

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GENİŞ BANTLI DİELEKTRİK LENS ANTENLERİN
REFLEKTÖR BESLEMESİ OLARAK KULLANILMASI

Nurda TÜRKE SÖNMEZ

DOKTORA TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Doç. Dr. Fikret TOKAN

Mart, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GENİŞ BANTLI DİELEKTRİK LENS ANTENLERİN REFLEKTÖR
BESLEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

Nurdañ TÜRKEK SÖNMEZ tarafından hazırlanan tez çalışması 01.03.2021 tarihinde aşığıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Fikret TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Fikret TOKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet Serdar TÜRK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Çağatay ULUIŞIK, Üye
Doğuş Üniversitesi

Doç. Dr. Hamid TORPİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Aktül KAVAS, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Fikret TOKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan GENİŞ BANTLI DİELEKTRİK LENS ANTENLERİN REFLEKTÖR BESLEMESİ OLARAK KULLANILMASI 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.

Nurdan TÜRKER SÖNMEZ

İmza

Biricik eşime...



TEŞEKKÜR

Yapılan bu çalışmada bana her zaman rehber olan, bilgi birikimini ve desteğini hiç esirgemeyen hocam ve tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Fikret TOKAN' a, beni bu günlere getiren sevgili anneme ve babama, süreç boyunca yanımda olup beni yönlendiren abim, ablam ve değerli eşlerine, neşe kaynağım yeğenlerime ayrıca süreç boyunca her zaman manevi desteğini yanımda hissettiren, hiçbir zaman beni tek başıma bırakmayan eşim Baki SÖNMEZ' e ve tez yazım sürecinde beni motive eden çalışma arkadaşlarım Derya ÇINAR YILMAZ ve Emre DENİZ' e teşekkür etmeyi borç bilirim. Bu tez onlarsız var olamazdı.

Bu çalışmanın okuyan her mühendise, mühendis adayına, bilim insanına faydalı ve yol gösterici olmasını dilerim.

Nurdan TÜRKER SÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	4
2 REFLEKTÖR ANTENLER	5
2.1 Faz Merkezi ve Faz Bozulması	7
3 HORN ANTEN BESLEMELİ REFLEKTÖR ANTEN TASARIMI	10
3.1 Horn Antenin Faz Merkezi	13
3.1.1 Horn Antenin Faz Hatası Kaybı	15
3.1.2 Horn Anten Beslemeli Reflektör Anten Tasarımı	16
3.2 Işın Takibi Yöntemi	18
3.2.1 Horn Anten Beslemeli Reflektör Anten Işın Takibi	20
3.3 Işıma Karakteristiğinin Analitik Analizi	22
4 REFLEKTÖR ANTENİN BLOKAJ ETKİSİNİN İNCELENMESİ	26
4.1 Piramit ve Konik Horn Besleme Anteni Tasarımları	27
4.1.1 Besleme Anten Tiplerinin Genlik Azalmasına Etkileri	28
4.2 Besleme Blokajının Etkileri	32
4.3 Kaydırılmış Eksenli Elips Anten Beslemeli Reflektör Antenlerin Faz Bozulması ve Blokaj Etkisi	37

5	LENS ANTEN BESLEMELİ REFLEKTÖR ANTEN TASARIMI	40
5.1	Lens Antenin Faz Merkezi	44
5.1.1	Lens Antenin Faz Hatası Kaybı	45
5.1.2	Lens Anten Beslemeli Reflektör Anten Tasarımı	46
5.2	Lens Anten Beslemeli Reflektör Anten Tasarımı Işın Takibi	48
5.3	Işıma Karakteristiğinin Analitik Analizi	49
6	DÜZLEMSEL DİELEKTRİK LENS ANTEN BESLEMELİ REFLEKTÖR ANTEN TASARIMI	53
6.1	Düzlemsel Dielektrik Lens Anten Faz Merkezi	58
6.1.1	Düzlemsel Lens Antenin Faz Hatası Kaybı	60
6.2	Düzlemsel Lens Anten Beslemeli Reflektör Tasarımı	61
6.2.1	$F/D=2.5$ E Düzlem Faz Merkezinin Reflektör Odağına Yerleştirildiği Birinci Tasarım Senaryosu	63
6.2.2	$F/D=2.5$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektör Odağına Yerleştirildiği İkinci Tasarım Senaryosu	66
6.2.3	$F/D=0.6$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektörün Odağına Yerleştirildiği Üçüncü Tasarım Senaryosu	69
6.3	Düzlemsel Lens Anten Anten Beslemeli Reflektör Sistemi Işın Takibi . .	71
6.3.1	$F/D=2.5$ E Düzlem Faz Merkezinin Reflektör Odağına Yerleştirildiği Birinci Tasarım Senaryosu Işın Takibi	72
6.3.2	$F/D=2.5$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektörün Odağına Yerleştirildiği İkinci Tasarım Senaryosu Işın Takibi	73
6.3.3	$F/D=0.6$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektörün Odağına Yerleştirildiği Üçüncü Tasarım Senaryosu Işın Takibi	75
6.4	$F/D=2.5$ ve $F/D=0.6$ Olan İki Reflektörün Birleştirilmesi ile Elde Edilen Yapının Işın Takibi	78
6.5	Işıma Karakteristiğinin Analitik Analizi	81
7	SONUÇ VE ÖNERİLER	88
	KAYNAKÇA	91
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	96

SİMGE LİSTESİ

λ	Dalga Boyu
dB	Desibel
ε_r	Dielektrik Sabiti
ρ	Kaynak ile Gözlem Noktası Arasındaki Mesafe
F	Odak Noktası
D	Reflektör Çapı
θ	Theta Açısı

KISALTMA LİSTESİ

ADE	Axially Displaced Ellipse
CST	Computer Simulation Technology
DADRA	Displaced-Axis Dual-Reflector Antenna
EM	Elektromagnetik
GHz	Gigaherthz
GO	Geometrik Optik
LEO	Low-Earth Orbit
MATLAB	Matrix Labarotary
mm	Milimetre
PEC	Perfect Electrical Conductor
PEL	Phase Error Loss
PPW	Parallel Plate Waveguide
SLL	Side Lobe Level
TEM	Transverse Electromagnetic
UWB	Ultra Wideband

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Çin gök gözü teleskobu [42]	5
Şekil 2.2	Parabolik anten geometrisi	6
Şekil 2.3	Parabolik reflektör tasarım parametreleri [43]	6
Şekil 2.4	Farklı antenlere ait faz merkezleri [46]	7
Şekil 2.5	Parabolik reflektör tasarım parametreleri [43]	9
Şekil 3.1	Tasarlanan horn antenin boyutları ve yandan görüntüsü	10
Şekil 3.2	Horn antenin geri dönüş kaybı grafiği	11
Şekil 3.3	Horn antenin E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz	12
Şekil 3.4	Horn antenin geri dönüş kaybı grafiği	12
Şekil 3.5	Horn anten frekansa bağlı faz merkezi değişimi	13
Şekil 3.6	Horn antenin $\phi = 0^\circ$ faz grafiği	14
Şekil 3.7	Horn antenin $\phi = 0^\circ$ faz merkezi kaydırma grafiği	14
Şekil 3.8	Horn antenin $\phi = 90^\circ$ faz grafiği	15
Şekil 3.9	F/D=1.1 Horn anten beslemeli reflektör tasarım modeli	17
Şekil 3.10	F/D=1.1 Horn anten beslemeli reflektör antene ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz . . .	18
Şekil 3.11	F/D=1.1 Horn anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi	18
Şekil 3.12	θ_0 açısıyla yansıyan dalganın gösterimi	19
Şekil 3.13	Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz	21
Şekil 3.14	Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz	21
Şekil 3.15	Açıklık yapısı	22
Şekil 3.16	Yansıtıcı yapı açıklığı üzerindeki genlik dağılımı; (a) E düzlemi (b) H düzlemi	24
Şekil 3.17	Tasarımın E ve H düzlemleri normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz	25

Şekil 4.1	Horn tipi besleme antenleri: (a) piramit horn yandan görünüm, (b) piramit horn arkadan görünüm, (c) konik horn yan görünüm ve (d) konik horn arkadan görünüm	27
Şekil 4.2	Besleme horn antenlerin geri dönüş kaybı	28
Şekil 4.3	Konik Horn ve Piramit Horn Normalize Işıma Paternleri	28
Şekil 4.4	Piramit (a, b, c, d) ve konik (e, f, g, h) horn antenlerle beslenmiş kenar azalması değerleri (a, e) 8 dB (b, f) 10 dB (c, g) 15 dB (d, h) 20 dB olan reflektör antenler [53]	29
Şekil 4.5	İlk yan lob seviyesinin (a) piramit horn beslemeli reflektör anteni (b) konik horn beslemeli reflektör antenine bağlı değişimi [53]	30
Şekil 4.6	20 dB kenar azalma değeri ile tasarlanmış (a) Piramit horn ile beslenmiş parabolik reflektör antenler yandan görünüm (b) konik horn ile beslenmiş parabolik reflektör antenler yandan görünüm (c) piramit horn ile beslenmiş parabolik reflektör antenler arkadan görünüm (d) konik horn beslenmiş parabolik reflektör antenler arkadan görünüm [53]	33
Şekil 4.7	(a) Piramit horn ve (b) Konik horn tarafından beslenen çeşitli büyüklükteki parabolik yansıtıcı antenlerin ilk yan lob seviyeleri [53]	35
Şekil 4.8	3-dB bant genişliğindeki normalize kazanç grafiklerinin (a) piramit horn (b) konik horn anten için gösterilmektedir. Engellenen güç miktarları da kazanç grafiklerinde işaretlenmiştir. [53]	36
Şekil 4.9	Oluklu horn anten beslemeli ADE alt reflektörlü DADRA sistemi [60]	38
Şekil 4.10	Oluklu horn tarafından beslenen parabolik reflektör anten [60]	38
Şekil 4.11	$\phi = 0^\circ$ ve $\phi = 90^\circ$ Oluklu Horn ve ADE Alt Reflektör Faz Bozulmaları	39
Şekil 5.1	Lens Anten Çeşitleri [62–65]	40
Şekil 5.2	Lens antene ait 3B tasarım görüntüleri	41
Şekil 5.3	Dairesel simetrik lens anten beslemesi (a) üstten görünüm (b) yandan görünüm [67]	41
Şekil 5.4	Lens antenden geri dönüş kaybı grafiği	42
Şekil 5.5	Lens antene ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz	43
Şekil 5.6	Lens antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi	43
Şekil 5.7	Lens antenin faz merkezi değişimi	44
Şekil 5.8	F/D=1.41 lens anten beslemeli reflektör anten tasarım modeli	46
Şekil 5.9	F/D=1.41 lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz	47
Şekil 5.10	Lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi	48

Şekil 5.11 Gelen ve yansıyan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	48
Şekil 5.12 Gelen ve yansıyan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	49
Şekil 5.13 Yansıtıcı yapı açıklığı üzerindeki genlik dağılımı; (a) E düzlem, (b) H düzlem	50
Şekil 5.14 Nihai tasarımın E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz.	52
Şekil 6.1 Lens Anten Çeşitleri [68]	53
Şekil 6.2 Düzlemsel dielektrik lens anten	54
Şekil 6.3 Düzlemsel dielektrik lens anten tasarım parametreleri (mm)	55
Şekil 6.4 Düzlemsel dielektrik lens anten geri dönüş kaybı grafiği	56
Şekil 6.5 Düzlemsel lens antene ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz	57
Şekil 6.6 Düzlemsel lens antene ait 3 boyutlu kazanç grafikleri	57
Şekil 6.7 Düzlemsel dielektrik lens antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi grafiği	57
Şekil 6.8 Lens Antenin Faz Merkezinin Bulunması [20]	58
Şekil 6.9 Düzlemsel lens antenin frekansa bağlı faz merkezi aralığı (a) E Düzlem (b) H Düzlem	59
Şekil 6.10 Düzlemsel lens antenin reflektör beslemesi olarak kullanıldığı dört senaryo (a) 7 GHz'deki E düzlemi faz merkezi, $F/D=2.5$ ile reflektör odağına, (b) 7 GHz'deki H düzlemi faz merkezi, $F/D=2.5$ ile reflektör odağına, (c) 7 GHz'deki E düzlem faz merkezi, $F/D=0.6$ ile parabolik reflektörün odağına yerleştirilir.	63
Şekil 6.11 $F/D=2.5$ E düzlemi faz merkezi ile reflektörün odağı çakıştırılan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör tasarım modeli	63
Şekil 6.12 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz	64
Şekil 6.13 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi	65
Şekil 6.14 $F/D = 2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektörün 3 boyutlu ışıma örüntüsü (a) E düzlemi (b) H düzlemi	65
Şekil 6.15 $F/D=2.5$ H düzlemi faz merkezi ile reflektörün odağı çakıştırılan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör tasarım modeli	66
Şekil 6.16 $F/D= 2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz	67
Şekil 6.17 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi	67

Şekil 6.18 $F/D = 2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektörün 3 boyutlu ışıma örüntüsü (a) E düzlemi (b) H düzlemi	68
Şekil 6.19 $F/D=0.6$ Düzlemsel Lens Anten Beslemeli Reflektör Tasarım Modeli	69
Şekil 6.20 $F/D=0.6$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz	70
Şekil 6.21 $F/D=0.6$ Düzlemsel Lens Anten Beslemeli Reflektörün 3 Boyutlu Işıma Örüntüsü (a) E düzlemi (b) H düzlemi	70
Şekil 6.22 $F/D=0.6$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi	71
Şekil 6.23 7 GHz’de E düzlemdeki düzlemsel lens antenin faz merkezi $F/D=2.5$ olan parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Uygulamanın konfigürasyonları (a) E düzlemi ve (b) H düzlemi.	72
Şekil 6.24 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz. Koyu mavi ışınlar reflektörü aydınlatır. Yeşil ışınlar reflektörden yansıyan ışınlardır ve mor ışınlar taşmayı göstermektedir.	73
Şekil 6.25 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz. Koyu mavi ışınlar reflektörü aydınlatır. Yeşil ışınlar reflektörden yansıyan ışınlardır ve mor ışınlar taşmayı göstermektedir.	73
Şekil 6.26 7 GHz’de H düzleminde düzlemsel lens antenin faz merkezi, $F/D=2.5$ olan parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Uygulamanın konfigürasyonları (a) E düzleminde ve (b) H düzleminde verilmiştir.	74
Şekil 6.27 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz.	75
Şekil 6.28 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	75
Şekil 6.29 7 GHz’de E-düzlemde düzlemsel lens antenin faz merkezi, F/D oranı 0.6 olan parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Uygulamanın konfigürasyonları (a) E-düzleminde ve (b) H-düzleminde verilmiştir.	76
Şekil 6.30 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	76
Şekil 6.31 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	77
Şekil 6.32 Düzlemsel lens anten beslemesi kullanılarak tasarlanan reflektör yapısı (a) E-düzlemi ve (b) H-düzlemi	79
Şekil 6.33 E düzlemi gelen ve yansıyan ışınlar (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	79

Şekil 6.34 H düzlemi gelen ve yansıyan ışınlar (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz	80
Şekil 6.35 Düzlemsel lens anten beslemeli şekillendirilmiş reflektör yapısı . . .	81
Şekil 6.36 Düzlemsel lens anten beslemeli şekillendirilmiş reflektör açıklık yapısı	82
Şekil 6.37 θ_0 açısıyla yansıyan dalganın gösterimi	83
Şekil 6.38 Yansıtıcı yapı açıklığı üzerindeki genlik dağılımı; (a) E - düzlem, (b) H - düzlem.	85
Şekil 6.39 Nihai tasarımın E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz (b) 7 GHz ve (c) 10 GHz.	86
Şekil 6.40 Düzlemsel lens anten beslemeli nihai reflektör yapısının ışıma verimliliğinin frekans ile değişimi	87



TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Horn anten frekansa bağlı faz merkezi değişimi	13
Tablo 3.2	Horn anten beslemeli reflektör antenin eksenel odaklanamamaya bağlı E düzlemi faz bozulması	15
Tablo 3.3	Horn anten beslemeli reflektör antenin eksenel odaklanamamaya bağlı H düzlemi faz bozulması	16
Tablo 3.4	Horn anten astigmatizme bağlı faz bozulması	16
Tablo 4.1	Piramidal ve konik horn beslemeli reflektör antenlerin kenar azalmasına göre kazanç farkları	31
Tablo 4.2	Şekil 4.6'da verilen reflektör anten tasarımlarının odak uzunluğu ve çap değerleri	32
Tablo 5.1	Dairesel simetrik lens anten beslemesi tasarım parametreleri [67] .	41
Tablo 5.2	Lens anten frekansa bağlı faz merkezi değişimi	44
Tablo 5.3	Lens Antenin E Düzlemi $\phi = 0^\circ$ Faz Bozulması	45
Tablo 5.4	Lens Antenin H Düzlemi $\phi = 90^\circ$ Faz Bozulması	45
Tablo 5.5	Lens Antenin Astigmatizme Bağlı Faz Bozulması	46
Tablo 6.1	Düzlemsel dielektrik lens anten tasarım parametre değerleri	55
Tablo 6.2	Düzlemsel dielektrik lens anten uydurma katmanı parametre değerleri	55
Tablo 6.3	Düzlemsel lens antenin frekansa bağlı faz merkezi değişim tablosu .	59
Tablo 6.4	Düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin E düzlemi $\phi = 0^\circ$ faz bozulması	60
Tablo 6.5	Düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin H düzlemi $\phi = 90^\circ$ faz bozulması	60
Tablo 6.6	Düzlemsel lens anten astigmatizme bağlı faz bozulması	61

GENİŞ BANTLI DİELEKTRİK LENS ANTENLERİN REFLEKTÖR BESLEMESİ OLARAK KULLANILMASI

Nurdan TÜRKER SÖNMEZ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Fikret TOKAN

Teknolojinin gelişmesi ile antenlerin kullanım alanları da artmış, antenler günlük hayatımızda vazgeçilmez bir konuma ulaşmıştır. Haberleşme amaçlı kullandığımız telefonlarımızdan tutun, uzay teleskoplarına, uydu haberleşmesinden tutun aracımızdaki radyoya kadar birçok alanda antenler kullanılmaktadır. Antenlerin yüksek kazanç ve düşük kayıp ile çalışmaları istenmekle beraber daha az yer kaplamaları, kurulum kolaylığı gibi özellikler de hedeflenmektedir. Parabolik reflektör antenlerin yüksek düzeyde yönlendirici huzme ve çok düşük yan lob seviyesi sağlama yetenekleri, uydu uygulamalarında onları en sık tercih edilen çözümler haline getirmektedir.

Tezin ilk bölümünde reflektör antenler kısaca tanıtılmış, özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Tezin ilerleyen bölümlerinde reflektör beslemesi olarak horn, dairesel simetrik lens anten ve düzlemsel lens anten kullanılmıştır. Horn ve dairesel simetrik lens anten, faz merkezlerindeki kararlılık ve E-H düzlemlerinde neredeyse aynı ışıma karakteristiği göstermelerinden dolayı reflektör beslemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Düzlemsel dielektrik lens anten iki düzlemde farklı ışıma özelliklerine sahiptir. Bir düzlemde yelpaze huzme diğer düzlemde ise kalem huzme ışıması yapmaktadır. Bu sebeple, reflektör beslemesi olarak kullanılması durumunda hangi düzleme göre tasarım yapılacağı sorunu önem teşkil etmektedir. Aynı zamanda faz merkezi konumu, frekans değişimine bağlı olarak yüksek oranda değişmektedir. Düzlemsel dielektrik lens antenin reflektör besleme anteni olarak kullanılması durumunda faz merkezi konumundaki bu farkın neden olduğu tasarımsal problemler

tez çalışmasında incelenmiştir.

Tez çalışmasında reflektör anten sistemindeki eksenel odaklanamama ve astigmatizme bağlı faz hatası kayıpları hesaplanmıştır. Reflektör sistemlerinde, besleme anteninin reflektörün önünde bulunması o noktaya dalganın iletimini engellemektedir. Bu durum blokaj etkisine bağlı ışıma kayıpları yaratmaktadır. Tez çalışmasında, blokajın ışıma üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Tasarımlar CST (Computer Simulation Technology)'de oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları Kirchhoff'un skaler formülasyonu analitik metodu ile doğrulanmıştır. Işının aldığı yol GO (Geometrik Optik) metodu ile takip edilerek reflektör sistemindeki ışın hareketi ayrıca incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Reflektör anten, dielektrik lens anten, blokaj etkisi, ışın takibi.



BROADBAND DIELECTRIC LENS ANTENNAS AS REFLECTOR FEEDS

Nurdan TÜRKER SÖNMEZ

The Department of Electronics and Communications Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Fikret TOKAN

The usage areas of antennas have increased with the development of technology and antennas have reached an indispensable position in our daily life. Antennas are used in many areas such as mobile phones, satellite communications, space telescopes and even radio in our vehicle. Although high gain and low loss are prerequisite to operate an antenna, features such as less space occupation and ease of installation are also aimed. The high level of directional beam and very low side lobe level abilities make parabolic reflector antennas the most appropriate and preferred solutions in satellite applications.

The reflector antennas are briefly introduced with the information about their specifications in the first part of the thesis. Horn, circular symmetrical lens and planar lens antennas were used as reflector feed in the following sections. The horn and circular symmetrical lens antenna are usually preferred as reflector feeds as they show almost the same radiation characteristics and they are stable in phase centers of the E-H planes. Planar dielectric lens antenna has different radiation characteristics in two planes; it radiates a fan beam in one plane and a pencil beam in the other. Because of this problem, it is important to design according to the plane of the reflector feed. The phase center changes significantly depending on the frequency change. The design problems caused by the phase center changes while reflector antennas are used as dielectric lens antenna feed are examined in the thesis study.

Axial defocusing and phase error loss due to astigmatism in the reflector antenna systems are calculated. In reflector systems, the position of the feed in front of the

reflector creates blockage effect. The blockage effect on radiation is also examined. The designs were run in CST (Computer Simulation Technology) software and the simulation results were approved by Kirchoff's scalar formulation analytical method. The path of the beam was followed by the GO (Geometric Optics) method and the beam rights in the reflector system were also examined.

Keywords: Reflector antenna, dielectric lens antenna, blockage effect, ray tracing.



1.1 Literatür Özeti

Reflektör antenler, yüksek yönelimli huzme ve çok düşük yan lob seviyesi (SLL) sağlama kabiliyetleri ile düşük üretim maliyetleri sebebiyle uzun menzilli iletişim, radar, yayın ve uydu uygulamalarında kullanılmaktadır [1–3]. Reflektör huzmesini birden çok yönde taramak için, anten veya kaynağı hareket ettirilebilmektedir [4–12]. Reflektör anten huzme taraması için çeşitli yöntemler kullanılabilmektedir. Örneğin tüm anteni hareket ettirmek için mekanik bir konumlandırma sistemine sahip tek bir reflektör, her yörünge konumu için bir tane olmak üzere, farklı anahtarlamalı beslemelere sahip sabit bir tek veya çift reflektörlü anten, hareketli beslemeli [13] sabit tek reflektör veya hareketli bir ikincil yansıtıcı ve sabit tek beslemeli sabit bir ikili reflektör [14] huzme tarama yöntemleri olarak kullanılabilmektedir.

Günümüz reflektör sistemlerinde, geniş frekans çalışma bandını kapsayan tek bir besleme anteni talebi artmaktadır [15]. Geniş bantlı reflektör uygulamalarında besleme elemanlarından, yüksek kazanç elde edebilmek için geniş frekans bandında kararlı faz merkezi konumları göstermesi beklenir.

Horn antenler, geniş bantlı reflektör uygulamaları için en yaygın besleme elemanlarıdır. Bir parabolik reflektör antenini verimli bir şekilde aydınlatmak için, ideal bir besleme anteni sabit bir radyasyon merkezi sağlamalıdır. Frekansla değişmeyen, simetrik yapıyla tüm frekans bandını kapsayan tek bir besleme anteni istenmektedir [15]. İdeal reflektör antenler dairesel simetrik huzmeye sahip besleme antenleri kullanılarak tasarlanmaktadır. Çıkıntılı horn antenler geniş frekans aralığı sağlamasına rağmen, ışına örüntüsü dairesel simetrik değildir [16]. [17]'de geniş frekans bantlı çıkıntılı bir horn, kısmen kararlı ışına örüntüsüne sahip olan reflektör beslemesi olarak önerilmektedir. Bow-tie horn antenlerin faz merkezi, frekans değişimi ile nispeten sabit kalmaktadır [18]. Ek olarak horn antenler, eksenel simetrik ışına örüntüleri sağladıkları için de reflektör beslemesi olarak kullanılmaktadır [19]. Çıkıntılı horn anten için [20]'de radyasyon modelinin, genel inanışın aksine,

tüm frekans aralığı boyunca horn eksenı yönünde tek bir ana lob oluşturmadiğı bulunmuştur. Bunun yerine, 12 GHz üzerindeki frekanslarda, radyasyon modelindeki ana lob, merkez eksen boyunca aralarında 6 dB'ye kadar bir düşüşle dört loba bölünmeye başlamaktadır. Ayrıca [20]'de EMC uygulamalarında bu tip horn anten kullanımının yetersiz kaldığı belirtilmektedir. Bu durumu ayrıntılı olarak incelemek için, 1–18 GHz geniş bant parabolik reflektör horn anten sistemi [21]'de kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırma, benzer şekilde tasarlanmış tüm geniş bant çıkıntılı hornların, daha yüksek mertebeden modların yayılmasını bastırmada başarısız olduklarından dolayı performans düşüşü sergilediğini göstermektedir.

Reflektör beslemesi olarak bir diğer umut verici çözüm, frekans kararlı faz merkezi ve yüksek kazanç sağlayabildikleri için dielektrik lens antenlerdir. Ayrıca, reflektör uygulamaları için düşük maliyetli ve daha az güç tüketen çözümlerdir. [22]'de 26 GHz'de çalışan LEO uyduları ile veri bağlantısı iletişimi için bir dielektrik lens anteni sunulmaktadır. Bir dizi sızdıran dalga yuvası (leaky-wave slots) tarafından beslenen bir dielektrik uzatılmış yarıküresel lens [23]'te 3:1 bant genişliği üzerinde neredeyse sabit 10 dB huzme genişliği ile sunulmaktadır. Geniş bantlı dielektrik lens antenler, [24]'te tanıtıldığı gibi kararlı ışınma örüntüsü ve faz merkezi konumları sunmak üzere de şekillendirilebilir.

Parabolik reflektör antenlerin yüksek kazanç ve çok düşük yan lob seviyesi sağlama yetenekleri, uydu uygulamalarında onları en sık tercih edilen çözümler haline getirmektedir. Bu anten sistemlerinin temel dezavantajı, besleme açıklıklarından kaynaklanan blokaj kayıplarıdır. Besleme blokajı, yansıyan ışınların bir kısmı besleme yapısına çarptığında meydana gelen, anten tasarımları ile ilgili önemli bir konudur. Besleme blokajı, beslemenin fiziksel boyutlarına bağlı olarak reflektör sistemini ışınma kazancının ve yan lob düzeyinin bozulmasına sebep olur [25, 26].

Yüksek diyafram açıklığı verimlilikleri ve uygun besleme sistemi konumları nedeniyle, çift reflektörlü sistemler uzun yıllardır noktadan noktaya iletişim, uydu iletişimi ve radyo astronomisinde uygulama bulmuştur [27, 28]. Bu tür antenlerin en geleneksel tipi, parabol ana reflektörlü ve hiperbol ikincil reflektörlü cassegrain antenlerdir [29]. Daha yüksek verim için cassegrain anten sistemlerinde iki reflektör için de şekillendirme uygulanabilir [30, 31]. Son zamanlarda, açıklığın merkez blokajını önlediği ofset çift reflektörlü sistemlerin şekillendirilmesiyle ek verimlilik artışı elde edilmiştir [32, 33]. Bununla birlikte, çift reflektörlü sistem tasarımı temel optik prensiplerine dayanmakta ve ikincil yansıtıcının sınırlı boyutunun neden olduğu kırınım etkilerini göz ardı etmektedir [34]. Küçük reflektör boyutları için kırınım etkileri, açıklık verimini önemli ölçüde azaltacaktır. Bu nedenle, anten tipleri arasında karşılaştırma ve mekanik parametrelerin optimizasyonu için kullanılan verimlilik

hesaplamalarında göz önünde bulundurulmalıdır [34].

Huzme yönlendirme uygulamaları ve dizi besleme elemanları olarak düzlemsel ve iki boyutlu dielektrik lens antenler kullanılmaktadır. [35]'te paralel plaka dalga kılavuzu lens anteni, otomotiv radar uygulaması için 71 - 85 GHz frekans bandında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. [36]'da geniş bir tarama sağlaması açısından, dairesel simetrik lens anten önerilir. Kalem huzme ışıma örüntüsü oluşturmak için dar bantlı düzlemsel dielektrik lens anten [37]'de tanıtılmıştır. Üç boyutlu vücut tarama sistemleri için uygun, geniş frekans bant genişliği sağlayan yarı düzlemsel dielektrik lens anten [38]'de sunulmaktadır. Her ne kadar düzlemsel lens antenler yukarıda belirtilen birçok uygulamada kullanılsa da bunlar hiçbir zaman geniş bantlı reflektör beslemeleri olarak incelenmemiştir. Bu antenler, küçük anten açıklıklarıyla besleme blokajını azaltmak için düşük maliyetli ve daha az güç tüketen çözümler olarak sunulabilir.

Bu çalışmada, bir geniş bantlı düzlemsel lens anteni yüksek kazançlı bir reflektör beslemesi olarak sunmak için yeni bir reflektör anten tasarımı kullanılmıştır. Geniş bantlı düzlemsel lens anten bir düzlemde yüksek derecede yönlendirici ışıma ve diğer düzlemde bir yelpaze ışıma sağlayan antenlerdir [38]. Yelpaze huzme X bandında askeri uygulamalar, deniz - hava radarları ve uydu uygulamalarında kullanılmaktadır [39]. Esasen, bir reflektör beslemesi olarak düzlemsel lens antenin olumsuz ışıma karakteristikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Bir düzlemde yüksek derecede yönlendirici ışıma ve diğer düzlemde geniş bir yelpaze ışıma,
- Frekans arttığında her iki düzlemde daha dar ve daha yönlendirici ışıma örüntüleri,
- Farklı düzlemlerdeki eşit olmayan faz merkezi konumlarından kaynaklanan astigmatizm kayıpları,
- Bir düzlemdeki faz merkezi antenin üzerinde ve neredeyse sabit, diğer düzlemde ise görünen faz merkezi antenin çok arkasında olması,
- Eksenel odaklanamamadan kaynaklanan kayıplar.

1.2 Tezin Amacı

Günden güne artan teknolojik gelişmelerle birlikte her alanda anten sistemlerinin kullanımı artmakta, bununla birlikte mevcut yapıların daha da verimli hale getirilmesi için yapılan çalışmalara hız kesmeden devam edilmektedir.

Yapılan çalışmada E ve H düzlemlerinde ışıma örüntüleri simetrik olan ve olmayan antenler, reflektör sisteminin besleme anteni olarak kullanılmıştır. Bu sistemin getirdiği faz merkezi noktasının frekansa göre yer değiştirmesi ile E ve H düzlemlerinde faz merkezi noktasının farklı konumlarda olması durumunun sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir. Horn anten ve çeşitli lens antenlerin reflektör beslemesi olarak kullanılması durumunda karşılaşılabilecek problemler hakkında fikir sahibi olunması hedeflenmiştir.

Işığın aldığı yolu temel yansıma kanunları ile hesaplayan GO (Geometrik Optik) metodu lens anten analizinde sıklıkla kullanılmaktadır. GO kodu kısa sürede yüksek doğruluklu sonuçlar verebilmekle beraber anten sistemi içerisindeki çoklu yansımaları hesaba katmamaktadır. Tez çalışmasında, reflektör sistemlerinin ışıma karakteristiği analizi için GO metodu kullanılmıştır. GO sonuçları dikkate alınarak gerçekleştirilen tasarımlar CST (Computer Simulation Technology)'de koşturulmuş ve simülasyon sonuçları Kirchoff'un skaler formülasyonu analitik metodu ile doğrulanmıştır. Tüm bu çalışmaların ışığında performansı yüksek bir reflektör anten sistemi tasarlamak amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Yüksek kazancı, üretim kolaylığı, düşük maliyeti ve çevre koşullarından etkilenmemesi gibi pek çok sebeple düzlemsel dielektrik lens anten beslemeli reflektör yapısı radar sistemleri, konum takip ve tespit uygulamaları için en uygun seçimlerden biridir. Yapılan literatür araştırmasında dairesel simetrik yapıya sahip olmayan düzlemsel lens antenin daha önce reflektör beslemesi olarak kullanılmadığı görülmüştür. Bu çalışma neticesinde literatüre yeni, özgün, yüksek performanslı bir reflektör anten sistemi tanıtılacaktır.

2 REFLEKTÖR ANTENLER

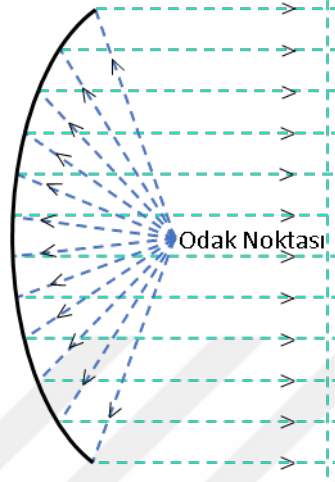
Reflektör antenler, 1888’de Hertz tarafından elektromanyetik dalga yayılımının keşfinden bu yana, farklı şekillerde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, reflektör anten tasarım mantığı, çok sayıda radar uygulamasının geliştiği II.Dünya Savaşı günlerine kadar ilerleme göstermemiştir [40].

Reflektör antenler haberleşme sistemlerinde uzak mesafeler arasında veri iletimini sağlayabilmek, radar sistemlerinde ise yüksek çözünürlükle hedef taraması yapabilmek için sıklıkla kullanılan anten sistemleridir. Reflektör antenler yüksek kazanç, düşük yan lob seviyesi ve huzmelerinin yönlendirilebilmesi sebebiyle tercih edilmektedir [41]. Radar sistemlerinde ise reflektör antenler yüksek kazanç ve dar huzmeleri sayesinde genel olarak yüksek çözünürlükle hedef taraması yapabilmektedir. Ek olarak reflektör antenler, yansıtıcı yüzeyleri üzerinde fiziksel değişiklikler yapılarak özel ışıma karakteristikleri elde etme imkânı vermektedir [41]. Reflektör antenler uzay araştırmalarında yüksek hassasiyete sahip teleskop olarak da kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de Çin’in uzay araştırmaları için kullandığı parabolik reflektör anten gösterilmektedir.



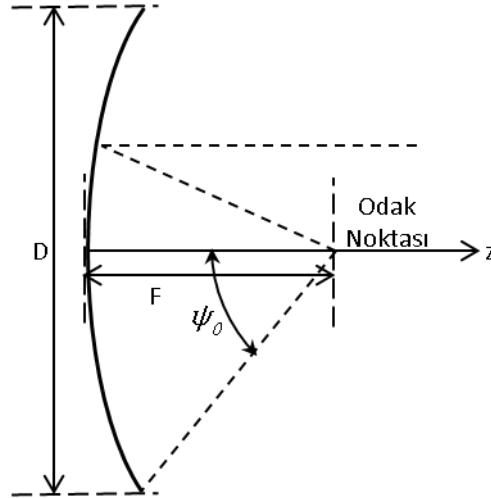
Şekil 2.1 Çin gök gözü teleskobu [42]

Koninin kesitine göre parabol, daire, elips ve hiperbol formlarında reflektör antenler elde edilebilir. İdeal reflektör anten Şekil 2.2’de gösterilen parabolik reflektör antendir. Parabol, odaktan yayılan ışınları veya RF ışınlarını dar bir ışın oluşturan paralel yollara yansıtma özelliğine sahiptir. Odak noktasından diyafram boyunca bir düzleme veya herhangi bir mesafede paralel bir düzleme kadar olan tüm yollar aynı uzunluktadır.



Şekil 2.2 Parabolik anten geometrisi

Parabolik yansıtıcı anten tasarımı yapabilmek için öncelikli olarak besleme anteninin E ve H düzlemleri ışınma örüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Parabolik yansıtıcı tasarım parametreleri Şekil 2.3’te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Parabolik reflektör tasarım parametreleri [43]

Burada ψ antenin en uç noktasına yapılan ışınma açısını, D yansıtıcı antenin çapını, F parabolik yansıtıcının odak uzaklığını göstermektedir. ψ yarı alt açısı (half subtended

angle) 2.1’de belirtilen formül ile bulunabilmektedir.

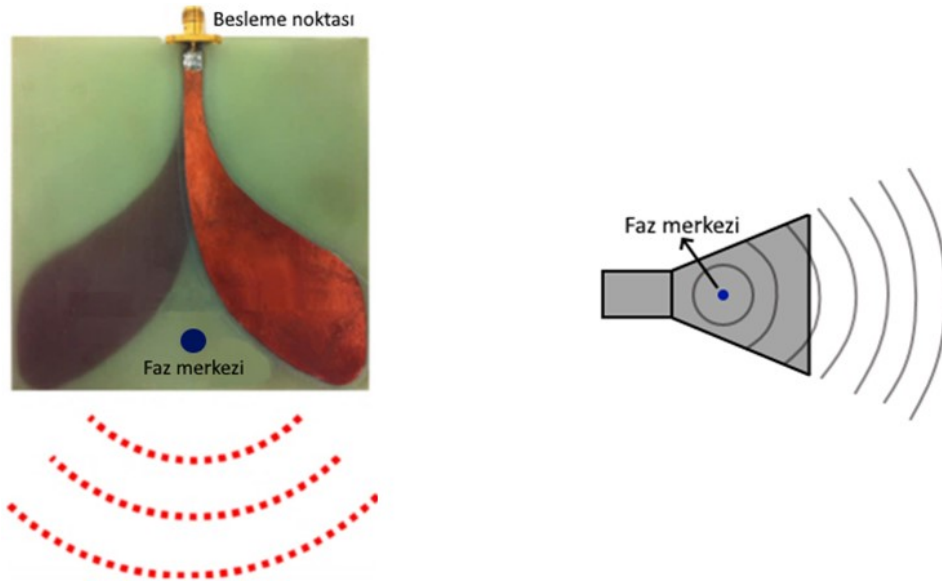
$$\psi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{4F/D} \right) \quad (2.1)$$

2.1 Faz Merkezi ve Faz Bozulması

Besleme anteninin faz merkezi parabolik reflektörün odağına yerleştirilmelidir. Bu sebeple besleme anteninin faz merkezinin konumunun doğru belirlenmesi yüksek önem taşımaktadır. Anten tasarım teorisinde, faz merkezi elektromanyetik radyasyonun küre şeklinde dışarı doğru yayıldığı ve sinyalin fazının küre üzerindeki herhangi bir noktada eşit olduğu noktadır [44]. Pratikte antenin faz merkezi minimum faz hatası veren nokta olarak tanımlanır [43]. Faz merkezinde elektromanyetik dalgalar küresel olarak yayınıma başlar ve kürenin üzerindeki her noktada işaret eşit faza sahiptir. Her frekansta (çalışma bandındaki yüksek ve alçak frekanslarda) faz merkezi konumları birbirinden farklı olacaktır [45].

Faz merkezinde ölçülen ışıma örüntüsünün fazı, ilgilenilen açısal alanda olabildiğince eş faz yüzeyine sahip olmalıdır. Faz merkezi konumunun belirlenmesinde, ilgilenilen frekanstaki E ve H düzlemindeki örüntülerin 10 dB (çoğunlukla reflektör sistemleri için) veya 3 dB huzme genişliği ile ilgilenilir [45].

Faz merkezi noktası konumu frekansa ve anten çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Şekil 2.4’te farklı antenlere ait faz merkezleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Farklı antenlere ait faz merkezleri [46]

Geniş bantlı anten teknolojisinin önemli avantajları bulunmakla beraber reflektör

sistemlerinde kullanılması bazı ekstra kayıpları da beraberinde getirmektedir. İdealde reflektörün tüm yüzeyi, bandın tüm frekanslarında besleme anteninden eşit güç yoğunluğu ile aydınlatılmalıdır. Ancak geniş bantlı bir sistem için bu mümkün değildir. Bant içindeki farklı frekanslardaki farklı faz merkezi konumları ve 10 dB ışın genişliği değerleri, bir reflektör sisteminde taşma, genlik incilmesi ve faz kayıplarına neden olmaktadır [47].

Geniş bantlı antenlerin faz merkezleri frekansla ve aynı frekans değerinde E-H düzlemlerinde farklı noktalarda bulunması ile değişebilmektedir. Faz merkezindeki bu değişim eksenel odaklanamama ve astigmatizm adı verilen faz hatası kayıplarına sebep olmaktadır.

Eksenel odaklanamama geniş bantlı lens antenin frekans değişimine bağlı olarak faz merkezi noktasının bir düzlem üzerinde değişiminin sebep olduğu faz hatası kaybıdır. En düşük ve en yüksek frekanslardaki faz merkezi konumları arasındaki bu mesafe, eksenel odaklanamama kaynaklı faz hatası kaybına neden olmaktadır [48].

Astigmatizm ise antenin aynı frekans değerinde E ve H düzlemlerinde faz merkezi yerinin değişimine bağlı olarak reflektörde oluşan kayıplardır.

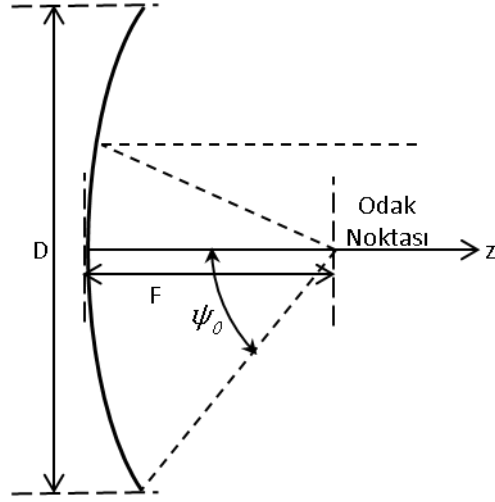
Yüksek performanslı bir reflektör sisteminde, yeterince yüksek bir yönlülük elde etmek için uzun besleme elemanları gereklidir. Bu elemanlardaki yüksek faz merkezi kararsızlığı, reflektör sistemindeki eksenel odaklanamama ve astigmatizm nedeniyle önemli faz hatası kaybına (PEL) neden olmaktadır [49].

Faz merkezlerindeki bu değişimden dolayı oluşan faz kayıpları, referans bir frekans değeri belirlenerek diğer frekanslardaki faz merkezi kayması hesaplanarak bulunur. Faz bozulmasına bağlı kayıpların incelenmesi için aşağıda 2.1, 2.2, 2.3 ve 2.4'te belirtilen formüller kullanılmaktadır. Şekil 2.5 tasarım parametrelerinin reflektör üzerindeki yerlerini göstermektedir.

$$S = \frac{z}{\lambda} \left[1 - \cos \left(2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{4F/D} \right) \right) \right] \quad (2.2)$$

$$\rho = \frac{f}{\left(\cos \left(\frac{\psi_0}{2} \right) \right)^2} \quad (2.3)$$

$$PEL = \frac{\rho^2 [1 - 2e^{-\rho} \cos(2\pi S) + e^{-2\rho}]}{[\rho^2 + (2\pi S)](1 - e^{-\rho})^2} \quad (2.4)$$



Şekil 2.5 Parabolik reflektör tasarım parametreleri [43]

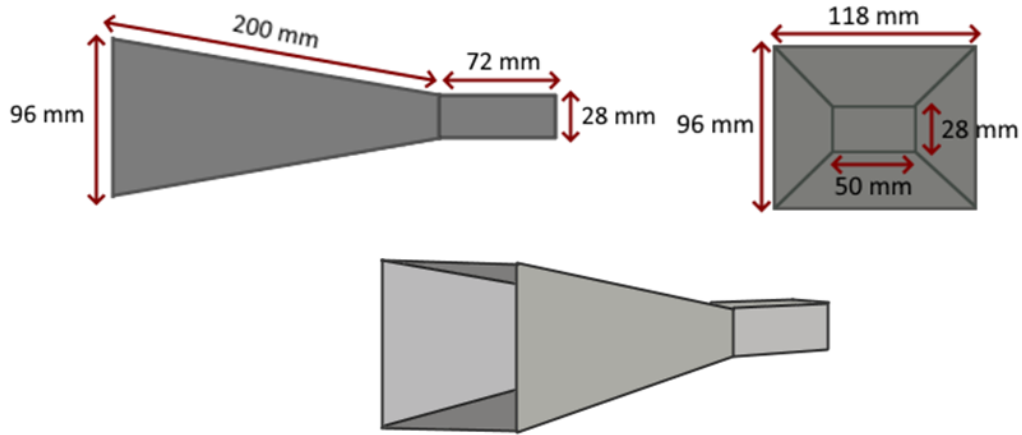
Burada z faz merkezleri arasındaki mesafeyi, ρ odaktan çıkıp yansıtıcı antene giden ışının aldığı yolu, ψ_0 ise odaktan çıkıp reflektörün en uç noktasına giden ışının açısını ifade etmektedir.

3

HORN ANTEN BESLEMELİ REFLEKTÖR ANTEN TASARIMI

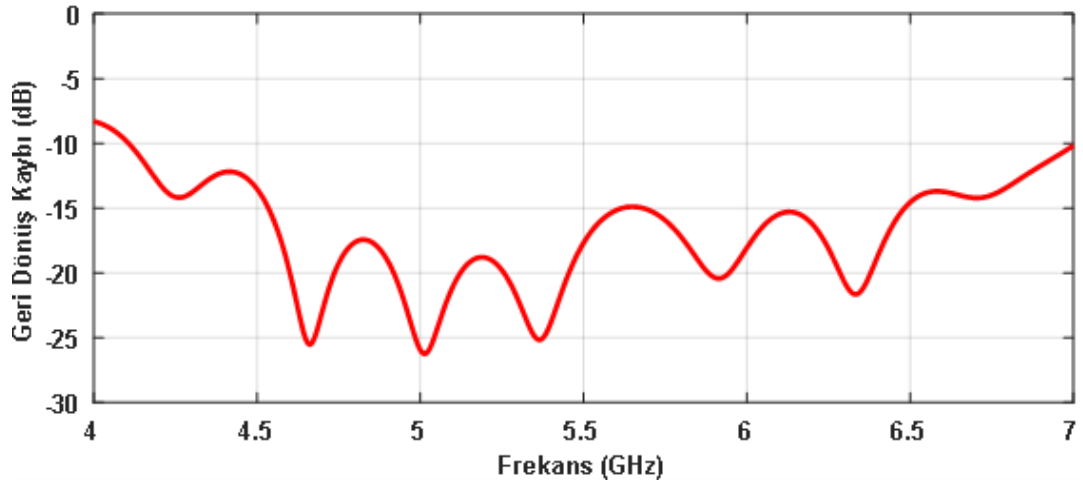
Çalışmanın bu bölümünde öncelikle horn anten tasarımı yapılmıştır. Horn antenler, reflektör sistemlerinde besleme anteni olarak oldukça sık tercih edilmektedir. Faz merkezindeki konum değişiminin az olması, E ve H düzlemlerinde yarım güç huzme genişliklerinin yaklaşık olarak eşit olması horn antenleri reflektör besleme kaynağı olarak seçiminde tercih sebebi haline getirmektedir.

4 - 7 GHz C band frekans aralığına karşılık gelmektedir. C band, özellikle insansız hava aracı uygulamaları için kullanılmaktadır. Horn antenin tasarım parametreleri bu frekans bandını kapsayacak şekilde seçilmiştir. Tasarlanan horn antene ilişkin tasarım uzunlukları ve resimleri Şekil 3.1’de bulunmaktadır.



Şekil 3.1 Tasarlanan horn antenin boyutları ve yandan görüntüsü

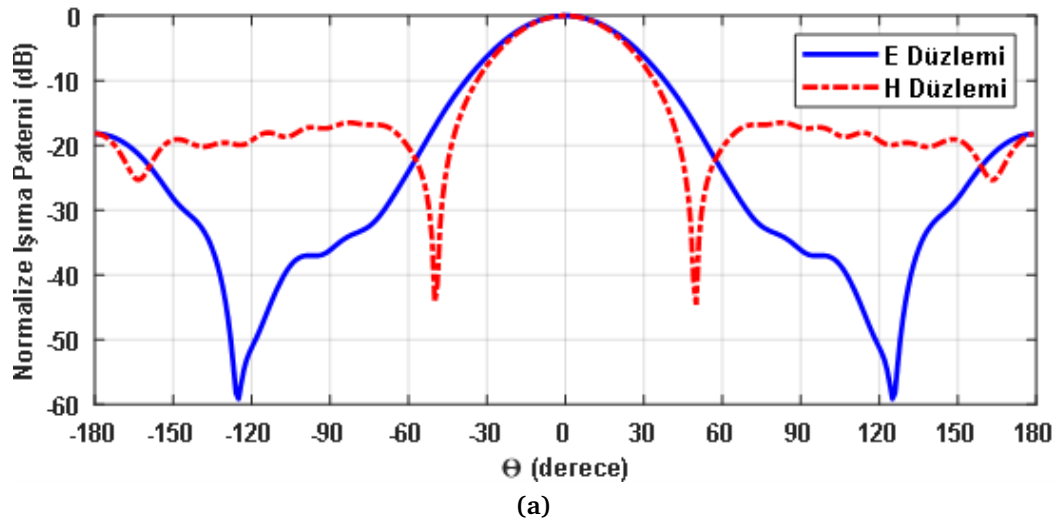
Tasarlanan horn antene ilişkin geri dönüş kaybı grafiği Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Geri dönüş kaybı grafiğinden de görüldüğü gibi horn anten yaklaşık olarak hedeflendiği gibi 4 - 7 GHz aralığında çalışmaktadır.

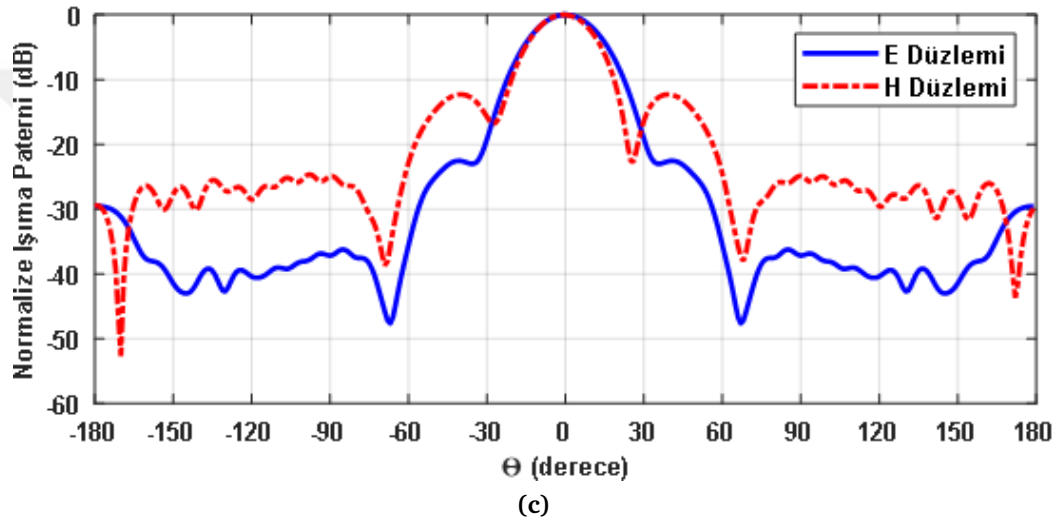
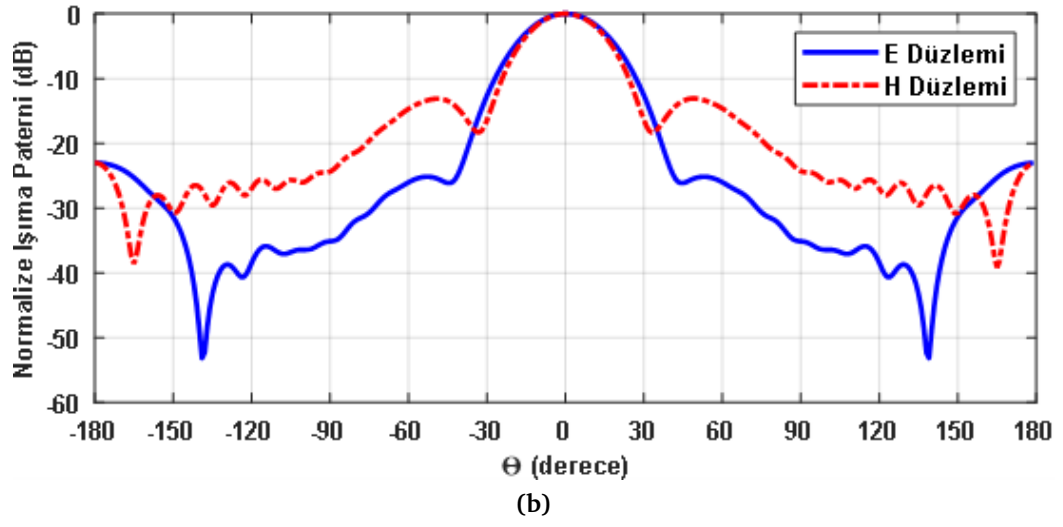


Şekil 3.2 Horn antenin geri dönüş kaybı grafiği

Horn antenin 4, 5.8 ve 7 GHz, $\phi = 0^\circ$ (E Düzlem) ve $\phi = 90^\circ$ (H Düzlem) normalize ışınım paterni grafikleri Şekil 3.3'te görülmektedir. Besleme anteninden çıkacak olan yan lobları da hesaba katabilmek için huzme genişliği 10 dB olarak belirlenmiş ve buna göre parabolik reflektör tasarım hesaplamaları yapılmıştır. Drone ve İHA antenleri kullanım frekansı olan 5.8 GHz referans frekansı olarak kabul edilmiştir.

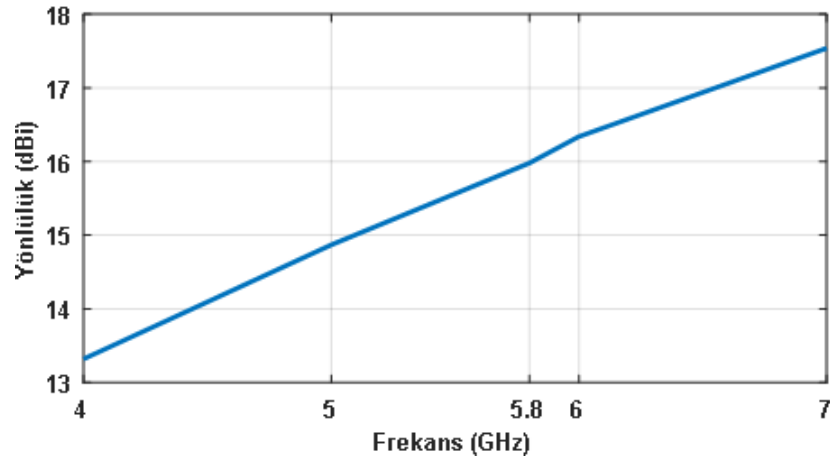
4 GHz'deki ışınım örüntüsünün 10 dB huzme genişliği, E düzleminde $\pm 37^\circ$, H düzleminde $\pm 33^\circ$ 'dir. 5.8 ve 7 GHz frekanslarında ise huzme genişliği değerleri sırasıyla E düzleminde $\pm 27^\circ$ ve $\pm 28^\circ$; H düzleminde $\pm 29^\circ$ ve $\pm 28^\circ$ 'dir.





Şekil 3.3 Horn antenin E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz

Şekil 3.4'te horn antenin yönlülük-frekans grafiği bulunmaktadır. Grafikten de görüldüğü üzere frekans arttıkça yönlülük artmaktadır.



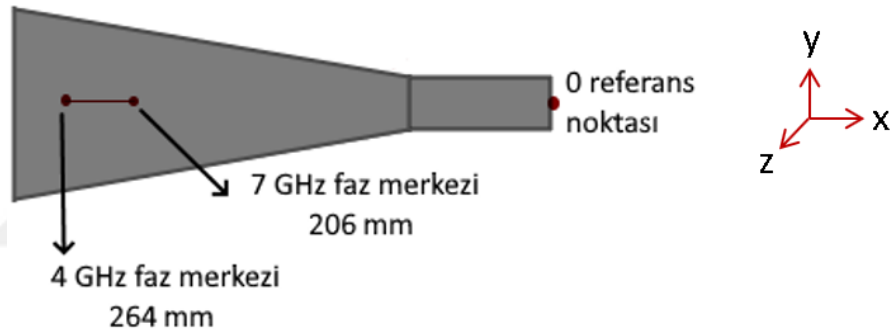
Şekil 3.4 Horn antenin geri dönüş kaybı grafiği

3.1 Horn Antenin Faz Merkezi

Horn antenin E ve H düzlemi frekansa bağlı faz merkezi noktası değişimi Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

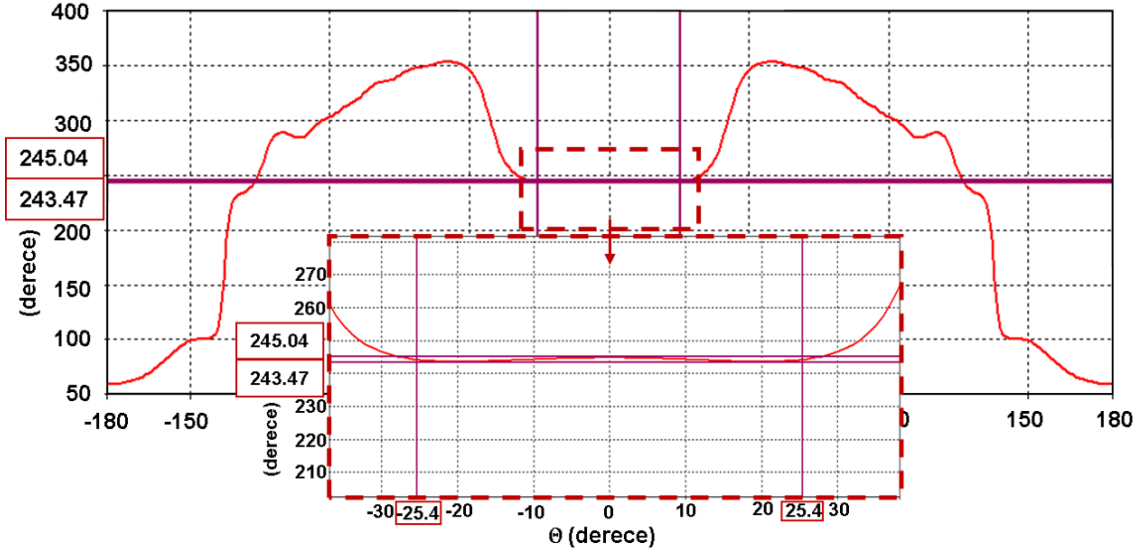
Tablo 3.1 Horn anten frekansa bağlı faz merkezi değişimi

Frekans	E Düzlemi Faz Merkezi (mm)	H Düzlemi Faz Merkezi (mm)
4	264	259
4.5	250	259
5	247	254
5.5	254	252
5.8*	237	252
6	242	250
6.5	223	249
7	206	244



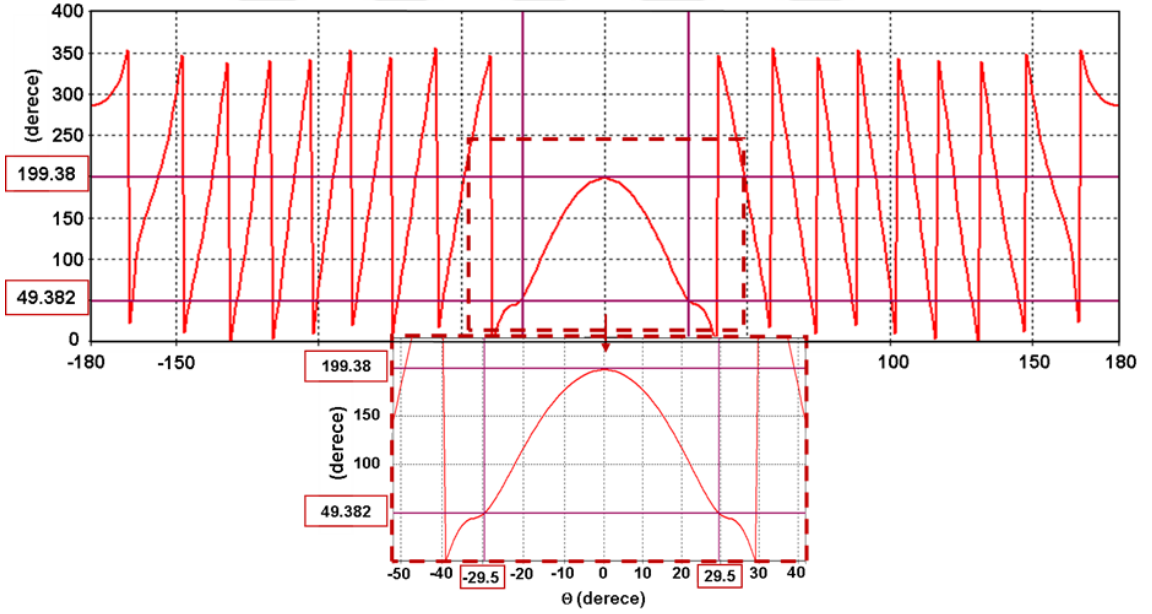
Şekil 3.5 Horn anten frekansa bağlı faz merkezi değişimi

Tasarlanan horn antenin frekansa bağlı faz merkezi değişimi Şekil 3.5’te gösterilmektedir. Faz merkezi noktası, sinyalin fazının küre üzerindeki herhangi bir noktada eşit olduğu nokta olmasından dolayı o noktada faz görüntüsü yaklaşık olarak düz görülmelidir. $\phi = 0^\circ$ ’de faz merkezi grafiği Şekil 3.6’da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi antenin fazı, faz merkezi noktasında neredeyse düz bir görünüme ulaşmıştır.



Şekil 3.6 Horn antenin $\phi = 0^\circ$ faz grafiği

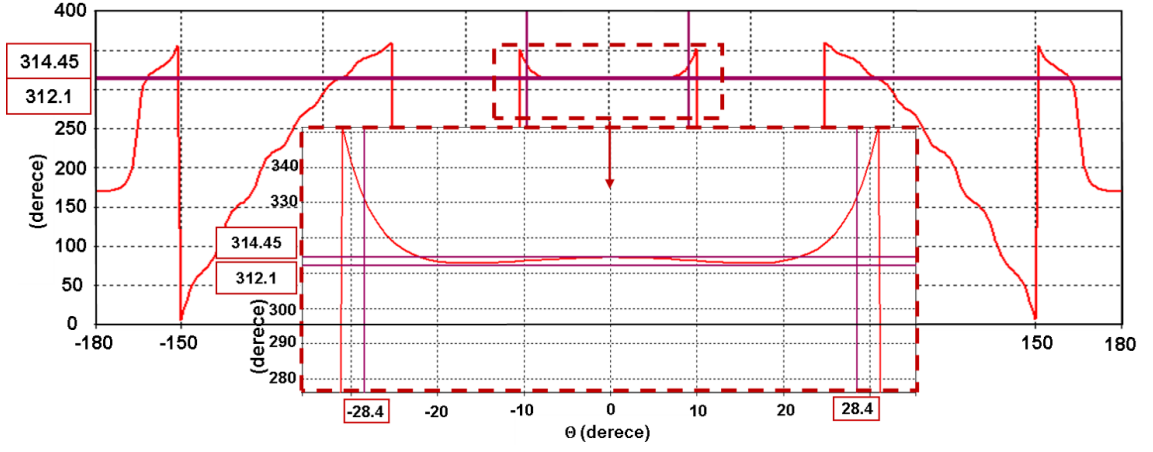
Aynı şartlardaki antenin faz merkezi noktası yeri değiştirildiğinde elde edilen grafik Şekil 3.7’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi faz merkezi olmayan noktadaki grafikte faz farkı yüksektir.



Şekil 3.7 Horn antenin $\phi = 0^\circ$ faz merkezi kaydırma grafiği

Tasarlanan horn antenin frekansa bağlı faz merkezi değişimi Şekil 3.5’te gösterilmektedir.

Horn antenin $\phi = 90^\circ$ (H düzlemi) grafiği Şekil 3.8’de gösterilmekte ve yine faz merkezi noktasında düz bir faz görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.8 Horn antenin $\phi = 90^\circ$ faz grafiği

Faz merkezi ile odak noktası çakıştırıldığında reflektör anten en yüksek kazancı vermektedir. Bu sebeple tasarım yapılırken besleme anteninin faz merkezi ile yansıtıcı antenin odak noktası aynı noktaya gelecek şekilde konumlandırılmalıdır.

3.1.1 Horn Antenin Faz Hatası Kaybı

Horn antenin faz hatası kaybı 2.4 formülü yardımıyla hesaplanmış, faz merkezindeki kayma miktarına bağlı olarak faz hatası kaybı bulunmuştur. Bu hesaplama eksenel odaklanamama ve astigmatizm sebebiyle horn antende oluşacak faz hatası kaybını vermektedir. Tablo 3.2 ve 3.3'te E ve H düzlemlerinde eksenel odaklanamamaya bağlı faz kayıpları elde edilmiştir.

Tablo 3.2 Horn anten beslemeli reflektör antenin eksenel odaklanamamaya bağlı E düzlemi faz bozulması

Frekans	Faz Merkezi (mm)	PEL	PEL (dB)
4	264	0.9960	-0.0176
4.5	254	0.9968	-0.0139
5	250	0.9987	-0.0055
5.5	247	0.9990	-0.0042
5.8*	242	1	0
6	237	0.9997	-0.0013
6.5	223	0.9974	-0.0115
7	206	0.9843	-0.0686

Tablo 3.3 Horn anten beslemeli reflektör antenin eksenel odaklanamamaya bağlı H düzlemi faz bozulması

Frekans	Faz Merkezi (mm)	PEL	PEL (dB)
4	259	0.9997	-0.0012
4.5	259	0.9997	-0.0014
5	254	1	-0.0016
5.5	252	1	0
5.8*	252	1	0
6	250	1	0
6.5	249	0.9999	-0.0015
7	244	0.9989	-0.0049

Tablodaki sonuçlardan da anlaşıldığı üzere horn antende frekans değişimine bağlı olarak faz merkezi noktası değişimi en fazla 9 mm olmakla birlikte eksenel odaklanamamaya bağlı yüksek faz hatası kaybına sebep olmamaktadır.

Horn antenin astigmatizme bağlı faz hatası kayıpları Tablo 3.4'te gösterilmektedir. Horn antenin E ve H düzlemlerinde faz merkezi noktası değişimi çok az olduğundan astigmatizme bağlı kayıplar horn antende ihmal edilebilir seviyededir.

Tablo 3.4 Horn anten astigmatizme bağlı faz bozulması

Frekans	Faz Merkezi E Düzlemi (mm)	Faz Merkezi H Düzlemi (mm)	PEL	PEL (dB)
4	264	259	0.9998	-0.0012
4.5	254	259	0.9996	-0.0019
5	250	254	0.9997	-0.0014
5.5	247	252	0.9999	-0.0039
6	237	250	0.9974	-0.0113
6.5	223	249	0.9908	-0.0401
7	206	244	0.9758	-0.1066

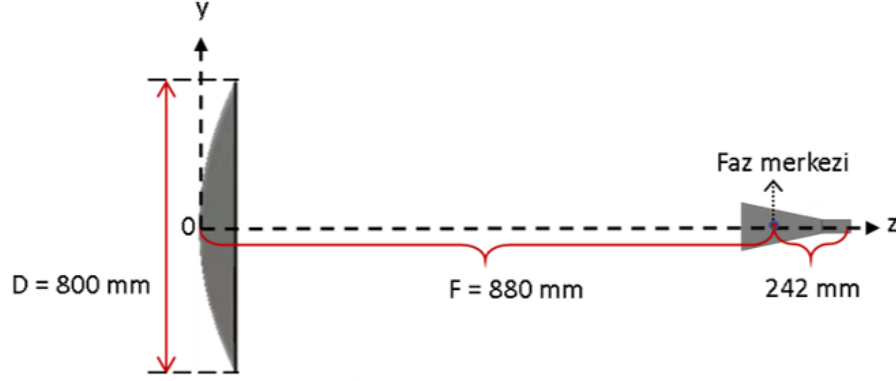
Yapılan incelemeler sonucunda horn antenin faz merkezinin frekansa bağlı değişiminin az olması ve E ve H düzlemlerinde konum değişiminin düşük olması nedeniyle eksenel odaklanamama ve astigmatizme bağlı faz hatası kayıplarının çok düşük olduğu görülmüştür.

3.1.2 Horn Anten Beslemeli Reflektör Anten Tasarımı

5.8 GHz'de $\phi = 0^\circ$ 'de horn antenin 10 dB huzme genişliği $\pm 25.5^\circ$ 'dir. 5.8 GHz frekansındaki $\pm 25.5^\circ$ huzme genişliğine göre 2.1'e yerleştirildiğinde F/D oranı 1.1 olarak bulunmuştur.

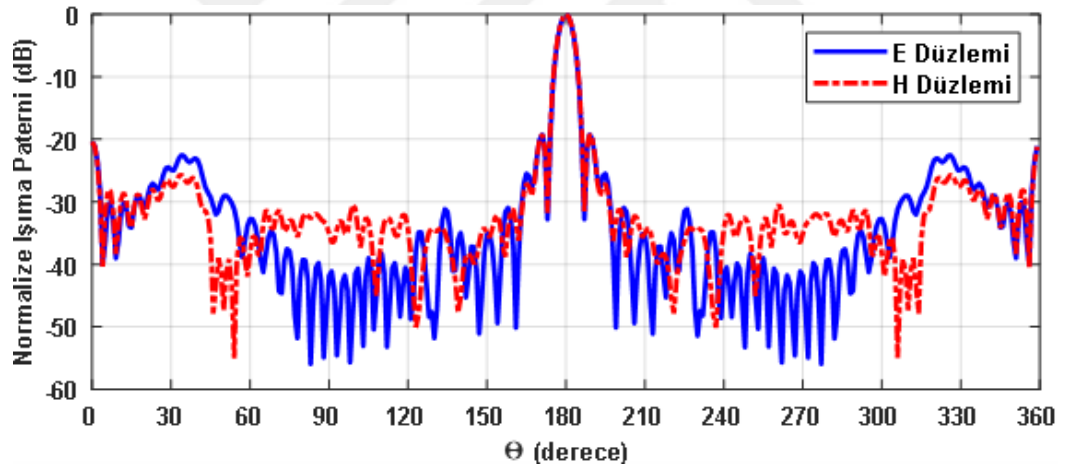
Reflektör anten çapı D, 800 mm kabul edilerek F=880 mm olarak bulunmuş ve

çalışmanın ilerleyen safhalarında $D=800$ mm uzunluğu referans değeri olarak kabul edilmiştir. Antenin odak noktası ($F=880$ mm), 5.8 GHz frekansındaki E düzlem faz merkezi (242 mm) ile çakışacak şekilde tasarım yapılmıştır. Horn anten beslemeli reflektör tasarımına ait model Şekil 3.9'da gösterilmektedir.

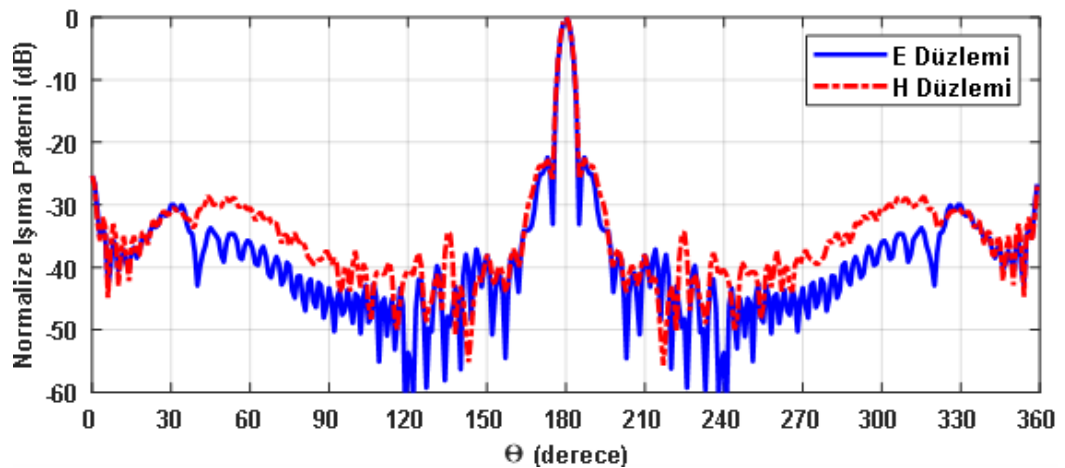


Şekil 3.9 $F/D=1.1$ Horn anten beslemeli reflektör tasarım modeli

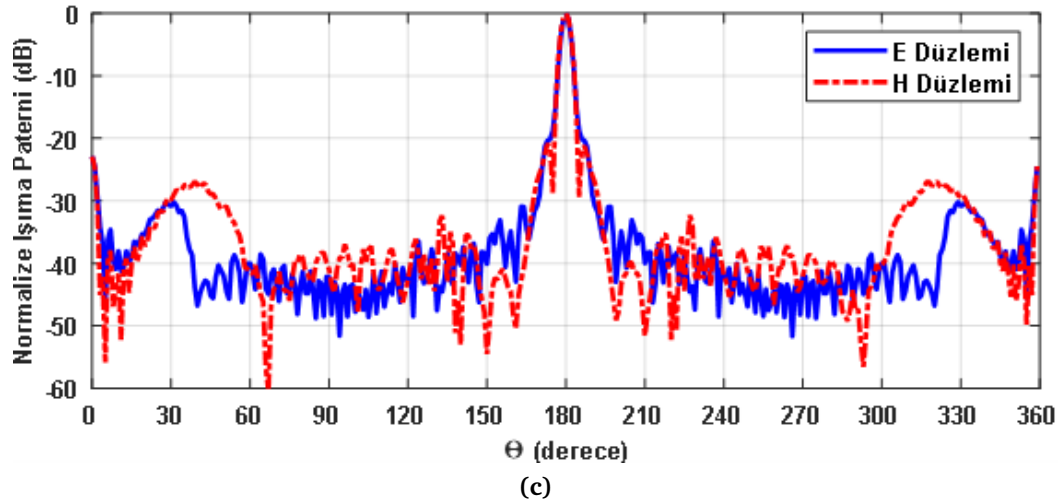
Şekil 3.10'da $F/D=1.1$ olan horn anten beslemeli parabolik reflektörün antenin 4, 5.8 ve 7 GHz, E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri gösterilmektedir.



(a)

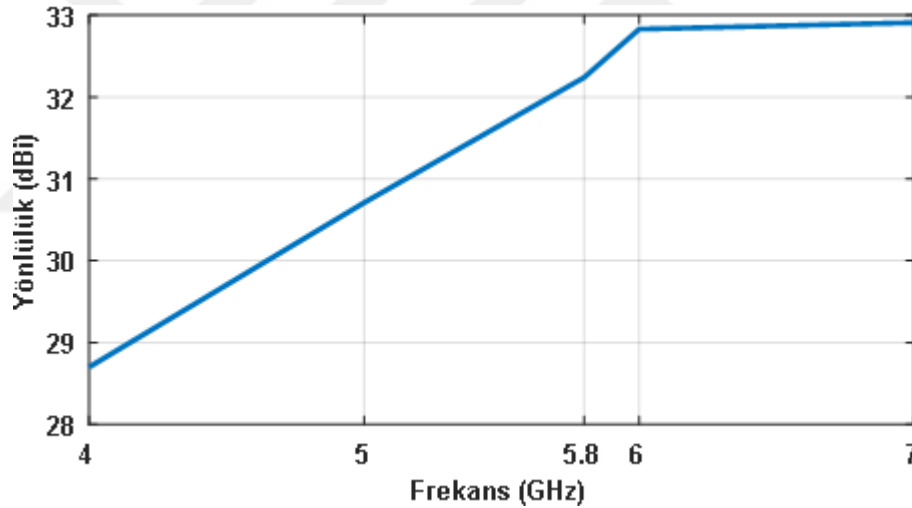


(b)



Şekil 3.10 $F/D=1.1$ Horn anten beslemeli reflektör antene ait E ve H düzlemi normalize ışınma paternleri (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz

$F/D=1.1$ horn anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekansa göre değişimi Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 $F/D=1.1$ Horn anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi

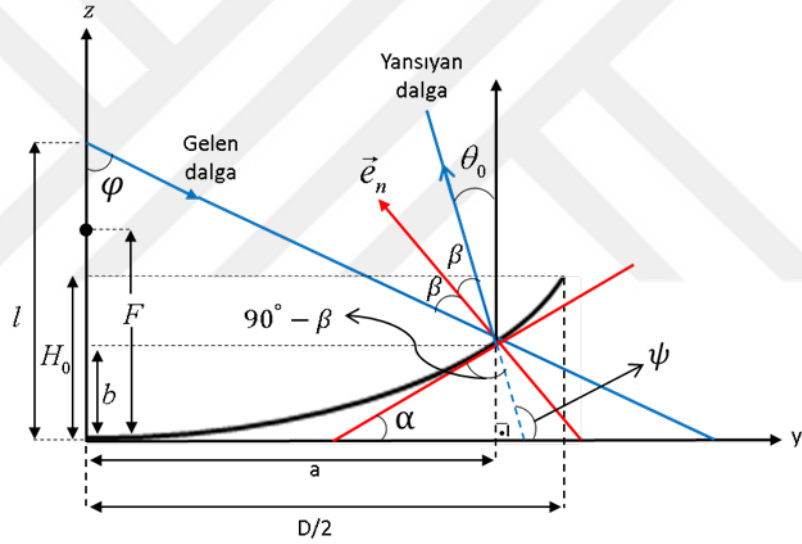
3.2 Işın Takibi Yöntemi

Tezin bu bölümünde daha önce CST simülasyon programında tasarlanan reflektör yapısının ışın takibi yöntemi ile aldığı yol incelenmiştir. Bu amaçla GO (Geometrik Optik) yöntemi ile yayılma doğrultusu, MATLAB üzerinde yazılan kod ile gösterilmiştir. Geometrik optik metodu, ikincil yansımaları hesaba katmamasına rağmen yüksek doğruluklu sonuçlar vermesi nedeniyle anten ışın takibinde oldukça sık tercih edilen bir yöntemdir. Bu sebeple horn anten beslemeli reflektör sisteminin yapısı hem CST hem de ışın takibi metodu ile incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. MATLAB’de

yazılan kod ile reflektör yapısı iki boyutlu olarak incelenmiştir. Giriş parametreleri olarak koda D (reflektör çapı), F (odak), faz merkezi ve 10 dB bant genişliği bilgileri girilmektedir. Kod bu bilgilere göre sistem yapısını oluşturmakta ve ışınların aldıkları yolları göstermektedir. Böylece sistemdeki gelen, yansıyan ve taşan ışınların izlediği yol rahatlıkla görülebilmektedir. Gelen ve yansıyan her bir ışının yönü ve açıları Şekil 3.12’de verilen çizim dikkate alınarak belirlenmektedir.

Şekil 3.12’de H_0 reflektörün derinliğidir ve $H_0 = (D/2)^2/4F$ şeklinde ifade edilir. F odak uzaklığı, D ise reflektör çapını temsil eder. Şekil 3.12’de ϕ aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{a}{l - \frac{a^2}{4f}} \right) \quad (3.1)$$



Şekil 3.12 θ_0 açısıyla yansıyan dalganın gösterimi

Burada b, reflektör yüzeyindeki bir noktanın reflektöre dik mesafesi ve a bu noktanın y eksenine izdüşüm mesafesidir. l, çalışma frekansındaki beslemenin faz merkezi konumu ile reflektör tepe noktası arasındaki mesafedir. Şekil 3.12 incelendiğinde, $\psi = 90^\circ - \beta + \alpha$ ve $\theta_0 = \psi - 90^\circ$ eşitlikleri görülmektedir. θ_0 , $\theta_0 = \alpha - \beta$, şeklinde belirtildiğinde eşitlikler yardımıyla $\theta_0 = 2\alpha - \phi$ elde edilir. Yansıyan ışınların θ_0 yansıma açısını açıkça tanımlamak için α da tanımlanmalıdır. Parabolün tanjant çizgisinin eğriye (y_a, z_a) ve (y_b, z_b) olarak iki farklı noktada temas ettiği varsayılırsa:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{z_b - z_a}{y_b - y_a} \right) \quad (3.2)$$

Burada $z_a = (y_a)^2/4F$ ve $z_b = (y_b)^2/4F'$ 'dir. Parabole teğet geçen bir çizginin parabole tam bir noktada değdiği düşünülür. Bu sebeple $y_b \approx y_a \approx a$ yaklaşımı yapılabilir ve buna bağlı olarak α aşağıdaki şekilde belirtilebilir:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{a}{2F}\right) \quad (3.3)$$

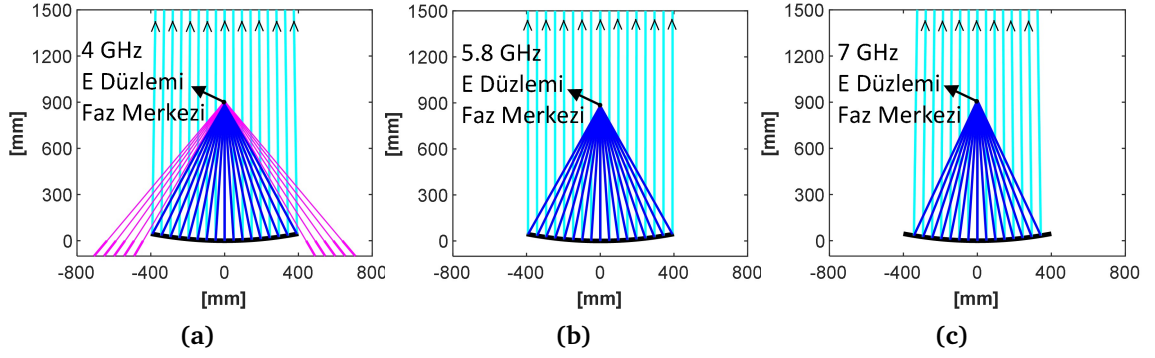
3.1 ve 3.3 eşitlikler değiştirilerek $\theta_0 = 2\alpha - \phi$, θ_0 açısı, çalışma frekansındaki faz merkezi, yansıtıcı sistemin odak uzunluğu ve noktanın y eksenine iz düşüm mesafesi olarak elde edilebilir. Böylece gelen ve yansıyan ışınların açıları bulunarak aldıkları yollar hesaplanabilmektedir.

$$\theta_0 = 2\tan^{-1}\left(\frac{a}{2F}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{a}{l - \frac{a^2}{4f}}\right) \quad (3.4)$$

Horn anten beslemeli reflektör anten sisteminde 5.8 GHz frekansındaki faz merkezinden gelen ışınlar, bu frekanstaki faz merkezi ile odak çakıştırıldığı için birbirine paralel yansıyacak ve $\theta_0 = 0^\circ$ olacaktır. 5.8 GHz referans noktasına en uzak olan 7 GHz faz merkezi konumundan gelen ışınlar için 3.4 eşitliğinden faydalanılarak θ_0 açısının en yüksek değeri hesaplanabilmektedir. $F=880$ odak noktası, $l=844$ 7 GHz frekansında faz merkezi değişimi ve $a=400$ antenin uç noktasına olan izdüşüm uzaklığı formülde yerine konularak 0.9° bulunmaktadır. Faz merkezi konumunun maksimum değişiminde dahi yansıma açısı 0.9° bulunmuş ve buna bağlı olarak horn anten beslemeli reflektör antenin ışın takibinde $\theta_0 \approx 0^\circ$ kabul edilmiştir.

3.2.1 Horn Anten Beslemeli Reflektör Anten Işın Takibi

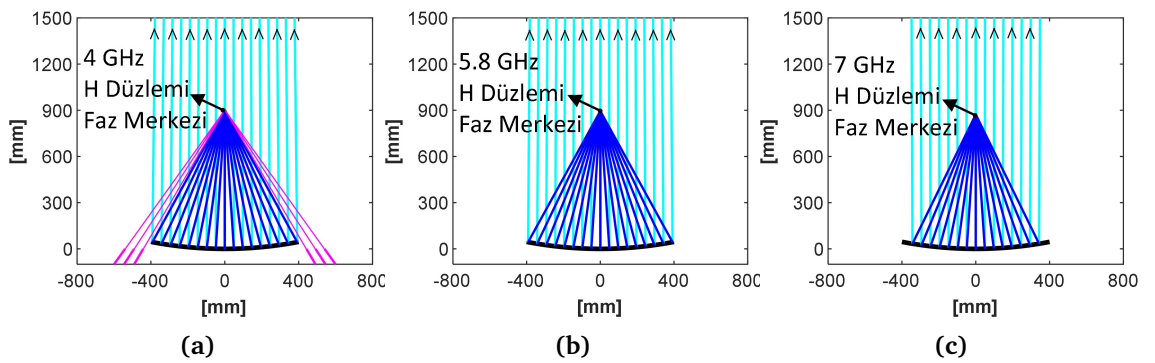
E düzleminde 4 GHz frekansında faz merkezi 264 mm, 5.8 GHz'de 242 mm ve 7 GHz'de 206 mm'dir. $F/D=1.1$ olan horn anten beslemeli reflektör tasarımında odak noktası 880 mm ile referans E düzlem 5.8 GHz faz merkezi çakıştırılmıştır. Diğer frekanslarda ise E düzlemi referans 5.8 GHz frekansı faz merkezi konumuna göre yerleştirme yapılarak ışın takibi sonuçları elde edilmiştir. Şekil 3.13'te $F/D=1.1$ olan horn anten beslemeli reflektör yapısının E düzleminde 4, 5.8 ve 7 GHz frekanslarındaki ışın takibi grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.13 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz

Şekil 3.13 (a)'da görüldüğü gibi 4 GHz frekansında reflektör sisteminde taşma sorunu oluşmaktadır. Bu taşmanın sebebi 5.8 GHz frekansında 10 dB huzme genişliğine göre tasarlanan horn anten beslemesinin 4 GHz frekansında huzme genişliğinin 5 dB olması ve buna bağlı olarak reflektörün kaynaktan çıkan tüm ışınları geri yansıtamamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.13(c)'de görüldüğü gibi 7 GHz frekansında ise huzme genişliği 15 dB'ye karşılık gelmekte ve buna bağlı olarak reflektörün tamamı aydınlatılamamaktadır.

H düzleminde 4 GHz frekansında faz merkezi 259 mm, 5.8 GHz'de 252 mm ve 7 GHz'de 206 mm'dir. H düzlemi ışın takibinde E düzlemi referans 5.8 GHz frekansı faz merkezi konumuna göre yerleştirme yapılarak ışın takibi sonuçları elde edilmiştir. Yapının 4, 5.8 ve 7 GHz frekans değerlerinde H düzleminde elde edilen sonuçlar da karşılaştırmalı olarak Şekil 3.14'te gösterilmektedir.



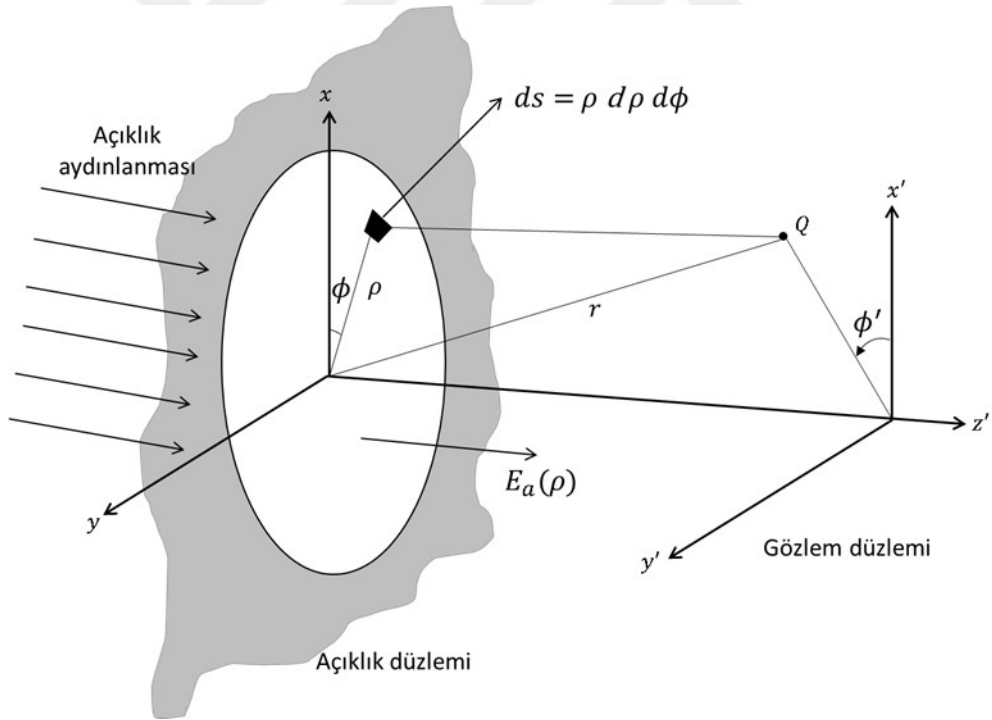
Şekil 3.14 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz

Horn antenin E ve H düzlemlerindeki faz merkezi neredeyse aynı yerde bulunduğundan, ışın takibi sonuçlarından da görüleceği gibi E ve H düzlemlerinde birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.14 (a)'da görüldüğü gibi 4 GHz'de E düzleminde taşma miktarı H düzlemine göre bir miktar fazladır. Bunun sebebi 4 GHz

frekansında huzme genişliği E düzleminde 5 dB iken H düzleminde 6 dB olmasıdır. 5.8 GHz frekansında faz merkezi ile H düzlemi faz merkezi konumları neredeyse aynı olduğundan ışınlar birbirine paralel ilerlemektedir. H düzlemi 7 GHz frekansında huzme genişliği ise 16 dB'ye karşılık gelmekte ve antenden çıkan ışınlar tüm reflektörü aydınlatamamaktadır.

3.3 Işıma Karakteristiğinin Analitik Analizi

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, horn anten tarafından beslenen reflektör yapısının ışıma özellikleri, ışın takibi yöntemi ve CST simülasyon programı kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu bölümde horn anten beslemeli reflektör yapısının ışıma karakteristiği, analitik çözümleri ile doğrulanacaktır. Analitik çözümler için skaler kırınım yaklaşımı uygulanmaktadır [40]. Işıma kaynağı, açıklık antenleri için açıklık düzlemlerinde elektrik alan dağılımıdır. Reflektör yapısının önündeki hayali açıklığın, Şekil 3.15'te vurgulandığı gibi dairesel olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 3.15 Açıklık yapısı

Şekil 3.15'te verilen dairesel açıklık düzlemi reflektör için $E_a(\rho, \phi)$ elektrik alan dağılımı ile aydınlatılır. Skaler kırınım yaklaşımı göz önüne alındığında, reflektör

açıklığı tarafından yayılan elektrik alan şu şekilde verilebilir:

$$\tilde{E}(r, \theta, \phi) = \frac{j}{\lambda} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \tilde{h}(\theta, \phi) \quad (3.5)$$

Burada $\tilde{h}(\theta, \phi)$ form faktörünü, k dalga sayısını temsil etmekle beraber $k = 2\pi/\lambda'$ dır. λ ve r dalgaboyu ile açıklığın merkezi ile Q gözlem noktası arasındaki mesafeyi temsil eder. Form faktörü 3.6'daki gibi gösterilebilir.

$$\tilde{h}(\theta, \phi) = \iint_S \tilde{E}_a(\rho, \phi) \times e^{jk\rho \sin\theta \cos(\phi-\phi')} dS \quad (3.6)$$

Şekil 3.15'te reflektörün diferansiyel açıklık yüzeyi silindirik koordinat sisteminde $F/D=1$ oranı için $dS = \rho d\rho d\phi'$ olarak ifade edilir. Form faktörü aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\tilde{h}(\theta, \phi) = \int_0^\rho \tilde{E}_a(\rho) \times \rho \left[\int_0^{2\pi} e^{jk\rho \sin\theta \cos(\phi-\phi')} d\phi' \right] d\rho \quad (3.7)$$

Reflektör yüzeyi üzerindeki genlik azalması (amplitude taper) çalışma frekans bandında sabit değildir. Reflektör açıklık düzlemi üzerindeki genlik dağılımı, Şekil 3.2 (b)'de gösterildiği gibi 5.8 GHz'de -10 dB'ye eşitken 5.8 GHz'e kadar frekanslarda daha yüksek genlik dağılımı değeri görülür. Ayrıca genlik dağılımı değeri 5.8 GHz'in üzerindeki frekanslarda Şekil 3.2 (c)'de verildiği gibi -10 dB'den düşüktür. Benzer bir şekilde H düzleminde genlik dağılımı Şekil 3.2'da gösterildiği gibi en yüksek çalışma frekansına kadar -10 dB'den daha yüksektir. Kenar azalma karakteristiklerinin bir sonucu olarak, tüm çalışma frekansları için geçerli olan reflektör açıklığı üzerinde sabit bir genlik dağılım fonksiyonu belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla, E düzlemindeki genlik dağılımları aşağıdaki kosinüs fonksiyonu ile karakterize edilir:

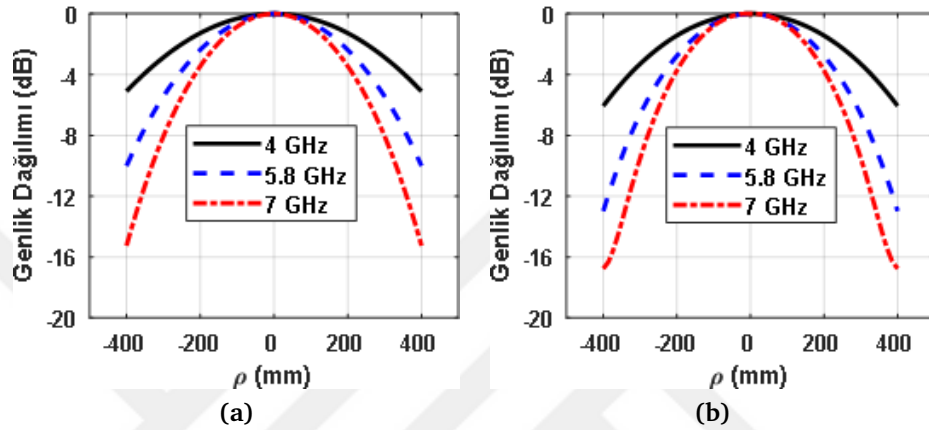
$$E_a(\rho) = \cos(\rho \times \pi \times a_f \times 10^{-4}); \quad -D_1/2 \leq \rho \leq D_1/2 \quad (3.8)$$

3.8'de belirtilen a_f , ilgili frekansta E düzlem genlik dağılımını belirten katsayıdır. 4 GHz frekansında a_f , Şekil 3.6 (a)'da verilen besleme anteninin E düzlemi ışıma örüntüsü dikkate alınarak 1, 5.8 GHz'de 1.17 ve 7 GHz için 1.22 olarak belirlenmiştir.

H düzlemi genlik dağılımını belirten katsayı, Şekil 3.6 (a)'da verilen besleme anteninin H düzlemi ışıma örüntüsü dikkate alınarak 4 GHz için 1.02, 5.8 GHz için 1.19 ve 7

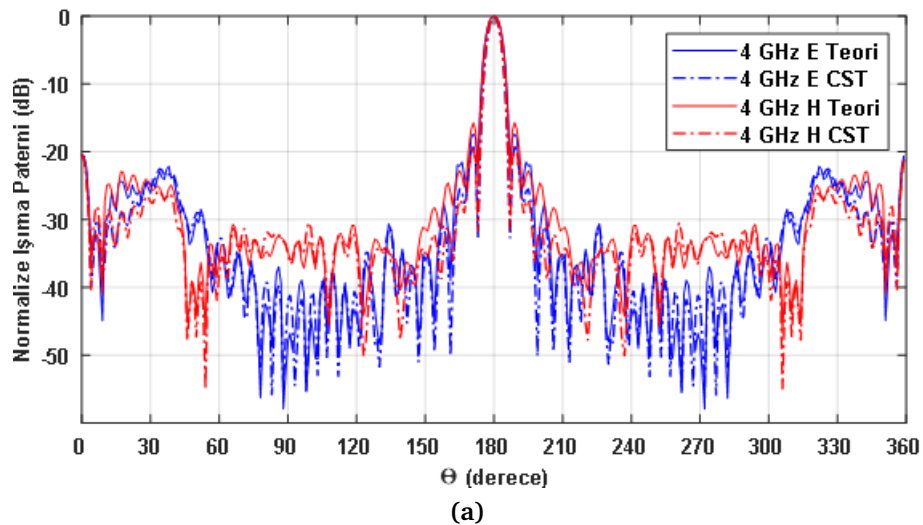
GHz için 1.25 olarak belirlenmiştir.

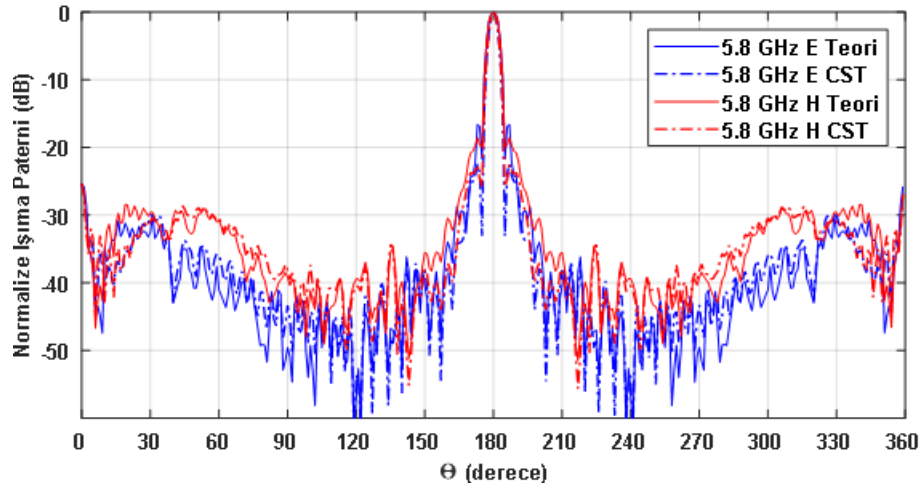
Her iki düzlemde de reflektör açıklığı üzerindeki genlik dağılımları 3.8 kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir. ρ değeri sıfıra eşit olduğunda, ışıma yoğunluğunun açıklık düzleminin ortasında maksimum değerine ulaştığı Şekil 3.16'da görülmektedir. -5 dB, -10 dB ve -15 dB kenar azalma değerleri, Şekil 3.16 (a)'da gösterildiği gibi oluşturulur. H düzlemi genlik dağılımı -6 dB, -11 dB ve -17 dB kenar azalma değerleri ise Şekil 3.16 (b)'de gösterilmektedir.



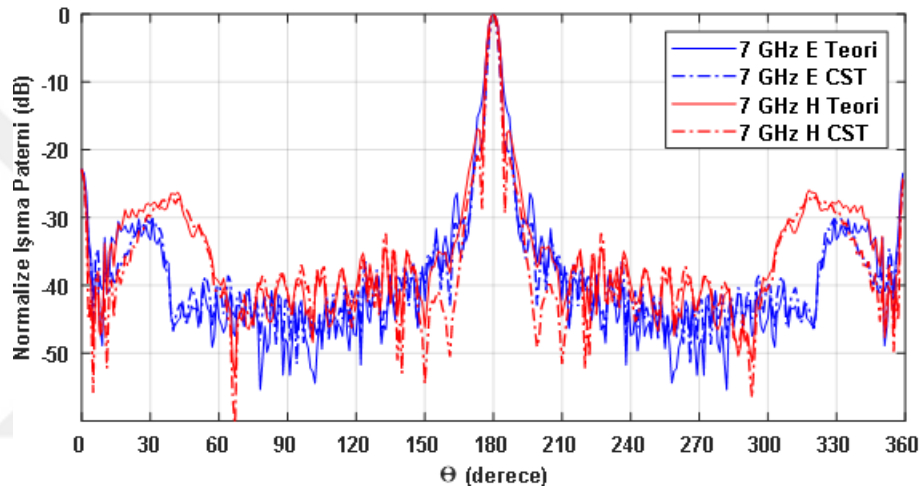
Şekil 3.16 Yansıtıcı yapı açıklığı üzerindeki genlik dağılımı; (a) E düzlemi (b) H düzlemi

Yayılan dalganın güç yoğunluğu $S(r, \theta, \phi) = |\tilde{h}(\theta, \phi)|^2 / 2\eta_0 \lambda^2 r^2$ şeklinde gösterilir. Böylece yansıtıcı antenin normalize edilmiş ışıma yoğunluğu, 3.8'de verilen form faktörü işlevlerinin genliğini kullanarak her iki düzlemde de elde edilebilir. Bu şekilde her iki düzlemde horn anten ile beslenen reflektör yapısının normalize ışıma örüntüleri elde edilmiştir. Teorik olarak elde edilen normalize ışıma örüntüleri, Şekil 3.17'de CST simülasyon sonuçları ile birlikte verilmektedir.





(b)



(c)

Şekil 3.17 Tasarımın E ve H düzlemleri normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz (b) 5.8 GHz ve (c) 7 GHz

CST simülasyonları kullanılarak elde edilen yan lob seviyeleri, teorik sonuçlara kıyasla biraz daha yüksek olmakla beraber azımsanabilecek bir fark oluşturmaktadır. Tüm frekans değerlerinde her iki düzlemde de yan lob seviyesi -18 dB'den düşüktür. Şekil 3.17'de verilen ışıma örüntüleri göz önüne alındığında, skaler kırınım yaklaşımı ile elde edilen horn anten beslemeli reflektör yapısının ışıma özelliklerinin her iki düzlemde de CST simülasyon sonuçları ile benzerlik gösterdiği söylenebilmektedir.

4

REFLEKTÖR ANTENİN BLOKAJ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Reflektör anten sistemlerinin temel dezavantajı, besleme açıklıklarından kaynaklanan blokaj kayıplarıdır. Besleme blokajı, anten tasarımında önemli bir etkidir. Besleme anteninin fiziksel boyutlarına bağlı olarak yansıyan ışınların bir kısmı besleme antenine çarpılmaktadır [23, 24].

Çift reflektörlü anten sistemlerinde, besleme blokajının yanında, ana reflektörden yansıyan ışınların hiperbolik ikinci reflektör üzerine gelmesi ile görülen alt reflektör blokajı da meydana gelmektedir. Uydu uygulamalarında yüksek kazanç ve düşük yan lob seviyesi önemli talepler olmasına rağmen, bu tür blokaj durumları, reflektör sistemlerinin kazancı ve yan lob seviyesi üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır [25, 26].

Bu bölümde parabolik reflektör antenlerin besleme blokajının ışıma örüntüleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır [50]. Aydınlatma kaybı etkilerini belirlemenin ilk adımı olarak tasarlanan parabolik reflektör antenler, piramit horn antenle beslenmiştir. Aynı çapa sahip bu parabolik reflektörler, reflektör açıklıkları üzerindeki 8 dB, 10 dB, 15 dB ve 20 dB genlik azalması (amplitude tapering) dağılımı dikkate alınarak tasarlanmıştır. Her tasarıma ait kazanç ve ilk yan lob seviyesinin değerleri karşılaştırılmıştır.

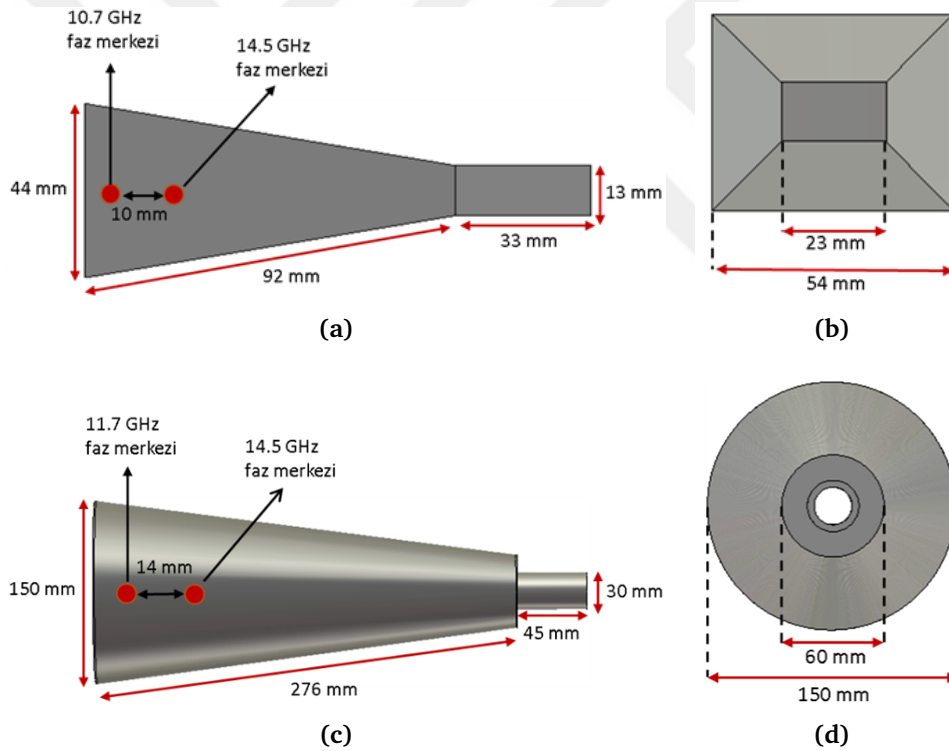
Reflektör ışıma örüntüsü üzerindeki besleme blokaj etkilerini araştırmak için dört farklı parabolik reflektör anten tasarlanmıştır. Bu kez antenler, farklı çaplara sahip olmasına rağmen aynı F/D değerine sahip olarak seçilmiştir. Bu tasarımlarda her reflektör, açıklık düzlemlerinde aynı kenar azalma (edge taper) değerine sahiptir. Bu tasarımlar sadece besleme blokajı etkilerini incelemeyi sağlamaktadır. Piramit horn antenle beslenen parabolik reflektörler, besleme türünün uydu alıcı uygulamaları üzerindeki blokaj etkisini gözlemlemek için analiz edilmiştir. Simülasyonlar, daha az bilinmeyenle daha yüksek doğruluk elde etmek için uyarlamalı ağ iyileştirmesi

kullanan CST yazılımı ile yapılmıştır [51].

Besleme antenin 8, 10, 15 ve 20 dB huzme genişliklerine göre reflektör tasarımları yapılmıştır. Bu çalışmalarda D anten çapı sabit tutularak karşılaştırma yapılmıştır. Ek olarak 20 dB huzme genişliğine sahip F/D oranları aynı, F ve D uzunlukları farklı parabolik anten sistemlerinin davranışları da incelenmiştir.

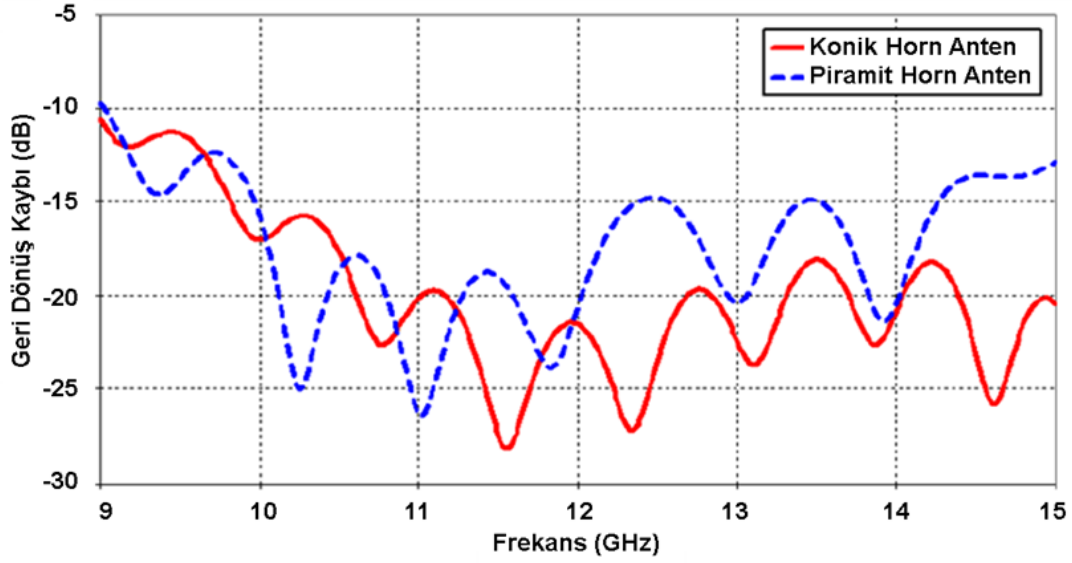
4.1 Piramit ve Konik Horn Besleme Anteni Tasarımları

Işıma örüntüsü üzerindeki her bir kayıp etkisini gözlemlemek için dört farklı parabolik reflektör anten tasarlanmıştır. Parabolik reflektör anten tasarımında uydu uygulamalarındaki besleme tipinin blokaj etkisini gözlemlemek için bir piramit horn ve konik horn olmak üzere iki farklı Ku-bant horn anten tipiyle beslenmiştir. Piramit ve konik horn antenler Şekil 4.1’de fiziksel boyutları ile gösterilmiştir.



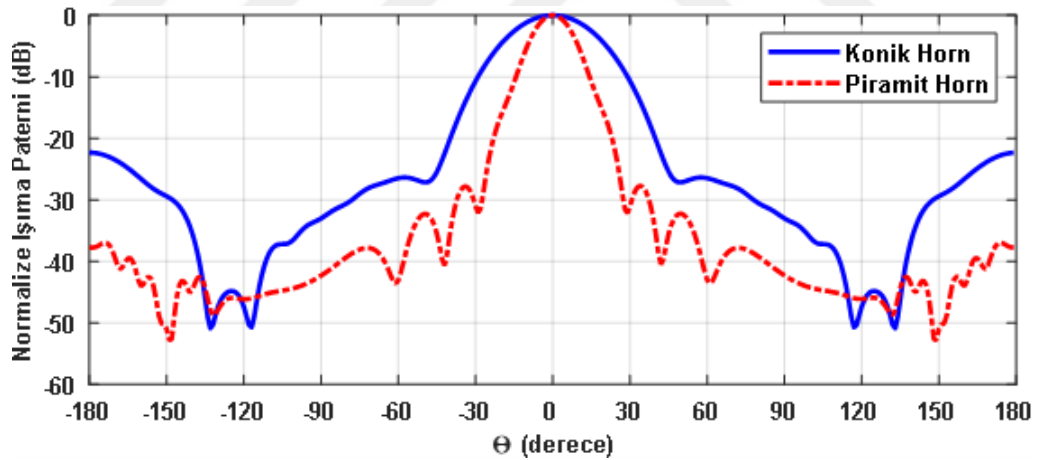
Şekil 4.1 Horn tipi besleme antenleri: (a) piramit horn yandan görünüm, (b) piramit horn arkadan görünüm, (c) konik horn yan görünüm ve (d) konik horn arkadan görünüm

Geniş bant antenlerin faz merkezi konumları, frekansın değişmesiyle birlikte hareket etmektedir. Bu hareket miktarı horn antenlerde oldukça düşüktür [52]. Bu özellik, geniş bantlı uydu uygulamaları için ideal reflektör antenlerin tasarımını mümkün kılmaktadır. Ku-bant çalışma frekansında tasarlanan her iki besleme anteninin faz merkezleri, Şekil 4.1’de belirtildiği gibi neredeyse sabit bir davranış sergilemektedir.



Şekil 4.2 Besleme horn antenlerin geri dönüş kaybı

Şekil 4.2'de besleme antenlerinin geri dönüş kaybının hem alıcı (10.7-12.7 GHz) bandında hem de verici (12.7 – 14.5 GHz) uydu iletişim bandında -15 dB'den daha düşük seviyede olduğu görülebilmektedir. 4.3'te 11.7 GHz frekansında piramit ve konik horn antenlere ait normalize ışınım paternleri gösterilmektedir.

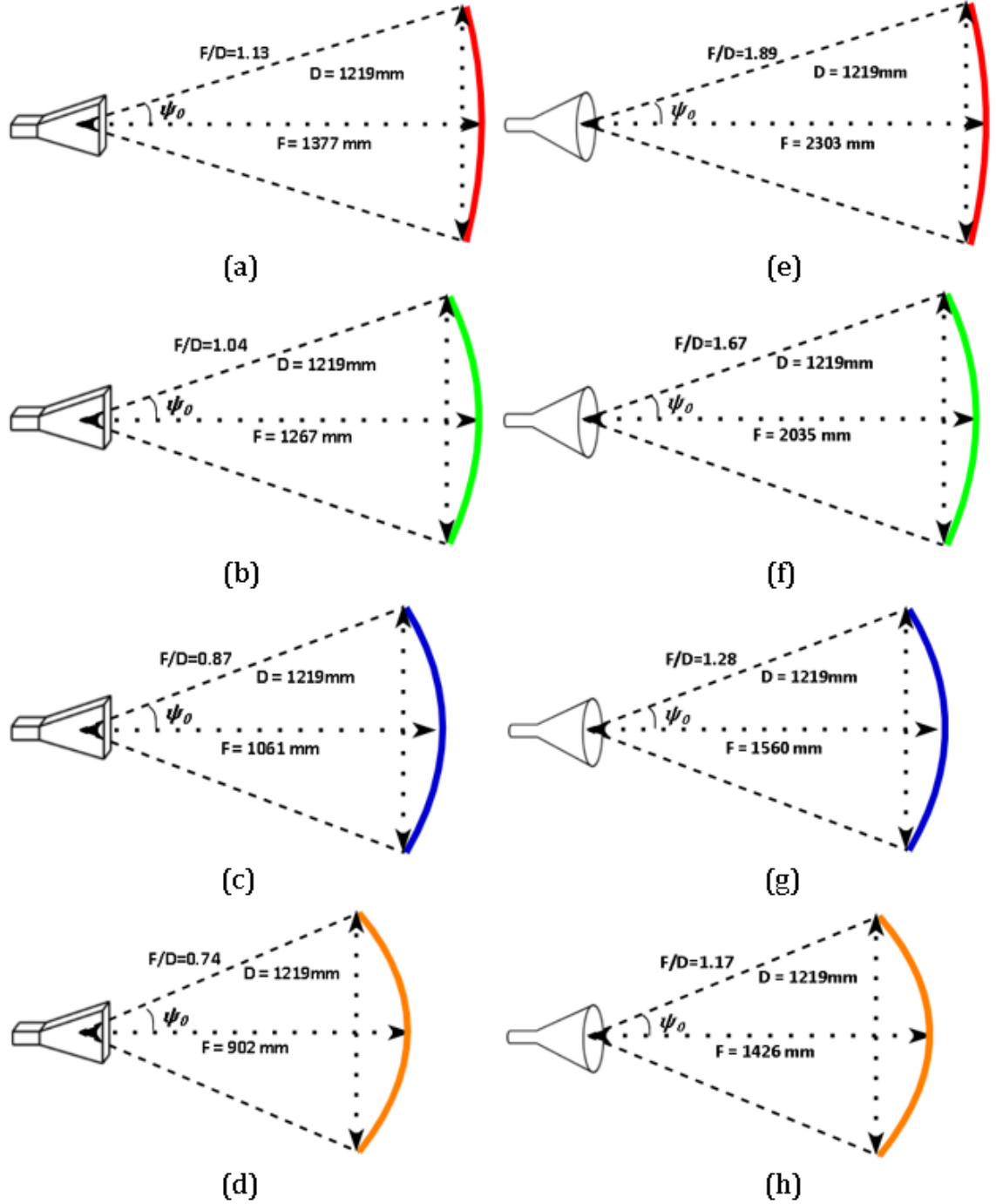


Şekil 4.3 Konik Horn ve Piramit Horn Normalize Işınım Paternleri

4.1.1 Besleme Anten Tiplerinin Genlik Azalmasına Etkileri

Bu alt bölümde parabolik reflektör antenin farklı tipte horn antenler tarafından beslendiğinde, aydınlatma kaybının ışınım örüntüleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla piramit ve konik horn antenlerle beslenen dört farklı parabolik reflektör tasarlanmıştır. Bir reflektör sisteminin kazancı, efektif toplam alanı ile doğru orantılı olduğu için tüm senaryolar aynı çap değeriyle ($D=1219$ mm) tasarlanmıştır. 11.7 GHz frekansındaki besleme horn antenin faz merkezi, reflektör odağı ile çakıştırılmıştır.

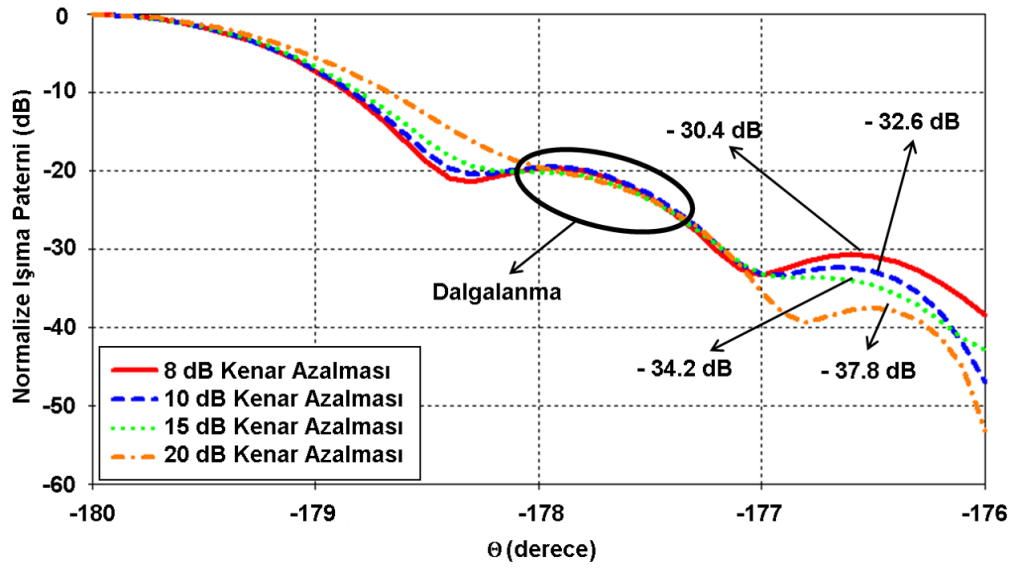
Reflektör açıklıkları üzerindeki -8 dB, -10 dB, -15 dB ve -20 dB genlik azalması göz önünde bulundurularak piramit horn besleme ile aydınlatılan reflektörler sırasıyla 1.13, 1.04, 0.87 ve 0.74 F/D değerlerini almaktadır. Şekil 4.4'te piramit horn antenlerle beslenen reflektör antenler görülmektedir. Bu değerler reflektörün F/D değeri ile ilişkili olan yarı alt açısı 4.1 eşitliği ile ölçülebilmektedir.



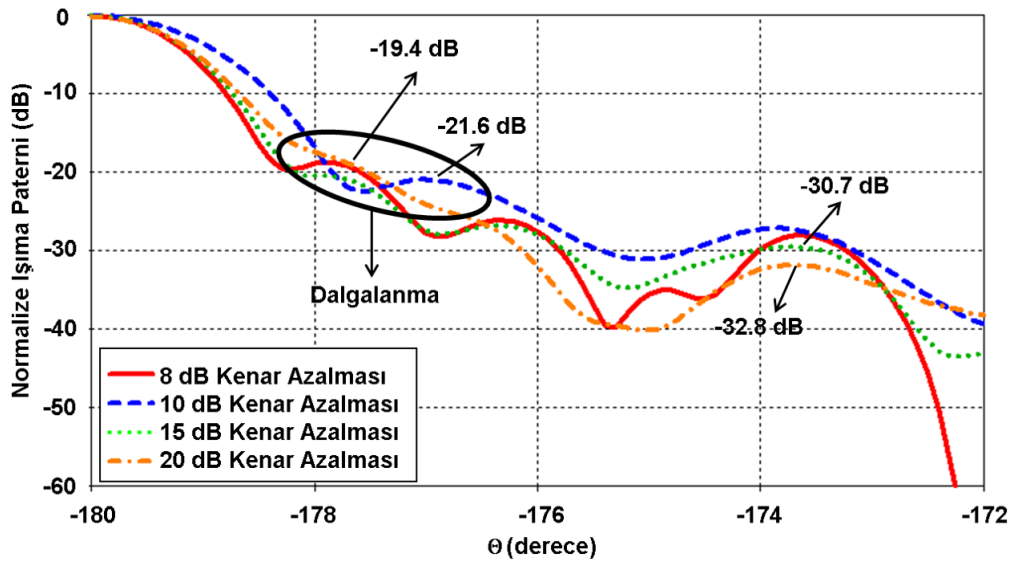
Şekil 4.4 Piramit (a, b, c, d) ve konik (e, f, g, h) horn antenlerle beslenmiş kenar azalması değerleri (a, e) 8 dB (b, f) 10 dB (c, g) 15 dB (d, h) 20 dB olan reflektör antenler [53]

$$\Psi_0 = 2 \tan^{-1} \frac{1}{4F/D} \quad (4.1)$$

Şekil 4.4'te verilen reflektörler ile aynı çap değerine sahip dört parabolik reflektör daha konik horn beslemesi ile tasarlanmıştır. Tasarlanan parabolik reflektörler, besleme tipinin Ku-bant uydu alıcı uygulamaları üzerindeki blokaj etkisini gözlemlemek için konik horn anten ile beslenir. 1.89, 1.67, 1.28 ve 1.17 F/D değerleri, reflektör açıklıkları üzerindeki sırasıyla -8 dB, -10 dB, -15 dB ve -20 dB genlik uydurma dağılımları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Konik horn antenle beslenen parabolik reflektör antenler Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.5 İlk yan lob seviyesinin (a) piramit horn beslemeli reflektör anteni (b) konik horn beslemeli reflektör antenine bağlı değişimi [53]

Piramit ve konik horn anten beslemeli reflektör anten sistemleri CST simülasyon programında koşturulmuştur. Işıma örüntüsünde gözlemlenebilen ilk yan lob seviyeleri Şekil 4.5 (a) ve (b)'de gösterilmektedir.

Piramit horn anten ile beslenen reflektör antenin ışım örüntüsü Şekil 4.5'te gösterilmektedir. İlk yan lob seviyesi, kenar koniklik dağılımındaki artışla azalmaktadır. İlk yan lob seviyesi, 8 dB kenar azalmasına karşın -30.4 dB değerine denk gelmekte, 20 dB kenar azalması için -37.8 dB değerine kadar düşmektedir. Sonuç olarak kenar azalmasının düşmesi, ilk yan lob seviyesini artırmaktadır.

Sonuçlar karşılaştırıldığında, ilk yan lob seviyenin piramit horn anten besleme açıklığı blokajından dolayı artış gösterdiği söylenebilmektedir. Şekil 4.5 (b)'de reflektör, konik horn anten ile beslenmektedir. Piramit horn beslemeli reflektör anten ile elde edilen seviyelere kıyasla oldukça yüksek ilk yan loblar meydana gelmiştir. Piramit besleme açıklığı blokajı sebebiyle ışım örüntüsünde oluşan küçük dalgalanmalar Şekil 4.5 (a)'da görülmektedir. Bu dalgalanmalar, ilk yan lob seviyesi olarak kabul edilmek için fazla küçüktür. Şekil 4.5 (b)'de görülebileceği gibi, $\theta = 0^\circ$ yönündeki dalgalanmalar, konik horn anten blokaj etkisinden daha fazladır. Şekil 4.5 (b)'deki daha derin dalgalanmalar, konik horn antenin sebep olduğu daha yüksek ışım blokajı ile açıklanabilmektedir.

Blokaj kaybının piramit ve konik horn anten beslemeli reflektör anten tasarımlarının kazanç üzerindeki etkisi Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Reflektör yüzeyinde kazanç değeri piramit horn beslemeli reflektör antenin 8 dB kenar azalması için 41.2 dBi iken, 20 dB kenar azalması için 38.1 dBi'ye düşmektedir. Konik horn beslemeli reflektör tasarımları için de benzer yorumlar yapılabilmektedir. En yüksek kazanç, reflektör yüzeyinde 8 dB kenar azalması ile elde edilir ve bu değer aydınlatma kayıplarının etkisiyle 40.25 dBi'ye düşmektedir. Bu nedenle, Tablo 4.1'den de görüldüğü üzere, kenar uydurmasındaki artışın kazançtaki düşüşle sonuçlandığı söylenebilir.

Tablo 4.1 Piramidal ve konik horn beslemeli reflektör antenlerin kenar azalmasına göre kazanç farkları

Kazanç (dBi)	8 dB kenar azalması (mm)	10 dB kenar azalması (mm)	15 dB kenar azalması (mm)	20 dB kenar azalması (mm)
Piramit horn	41.2	40.15	39.4	38.1
Konik horn	41.9	41.65	41.2	40.25

Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Tablo 4.1'de sunulan sonuçlar göz önüne alındığında, kenar azalması düzeyinin artmasının ilk yan lob seviyesinde kazançta azalma ile sonuçlandığı söylenebilmektedir. Parabolik reflektör anten kazancındaki azalma ve

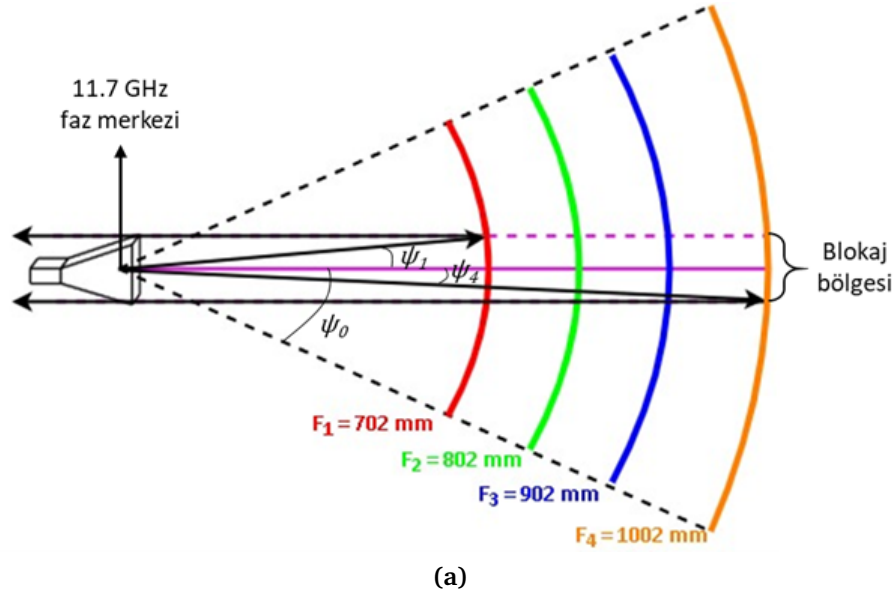
birinci yan lob seviyesindeki artışın, açıklık dağılım fonksiyonuna bağımlı olarak değiştiği sonucuna varılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu görüldüğü üzere referans D uzunluğu değişmeden F/D oranı ve buna bağlı olarak F uzaklığı değişen tasarımların kazançları odak uzaklığı azaldıkça azalmaktadır.

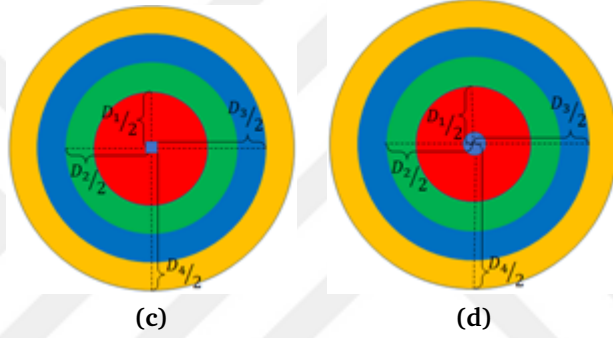
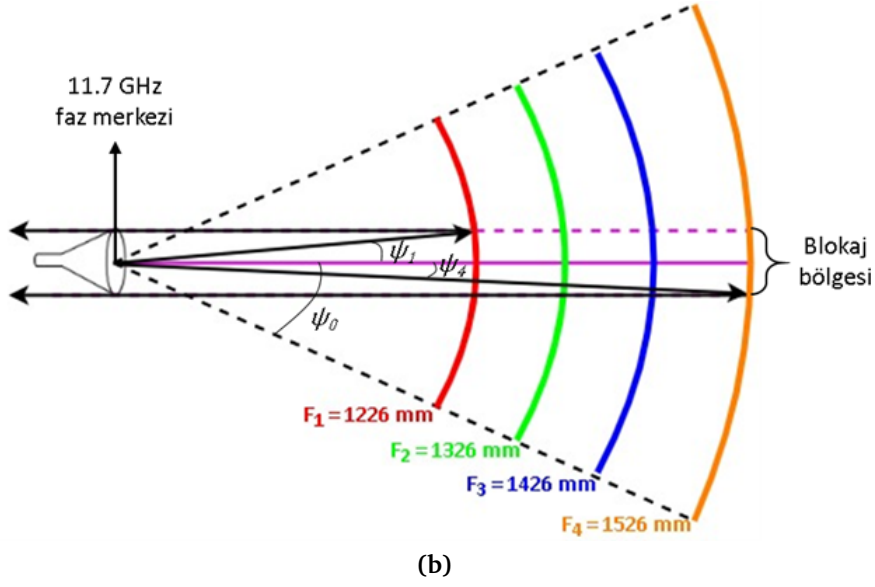
4.2 Besleme Blokajının Etkileri

Bu bölümde ışıma üzerindeki aydınlatma kaybı etkilerini azaltmak ve sadece besleme blokajının etkisini incelemek için, 20 dB aynı kenar azalması değerine sahip dört farklı parabolik reflektör anten tasarlanmıştır. Bu reflektör konfigürasyonları, Şekil 4.6'da verildiği gibi piramit ve konik horn antenlerle beslenmiştir. Şekil 4.6 (a)'da verilen parabolik reflektör anten, $F/D=0.74$ değerine ve 20 dB kenar azalma değerine sahiptir. Benzer şekilde, Şekil 4.6 (b)'de verilen konik horn beslemeli reflektör antenler de 1.17 F/D değeri ve 20 dB kenar azalma değeri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Şekil 4.6 (c)'de piramit horn beslemesi, dikdörtgen şeklinde, Şekil 4.6 (d)'de konik horn beslemesi ise dairesel bir bölge oluşturmaktadır. Şekil 4.6'da verilen her bir reflektör antenin odak uzunluğu ve çap değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 4.2 Şekil 4.6'da verilen reflektör anten tasarımlarının odak uzunluğu ve çap değerleri

Besleme anteni	F_1, D_1	F_2, D_2	F_3, D_3	F_4, D_4
Piramit horn	702, 948	802, 1083	902, 1219	1002, 1354
Konik horn	1226, 1047	1326, 1113	1426, 1219	1526, 1304





Şekil 4.6 20 dB kenar azalma değeri ile tasarlanmış (a) Piramit horn ile beslenmiş parabolik reflektör antenler yandan görünüm (b) konik horn ile beslenmiş parabolik reflektör antenler yandan görünüm (c) piramit horn ile beslenmiş parabolik reflektör antenler arkadan görünüm (d) konik horn beslenmiş parabolik reflektör antenler arkadan görünüm [53]

Reflektör uygulamalarında faz hatası, aydınlatma, taşma ve besleme blokaj kayıpları, anten ışıma örüntüsünü bozucu etkilere sahiptir. Bu çalışmada besleme blokaj etkileri 11.7 GHz frekansında incelendiğinden, faz merkezi yer değiştirmesinden dolayı oluşan faz hatası kaybı söz konusu olmayacaktır. Şekil 4.6’da verilen aynı F/D değerine sahip kenar azalması ile tasarlanan reflektör konfigürasyonları sayesinde aydınlatma kaybı her reflektör konfigürasyonunda aynı seviyede olacaktır. Her konfigürasyonla ilgili taşma kayıpları, Şekil 4.6 (a) ve (b)’de verildiği gibi her parabolik reflektör grubu için ile gösterilen yarı-alt açılar piramit ve konik horn antenler için eşit olduğundan aynı olacaktır.

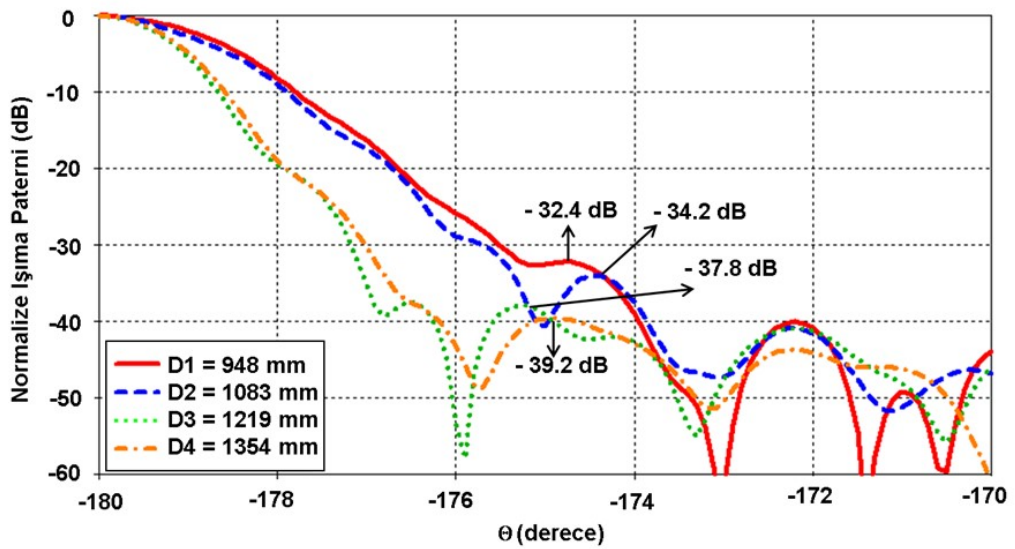
Tasarlanan reflektör antenlerin ışıma örüntülerinin ilk yan lob seviyeleri Şekil 4.7 (a) ve (b)’de görülebilmektedir. Daha önceki bölümde açıklandığı gibi, bir reflektör antenin ilk yan lob seviyesi reflektör açıklığının kenar azalması değerleriyle ilişkilidir [53]. Bu nedenle, beklendiği gibi Şekil 4.7 (a) ve (b)’de verilen ilk yan lob seviyeleri

tüm reflektör açıklıklarında kenar azalması 20 dB'ye eşit olduğu için birbirine çok yakın değerlere sahiptir. Reflektörler Şekil 4.7 (b)'de verilen konik horn anten ile beslendiğinde elde edilen ilk yan lob seviyelerinin biraz daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum konik horn antenin daha büyük besleme blokaj açıklığı ile açıklanabilir.

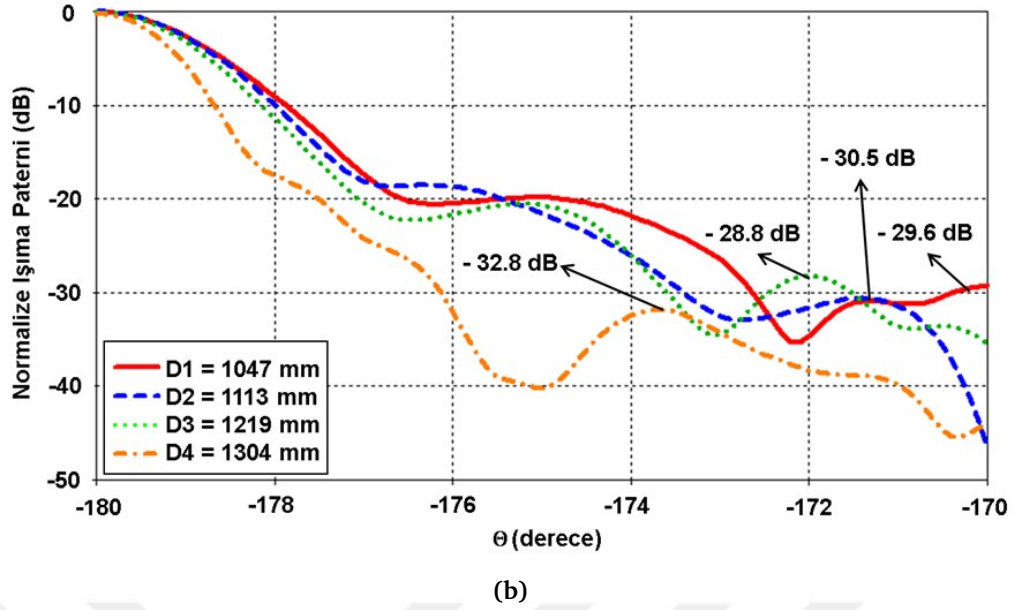
Farklı çaplara sahip reflektör antenlerin Şekil 4.6 (a)'da yer alan piramit horn anten ile beslenmesi durumunda en küçük reflektörden ($D_1 = 948\text{mm}$) 35.4 dBi kazanç elde edilmiştir. Bu değer, reflektörün etkin alanının genişlemesi ile artar. Reflektör antenlerin kazanç değerleri $D_2 = 1083\text{mm}$, $D_3 = 1219\text{mm}$ ve $D_4 = 1354\text{mm}$ çapındaki reflektörler için sırasıyla 36.3 dBi, 38.1 dBi ve 38.9 dBi olarak elde edilmiştir.

Benzer durum Şekil 4.6 (b)'de yer alan konik horn anten ile beslenen reflektörlerin kazanç değerleri için de görülmektedir. 36.6 dBi'lık en düşük kazanç değeri, en küçük reflektör antenin ($D_1 = 1047\text{ mm}$) beslenmesi ile elde edilir ve bu değer, reflektör etkin alanının $D_2 = 1113\text{ mm}$ için 37.9 dBi'ye, $D_3 = 1219\text{ mm}$ için 40.25 dBi'ye ve son olarak en büyük reflektör anten $D_4 = 1304\text{ mm}$ için 42.1 dBi değerlerine kadar ulaşır.

Şekil 4.6 (a)'da piramit horn antenin açıklığının reflektör antenlerden yansıyan enerjinin bir kısmını bloke ettiği gösterilmektedir. Alt açısı $\psi_1 = 2^\circ$ olan piramit horn antenin ışıması en küçük reflektör anten tarafından bloklanmaktadır. Bu açı en büyük reflektör için $\psi_4 = 1.3^\circ$ değerine kadar düşer. Şekil 4.6 (a)'da görüldüğü üzere reflektör yüzeylerinin genişlemesinin daha küçük yarı alt açıları ile sonuçlandığı ve bunun sonucunda besleme horn anteninin bloke edilmiş güç miktarının azaldığı anlaşılmaktadır [53].



(a)

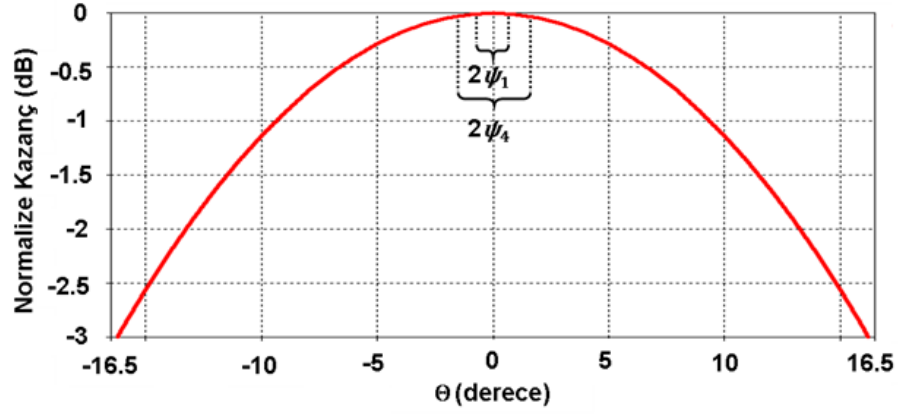


Şekil 4.7 (a) Piramit horn ve (b) Konik horn tarafından beslenen çeşitli büyüklükteki parabolik yansıtıcı antenlerin ilk yan lob seviyeleri [53]

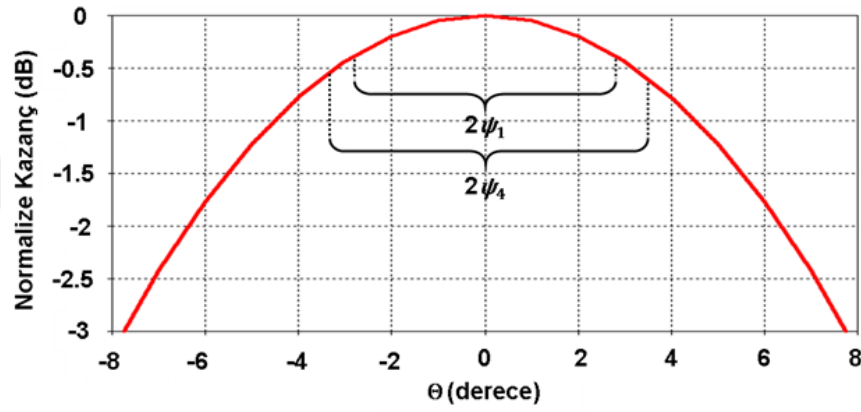
Şekil 4.6 (b)'de verilen konik horn anten ile beslenen reflektör antenler incelendiğinde, reflektör yüzeylerinin genişlemesi ile bloke edilen enerji miktarının azaldığı söylenebilir.

Piramit horn anteninin 3 dB bant genişliği için normalize edilmiş kazanç grafiği ve bloke edilmiş ışıma miktarı Şekil 4.8 (a)'da gösterilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 4.8 (b)'de konik horn anteninin 3 dB bant genişliğinde normalize kazanç grafiği ve besleme açıklığı tarafından bloke edilen güç miktarı gösterilmektedir. Şekil 4.8 (a)'ya göre piramit horn anteninin açıklığı, en büyük reflektör yüzeyi için ışımanın yaklaşık 0.15 dB huzmesini bloke etmekte ve bu değer en küçük reflektörde 0.1 dB'ye kadar düşmektedir. Şekil 4.8 (b) incelendiğinde konik horn besleme anteninin daha geniş açıklığı nedeniyle reflektör tasarımlarında bloke edilen enerjinin daha yüksek olacağı söylenebilir. Konik horn anteninin ışımasının yaklaşık olarak 0,4 dB olan kısmı en küçük reflektör aydınlatmasında engellenir. Bu değer, en büyük reflektör aydınlatması için 0.6 dB'ye kadar azalmaktadır.

Konik horn besleme anteninin açıklığı tarafından oluşan piramit horn antene göre daha yüksek ışıma blokaj miktarı, Şekil 4.8'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.8 3-dB bant genişliğindeki normalize kazanç grafiklerinin (a) piramit horn (b) konik horn anten için gösterilmektedir. Engellenen güç miktarları da kazanç grafiklerinde işaretlenmiştir. [53]

Yapılan çalışma sonucunda besleme anten açıklığındaki artışın besleme blokajına sebebiyet vermesi nedeniyle anten kazancına olumsuz etkilere sebep olabileceği görülmüştür. Yüksek kazanç ve düşük ilk yan lob seviyesi, uydu uygulamalarında yüksek sinyal-gürültü oranı sağlamak için çok önemli gereksinimlerdir. Genlik azalması ve besleme blokajının reflektör anten ışıma örüntüleri üzerinde olumsuz etkilere sebep olduğu düşünülmektedir. Kazanç ve ilk yan lob seviyesi ile ilgili teorik ve simülasyon sonuçları sunulurken Ku-bant parabolik reflektör antenlerin ışıma örüntüleri üzerindeki genlik azalması ve besleme blokajının etkileri ortaya koyulmuştur.

Parabolik antenlerde kenar azalmasının etkileri, aynı çap değerine sahip fakat açıklıkları üzerinde farklı kenar azalması bulunan dört reflektör kullanılarak incelenmiştir. Tasarlanan parabolik reflektörler besleme tipinin Ku-bant uydu alıcı uygulamaları üzerindeki blokaj etkisini gözlemlemek için piramit ve konik horn antenler ile beslenmiştir. Parabolik reflektör antendeki ilk yan lob seviyesindeki artışın,

açıklık dağılım fonksiyonuna büyük ölçüde bağlı olduğu sonucuna varılmaktadır. Aslında ilk yan lob seviyesi, daha geniş bir açıklık engellemesiyle de artmaktadır.

Benzer şekilde, besleme blokajının kazanç üzerindeki rolünü tamamen inceleyebilmek için dört reflektör anten tasarlanmıştır. Tasarlanan bu reflektör antenler piramit ve konik horn antenlerle beslenen aynı yarı eğimli açıya sahiptir. Besleme anteni açıklığının genişlemesi ile anten kazancı üzerindeki besleme blokajından kaynaklanan bozulma etkilerinin önemli ölçüde azaldığı kanıtlanmıştır [53].

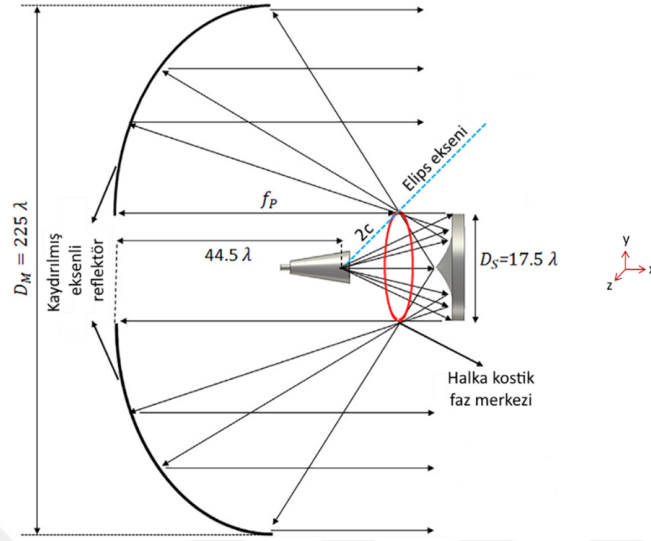
Besleme anteni blokajının bozulma etkilerinden kaçınmak, daha yüksek kazanç ve daha düşük ilk yan lob seviyeleri elde etmek için, radyasyon alanı dağılımının düzlemselliği korunmalıdır. Bu durum, elektriksel olarak daha büyük reflektör antenler kullanılarak elde edilebilir. Bununla birlikte, reflektör yüzeyinin genişletilmesi besleme anteni ve kuvvetlendirici arasındaki dalga kılavuzu kayıplarında artışa neden olmaktadır. Düzlemsel bir besleme anteni tasarlamak, besleme blokaj etkilerini en aza indirmeye yardımcı olacaktır.

4.3 Kaydırılmış Eksenli Elips Anten Beslemeli Reflektör Antenlerin Faz Bozulması ve Blokaj Etkisi

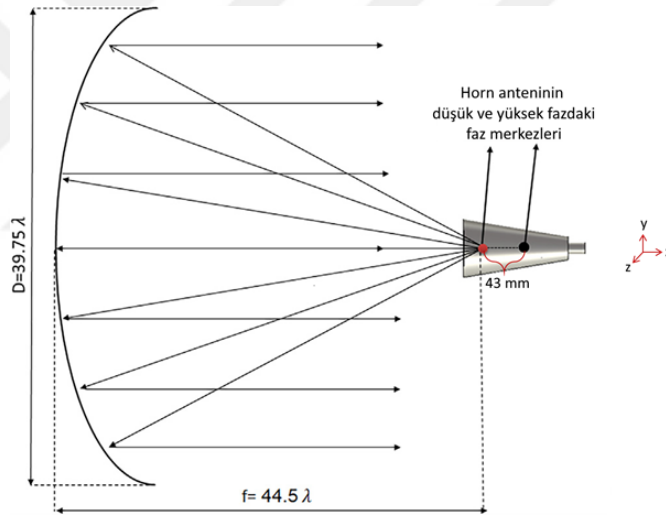
Odak noktalarına yerleştirilmiş bir besleme anteniyle aydınlatılan parabolik reflektörler uydu uygulamasında yaygın olarak kullanılan bir tasarımıdır [54, 55]. Ancak, tek yansıtıcı parabolik yüzey tasarım esnekliğini sınırlamaktadır [56]. Bu durumu iyileştirmek için nispeten daha küçük bir hiperbolik ikincil reflektör anten ile aydınlatılan büyük bir parabolik ana reflektör kullanılmaktadır [57, 58]. Besleme anteninin ana reflektörün yakınına yerleştirilmesi, gerekli elektronik ekipmanının ana reflektörün arkasına yerleştirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede anten sistemi boyutlarının küçülmesi ve besleme anteni ile yükselteç [59] arasındaki dalga kılavuzu kayıplarını en aza indirilmesi sağlanmış olur.

Klasik bir cassegrain geometrisinde besleme ve ikincil reflektör antenlerinin saçılma ve kırınım sebebiyle blokaj etkisi yarattığı bilinmektedir. Şartlar göz önünde alındığında DADRA (Displaced-Axis Dual-Reflector Antenna) sistemlerinin kaydırılmış eksenli elips (Axially-Displaced Ellipse) tasarımlarında merkezi blokaj etkisinin olmadığı görülmüştür. Reflektör anten sistemlerinde maksimum kazancın elde edilebilmesi için besleme anteninin faz merkezi reflektör antenin odağında yer almalıdır. Faz bozulması kaçınılabılır bir etki değildir. Faz merkezinin değişimi çalışma frekansı değişimi ile gözlemlenmektedir. Şekil 4.9'da DADRA sisteminde besleme anteni olarak oluklu horn anten kullanılmaktadır. İkincil reflektör olarak da kaydırılmış eksenli elips (ADE) [60]

anteni kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise oluklu horn anten ve eksenel kaydırmalı elips sistemlerinin faz bozulmaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 4.9 Oluklu horn anten beslemeli ADE alt reflektörlü DADRA sistemi [60]

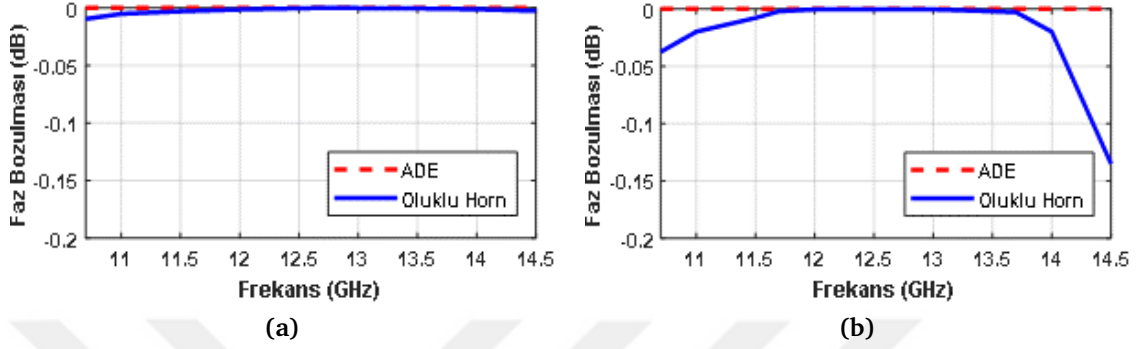


Şekil 4.10 Oluklu horn tarafından beslenen parabolik reflektör anten [60]

Eksenel odaklanamama nedeniyle oluşan faz bozulması değerleri 2.4 eşitliği kullanılarak hesaplanır. Horn anten ile beslenen ADE ikincil reflektörün faz merkezi konumunun çok az yer değiştirmesi DADRA sistemi için ihmal edilebilir düzeylerde faz hatası kaybına neden olmaktadır. Hesaplanan faz bozulması seviyeleri Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Faz merkezi konumu çalışma frekansı bandında neredeyse sabit olduğundan, faz bozulması seviyesi ADE beslemeli DADRA sistemi için $\phi = 0^\circ$ düzlemde ihmal edilebilir seviyededir. $\phi = 90^\circ$ düzleminde faz merkezi hareketi merkez frekansta 0.25λ değerine ulaşmasına rağmen, maksimum faz bozulma seviyesi tüm bantta hala sıfıra yakındır.

14.5 GHz çalışma frekansında ve $\phi = 0^\circ$ düzleminde oluklu horn anten beslemeli

reflektör anten sisteminde yüksek faz bozulma seviyeleri gözlemlenmiştir. Bu durum çalışma frekansındaki 2.1λ faz merkezi hareketinin sonucudur. $\phi = 0^\circ$ ve $\phi = 90^\circ$ düzlemlerindeki eşit olmayan faz merkezi lokasyonları astigmatizm etkisi ile faz bozulmalarına sebebiyet vermektedir. Şekil 4.11’de faz bozulması grafikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



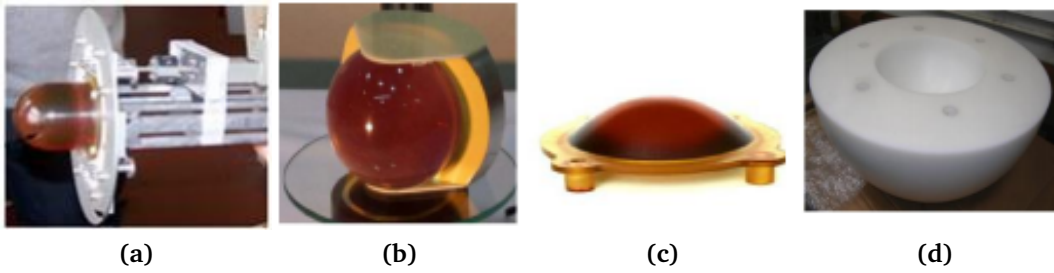
Şekil 4.11 $\phi = 0^\circ$ ve $\phi = 90^\circ$ Oluklu Horn ve ADE Alt Reflektör Faz Bozulmaları

Yapılan çalışmadan görüldüğü üzere DADRA sistemi geniş bir frekans bandı üzerinde faz merkezi konum kararlılığı sergilemektedir. Oluklu horn antenin faz merkezi hareketi, çalışma frekans bandında dikkate alınmaktadır. Halka kostik faz merkezi konumunun hareketi, DADRA için neredeyse ihmal edilebilir düzeyde faz hatası kaybı ile sonuçlanmaktadır. Şekil 4.11’de oluklu horn anten tarafından beslenen parabolik reflektör ile ADE beslemeli parabolik reflektör sistemi faz hatası kaybı ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, DADRA sisteminin halka kostik faz merkezi pozisyon stabilitesindeki üstünlüğünü de göstermektedir.

5

LENS ANTEN BESLEMELİ REFLEKTÖR ANTEN TASARIMI

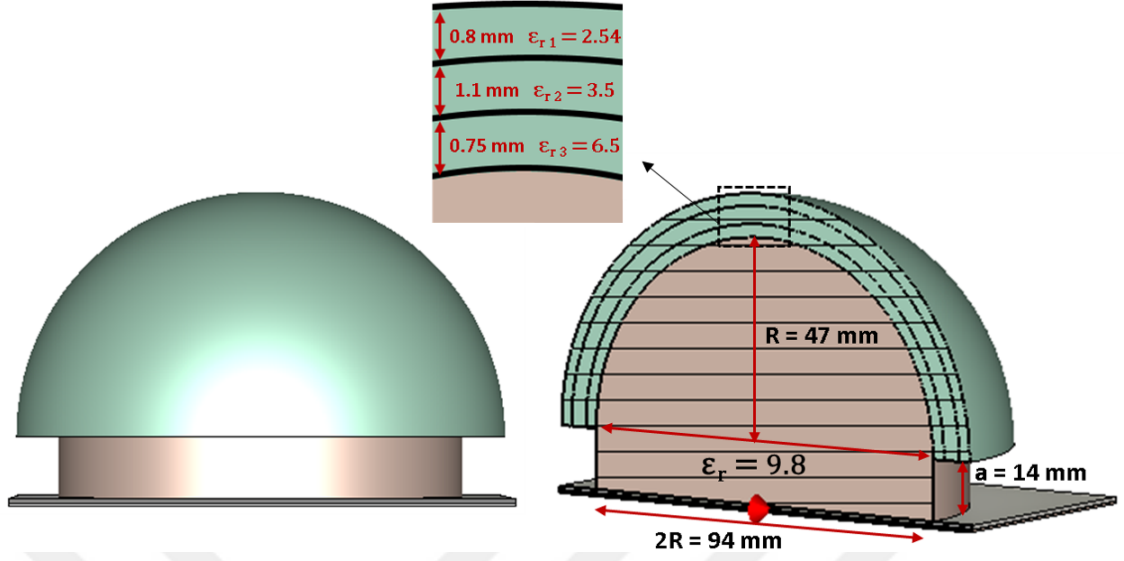
Antenler her türlü kablosuz haberleşme sisteminde hayati öneme sahiptir. Özellikle yakın alan haberleşmesi, uydu haberleşmesi ve otomotiv güvenlik (radar yardımı ile sürücü desteği) gibi uygulamaların hızlı gelişimi çok geniş bantlı, çoklu huzmeli ışıma yapabilen, yüksek yönlendiriciliğe sahip anten geometrilerinin tasarımını gerekli kılmıştır [45]. Alternatif çözüm ise odaklayıcı bir lensi bir kaynak ile odağından beslemektir. Bu yöntem farklı lens tiplerinin ve besleme antenlerinin varlığı sebebiyle kablosuz haberleşme antenleri için esnek çözümler sağlar. Lens antenler, imalat kolaylığı ve ışıma performansı ile kablosuz haberleşme sistemlerinde başarıyla kullanılan anten tiplerinden biridir [61]. Farklı lens anten çeşitleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



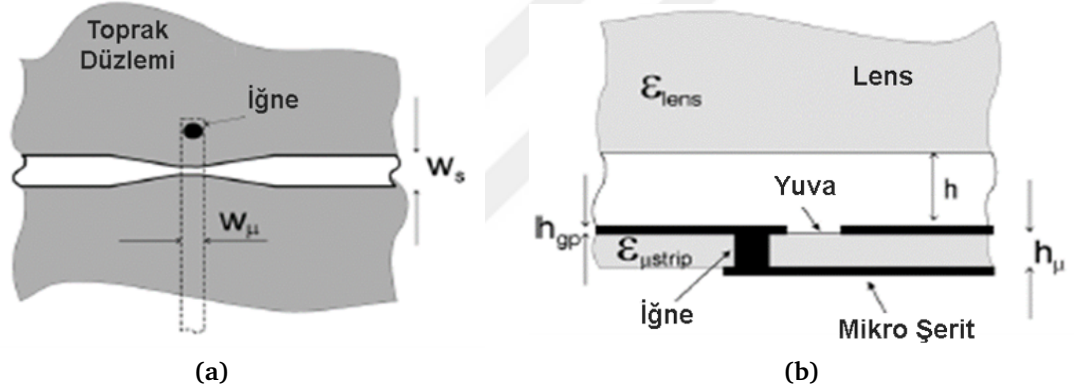
Şekil 5.1 Lens Anten Çeşitleri [62–65]

[66]’da tasarlanmış ve reflektör beslemesi olarak kullanılan lens antene ait 3B lens anten görüntüleri Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Lens anten yapılarında, farklı ortamlar arasındaki dielektrik sabiti farkı ne kadar yüksek ise dalganın geçişi sırasındaki yansıma miktarı da o kadar yüksek olacaktır. Farklı ortamlar arasındaki geçişlerde yaşanan yansımaları azaltmak amacıyla uydurma katmanları kullanılır. Özellikle yüksek dielektrik sabitine sahip malzemelerden hava ortamına geçiş esnasında (ya da tersi) uydurma katmanı gereklidir [61]. Şekil 5.2’de yüksek dielektrik sabitine sahip yarıküresel lensin uydurma katmanları ($\epsilon_{r1} = 6.5, \epsilon_{r2} = 3.5, \epsilon_{r3} = 2.54$) gösterilmektedir. Geri dönüş kaybı grafiği ise Şekil 5.4’te gösterilmektedir. Geri dönüş

kayıb grafiğinden de görüldüğü gibi anten 4 – 12 GHz frekans aralığında çalışmaktadır.



Şekil 5.2 Lens antene ait 3B tasarım görüntüleri



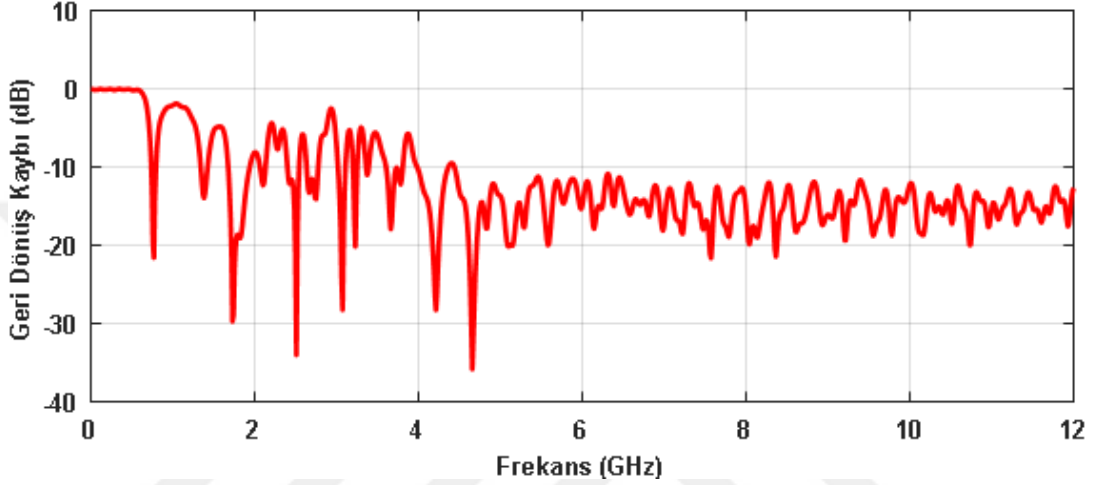
Şekil 5.3 Dairesel simetrik lens anten beslemesi (a) üstten görünüm (b) yandan görünüm [67]

Tablo 5.1 Dairesel simetrik lens anten beslemesi tasarım parametreleri [67]

Parametre	Değer
w_s	0.5 mm
l_{slot}	24 mm
D	25 mm
h_{gp}	35 μ m
h	250 μ m
h_μ	127 μ m
w_μ	200 μ m
ϵ_{lens}	10
$\epsilon_{\mu strip}$	3

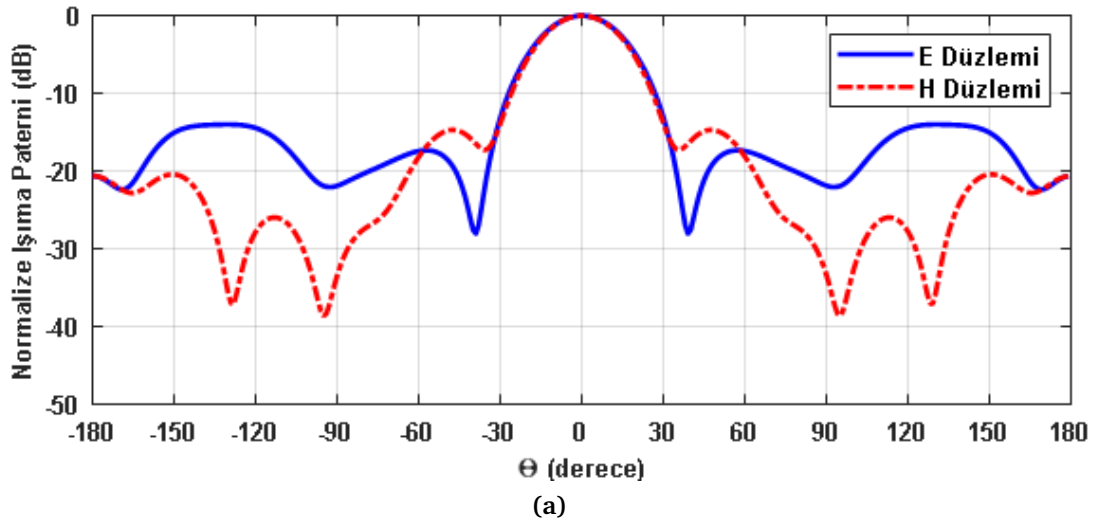
Lens antenin besleme yapısına ait tasarım parametreleri Şekil 5.3'te gösterilmektedir [67]. Metalik kalın plakanın altına ince, ϵ_r dielektrik sabitine

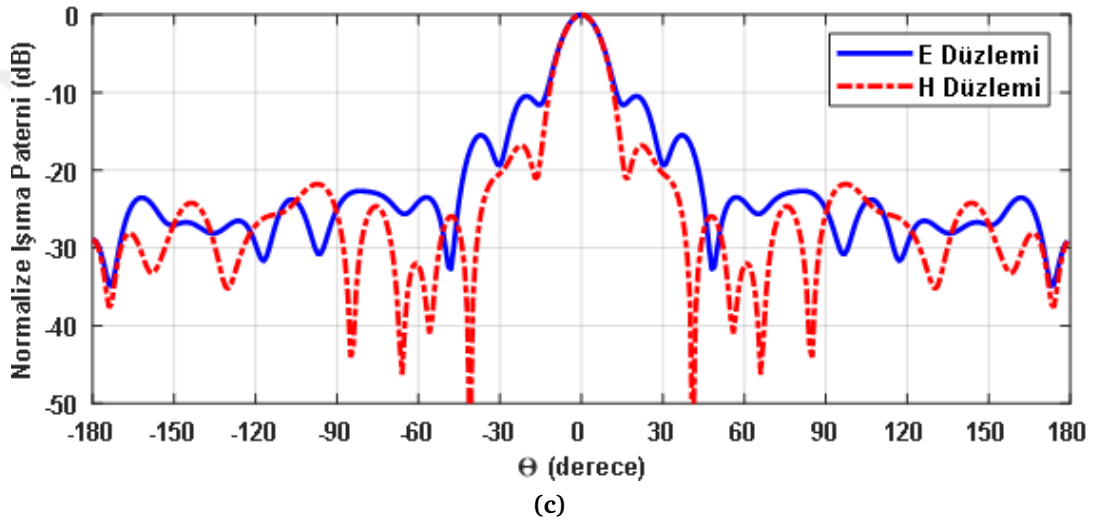
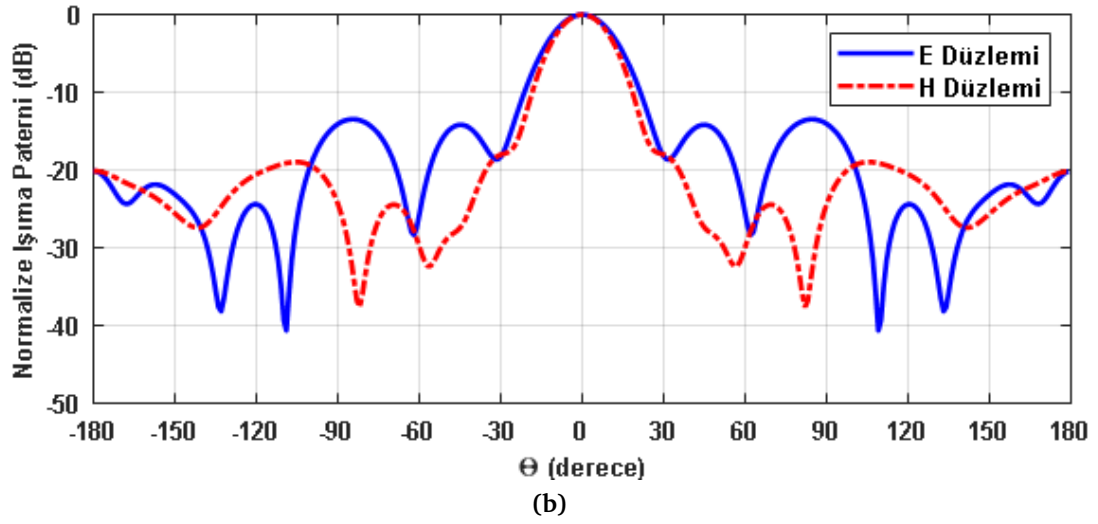
sahip tabakadan oluşan bir baskılı devre kartı yapıştırılmıştır. Metal tutma bloğu, yuvanın düzlemini lensin altından h mesafede tutmaktadır. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi dikey metalik bir pim aracılığıyla yuvanın düzlemine kısa devre yapan bir mikro şerit hattı yuvayı besler. Mikro şerit genişliği w_μ , 80 karakteristik empedansa karşılık gelmektedir. Yuva genişliğinin sabit olmamakla birlikte, mikro şerit geçişine karşılık olarak yaklaşık $100 \mu\text{m}$ 'ye kadar incelmektedir. Bu durum, lokalize reaktif enerjiyi en aza indirmekte ve eşleştirmeyi önemli ölçüde iyileştirmektedir. Tablo 5.1'de geniş bantlı lensin tasarım parametreleri verilmektedir [67].



Şekil 5.4 Lens antenden geri dönüş kaybı grafiği

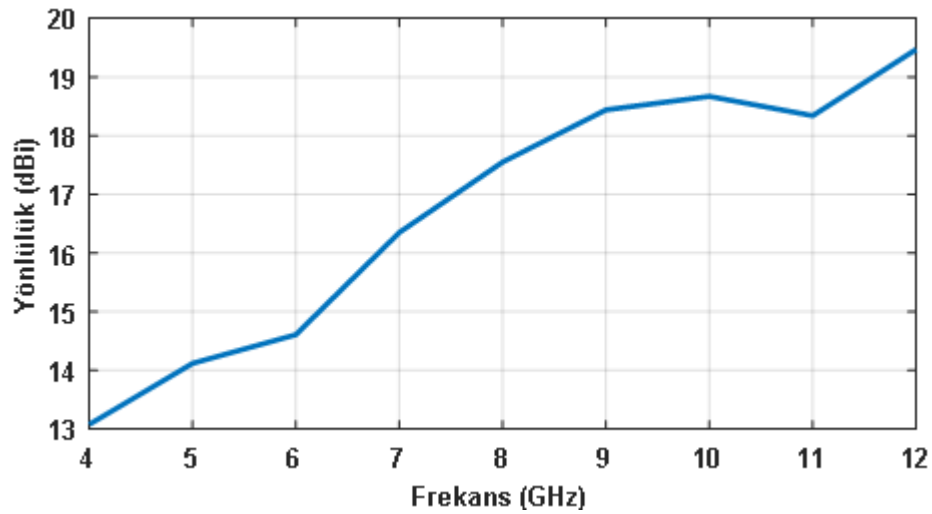
Lens antene ait 4, 7 ve 12 GHz, E - H düzlemi normalize ışıma paternleri Şekil 5.5'te gösterilmektedir. 4 GHz'deki ışıma örüntüsünün 10 dB huzme genişliği, E düzleminde ve H düzleminde $\pm 26^\circ$ 'dir. 7 ve 12 GHz frekanslarında ise huzme genişliği değerleri sırasıyla E düzleminde $\pm 21^\circ$ ve $\pm 12^\circ$; H düzleminde $\pm 18^\circ$ ve $\pm 12^\circ$ 'dir.





Şekil 5.5 Lens antene ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz

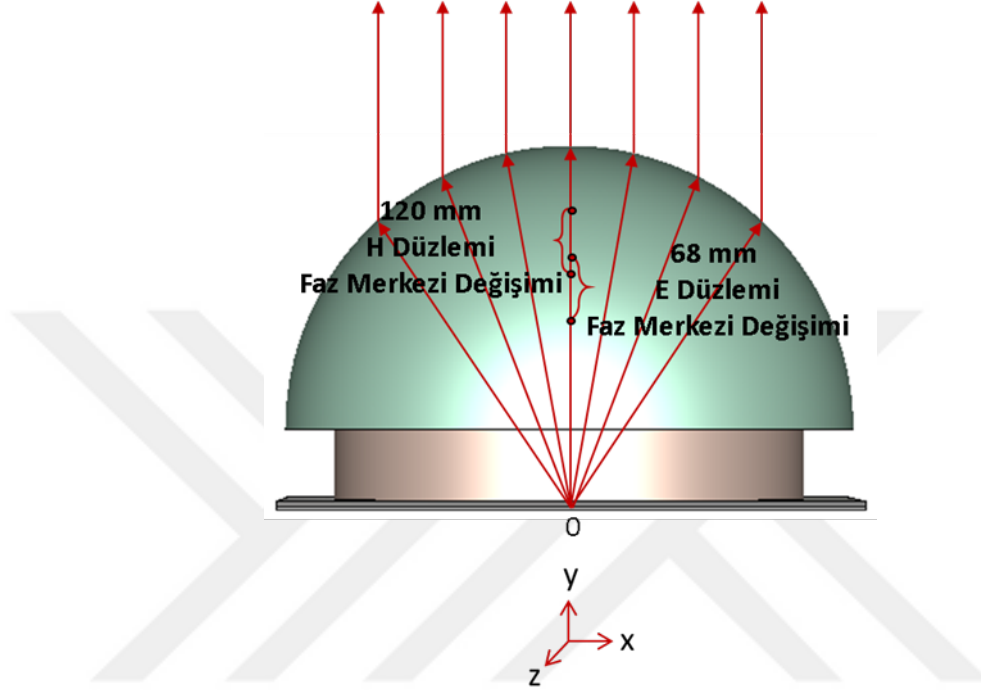
Lens antene ait yönlülüğün frekansla değişimi Şekil 5.6’da gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Lens antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi

5.1 Lens Antenin Faz Merkezi

Besleme antenin faz merkezi ile odak noktası çakıştırıldığında reflektör anten en yüksek kazancı vermektedir. Bu sebeple tasarım yapılırken besleme anteninin faz merkezi ile yansıtıcı antenin odağı aynı noktaya gelecek şekilde konumlandırılmalıdır. Şekil 5.7’de lens antenin faz merkezi değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Lens antenin faz merkezi değişimi

Lens antenin E ve H düzlemi frekansa bağlı faz merkezi noktaları Tablo 5.2’de görülmektedir.

Tablo 5.2 Lens anten frekansa bağlı faz merkezi değişimi

Frekans	E Düzlemi Faz Merkezi (mm)	H Düzlemi Faz Merkezi (mm)
4	78	50
5	50	60
6	60	40
7*	70	110
8	50	150
9	10	100
10	15	95
11	50	105
12	55	160

5.1.1 Lens Antenin Faz Hatası Kaybı

2.4 kullanılarak lens antenin eksenel odaklanamamaya bağlı E ve H düzlemi faz kayıpları Tablo 5.3 ve 5.4'te gösterilmektedir. Formül E düzlemi 7 GHz referans faz merkezi konumuna göre diğer frekans değerlerinin faz merkezi mesafesi hesaplanarak kullanılmaktadır.

Tablo 5.3 Lens Antenin E Düzlemi $\phi = 0^\circ$ Faz Bozulması

Frekans	Faz Merkezi	PEL	PEL (dB)
4	78	0.9999	-0.0056
5	50	0.9943	-0.0248
6	60	0.9974	-0.0113
7*	70	1	0
8	50	0.9942	-0.0253
9	10	0.9623	-0.1669
10	15	0.9631	-0.1633
11	50	0.9942	-0.0253
12	55	0.9959	-0.0179

Tablo 5.3'ten görüldüğü üzere E düzleminde en yüksek faz merkezi kayması referans 7 GHz değerine göre 6 cm olmaktadır. Faz merkezindeki bu düşük kayma miktarı yüksek miktarda faz kaybına sebebiyet vermemektedir.

Tablo 5.4 Lens Antenin H Düzlemi $\phi = 90^\circ$ Faz Bozulması

Frekans	Faz Merkezi	PEL	PEL (dB)
4	50	0.9921	-0.0343
5	60	0.9927	-0.0318
6	40	0.9551	-0.1995
7*	110	1	0
8	150	0.9967	-0.0144
9	100	0.9990	-0.0046
10	95	0.9971	-0.0124
11	105	0.9996	-0.0017
12	160	0.9920	-0.0349

Lens antenin astigmatizme bağlı olarak oluşturduğu faz hatası kayıpları Tablo 5.5'te gösterilmektedir. Antenin faz merkezinde yer değiştirmenin çok farklı olmamasından dolayı eksenel odaklanamama ve astigmatizm kaynaklı faz hatası kaybı düşüktür.

Tablo 5.5 Lens Antenin Astigmatizme Bağlı Faz Bozulması

Frekans	E Düzlemi Faz Merkezi (mm)	H Düzlemi Faz Merkezi (mm)	PEL	PEL (dB)
4	78	50	0.9984	-0.0069
5	50	60	0.9997	-0.0014
6	60	40	0.9886	-0.0497
7	70	110	0.9897	-0.0449
8	50	150	0.9177	-0.3729
9	10	100	0.9193	-0.3655
10	15	95	0.9212	-0.3566
11	50	105	0.9535	-0.2070
12	55	160	0.8145	-0.8912

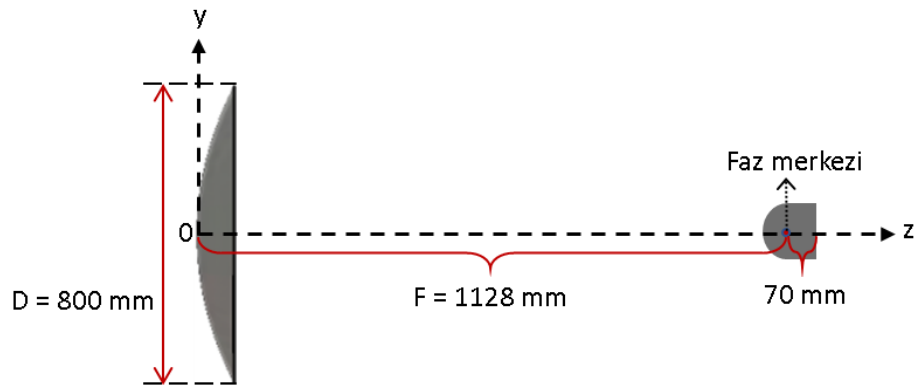
Lens antenin faz merkezinin frekans ve E-H düzlemine bağlı olarak konumunda yüksek bir değişim bulunmamaktadır. Bu sebeple simetrik ışıma örüntüsüne sahip bu lens anten tasarımında eksenal odaklanamama ve astigmatizme bağlı faz hatası kaybı düşüktür.

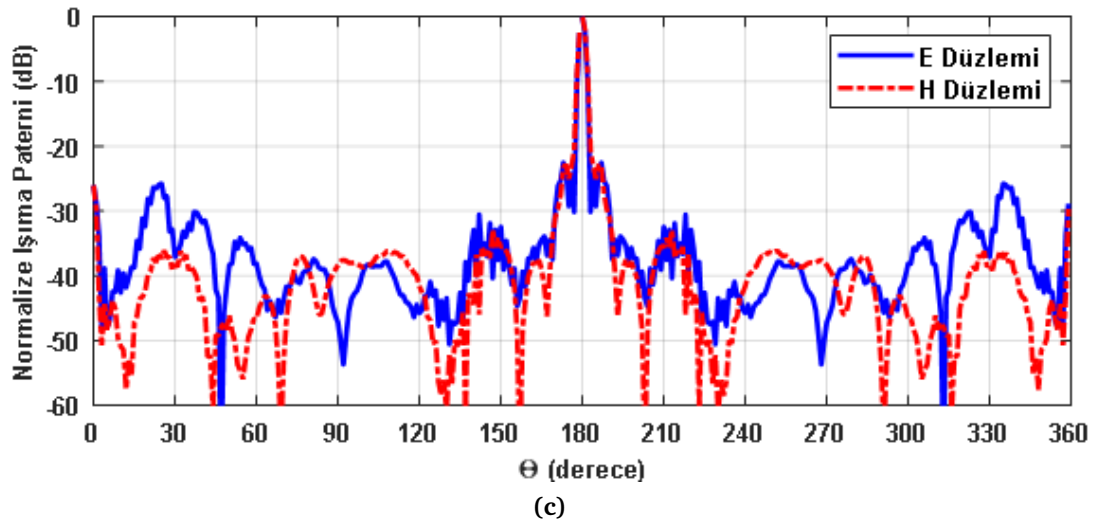
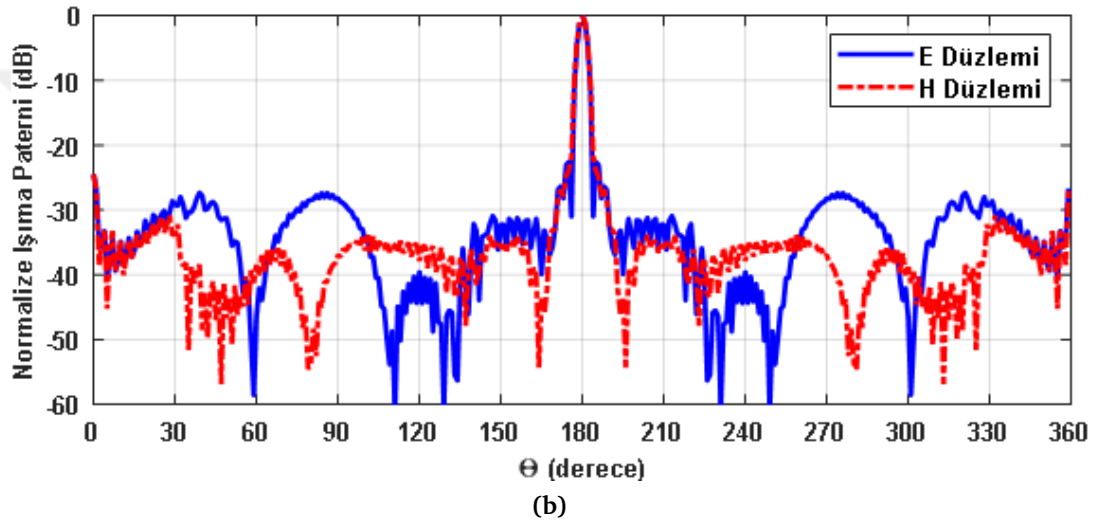
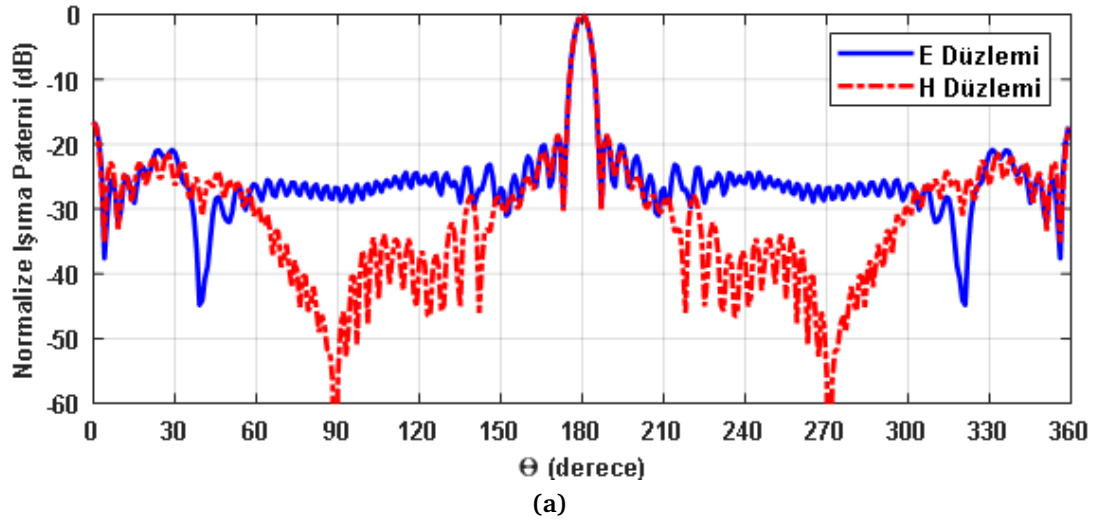
5.1.2 Lens Anten Beslemeli Reflektör Anten Tasarımı

Parabolik yansıtıcı anten tasarımı yapmak için öncelikli olarak besleme antenin E ve H düzlemleri ışıma örüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Lens antenin 7 GHz'de $\phi = 0^\circ$ 'de 10 dB huzme genişliği $\pm 20^\circ$ 'dir. 7 GHz frekansındaki $\pm 20^\circ$ huzme genişliğine göre 2.1'e yerleştirildiğinde F/D oranı 1.41 olarak bulunmuştur.

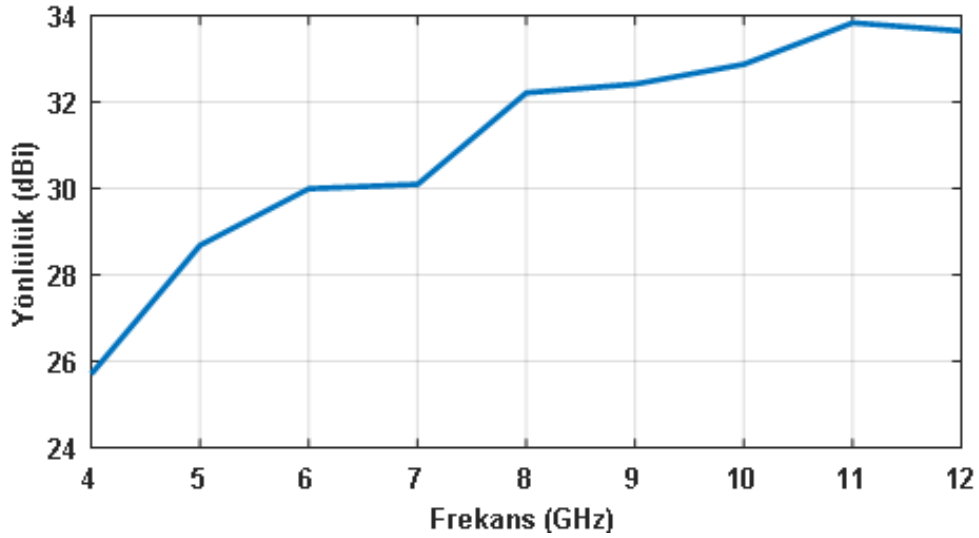
D=800 mm kabul edilerek F=1128 mm olarak bulunmuş ve çalışmanın ilerleyen safhalarında D=800 mm uzunluğu referans değer olarak kabul edilmiştir. Lens anten beslemeli reflektör tasarımına ait tasarım modeli ve 4, 7, 12 GHz E-H düzlemi normalize ışıma paternleri Şekil 5.8 ve 5.9'da gösterilmektedir.

**Şekil 5.8** F/D=1.41 lens anten beslemeli reflektör anten tasarım modeli



Şekil 5.9 $F/D=1.41$ lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışım paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz

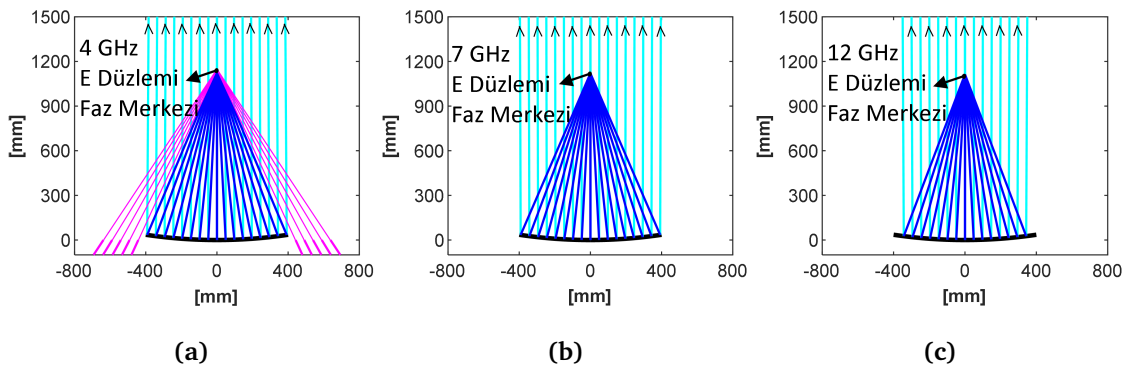
Lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekansa göre değişimi grafiği Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10 Lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi

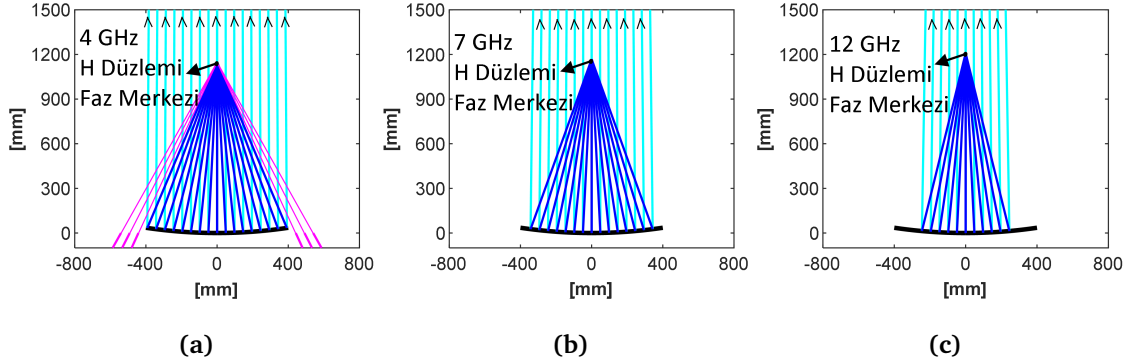
5.2 Lens Anten Beslemeli Reflektör Anten Tasarımı Işın Takibi

Bu tasarımda $F/D = 1.41$ lens anten beslemeli reflektör antenin $\phi = 0^\circ$ 'de 4, 7 ve 12 GHz frekanslarında ışın takibi yapılmıştır. $F/D = 1.41$ lens anten beslemeli reflektör anten için ışın takibi sonuçları Şekil 5.11'de gösterilmektedir. 7 GHz referans frekans E düzlemi faz merkezi (70 mm) ile reflektörün odağı (1128 mm) çakıştırılmıştır. Bu sebeple Şekil 5.11 (b)'de görüldüğü gibi ışınlar reflektörden yansıdıktan sonra paralel ilerlemektedir. 4 GHz frekansında referans noktasına göre faz merkezi konumu odağın 8 mm gerisine düşmekte ve lens antenin huzme genişliği referans 7 GHz frekansına göre 5° artmaktadır. Bu sebeple reflektör tüm ışınları karşılayamamakta ve Şekil 5.11 (a)'da görüldüğü gibi bu frekansta taşma sorunu oluşmaktadır. 12 GHz frekansında ise lens antenin huzme genişliği 14° azalmakta fakat faz merkezi konumu reflektöre yaklaşmaktadır. Bu sebeple Şekil 5.11 (c)'de görüldüğü gibi reflektör kaynaktan gelen ışınların tamamı aydınlatılamamaktadır.



Şekil 5.11 Gelen ve yansıyan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz

Şekil 5.12’de lens anten beslemeli reflektör antenin 7 GHz E düzlemi referans noktasına göre H düzlemi 4, 7 ve 12 GHz faz merkezleri konumlandırılmıştır.



Şekil 5.12 Gelen ve yansıyan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz

Şekil 5.12 (a)’da görüldüğü üzere lens anten beslemeli reflektör sisteminin H düzlemi 4 GHz frekansında taşma gözlemlenmektedir. Bu taşmanın sebebi 4 GHz frekansında 26° ile referans 7 GHz huzme genişliğinden 5° yüksek olan huzme genişliğinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.12 (b) ve (c)’de reflektörün kaynak tarafından tamamen aydınlatılamadığı görülebilmektedir. Bu durumun sebebi 7 ve 12 GHz frekanslarında H düzlemi huzme genişliğinin düşüşüdür. Şekil 5.12 (b)’nin Şekil 5.12 (c)’ye göre daha fazla aydınlatılması ise faz merkezinin odağa daha yakın konumlandırılması ile açıklanabilmektedir.

5.3 Işıma Karakteristiğinin Analitik Analizi

Bu bölümde daha önce ikinci bölümde horn anten beslemeli reflektör anten sistemindeki gibi skaler kırınım yaklaşımı lens antenler için de uygulanmıştır. İki düzlemde simetrik yapıya sahip lens anten beslemeli reflektör ışıması da, düzlem üzerinde bir dairesel açıklık ışıma dağılımı olarak temsil edilmektedir.

Şekil 3.15’te verilen dairesel açıklık düzlemi F/D oranı 1.41 olan reflektör için $E_a(\rho, \phi)$ elektrik alan dağılımı ile aydınlatılır. Skaler kırınım yaklaşımı göz önüne alındığında, reflektör açıklığı tarafından yayılan elektrik alan 3.5 eşitliği ile gösterilebilir.

Şekil 3.15’te verilen açıklık, reflektörün diferansiyel açıklık yüzeyi silindirik koordinat sisteminde F/D=1.41 oranı için $ds = \rho d\rho d\phi'$ olarak ifade edilir. Form faktörünü hesaplamak için 3.6 eşitliği kullanılır.

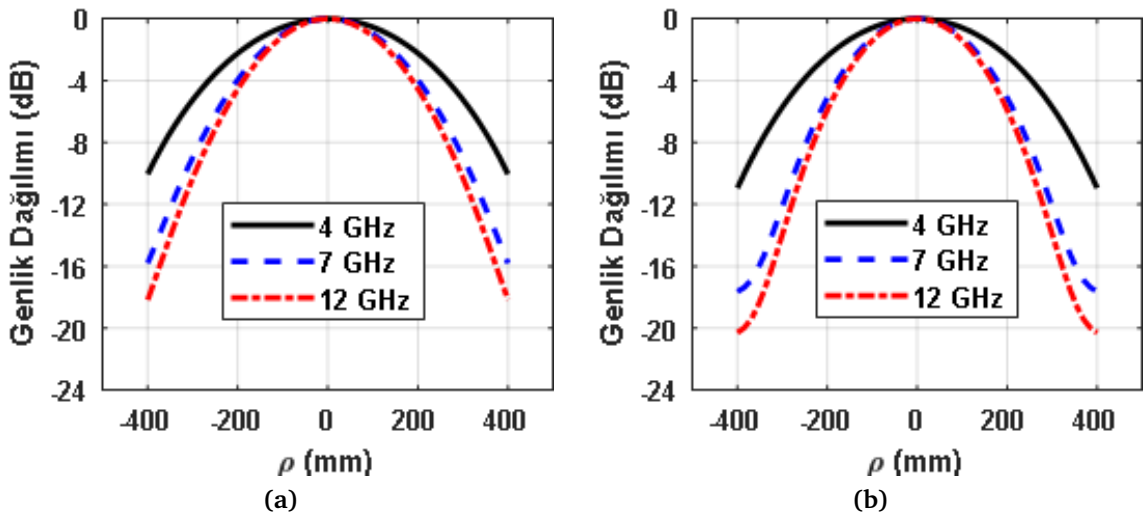
Reflektör yüzeyi üzerindeki genlik azalması çalışma frekans bandında sabit değildir. Açıklık üzerindeki genlik dağılımı, Şekil 5.6 (b)’de gösterildiği gibi 4 GHz’de düzlem

ışımada -10 dB'ye eşitken 12 GHz'e kadar frekanslarda daha yüksek genlik dağılımı değerleri görülür. Ayrıca, genlik dağılımı değeri, Şekil 5.6 (c)'de verildiği gibi 12 GHz'de -10 dB'den düşüktür. Benzer bir şekilde genlik dağılımı Şekil 5.13'te gösterildiği gibi en yüksek çalışma frekansına kadar -10 dB'den daha yüksektir. Bu kenar daralma karakteristiklerinin bir sonucu olarak, tüm çalışma frekansları için geçerli olan reflektör açıklığı üzerinde sabit bir genlik dağılım fonksiyonu belirlemek mümkün değildir. Dolayısıyla, E düzlemindeki genlik dağılımları 3.8'deki kosinüs fonksiyonu ile karakterize edilir.

3.8'de belirtilen a_f , ilgili frekansta E düzlem genlik dağılımını belirten katsayıdır. 4 GHz frekansında a_f , Şekil 5.6(a)'da verilen besleme anteninin E-düzlemi ışıma örüntüsü dikkate alınarak 1.19, 7 GHz'de 1.25 ve 12 GHz olarak 1.25 olarak belirlenmiştir.

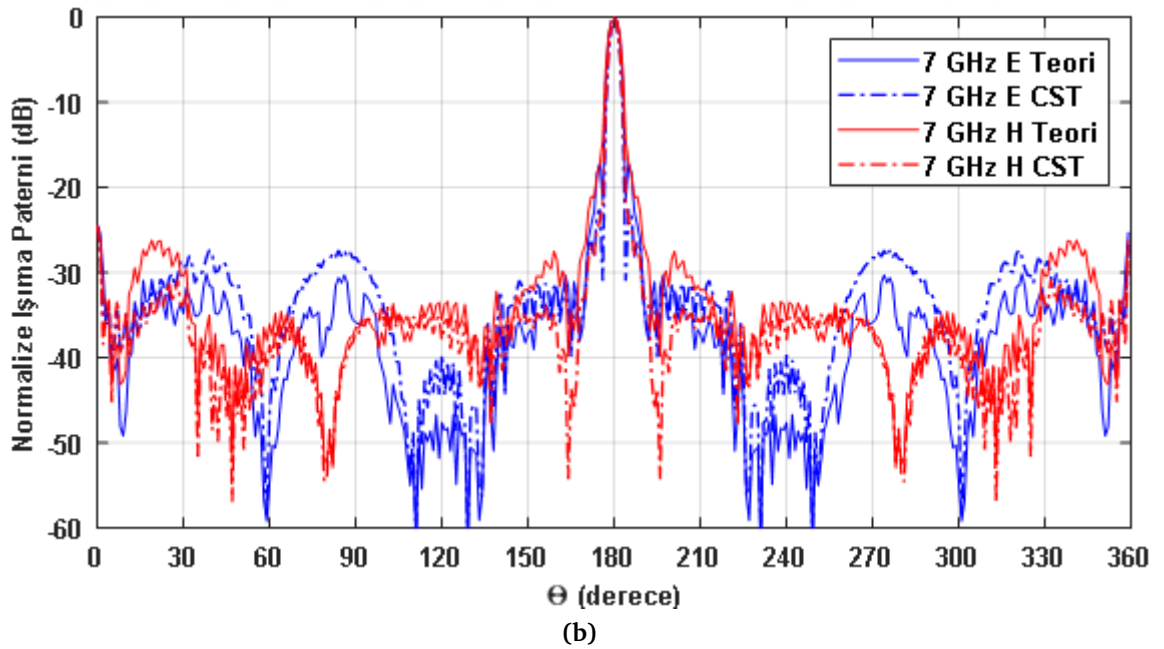
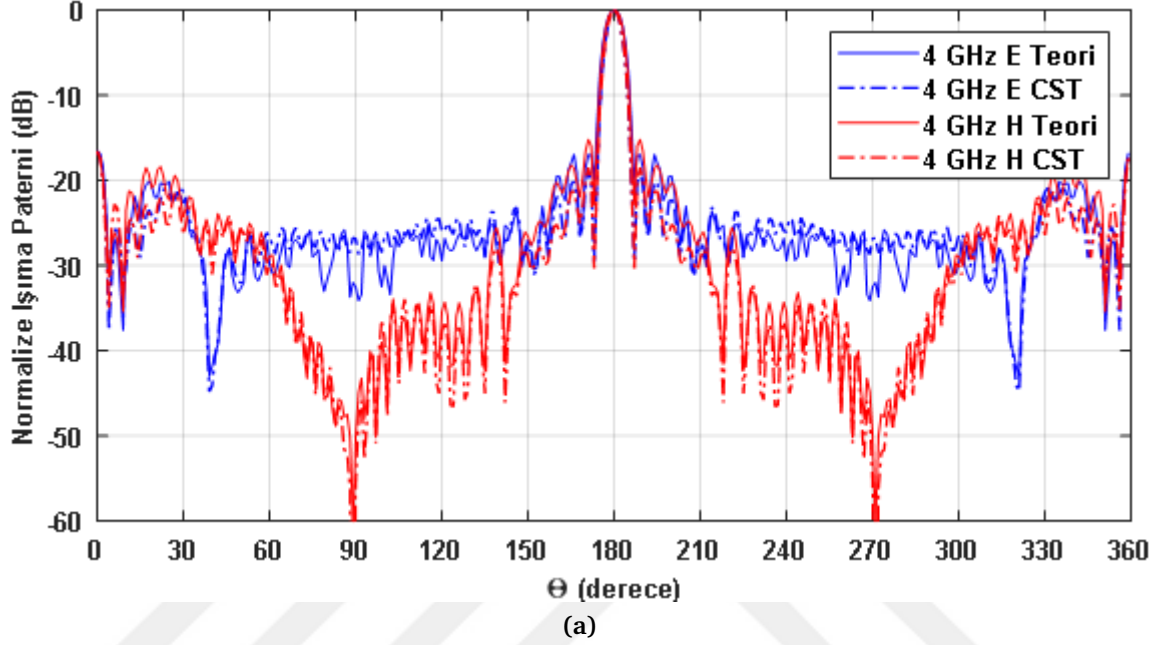
H düzlemi genlik dağılımını belirten katsayı 4 GHz frekansında Şekil 5.6 (a)'da verilen besleme anteninin H düzlemi ışıma örüntüsü dikkate alınarak 1.02, 5.8 GHz'de 1.2 ve 7 GHz için 1.2 olarak belirlenmiştir. Lens antenin horn anten gibi E ve H düzleminde dairesel simetrik ışıma örüntüsüne sahip olması nedeniyle H düzleminde de aynı formül ve katsayılar uygulanmıştır.

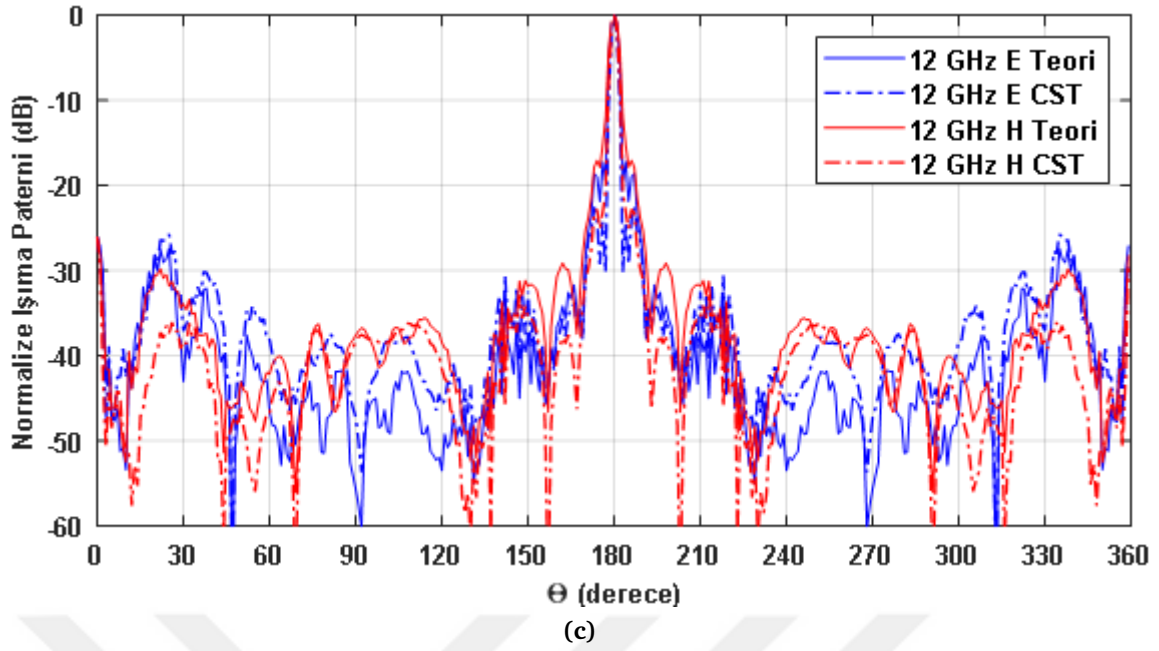
Her iki düzlemde de reflektör açıklığı üzerindeki genlik dağılımları 3.8 kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 5.13'te gösterilmiştir. ρ değeri sıfıra eşit olduğunda, ışıma yoğunluğunun açıklık düzleminin ortasında maksimum değerine ulaştığı Şekil 5.13'te görülmektedir. -10 dB, -16 dB ve -16 dB kenar azalma değerleri, Şekil 5.13 (a)'da gösterildiği gibi oluşturulur. H düzlemi genlik dağılımı ise Şekil 5.13 (b)'de gösterilmektedir.



Şekil 5.13 Yansıtıcı yapı açıklığı üzerindeki genlik dağılımı; (a) E düzlem, (b) H düzlem

Yayılan dalganın güç yoğunluğu $S(r, \theta, \phi) = |\tilde{h}(\theta, \phi)|^2 / 2\eta_0 \lambda^2 r^2$ şeklinde gösterilir. Böylece, nihai yansıtıcı antenin normalize edilmiş radyasyon yoğunluğu, 3.8’de verilen form faktörü işlevlerinin genliğini kullanarak her iki düzlemde de elde edilir. Bu şekilde her iki düzlemde lens anten ile beslenen reflektör yapısının normalize ışıma paternleri elde edilir. Teorik olarak elde edilen normalize ışıma paternleri, Şekil 5.14’te CST simülasyon sonuçları ile birlikte verilmektedir.



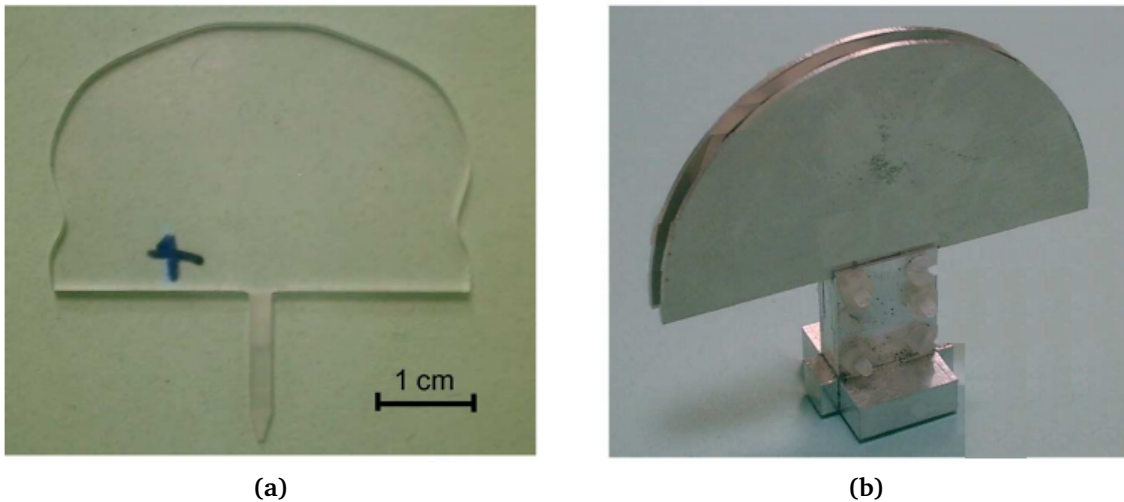


Şekil 5.14 Nihai tasarımın E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz.

CST simülasyonları kullanılarak elde edilen yan lob seviyeleri, teorik sonuçlara kıyasla biraz daha yüksek olmakla beraber yine de her iki düzlemde de -18 dB'den düşüktür. 7 ve 9 GHz frekansında elde edilen ve Şekil 5.14 (b) ve (c)'de gösterilen normalize ışıma örüntüleri için de benzer yorumlar yapılabilir. Her iki düzlemdeki yan lob seviyeleri, Şekil 5.14'te görüldüğü gibi -24 dB'den düşüktür. Şekil 5.14'te verilen ışıma örüntüleri göz önüne alındığında, skaler kırınım yaklaşımı ile elde edilen reflektör sistemi ışıma özelliklerinin her iki düzlemde de CST simülasyon sonuçları ile uyum içinde olduğu söylenebilir.

DÜZLEMSEL DİELEKTRİK LENS ANTEN BESLEMELİ REFLEKTÖR ANTEN TASARIMI

Düzlemsel lens antenler bir önceki bölümde anlatılan dairesel simetrik yapıdaki lens antenlerden farklı fiziksel özelliklere sahiptirler. İki düzlemde simetrik olmayan fiziksel yapıları nedeniyle düzlemsel lens antenlerin ışıma örüntüleri de E ve H düzlemlerinde birbirinden çok farklıdır. Düzlemsel lens antenin E düzlemi faz merkezi lens yapısının üzerinde bulunmaktadır. E düzleminde frekans değişimine bağlı faz merkezi konumu değişimi yüksek değildir. H düzlemi faz merkezi ise lens antenin fiziksel yapısının gerisinde kalmaktadır. H düzleminde frekans değişimi ile faz merkezi konumu çok fazla yer değiştirmektedir. Yapılan literatür çalışmasında E ve H düzlemi ışıma paternleri simetrik olmayan antenlerin parabolik lens anten beslemesi olarak daha önce kullanılmadığı saptanmıştır. Şekil 6.1’de çeşitli düzlemsel lens anten yapıları gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Lens Anten Çeşitleri [68]

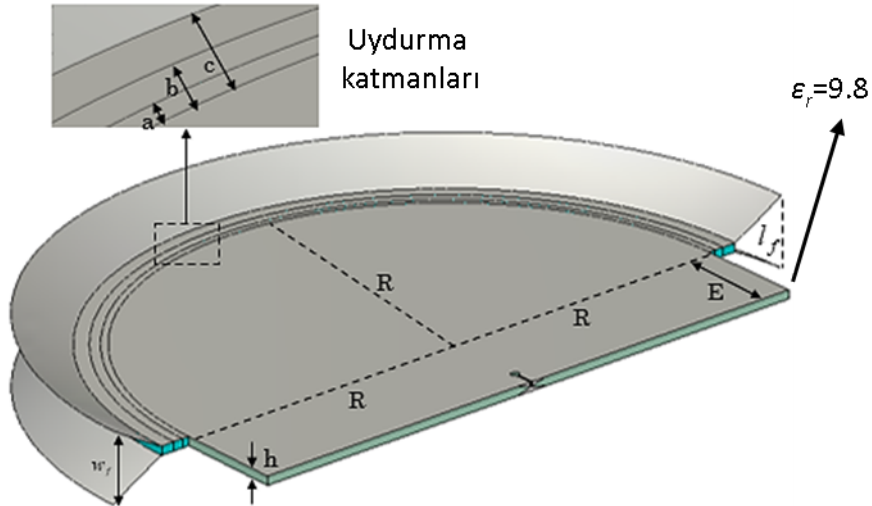
Şekil 6.2’de gösterilen düzlemsel lens anten yapısı, TEM dalga yayılımını destekleyen bir dielektrik paralel plakalı dalga kılavuzundan (PPW) oluşmaktadır. PPW’de yayılan silindirik dalga cephesini düzlemsel bir dalga cephesine dönüştürmek için yapı, eliptik

bir düzlemsel mercek haline getirilmiştir. PPW yarı dairesel bir parçaya sahiptir, yarıçapı $R=162.5$ mm'dir ve eliptik profili oluşturmak için, ayrıca dikdörtgen bir uzatma parçası da yarı dairesel parçanın sonuna $E=0.35R$ eklenerek eliptik bir yapı oluşturulmuştur. Yüksek dielektrik malzeme olan Rogers TMM10i ($\epsilon_r = 9.8$), gücün çoğunu dielektriğe aktarabilmek için dielektrik lens çekirdeği olarak seçilmiştir [69].

Mercek çekirdeği ve hava arasındaki dielektrik kontrast nedeniyle dielektrik-hava ara yüzünde önemli miktarda dahili yansıma meydana gelmektedir [41, 42]. Dahili yansımalar hem geri dönüş kaybını hem de antenin kazancını bozmaktadır. Bu sebeple, iç yansımaları azaltmak ve sonuç olarak geniş bant empedans uyumuna ulaşmak için üç eşleşen katman; eliptik yapının açık ucuna sırasıyla Rogers TMM6 ($\epsilon_r = 6.3$) $a = 3.57$ mm, TMM4 ($\epsilon_r = 4.7$) $b = 5.3$ mm ve Rexolite ($\epsilon_r = 2.54$) $c=7.59$ mm kalınlığında eklenmiştir. Ayrıca, havaya geçişi kolaylaştırmak için, eşleşen katmanlardan sonra kısa bir metalik açıklık (flaring) eklenir. Prototip antenin ölçülen yansıma katsayısı, tüm 4-12 GHz frekans bandında neredeyse -9.5 dB'den daha düşüktür. Yanal dalga uyarımı ve antenin radyasyon mekanizması [69]'da derinlemesine araştırılmıştır.

Yapılan literatür çalışması sonucunda katmanlı düzlemsel lens anten yapısı oluşturulmuştur [69]. Bu yapı CST simülasyon programında da koşturulmuş geri dönüş kaybı, kazanç vb. grafikleri elde edilmiştir.

Düzlemsel lens antene ait tasarım parametreleri Şekil 6.2, Tablo 6.1 ve 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Düzlemsel dielektrik lens anten

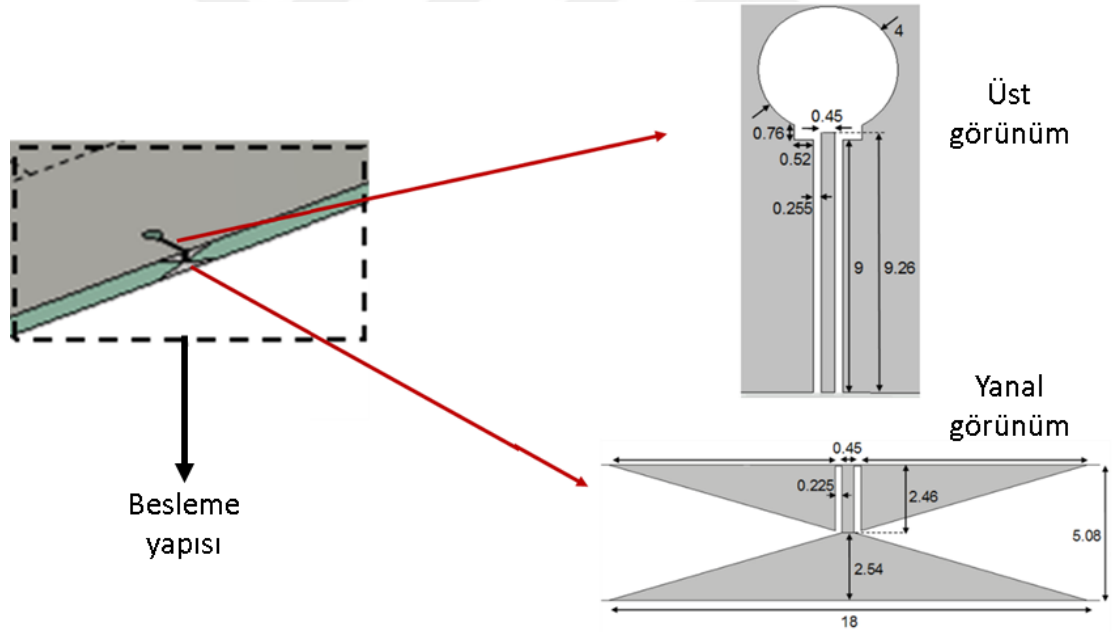
Tablo 6.1 Düzlemsel dielektrik lens anten tasarım parametre değerleri

R	162.5 mm
E	0.35*R
h	5 mm
a	3.57 mm
b	5.3 mm
c	7.59 mm
l_f	55 mm
w_f	40 mm

Tablo 6.2 Düzlemsel dielektrik lens anten uydurma katmanı parametre değerleri

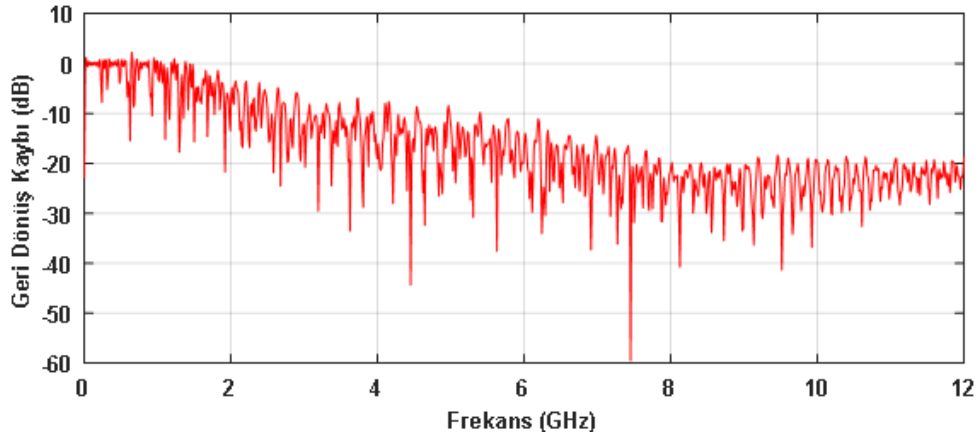
Birinci Uydurma Katmanı	6.3
İkinci Uydurma Katmanı	4.7
Üçüncü Uydurma Katmanı	2.54

Düzlemsel lense ait besleme yapısı ve tasarım parametreleri Şekil 6.3'te gösterilmektedir.



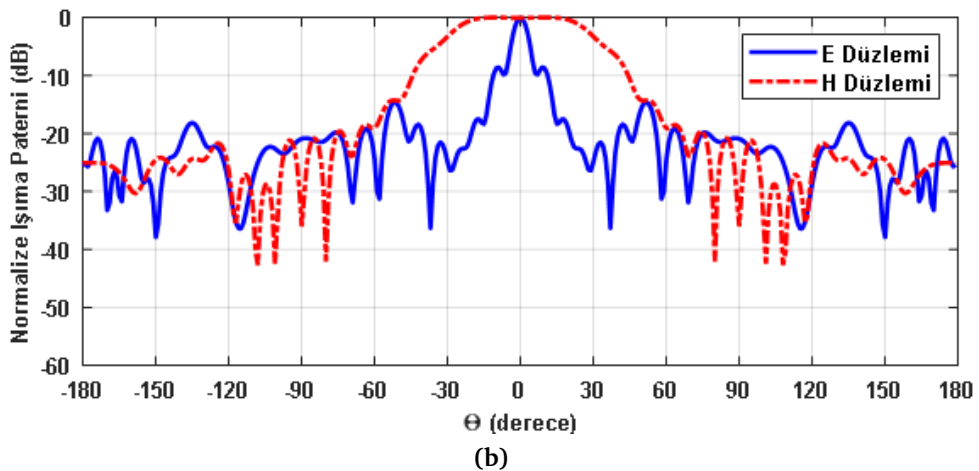
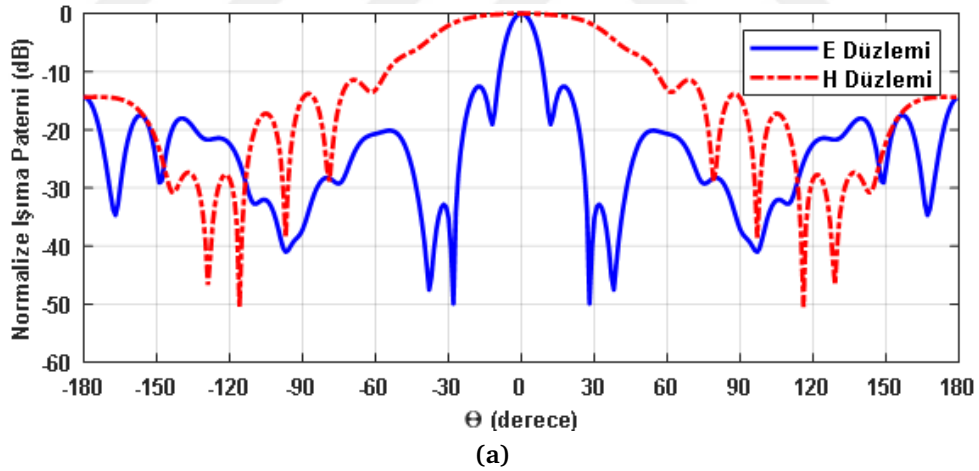
Şekil 6.3 Düzlemsel dielektrik lens anten tasarım parametreleri (mm)

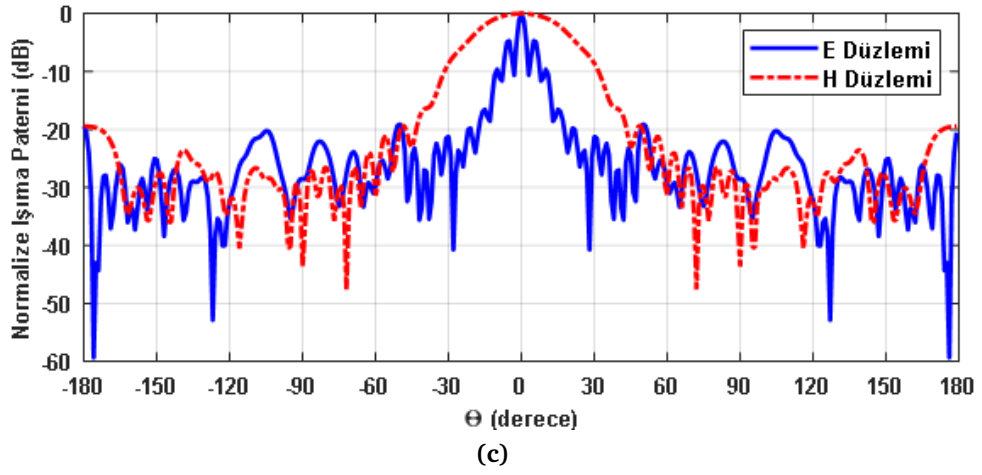
Düzlemsel lens antenin geri dönüş kaybı Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Grafikten de görüldüğü üzere düzlemsel lens anten 4 – 12 GHz frekans bandında çalışmaktadır.



Şekil 6.4 Düzlemsel dielektrik lens anten geri dönüş kaybı grafiği

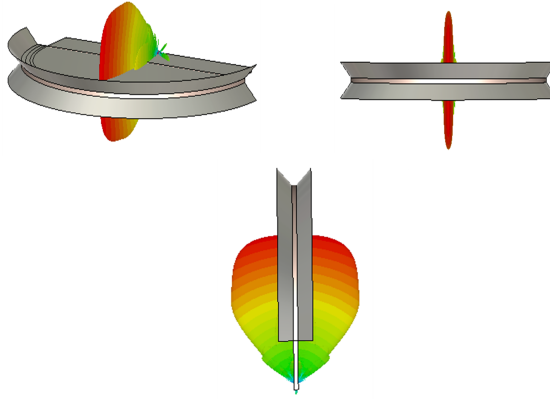
Düzlemsel lens antene ait 4, 7 ve 12 GHz, normalize ışınım paternleri hem E hem de H düzlemlerinde Şekil 6.5'te gösterilmektedir. 4 GHz'deki ışınım örüntüsünün 10 dB huzme genişliği, E düzleminde $\pm 55^\circ$, H düzleminde $\pm 13^\circ$ 'dir. 7 ve 12 GHz frekanslarında ise huzme genişliği değerleri sırasıyla E düzleminde $\pm 40^\circ$ ve $\pm 32^\circ$; H düzleminde $\pm 5^\circ$ ve $\pm 3^\circ$ 'dir. Bu değerler [69]'da sunulan ölçüm sonuçları ile uyum içindedir. Düzlemsel lens anten frekans artışıyla her iki düzlemde daha dar ve daha yönlendirici ışınım örüntüleri sergilemektedir.





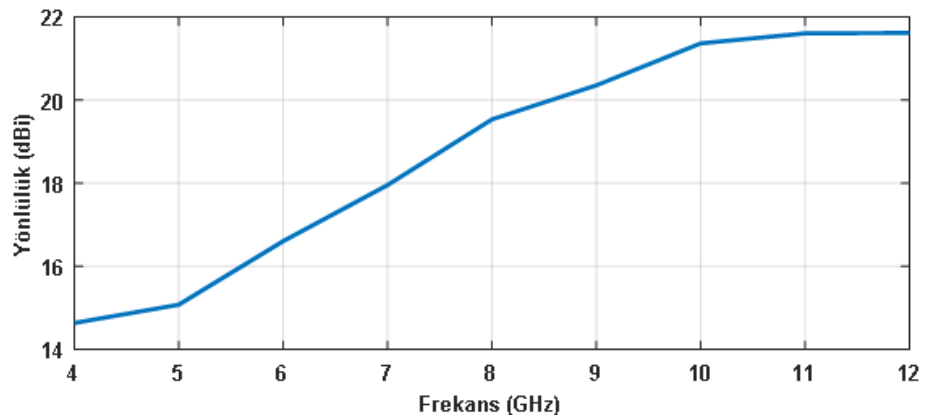
Şekil 6.5 Düzlemsel lens antene ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz

Düzlemsel lens antenin 7 GHz üç boyutlu ışıma örüntüsü Şekil 6.6’da gösterilmektedir.



Şekil 6.6 Düzlemsel lens antene ait 3 boyutlu kazanç grafikleri

Düzlemsel lens antene ait yönlülük – frekans grafiği Şekil 6.7’de gösterilmektedir.

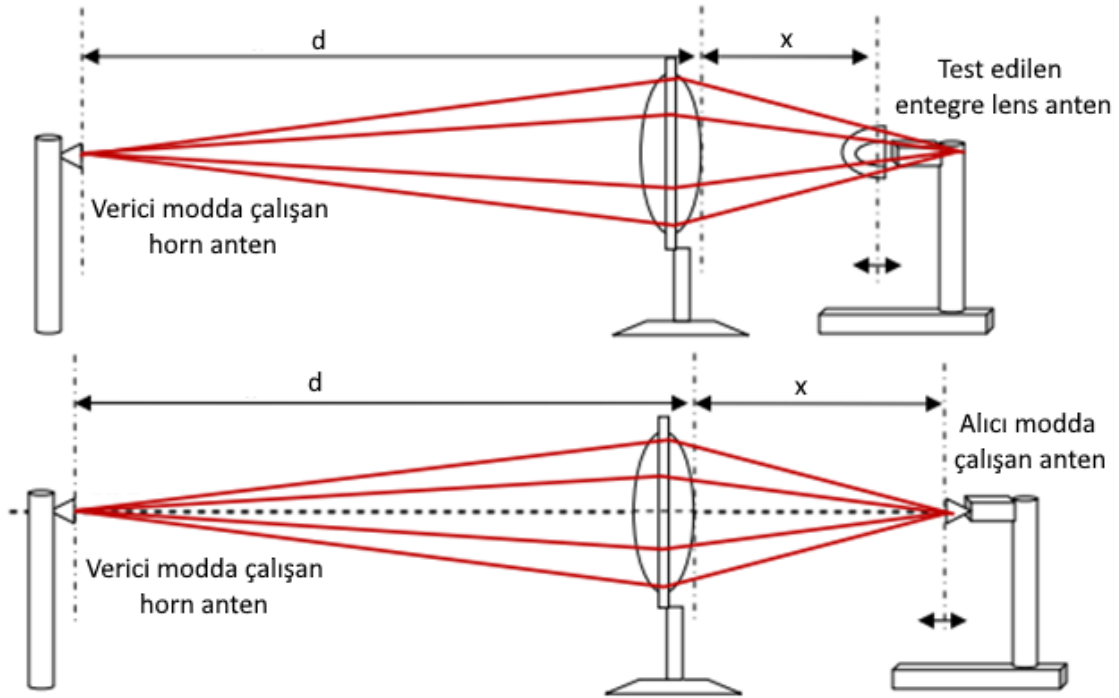


Şekil 6.7 Düzlemsel dielektrik lens antenin yönlüğünün frekans ile değişimi grafiği

6.1 Düzlemsel Dielektrik Lens Anten Faz Merkezi

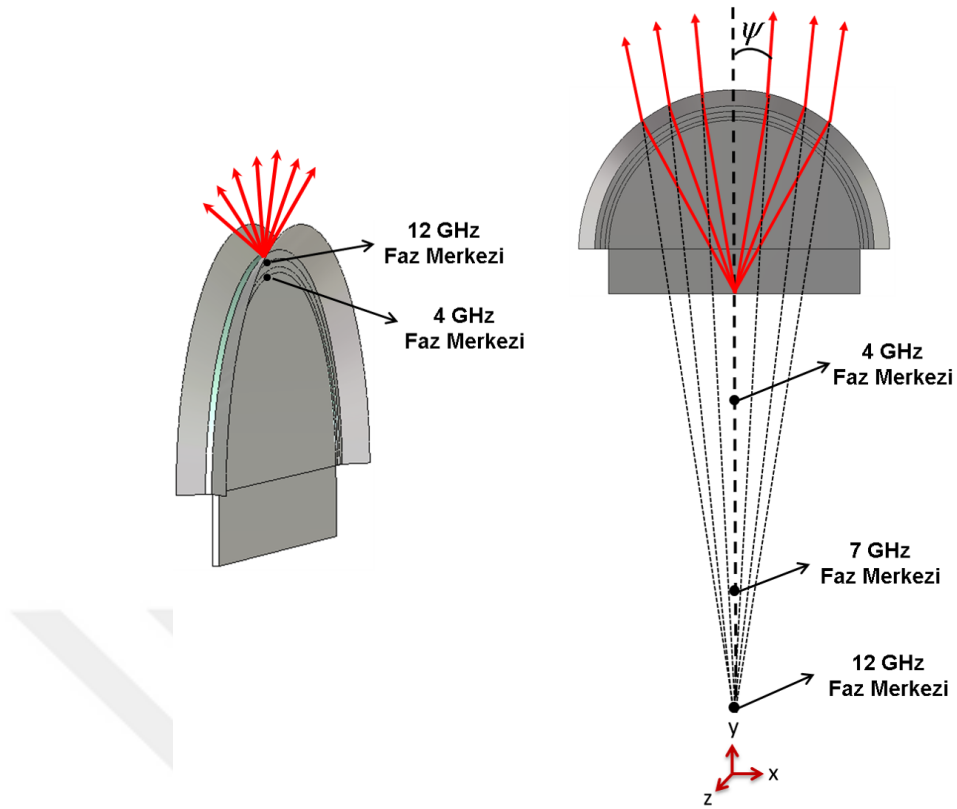
Düzlemsel lens antenler, yüksek kazançla sahip olmaları, geniş bantlı olmaları ve iki düzlem ışınma örüntülerinin farklı olmalarından dolayı tercih edilmektedirler. İki düzlemde ışınma örüntüsünün farklı olması düzlemsel lens anten yapılarına istenilen yöne yönelim özelliği katabilmektedir.

Düzlemsel lens antenlerin faz merkezinin lensin fiziksel yapısının arkasında olduğu yapılan literatür çalışmalarında da görülmüş, Şekil 6.8’de gösterilmiştir [20]. Bu çalışmada iki ayrı test düzeneği hazırlanmıştır. İlk düzenekte verici modunda çalışan horn anten çift taraflı mercekten d kadar uzaklığa konulmuş, diğer tarafta da x uzaklığında alıcı modunda çalışan horn anten konulmuş, karşılıklı haberleşmeleri sağlanmıştır. İkinci deney düzeneğinde yine d uzaklığına aynı özelliklere sahip verici modunda çalışan horn anten yerleştirilmiştir. Merceğin karşı tarafına ise alıcı modunda çalışan lens anten yerleştirilmiştir. Lens antenin karşıdan gelen elektromagnetik dalgayı x uzaklığından çok daha yakın bir konumda karşıladığı görülmüştür. Bu şekilde lens antenin faz merkezinin düzlemsel lens antenin gerisinde olduğu ispat edilmiştir.



Şekil 6.8 Lens Antenin Faz Merkezinin Bulunması [20]

Düzlemsel lens antenin bir düzlemdeki faz merkezi antenin üzerinde, diğer düzlemdeki faz merkezi ise fiziksel yapının gerisinde bulunmaktadır. Düzlemsel lens antenin faz merkezi hem E ve H düzlemlerinde hem de frekans değişimine bağlı olarak değişmektedir. Tasarlanan düzlemsel lens antenin farklı frekans ve farklı düzlemlerdeki faz merkezi değişimi Şekil 6.9’da gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Düzlemsel lens antenin frekansa bağlı faz merkezi aralığı (a) E Düzlem (b) H Düzlem

Düzlemsel lens antenin E ve H düzlemi frekansa bağlı faz merkezi noktaları Tablo 6.3'te gösterilmektedir.

Tablo 6.3 Düzlemsel lens antenin frekansa bağlı faz merkezi değişim tablosu

Frekans	E Düzlemi Faz Merkezi (mm)	H Düzlemi Faz Merkezi (mm)
4	219	-280
5	227	-825
6	225	-850
7*	210	-900
8	212	-960
9	213	-1125
10	207	-1150
11	200	-1295
12	191	-1330

Eksenel odaklanamama bir düzlem üzerinde frekans değişimiyle faz merkezi konumunun kayması sebebiyle oluşan faz hatası kayıplarıdır. Astigmatizm ise E ve H düzlemlerinde aynı frekansta faz merkezi konumunun farklı olmasından kaynaklanan faz hatası kaybı olarak tanımlanabilir. Tablo 6.3'ten görüldüğü gibi düzlemsel lens antenin E düzleminde faz merkezi konumunda büyük bir fark görülmemesine rağmen

H düzleminde faz merkezi konumunda kayma miktarı yüksektir. Bu sebeple H düzleminde eksenel odaklanamama ve astigmatizme bağlı faz kayıplarının diğer incelenen antenlere göre daha yüksek olması beklenmektedir.

6.1.1 Düzlemsel Lens Antenin Faz Hatası Kaybı

Düzlemsel lens antenin eksenel odaklanamamaya bağlı E ve H düzlemi faz kayıpları Tablo 6.4 ve 6.5'te gösterilmektedir. Faz hatası kaybı 7 GHz referans faz merkezi konumuna göre diğer frekans değerlerinin faz merkezi mesafesine uzaklığı bulunarak hesaplanmaktadır.

Tablo 6.4 Düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin E düzlemi $\phi = 0^\circ$ faz bozulması

Frekans	Faz Merkezi	PEL	PEL (dB)
4	219	1	-7.45×10^{-5}
5	227	0.9999	-4.27×10^{-4}
6	225	0.9999	-4.83×10^{-4}
7*	210	1	0
8	212	1	-1.36×10^{-5}
9	213	1	-4.12×10^{-5}
10	207	1	-7.32×10^{-5}
11	200	0.9998	-8.71×10^{-5}
12	191	0.9992	-0.0034

Tablo 6.5 Düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin H düzlemi $\phi = 90^\circ$ faz bozulması

Frekans	Faz Merkezi	PEL	PEL (dB)
4	-280	0.6574	-1.8217
5	-825	0.9967	-0.0143
6	-850	0.9987	-0.0054
7*	-900	1	0
8	-960	0.9980	-0.0085
9	-1125	0.9432	-0.2539
10	-1150	0.9160	-0.3810
11	-1295	0.7594	-1.1955
12	-1330	0.6808	-1.6696

Tablodaki sonuçlardan da görüldüğü üzere E düzleminde faz merkezinde kayma az olduğu için eksenel odaklanamamaya bağlı faz hatası kaybı ihmal edilebilecek seviyededir. H düzleminde faz merkezi antenin arka tarafında ve konum değişimi yüksek olduğu için eksenel odaklanamamaya bağlı faz hatası kaybı -0,0085 ile -1,6696 dB arasında değişmektedir.

Düzlemsel lens antenin astigmatizme bağlı olarak oluşturduğu faz hatası kayıpları Tablo 6.6'da gösterilmektedir.

Tablo 6.6 Düzlemsel lens anten astigmatizme bağlı faz bozulması

Frekans	E Düzlemi Faz Merkezi (mm)	H Düzlemi Faz Merkezi (mm)	PEL	PEL (dB)
4	219	-280	0.9978	-0.0098
5	227	-825	0.9803	-0.0864
6	225	-850	0.9005	-0.4554
7	210	-900	0.8376	-1.7695
8	212	-960	0.6563	-1.8287
9	213	-1125	0.5643	-2.4851
10	207	-1150	0.4271	-3.6948
11	200	-1295	0.3934	-4.0521
12	191	-1330	0.3126	-5.0498

Faz merkezi E düzleminde antenin üzerinde H düzleminde ise anten yapısının gerisinde olduğu için aynı frekansta faz merkezi konumları arasındaki fark çok yüksek olmakta ve buna bağlı olarak da astigmatizme bağlı faz hatası kaybı artmaktadır. Astigmatizme bağlı faz bozulması en düşük 4 GHz frekansında 0,0098 dB olmakla birlikte en yüksek faz bozulması, 12 GHz frekansında 5,0498 dB olarak görülmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümü içerisinde düzlemsel lens antenlerin farklı besleme tipleri ile beslendiğinde oluşabilecek eksenel odaklanamama ve astigmatizm problemlerine bağlı faz bozulmaları incelenmiştir. Bu amaçla MATLAB'de yazılan faz bozulması kodu ile bu etkiler hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde düzlemsel lens antendeki faz merkezi konumunda olan yüksek değişimden dolayı astigmatizme bağlı faz hatası kaybının yüksek olduğu görülmüştür.

6.2 Düzlemsel Lens Anten Beslemeli Reflektör Tasarımı

Bu bölümde faz merkezlerinin E ve H düzlemlerinde farklı pozisyonlarda olduğu dikkate alınarak dört farklı senaryo ile değerlendirilmiştir. Parabolik yansıtıcı anten tasarımı yapmak için öncelikli olarak besleme antenin E ve H düzlemleri ışıma örüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada tasarlanan düzlemsel lens antene [69] ait sonuçlar kullanılmıştır.

$\psi_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{4F/D} \right)$ eşitliği ile uç nokta ışıma derecesi bulunmaktadır. 7 GHz'de $\phi = 0^\circ$ 'de düzlemsel lens antenin 10 dB huzme genişliği $\pm 5.5^\circ$ 'dir. 7 GHz frekansındaki $\pm 5.5^\circ$ huzme genişliğine göre 2.1'e yerleştirildiğinde F/D oranı 2.5 olarak bulunmuştur. 7 GHz'de $\phi = 90^\circ$ 'de 10 dB huzme genişliği $\pm 44^\circ$ 'dir. 7

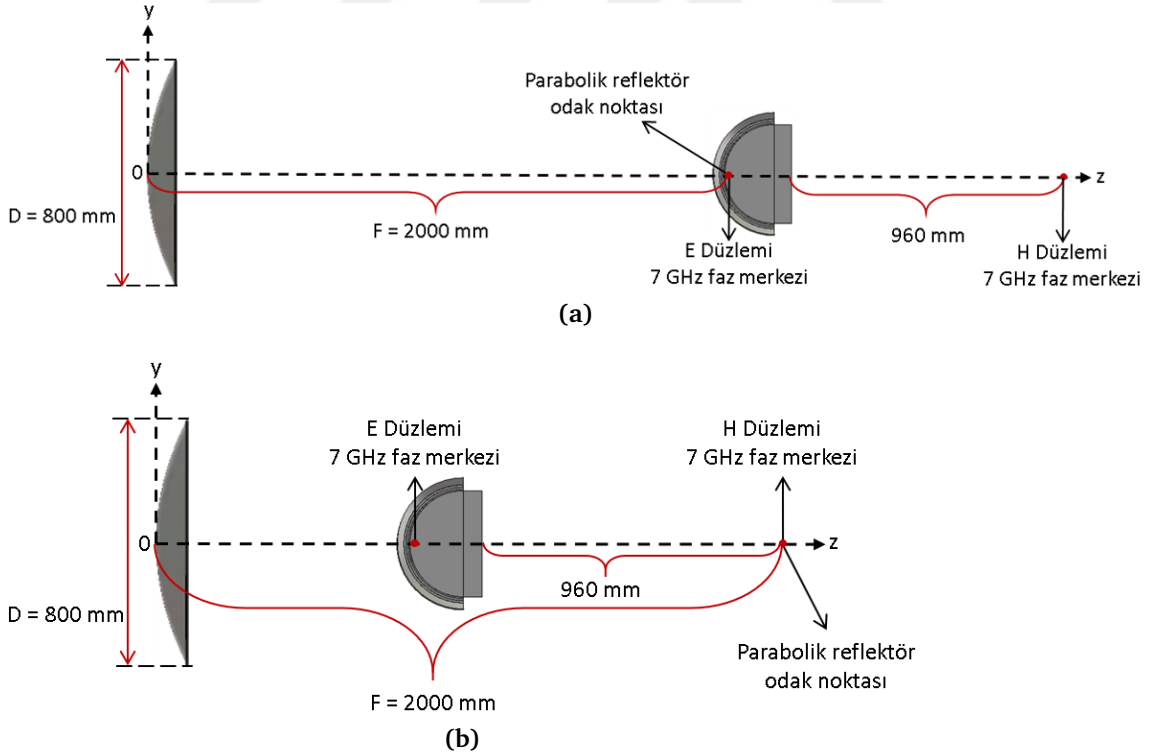
GHz frekansındaki $\pm 44^\circ$ huzme genişliğine göre 2.1'e yerleştirildiğinde F/D oranı 0.6 olarak bulunmuştur.

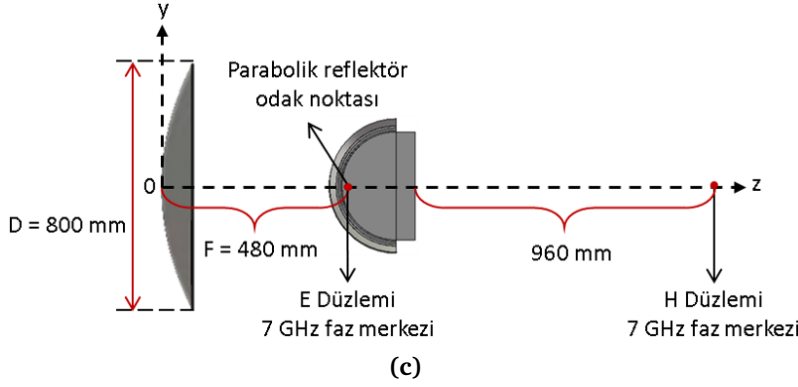
İlk senaryoda, 2.5 F/D oranına sahip olan parabolik reflektör antenin odağı Şekil 6.10 (a)'da verildiği gibi, 7 GHz'de düzlemsel lens antenin E düzlemi faz merkezi ile çakışmaktadır.

İkinci senaryoda, 2.5 F/D oranına sahip parabolik reflektör antenin odağı, Şekil 6.10 (b)'de verildiği gibi 7 GHz'de düzlemsel lens antenin H düzlemi faz merkezi ile çakışmaktadır.

Üçüncü senaryoda, 0.6 F/D oranına sahip parabolik reflektör antenin odağı, Şekil 6.10 (c)'de verildiği gibi 7 GHz'de E düzlemi faz merkezi ile çakışmaktadır.

Son senaryoda 0.6 F/D oranına sahip parabolik reflektör antenin odağının, 7 GHz'de H düzlemi faz merkezi ile çakışması amaçlanmıştır. Bu durum besleme anteninin parabolik reflektörün arka tarafına konumlandırılması anlamına gelmektedir. Bu yerleştirmenin yapı uygulaması pratik olarak gerçekleştirilemediği için bu durum analiz edilmemiştir.

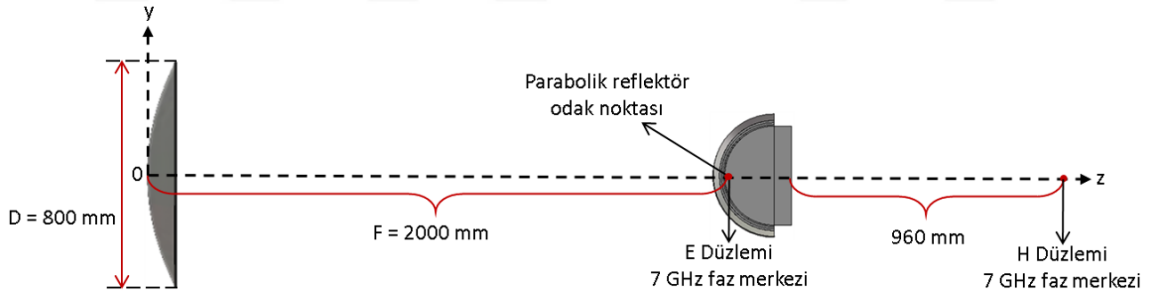




Şekil 6.10 Düzlemsel lens antenin reflektör beslemesi olarak kullanıldığı dört senaryo (a) 7 GHz'deki E düzlemi faz merkezi, $F/D=2.5$ ile reflektör odağına, (b) 7 GHz'deki H düzlemi faz merkezi, $F/D=2.5$ ile reflektör odağına, (c) 7 GHz'deki E düzlem faz merkezi, $F/D=0.6$ ile parabolik reflektörün odağına yerleştirilir.

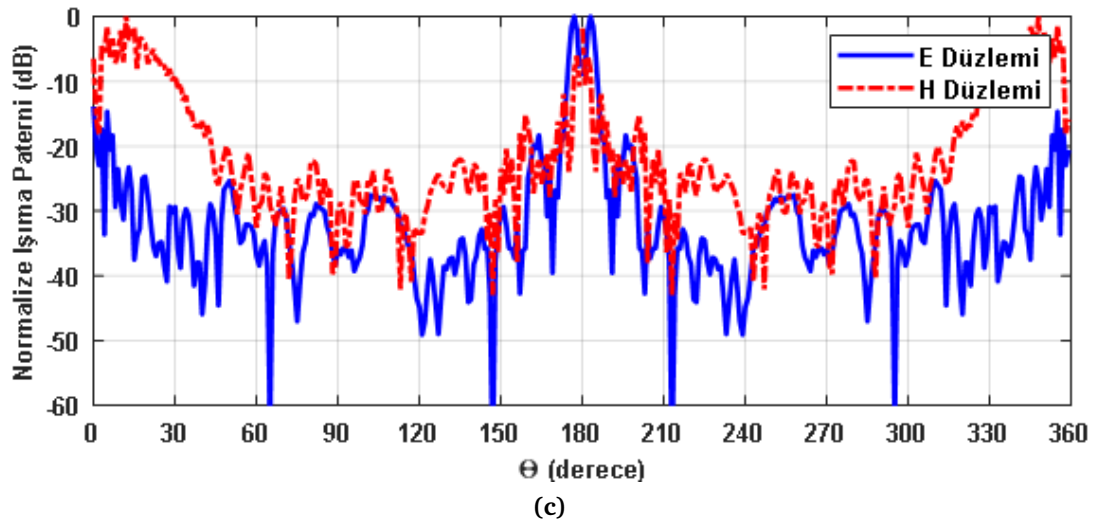
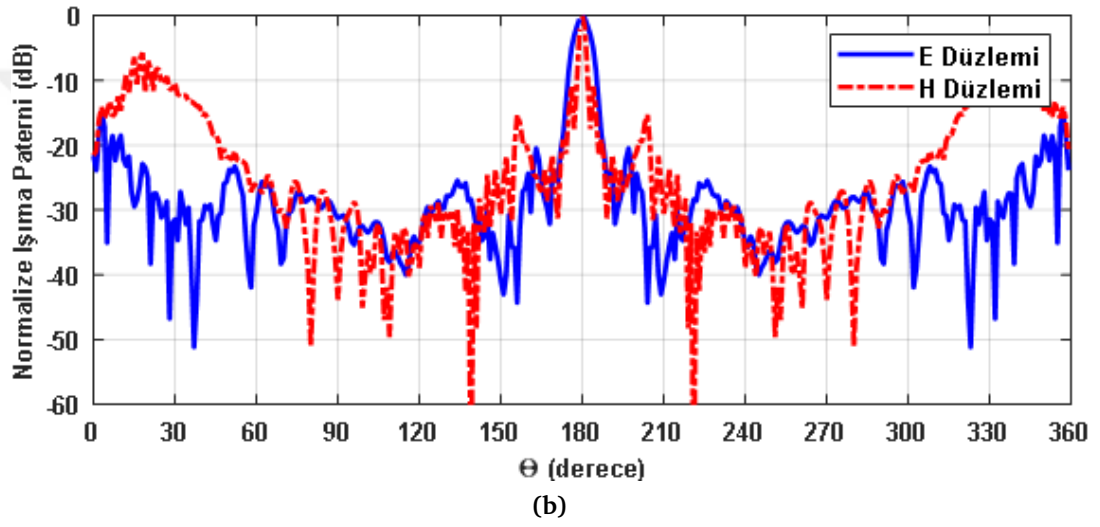
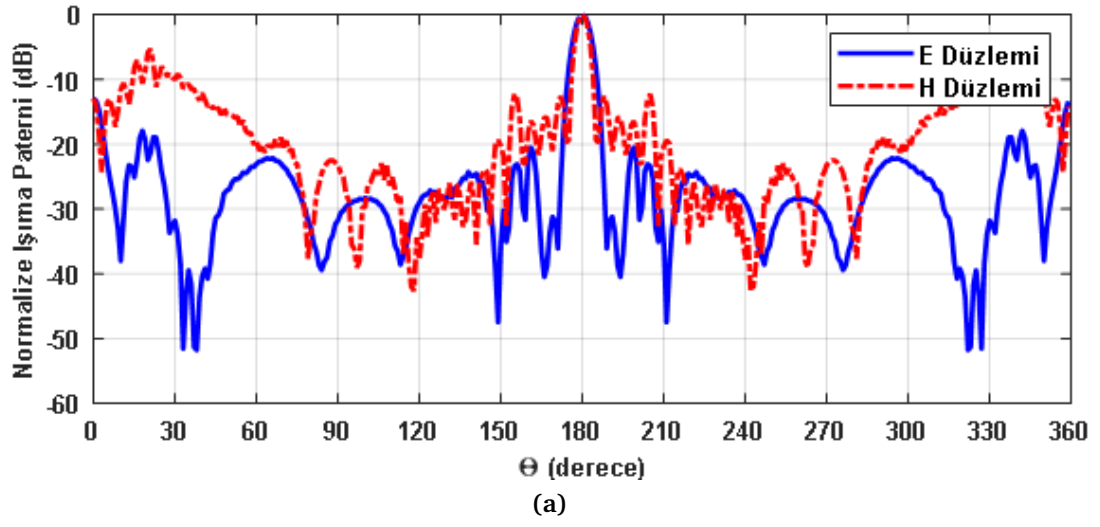
6.2.1 $F/D=2.5$ E Düzlem Faz Merkezinin Reflektör Odağına Yerleştirildiği Birinci Tasarım Senaryosu

Birinci senaryonun tasarımında $D=800$ mm kabul edilerek $F=2000$ mm olarak bulunmuş ve çalışmasının ilerleyen safhalarında $D=800$ mm uzunluğu referans değer olarak kabul edilmiştir. Bu tasarımda $F=2000$ mm odak noktası ile E düzlemi faz merkezi (220 mm) çakıştırılmıştır.



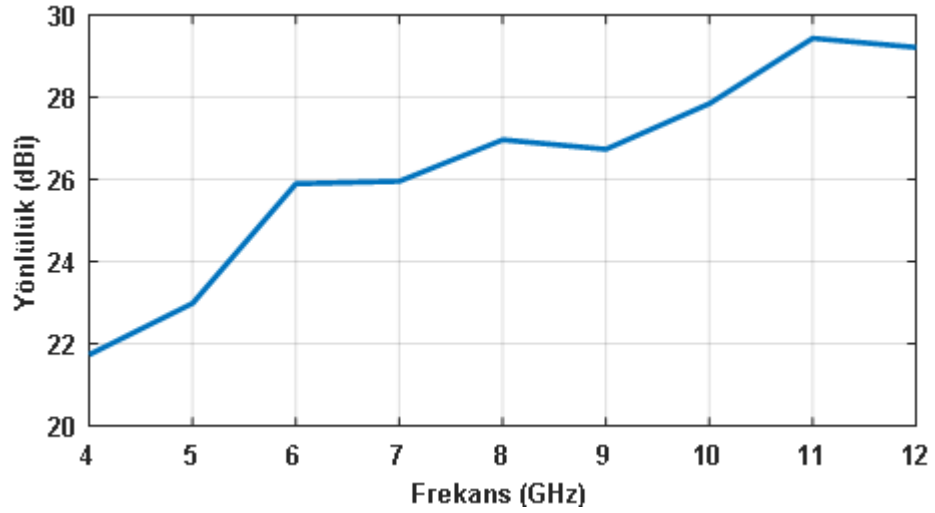
Şekil 6.11 $F/D=2.5$ E düzlemi faz merkezi ile reflektörün odağı çakıştırılan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör tasarım modeli

Şekil 6.11'de konfigürasyonu belirtilen tasarım CST simülasyon programında oluşturulmuştur. $F/D=2.5$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin 4, 7 ve 12 GHz, E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri Şekil 6.12'de gösterilmektedir.



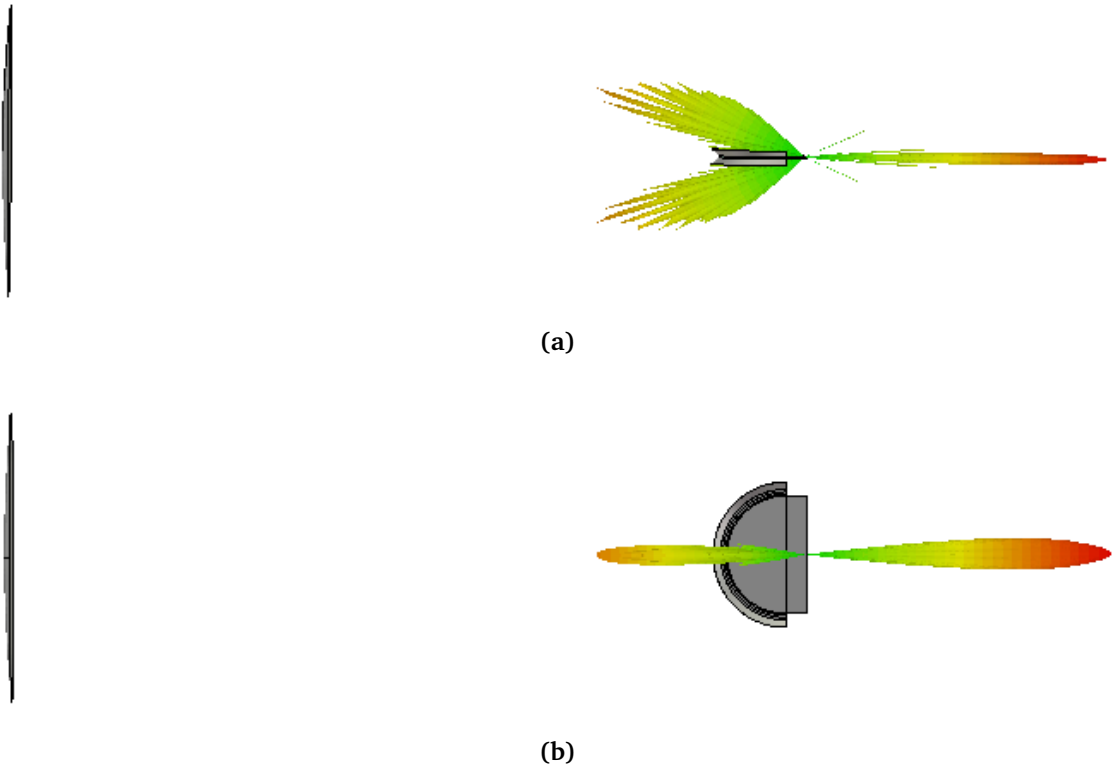
Şekil 6.12 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz

$F/D=2.5$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülük – frekans grafiği Şekil 6.13'te gösterilmektedir.



Şekil 6.13 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi

$F/D=2.5$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin 7 GHz E ve H düzlem üç boyutlu ışınma örüntüsü Şekil 6.14'te gösterilmektedir.



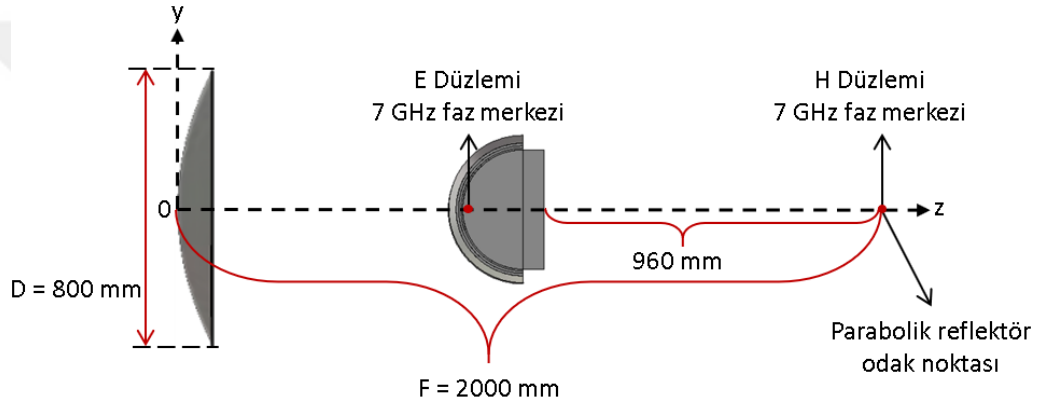
Şekil 6.14 $F/D = 2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektörün 3 boyutlu ışınma örüntüsü (a) E düzlemi (b) H düzlemi

Üç boyutlu ışınma örüntülerinden de görüldüğü üzere tasarımın ışınma örüntüsü E ve H düzlemlerinde farklıdır. Bir düzlemde ışınma örüntüsü kalem huzme oluştururken diğer düzlemde taşma problemi oluşmaktadır. Bu taşma problemi, antenin bir düzleme

uygun (E düzlemi) olan tasarımın diğer düzlem (H düzlemi) için uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Tasarım E düzlemi faz merkezi olan 220 mm’de reflektörün odağı ile çakıştırılmıştır. H düzlemi faz merkezi ise -960 mm’de bulunmasından dolayı bu düzlemde faz merkezi odak noktasının arkasında kalmaktadır. H düzlem faz merkezinin reflektörün çok arkasında kalması, buradan gelen elektromagnetik dalgaların taşma yapmasına sebep olmaktadır.

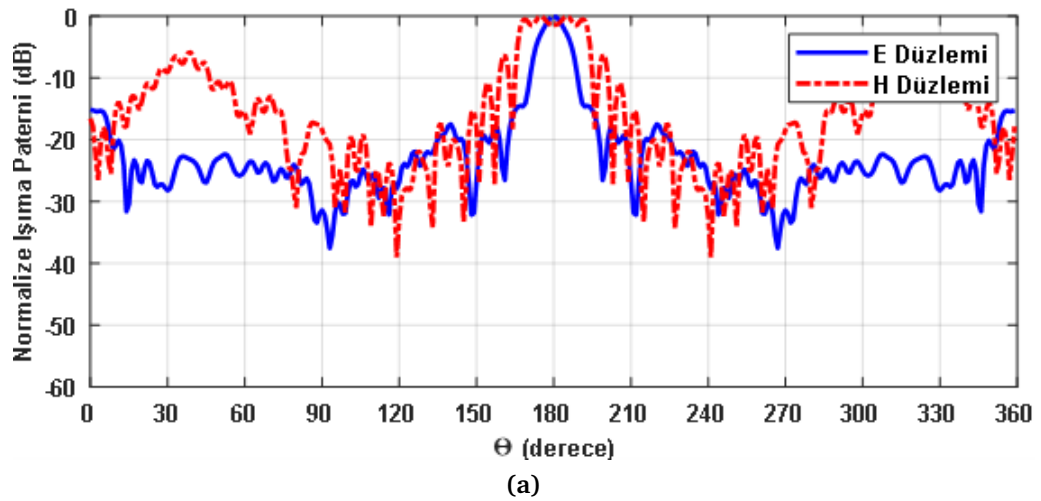
6.2.2 $F/D=2.5$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektör Odağına Yerleştirildiği İkinci Tasarım Senaryosu

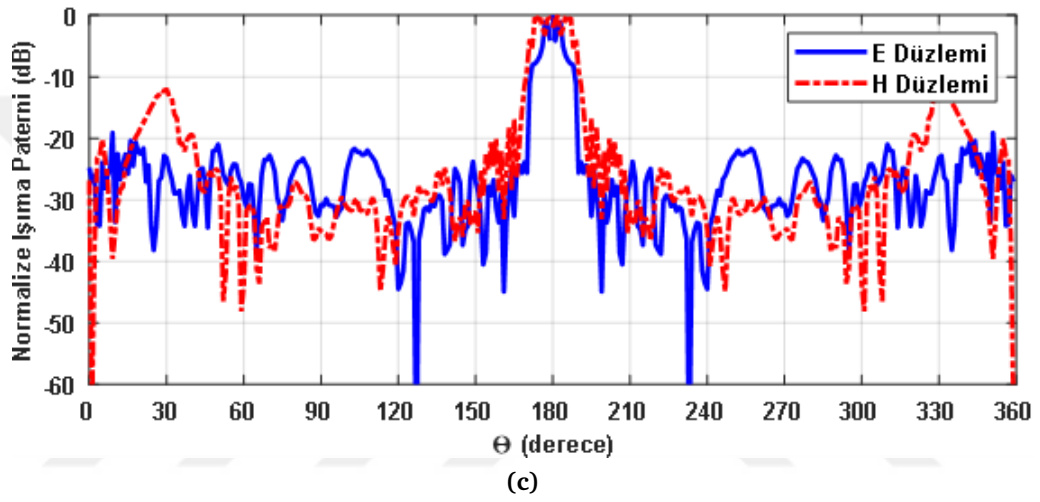
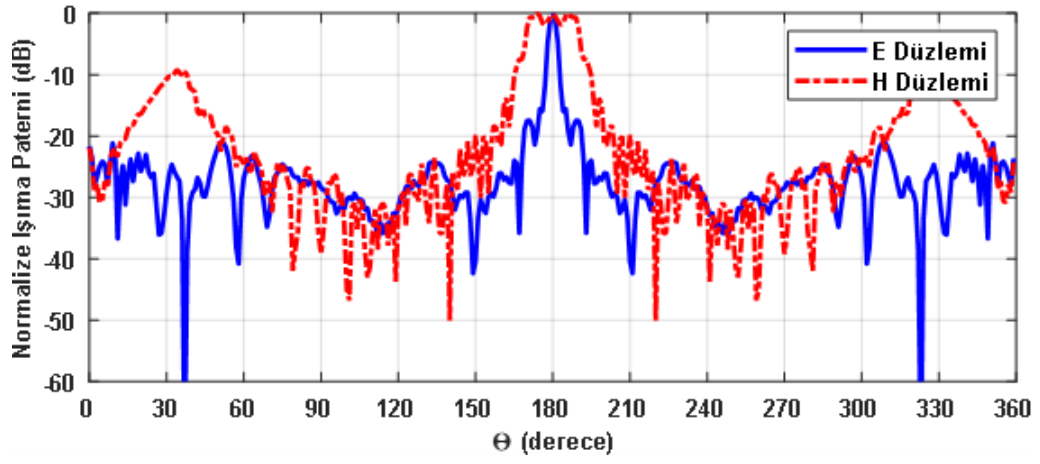
İkinci senaryonun tasarımında $D = 800$ mm kabul edilerek reflektörün odak noktası $F = 2000$ mm ile H düzlemi faz merkezi (-960 mm) çakıştırılmıştır.



Şekil 6.15 $F/D=2.5$ H düzlemi faz merkezi ile reflektörün odağı çakıştırılan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör tasarım modeli

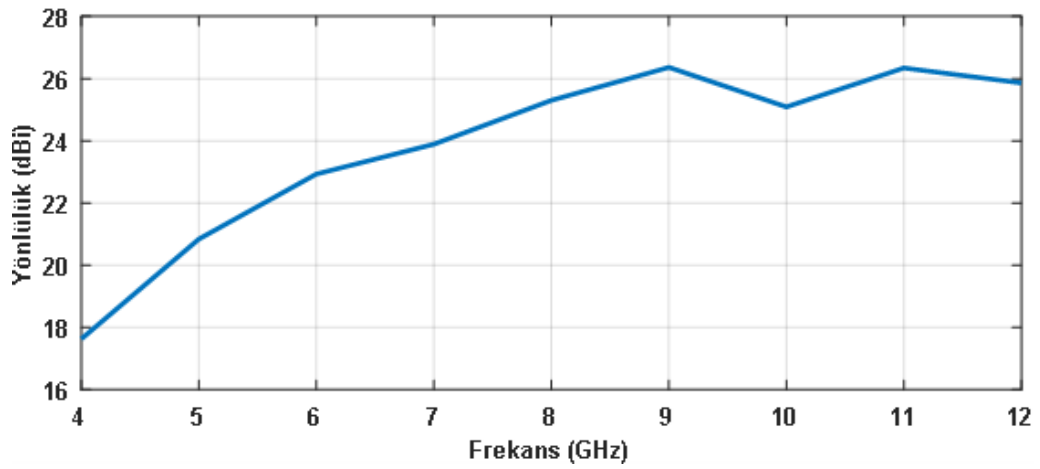
Şekil 6.15’te konfigürasyonu belirtilen tasarım CST simülasyon programında koşturulmuştur. $F/D=2.5$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin 4, 7 ve 12 GHz, E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri Şekil 6.16’da gösterilmektedir.





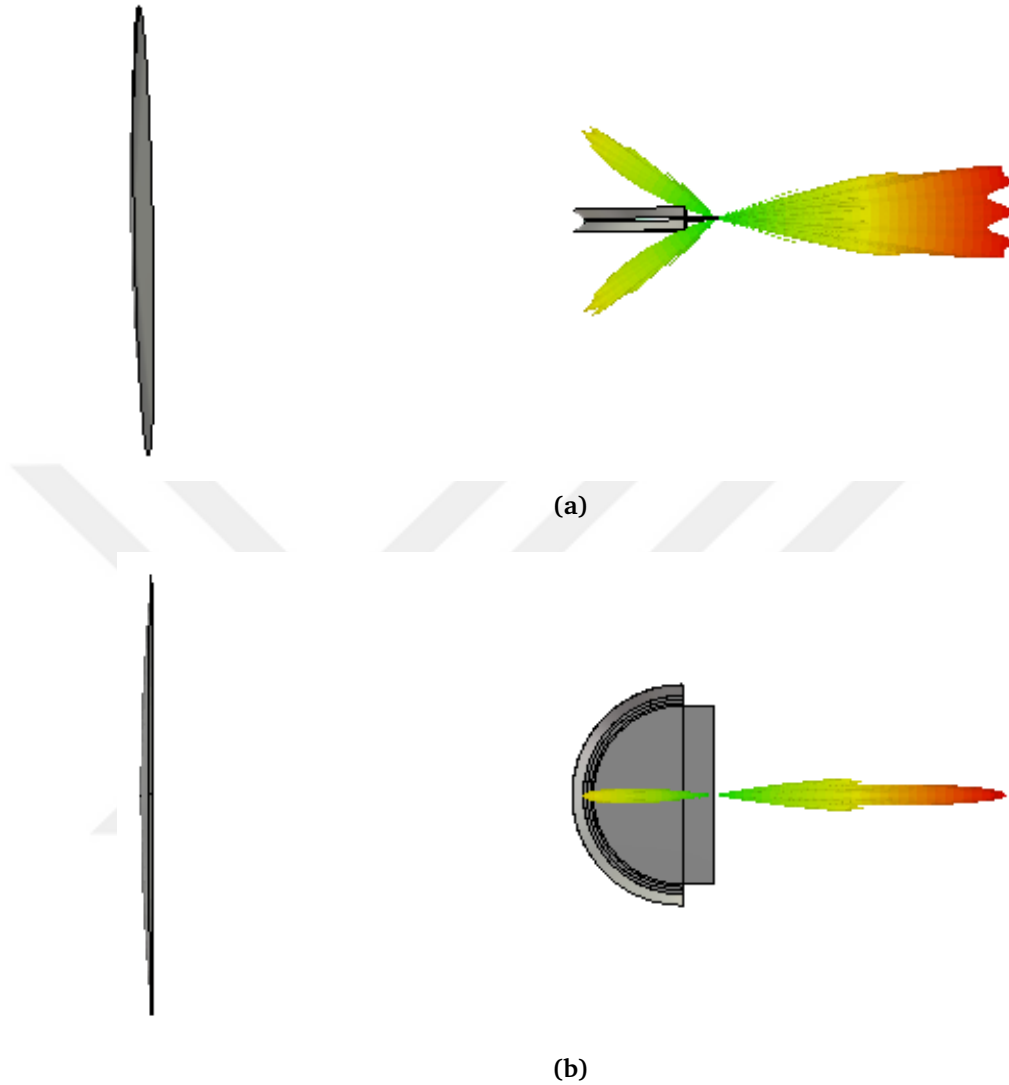
Şekil 6.16 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz

$F/D=2.5$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülük – frekans grafiği Şekil 6.17’de gösterilmektedir.



Şekil 6.17 $F/D=2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi

$F/D=2.5$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin 7 GHz E ve H düzlem üç boyutlu ışıma örüntüsü Şekil 6.18’de gösterilmektedir.

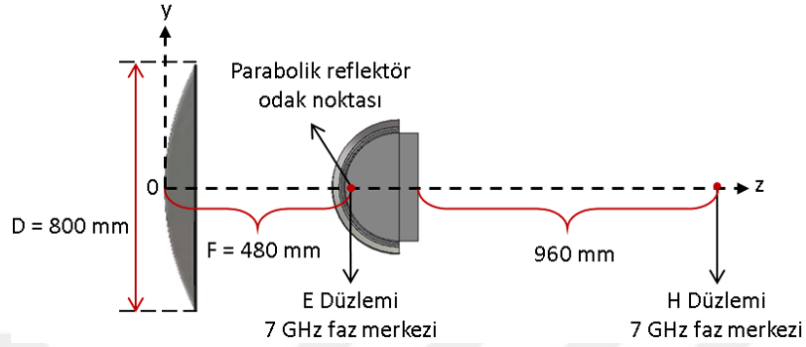


Şekil 6.18 $F/D = 2.5$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektörün 3 boyutlu ışıma örüntüsü (a) E düzlemi (b) H düzlemi

Üç boyutlu ışıma örüntülerinden de görüldüğü üzere tasarımın ışıma örüntüsü E ve H düzlemlerinde farklıdır. Bir düzlemde ışıma örüntüsü kalem huzme oluştururken diğer düzlemde taşma problemi oluşmaktadır. Bu taşma problemi, antenin bir düzleme uygun (H düzlemi) olan tasarımın diğer düzlem (E düzlemi) için uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Tasarım H düzlemi faz merkezi olan -960 mm’de reflektörün odağı ile çakıştırılmıştır. E düzlemi faz merkezi ise 220 mm’de bulunmasından dolayı bu düzlemde faz merkezi odak noktasının önünde kalmaktadır. E düzlem faz merkezinin reflektöre bu kadar yakın olması taşma sorununa sebep olmaktadır.

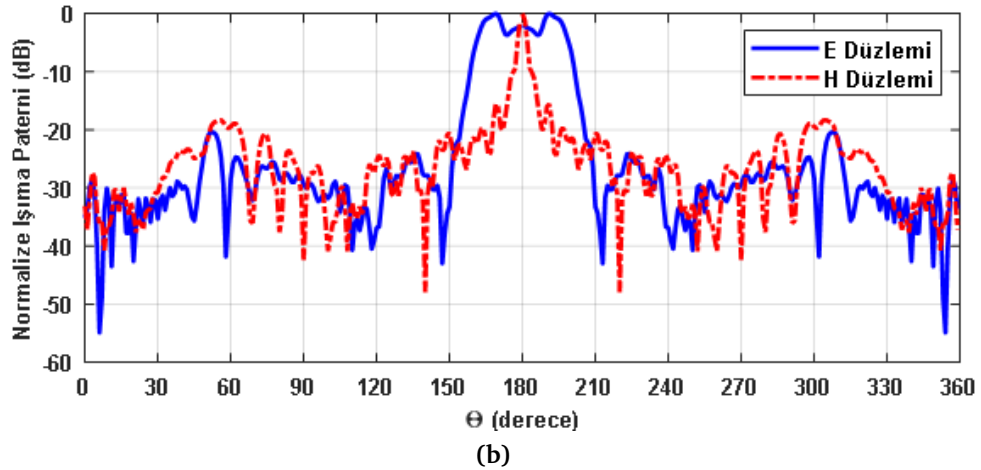
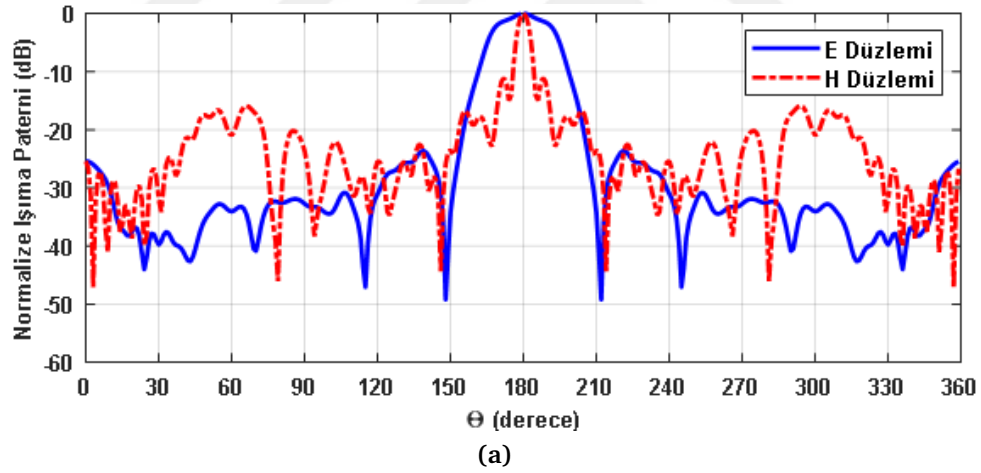
6.2.3 F/D=0.6 H Düzlem Faz Merkezinin Reflektörün Odağına Yerleştirildiği Üçüncü Tasarım Senaryosu

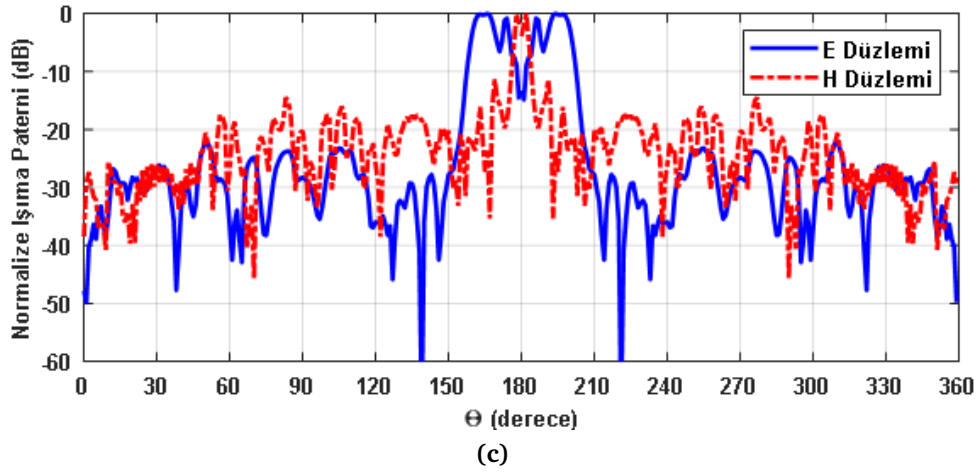
Üçüncü tasarım senaryosunda $D=800$ mm referans değeri verilerek $F=480$ mm olarak bulunmuştur. Tasarımı yapılacak olan parabolik yansıtıcı anten şablonu Şekil 6.19’da gösterilmektedir.



Şekil 6.19 F/D=0.6 Düzlemsel Lens Anten Beslemeli Reflektör Tasarım Modeli

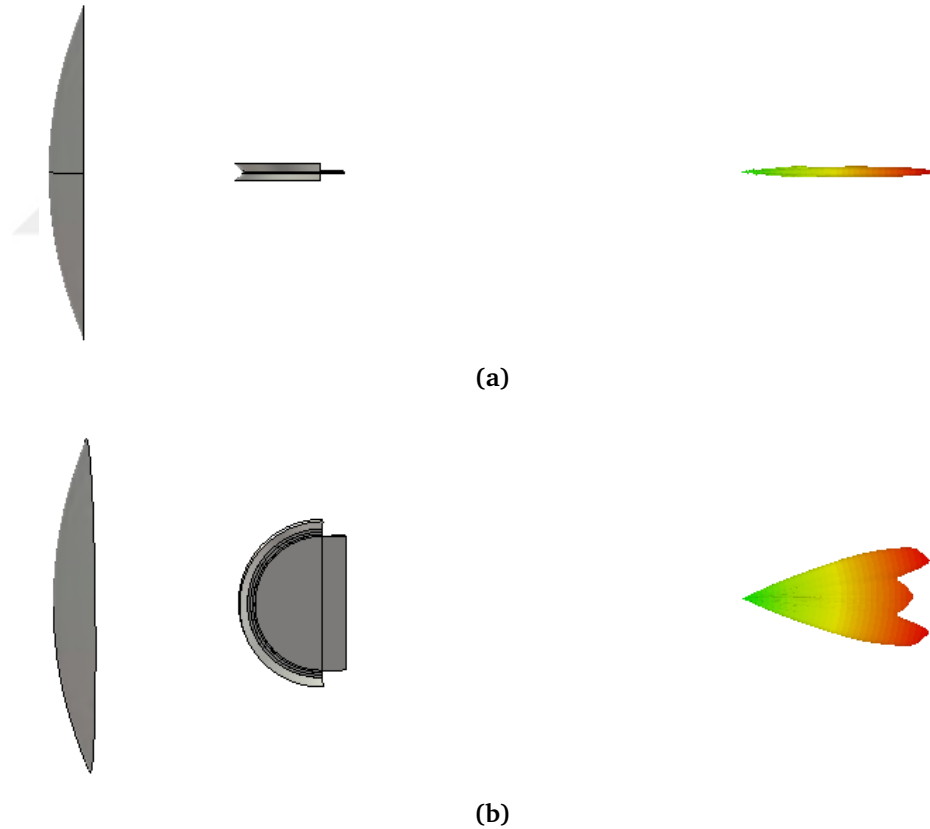
F/D=0.6 olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin 4, 7 ve 12 GHz, E ve H düzlemi normalize ışınım paternleri Şekil 6.20’de gösterilmektedir.





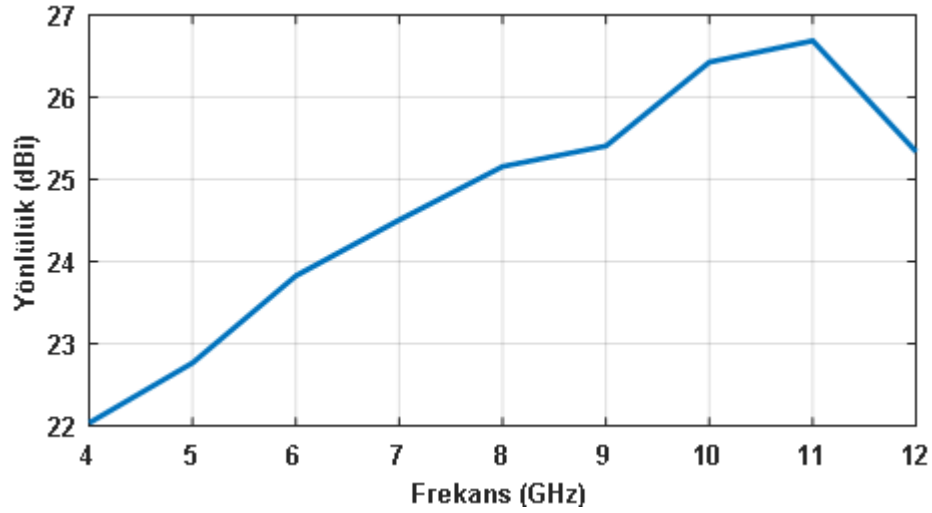
Şekil 6.20 $F/D=0.6$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektöre ait E ve H düzlemi normalize ışınım paternleri (a)4 GHz, (b)7 GHz ve (c)12 GHz

$F/D=0.6$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin E ve H düzlem üç boyutlu ışınım örüntüsü Şekil 6.21’de gösterilmektedir.



Şekil 6.21 $F/D=0.6$ Düzlemsel Lens Anten Beslemeli Reflektörün 3 Boyutlu Işınım Örüntüsü (a) E düzlemi (b) H düzlemi

$F/D=0.6$ olan düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülük – frekans grafiği Şekil 6.22’de gösterilmektedir.



Şekil 6.22 $F/D=0.6$ düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin yönlülüğünün frekans ile değişimi

Üç boyutlu ışıma örüntülerinden de görüldüğü üzere tasarımın ışıması E ve H düzlemlerinde farklıdır. Bir düzlemde ışıma örüntüsü kalem huzme oluştururken diğer düzlemde yelpaze huzme görüntüsü oluşmaktadır. Bu problemin temeli antenin bir düzlemde uygun olan tasarımının diğer düzlem için uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu tasarımda $\phi = 90^\circ$ odağı (480 mm) ile E düzlem faz merkezleri çakıştırılmıştır. H düzlem faz merkezi -960 mm'den yayılım yapmaktadır. Tasarım parametreleri H düzlemine göre hesaplandığı için ışıma örüntüsü H düzleminde kalem huzme oluştururken E düzleminde yelpaze huzme oluşturmaktadır.

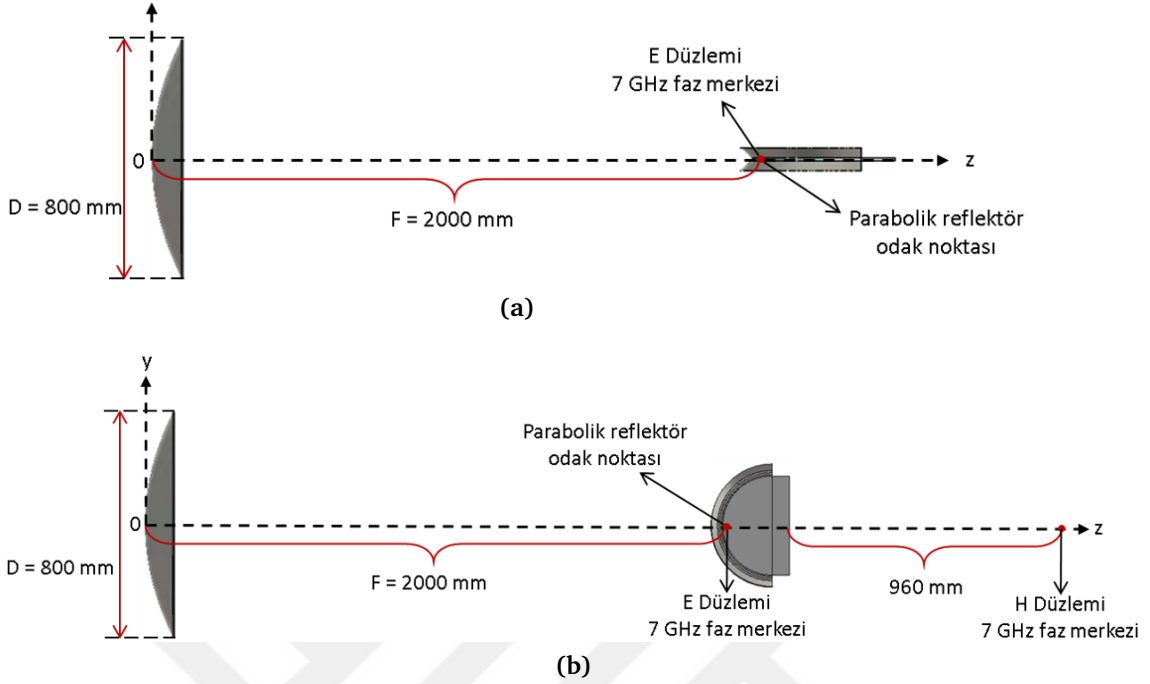
6.3 Düzlemsel Lens Anten Anten Beslemeli Reflektör Sistemi Işın Takibi

Tezin daha önceki bölümlerinde, düzlemsel lens anten beslemeli reflektör sistemi, CST simülasyon programında tasarlanmış ve sonuçları yorumlanmıştır. Bu bölümde $F/D=2.5$ ve $F/D=0.6$ değerlerine sahip olan reflektör sistemlerinin yayılım karakteristiği ışın takibi yöntemi ile incelenmiştir.

F/D oranının 2.5 olduğu durum için farklı frekanslardaki ışın takibi şekilleri gösterilmiştir. Sistem davranışları hem $\phi = 0^\circ$ hem de $\phi = 90^\circ$ için ayrı ayrı incelenmiştir. F/D oranının 0.6 olduğu durum için de farklı frekanslardaki ışın takibi grafikleri gösterilmiştir. Sistem davranışları yine hem $\phi = 0^\circ$ hem de $\phi = 90^\circ$ için ayrı ayrı incelenmiştir.

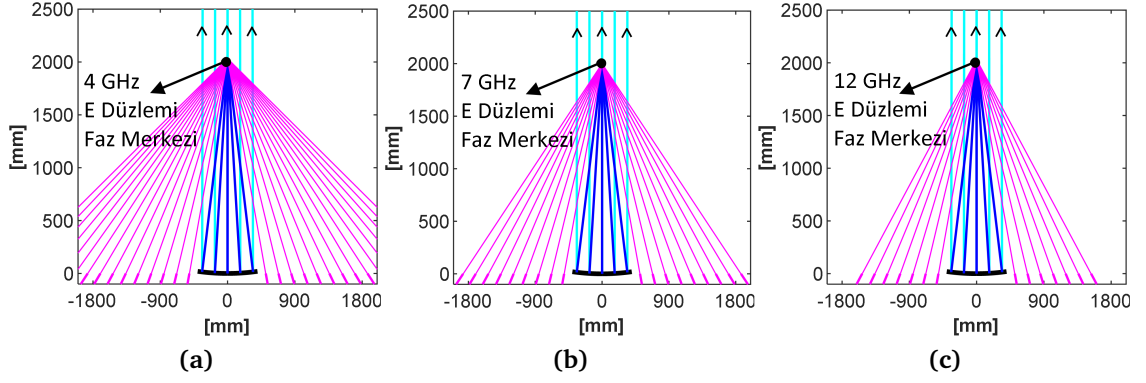
Düzlemsel lens anten yapı itibarıyla bir düzlemde faz merkezi kendi üzerindeyken diğer düzlemde faz merkezi yapının gerisine düşmektedir. Bu sebeple bu hem E hem de H düzlemlerinde ışın takibi incelemeleri yapılmıştır.

6.3.1 F/D=2.5 E Düzlem Faz Merkezinin Reflektör Odağına Yerleştirildiği Birinci Tasarım Senaryosu Işın Takibi



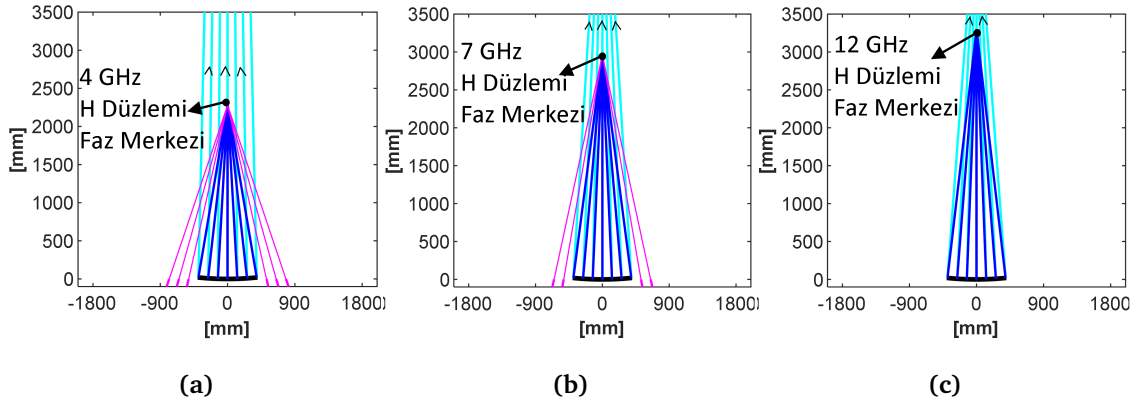
Şekil 6.23 7 GHz’de E düzlemdeki düzlemsel lens antenin faz merkezi $F/D=2.5$ olan parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Uygulamanın konfigürasyonları (a) E düzlemi ve (b) H düzlemi.

Birinci tasarım senaryosunda 7 GHz’de düzlemsel lens antenin E düzlem faz merkezi, E düzlem için Şekil 6.23 (a)’da ve H düzlemi gösterimleri için 6.23 (b)’de verildiği gibi parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Parabolik reflektör 7 GHz frekansında, H düzleminde F/D oranı 2.5 olacak şekilde tasarlanmıştır ($\psi_o = \pm 11^\circ$). Bu senaryoda reflektörün odak noktası ile 7 GHz E düzlemi faz merkezi çakıştırılır. Faz merkezi hareketi E düzleminde ihmal edilebilir seviyelerde bulunmaktadır. Yansıtıcı yüzeylerden yansıyan enerji, Şekil 6.24’te gösterildiği gibi tüm çalışma frekanslarında neredeyse paralel şekilde iletilmektedir. Yansıyan, iletilen ve taşma yapan ışınlar ışın takibi yöntemi ile belirlenmektedir. Şekil 6.24’te görüldüğü gibi en yüksek taşma miktarı, $\pm 55^\circ$ yarım güç huzme genişliği olan 4 GHz’de görülmektedir. 7 GHz frekansında $\pm 44^\circ$ huzme genişliği ve 12 GHz frekansında $\pm 32^\circ$ huzme genişliğine sahip grafiklerde de görüldüğü gibi taşma miktarı frekans arttıkça faz merkezi değişimine bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 6.24 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz. Koyu mavi ışınlar reflektörü aydınlatır. Yeşil ışınlar reflektörden yansıyan ışınlardır ve mor ışınlar taşmayı göstermektedir.

Şekil 6.25 (b)'de verildiği gibi H düzleminde, bu düzlemdeki faz merkezi besleme antenin arkasında olduğundan, parabolik reflektörün odak noktası besleme faz merkezinden uzaktır. Reflektörün odağı ile besleme faz merkezi arasındaki mesafe, frekanstaki artışla birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Şekil 6.25'te görüldüğü gibi taşma miktarı H düzleminde düşüktür. H düzleminde taşmanın düşük olmasının sebebi ışının bu düzlemde oldukça dar olmasıdır. Şekil 6.25'te görüldüğü gibi ışınlar 4 GHz'de paralel olarak yansımaya rağmen 7 ve 12 GHz frekanslarında toplanma göstermektedir. Bu durumun sebebi ise yüksek çalışma frekanslarında reflektörün odağı ile faz merkezi arasındaki mesafenin hızla artmasıdır.

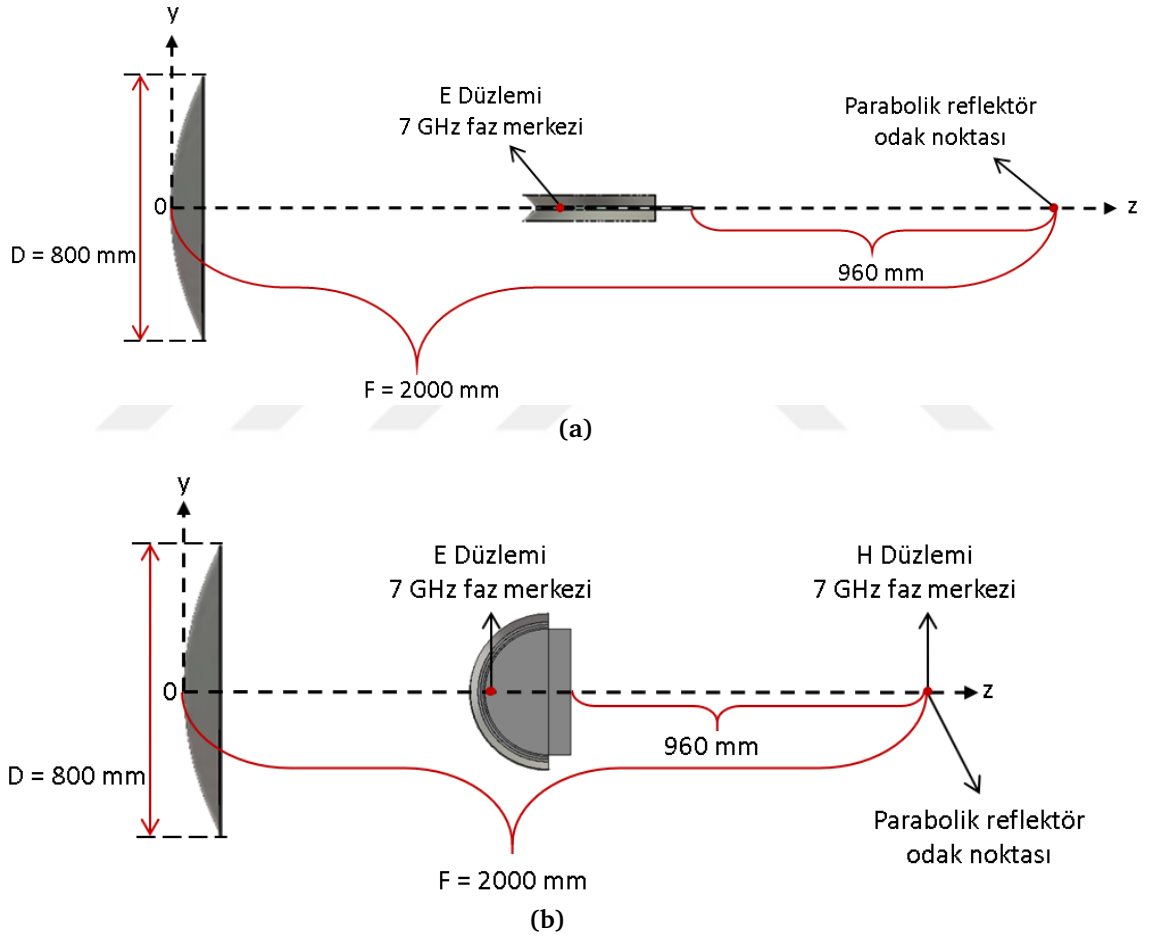


Şekil 6.25 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz. Koyu mavi ışınlar reflektörü aydınlatır. Yeşil ışınlar reflektörden yansıyan ışınlardır ve mor ışınlar taşmayı göstermektedir.

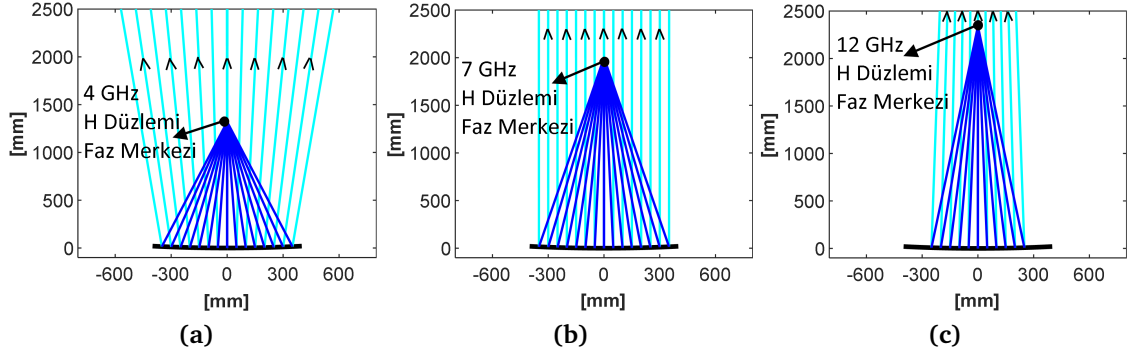
6.3.2 $F/D=2.5$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektörün Odağına Yerleştirildiği İkinci Tasarım Senaryosu Işın Takibi

İkinci tasarım senaryosunda H düzlemi 7 GHz faz merkezi ile reflektör antenin odağı çakıştırılmıştır (Şekil 6.26). Reflektör sisteminin H ve E düzlem faz merkezi

konumu görüntüleri sırasıyla Şekil 6.26 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. H düzleminde, 4 GHz'de düzlemsel lens antenin arkasında bulunan faz merkezi konumu, daha yüksek frekans faz merkezi konumlarına kıyasla besleme antenine daha yakındır. Bu sebeple, Şekil 6.27 (a)'da verildiği gibi 4 GHz'de az miktarda yayılma kaybı meydana gelmektedir. 7 GHz frekansında, Şekil 6.27 (b)'de de görülebileceği gibi verilen ışın izleme çiziminde, beklendiği gibi bir yayılma gözlenmez. Yansıyan ışınlar mükemmel şekilde toplanmaktadır. Besleme anteninin ışın demeti daha yüksek frekanslarda daraldığından, parabolik reflektörün çapı, besleme ışınmasının -10 dB huzme genişliği için büyüktür. Bu sebeple, yansıtıcı anten Şekil 6.27 (c)'de verildiği gibi 12 GHz'de verimli bir şekilde aydınlatılamamaktadır. Ek olarak, yansıyan ışınlar en yüksek çalışma frekansında neredeyse paralel iletilmektedir.

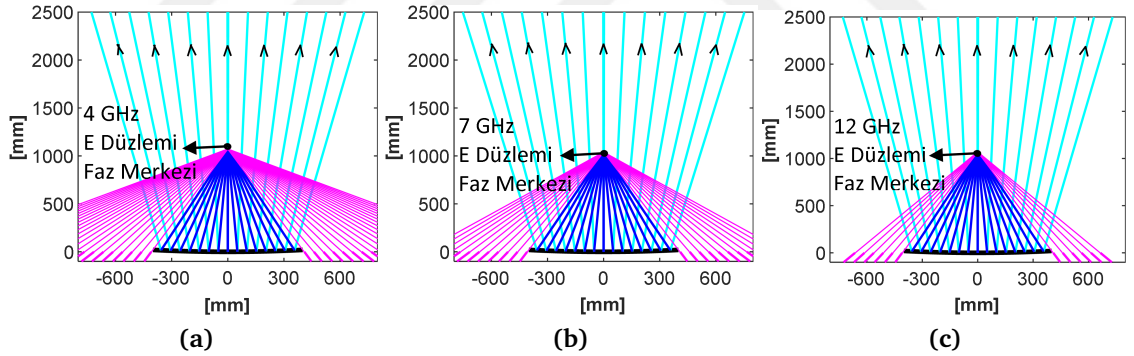


Şekil 6.26 7 GHz'de H düzleminde düzlemsel lens antenin faz merkezi, $F/D=2.5$ olan parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Uygulamanın konfigürasyonları (a) E düzleminde ve (b) H düzleminde verilmiştir.



Şekil 6.27 Gelen, yansıyan ve taşın ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz.

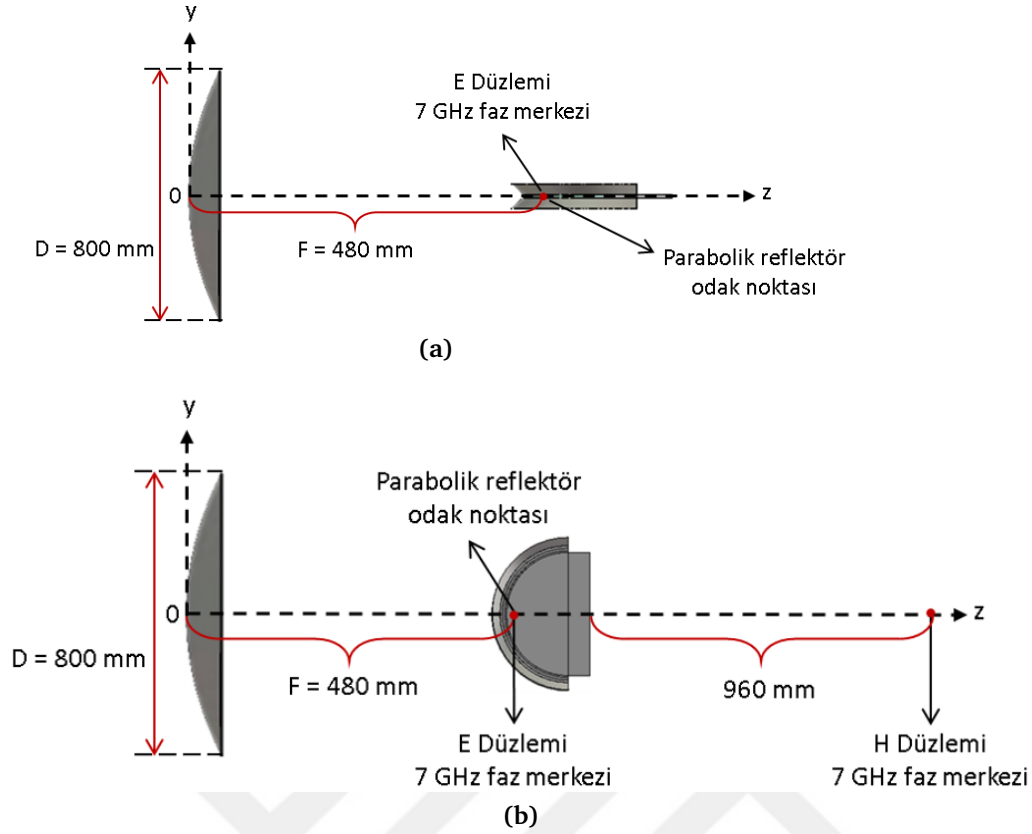
E düzleminde, Şekil 6.28’de verilen ışın izleme şekillerinden de anlaşıldığı gibi yayılma görülmektedir. Bu senaryoda yayılma seviyesi, ilk senaryonun E düzlem ışımasındaki yayılmadan daha düşüktür. Burada düzlemsel lens anten, parabolik reflektör antene çok daha yakın konumlandırılmıştır. Yansıyan ışınlar paralel şekilde ilerleyememektedir. Ek olarak yansıyan ışınların yönü, E düzlemde beslemenin faz merkezi stabilitesi nedeniyle, Şekil 6.28’de de görüldüğü gibi frekansla önemli ölçüde değişmemektedir. Frekans yükseldikçe taşma miktarı azalmaktadır.



Şekil 6.28 Gelen, yansıyan ve taşın ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz

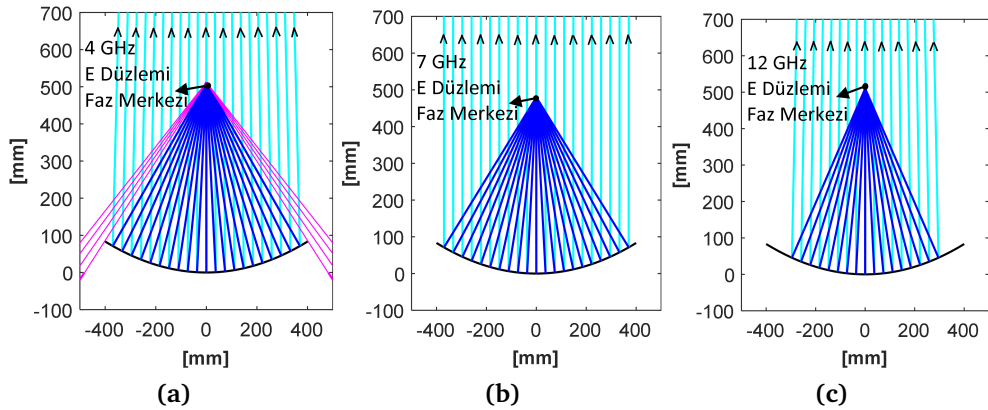
6.3.3 $F/D=0.6$ H Düzlem Faz Merkezinin Reflektörün Odağına Yerleştirildiği Üçüncü Tasarım Senaryosu Işın Takibi

Şekil 6.29’da verilen üçüncü senaryoda, 7 GHz’de düzlemsel lens antenin E düzlemi faz merkezi parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Parabolik reflektör, beslemenin 7 GHz’de H düzlemi ışıması dikkate alınarak tasarlanmış dolayısıyla reflektörün F/D oranı bu konfigürasyonda 0.6 olarak kullanılmıştır.

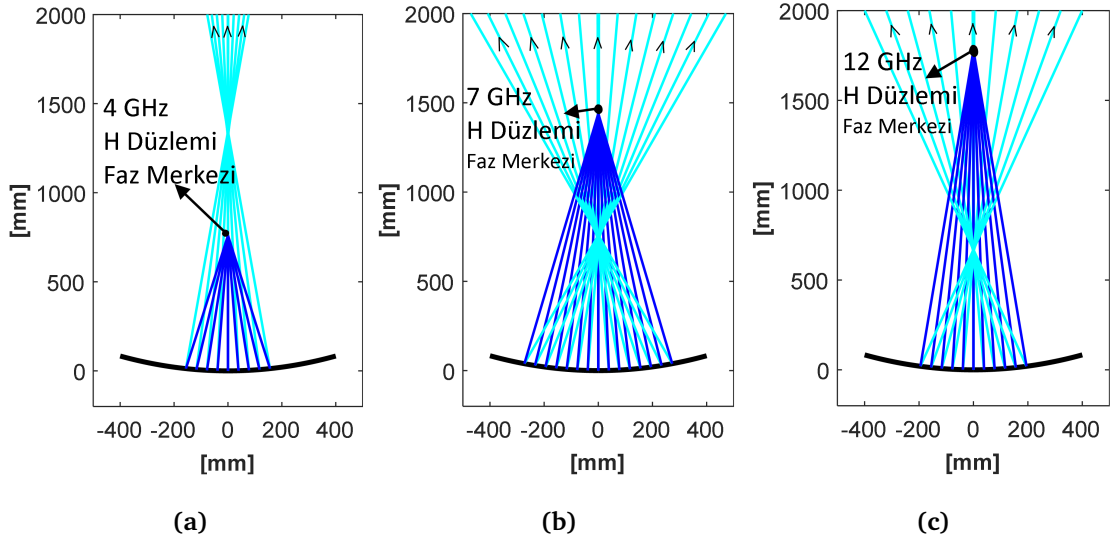


Şekil 6.29 7 GHz’de E-düzlemde düzlemsel lens antenin faz merkezi, F/D oranı 0.6 olan parabolik reflektörün odağına yerleştirilmiştir. Uygulamanın konfigürasyonları (a) E-düzleminde ve (b) H-düzleminde verilmiştir.

Şekil 6.30’da verilen E düzlem ışın izleme gösterimleri incelendiğinde, en düşük çalışma frekansı olan 4 GHz’de sadece küçük bir miktar taşma gözlemlenmektedir. Yansıyan ışınlar neredeyse E düzlemindeki tüm çalışma frekanslarında birbirlerine paralel olarak ilerlemektedir. Bu durum, reflektör odağının besleme anteninin E düzlem faz merkezi ile üst üste binmesi ve ayrıca bu düzlemdeki faz merkezinin stabilitesi ile açıklanabilmektedir.



Şekil 6.30 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların E düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz



Şekil 6.31 Gelen, yansıyan ve taşan ışınların H düzleminde ilerlemesi (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz

Parabolik reflektörün çapı (D), besleme Şekil 6.27 (b)'de verildiği gibi reflektör anteninden 2000 mm uzağa yerleştirildiğinde düzlemsel lens antenin H-düzlemi ışıması ile uyumludur. Bu senaryoda H düzleminde, besleme anteni reflektör antene 2000 mm'den daha yakın bir noktaya yerleştirilmiştir. Böylece, gelen EM dalgalar reflektör yüzeyinin merkez bölgesi üzerinde yoğunlaşır ve reflektörün kenarları, Şekil 6.31'deki ışın izleme şekillerinden de görüldüğü gibi aydınlatılamamaktadır. Ayrıca reflektörün odağı ile H düzlemindeki beslemenin faz merkezi arasındaki mesafe çok yüksektir. 4 GHz'de bu mesafe 600 mm olmakla birlikte bu aralık yüksek frekanslarda önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle parabolik reflektör yüzeyinden yansıyan elektromanyetik dalgalar, H düzleminde keyfi yönlerde yönlendirilecek ve reflektör anteninin ışın demeti, Şekil 6.31'de gösterildiği gibi yayılacaktır.

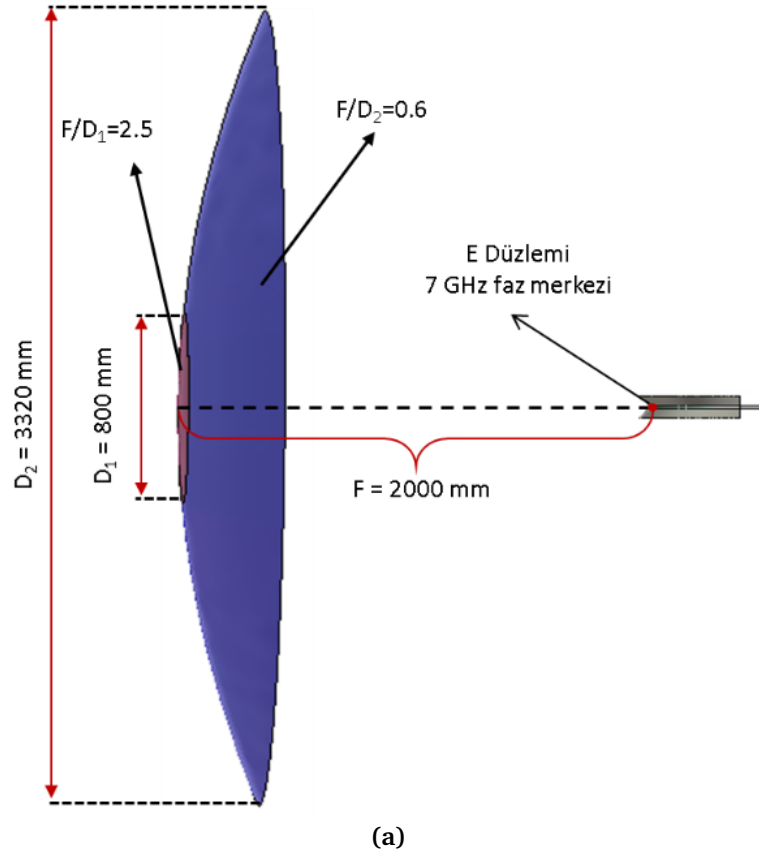
Son senaryoda, F/D oranı 0.6 olan parabolik reflektör anteninin odağının 7 GHz'de H düzlemi faz merkezi ile çakışması amaçlanmıştır. Bu yerleşimin uygulanması, besleme anteninin parabolik reflektörün arka tarafına konumlanmasıyla sonuçlandırıldığı için analiz edilebilmesi mümkün değildir.

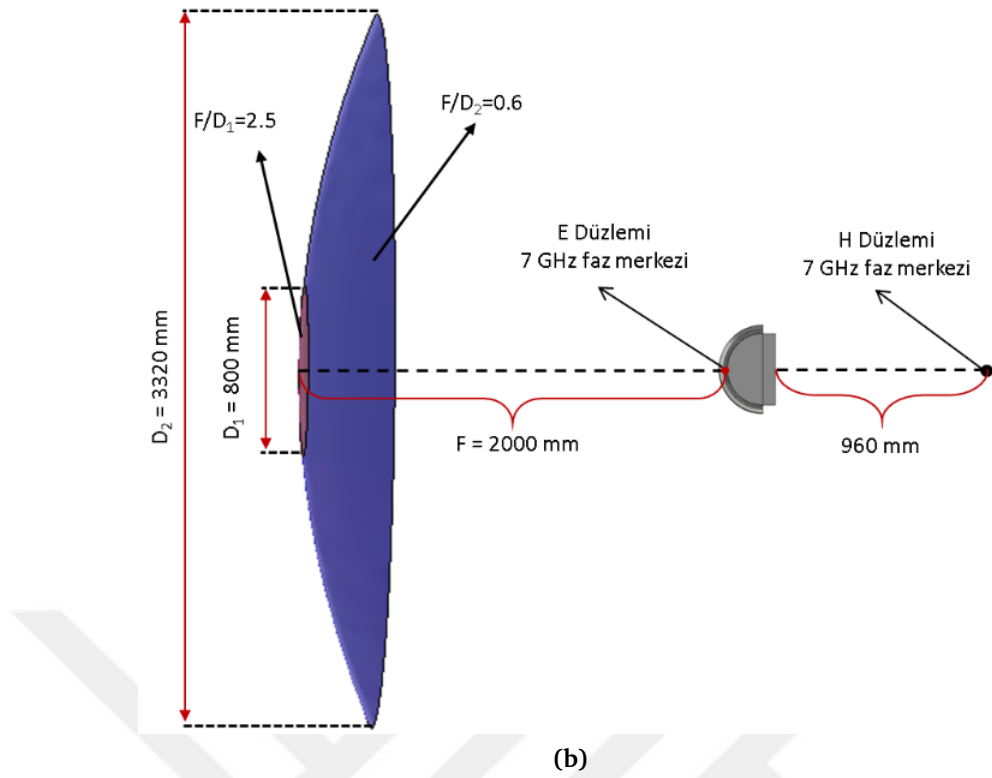
Şekil 6.26'da verilen ikinci senaryoda, yansıyan ışınlar H düzleminde paralel şekilde yönlendirilse de, E düzlemindeki yansıyan ışınlar açılarak yayılmaya devam etmektedir. Şekil 6.29'da verilen üçüncü senaryo için de benzer yorumlar yapılabilmektedir. Bu senaryonun H düzleminde, yansıyan ışınlar, paralel yayılmak yerine çeşitli yönlerde dağılmaktadır. İlk senaryoda, beslemenin E düzlemi faz merkezinin parabolik yansıtıcı odağına yerleştirilmesi, E düzleminde tüm çalışma frekansı bandında, toplanan ışınlarla sonuçlanmakla birlikte yüksek miktarda taşma meydana gelmektedir. Yansıyan ışınları inceleyen kapsamlı bir değerlendirme

yapıldığında, geniş bant düzlemsel lens anten kullanılarak bir reflektör antenini beslemek için en umut verici çözümün, yayılma kayıplarını azaltmak koşuluyla Şekil 6.23'te verilen ilk senaryo olduğu söylenebilmektedir.

6.4 $F/D=2.5$ ve $F/D=0.6$ Olan İki Reflektörün Birleştirilmesi ile Elde Edilen Yapının Işın Takibi

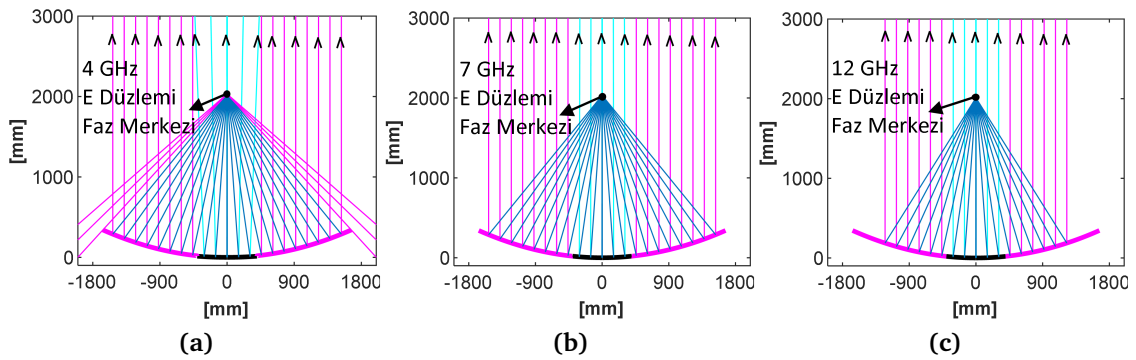
Bu bölümde, geniş bantlı düzlemsel lens antenin besleme elemanı olarak kullanıldığında her iki düzlemde de yüksek kazanç ve ışıma verimliliği elde etmek için yeni bir reflektör anten tasarım prosedürü tanıtılacaktır. Değişiklikler, önceki bölümde ilk senaryo olarak sunulan Şekil 6.26'da verilen yapılandırmaya uygulanmıştır. Bu amaçla ilk olarak E düzleminde taşmayı azaltmak amacıyla F/D değeri 0.6 olan parabolik yansıtıcı antenin merkezi kesilmiş ve daha sonra F/D değeri 2.5 olan ile parabolik yansıtıcının kenarına tutturulmuştur. Şekil 6.23'te gösterilen parabolik reflektörün odak uzaklığı 2000 mm'dir. Bu nedenle F/D değeri 0.6 olan reflektörün çapı yaklaşık 3320 mm olmalıdır. Birleşik reflektör sistemi Şekil 6.32'de gösterilmektedir.





Şekil 6.32 Düzlemsel lens anten beslemesi kullanılarak tasarlanan reflektör yapısı
(a) E-düzlemi ve (b) H-düzlemi

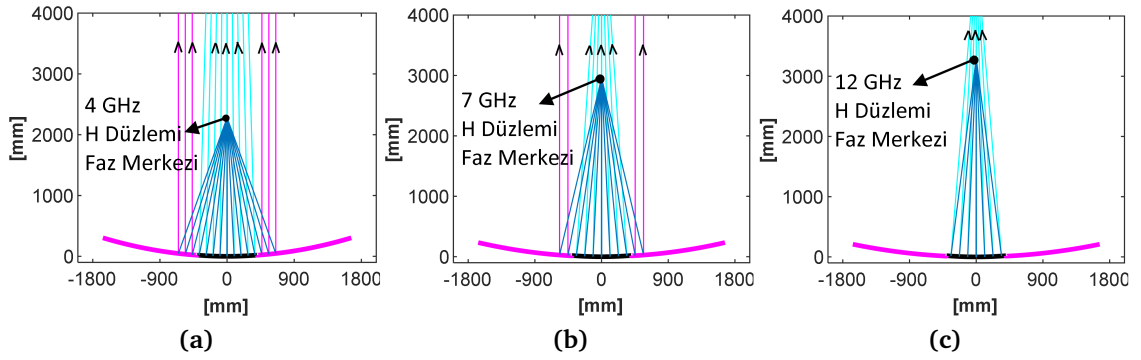
Düzlemsel lens anten tarafından beslenen birleşik reflektör yapısının ışıma özelliklerini tahmin etmek için daha önceki bölümlerde olduğu gibi ışın takibi yöntemi uygulanmıştır. Giden ışınlar mavi renkle, $F/D=2.5$ olan reflektör yüzeyinden yansıyan ışınlar yeşil, $F/D=0.6$ yansıyan ışınlar ise mor renkte gösterilmiştir.



Şekil 6.33 E düzlemi gelen ve yansıyan ışınlar (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz

Şekil 6.33 (a)'da sadece en düşük çalışma frekansında taşma görülmektedir. Diğer frekanslarda, F/D değeri 0.6 olan parabolik reflektör eklenerek ve reflektör yüzeyinin genişlemesi sayesinde taşma ortadan kaldırılmıştır. Birleşik reflektörün tepe bölgesinden yansıyan ışınlar, beklediği gibi bir paralel dalga cephesine sahiptir. Eklenen parabolik reflektör anteninin odağı 7 GHz'de beslemenin E düzlem faz

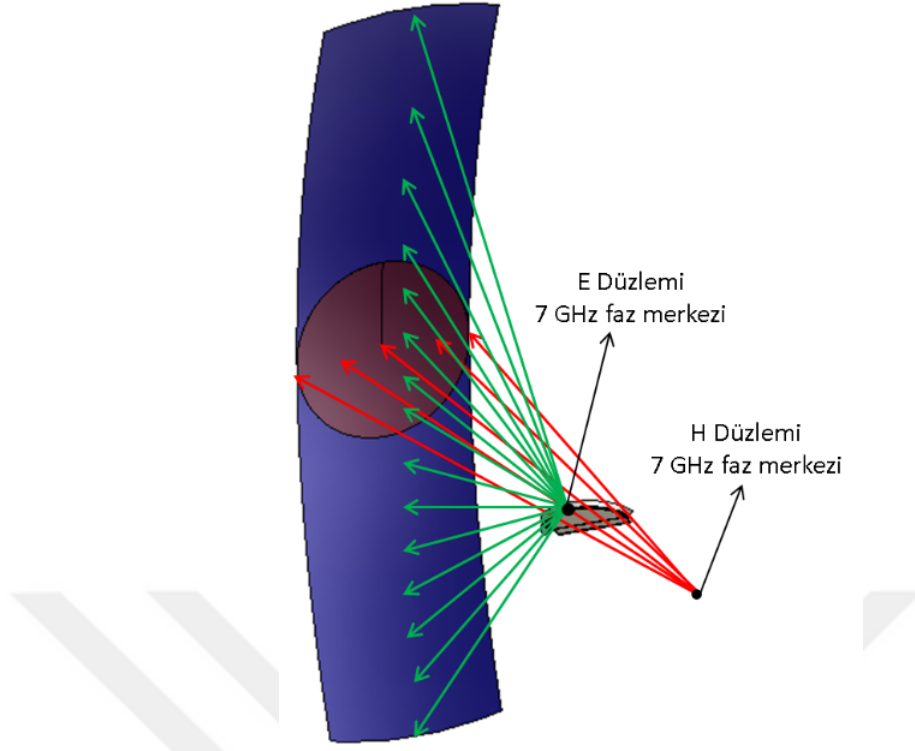
merkezi ile çakıştığından, eklenen parabolik reflektör yüzeyinden yansıyan ışınlar da düzgün bir şekilde toplanmaktadır.



Şekil 6.34 H düzlemi gelen ve yansıyan ışınlar (a) 4 GHz, (b) 7 GHz ve (c) 12 GHz

H düzlemindeki kombine reflektör sisteminin ışın karakteristikleri geometrik optik yaklaşımı kullanılarak benzer şekilde tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 6.34'te, birleşik reflektör sistemi için gelen ve yansıyan ışınlar H düzleminde gösterilmiştir. Işın örüntüleri, frekans arttıkça daralır ve yönlendirilir. Böylece, reflektörün sadece küçük bir kısmı -10 dB ışın genişliği ile aydınlatılmıştır. Birleştirilmiş reflektörün aydınlatılan kısmı, frekanstaki artışla kademeli olarak azalmaktadır. Yüksek frekanslarda, H düzleminde yüksek faz merkezi hareket miktarı nedeniyle, H düzlemindeki faz merkezi ile birleştirilmiş reflektörün odak noktası arasındaki mesafe önemli ölçüde artmaktadır. Faz merkezi konumundaki bu hareket miktarı, yüksek çalışma frekanslarında H düzleminde yayılma ile sonuçlanmaktadır.

Şekil 6.34'te verilen ışın izleme çizimleri göz önüne alındığında, birleşik reflektör yapısının daha düşük ışın yoğunluğu ile aydınlatılan kısmı kesilmiştir. Kesilen kısım sadece F/D değeri 0.6 olan parabolik reflektördür. Sonunda, yeni bir reflektör anten yapısı Şekil 6.35'te verildiği gibi tasarlanmıştır. Şekil 6.35'te nihai reflektör yapısında, 7 GHz frekansında her iki düzlemde taşma görülmeyecek, sistem verimli bir şekilde aydınlatılabilecektir.

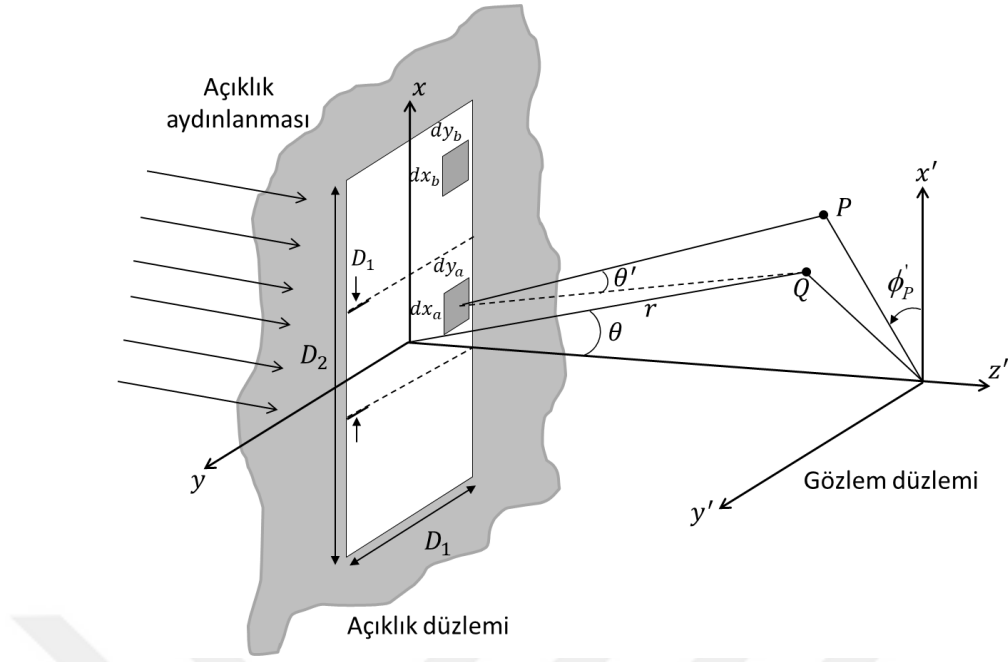


Şekil 6.35 Düzlemsel lens anten beslemeli şekillendirilmiş reflektör yapısı

6.5 Işıma Karakteristiğinin Analitik Analizi

Son bölümde, reflektör anten geniş bantlı düzlemsel lens anten tarafından beslendiğinde hem E hem de H düzlemi ışınlarını desteklemek için yeni bir reflektör yapısı tasarımı yapılmıştır. Nihai reflektör yapısının E düzlemi ışınları, Şekil 6.33'te verilen ışın izleme çizimleri ile aynı olacaktır. Şekil 6.25'te verilen ışın izleme çizimleri ise nihai yapının H düzlemi ışınları için de geçerli olacaktır. Nihai reflektör yapısının, düzlemsel lens anten tarafından E düzlemindeki tüm çalışma bant genişliğinde verimli bir şekilde beslenebileceği sonucuna varılabilmektedir. H düzlemindeki yüksek çalışma frekanslarında, yansıyan elektromanyetik dalga taşma yaparak yayılmaktadır.

Daha önceki bölümlerde olduğu gibi bu bölümde de analitik çözümler için skaler kırınım yaklaşımı uygulanmıştır [40]. Düzlem üzerinde bir dikdörtgen açıklık ışın dağılımı olarak temsil edilebilir. Analitik çözümde nihai reflektör yapısının önündeki hayali açıklığın, Şekil 6.36'da vurgulandığı gibi neredeyse dikdörtgen şeklinde olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 6.36 Düzlemsel lens anten beslemeli şekillendirilmiş reflektör açıklık yapısı

Şekil 6.36'da verilen dikdörtgen açıklık düzlemi F/D oranı 2.5 olan reflektör için $E_a(x_a, y_a)$; F/D oranı 0.6 olan reflektör için $E_b(x_b, y_b)$ elektrik alan dağılımı ile aydınlatılır. Skaler kırınım yaklaşımı göz önüne alındığında, reflektör açıklığı tarafından yayılan elektrik alan şu şekilde verilebilir:

$$\tilde{E}(r, \theta, \phi) = \frac{j}{\lambda} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) \tilde{h}(\theta, \phi) \quad (6.1)$$

Şekil 6.36'da verilen açıklık, iki farklı reflektör yüzeyinin oluşturulmasıyla oluşturulduğundan reflektörün diferansiyel açıklık yüzeyleri kartezyen koordinat sisteminde F/D=2.5 oranı için $ds_1 = dx_a dy_a$, F/D=0.6 oranı için $ds_2 = dx_b dy_b$ olarak ifade edilmektedir. Form faktörü aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\begin{aligned} \tilde{h}(\theta, \phi) = & \int_{x_a=-D_1/2}^{D_1/2} \int_{y_a=-D_1/2}^{D_1/2} E_a(x_a, y_a) e^{jk(x_a \sin \theta \cos \phi + y_a \sin \theta \sin \phi)} dx_a dy_a + \\ & \int_{x_b=-(D_2-D_1)/2}^{(D_2-D_1)/2} \int_{y_b=-D_1/2}^{D_1/2} E_b(x_b, y_b) e^{jk(x_b \sin \theta \cos \phi + y_b \sin \theta \sin \phi)} dx_b dy_b \end{aligned} \quad (6.2)$$

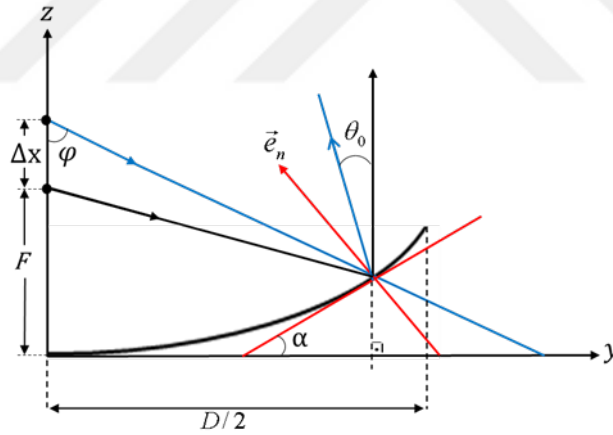
Şekil 6.36'da gösterilen dikdörtgensel açıklık, y-z düzleminde E düzlemi eşleniği $\phi = \pi/2$ 'dir. Bu durumda 6.2. formül aşağıdaki şekle dönüşmektedir:

$$\tilde{h}(\theta) = \int_{x_a=-D_2/2}^{D_2/2} \int_{y_a=-D_1/2}^{D_1/2} E_a(y_a) e^{jk y_a (\sin\theta - \sin\theta_0)} dx_a dy_a \quad (6.3)$$

Benzer şekilde, x-z düzlemi için H düzlem eşleniği $\phi = 0$ 'dır ve formül aşağıdaki şekle dönüşmektedir:

$$\begin{aligned} \tilde{h}(\theta) = & \int_{x_a=-D_1/2}^{D_1/2} \int_{y_a=-D_1/2}^{D_1/2} E_a(y_a) e^{jk x_a (\sin\theta - \sin\theta_0)} dx_a dy_a + \\ & \int_{x_a=-(D_2-D_1)/2}^{(D_2-D_1)/2} \int_{y_a=-D_1/2}^{D_1/2} E_b(x_b) e^{jk(x_b \sin\theta + \sin\theta_0)} dx_b dy_b \end{aligned} \quad (6.4)$$

6.3 ve 6.4'te θ_0 yansıyan ışın açısını göstermektedir. Düzlemsel lens antenin odağı ile E ve H düzlemlerinin faz merkezi çakıştırıldığında yansıyan ışınlar Şekil 3.12'de tahmin edildiği gibi ilerleyecek ve yansıtılan her bir ışının radyasyon yönü $\theta_0 = 0$ olacaktır. Örneğin Şekil 6.37'de görüldüğü gibi E düzlemi F odak noktasından (210 mm) Δx kadar uzaklıkta bulunan 4 GHz faz merkezi noktasından (219 mm) gelen ışınlar 3.4 eşitliği kullanılarak θ_0 yansıma açısı 1.2° olarak bulunmuş ve $\theta_0 \approx 0^\circ$ kabul edilmiştir.



Şekil 6.37 θ_0 açısıyla yansıyan dalganın gösterimi

Antenin faz merkezinin reflektör yapısının odağı ile çakışmaması durumunda, yansıyan elektromanyetik dalga paralel ilerlemeyecektir. Bu durum tahmin edildiği gibi H düzlem ışımasında görülecektir. Tezin ikinci bölümünde ayrıntılı açıklandığı gibi paralel yansımayan ışınların açısı θ_0 , 3.4 formülü ile hesaplanmaktadır.

Nihai yapıda, reflektör yüzeyi üzerindeki genlik azalması çalışma frekans bandında sabit değildir. Açıklık üzerindeki genlik dağılımı, Şekil 6.33 (b)'de gösterildiği gibi 7 GHz'de düzlem ışıma -10 dB'ye eşitken 7 GHz'e kadar frekanslarda daha yüksek genlik dağılımı değerleri görülmektedir. Ayrıca, genlik dağılımı değeri, Şekil 6.33

(c)'de verildiği gibi -10 dB'den düşüktür. Benzer bir şekilde düzlemdeki genlik dağılımı Şekil 6.25'te gösterildiği gibi en yüksek çalışma frekansına kadar -10 dB'den daha yüksektir. Bu kenar daralma karakteristiklerinin bir sonucu olarak, tüm çalışma frekansları için geçerli olan reflektör açıklığı üzerinde tek bir genlik dağılım fonksiyonu belirlemek mümkün değildir. Bu sebeple, E düzlemindeki genlik dağılımları aşağıdaki kosinüs fonksiyonu ile karakterize edilmiştir:

$$E_a(x_a) = \cos(x_a \times \pi \times a_f \times 10^{-4}); \quad -D_2/2 \leq x_a \leq D_2/2 \quad (6.5)$$

6.5'te belirtilen a_f , ilgili frekansta E düzlemi genlik dağılımını belirten katsayıdır. 4 GHz frekansında a_f , Şekil 6.5(a)'da verilen besleme anteninin E düzlemi ışıma örüntüsü dikkate alınarak 2.61, 7 GHz'de 2.81 ve 12 GHz olarak 2.95 olarak belirlenmiştir. H düzleminde, reflektör açıklığı üzerindeki genlik dağılımı 4 GHz ve 7 GHz'de 6.6 ile sunulabilmektedir. Benzer şekilde, 6.6'daki b_f katsayısı, 4 GHz ve 7 GHz frekansları için sırasıyla 1.16 ve 1.7 olarak ayarlanan açıklık üzerindeki genlik daralmasını karakterize etmektedir.

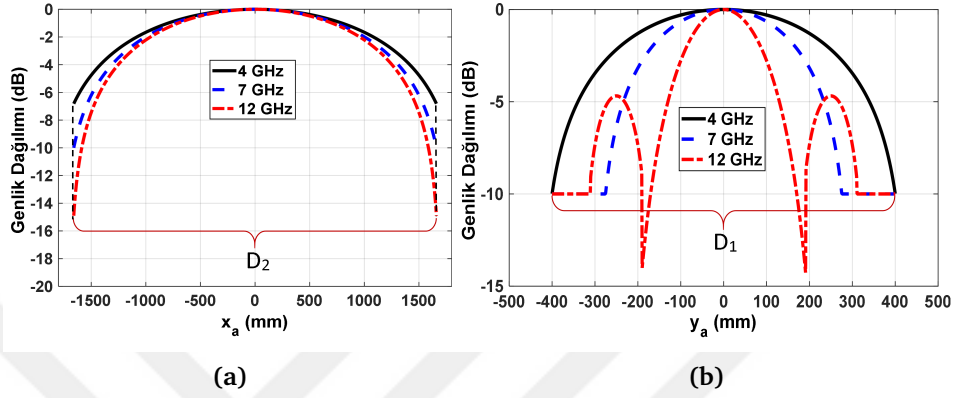
$$E_a(y_a) = \cos(y_a \times \pi \times a_f \times 10^{-3}); \quad -D_2/2 \leq y_a \leq D_2/2 \quad (6.6)$$

Besleme anteni ışımalarının yan lob seviyesi, 7 GHz frekansının üzerinde artış göstermektedir. Yan lob seviyesi, Şekil 6.5 (b)'de verildiği gibi, H düzleminde 12 GHz'de neredeyse -5 dB'ye ulaşmaktadır. Böylece, bu frekanstaki genlik dağılımı aşağıdaki fonksiyonla belirlenmektedir:

$$\begin{aligned} E_a(y_a) = & \cos^{2.6}(y_a \times \pi m \times 10^{-3}); & -190 \leq y_a \leq 190 \\ & \cos(y_a \times \pi n \times 10^{-3}); & -310 \leq y_a \leq -190 \text{ ve } 190 \leq y_a \leq 310 \\ & 0.1; & -D_1/2 \leq y_a \leq -310 \text{ ve } 310 \leq y_a \leq D_1/2 \end{aligned} \quad (6.7)$$

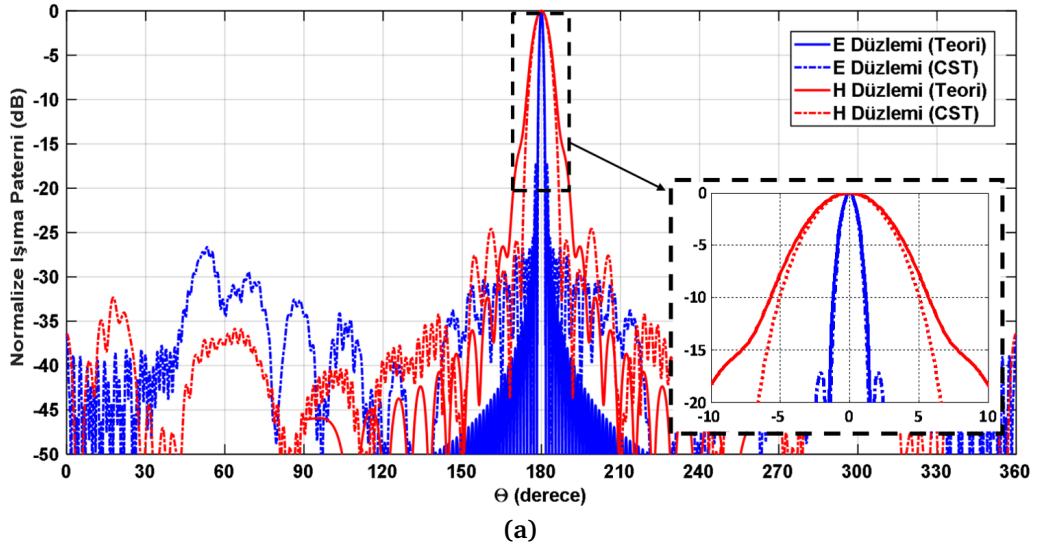
6.7'deki birinci kosinüs fonksiyonu, besleme anteninin ana lobuna bağlı olarak genlik dağılımını tanımlamaktadır. Burada ikinci fonksiyon, beslemenin yan lobunun katkısı ile dağılımı karakterize etmektedir. Ayrıca, açıklığın kenarı etrafındaki genliğin neredeyse sabit olduğu varsayılmaktadır. Her iki düzlemde de nihai reflektör açıklığı üzerindeki genlik dağılımları 6.5, 6.6 ve 6.7 kullanılarak elde edilmekte ve Şekil 6.38'de gösterilmektedir. x_a ve y_a değerleri sıfıra eşit olduğunda, ışıma yoğunluğunun açıklık düzleminin ortasında maksimum değerine ulaştığı Şekil 6.38'de görülmektedir.

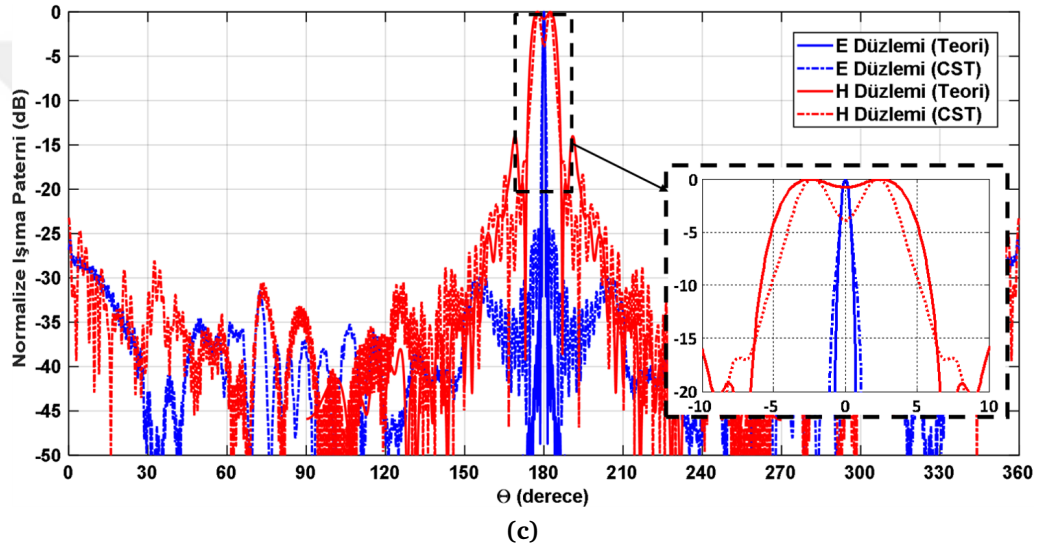
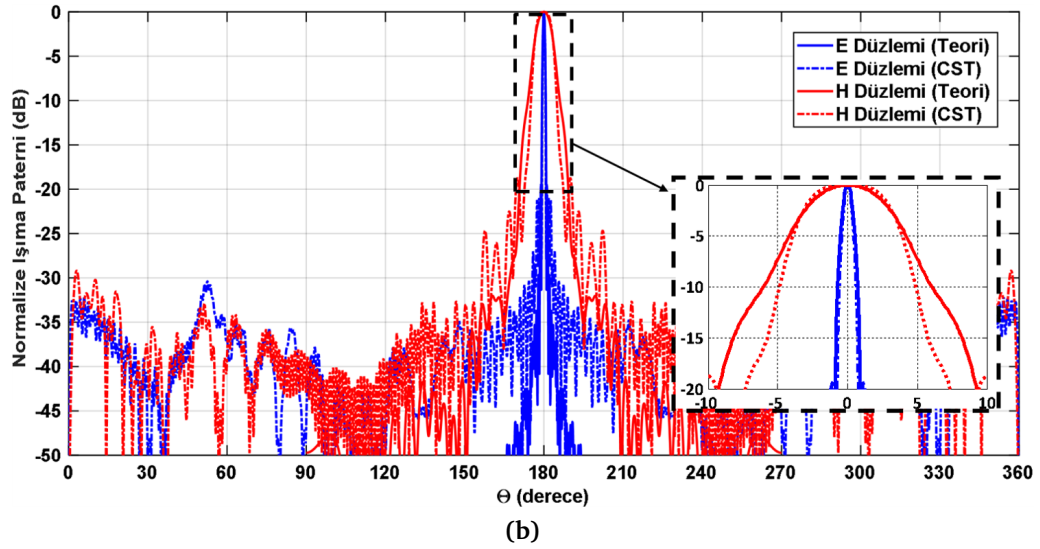
-7 dB, -10 dB ve -15 dB kenar azalma değerleri, Şekil 6.38 (a)'da gösterildiği gibi oluşturulmaktadır. H düzleminde 4 GHz'de dikdörtgen açıklığın kenarında -10 dB genlik daralma değeri meydana gelir. Genlik daralması, y_a için -10 dB'ye, sırasıyla 7 GHz ve 12 GHz frekanslarında 275 mm ve 190 mm'ye eşittir. Şekil 6.38 (b)'de görüldüğü gibi, 275 mm ve 310 mm konumlardan dikdörtgen açıklığın kenarına kadar, genlik daralama değerinin 7 GHz ve 12 GHz'de sabit olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 6.38 Yansıtıcı yapı açıklığı üzerindeki genlik dağılımı; (a) E - düzlem, (b) H - düzlem.

Teorik olarak elde edilen normalize ışıma paternleri, Şekil 6.39'da CST simülasyon sonuçları ile birlikte verilmektedir.



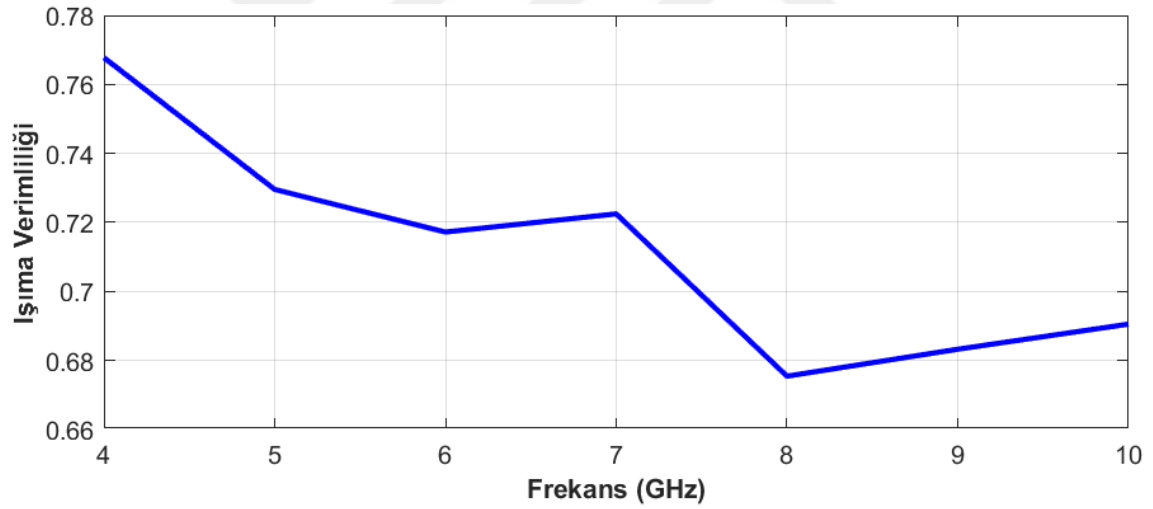


Şekil 6.39 Nihai tasarımın E ve H düzlemi normalize ışıma paternleri (a) 4 GHz (b) 7 GHz ve (c) 10 GHz.

Şekil 6.39 (a)'da, nihai yansıtıcının örüntülerinden, her iki düzlemde de 4 GHz'de kalem şeklinde ışıma yaptığı görülmektedir. Işıma örüntüsünün 10 dB huzme genişliği, E düzleminde yaklaşık olarak 1.5° , H düzleminde yaklaşık 5° 'dir. 12 GHz'deki reflektör açıklığının elektriksel uzunluğu, 4 GHz frekansındaki reflektör açıklığından üç kat daha büyüktür. CST simülasyonları kullanılarak elde edilen yan lob seviyeleri, teorik sonuçlara kıyasla biraz daha yüksek olmakla beraber yine de her iki düzlemde de -18 dB'den düşüktür. 7 GHz frekansında elde edilen ve Şekil 6.39 (b)'de gösterilen normalize ışıma örüntüleri için benzer yorumlar yapılabilmektedir. E düzlemindeki ışıma örüntülerinin 10 dB huzme genişliği, frekans arttıkça daralmaktadır. Bununla birlikte, H düzleminde 10 dB huzme genişliği sabit kalmaktadır. Her iki düzlemdeki yan lob seviyeleri, Şekil 6.39 (b)'de görüldüğü gibi -20 dB'den düşüktür. Maksimum ışıma yönü E düzleminde olmasına rağmen, Şekil 6.39 (c)'de verilen 10 GHz frekansında; yansıtıcı yüzeyden yansıyan ışın H düzleminde

ikiye ayrılmaktadır. Bu durum, F/D oranı 2.5 olan parabolik reflektörün odak noktası ile besleme anteninin faz merkezi arasındaki mesafenin frekans değeri yükseldikçe artmasıyla açıklanabilmektedir. Yüksek frekanslarda reflektör açıklığı üzerindeki genlik dağılımları da yansıyan dalganın iki ışına bölünmesine katkıda bulunmaktadır. Bunun sebebi ise besleme ışmasının yan lob seviyelerinin H düzleminde yüksek frekanslarda -5 dB'ye kadar yükselmesidir. Işıma örüntüsünde teorik olarak elde edilen dalgalanma derinliği 0.8 dB'dir. CST simülasyon sonuçlarında bu seviye yaklaşık 3 dB'dir. Şekil 6.39'da verilen ışıma örüntüleri göz önüne alındığında, skaler kırınım yaklaşımı ile elde edilen nihai yansıtıcı yapının ışıma özelliklerinin her iki düzlemde de tam dalga CST simülasyon sonuçları ile uyum içinde olduğu söylenebilmektedir.

Dalgalanma miktarı 10 GHz frekansı üzerinde artmaktadır. Böylece besleme anteni 4-12 GHz frekans bandı arasında çalışmasına rağmen, tasarlanan yeni reflektörün düzlemsel lens anten tarafından 4-9 GHz frekansları arasında verimli bir şekilde beslenebileceği sonucuna varılmaktadır. Düzlemsel dielektrik lens anten beslemeli nihai reflektör yapısının frekansa bağlı ışıma verimliliği grafiği Şekil 6.40'ta gösterilmektedir.



Şekil 6.40 Düzlemsel lens anten beslemeli nihai reflektör yapısının ışıma verimliliğinin frekans ile değişimi

7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında parabolik reflektör antenlerin geniş bantlı antenlerle beslenmesi durumunda oluşabilecek problemler incelenmiştir. Parabolik reflektör antenini en yüksek verimde aydınlatabilmek için frekans değişimine göre neredeyse sabit faz merkezi konumuna sahip, geniş bantta yayılım yapabilen besleme antenleri tercih edilmektedir. Bu hedeflere sahip horn anten ve dairesel simetrik yapılı lens besleme antenleriyle beslendiklerinde reflektör yapılarının sistemsal tasarım problemleri incelenmiş, sebepleri araştırılmış, yöntem uygulamaları ile sistem karakteristiği incelenmiştir.

Tez çalışmasında farklı geniş bantlı antenlerin reflektör beslemesi olarak kullanılması durumunda oluşacak problemleri incelemeyen önce ideal reflektör beslemesi olarak sıklıkla kullanılan horn anten beslemeli reflektör anten tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle horn anten tasarımı yapılmış, simülasyon CST benzetim programında koşturulmuş ve sonuçları gösterilmiştir. Ardından faz merkezi hareketine bağlı eksenel odaklanamama ve astigmatizm kayıpları hesaplanmıştır. Horn antende faz merkezi kayması en fazla 9 mm olmakta ve bu uzunluk ihmal edilebilir seviyelerde kabul edilmektedir. Horn antenin frekans değişimi ve E-H düzlemlerinde neredeyse sabit faz merkezi konumu nedeniyle faz bozulma oranının çok düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Ardından horn antenin E ve H düzlem 10 dB huzme genişliklerine göre reflektör sistemi tasarlanmış, simülasyon CST’de koşturulmuştur. Geometrik optik yöntemi ile ışının aldığı yol tespit edilmiş, gelen ve yansıyan ışınlar karşılaştırmalı olarak 4, 5.8 ve 7 GHz frekanslarında gösterilmiştir. Yine faz merkezindeki stabilite nedeniyle reflektörden yansıyan ışınların birbirine paralel ilerlediği görülmüştür. Son olarak horn anten beslemeli reflektör antenin analitik çözümü skaler kırınım yaklaşımı ile incelenmiştir. Normalize ışına örüntülerinden CST ve skaler kırınım yaklaşımı sonuçlarının birbirleriyle neredeyse eş olduğu görülmüştür.

Tez çalışmasının ilerleyen bölümünde reflektör anten sistemlerinde önemli bir sorun yaratan blokaj etkisi incelenmiştir. Bu amaçla farklı besleme antenlerinin aynı reflektör üzerinde oluşturacağı blokaj etkisi incelenmiştir. Aynı çap uzunluğuna

sahip reflektörler konik horn ve piramit horn antenlerle beslenmiş ve sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ardından aynı besleme antenleri kullanılarak sadece blokaj etkisini ölçebilmek amacıyla F/D değeri aynı olan 20 dB kenar azalması değerine sahip dört farklı reflektör senaryosu tasarlanmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde öncelikle dairesel simetrik dielektrik lens anten tanıtılmıştır. Ardından lens antenin faz hatası kaybı hesaplanmıştır. Dairesel simetrik lens anten 2. bölümde tasarlanan horn anten gibi frekans ve E-H düzlemlerinde faz merkezi konumlarında yer değiştirmenin az olduğu bir antendir. Yapılan hesaplamalar sonucu lens antenin faz hatası kaybının önem arz etmeyecek kadar düşük olduğu görülmüştür. Ardından dairesel simetrik lens anten beslemeli reflektör tasarımları yapılmış, tasarım CST simülasyon programında koşturulmuştur. Dairesel simetrik lens antenden çıkıp reflektörden yansıyan ışınlar incelenmiş, lens antenin faz değişimindeki stabilite nedeniyle yansıyan ışınların birbirlerine paralel ilerlediği 4, 7 ve 12 GHz frekanslarında karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Son kısımda ise dairesel simetrik lens antenin analitik çözümü skaler kırınım yaklaşımı ile incelenmiş ve CST simülasyon sonuçlarıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde tez çalışmasının yapılma amacı olan düzlemsel lens antenin reflektör beslemesi olarak kullanılması durumundaki oluşan problemler incelenmiştir. Düzlemsel lens antenin E düzlem faz merkezi yer değiştirmesi en fazla 19 mm olmakla birlikte faz bozulması çok düşük seviyelerdedir. H düzleminde faz merkezi lensin fiziksel konumunun gerisine düşmekle birlikte yer değişim miktarı çok yüksek olmaktadır. H düzlemindeki yer değiştirme miktarı 620 mm'ye kadar çıkmaktadır. Bu sebeple E düzleminde eksenel odaklanamamaya bağlı faz bozulması dikkate alınmayacak kadar düşük bulunurken H düzleminde 1,6 dB'ye kadar çıkmaktadır. H düzlemindeki yüksek faz merkezi konumu değişimi nedeniyle astigmatizme bağlı faz hatası kaybı da yüksek olmaktadır. Düzlemsel lens antenin astigmatizme bağlı faz hatası kaybı en düşük 0,0098 dB olmakla birlikte en yüksek faz bozulması, 12 GHz frekansında 5,0498 dB olarak görülmektedir.

Düzlemsel lens antenin faz hatası kaybı hesaplamalarının ardından E ve H düzlemi 10 dB huzme genişliğine göre reflektör tasarımları yapılmıştır. E düzlemi faz merkezi konumuna göre yapılan reflektör tasarımında reflektörün odağı (2000 mm) ile E düzlemi faz merkezi (220 mm) çakıştırılmıştır. Bu durumda sistemin E düzlemi faz merkezinden yayılan elektromanyetik dalga kendisine uygun tasarlanan reflektör ile beslendiğinden kalem huzme ışıma sonucu alınmış olup H düzleminde -960 mm'den yayılım yapılması nedeniyle bu düzlemde taşma problemi olduğu görülmüştür. Reflektör tasarımı H düzlem faz merkezine göre yapıldığında ise H düzlemi faz merkezi (480 mm) ile reflektör odağı çakıştırılmıştır. Bu senaryoda yine bir düzlemde kalem

huzme elde edilirken diğ er düzlemde fan huzme elde edilmiştir.

Işın takibi yöntemiyle gelen, yansıyan ve taşan ışınlar 4, 7 ve 12 GHz frekanslarında incelenmiştir. Bu yöntem ile ışının faz merkezi konumuna göre aldığı yol görülebilmekte, faz merkezi değişimine göre reflektörden yansıyan ışınların yayılma, toplanma ya da taşması rahatlıkla incelenebilmektedir. Işın takibi yöntemi ile uzun simülasyon süreleri beklemeden sistemin ışıma karakteristiği hakkında fikir edinilmiştir. Son olarak düzlemsel lens anten beslemeli reflektör antenin analitik c oz umu daha önceli b olumlerde de yapıldığı gibi skaler kırınım yaklaşımı ile yapılmıştır. Bu yaklaşım sonucunda düzlemsel lens anten beslemeli reflektör yapısının ışıma özelliklerinin her iki düzlemde de CST simülasyon sonuçları ile uyum içinde olduğu söylenebilmektedir.



- [1] Y. Rahmat-Samii, R. Haupt, "Reflector antenna developments: A perspective on the past, present and future," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 85–95, 2015.
- [2] A. Hosseini, S. Kabiri, F. De Flaviis, "V-band high-gain printed quasi-parabolic reflector antenna with beam-steering," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 1589–1598, 2017.
- [3] S. Xu, Y. Rahmat-Samii, D. Gies, "Shaped-reflector antenna designs using particle swarm optimization: An example of a direct-broadcast satellite antenna," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 7, pp. 1341–1347, 2006.
- [4] C. Sletten, R. Mack, W. Mavroides, H. Johanson, "Corrective line sources for paraboloids," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 3, pp. 239–251, 1958.
- [5] Y. Lo, "On the beam deviation factor of a parabolic reflector," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 3, pp. 347–349, 1960.
- [6] J. Ruze, "Lateral-feed displacement in a paraboloid," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 13, no. 5, pp. 660–665, 1965.
- [7] W. Rusch, A. Ludwig, "Determination of the maximum scan-gain contours of a beam-scanning paraboloid and their relation to the petzval surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 21, no. 2, pp. 141–147, 1973.
- [8] A. Rudge, "Multiple-beam antennas: Offset reflectors with offset feeds," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 23, no. 3, pp. 317–322, 1975.
- [9] W. Imbriale, P. Ingerson, W. Wong, "Large lateral feed displacements in a parabolic reflector," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 22, no. 6, pp. 742–745, 1974.
- [10] A. V. Mrstik, "Scan limits of off-axis fed parabolic reflectors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 27, no. 5, pp. 647–651, 1979.
- [11] B. Rao, "Bifocal dual reflector antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 22, no. 5, pp. 711–714, 1974.
- [12] C. Rappaport, "An offset bifocal reflector antenna design for wide-angle beam scanning," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 32, no. 11, pp. 1196–1204, 1984.
- [13] S. Wu, A. Ishimaru, "Fields in the focal region of a parabolic torus reflector," in *1970 Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, vol. 8, 1970, pp. 438–445.

- [14] C. Sletten, S. Carrillo, "Scanning multibeam communication antennas," in *1984 Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, vol. 22, 1984, pp. 474–477.
- [15] K.-H. Lee, C.-C. Chen, R. Lee, "Uwb dual-linear polarization dielectric horn antennas as reflector feeds," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 798–804, 2007.
- [16] C. Bruns, P. Leuchtmann, R. Vahldieck, "Analysis and simulation of a 1-18-ghz broadband double-ridged horn antenna," *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 45, no. 1, pp. 55–60, 2003.
- [17] A. Akgiray, S. Weinreb, W. A. Imbriale, C. Beaudoin, "Circular quadruple-ridged flared horn achieving near-constant beamwidth over multioctave bandwidth: Design and measurements," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 3, pp. 1099–1108, 2012.
- [18] M. Mahmoud, T. Lee, W. Burnside, "An sbh antenna with a pulse type main beam," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No. 99CH37010)*, IEEE, vol. 1, 1999, pp. 96–99.
- [19] T. Tiwari, V. Tiwari, "Comparative studies of radiation patterns of solid and hollow dielectric diagonal horn antennas," in *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility'99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487)*, IEEE, 1999, pp. 245–248.
- [20] C. Bruns, P. Leuchtmann, R. Vahldieck, "Analysis and simulation of a 1-18-ghz broadband double-ridged horn antenna," *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 45, no. 1, pp. 55–60, 2003.
- [21] C. Bruns, P. Leuchtmann, R. Vahldieck, "Comprehensive analysis and simulation of a 1-18 ghz broadband parabolic reflector horn antenna system," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 6, pp. 1418–1422, 2003.
- [22] J. R. Costa, C. A. Fernandes, G. Godi, R. Sauleau, L. Le Coq, H. Legay, "Compact ka-band lens antennas for leo satellites," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 5, pp. 1251–1258, 2008.
- [23] O. Yurduseven, D. Cavallo, A. Neto, "Wideband dielectric lens antenna with stable radiation patterns fed by coherent array of connected leaky slots," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 62, no. 4, pp. 1895–1902, 2014.
- [24] C. A. Fernandes, E. B. Lima, J. R. Costa, "Broadband integrated lens for illuminating reflector antenna with constant aperture efficiency," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 58, no. 12, pp. 3805–3813, 2010.
- [25] A. Love, "Central blocking in symmetrical cassegrain reflectors," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 34, no. 1, pp. 47–49, 1992.
- [26] A. P. Popov, T. Milligan, "Amplitude aperture-distribution control in displaced-axis two-reflector antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 58–63, 1997.
- [27] P. J. Clarricoats, G. T. Poulton, "High-efficiency microwave reflector antennas-a review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, no. 10, pp. 1470–1504, 1977.

- [28] A. Love, "Some highlights in reflector antenna development," *Radio Science*, vol. 11, no. 8-9, pp. 671–684, 1976.
- [29] P. Hannan, "Microwave antennas derived from the cassegrain telescope," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 9, no. 2, pp. 140–153, 1961.
- [30] V. Galindo, "Design of dual-reflector antennas with arbitrary phase and amplitude distributions," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 12, no. 4, pp. 403–408, 1964.
- [31] W. Williams *et al.*, "High efficiency antenna reflector," *MiJo*, vol. 8, no. 7, pp. 79–82, 1965.
- [32] A. W. Rudge, N. A. Adata, "Offset-parabolic-reflector antennas: A review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 12, pp. 1592–1618, 1978.
- [33] J. Lee, L. Parad, R. Chu, "A shaped offset-fed dual-reflector antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 27, no. 2, pp. 165–171, 1979.
- [34] P-S. Kildal, "The effects of subreflector diffraction on the aperture efficiency of a conventional cassegrain antenna—an analytical approach," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 31, no. 6, pp. 903–909, 1983.
- [35] A. Karttunen, K. Piironen, J. Ala-Laurinaho, A. V. Räisänen, "Millimetre-wave dielectric slab and parallel plate waveguide dielectric lens antennas for beam steering," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, IEEE, 2014, pp. 459–462.
- [36] C. Hua, N. Yang, X. Wu, W. Wu, "Millimeter-wave fan-beam antenna based on step-index cylindrical homogeneous lens," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1512–1516, 2012.
- [37] A. Mirkamali, J.-J. Laurin, F. Siaka, R. Deban, "A planar lens antenna with circular edge inspired by gaussian optics," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 9, pp. 4476–4483, 2013.
- [38] F. Tokan, N. T. Tokan, A. Neto, D. Cavallo, "The lateral wave antenna," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 62, no. 6, pp. 2909–2916, 2014.
- [39] R. Udaiyakumar, T. Janani, R. Vigneshram, R. Maheswar, I. S. Amiri, "A fan-beam stacked array x-band radar antenna," *National Academy Science Letters*, pp. 1–4, 2019.
- [40] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design, 2nd ED*. New York: John Wiley and Sons, 1997, pp. 584–603, ISBN: 978-8126513932.
- [41] M. Kartal, İ. Gungor, "Frekans seçici yüzeyler kullanarak İki farklı frekansta İstenilen ışınma desenlerine sahip reflektör anten tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, M.S. thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi, Telekomünikasyon Mühendisliği, İstanbul, 2012.
- [42] S. Chen, *How Noisy Chinese Tourists May Be Drowning Out Interstellar Signals at the World's Biggest Telescope*, <https://www.businessinsider.com/chinese-tourist-disrupt-fast-signals-worlds-biggest-telescope-2017-8>, 2020.
- [43] T. A. Milligan, *Modern Antenna Design*. New York: McGraw-Hill, 1985, pp. 239–249.

- [44] J. D. Dyson, "Determination of the phase center and phase patterns of antennas," in *Radio Antennas for Aircraft and Aerospace Vehicles*, Technivision Services, 1967.
- [45] N. Türker, "Otomotiv uygulamaları için dielektrik lens anten tasarımı," Yüksek Lisans Tezi, M.S. thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, İstanbul, 2014.
- [46] A. Hatami, A. S. Arezomand, F. B. Zarrabi, "Phase center controlling in vivaldi antenna: Review and development of the story," *Journal of Computational Electronics*, pp. 736–749, 2020.
- [47] H. Kara, N. T. Tokan, "Additional losses in ultra-wide band reflector systems.," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 31, no. 1, 2016.
- [48] N. T. Tokan, "Optimization of the uwb feed antenna position in reflector applications," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014.
- [49] P-S. Kildal, *Foundations of antenna engineering: a unified approach for line-of-sight and multipath*. Artech House, 2015.
- [50] M. J. van der Vorst, P. J. de Maagt, M. H. Herben, "Effect of internal reflections on the radiation properties and input admittance of integrated lens antennas," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, no. 9, pp. 1696–1704, 1999.
- [51] *The homepage of CST Microwave Studio*, <http://www.cst.com>.
- [52] N. T. Nguyen, R. Sauleau, C. J. M. Perez, "Very broadband extended hemispherical lenses: Role of matching layers for bandwidth enlargement," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 57, no. 7, pp. 1907–1913, 2009.
- [53] N. Sonmez, F. TOKAN, "Influences of amplitude tapering and feed blockage on the radiation characteristics of ku-band parabolic reflector antennas," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 322–330, 2020.
- [54] N. T. Tokan, "Performance of vivaldi antennas in reflector feed applications.," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 28, no. 9, 2013.
- [55] V. Manohar, J. M. Kovitz, Y. Rahmat-Samii, "Synthesis and analysis of low profile, metal-only stepped parabolic reflector antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 6, pp. 2788–2798, 2018.
- [56] A. Prata, F. J. Moreira, L. R. Amaro, "Displaced-axis-ellipse reflector antenna for spacecraft communications," in *Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference-IMOC 2003.(Cat. No. 03TH8678)*, IEEE, vol. 1, 2003, pp. 391–395.
- [57] N. Fourikis, "A parametric study of the constraints related to gregorian/cassegrain offset reflectors having negligible cross polarization," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 36, no. 1, pp. 144–147, 1988.
- [58] R. Lehmensiek, I. P. Theron, D. I. de Villiers, "Deriving an optimum mapping function for the ska-shaped offset gregorian reflectors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4658–4666, 2015.

- [59] F. J. Moreira, A. Prata, "Generalized classical axially symmetric dual-reflector antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 4, pp. 547–554, 2001.
- [60] A. Demirci, N. Sonmez, F. Tokan, N. T. Tokan, "Phase error analysis of displaced-axis dual reflector antenna for satellite earth stations," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 110, p. 152 824, 2019.
- [61] N. T. Nguyen, A. V. Boriskin, A. Rolland, L. Le Coq, R. Sauleau, "Shaped lens-like dome for uwb antennas with a gaussian-like radiation pattern," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1658–1664, 2012.
- [62] A. Kohmura, S. Futatsumori, N. Yonemoto, M. Matsuzaki, "W-band antenna-reflector combined in a lens," in *The 7th European Radar Conference*, IEEE, 2010, pp. 356–359.
- [63] M. Mayer, K. Baur, T. Walter, "Packaging technologies for highly integrated 77 ghz automotive radar sensors," in *2009 European Microwave Conference (EuMC)*, IEEE, 2009, pp. 1311–1314.
- [64] R. Brown, "Dielectric bifocal lenses," in *1958 IRE International Convention Record*, IEEE, vol. 4, 1966, pp. 180–187.
- [65] J. Thornton, A. White, D. Gray, "Multi-beam lens-reflector for satellite communications: Construction issues and ground plane effects," in *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, IEEE, 2009, pp. 1377–1380.
- [66] F. Tokan, "Optimization-based matching layer design for broadband dielectric lens antennas," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 29, no. 6, 2014.
- [67] A. Neto, "Uwb, non dispersive radiation from the planarly fed leaky lens antenna—part 1: Theory and design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 7, pp. 2238–2247, 2010.
- [68] A. Rolland, R. Sauleau, L. Le Coq, "Flat-shaped dielectric lens antenna for 60-ghz applications," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 59, no. 11, pp. 4041–4048, 2011.
- [69] J. R. Costa, E. B. Lima, C. A. Fernandes, "Antenna phase center determination from amplitude measurements using a focusing lens," in *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, 2010, pp. 1–4.

Makale

1. A. Demirci, N. Sonmez, F. Tokan, N. T. Tokan, “Phase error analysis of displaced-axis dual reflector antenna for satellite earth stations,” AEU International Journal of Electronics and Communications, vol. 110, p. 152 824, 2019.
2. N. Sonmez, F. TOKAN, “Influences of amplitude tapering and feed blockage on the radiation characteristics of ku-band parabolic reflector antennas,” Applied Computational Electromagnetics Society Journal, vol. 35, no. 3, pp. 322–330, 2020.
3. Nurdan T. Sönmez, Fikret Tokan, “A Novel, Combined Reflector Antenna Design Procedure for Ultra-Wide Band Planar Lens Antenna Feeds,” AEU International Journal of Electronics and Communications, vol. 132, 153650, 2021.