10.1109/TAP.2010.2052568.
- [21] A. Yu, F. Yang, A. Z. Elsherbeni, J. Huang, and Y. Kim, “An Offset-Fed X-Band Reflectarray Antenna Using a Modified Element Rotation Technique”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 60, no. 3, pp. 1619–1624, Mar. 2012, doi: 10.1109/TAP.2011.2180299.
- [22] C. Han, C. Rodenbeck, J. Huang, and K. Chang, “A C/Ka Dual Frequency Dual Layer Circularly Polarized Reflectarray Antenna With Microstrip Ring Elements”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 52, no. 11, pp. 2871–2876, Nov. 2004, doi: 10.1109/TAP.2004.835144.
- [23] A. H. Gülseren, A. Alparslan, and N. T. Tokan, “Dual Band Linear Polarized Reflectarray System with FSS Backing,” in 2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkiye: IEEE, Nov. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ELECO60389.2023.10416002.
- [24] Bodur, S. Unaldi, S. Cimen, and G. Cakir, “A novel reflectarray antenna combined with double layer FSS for RCS reduction,” in 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade: IEEE, Nov. 2017, pp. 1–3. doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249385.
- [25] T. Smith, U. Gothelf, O. S. Kim, and O. Breinbjerg, “An FSS-Backed 20/30 GHz Circularly Polarized Reflectarray for a Shared Aperture L- and Ka-Band

- Satellite Communication Antenna,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 62, no. 2, pp. 661–668, Feb. 2014, doi: 10.1109/TAP.2013.2292692.
- [26] B. Xi, Q. Xue, Y. Cai, L. Bi, and Y. Wang, “Analytical Method for an FSS-Sandwiched Dual-Band Reflectarray Antenna,” *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 77, 2019.
- [27] M. Mussetta, N. Bliznyuk, P. Pirinoli, N. Engheta, and R. E. Zich, “Application of genetic algorithms for optimization of a FSS reflectarray antenna,” in *10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, 2004., Dnepropetrovsk, Ukraine: IEEE, 2004, pp. 522–524. doi: 10.1109/MMET.2004.1397104.
- [28] Z. Wang et al., “1 Bit Electronically Reconfigurable Folded Reflectarray Antenna Based on p-i-n Diodes for Wide-Angle Beam-Scanning Applications,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 68, no. 9, pp. 6806–6810, Sep. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2975265.
- [29] X. Yang et al., “A Broadband High-Efficiency Reconfigurable Reflectarray Antenna Using Mechanically Rotational Elements,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 65, no. 8, pp. 3959–3966, Aug. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2708079.
- [30] W. Zhang, Y. Li, and Z. Zhang, “A Reconfigurable Reflectarray Antenna With an 8  $\mu$  m-Thick Layer of Liquid Crystal,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 4, pp. 2770–2778, Apr. 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3125378.
- [31] S.-G. Zhou et al., “A Wideband 1-Bit Reconfigurable Reflectarray Antenna at Ku -Band,” *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 21, no. 3, pp. 566–570, Mar. 2022, doi: 10.1109/LAWP.2021.3138438.
- [32] Y. Li and A. Abbosh, “Electronically Controlled Phasing Element for Single-Layer Reconfigurable Reflectarray,” *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 628–631, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2203290.
- [33] H. Zhang, W. Wu, Q. Cheng, Q. Chen, Y.-H. Yu, and D.-G. Fang, “Reconfigurable Reflectarray Antenna Based on Hyperuniform Disordered Distribution,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 9, pp. 7513–7523, Sep. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3193230.
- [34] The Homepage of CST Microwave Studio. Accessed: 2023. [Online]. Available: <http://www.cst.com/>, 2023
- [35] E. Nido, “New Advances On Multi-Frequency And Multi-Beam Reflectarrays With Application To Satellite Antennas In Ka-Band”, *Universidad Politécnic De Madrid, Doctoral Thesis, Madrid*, 2018
- [36] Florencio, R., Boix, R.R., Carrasco, E., Encinar, J.A., Barba, M. and Pérez-Palomino, G. (2014), Broadband reflectarrays made of cells with three coplanar parallel dipoles. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 56: 748-753.
- [37] J. Huang, “Analysis of a Microstrip Reflectarray Antenna for Microspacecraft Application”, *Telecommunications and Data Acquisition Progress Report*, vol. 120, pp. 153–173, Feb. 1994
- [38] A. Yu, F. Yang, A.Z. Elsherbeni, J. Huang and Y. Rahmat-Samii, “Aperture efficiency analysis of reflectarray antennas,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, no. 2, pp. 364-372, Dec. 2009, doi: <https://doi.org/10.1002/mop.24949>

- [39] M. H. Dahri, M. I. Abbasi, M. H. Jamaluddin, and M. R. Kamarudin, "A Review of High Gain and High Efficiency Reflectarrays for 5G Communications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 5973–5985, 2018
- [40] P. Mei, S. Zhang, and G. F. Pedersen, "A Low-Cost, High-Efficiency and Full-Metal Reflectarray Antenna with Mechanically 2-D Beam-Steerable Capabilities for 5G Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 10, pp. 6997–7006, Oct. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2993077
- [41] Y. Cui, R. Bahr, S. A. Nauroze, T. Cheng, T. S. Almoneef and M. M. Tentzeris, "3D Printed "Kirigami"-Inspired Deployable Bi-Focal Beam-Scanning Dielectric Reflectarray Antenna for mm-Wave Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 9, pp. 7683-7690, Sept. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3199501
- [42] P. Mei, S. Zhang, and G. F. Pedersen, "A Wideband 3-D Printed Reflectarray Antenna With Mechanically Reconfigurable Polarization," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 10, pp. 1798–1802, Oct. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3018589
- [43] H. Kim, S. Oh, S. Bang, H. Yang, B. Kim, and J. Oh, "Independently Polarization Manipulable Liquid- Crystal -Based Reflective Metasurface for 5G Reflectarray and Reconfigurable Intelligent Surface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 8, pp. 6606–6616, Aug. 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3283136
- [44] J. A. Encinar, M. Arrebola, L. F. de la Fuente and G. Toso, "A Transmit-Receive Reflectarray Antenna for Direct Broadcast Satellite Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 9, pp. 3255-3264, Sept. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2161449
- [45] S. A. M. Soliman, E. M. Eldesouki, and A. M. Attiya, "Analysis and Design of an X-Band Reflectarray Antenna for Remote Sensing Satellite System," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 1166, Feb. 2022, doi: 10.3390/s22031166
- [46] R. Deng, S. Xu, F. Yang and M. Li, "An FSS-Backed Ku/Ka Quad-Band Reflectarray Antenna for Satellite Communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 8, pp. 4353-4358, Aug. 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2835725
- [47] M. Bozzi, S. Germani and L. Perregrini, "Performance comparison of different element shapes used in printed reflectarrays," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 2, pp. 219-222, 2003, doi: 10.1109/LAWP.2003.819687
- [48] W. Song, Q. Xue, Y. Cai, N. Guo, K. Liu, S. Li and H. Ding, "A Single-Layer Reflect-Transmit-Array Antenna with Polarization-Dependent Operation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 167928–167935, Nov. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137185
- [49] Á. F. Vaquero, R. Florencio, M. R. Pino and M. Arrebola, "Dual-Polarized Near-Field Plane Wave Generator Using an Offset-Optics Reflectarray Mm-Wave Band," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 12, pp. 12370-12375, Dec. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3209176



- [50] Xi B., Cai Y., Wang Y., Yang S., Zang R. and Zhang L., "Design of a dual-polarized reflect-transmit-array," *Microw Opt Technol Lett.*, vol. 62, no. 2 ,pp. 949-955, Feb. 2020
- [51] S. Yang, Z. Yan, T. Zhang, M. Cai, F. Fan and X. Li, "Multifunctional Tri-Band Dual-Polarized Antenna Combining Transmitarray and Reflectarray," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 9, pp. 6016-6021, Sept. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3060938.
- [52] C. C. Chung, F. P. Lai, S. X. Huang and Y. S. Chen, "Anisotropic Metasurface with Asymmetric Propagation of Electromagnetic Waves and Enhancements of Antenna Gain," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 90295-90305, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091464
- [53] J. Yin, Q. Lou, H. Wang, Z. N. Chen and W. Hong, "Broadband Dual-Polarized Single-Layer Reflectarray Antenna with Independently Controllable 1-Bit Dual Beams," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 6, pp. 3294-3302, June 2021, doi: 10.1109/TAP.2020.3037686
- [54] Y. Liu, H. Wang, and X. Dong, "Design of a Dual Polarized Broadband Single-Layer Reflectarray Based on Square Spiral Element," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 72, pp. 23-30, Aug. 2018, doi:10.2528/PIERM18070202
- [55] R. Florencio, D. Martinez-de-Rioja, E. Martinez-de-Rioja, J. A. Encinar, R. R. Boix, and V. Losada, "Design of Ku- and Ka-Band Flat Dual Circular Polarized Reflectarrays by Combining Variable Rotation Technique and Element Size Variation," *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 985, Jun. 2020, doi: 10.3390/electronics9060985
- [56] S. Mener, R. Gillard, R. Sauleau, A. Bellion and P. Potier, "Dual Circularly Polarized Reflectarray with Independent Control of Polarizations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 4, pp. 1877-1881, April 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2398458
- [57] N. Zhang, K. Chen, J. Zhao, Q. Hu, K. Tang, J. Zhao, T. Jiang and Y. Feng, "A Dual-Polarized Reconfigurable Reflectarray Antenna Based on Dual-Channel Programmable Metasurface," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 9, pp. 7403-7412, Sept. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3165872
- [58] P. Aghabeyki, Y. Cai, G. Deng, Z. -H. Tan and S. Zhang, "A Dual-Polarized Reconfigurable Reflectarray with a Thin Liquid Crystal Layer and 2-D Beam Scanning," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 4, pp. 3282-3293, April 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3240853
- [59] W. Li, H. Tu, Y. He, L. Zhang, S. -W. Wong and S. Gao, "A Novel Wideband Tightly Coupled Dual-Polarized Reflectarray Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, no. 6, pp. 5422-5427, June 2023, doi: 10.1109/TAP.2023.3262969
- [60] L. X. Wu, Q. Hu, X. Y. Luo, J. Zhao, T. Jiang, K. Chen and Y. Feng, "Wideband Dual-Feed Dual-Polarized Reflectarray Antenna Using Anisotropic Metasurface," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 21, no. 1, pp. 129-133, Jan. 2022, doi: 10.1109/LAWP.2021.3121018

- [61] I. Aryanian, A. Ahmadi, M. Rabbani, S. Hassibi, and M. Karimipour, "Design and fabrication of a dual-polarized, dual-band reflectarray using optimal phase distribution," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, pp. 878–888, Mar. 2019, doi: 10.3906/elk-1807-324
- [62] S. Li, Y. Cao, Y. B. Zhang and T. Wu, "Dual polarized reflectarray antenna for operation in X and Ku bands," *Microwave Opt Technol Lett.*, vol. 64, no. 7, pp. 1272-1279, March 2022, doi:10.1002/mop.33272
- [63] M. Abdollahvand, K. Forooghi, J. A. Encinar, Z. Atlasbaf and E. Martinez-de-Rioja, "A 20/30 GHz Reflectarray Backed by FSS for Shared Aperture Ku/Ka-Band Satellite Communication Antennas," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 566-570, April 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.2972024
- [64] C. McLain, S. Panthi, M. Sturza and J. Hetrick, "High throughput Ku-band satellites for aeronautical applications," *MILCOM 2012 - 2012 IEEE Military Communications Conference*, Orlando, FL, USA, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/MILCOM.2012.6415863
- [65] S. Yılmaz, A. H. Gülseren and N. T. Tokan, "Dual-Polarized Reflectarray for High-Speed Satellite Communication," *2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkiye, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/RAST57548.2023.10197873
- [66] S.-G. Lee and J.-H. Lee, "A Dual-Polarized Reconfigurable Reflectarray Antenna Based on a Symmetrically Rotated Sub-Array," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 55657–55663, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3280855
- [67] R. S. Malfajani and Z. Atlasbaf, "Design and Implementation of a Dual-Band Single Layer Reflectarray in X and K Bands," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 62, no. 8, pp. 4425–4431, Aug. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2327137
- [68] R. Deng, S. Xu, F. Yang, and M. Li, "Design of a Low-Cost Single-Layer X/Ku Dual-Band Metal-Only Reflectarray Antenna," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 2106–2109, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2017.2698099
- [69] T. Smith, U. Gothelf, O. S. Kim, and O. Breinbjerg, "Design, Manufacturing, and Testing of a 20/30-GHz Dual-Band Circularly Polarized Reflectarray Antenna," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1480–1483, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2288995
- [70] R. Shamsaee Malfajani and B. Abbasi Arand, "Dual-Band Orthogonally Polarized Single-Layer Reflectarray Antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 65, no. 11, pp. 6145–6150, Nov. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2754459
- [71] J. A. Ortiz-Fuentes, J. Silva-Montero, J. I. Martinez-Lopez, J. Rodriguez-Cuevas, and A. E. Martynyuk, "Dual-Frequency Reflectarray Based on Split-Ring Slots," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 16, pp. 952–955, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2615049
- [72] S.-W. Qu, S. Lu, C. Ma, and S. Yang, "K/Ka Dual-Band Reflectarray Subreflector for Ring-Focus Reflector Antenna," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 8, pp. 1567–1571, Aug. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2019.2923288

- [73] R. L. Farias, C. Peixeiro, and M. V. T. Heckler, "Single-Layer Dual-Band Dual-Circularly Polarized Reflectarray for Space Communication," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 7, pp. 5989–5994, Jul. 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3161552
- [74] R. Deng, S. Xu, F. Yang, and M. Li, "Single-Layer Dual-Band Reflectarray Antennas With Wide Frequency Ratios and High Aperture Efficiencies Using Phoenix Elements," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 65, no. 2, pp. 612–622, Feb. 2017, doi: 10.1109/TAP.2016.2639023
- [75] X. Li, X. Li, and L. Yang, "Single-Layer Dual-Band Wide Band-Ratio Reflectarray With Orthogonal Linear Polarization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 93586–93593, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2986040
- [76] H. Hasani, C. Peixeiro, A. K. Skrivervik, and J. Perruisseau-Carrier, "Single-Layer Quad-Band Printed Reflectarray Antenna with Dual Linear Polarization," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 63, no. 12, pp. 5522–5528, Dec. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2481918
- [77] L. Guo, P.-K. Tan, and T.-H. Chio, "Single-Layered Broadband Dual-Band Reflectarray With Linear Orthogonal Polarizations," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 64, no. 9, pp. 4064–4068, Sep. 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2574920
- [78] T. Su, X. Yi, and B. Wu, "X/Ku Dual-Band Single-Layer Reflectarray Antenna," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 18, no. 2, pp. 338–342, Feb. 2019, doi: 10.1109/LAWP.2018.2890766
- [79] D. R. Prado, M. Arrebola, M. R. Pino, and G. Goussetis, "Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 68, no. 11, pp. 7682–7687, Nov. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2993014
- [80] D. E. Serup, G. F. Pedersen, and S. Zhang, "Dual-Band Shared Aperture Reflectarray and Patch Antenna Array for S- and Ka-Bands," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 70, no. 3, pp. 2340–2345, Mar. 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3111171
- [81] X.-C. Zhu, P.-P. Zhang, Y.-X. Zhang, J.-X. Ge, and Z.-H. Gao, "A High-Gain Filtering Antenna Based on Folded Reflectarray Antenna and Polarization-Sensitive Frequency Selective Surface," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 8, pp. 1462–1465, Aug. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2020.3007540
- [82] R. Deng, F. Yang, S. Xu, and M. Li, "An FSS-Backed 20/30-GHz Dual-Band Circularly Polarized Reflectarray With Suppressed Mutual Coupling and Enhanced Performance," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 65, no. 2, pp. 926–931, Feb. 2017, doi: 10.1109/TAP.2016.2633159
- [83] X. Zhong, H.-X. Xu, L. Chen, W. Li, H. Wang, and X. Shi, "An FSS-Backed Broadband Phase-Shifting Surface Array With Multimode Operation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 67, no. 9, pp. 5974–5981, Sep. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2916747
- [84] W. Li, Y. Wang, S. Sun, and X. Shi, "An FSS-Backed Reflection/Transmission Reconfigurable Array Antenna," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23904–23911, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970611

- [85] M. R. Chaharmir and J. Shaker, "Design of a Multilayer X-/Ka-Band Frequency-Selective Surface-Backed Reflectarray for Satellite Applications," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 63, no. 4, pp. 1255–1262, Apr. 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2389838
- [86] J. Shaker, M. R. Chaharmir, and J. Ethier, *Reflectarray antennas: analysis, design, fabrication, and measurement*. in *The Artech House antennas and propagation series*. Boston: Artech House, 2014
- [87] S. H. Yusop, N. Misran, M. T. Islam, and M. Y. Ismail, "Design of High Performance Dual Frequency Concentric Split Ring Square Element for Broadband Reflectarray Antenna," vol. 27, no. 4, 2012
- [88] P. Xu, L. Li, R. Li, and H. Liu, "Dual-Circularly Polarized Spin-Decoupled Reflectarray With FSS-Back for Independent Operating at Ku -/ Ka -Bands," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 69, no. 10, pp. 7041–7046, Oct. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3076518
- [89] J. Li, L. Mao, and T. Zhang, "FSS Sandwiched Dual-Frequency Reflectarray for Mobile Communication Applications," *Electronics*, vol. 12, no. 4, p. 897, Feb. 2023, doi: 10.3390/electronics12040897
- [90] M. M. Tahseen and A. A. Kishk, "Flexible and Portable Textile-Reflectarray Backed by Frequency Selective Surface," *Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 46–49, Jan. 2018, doi: 10.1109/LAWP.2017.2772919
- [91] Li, L.; Chen, Q.; Yuan, Q.; Sawaya, K.; Maruyama, T.; Furuno, T.; Uebayashi, S. Frequency Selective Reflectarray Using Crossed-Dipole Elements with Square Loops for Wireless Communication Applications. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 2011, 59, 89–99

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

## Konferans Bildirileri

1. A. H. Gülseren, A. Alparslan, and N. T. Tokan, “Dual Band Linear Polarized Reflectarray System with FSS Backing,” in 2023 14th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Türkiye: IEEE, Nov. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ELECO60389.2023.10416002

2 S. Yılmaz, A. H. Gülseren and N. T. Tokan, “Dual-Polarized Reflectarray for High-Speed Satellite Communication,” 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), Istanbul, Türkiye, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/RAST57548.2023.10197873

## Makaleler

1. A. H. Gülseren, A. Alparslan, and N. Türker Tokan, “Dual-Band Frequency Selective Surface-Backed Reflectarray for High-Speed Ka-Band Satellites,” Applied Sciences, vol. 14, no. 7, p. 2928, Mar. 2024, doi: 10.3390/app14072928

2. A. H. Gülseren, S. Yılmaz, A. Alparslan, N.T. Tokan, “A Dual-Polarized Reflectarray Antenna for High-Speed Ka-Band Satellite Communications”, değerlendirme için gönderilmiştir.

## Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Proje Başlığı: Ka Band Uydu Haberleşmesi için Çok Hüzmeli Yansıtıcı Dizi Anten Tasarımı, Proje Kodu: FBA-2021-4493, Ağustos 2021-Mayıs 2024