

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV RADARI İÇİN DÜZLEMSEL DİELEKTRİK LENS
ANTEN TASARIMI

Murat TARANCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Danışman
Prof. Dr. Fikret TOKAN

Mart, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV RADARI İÇİN DÜZLEMSEL DİELEKTRİK LENS ANTEN
TASARIMI**

Murat TARANCI tarafından hazırlanan tez çalışması 15.03.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Haberleşme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fikret TOKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fikret TOKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hamit TORPİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sultan ALDIRMAZ ÇOLAK, Üye
Kocaeli Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Fikret TOKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Otomotiv Radarı için Düzlemsel Dielektrik Lens Anten Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Murat TARANCI

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bilgi ve deneyimleriyle bana ışık tutan değerli hocam Prof. Dr. Fikret TOKAN'a, tez yazım sürecinde her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan aileme teşekkür ederim.

Ayrıca anten prototipinin üretim aşamasında yardımcı olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Selami Demir'e ve Dr. Alper Çalışkan'a teşekkür ederim.

Murat TARANCI



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	6
2 DÜZLEMSEL DİELEKTRİK LENS ANTEN TASARIMI	8
2.1 Yanal Dalga Dielektrik Lens Anten	8
2.2 Anten Boyutlarının Belirlenmesi	9
2.2.1 24-27 GHz Bandı için Diziyi Oluşturan Elemanın Parametrik Tasarımı	12
2.2.2 76-81 GHz Bandı için Diziyi Oluşturan Elemanın Parametrik Tasarımı	16
2.3 Bow-tie Besleme Yapısının Boyutlarının Optimizasyonu	19
2.4 Uydurma Katmanlarının Optimizasyonu	24
3 HÜZME YÖNLENDİRME İÇİN ANALİTİK YAKLAŞIM	29
3.1 Paralel Uydurma Katmanlı Yapıda Kritik Açıların Analitik İncelemesi	29
3.2 Dairesel Uydurma Katmanlı Yapıda Kritik Açıların Analitik İncelemesi	38
3.2.1 25,5 GHz Merkez Frekansı için MATLAB Sonuçları	43
3.2.2 78,5 GHz Merkez Frekansı için MATLAB Sonuçları	48
4 UZAK ALAN IŞIMA PATERNLERİNİN VE YANSIMA KATSAYILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	55
4.1 Tek Elemanlı Anten için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansım Katsayıları	56
4.1.1 24-27 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansım Katsayıları	56
4.1.2 76-81 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansım Katsayıları	64
4.2 8 Elemanlı Anten Dizisi için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansım Katsayıları	71

4.2.1	24-27 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları.....	72
4.2.2	76-81 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları.....	78
5	3B PROTOTİP ÜRETİMİ	85
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
	KAYNAKÇA	93
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	96



SİMGE LİSTESİ

$\lambda_{24\text{GHz}}$	24 GHz frekansının dielektrik ortamdaki dalga boyu uzunluğu
$\lambda_{81\text{GHz}}$	81 GHz frekansının dielektrik ortamdaki dalga boyu uzunluğu
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
b	Bow-tie besleme kolunun kısa kenar uzunluğu
a	Bow-tie besleme kolunun uzun kenar uzunluğu
g	Bow-tie besleme kolları arası açıklık uzunluğu
r_0	Çekirdek yarıçapı
h	Dielektrik lens anten kalınlığı
ϵ_{hava}	Hava ortamının dielektrik sabiti
t_k	k. uydurma katmanının kalınlığı
$\tan\delta$	Kayıp tanjantı
φ	Küresel koordinatlarda azimut açısı
L	Lens antenin uzatma bölümünün uzunluğu
λ_0	Serbest uzaydaki dalga boyu
f_{hava}	Malzemenin bağıl boşluk oranı
f_m	Malzemenin bağıl malzeme oranı
ϵ_m	Malzemenin dielektrik sabiti
ϵ_{eff}	Malzemenin efektif dielektrik sabiti
f_c	Merkez frekans değeri
$\epsilon(k,n)$	n uydurma katmanlı yapının k. elemanının bağıl dielektrik sabiti
$t_h(k,n)$	n uydurma katmanlı yapının k. elemanının kalınlığı
β_n	n. kırılma noktasının geliş açısı
α_n	n. kırılma noktasının normal doğrusunun açısı
θ_n	n. kırılma noktasının y-eksenine göre yönlendirme açısı
S_{mn}	n. porttan m. porta iletim katsayısı

λ_n	n. uydurma katmanındaki dalga boyu
ϵ_n	n. uydurma katmanının bağıl dielektrik sabiti
r_n	n. uydurma katmanının dış yarıçapı
Γ_m	m portu için aktif yansıma katsayısı
d	PEC materyal kalınlığı Dizi elemanları arası uzaklık
c_0	Serbest uzaydaki ışık hızı
k	Uydurma katmanları arasındaki ışın doğru parçasının uzunluğu Dalga sayısı
p	Uydurma katmanlarındaki ışın doğru parçasının orijine dik uzaklığı



KISALTMA LİSTESİ

ACC	Adaptive Cruise Control (Uyarlanabilir Seyir Kontrolü)
AEB	Automatic Emergency Braking (Otomotik Acil Durum Frenlemesi)
BSD	Blind Spot Detection (Kör Nokta Algılama)
CST	Computer Simulation Technology (Bilgisayarlı Benzetim Teknolojisi)
DBF	Digital Beam Forming (Dijital Işın Şekillendirme)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi)
FDM	Fused Deposition Modeling (Ergiyik Biriktirmeli Modelleme)
FDTD	Finite Difference Time Domaine (Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi)
ISM	Industrial Scientific Medical (Endüstriyel Bilimsel ve Medikal)
ITU	International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
LCA	Lane Change Assistance (Şerit Değişirme Yardımı)
LIDAR	Light Detection and Ranging (Işık Algılama ve Mesafe Tayini)
LLR	Long Range Radar (Uzak Menzil Radarı)
MATLAB	MATrix LABoratory (Matris Laboratuvarı)
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit (Monolitik Mikrodalga Tümlşik Devre)
MRR	Middle Range Radar (Orta Menzil Radarı)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış)
PEC	Perfect Electrical Conductor (Mükemmel İletken)
PPW	Parallel Plate Waveguide (Paralel Tabakalı Dalga Kılavuzu)
SRR	Short Range Radar (Kısa Menzil Radarı)
UK	Uydurma Katmanı
YGHG	Yarım Güç Hüzme Genişliği

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Otonom araç sistemlerinde otomotiv radarları ve diğer sensörlerin kullanıldığı uygulamalar	2
Şekil 1.2	Bosch LRR3 otomotiv radar sensörünün iç yapısı [1]	3
Şekil 2.1	Yanal dalga dielektrik lens anten (a) üst görünüşü (b) yan görünüşü	8
Şekil 2.2	Tek elemanlı düzlemsel dielektrik lens anten (a) perspektif görünüşü (b) besleme yapısı	10
Şekil 2.3	Küresel koordinatlarda 8 elemanlı düzlemsel dielektrik lens anten dizisinin yerleşimi	11
Şekil 2.4	Bow-tie besleme yapısının parametrik uzunlukları.....	13
Şekil 2.5	Farklı dalga boyları için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi (a) $\lambda_{24\text{GHz}}$ (b) $\lambda_{25,5\text{GHz}}$ (c) $\lambda_{27\text{GHz}}$	14
Şekil 2.6	Farklı dalga boyları için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi (a) $\lambda_{76\text{GHz}}$ (b) $\lambda_{78,5\text{GHz}}$ (c) $\lambda_{81\text{GHz}}$	17
Şekil 2.7	$a=2\lambda$ değeri için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi.....	20
Şekil 2.8	$b=\lambda/8$ değeri için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi	21
Şekil 2.9	$g=\lambda/18$ değeri için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi.....	22
Şekil 2.10	Optimize edilmiş bow-tie yapı ile beslenen lens antene ait yönlülüğün θ ile değişimi	23
Şekil 2.11	Beş farklı uydurma katmanlı lensin $x=0$ noktasındaki bow-tie yapı ile beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (Dış yarıçaplar sabit değil).....	26
Şekil 2.12	Beş farklı uydurma katmanlı lensin $x=0$ noktasındaki bow-tie yapı ile beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (Dış yarıçaplar yaklaşık sabit).....	26
Şekil 3.1	Paralel uydurma katmanlarında kırılmaya uğrayan bir ışının geometrik modeli.....	30
Şekil 3.2	Çekirdek lens ortamından hava ortamına çıkan ışın için geliş açısına bağlı kırılma açısının grafiği	33
Şekil 3.3	Bir paralel uydurma katmanı bulunduğu durumda geliş açısına göre kırılma açılarının grafiği	33
Şekil 3.4	İki paralel uydurma katmanı bulunduğu durumda geliş açısına göre kırılma açılarının grafiği	34
Şekil 3.5	Sırasıyla 3, 4 ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan yapılardaki θ_k kırılma açılarının θ_0 kritik açılara göre değişimlerinin grafikleri (a) UK-3 (b) UK-4 (c) UK-5.....	35
Şekil 3.6	Beş adet uydurma katmanı kullanılan yapı için ışınların geometrik optik modeli.....	37

Şekil 3.7	Dairesel dielektrik uydurma katmanlarında kırılmaya uğrayan bir ışının geometrik optik modeli	38
Şekil 3.8	Dairesel dielektrik uydurma katmanlarında kırılmaya uğrayan bir ışının geometrik optik modeli (Sol yarı-düzlem)	40
Şekil 3.9	Çekirdek kısmından hava ortamına çıkan ışınların kırılma açısı $\beta+\theta$ 'nın x-ekseni üzerindeki besleme noktasına göre değişimi	43
Şekil 3.10	Bir adet uydurma katmanlı dairese yapı için $\beta+\theta$ kırılma açılarının x-ekseni üzerindeki besleme noktasına göre değişimi	44
Şekil 3.11	İki adet uydurma katmanlı dairese yapı için $\beta+\theta$ kırılma açılarının x-ekseni üzerindeki besleme noktasına göre değişimi	44
Şekil 3.12	Artan uydurma katmanlı dairese lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre kırılma açılarının değişimi (a) UK-3 (b) UK-4 (c) UK-5.....	45
Şekil 3.13	25,5 GHz merkez frekansı için 5 adet uydurma katmanı kullanılan dielektrik lens üzerine besleme yapısından gönderilen ışınların geometrik optik modeli	48
Şekil 3.14	Artan uydurma katmanlı dairese lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre $\beta+\theta$ kırılma açılarının değişimi (a) çekirdek (b) UK-1 (c) UK-2 (d) UK-3 (e) UK-4 (f) UK-5	49
Şekil 3.15	78,5 GHz merkez frekansı için beş adet uydurma katmanı kullanılan dielektrik lens üzerine besleme yapısından gönderilen ışınların geometrik optik modeli	53
Şekil 4.1	Besleme yapısı pozisyonları	56
Şekil 4.2	Çekirdek lensin $x=0$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi	57
Şekil 4.3	Beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin $x=0$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi	57
Şekil 4.4	Çekirdek lensin $x=p_1$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi	58
Şekil 4.5	Beş adet uydurma katmanı kullanılan çekirdek lensin $x=p_1$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi	59
Şekil 4.6	$x=p_2$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	60
Şekil 4.7	$x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	61
Şekil 4.8	24-27 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$	62
Şekil 4.9	$x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	65
Şekil 4.10	$x=p_1$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	66

Şekil 4.11	$x=p_2$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	67
Şekil 4.12	$x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	68
Şekil 4.13	76-81 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$	69
Şekil 4.14	Sekiz elemanlı çekirdek lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi.....	72
Şekil 4.15	Sekiz elemanlı 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi.....	73
Şekil 4.16	Sekiz elemanlı 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens anten dizisi için $x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	74
Şekil 4.17	24-27 GHz frekans bandında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens üzerindeki yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$	76
Şekil 4.18	Sekiz elemanlı çekirdek lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi.....	78
Şekil 4.19	Sekiz elemanlı 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi.....	79
Şekil 4.20	Sekiz elemanlı anten dizisi için $x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens	80
Şekil 4.21	76-81 GHz frekans bandında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens üzerindeki yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$	82
Şekil 5.1	Dielektrik lens anten prototipinin 3B baskısı.....	87
Şekil 5.2	Sekiz elemanlı dielektrik lens anten dizisinin 3B prototipi	88
Şekil 5.3	Tek girişli 8 portlu besleme yapısı	89
Şekil 5.4	Bir elemanlı besleme yapısı.....	90

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Otomotiv radarlarının menzillerine göre sınıflandırılması [10]	4
Tablo 1.2	Otomotiv radar sensörlerinde kullanılan anten tipleri için yapılan bazı çalışmalara ait kazanç ve yarım hüzm bant genişliği değerleri [11]	5
Tablo 2.1	24-27 GHz frekans bandı için dalga boylarına bağlı genel parametreler	13
Tablo 2.2	24-27 GHz frekans bandında farklı dalga boyu değerleri için ana lob ve yan lob seviyelerinin karşılaştırılması	16
Tablo 2.3	76-81 GHz frekans bandı için dalga boylarına bağlı genel parametreler	17
Tablo 2.4	Boyutlandırma için dalga boylarına göre 76-81 GHz bandında elde edilen ışıma paternlerinin karşılaştırılması	19
Tablo 2.5	Bow-tie beslemenin başlangıç ve nihai değerleri	20
Tablo 2.6	Bow-tie besleme boyutlarının optimizasyonu için kontrollü testlerin ilk ve nihai değerlerine ait ışıma karakteristikleri	22
Tablo 2.7	Bütün kontrol değişkenlerinin eş zamanlı uygulaması ile oluşan nihai sonuçlara ait yönlülük değerleri	24
Tablo 2.8	Uydurma katmanlarının dış yarıçaplarının ve uzatma bölümlerinin başlangıç ve nihai değerleri	25
Tablo 2.9	Dış çaplarının durumlarına bağlı olarak uydurma katmanlarının artışının ışıma paternlerine etkisinin karşılaştırılması	27
Tablo 3.1	25,5 GHz merkez frekansında 5 farklı uydurma katmanlı dielektrik lensler üzerinde gönderilen ışınların kritik x değerleri	47
Tablo 3.2	78,5 GHz merkez frekansında 5 farklı uydurma katmanlı dielektrik lensler üzerinde gönderilen ışınların kritik x değerleri	52
Tablo 4.1	24-27 GHz frekans bandında farklı lens yapıları için maksimum yönlülük değerleri	75
Tablo 4.2	76-81 GHz frekans bandında farklı lens yapıları için yönlülük değerlerinin karşılaştırılması	81
Tablo 5.1	Lens antenin bağıl hacim oranları, dielektrik sabitleri ve kalınlık değerleri	86
Tablo 5.2	3B dielektrik lens anten baskı parametreleri	87

Otomotiv Radarı için Düzlemsel Dielektrik Lens Anten Tasarımı

Murat TARANCI

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fikret TOKAN

Otomotiv sektörünün en yeni trendlerinden olan otonom araçların vazgeçilmez öğelerinden biri otomotiv radarıdır. Bu cihazlar gelişen teknolojiyle daha kompakt ve efektif hale gelmektedirler. Bu iyileştirmelerin temelinde otomotiv radarları için geliştirilen monolitik mikrodalga tümleşik devreler ile yüksek yönlülük ve kazanç değerlerine sahip yama anten dizilerinin geliştirilmesi yer almaktadır.

Bu teze konu olan otomotiv radarı için düzlemsel dielektrik lens anten tasarımı; daha iyi yönlülük ve yüksek seviyelerde yönlendiricilik elde etmeye odaklanmaktadır. Temelde otomotiv radarının görüş açısını artırmak ve aynı zamanda yönlülük değerlerinden minimal kayıplar verecek şekilde optimize edilmiş düzlemsel dielektrik lens anten yapısına yoğunlaşmaktadır.

Bu tasarım sürecinde anten parametrelerinin farklı varyasyonları üzerinde durulmuş, eniyileme yaklaşımıyla optimum geometri elde edilmeye çalışılmıştır. Anten için kullanılan yüksek yoğunluklu dielektrik lens ($\epsilon_r=9,8$) ile hava ortamı arasında yumuşak geçişler sağlamak ve iç yansımaları azaltmak için farklı bağıl dielektrik sabitine sahip uydurma katmanları kullanılmıştır. Lensin farklı besleme konumları ve farklı uydurma katman sayıları için hüzme yönlendirme çalışmaları

yapılmıştır. Işın modelinin analitik yapısı analiz edilmiş, maksimum yönlendiricilik yapan besleme noktaları iki farklı frekans aralığı için (24-27 GHz/76-81 GHz) belirlenmiştir. CST Studio Suite® programı kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen ışıma paternleri ile geometrik optik yaklaşım sonuçları arasındaki tutarlılıklar üzerinde durulmuştur. Maksimum 22,7 dBi yönlülük ve -14 dB seviyesinin altında yansıma katsayılarına sahip 8 paralel katlı ve 5 uydurma katmanlı düzlemsel dielektrik lens antenler tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik lens anten, otomotiv radarı, uzak alan ışıma paterni, yönlülük, yansıma katsayıları



Planar Dielectric Lens Antenna Design for Automotive Radar

Murat TARANCI

Department of Electronics and Telecommunication Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fikret TOKAN

One of the indispensable elements of autonomous vehicles, which is one of the newest trends in the automotive industry, is automotive radar. These devices are becoming more compact and effective with advances in technology. These improvements are based on the development of monolithic microwave integrated circuits for automotive radars and the development of patch antenna arrays with high directivity and gain.

The planar dielectric lens antenna design for automotive radar, which is the subject of this thesis, focuses on achieving better directivity levels on the high degrees of beam steering. Basically, it focuses on optimized planar dielectric lens antenna structure to increase the field of view of the automotive radar and at the same time to give minimal losses in directivity values.

In this design process, different variations of the antenna parameters are considered and an optimization approach is used to obtain the optimum geometry. The high-density dielectric lens ($\epsilon_r=9.8$) is used for the antenna with matching layers with different relative dielectric constants to provide smooth transitions between the lens and the air medium and to reduce internal reflections. Beam steering studies were performed for different feed positions of the lens and different numbers of

matching layers. The analytical structure of the beam model was analyzed and feed points achieving the maximum directivity feed points were determined for two different frequency ranges (24-27 GHz/76-81 GHz). The consistencies between the radiation patterns obtained from simulations using the CST Studio Suite® program and the results of the geometrical optical approximation are discussed. Planar dielectric lense antennas with 8 parallel plates and 5 matching layers are designed with a maximum directivity of 22.7 dBi and reflection coefficients below -14 dB.

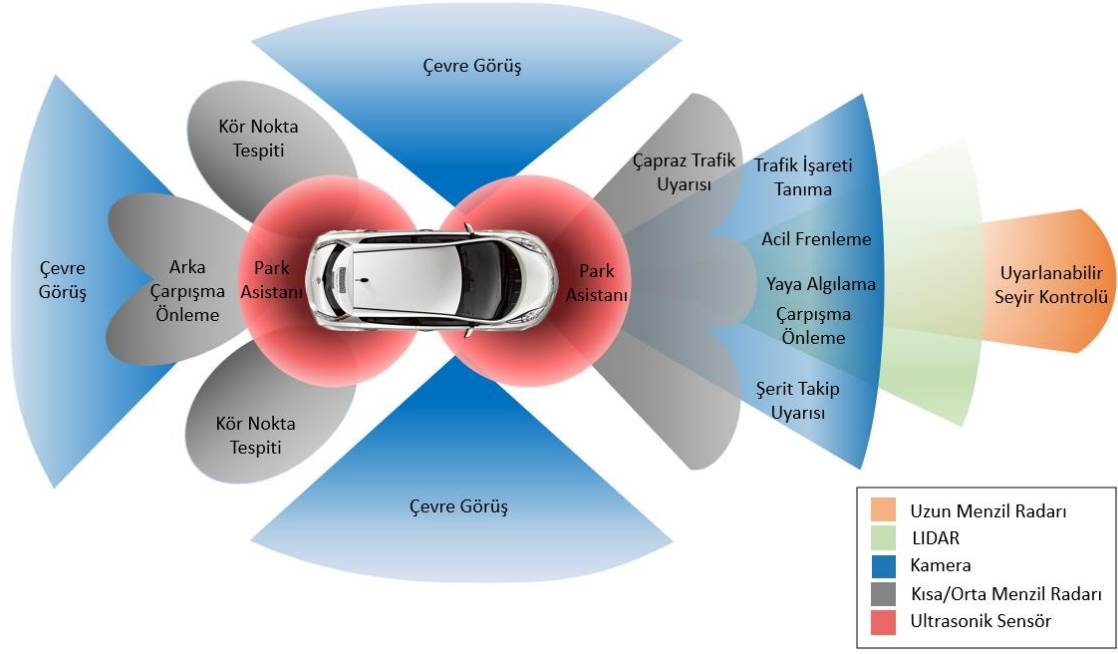
Keywords: Dielectric lens antenna, automotive radar, far-field radiation pattern, directivity, reflection coefficients



1.1 Literatür Özeti

Sürücüler, yolcular ve diğer yol kullanıcıları için güvenlik, son yıllarda büyük önem arz etmeye başlamıştır. Trafik güvenliği ve konforlu sürüş gereksinimlerini karşılamak için radar sensörleri, yol ortamının yanı sıra diğer araçları, yayaları veya bisikletlileri algılamak amacıyla sürekli olarak bir gelişim sürecindedir. Otomotiv radarları, otonom araç teknolojisinde kullanılmaya başlanan ışık algılama ve mesafe tayini sensörleri (LIDAR), kamera gibi alternatiflerine göre kötü ışık ve şiddetli hava koşullarından daha az etkilendikleri için otonom araç endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Mesafeyi, açisal hızı ve uygun bir anten sistemi ile uzaktaki nesnelerin açısını doğrudan ölçebilirler. Başlangıçta radarlar mesafe uyarısı ve çarpışmadan kaçınma amacıyla geliştirilmiştir. Ancak günümüz gelişen teknolojisi ve beklenen konfor ihtiyacıyla beraber bu işlevlerin yanı sıra uyarlanabilir seyir kontrol (ACC), otomatik acil durum frenlemesi (AEB), kör nokta algılama (BSD) ve şerit değiştirme yardımı (LCA) gibi sürüş özellikleri, otomotiv radarlarını vazgeçilmez kılmıştır. Günümüzde yolcuları ve yayaları koruyan güvenlik işlevleri önemli bir rol oynamaktadır[1]. Şekil1.1’de otonom araç teknolojilerinin sensör teknolojileri ve bunların kullanıldığı uygulamalar verilmiştir.

Otomotiv radarlarının artan performanslarıyla beraber, kamera ve LIDAR sensörleri kullanılarak uzaktaki bir nesnenin tekli yansımalarından daha fazlası algılanabilmekte ve tüm ortamın görüntüleri elde edilebilmektedir. Silikon teknolojisinin getirmiş olduğu yüksek düzeyde entegre edilmiş monolitik mikrodalga tümleşik devrelerin (MMIC) mevcudiyeti, yeni paketleme yaklaşımları, düzlemsel antenler ve giderek daha güçlü sinyal işleme ile radar tabanlı sistemler düşük maliyetle seri üretilebilir hale gelmiştir. Dijital hüzmleme (DBF) ve çok girişli çok çıkışlı (MIMO) konseptler sayesinde yanal algılamada daha fazla veri elde edilebilmektedir. Analog fonksiyonların dijital alana geçişiyle; gelişmiş veri işleme, esneklik, netlik, çözünürlük ve hedef sınıflandırma açısından daha fazla fonksiyonel sistem geliştirilmesinin yolu açılmıştır[1].



Şekil 1.1 Otonom araç sistemlerinde otomotiv radarları ve diğer sensörlerin kullanıldığı uygulamalar

Otomotiv radarı alanındaki ilk çalışmalar 50'li yılların sonlarında gerçekleştirilmiştir. 70'li yıllarda mikrodalga frekanslarında yoğun çalışmalar yapılmış ve radar sistemlerinde uygulanmaya başlamıştır. Devam eden süreçte 17 GHz, 24 GHz, 35 GHz, 49 GHz, 60 GHz ve 77 GHz frekanslarında çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Otomotiv radarı fikrinin başlangıcından itibaren tüm bu araştırmaların temel motivasyon kaynağı, trafikteki araçların çarpışmadan kaçınılmasını sağlamaktır. Bu fikir tüm dünyada birçok mühendis için akıllı otomotiv radarları geliştirmek için büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur. Bu süreç boyunca mikrodalgalar ve radar sinyal işleme alanında çok fazla bilgi birikimi elde edilmiştir. Yarıiletken monolitik mikrodalga tümleşik devrelerin geliştirilmesi ve mikrodenetleyicilerin sayısal işaret işleme kabiliyetlerinin artması, otomotiv radarlarının ticarileştirilmesini 90'lı yıllarda mümkün kılmıştır. Bu gelişmeler ekseninde ACC ilk kez 1995 yılında Japonya'da ticarileştirilmiştir. LIDAR tabanlı ACC özellikle Japonya'da tercih edilirken, Avrupa ve ABD şirketleri ağırlıklı olarak radar tabanlı ACC teknolojisine odaklanmışlardır. 1999 yılında Mercedes-Benz, S-sınıfında radar tabanlı ACC sistemi olan Distronic'i tanıtan ilk otomobil üreticisi olmuştur. 2000'li yılların başlarında Avrupalı otomobil üreticileri 77 GHz sistemlerini sadece ACC sistemleri için sunarken, Japon rakipleri Honda ve Toyota

2003 yılında 77 GHz uzun menzilli radar (LRR) teknolojisinde ACC'ye ek olarak çarpışma azaltma için aktif fren yardımı tanıtılmıştır [2].

Denso firması tarafından dijital ışın şekillendirme (DBF) kabiliyetine sahip radar sensörü 2008 yılında tanıtılmıştır [3]. 2009 yılında Bosch tarafından ilk kez 77 GHz frekansında çalışan SiGe tümleşik devresi kullanılan sensör olan LRR3 modeli (Şekil 1.2) tanıtılmıştır. Bosch LRR3 modelinde kullandığı yüksek kazançlı dielektrik lens anten ile ilk kez 250 m tarama menziline ulaşmıştır [4]. Yine aynı yıl Continental firması tarafından görüş alanını mekanik olarak tarayabilen ARS 300 radar sensörlerini tanıtılmıştır [5].



Şekil 1.2 Bosch LRR3 otomotiv radar sensörünün iç yapısı [1]

Otomotiv radar teknolojisinde kullanılan frekans bantları ülkelere göre değişkenlik göstermektedir. Genel olarak kısa menzil için tahsis edilen frekans bandı 24.05-24.25 GHz frekans aralığıdır (ISM bandı). 24-GHz frekans aralığındaki bantlar dar bant ve çok geniş bant olarak ülkelere göre farklılık göstermektedir. Uzak menzil için genellikle 76-77-GHz bant aralığında (ITU-R M1452 düzenlemesi), orta ve kısa menziller için ise 77-81 GHz frekans bandında tercih edilmektedir. Yakın gelecekte neredeyse tüm uzun veya orta menzilli otomotiv radar sensörleri 76-81-GHz aralığında çalışacağı öngörülmektedir [6].

Geçmişte otomotiv radarları çoğunlukla kısa menzilli uygulamalar için 24 GHz bandında ve daha uzun menzilli veya daha zorlu uygulamalar için 76-77 GHz aralığında çalıştırılırken, bugün yeni geliştirilen sensörlerin çoğu mesafe ve hız çözünürlüğünü artırmak için 76-81 GHz frekans bandında çalıştırılmaktadırlar [7-8]. 100 GHz'in üzerindeki daha yüksek frekans bantları üzerine araştırmalar devam etmekle beraber özellikle yarı iletken performansları ile ilgili araç entegrasyonu ve teknolojik zorluklar aşılmaya çalışılmaktadır [9].

Otomotiv radarları; kısa menzil radarları (SRR), orta menzil radarları (MRR) ve uzun menzil radarları (LRR) olarak kategorize edilmektedir. Tablo 1.1'de 76-81 GHz frekans bandını kullanan otomotiv radarlarının menzillerine göre sınıflandırılması ve teknik özellikleri verilmiştir [10].

Tablo 1.1 Otomotiv radarlarının menzillerine göre sınıflandırılması [10]

Özellikler	LRR	MRR	SRR
Maksimum iletilen güç	55 dBm	-9 dBm/MHz	-9 dBm/MHz
Frekans bandı	76-77	76-77	76-81
Bant genişliği	600 MHz	600 MHz	4 GHz
Mesafe aralığı	10-250 m	1- 100 m	0,15-30 m
Mesafe çözünürlüğü	0,5 m	0,5 m	0,1 m
Mesafe doğruluğu	0,1 m	0,1 m	0,02 m
Hız çözünürlüğü	0,6 m/s	0,6 m/s	0,6 m/s
Hız doğruluğu	0,1 m/s	0,1 m/s	0,1 m/s
Açısal doğruluk	0,1°	0,5°	1°
Yanal 3 dB hüzmeye genişliği (Azimuth)	±15°	±40°	±80°
Yükselme 3 dB hüzmeye genişliği (Elevation)	±5°	±5°	±10°

Otomotiv radar sensörlerinin kullanıldığı otonom uygulamaları ve tahsis edildiği frekans bantları ile ilgili verilen genel literatür özetine ek olarak üzerinde çalışılan bazı anten tipleri ve kazançları Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2 Otomotiv radar sensörlerinde kullanılan anten tipleri için yapılan bazı çalışmalara ait kazanç ve yarım hüzme bant genişliği değerleri [11]

Anten Tipi	Çalışma Frekansı [GHz]	Kazanç [dBi]	HPBW (E/H-Düzlemi)
Katlanmış reflektör anten [12]	55–64, 76–77	34, 35	3.2/3.4, 2.9/3
Lens anten [13]	76.4–76.6	28	4/4.4
Birleştirilmiş lens anten [14]	73–94	20	18
Çift katmanlı verici-dizi [15]	75–78	18,5	15
Düzlemsel dielektrik lens anten [16]	57–64, 76–80	15, 18.9	21, 20
Hibrit ince-film anten [17]	76–85	11	12/40
Seri beslemeli yama dizisi [18]	75–80	15.9	4.5/12
Düzlemsel ızgara dizi [19]	77–81	15	5
Mikroşerit anten [20]	75.6–78.5	21.7	15
Mikroşerit yama dizisi [21]	76–81.4	14.8	–
Dairesel şekilli yama dizisi [22]	76–79.5	21	19/9.5
Mikroşerit düzlemsel dizi [23]	76.5–81.5	10	–
Yama anten dizisi [24]	76–81	11.5	8.1

Gelişmekte olan otonom araç uygulamalarına paralel olarak otomotiv radar sensörleri de geliştirilmeye devam etmektedir. Bu sensörlerde kullanılan MMIC ve anten tasarımlarının geliştirilmesiyle de daha kompakt yapılı ve yüksek kazançlı sensörlerin uygulamaya geçirilmesinin önünü açılmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Otomotiv radarları için günümüzde kullanılan her iki frekans aralığı için (24-27 GHz/76-81 GHz) farklı iki anten tasarlamak amacıyla bu tezin konusu seçilmiştir.

Geniş bant otomotiv radarı için yüksek kazançlı ve geniş tarama açısına sahip düzlemsel dielektrik lens anten tasarımı için yüksek yoğunluklu dielektrik lens seçilmiştir. Ancak uygulamada yüksek yoğunluklu dielektrik lenslerin geniş bant aralığında yönlülüğünü yani kazancını artırmak için yansıma katsayılarını (aktif s-parametreleri) azaltmak gerekmektedir. Dolayısıyla ışıma verimliliğini artırmak için, besleme noktasından çıkan ışınların daha yumuşak kırılmalarla hava ortamına çıkabilmesi için uydurma katmanlarına gereksinimi vardır. Daha önce 4-12 GHz geniş bant aralığında çalışan benzer bir çalışmada, düzlemsel yanal dalga antenin silindirik dalga cephesine yerleştirilen horn benzeri metal açıklık (flaring) kullanılmıştır [27]. Bu çalışmada ise horn benzeri açıklıklı antenin üretim sürecinde karşılaşılan zorlukları gidermek ve daha yüksek frekans aralıklarında (24-27 GHz/76-81 GHz) otomotiv radarları için kullanılabilecek bir anten dizisi üzerinde çalışılmıştır. Yalnızca uydurma katmanları kullanılarak horn benzeri açıklıklı yapıya olan gereksinimi ortadan kaldırmak ve daha iyi sonuçlar elde edilebilecek dielektrik lens anten tasarlamak amaçlanmıştır.

Çalışmanın odaklandığı diğer bir konu ise otomotiv radarlarının gereksinim duyduğu geniş tarama açısıdır. Bu amaç doğrultusunda yapılan anten tasarımında H-düzleminde minimum iç yansıma değerleri ile maksimum yönlendiricilik elde etmek hedeflenmiştir. Bunun için yarı eliptik formlu lens anten üzerinde elde edilebilecek maksimum yönlendirme açısını veren besleme konumlarının tayini üzerine çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Maksimum $\theta=\pm 40^\circ$ tarama açısı, merkezi besleme noktasında uzak alan ışıma paterninde maksimum 22,7 dBi yönlülük ve -14 dB seviyesinin altında aktif S-parametrelerine sahip 5 adet uydurma katmanı kullanılan, 8 elemanlı düzlemsel dielektrik lens anten dizisi tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde yarı-eliptik formlu düzlemsel dielektrik lens üzerinde, geometrik optik yaklaşımla ışın davranışlarının analitik modeli ortaya koyulmuştur. Böylece her iki çalışma frekansında tasarlanan

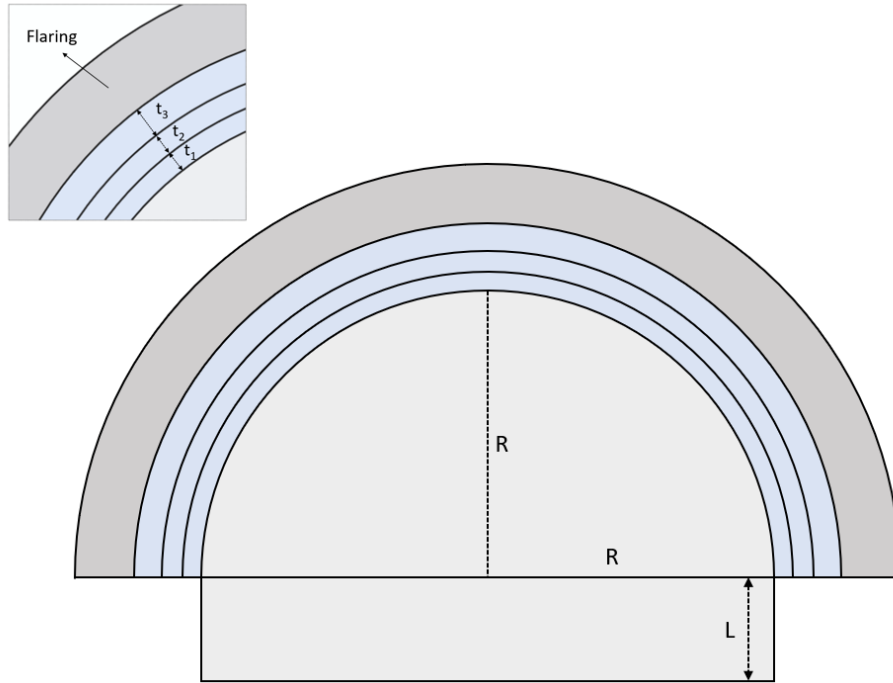
lens antenler için minimum kayıplı maksimum yönlendirme sağlanabilecek besleme noktası pozisyonları tespit edilmiştir.



DÜZLEMSEL DİELEKTRİK LENS ANTEN TASARIMI

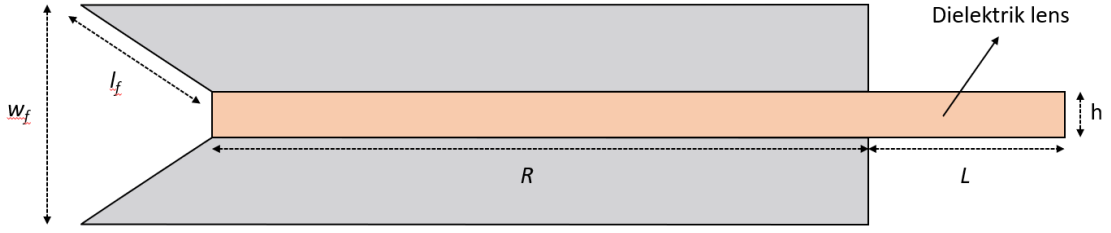
2.1 Yanal Dalga Dielektrik Lens Anten

Yanal dalga dielektrik lens antenler, içi yüksek dielektrik sabitli materyalle doldurulmuş paralel tabakalı dalga kılavuzu (PPW) ile besleme kaynağından oluşurlar. Yanal dalga dielektrik lens antenler yüksek frekanslarda geniş bantlı uygulamalarda yüksek kazanç ve yönlülük sergilerler. Besleme kaynağından gönderilen ışın demetinde daha az bozulmaların olması ve yüksek frekanslarda stabil faz merkezine sahip olmaları gibi avantajlarından dolayı radar uygulamalarında tercih edilirler. Tasarım ve üretim kolaylığı sağlarlar. Özellikle dar hüzmeye açısı elde edilebildiği için açısal çözünürlüğü yüksek olmaktadır. Dolayısıyla radar sistemlerinin yanı sıra yüksek görüntüleme çözünürlüğüne gereksinim duyan 3B vücut tarama sistemlerinde de tercih edilirler [25-26].



(a)

Şekil 2.1 Yanal dalga dielektrik lens anten (a) üst görünüşü (b) yan görünüşü



(b)

Şekil 2.1 Yanal dalga dielektrik lens anten (a) üst görünüşü (b) yan görünüşü (devamı)

Yarı-dairesel kesitli, uzatma bölümüyle eliptik bir form kazanan düzlemsel yanal dalga anten Şekil 2.1’de verilmiştir. Yoğun dielektrik malzemeden ($\epsilon_r=9,8$) oluşan bu antende, hava ortamına çıkan ışın hüzmesindeki iç yansıma kayıplarını (S_{11}) azaltmak için 3 uydurma katmanı ve ön uç dalga cephesine yerleştirilen horn benzeri metal açıklık (flaring) kullanılmıştır. Düzlemsel benzeri dielektrik lens anten kullanılan çalışmada düşük yansıma katsayıları (<-9 dB) ve 3:1 oranının üzerinde bant genişliğinde yüksek yönlülük elde edilmiştir [27].

Bu çalışmada ise üretim sırasında bahsi geçen bu horn benzeri açıklığın antene entegre edilmesindeki güçlüğü gidermek için açıklık bölümünün yerine sadece 5 uydurma katmanı kullanılan dielektrik lens anten tasarımı yapılmıştır.

2.2 Anten Boyutlarının Belirlenmesi

CST Studio Suite® 3D EM simülasyon ve analiz yazılımı üzerinde, iki farklı frekans bandı için dielektrik lens anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Başlangıç parametrelerinin doğru belirlenmesi, çizim ve simülasyon için kritik bir öneme sahiptir. Çünkü burada yapılabilecek bir hata bütün bir süreci olumsuz etkileyecektir. Dolayısıyla merkez çalışma frekansları ve bunlara bağlı efektif dalga boyu uzunlukları tasarım parametrelerinin oluşturulmasında yapı taşı oluşturmaktadır.

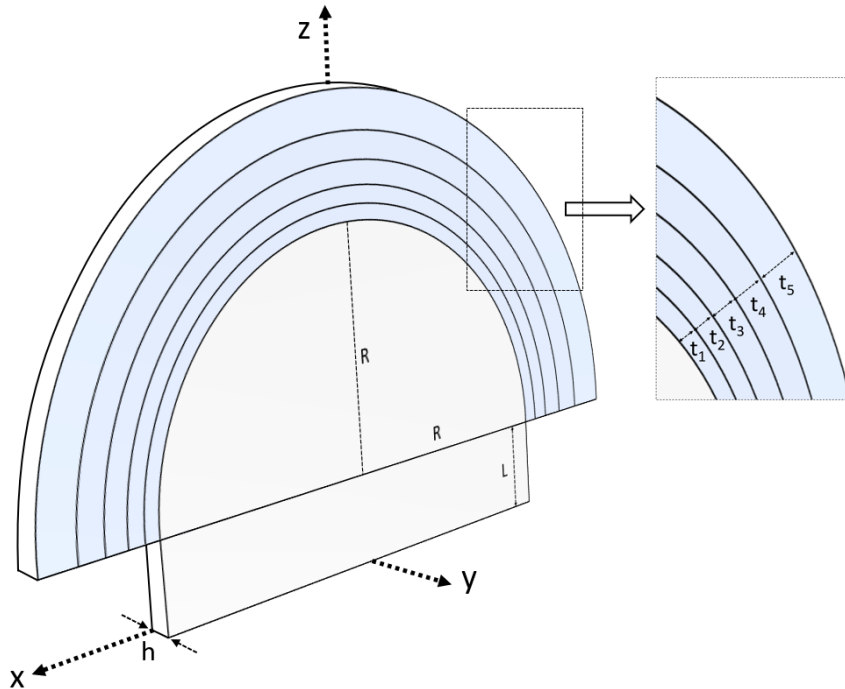
Şekil 2.2’de görülebileceği üzere yarı-dairesel kesitli, xz-düzlemine konumlandırılmış iki paralel PEC plaka arasına doldurulmuş yön bağımsız, homojen dielektrik ortam dalga kılavuzu olarak kullanılmıştır. Tasarımın ana bölümünü oluşturan bu çekirdek yapı, $\epsilon_r=10$ yüksek dielektrik sabitine ve $\tan \delta=0,0022$ kayıp tanjantına sahip Rogers TMM 10 malzemeden oluşmaktadır. Bu çekirdek yapının

yanı sıra geometrik orantılı azalan dielektrik sabitli ve çeyrek dalga boyu kalınlıklı uydurma katmanları (UK) kullanılmıştır. Yoğun dielektrik ortamdan hava ortamına geçen dalgaların ışıma verimliliğini artırmak, geniş bant çalışmalarda yüksek yönlülük ve yönlendiricilik elde etmek amaçlanmıştır.

Anten beslemesi için xy-düzlemine paralel ve x-ekseni boyunca farklı pozisyonlarda konumlanabilen bow-tie yapıda besleme yer almaktadır. Bow-tie besleme yapısı PEC materyalinden oluşup alt ve üst kolları dielektrik yüzeyin üstündeki ve altındaki PEC kaplamalarla kontak halindedir. Her iki frekans bant aralıkları için bu metal plakaların kalınlığı 5 μm olarak belirlenmiştir.

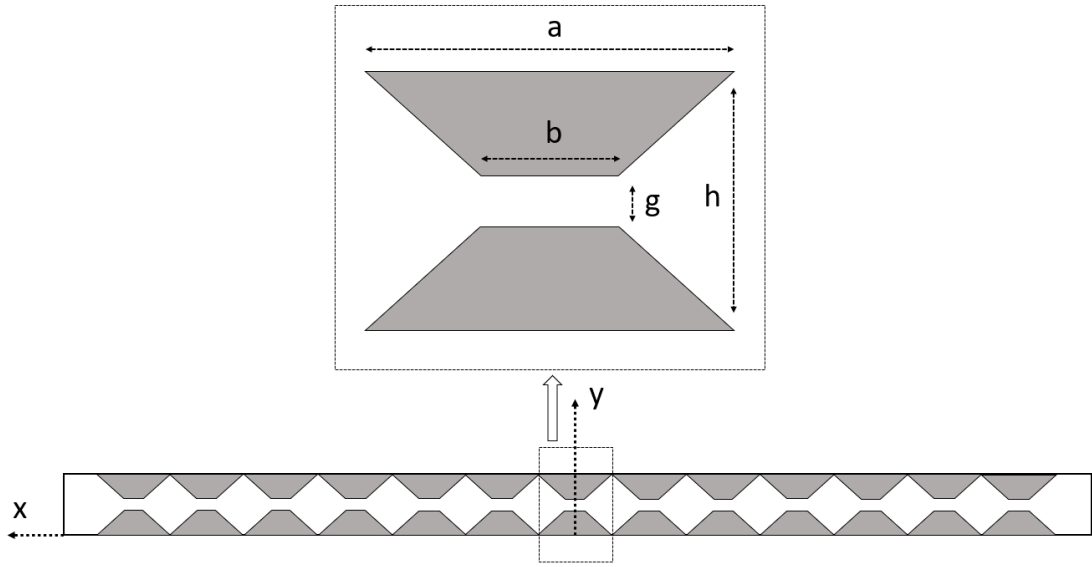
Yarı-daire şekilli çekirdek kısmına ek olarak antenin görüş yönünün aksi yönünde uzatma bölümü vardır. Bu uzatma bölümünün uzunluğu (L) z-ekseni boyunca eliptik bir şekil elde etmek için yarıçap değerinin yaklaşık %35 uzunluğuna sahiptir [27].

Şekil 2.2’de yalnızca bir anten elemanın bulunduğu tek bir çekirdek ve ön ucunda 5 adet uydurma katmanlı yapının şekli verilmiştir.



(a)

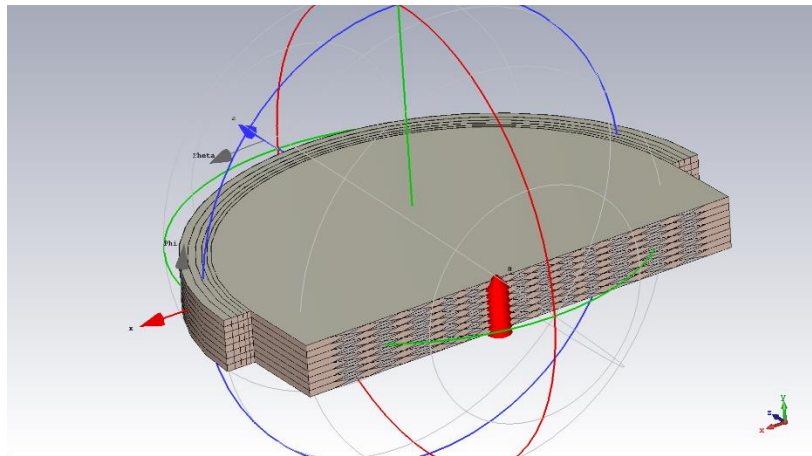
Şekil 2.2 Tek elemanlı düzlemsel dielektrik lens anten (a) perspektif görünüşü (b) besleme yapısı



(b)

Şekil 2.2 Tek elemanlı düzlemsel dielektrik lens antenin (a) perspektif görünüşü (b) besleme yapısı (devamı)

Yalnızca bir antenin ışıması, bir anten dizisinin eş fazlı olarak ışımasına göre daha zayıf kalacaktır. Dolayısıyla bu tasarım bir adım öteye taşınıp, daha yüksek kazançlı olması için 8 adet düzlemsel lens aralarında boşluk kalmayacak şekilde birleştirilmiştir. Bu sayede doğrusal 8 elemanlı bir anten dizisi elde edilmiş ve bu dizinin ışıma paterninde ana lob şiddetini artırmak hedeflenmiştir. Bu anten dizisinin küresel koordinatlardaki gösterimi Şekil 2.3'te verilmiştir. Anten görüş yönü H-düzlemi üzerinde z-ekseni doğrultusundadır ($\theta=0^\circ$).



Şekil 2.3 Küresel koordinatlarda 8 elemanlı düzlemsel dielektrik lens anten dizisinin yerleşimi

Tasarım parametrelerinin belirlenmesi için öncelikle çalışılan frekans bandının ve dolayısıyla efektif dalga boyu uzunluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Burada elektromanyetik dalgaların dielektrik ortamdaki elektriksel uzunluğu (2.1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda_{eff} = \frac{c}{f_c \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (2.1)$$

Dielektrik ortamda manyetik geçirgenlik $\mu_r=1$ olacağı için (2.1)'i (2.2)'deki gibi güncelleyebiliriz.

$$\lambda_{eff} = \frac{c}{f_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

Buradan hareketle anten boyutlarını belirleyebilir ve mm-dalga ölçeğinde çalışabiliriz.

2.2.1 24-27 GHz Bandı için Diziye Oluşturan Elemanın Parametrik Tasarımı

Tasarım sürecinde çalışılan frekans aralığında başlangıç, merkez ve bitiş frekanslarına bağlı olarak üç farklı efektif dalga boyu baz alınmıştır. 5 uydurma katmanlı lens üzerinde $x=0$ referans noktasında maksimum ışınma örüntüleri değerlendirilmiştir. Doğru sonuçların alınması için xz-düzleminin üzerinde z-simetri ekseninde gönderilen ışınların minimum iç yansıma yapması öngörüsüyle en iyi yönlülük değerleri referans alınmıştır. Bu üç değer etkilediği diğer parametrelerin tamamına göre bir değerlendirmede bulunulmuştur. 24-27 GHz bandı için sırasıyla 24 GHz, 25,5 GHz ve 27 GHz için efektif dalga boyu uzunlukları aşağıdaki eşitlikler ile elde edilir (2,3), (2,4), (2,5).

$$\lambda_{24GHz} = \frac{c}{24 \times 10^9 \sqrt{9,8}} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{24GHz} = 3,993 \text{ mm}$$

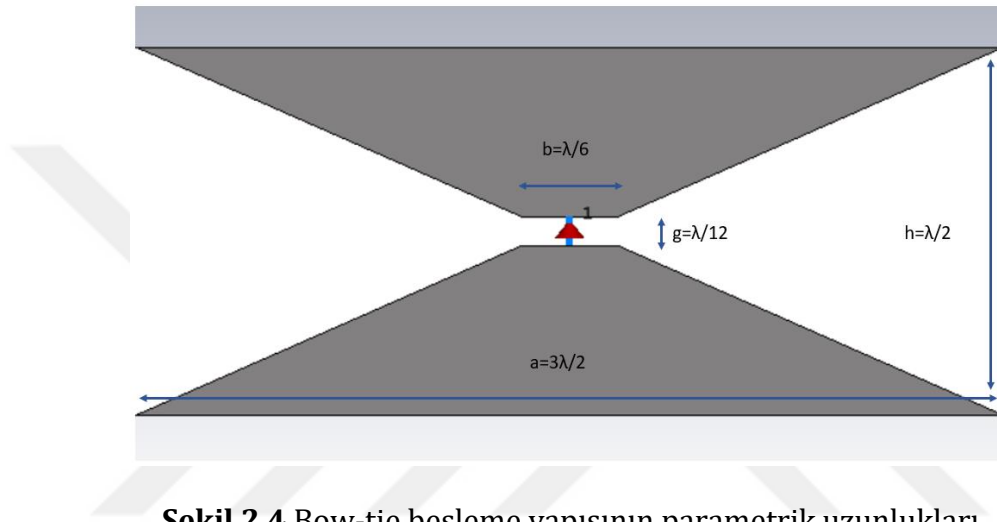
$$\lambda_{25,5GHz} = \frac{c}{25,5 \times 10^9 \sqrt{9,8}} \quad (2.4)$$

$$\lambda_{25,5GHz} = 3,758 \text{ mm}$$

$$\lambda_{27GHz} = \frac{c}{27 \times 10^9 \sqrt{9,8}} \quad (2.5)$$

$$\lambda_{27GHz} = 3,549 \text{ mm}$$

Milimetre dalga geniş bant uygulamalarında tercih edilen bow-tie besleme yapısı, Şekil 2.4’de görülebileceği üzere simetrik trapezoidal çiftten oluşmaktadır. Bu tasarımda kalınlığı $d=0,005$ mm olup PEC materyal kullanılmıştır. Anten yüksekliği $h=\lambda/2$ ve yarıçapı $r_0=18\lambda$ uzunluğuna sahiptir. Bow-tie besleme yapısının kollarından birinin uzun kenar genişliği başlangıçta $a=3\lambda/2$ olarak belirlenmiştir. Kısa kenar uzunluğu $b=\lambda/6$ ve kollar arası boşluk ise $g=\lambda/12$ olarak belirlenmiştir. Lens anten için kullanılan PEC materyali burada da kullanılmış ve kalınlık olarak $d=5$ μm seçilmiştir.



Şekil 2.4 Bow-tie besleme yapısının parametrik uzunlukları

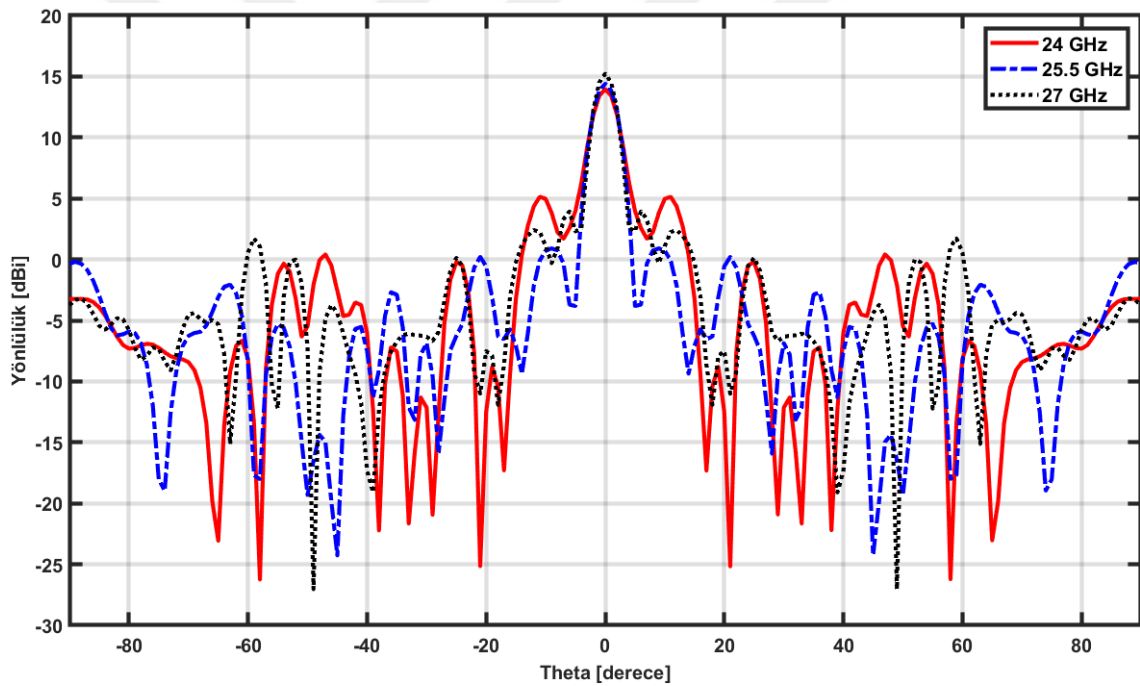
Buradan hareketle tasarıma ait diğer başlangıç parametreleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 24-27 GHz frekans bandı için dalga boylarına bağlı genel parametreler

Parametreler		$\lambda_{24\text{GHz}}$ [mm]	$\lambda_{25,5\text{GHz}}$ [mm]	$\lambda_{27\text{GHz}}$ [mm]
r_0	$36 \cdot \lambda/2$	71,874	67,646	63,888
L	$0,35 \cdot r_0$	25,156	23,676	22,361
h	$\lambda/2$	1,996	1,879	1,775
d	-	0,005	0,005	0,005
a	$3\lambda/2$	5,989	5,637	5,324
b	$\lambda/6$	0,665	0,626	0,592
g	$\lambda/12$	0,333	0,313	0,296

Bu bahsi geçen uzunluklar jenerik bir bow-tie tipi besleme modellemesi için başlangıç değerleri olup daha sonra optimize edilmiştir. Bow-tie yapıda beslemeler x-eksenin merkezine ve her iki yönüne 2λ aralıklarla 6'şar adet yerleştirilmiştir. Böylece antenin görüş açısı aralığı $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ aralığının tamamını kapsayabilecek bir dizilim oluşturulmuştur.

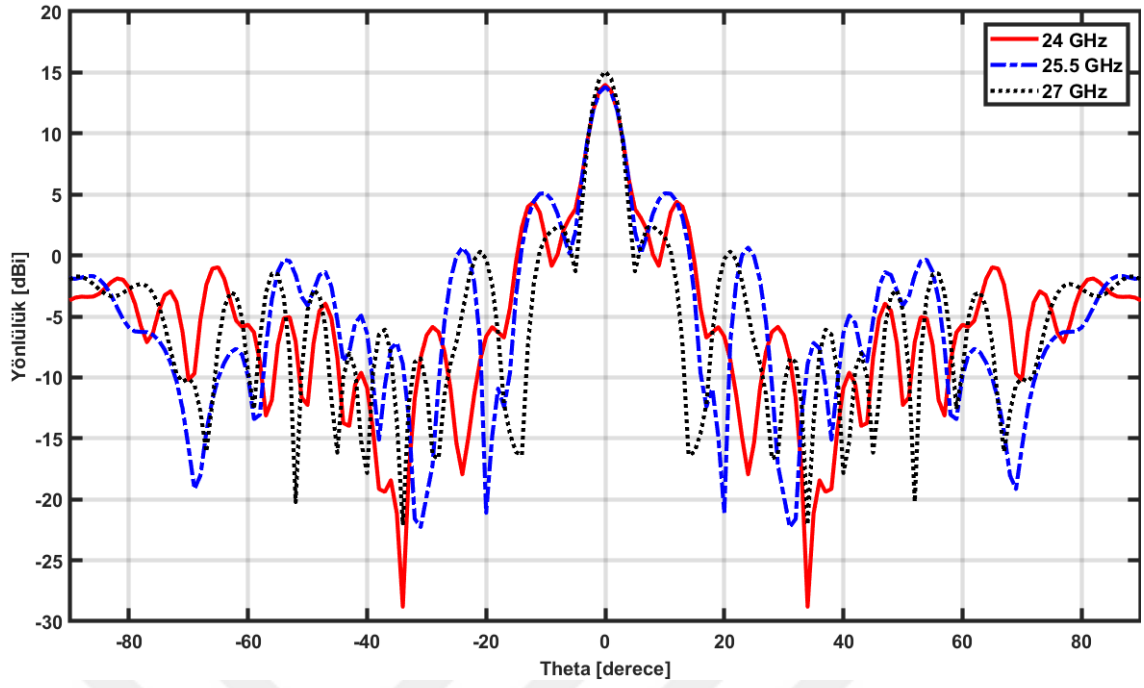
Sırasıyla frekans bandının başlangıç, merkez ve bitiş değerleri olan 24 GHz, 25,5 GHz ve 27 GHz için belirlenen $\lambda_{24\text{GHz}}$, $\lambda_{25,5\text{GHz}}$ ve $\lambda_{27\text{GHz}}$ değerleri kullanılarak antenin $x=p_0=0$ 'daki uzak alan ışıma paternlerinin ana lob şiddetleri ve yan lob seviyeleri dikkate alınmıştır. En iyi sonucu veren değer Şekil 2.5(a)'da görülebileceği üzere alt frekans değeri olan $\lambda_{24\text{GHz}}$ için elde edildi. Şekil 2.5(b)'de merkez frekans için elde edilen ana lob seviyesi kısmen daha iyi iken Şekil 2.5(c)'deki ana lob seviyesi, bu frekans bandı için görece daha düşük değerler vermektedir.



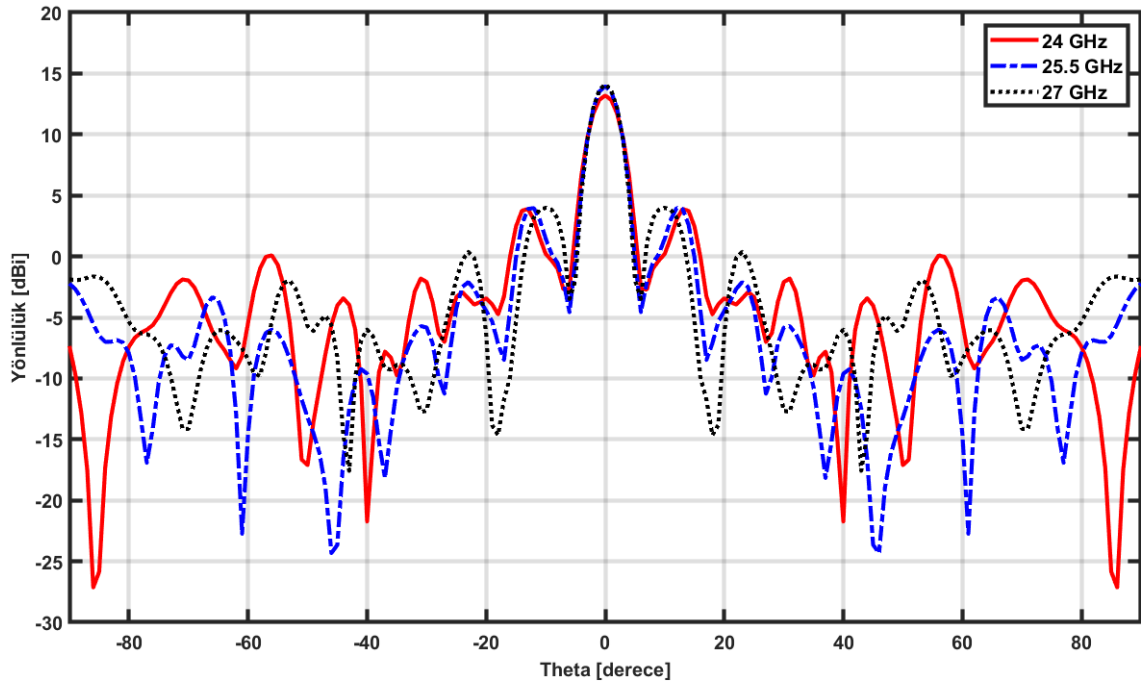
(a)

Şekil 2.5 Farklı dalga boyları için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi (a)

$\lambda_{24\text{GHz}}$ (b) $\lambda_{25,5\text{GHz}}$ (c) $\lambda_{27\text{GHz}}$



(b)



(c)

Şekil 2.5 Farklı dalga boyları için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi (a) $\lambda_{24\text{GHz}}$ (b) $\lambda_{25,5\text{GHz}}$ (c) $\lambda_{27\text{GHz}}$ (devamı)

Bu üç farklı boyutlandırmada elde edilen ana lob ve yan lob seviyelerine ilişkin sayısal veriler Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 24-27 GHz frekans bandında farklı dalga boyu değerleri için ana lob ve yan lob seviyelerinin karşılaştırılması

	24 GHz		25,5 GHz		27 GHz	
Dalga boyu	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
λ_{24GHz}	14	-8,8	14,4	-11,1	15,2	-11,3
$\lambda_{25,5GHz}$	14,4	-9,6	13,8	-8,7	15,1	-12,4
λ_{27GHz}	13,2	-9,3	14	-10	14,1	-10,1

Tablo 2.2'deki sonuçlar incelendiğinde λ_{27GHz} için en olumsuz sonuçlar ortaya çıkarken λ_{24GHz} için merkez frekans değerleri görece daha iyi sonuçlar vermiştir. 14,4 dBi ana lob şiddeti ve -11 dB yan lob bastırma seviyesi bu tek elemanlı anten için kabul edilebilir seviyelerdedir. Bu yapının son hali olan 8 elemanlı anten dizisinde ise çok daha iyi bir patern oluşmaktadır.

2.2.2 76-81 GHz Bandı için Diziyi Oluşturan Elemanın Parametrik Tasarımı

Bu frekans bandı için başlangıç parametrelerinin belirlenmesinde yine aynı ön kabuller temel alınmıştır. Başlangıç, merkez ve bitiş frekanslarına bağlı efektif dalga boyu belirlenmiş ve bu üç tasarım için yapılan simülasyonlarda en iyi yönlülük değerlerine sahip olan dalga boyu değeri referans alınmıştır. Bu frekans aralığı için dalga boyu değerleri sırasıyla (2.6), (2.7), (2.8) eşitliklerinde verilmiştir.

$$\lambda_{76GHz} = \frac{c}{76 \times 10^9 \sqrt{9,8}} \quad (2.6)$$

$$\lambda_{76GHz} = 1,261 \text{ mm}$$

$$\lambda_{78,5GHz} = \frac{c}{78,5 \times 10^9 \sqrt{9,8}} \quad (2.7)$$

$$\lambda_{78,5GHz} = 1,221 \text{ mm}$$

$$\lambda_{81GHz} = \frac{c}{81 \times 10^9 \sqrt{9,8}} \quad (2.8)$$

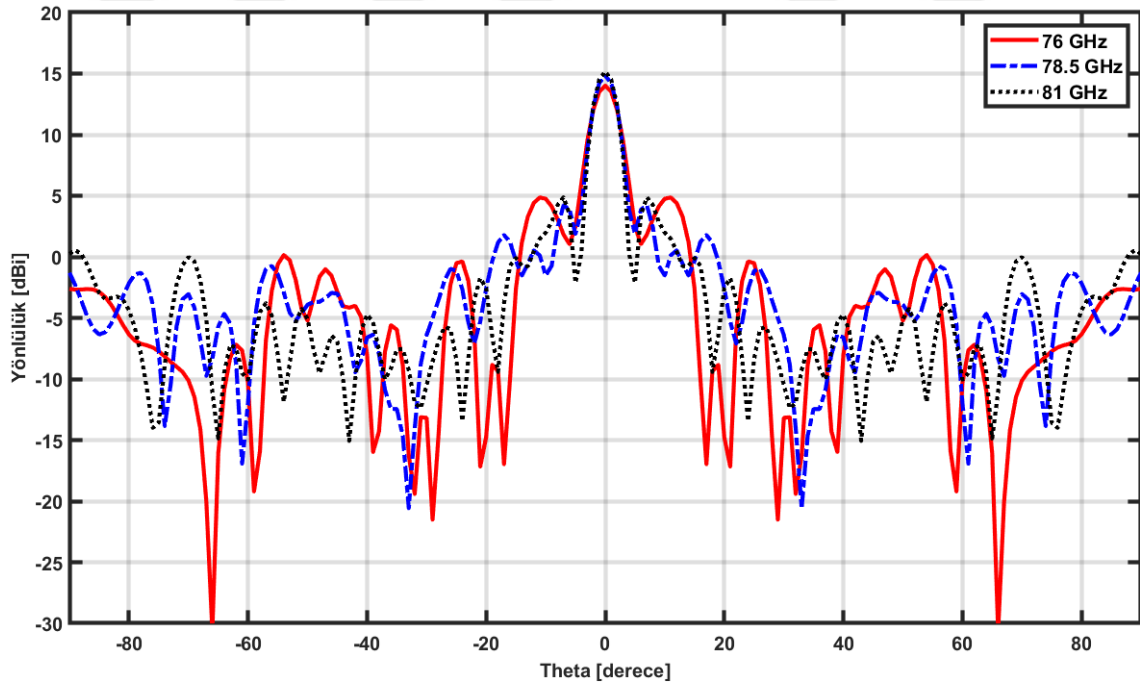
$$\lambda_{81GHz} = 1,183 \text{ mm}$$

Lensin uzatma bölümü ve besleme yapısının boyutlarının da olduğu başlangıç genel parametreleri ve uzunlukları Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 76-81 GHz frekans bandı için dalga boylarına bağlı genel parametreler

Parametreler		λ_{76GHz} [mm]	$\lambda_{78,5GHz}$ [mm]	λ_{81GHz} [mm]
r_0	$36 \cdot \lambda/2$	22,697	21,974	21,296
L	$0,35 \cdot r_0$	7,944	7,691	7,454
h	$\lambda/2$	0,63	0,61	0,592
d	-	0,005	0,005	0,005
a	$3\lambda/2$	1,891	1,831	1,775
b	$\lambda/6$	0,21	0,204	0,197
g	$\lambda/12$	0,105	0,102	0,099

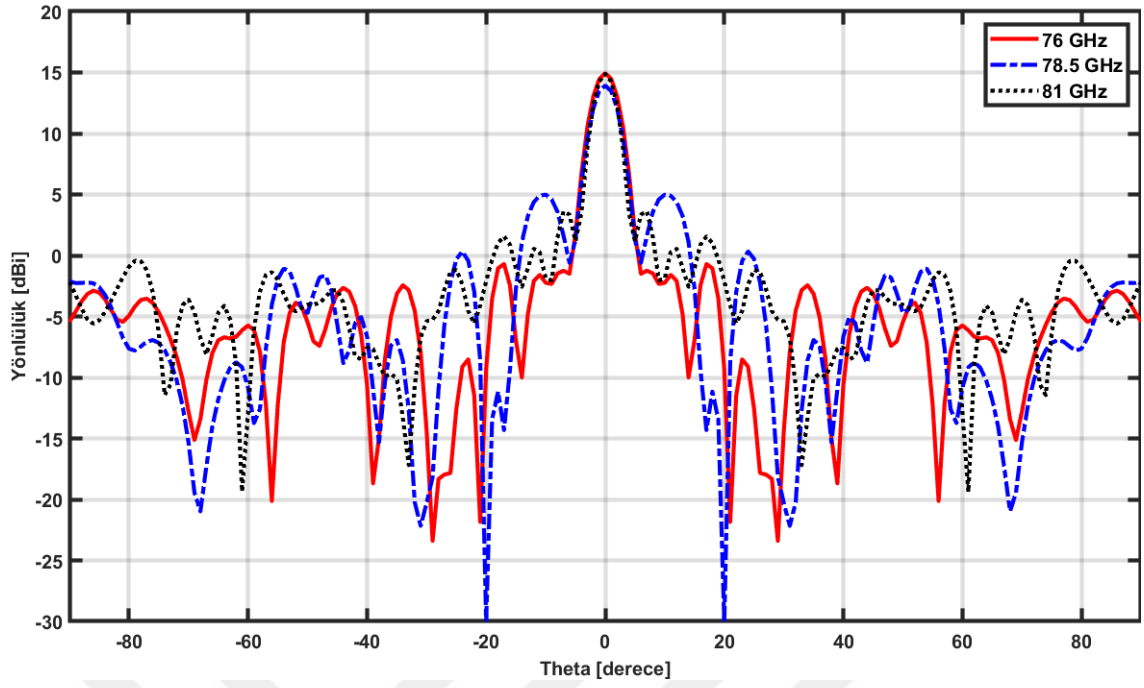
Boyutların belirlenmesinde bir önceki çalışma frekans aralığında olduğu gibi yine 76 GHz başlangıç frekansı, 78 GHz merkez frekansı ve 81 GHz bitiş frekansı için belirlenen dalga boyu değerlerine bağlı parametrik boyutlandırma uygulanmıştır.



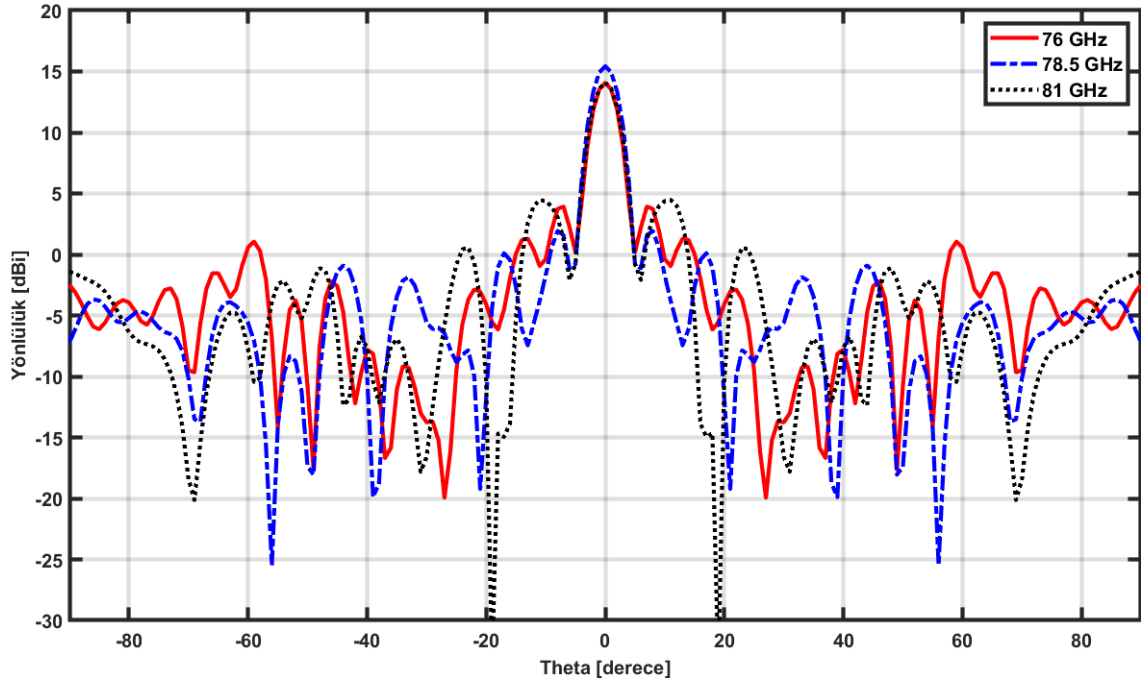
(a)

Şekil 2.6 Farklı dalga boyları için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi (a)

λ_{76GHz} (b) $\lambda_{78,5GHz}$ (c) λ_{81GHz}



(b)



(c)

Şekil 2.6 Farklı dalga boyları için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi (a) $\lambda_{76\text{GHz}}$ (b) $\lambda_{78,5\text{GHz}}$ (c) $\lambda_{81\text{GHz}}$ (devamı)

$\lambda_{76\text{GHz}}$, $\lambda_{78,5\text{GHz}}$ ve $\lambda_{81\text{GHz}}$ değerlerinin her üçü için yapılan simülasyonlara ait uzak alan ışıma paternleri Şekil 2.6'da görülmektedir. $x=p_0$ pozisyonu ve $\varphi=0^\circ$ düzlemi için elde edilen bu ışıma paternlerindeki ana lob şiddeti ve yan lob seviyesi değerleri Tablo 2.4'te görülmektedir.

Tablo 2.4 Boyutlandırma için dalga boylarına göre 76-81 GHz bandında elde edilen ışıma paternlerinin karşılaştırılması

	76 GHz		78,5 GHz		81 GHz	
Dalga boyu	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
$\lambda_{76\text{GHz}}$	14	-9,2	14,8	-10,6	15,2	-10,3
$\lambda_{78,5\text{GHz}}$	14,9	-12,9	13,9	-9	14,9	-11,3
$\lambda_{81\text{GHz}}$	14,1	-10,1	15,4	-13,4	14,1	-9,6

Başlangıçta merkez frekanslarını baz aldığımız bu boyutlandırma çalışmasında her iki frekans aralığı için farklı sonuçlar elde edildi. 24-27 GHz frekans bandı için başlangıç frekansına, 76-81 GHz frekans bandı için bitiş frekansına bağlı dalga boyu uzunlukları daha iyi sonuçlar vermektedir.

2.3 Bow-tie Besleme Yapısının Boyutlarının Optimizasyonu

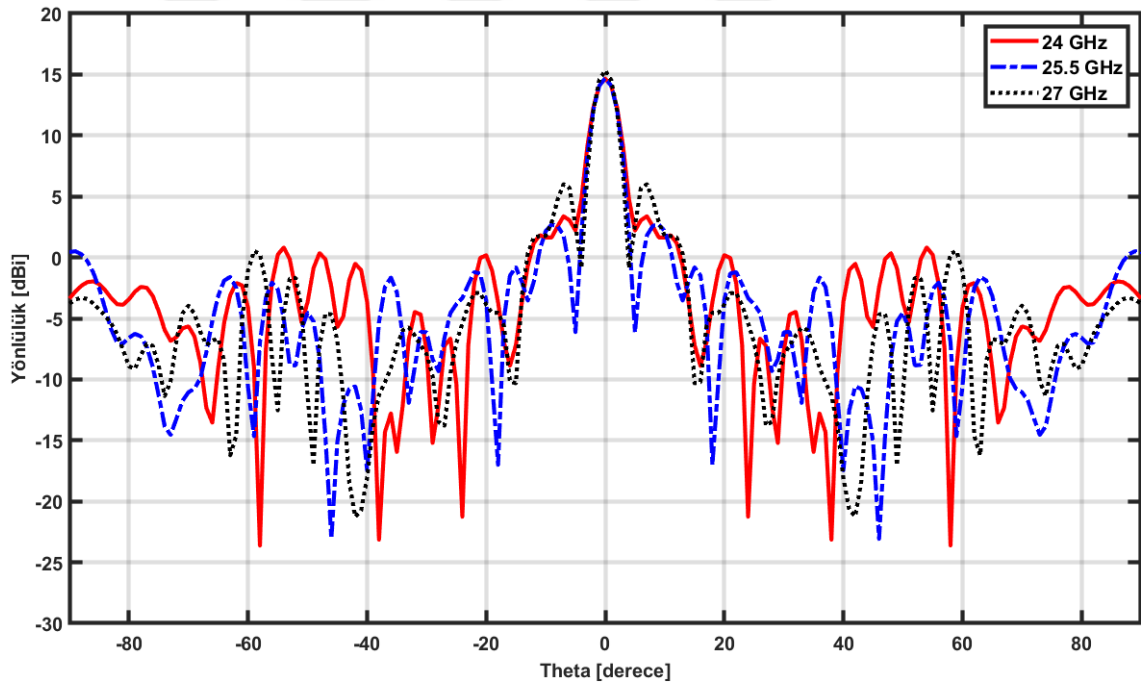
Birkaç kontrollü test ile başlangıçta belirlenen anten besleme uzunluk değerlerinin en iyi sonuç verenleri belirlenmiştir. Bu testlerin sadece 24-27 GHz frekans bandında yapılması yeterli olacaktır. Karşılaştırma yapılırken dielektrik lens antene ait diğer bütün uzunluklar sabit tutulmuştur. Burada kontrol değişkenleri sırasıyla ikili olarak ele alınmış ve uzak alan ışıma paternleri üzerinde elde edilen ana lob şiddeti ve yan lob seviyeleri kıyaslanmıştır. Bu kontrollü testler için diğer bütün parametreler ve bow-tie yapının boyut parametreleri $\lambda_{24\text{GHz}}$ birim uzunluğuna bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Besleme yapısı referans konumumuz olan $x=p_0$ üzerinde konumlandırılmıştır. Böylece E-düzlemine göre simetri sağlanmış olup maksimum ışıma yönlülüğü elde edilmiştir.

Başlangıç ve nihai değerlerine ait parametrik değerler ve uzunlukları Tablo 2.5'te görülebileceği üzere dalga boyu uzunluklarının belirli rasyonel katları şeklinde belirlenmiştir.

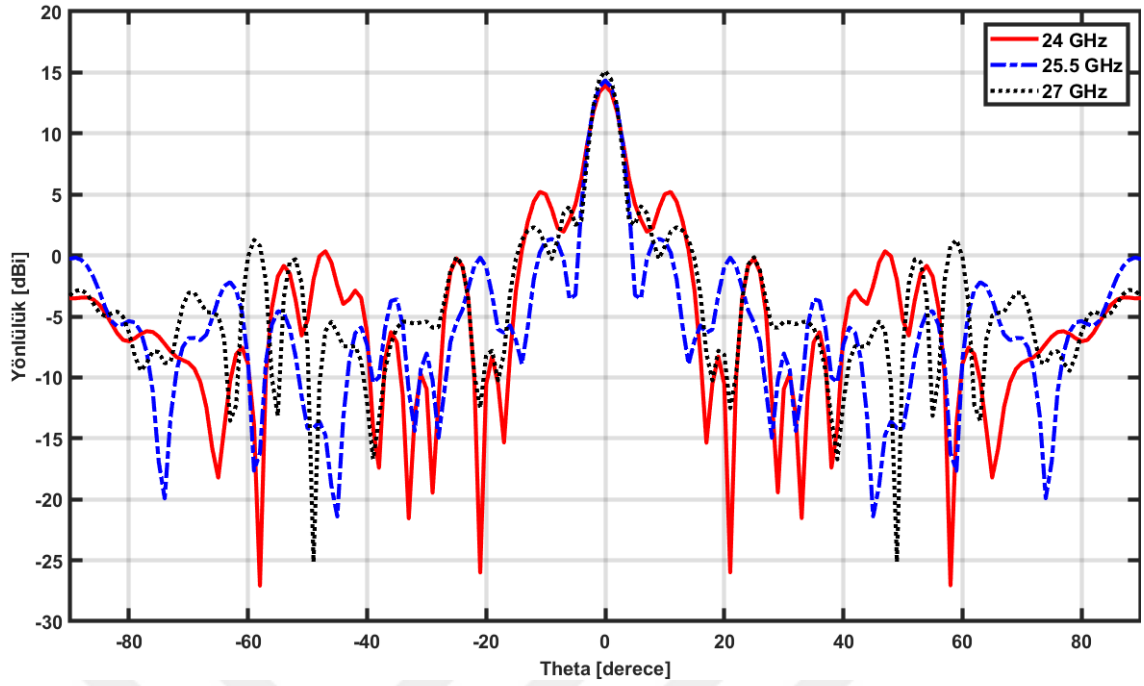
Tablo 2.5 Bow-tie beslemenin başlangıç ve nihai değerleri

Parametre	Başlangıç Değerleri		Nihai Değerleri	
	Parametrik	[mm]	Parametrik	[mm]
a	$3\lambda/2$	5,989	2λ	7,986
b	$\lambda/6$	0,665	$\lambda/8$	0,5
g	$\lambda/12$	0,333	$\lambda/18$	0,222

İlk test için bow-tie besleme yapısını oluşturan trapezoidal elemanların en uzun kenarı olan a uzunluğu seçilmiştir. Diğer parametreler sabit tutulduğunda a değerinin yeni değeri için oluşan uzak alan ışıma paterni Şekil 2.7'deki gibi elde edilmiştir.

**Şekil 2.7** $a=2\lambda$ değeri için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi

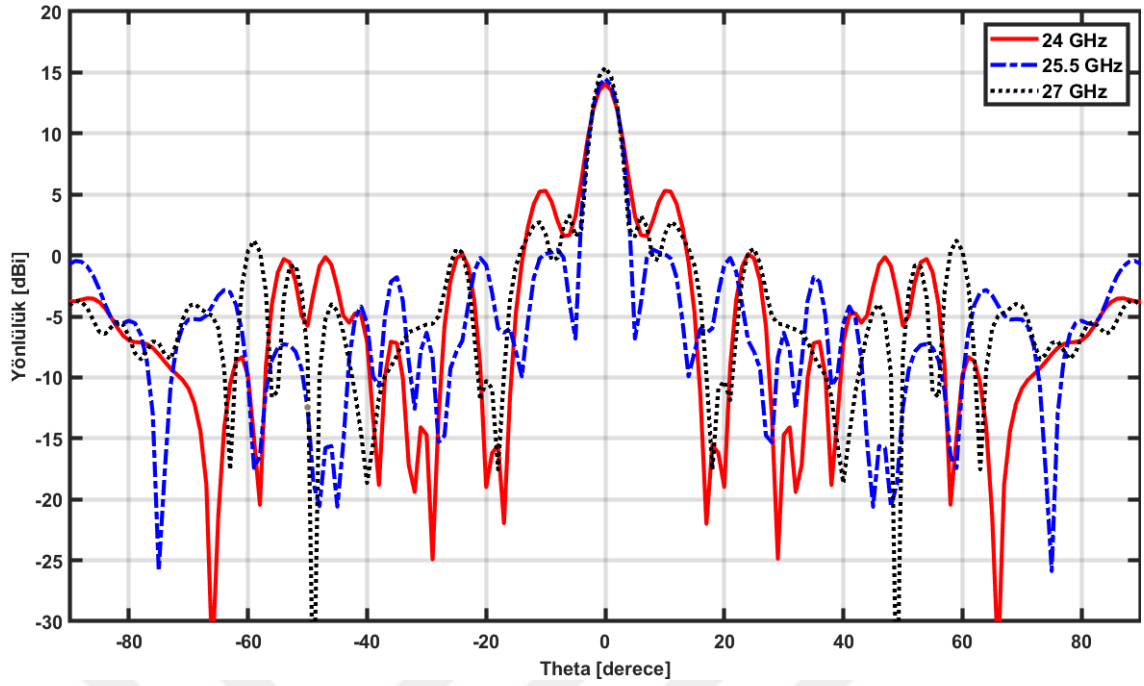
Şekil 2.7'deki a değişkenine bağlı bu yeni ışıma paterninde başlangıçtaki orijinal paterne göre bir iyileşme söz konusudur. İkinci test için trapezoidal kollardan birinin en kısa kenarı olan b uzunluğu %25 kısaltılarak $b=\lambda/8$ için tekrar yönlülük değerleri elde edilmiştir. Şekil 2.8'de bu yeni ışıma paterni 24, 25.5 ve 27 GHz frekanslarında görülmektedir.



Şekil 2.8 $b=\lambda/8$ değeri için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi

Bow-tie yapının kısa kenarındaki kısalma sonucu ana lob şiddetleri her üç frekansta da artmıştır. Bunun yanı sıra yan lob seviyelerinde yer yer artma ve azalmalar olmuştur. Burada öncelikli olarak ışıma paterni üzerindeki ana lob seviyeleri olduğundan dolayı bu yeni $b=\lambda/8$ değeri kabul edilebilir sonuçlar vermektedir.

Kontrollü testlerin son aşamasında ise bow-tie yapının kollarının arasındaki açıklık değeri $g=\lambda/12$ uzunluğundan %33'lük bir azalmayla $g=\lambda/18$ uzunluğuna düşürülmüştür. Yeni açıklık değeri için ışıma paterni Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.9 $g=\lambda/18$ değeri için lens antenin ışıma paterninin θ ile değişimi

Anten açıklığı için elde edilen ışıma paterni incelendiğinde çok az da olsa ana lob şiddetlerinde artış olduğu gözlenebilir. Bu üç değişken için ilk sonuçlar ile nihai sonuçlarının 24-27 GHz frekans bandındaki karşılaştırma sonuçları Tablo 2.6'da verilmiştir. Yeni değerlerden ana lob şiddeti büyük olanlar ve yan lob seviyeleri düşük olanlar kalın puntolarla yazılmıştır.

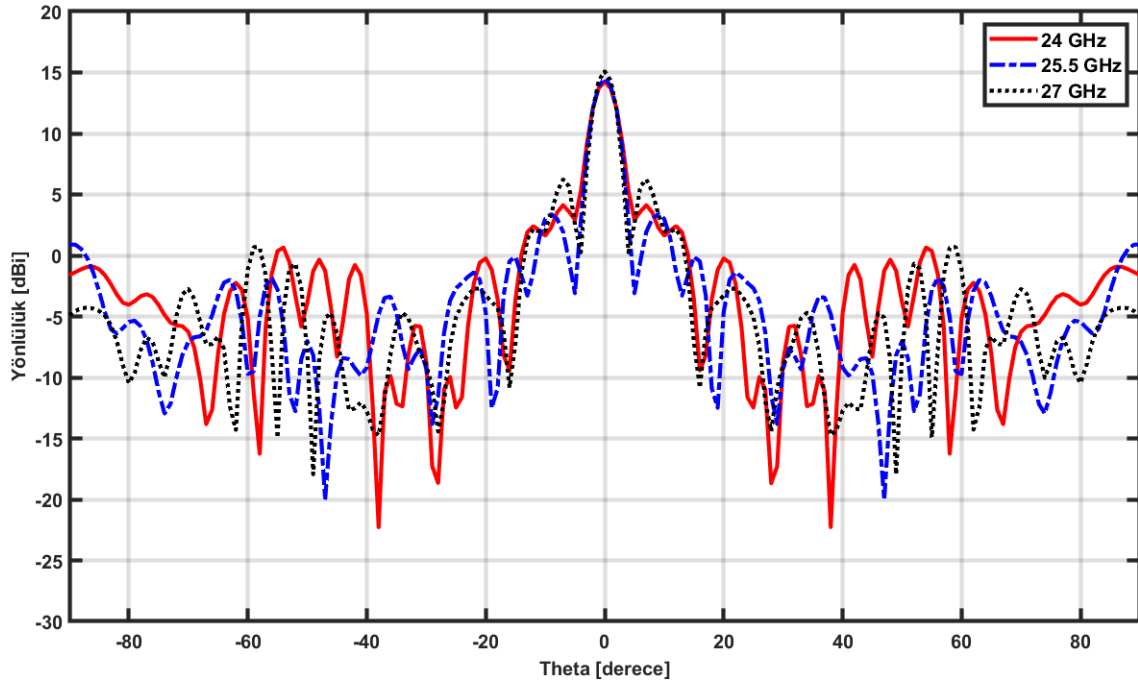
Tablo 2.6 Bow-tie besleme boyutlarının optimizasyonu için kontrollü testlerin ilk ve nihai değerlerine ait ışıma karakteristikleri

		İlk Sonuçlar		Nihai Sonuçlar	
Anten parametreleri	Frekans [GHz]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
a	24	13,8	-9	14,3	-10,1
	25,5	14,3	-11,2	14,5	-11,1
	27	15	-10,4	15,1	-8,9
b	24	13,8	-9	13,9	-8,7
	25,5	14,3	-11,2	14,4	-10,9

Tablo 2.6 Bow-tie besleme boyutlarının optimizasyonu için kontrollü testlerin ilk ve nihai değerlerine ait ışıma karakteristikleri (devamı)

	27	15	-10,4	15,1	-11,1
c	24	13,8	-9	14,1	-8,8
	25,5	14,3	-11,2	14,5	-10,9
	27	15	-10,4	15,4	-12,2

Sonuç itibariyle seçilen her üç parametrenin yeni değerleri ile elde edilen ışıma özellikleri başlangıçta belirlenen parametreler ile kontrollü karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar vermektedir. Bow-tie yapının bütün parametrelerinin aynı anda değiştirilmesiyle elde edilen ışıma paterninin son hali Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 Optimize edilmiş bow-tie yapı ile beslenen lens antene ait yönlülüğün θ ile değişimi

Tablo 2.7'de görülebileceği üzere bu optimizasyon sonucunda her üç frekans için yan lob seviyeleri daha fazla bastırılmış ve tamamında yüksek ana lob seviyeleri elde edilmiştir.

Tablo 2.7 Bütün kontrol değişkenlerinin eş zamanlı uygulaması ile oluşan nihai sonuçlara ait yönlülük değerleri

		İlk Sonuçlar		Nihai Sonuçlar	
Anten parametreleri	Frekans [GHz]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
a, b, g (eş zamanlı)	24	13,8	-9	14,2	-11,2
	25,5	14,3	-11,2	14,7	-12
	27	15	-10,4	15,3	-9,3

Bu aşamadan sonra 8 katlı anten dizisi için sırasıyla $a=2\lambda$, $b=\lambda/8$ ve $g=\lambda/18$ boyutlarının kullanıldığı anten besleme elemanları yer alacaktır.

2.4 Uydurma Katmanlarının Optimizasyonu

Hüzme yönlendirme çalışmasında karşımıza çıkan yoğun dielektrik ortamdan daha az yoğun hava ortamına doğru gönderilen ışın demetlerinin iç yansımasıyla oluşan kayıpları minimize etmek için uydurma katmanları kullanılmıştır. Uydurma katmanlarının dielektrik sabitleri ve bu dielektrik sabitlerine bağlı kalınlıkları belirlemek için bir $th(k,n)$ dizisi geliştirilmiştir. Hüzme yönlendirme için analitik yaklaşımın yer aldığı Bölüm 3'te bu modelleme için yapılan çalışmalar detaylı anlatılmaktadır. Burada tek bir lens anten için $x=0$ konumuna yerleştirilmiş yalnızca bir besleme portunun çalışması durumunda uydurma katmanlarının maksimum ışıma örüntülerini elde etmek amaçlanmıştır.

Çekirdek bölümünün uzatma kısmı, lensin eliptik bir yapı kazanması için $L=0,35r_0$ seçilmişti. Ancak ne var ki artan uydurma katman sayısı ile bu eliptik form bozulmaktadır. Ayrıca artan katman sayısına bağlı olarak $x=0$ beslemesi için ışınlar daha fazla yol kat etmektedir. Dolayısıyla her bir uydurma katmanlı yapı için $L=0,35r_n$ seçilerek eliptik form korunmuş olacaktır. Ayrıca lensin tamamının dış çapı olan r_n uzunluğunun yaklaşık sabit olması için r_0 değerleri çekirdek bölümünden itibaren dışa doğru $\lambda/4$ adımlarla azaltılmıştır. Böylece her yeni eklenen uydurma katmanın kalınlığıyla beraber oluşan yeni dış yarıçap değeri yaklaşık olarak sabit

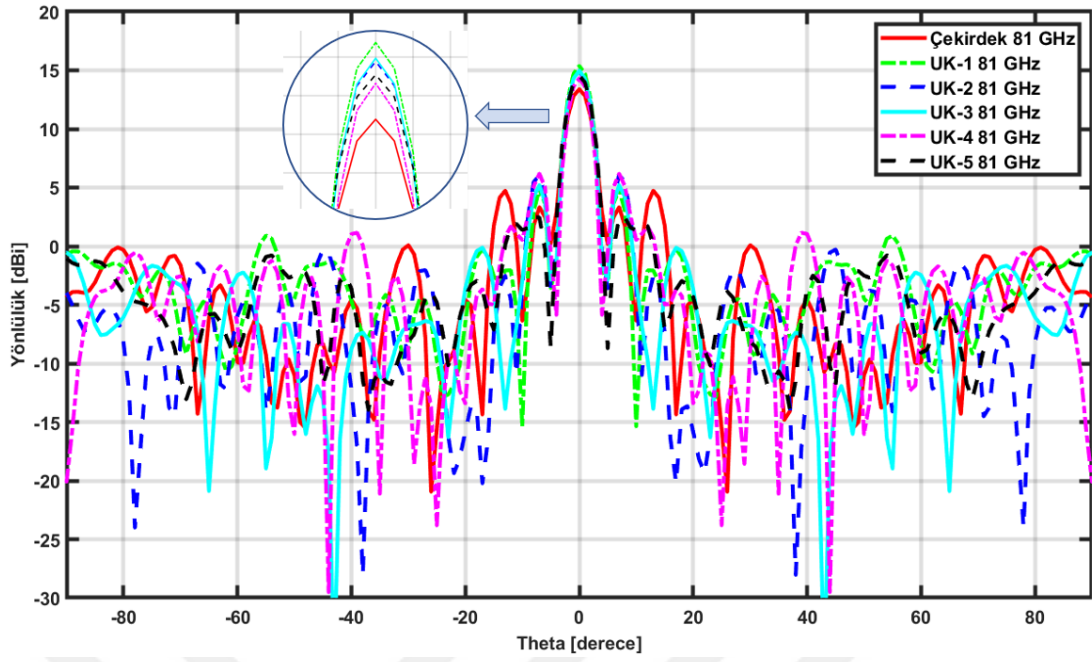
tutulmuş olmaktadır. Yaklaşık olarak ifade edilmesinin sebebi yeni eklenen $\lambda_k/4$ değerinin $\lambda_0/4$ değerinden biraz daha büyük olmasıdır. 76-81 GHz frekans bandında yapılan uzak alan ışıma simülasyonlarında 5 farklı uydurma katmanlı yapı için bu iyileştirme test edilmiştir. Tablo 2.8’de başlangıçta belirlenen parametrik uzunluklar ve kontrollü test için belirlenen nihai parametrik uzunluklar verilmiştir.

Tablo 2.8 Uydurma katmanlarının dış yarıçaplarının ve uzatma bölümlerinin başlangıç ve nihai değerleri

Parametre	Başlangıç Değerleri	Nihai Değerler
r_0	$18\lambda_0$	$19,25\lambda_0$
r_1	$18\lambda_0 + \lambda_1/4$	$19\lambda_0 + \lambda_1/4$
r_2	$18\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2)/4$	$18,75\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2)/4$
r_3	$18\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)/4$	$18,5\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)/4$
r_4	$18\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)/4$	$18,25\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)/4$
r_5	$18\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)/4$	$18\lambda_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5)/4$
L	$0,35 r_0$	$0,35 r_n$

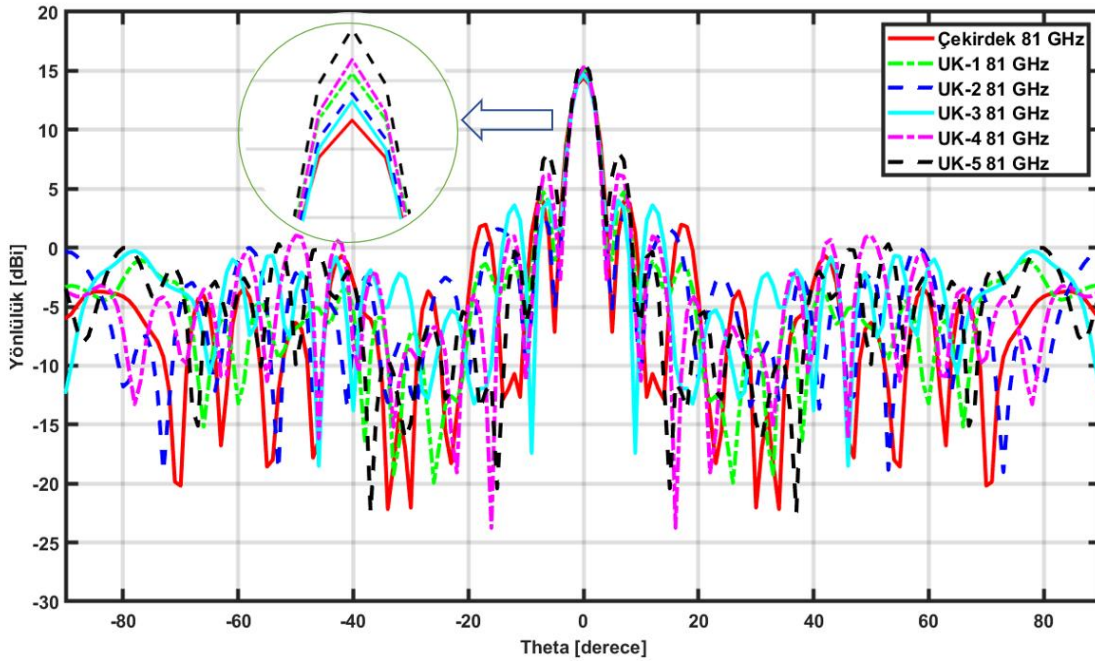
Başlangıç değerlerine ait lens yapısına ait yönlülüğün 81 GHz frekansında θ ile değişimi Şekil 2.11’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 2.12’de ise lens antenlerin dış yarıçapları yaklaşık olarak eşittir ve yönlülük değerleri uydurma katman sayısı artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla uydurma katmanlarının lensin yönlülük değerlerine yaptığı pozitif katkısı tam olarak gösterebilmek için dış yarıçapları ve dış yarıçaplara bağlı olarak yarı-eliptik formu koruyan uzatma kısımlarının uzunlukları aynı oranda eşit tutulmuştur. Her iki yapının 76-81 GHz frekans bandında başlangıç, merkez ve bitiş değerleri için ışıma değerleri Tablo 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.11 Beş farklı uydurma katmanlı lensin $x=0$ noktasındaki bow-tie yapı ile beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (Dış yarıçaplar sabit değil)

Şekil 2.11’de görülebileceği üzere uydurma katman sayısı artıkcça yönlülük değerlerinde bir artış beklenirken rastgele bir dağılım izliyor. Şekil 2.12’de ise dış çaplarının sabit tutulduğu lens yapılarının ışıma paternleri verilmiştir.



Şekil 2.12 Beş farklı uydurma katmanlı lensin $x=0$ noktasındaki bow-tie yapı ile beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (Dış yarıçaplar yaklaşık sabit)

Tablo 2.9 Dış çaplarının durumlarına bağlı olarak uydurma katmanlarının artışının ışıma paternlerine etkisinin karşılaştırılması

		Dış Yarıçaplar Artımlı		Dış Yarıçaplar Sabit	
Uydurma Katmanları	Frekans [GHz]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
Çekirdek	76	13,9	-11	14,3	-8,1
	78,5	14,1	-11	14,3	-11
	81	13,4	-8,7	14,4	-10,5
UK-1	76	15	-12	15	-9,2
	78,5	14,5	-8	14,8	-8,5
	81	15,4	-10,6	15,1	-10,4
UK-2	76	13,9	-12,1	15,6	-9,6
	78,5	14,8	-13	14,1	-7,6
	81	14,9	-8,8	14,8	-10,8
UK-3	76	14,6	-9,3	15	-12,8
	78,5	15,4	-11,3	15	-8
	81	15	-9,8	14,7	-10,7
UK-4	76	13,7	-10,7	15	-13,8
	78,5	14,6	-10,2	15,2	-9,8
	81	14,3	-8,1	15,3	-9,1
UK-5	76	14,2	-8,7	14,8	-11,1
	78,5	15,3	-12,6	14,9	-9,1
	81	14,5	-10,3	15,8	-7,6

Tablo 2.9'daki değerler incelendiğinde genel itibariyle dış çapların sabit tutulmaya çalışıldığı lens yapıları, ana lob şiddeti bakımından daha iyi sonuçlar vermektedir.

Uydurma katman sayısına bağlı olarak elde edilen bu tespit doğrultusunda Bölüm 4'teki çalışmalarda dış yarıçapları yaklaşık eşit dielektrik lensler için farklı besleme noktalarındaki ışıma paternlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

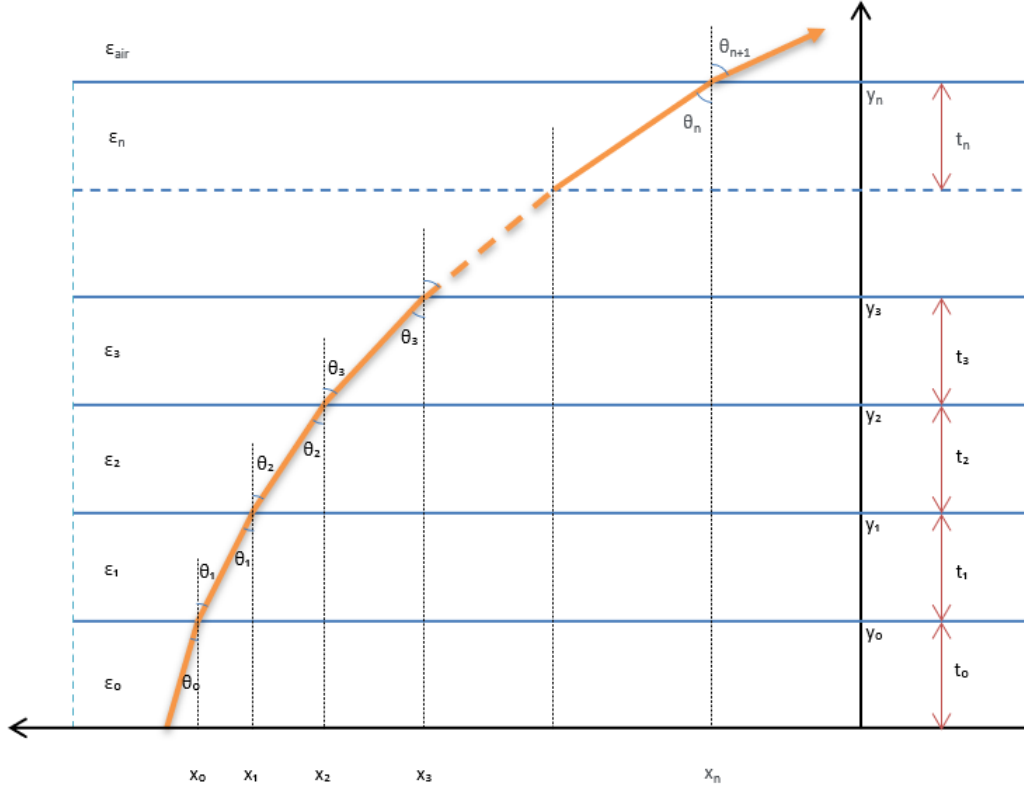


Bu bölümde dielektrik lensin üzerindeki farklı bağıl dielektrik sabitli uydurma katmanlarının hüzme yönlendirme işlemindeki matematiksel modellemesi ele alınmıştır. Hüzme yönlendirme işleminde yatayda konumlanmış anten dizisinin herhangi bir elemanından çıkan ışın demeti için farklı yönlendirme açısıyla sapması istenmektedir. Otomotiv radarı için tasarlanan lens antenin orta menzilli radar (MRR) için $\pm 40^\circ$ ve uzun menzilli radar (LRR) için $\pm 15^\circ$ görüş açısına sahip olması beklenmektedir. Dolayısıyla dielektrik lens anten üzerinde farklı bağıl dielektrik sabitine sahip uydurma katmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Snell yasası gereği yoğun ortamdan daha az yoğun ortama geçerken gelen ışının bir miktar saptığı (normalden uzaklaştığı) bilinmektedir. Bu bölümde hüzme yönlendirme için bu yaklaşımla analitik modellemeler yapılmıştır. Toplam ışıma verimliliğini yüksek tutacak şekilde farklı yapılarda analitik değerlendirmelerde bulunulmuştur. Uydurma katmanlarının paralel olduğu ve dairesel olduğu iki farklı senaryo için maksimum tarama açısı tespit edilip en yüksek verimliliğe sahip olan model tercih edilmiştir.

3.1 Paralel Uydurma Katmanlı Yapıda Kritik Açıların Analitik İncelemesi

İlk senaryo olan paralel yapılı sistemi ele alalım. Burada nihai yönelme açısı olan θ_{n+1} açısı; uydurma katman sayısı, katmanların dielektrik sabitleri ve θ_0 başlangıç giriş açısının bir fonksiyonudur. Ayrıca ışının hava ortamına çıktığı nokta ile ilk kırılma noktasının yataydaki uzaklığı katman sayısından bağımsız olarak sabit bir değere sahiptir. Bu değer eşitlik (3.1)'de verildiği gibi katman kalınlıklarının tanjantlarının toplamına eşittir.

$$|x_n - x_0| = \sum_{k=1}^n t_k \tan \theta_k \quad k \leq n+1 \quad k, n \in N \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 Paralel uydurma katmanlarında kırılmaya uğrayan bir ışının geometrik modeli

Şekil 3.1’de anten dizisinin x_0 noktasında yaptığı ışıma sonucu oluşan dalgaların izlediği yol görülmektedir. Gönderilen ışının en yüksek dielektrik sabiti değerine ($\epsilon_0=9,8$) sahip temel bölümden başlayarak azalan dielektrik sabitli değerlere sahip uydurma katmanlarından geçişi ve hava ortamına ($\epsilon_{hava}=1$) çıkışı gösterilmektedir. n adet uydurma katmanı kullanılan bir sistemde katmanlar arası geri yansımayı engelleyebilmek amacıyla her bir katman için dielektrik sabitleri eşitlik (3.2)’deki gibi belirlenir.

$$\epsilon_k(n) = \epsilon_{hava} \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{hava}} \right]^{\frac{n+1-k}{n+1}} \quad k \leq n+1 \quad k, n \in N \quad (3.2)$$

Burada uydurma katman sayısına bağlı olarak dielektrik sabitleri geometrik ortalamalı bir dizilime sahiptir. Örneğin hiç uydurma katmanı olmayan $n=0$ durumu için $\epsilon_0=9,8$ ve $\epsilon_1=\epsilon_{hava}=1$ şeklinde değer alacaktır. Bunu iki değişkenli bir fonksiyon olarak $\epsilon(k,n)$ şeklinde tanımlayacak olursak ϵ_k değerlerinin her bir n için alt kümeleri (3.3)’de verildiği şekilde sıralanabilir.

$$\begin{aligned}
\epsilon(k, 0) &= \{9,8 \ 1,0\} \\
\epsilon(k, 1) &= \{9,8 \ 3,13 \ 1,0\} \\
\epsilon(k, 2) &= \{9,8 \ 4,58 \ 2,14 \ 1,0\} \\
\epsilon(k, 3) &= \{9,8 \ 5,54 \ 3,13 \ 1,77 \ 1,0\} \\
\epsilon(k, 4) &= \{9,8 \ 6,2 \ 3,93 \ 2,49 \ 1,58 \ 1,0\} \\
\epsilon(k, 5) &= \{9,8 \ 6,7 \ 4,58 \ 3,13 \ 2,14 \ 1,46 \ 1,0\}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Bu sistematik dizide artan n değerleri için ϵ_k değerleri yeniden üretilir. Her bir dizide artan k değerleri için azalan ϵ_k değerleri elde edilir. Burada bir tek yapı için sıralı olarak ele alınan ortamların dielektrik yoğunlukları arasındaki oran sabittir (3.4), (3.5).

$$\frac{\epsilon_k(n)}{\epsilon_{k+1}(n)} = \frac{\left[\epsilon_{hava} \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{hava}} \right]^{\frac{n+1-k}{n+1}} \right]}{\left[\epsilon_{hava} \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{hava}} \right]^{\frac{n+1-(k+1)}{n+1}} \right]} \tag{3.4}$$

$$\frac{\epsilon_k(n)}{\epsilon_{k+1}(n)} = \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{hava}} \right]^{\frac{1}{n+1}} \tag{3.5}$$

Bu oran, sonraki aşamalarda kullanılacak olan Snell yasasında karşımıza çıkacaktır. Her bir uydurma katmanı için azalan dielektrik sabiti değerleri için λ_k dalga boyu uzunlukları ve dolayısıyla t_k kalınlıkları artacaktır. Bu kalınlık değerleri (3.6)'da verilen $\lambda/4 + m \cdot \lambda/2$ eşitliği kullanarak belirlenmiştir [28].

$$t_k = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_k}f_0} + \frac{mc}{2\sqrt{\epsilon_k}f_0} \quad k, m \in N \tag{3.6}$$

Görüleceği üzere uydurma katman kalınlıkları frekans ve dielektrik sabitinin bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla ϵ_k değerleri n adet katman kalınlığına bağlı olduğu gibi t_k değerleri de n adet uydurma katman sayısına göre düzenlenmelidir. Burada $f_0=25,5$ GHz ve $m=0$ için yine n ve k 'ya bağlı iki değişkenli bir $th(k,n)$ dizisi oluşturabiliriz (3.7).

$$th(k, 1) = \{1,66\}$$

$$th(k, 2) = \{1,37 \ 2,01\}$$

$$th(k, 3) = \{1,25 \ 1,66 \ 2,21\} \quad (3.7)$$

$$th(k, 4) = \{1,18 \ 1,48 \ 1,86 \ 2,34\}$$

$$th(k, 5) = \{1,14 \ 1,37 \ 1,66 \ 2,01 \ 2,43\}$$

Buraya kadar başlangıç değerlerinin belirlenmesi üzerinde duruldu. Snell yasasının aşamalı olarak uygulanması ardışık dielektrik ortamlardaki kırılmalar sonucu oluşacak θ_1 , θ_2 ve θ_{n+1} değeri sırasıyla eşitlik (3.8),(3.9), (3.10) ve (3.11)'de verilmiştir.

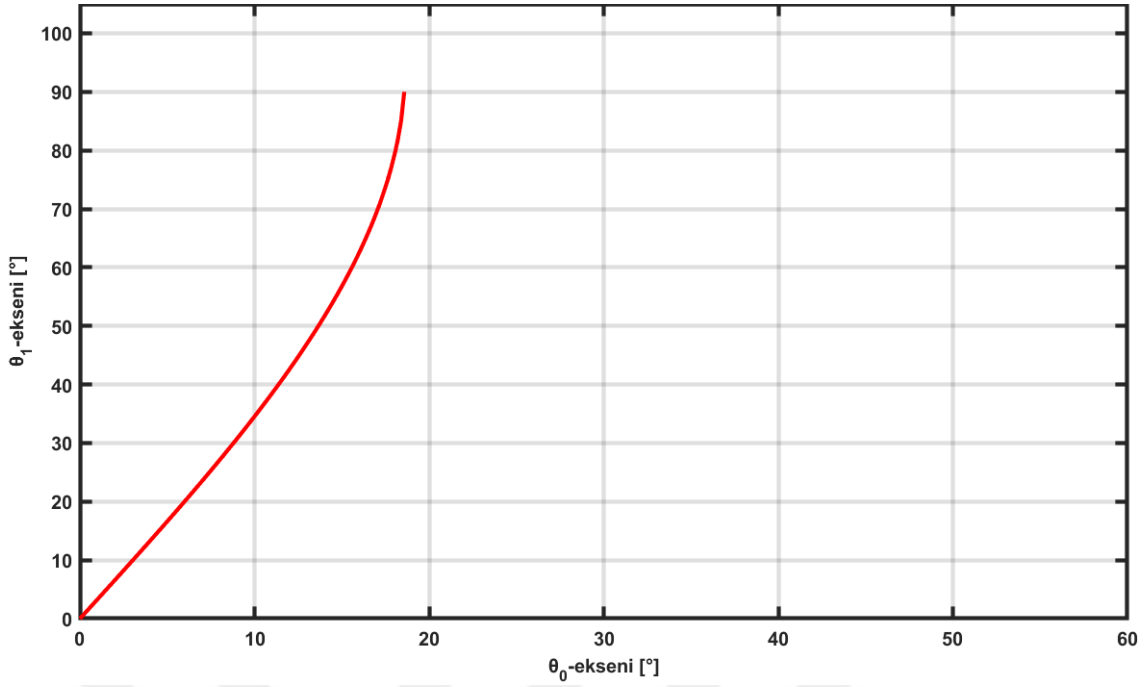
$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\epsilon_1}} \sin(\theta_0) \right] \quad (3.8)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin(\theta_1) \right] \quad (3.9)$$

$$\theta_{n+1} = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_n}{\epsilon_{n+1}}} \sin(\theta_n) \right] \quad (3.10)$$

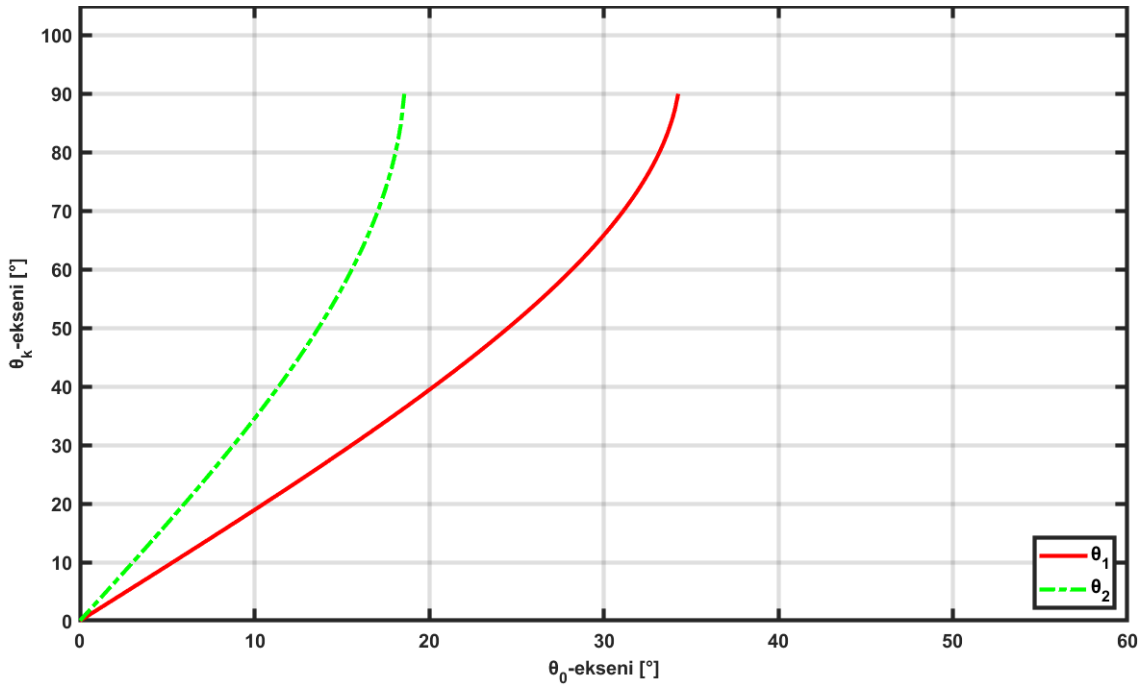
$$\theta_{n+1} = \sin^{-1} \left[\left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{air}} \right]^{\frac{1}{2(n+1)}} \sin(\theta_n) \right] \quad (3.11)$$

MATLAB benzetim ortamında $f_0=25,5$ GHz için hiç katman kullanılmadan ($n=0$) ve katman sayıları her defasında bir artırılarak elde edilen yapıların artan θ_0 değerlerine bağlı olarak θ_k değerleri grafiklerde görülmektedir. Katman sayısının artışıyla beraber çok daha küçük θ_0 giriş açısı için maksimum olarak yönlendirme yapılabilmektedir.



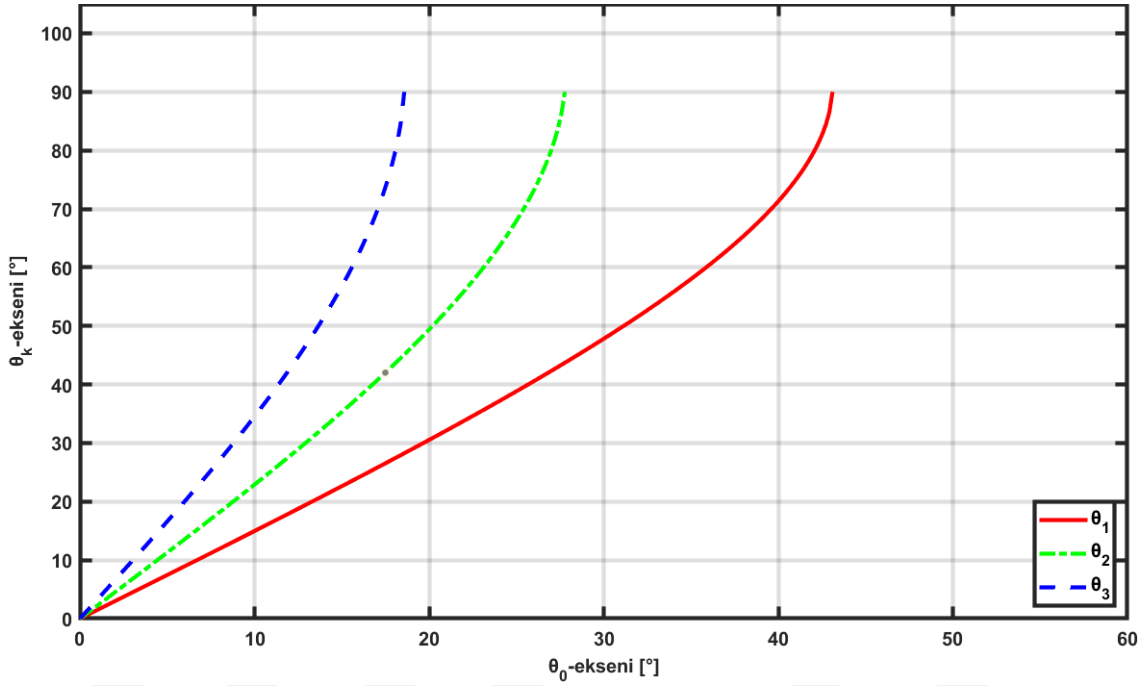
Şekil 3.2 Çekirdek lens ortamından hava ortamına çıkan ışın için geliş açısına bağlı kırılma açısının grafiği

Şekil 3.2’de çekirdek lens ile hava ortamı arasında oluşan kırılmanın geliş açısına göre değişimi verilmiştir. Burada, gönderilen ışınların yoğun dielektrik ortamdan hava ortamına çıkarken karşılaştığı yüksek dielektrik kontrast sebebiyle 18,58° gibi küçük bir kritik açı değeri oluşturmaktadır.



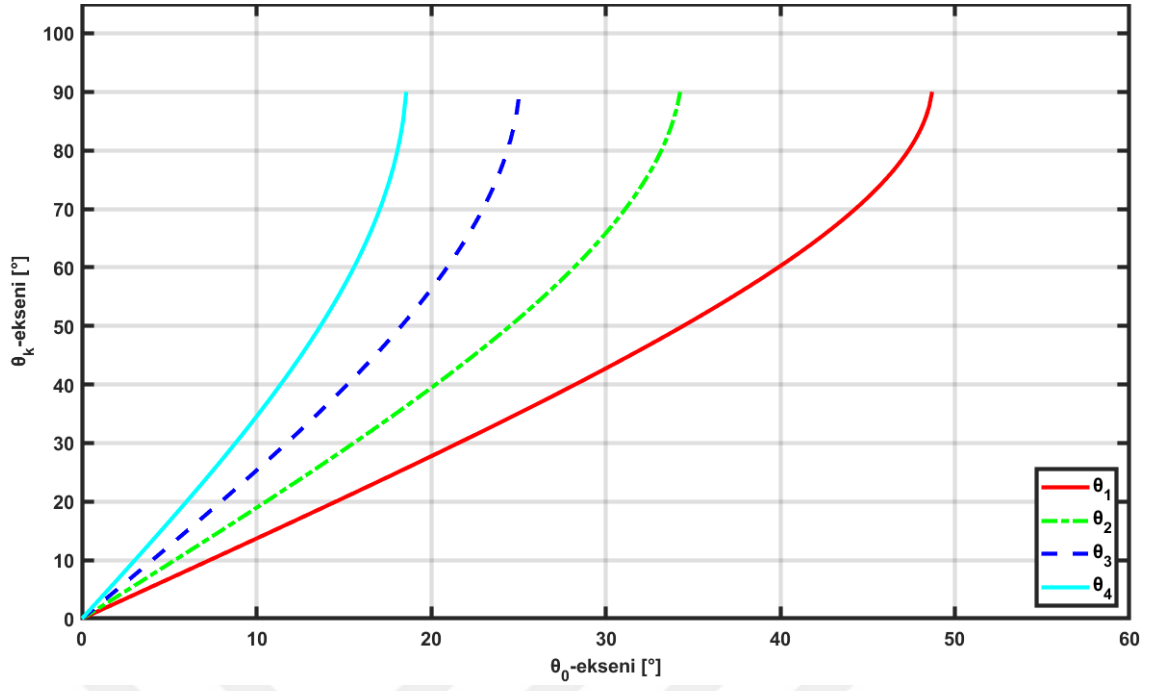
Şekil 3.3 Bir paralel uydurma katmanı bulunduğu durumda geliş açısına göre kırılma açılarının grafiği

Uydurma katman sayısını bir artırdığımızda Şekil 3.3'te görülebileceği üzere ilk kırılma (Çekirdek - UK-1) için maksimum $34,27^\circ$ gibi bir değere kadar geliş açıları saptırılabilir. 2. kırılma (UK-2 - hava ortamı) için ise yine maksimum giriş açısı değişmiyor ve $18,58^\circ$ gibi bir değerde sabit kalıyor. Daha büyük değerler için ise tam iç yansımaya uğruyor.

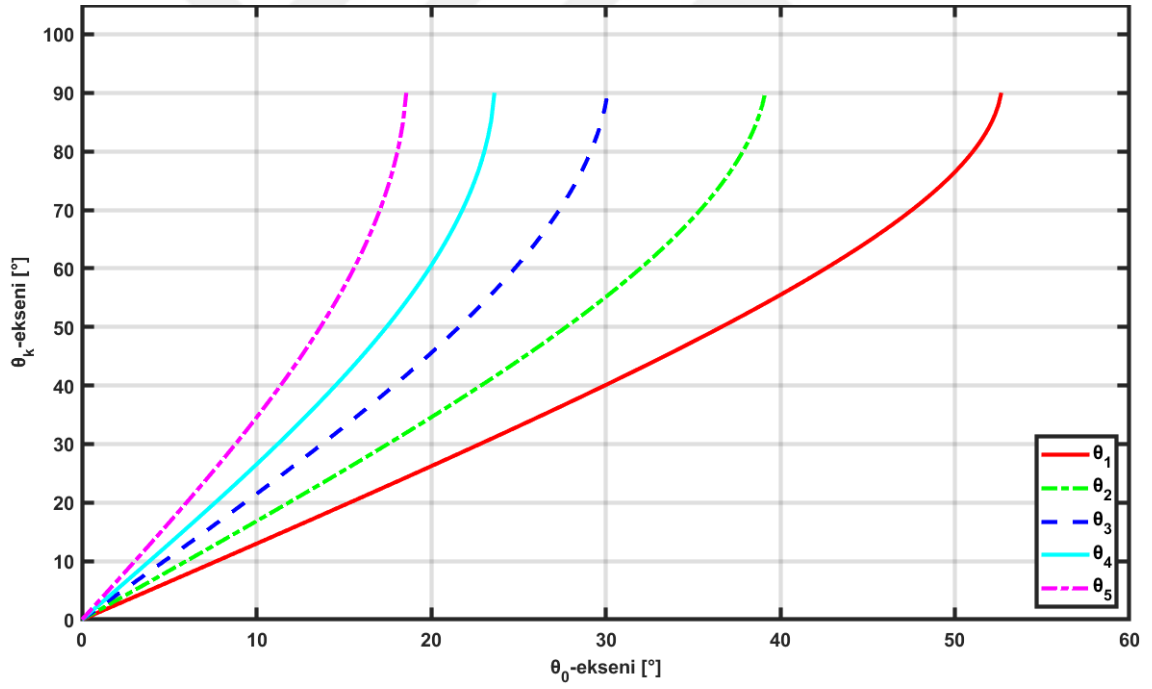


Şekil 3.4 İki paralel uydurma katmanı bulunduğu durumda geliş açısına göre kırılma açılarının grafiği

İki uydurma katmanı kullanılan yapı için çekirdek bölümü, UK-1, UK-2 ve hava ortamları arasında daha yumuşak bir geçiş ile ilk giriş açısı θ_0 $48,7^\circ$ değerine kadar artırılabilir (Şekil 3.4). Her bir artışta süreç bu şekilde ilerlemekte ve son katman ile hava ortamı arasındaki kritik açı değeri sabit kalmaktadır. Uydurma katman sayılarının 3, 4 ve 5 olduğu durumlar sırasıyla Şekil 3.5(a), 3.5(b) ve 3.5(c)'de verilen grafiklerde görülmektedir.

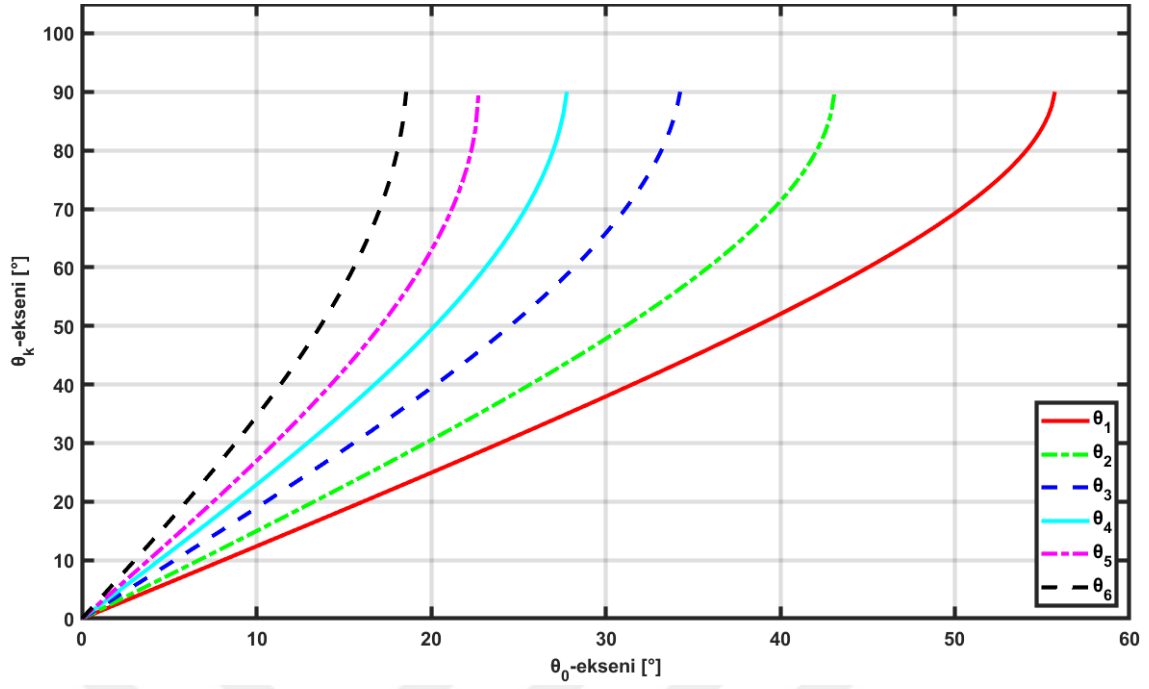


(a)



(b)

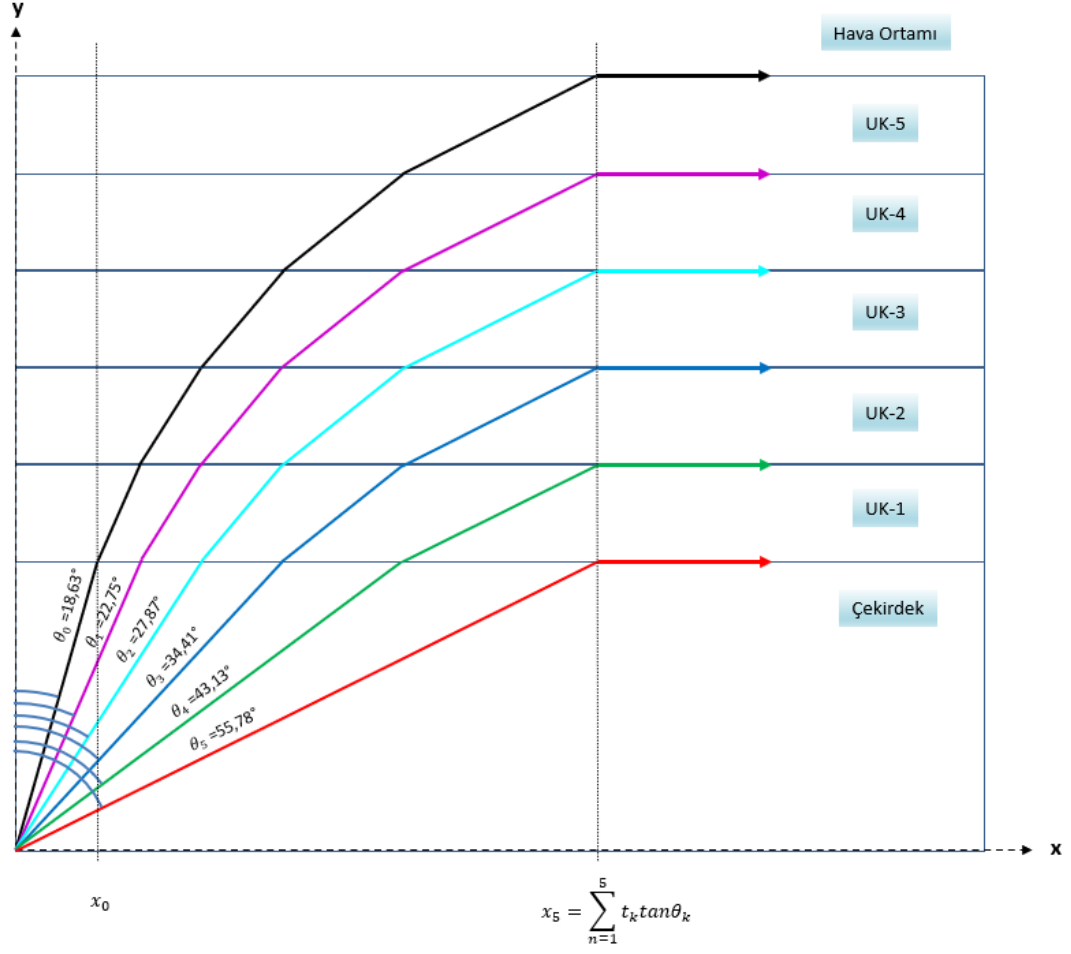
Şekil 3.5 Sırasıyla 3, 4 ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan yapılardaki θ_k kırılma açılarının θ_0 kritik açlarına göre değişimlerinin grafikleri (a) UK-3 (b) UK-4 (c) UK-5



(c)

Şekil 3.5 Sırasıyla 3, 4 ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan yapılardaki θ_k kırılma açılarının θ_0 kritik açılara göre değişimlerinin grafikleri (a) UK-3 (b) UK-4 (c) UK-5 (devamı)

Şekil 3.5(c)'de görülebileceği üzere çekirdek, 5 adet uydurma katmanı ve hava ortamları arasındaki 6 farklı kırılma açısı ve maksimum 90°'ye yönlendiren kritik θ_0 değerleri verilmiştir. Bu son grafikte verilen ışınların geometrik optik davranışı Şekil 3.6'da görselleştirilmiştir.

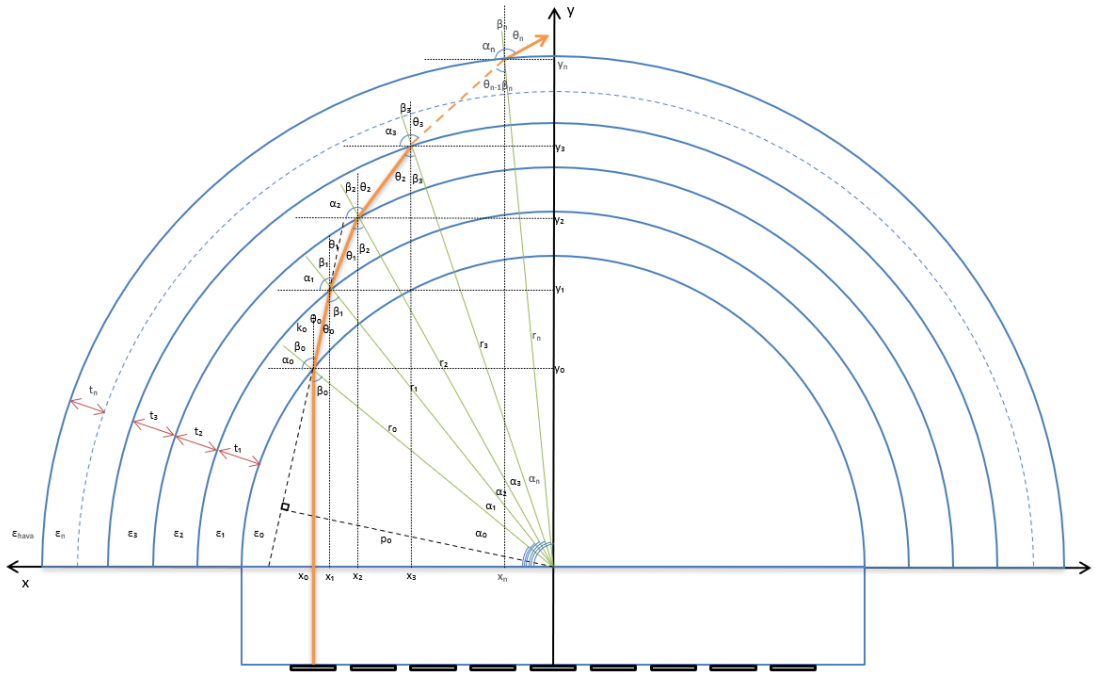


Şekil 3.6 Beş adet uydurma katmanı kullanılan yapı için ışınların geometrik optik modeli

Sonuç itibariyle kırılma indisleri dereceli ve orantılı olarak azalan daha fazla uydurma katmanına sahip lensler için gönderilen ışınların giriş açısı minimize edilebilir. Bu yaklaşım dairesel uydurma katmanlı dielektrik lens anten üzerinde hüzme yönlendirme çalışması için ışınların nasıl davrandığı hakkında fikir vermektedir. Bir sonraki alt başlıkta x değişkenine bağlı maksimum yönlendirme açısı elde etmek amacıyla dairesel yapının önce analitik yapısı daha sonra ise MATLAB benzetim sonuçları üzerinde durulacaktır.

3.2 Dairesel Uydurma Katmanlı Yapıda Kritik Açıların Analitik İncelemesi

Bu yapıda gönderilen ışınlar, ardışık dielektrik ortamlar arası kırılmalarda kendi normalleriyle yapacağı sapma miktarlarına ek olarak antenin dairesel yapısından kaynaklı olarak daha fazla yönlenebilmektedir. Uydurma katmanları arası her bir kırılma için $\alpha_n - \alpha_{n-1}$ açısal kayma olmaktadır. Böylece kırılmalarda kritik açı sınır değerlerine ulaşmadan yumuşak bir geçiş sağlanabilecek ve toplam yansıma kayıpları minimize edilebilmektedir.



Şekil 3.7 Dairesel dielektrik uydurma katmanlarında kırılmaya uğrayan bir ışının geometrik optik modeli

Şekil 3.7’de görüleceği üzere bilinen ve bizim önceden tayin ettiğimiz değerler kullanılarak gönderilen ışının geçtiği koordinatlar (x_n, y_n) ve yaptığı sapma açısı θ_n bulunmaya çalışılacaktır. Öncelikle birinci ve ikinci kırılmaların analitik yapısı ele alınıp daha sonra elde edilen sonuçlar genelleştirilecektir. Bu eşitlikler sisteminin başlangıç parametresi olan α_0 ve β_0 değerleri, x_0 başlangıç besleme pozisyonu değeri kullanılarak sırasıyla (3.12) ve (3.13)’deki gibi bulunur.

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \frac{x_0}{r_0} \quad (3.12)$$

$$\beta_0 = 90^\circ - \alpha_0 \quad (3.13)$$

Burada β_0 değeri, dielektrik lensin çekirdek bölümü ile ilk uydurma katmanının ara yüzeyinde, gönderilen ışın ile bu ışının normali arasındaki geliş açısıdır. Snell yasası kullanılarak β_0 değeri için kırılma açısı olan $\beta_0 + \theta_0$ açısı ve dolayısıyla θ_0 açısı (3.14) ve (3.15) yardımıyla bulunur. Bu değer, ışınma doğrultusu olan y-eksenine göre ilk kırılmanın yönlendirme değeridir.

$$\sqrt{\varepsilon_0} \sin \beta_0 = \sqrt{\varepsilon_1} \sin(\beta_0 + \theta_0) \quad (3.14)$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}} \sin \beta_0 \right] - \beta_0 \quad (3.15)$$

Şekil 3.8’de görülebileceği üzere lensin çekirdek kısmından 1. uydurma katmanına geçerken oluşan kırılma θ_0 kadar bir sapma meydana getirmektedir. Bundan sonraki her bir uydurma katmanından sonra oluşacak olan yeni açıklıkların eklenmesi ile gönderilen ışının tarama açısı artacaktır. 1. uydurma katmanından 2.sine geçerken burada belirleyici olan t_1 katman kalınlığı olacaktır. Bu aşamada ışının bir sonraki kırılma noktasını tespit etmek için öncelikle üzerinde bulunduğu doğrunun denklemi elde edilecek ve daha sonra merkez noktasına olan uzaklığı belirlenecektir. Böylece k_0 doğru parçasının uzunluğu bulunabilir. Bu değer kosinüs teoremi kullanılarak bizi ikinci kırılma noktasının normalinin x-ekseniyle yaptığı açı olan α_1 değerine götürecektir. Öncelikle k_0 doğru parçasının üzerinde bulunduğu, bir noktası bilinen doğrunun denklemi (3.16), (3.17), (3.18) kullanılarak bulunmalıdır.

$$y - y_0 = \tan(90^\circ - \theta_0)(x - x_0) \quad (3.16)$$

$$y - y_0 = \tan(90^\circ - \theta_0)x - \tan(90^\circ - \theta_0)x_0 \quad (3.17)$$

$$y - \tan(90^\circ - \theta_0)x - (y_0 - \tan(90^\circ - \theta_0)x_0) = 0 \quad (3.18)$$

Orijinin bu doğruya olan dik uzaklığı p_0 olsun. Orijin koordinatları $(x_p, y_p) = (0,0)$ olacağı için dik uzaklık sadece bu doğrusal denklemin sabit bileşeni olan c değerine bağlı olacaktır.

$$p_0 = \frac{|y_0 - \tan(90^\circ - \theta_0)x_0|}{\sqrt{\tan^2(90^\circ - \theta_0) + 1}} \quad (3.22)$$

Burada $y_0 = x_0 \tan \alpha_0$ ve $\tan(90^\circ - \theta_0) = \cot \theta_0$ dönüşümleri yapılır (3.23) ve (3.24)'de verildiği gibi p_0 uzaklık değerinin nihai hali bulunur.

$$p_0 = \frac{|x_0 \tan \alpha_0 - x_0 \cot \theta_0|}{\sqrt{1 + \cot^2 \theta_0}} \quad (3.23)$$

$$p_0 = \frac{x_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|}{\sqrt{1 + \cot^2 \theta_0}} \quad (3.24)$$

Dik uzaklık belirlendikten sonra k_0 değerini bulmak için bilinen r_0 ve r_1 değerlerine bağlı Öklid bağıntısı kullanılır. Ancak öncesinde p_0^2 değeri (3.26)'daki gibi bulunarak bu adımdan sonra k_0 için (3.28)'de verilen daha sade bir eşitlik elde edilebilir.

$$p_0^2 = \frac{x_0^2 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2}{1 + \cot^2 \theta_0} \quad (3.25)$$

$$p_0^2 = x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2 \quad (3.26)$$

$$k_0 = \sqrt{r_1^2 - p_0^2} - \sqrt{r_0^2 - p_0^2} \quad (3.27)$$

$$k_0 = \sqrt{r_1^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2} - \sqrt{r_0^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2} \quad (3.28)$$

Bu aşamada k_0 doğru parçasını gören $\alpha_1 - \alpha_0$ açısı için kosinüs teoremi uygulandığında α_1 için (3.31) ile verilen eşitlik elde edilir.

$$\cos(\alpha_1 - \alpha_0) = \frac{r_0^2 + r_1^2 - k_0^2}{2r_0 r_1} \quad (3.29)$$

$$\cos(\alpha_1 - \alpha_0) = \frac{r_0^2 + r_1^2 - \left[\sqrt{r_1^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2} - \sqrt{r_0^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2} \right]^2}{2r_0 r_1} \quad (3.30)$$

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left[\frac{r_0^2 + r_1^2 - \left[\sqrt{r_1^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2} - \sqrt{r_0^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0 |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2} \right]^2}{2r_0 r_1} \right] + \alpha_0 \quad (3.31)$$

Şekil-3.8'te görüleceği üzere 2. kırılma noktasında, gelen açı $\beta_1 + \theta_0$ ve kırılma açısı ise $\beta_1 + \theta_1$ olduğu için $\beta_1 = 90^\circ - \alpha_1$ eşitliği kullanılarak ikinci kez Snell yasası uygulandığında;

$$\sqrt{\varepsilon_1} \sin(\beta_1 + \theta_0) = \sqrt{\varepsilon_2} \sin(\beta_1 + \theta_1) \quad (3.32)$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin(90^\circ - \alpha_1 + \theta_0) \right] - (90^\circ - \alpha_1) \quad (3.33)$$

θ_1 için (3.33) eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte (3.31)'de elde edilen α_1 değeri yerine yazılırsa 2. kırılma sonrasında θ_1 'e ilişkin sadece başlangıçta bilinen parametrelere bağlı (3.34)'deki gibi bir eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} \theta_1 = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin \left[90^\circ \right. \right. \\ \left. \left. - \cos^{-1} \left[\frac{r_0^2 + r_1^2}{2r_0r_1} - \frac{[\sqrt{r_1^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0} |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2 - \sqrt{r_0^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0} |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2]^2}{2r_0r_1} \right] - \alpha_0 \right] \right] \\ \left. - \left[90^\circ - \cos^{-1} \left[\frac{r_0^2 + r_1^2}{2r_0r_1} - \frac{[\sqrt{r_1^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0} |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2 - \sqrt{r_0^2 - x_0^2 \sin^2 \theta_0} |\tan \alpha_0 - \cot \theta_0|^2]^2}{2r_0r_1} \right] - \alpha_0 \right] \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

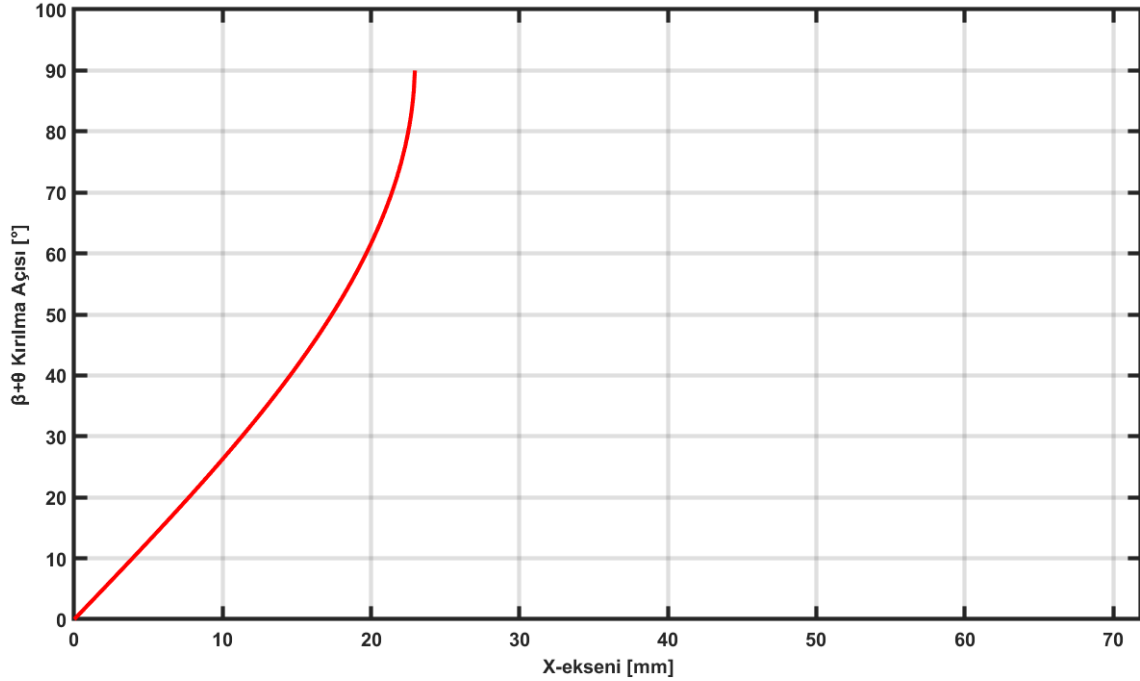
Buraya kadar ifade edilen denklemler sistemi ile θ_1 yönlenme açısı bulunabilir. Bu işlemler n adet uydurma katmanlı bir dielektrik lens için genelleştirilecek olursa θ_n (3.35)'te verildiği gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} \theta_n = \sin^{-1} \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+1}}} \sin \left[90^\circ - \cos^{-1} \left[\frac{r_n^2 + r_{n-1}^2}{2r_nr_{n-1}} \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{[\sqrt{r_n^2 - x_{n-1}^2 \sin^2 \theta_{n-1}} |\tan \alpha_{n-1} - \cot \theta_{n-1}|^2 - \sqrt{r_{n-1}^2 - x_{n-1}^2 \sin^2 \theta_{n-1}} |\tan \alpha_{n-1} - \cot \theta_{n-1}|^2]^2}{2r_nr_{n-1}} \right] - \alpha_{n-1} \right] \right] \\ \left. - \left[90^\circ - \cos^{-1} \left[\frac{r_n^2 + r_{n-1}^2}{2r_nr_{n-1}} \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{[\sqrt{r_n^2 - x_{n-1}^2 \sin^2 \theta_{n-1}} |\tan \alpha_{n-1} - \cot \theta_{n-1}|^2 - \sqrt{r_{n-1}^2 - x_{n-1}^2 \sin^2 \theta_{n-1}} |\tan \alpha_{n-1} - \cot \theta_{n-1}|^2]^2}{2r_nr_{n-1}} \right] - \alpha_{n-1} \right] \right] \end{aligned} \quad (3.35)$$

Bu kadar yoğun trigonometrik denklem ihtiva eden bu analizde herhangi bir x_0 değerine bağlı farklı uydurma katmanlarındaki kritik açı değerlerini bulmak için MATLAB benzetim ortamı kullanılmıştır. 24-27 GHz ve 76-81 GHz frekans bantlarının merkez frekansları için iki farklı çalışma yapılmıştır.

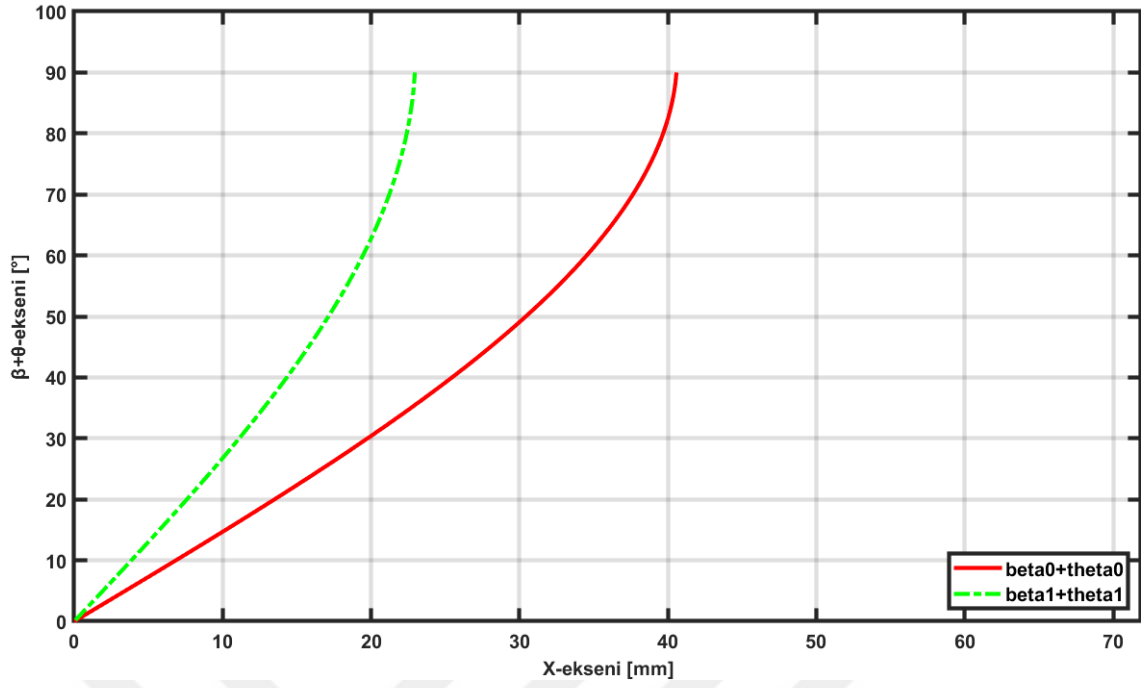
3.2.1 25,5 GHz Merkez Frekansı için MATLAB Sonuçları

24-27 GHz frekans bandı için daha önce öngörülen $r_0=18\lambda_{24\text{GHz}}=71,874$ mm uzunluğu baz alınarak MATLAB grafik sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca uydurma katman kalınlıkları merkez frekansa bağlı dalga boyu değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Çekirdek lens için oluşturulan grafik Şekil 3.9’da verilmiştir.



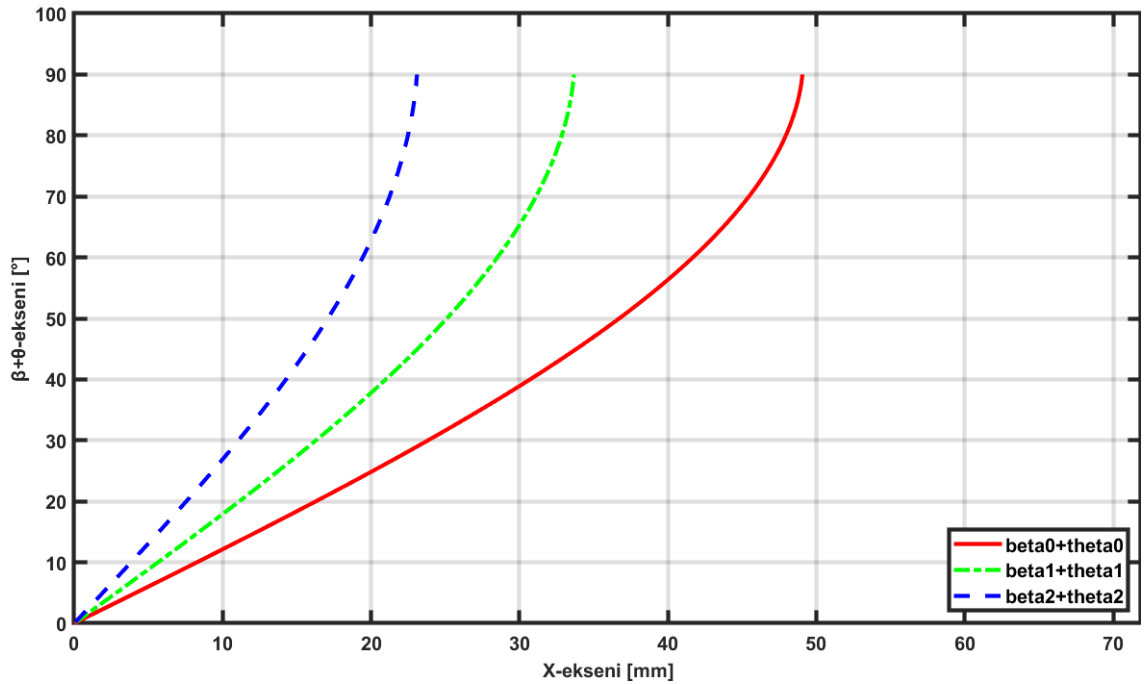
Şekil 3.9 Çekirdek kısmından hava ortamına çıkan ışınların kırılma açısı $\beta+\theta$ 'nın x-ekseni üzerindeki besleme noktasına göre değişimi

Artan x değerlerine bağlı olarak $\beta_0+\theta_0$ kırılma açısı $x=22,95$ mm değerinde maksimum değerine ulaşmakta olup daha büyük x değerleri için ise iç yansıma oluşmaktadır. Yalnızca bir adet uydurma katmanlı yapı için kırılma eğrisi Şekil 3.10’da verilmiştir.



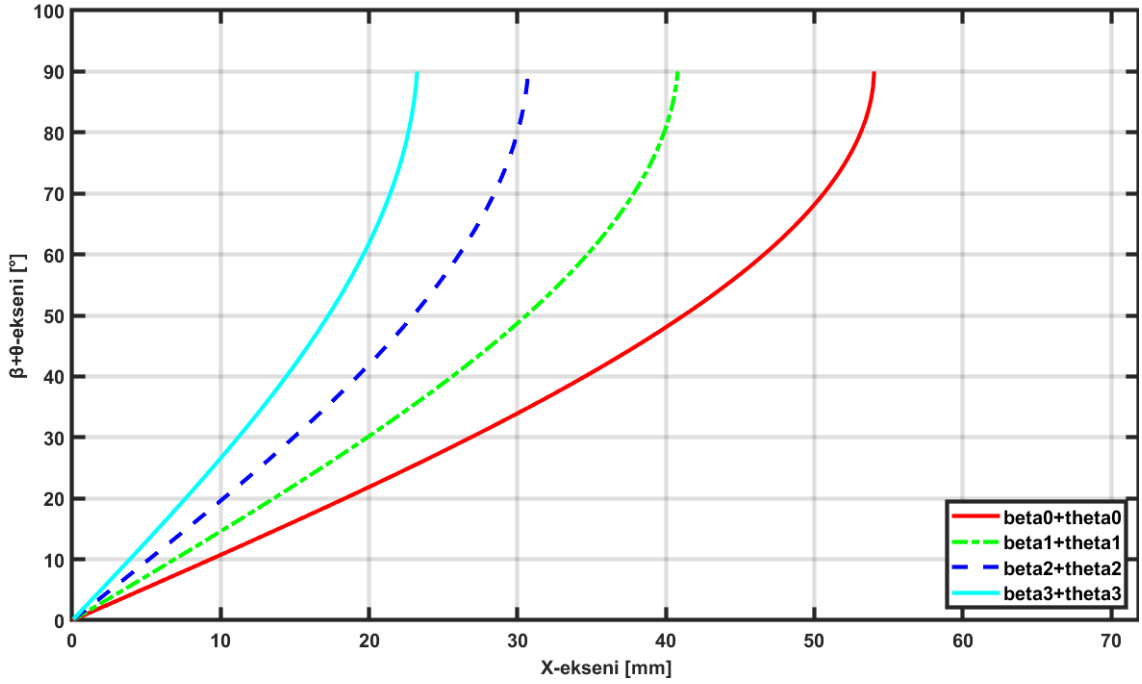
Şekil 3.10 Bir adet uydurma katmanlı dairesel yapı için $\beta+\theta$ kırılma açılarının x-ekseni üzerindeki besleme noktasına göre değişimi

Burada çekirdek kısmına bir uydurma katmanı eklenince ilk kritik açının ortaya çıktığı x değerine orijinden daha uzak bir noktada ulaşılmaktadır (Şekil 3.10). Hava ortamına çıkış yaptığı 2. kırılma açısı olan $\beta_1+\theta_1=90^\circ$ değeri $x=22,95$ mm kritik noktasında gerçekleşiyor.



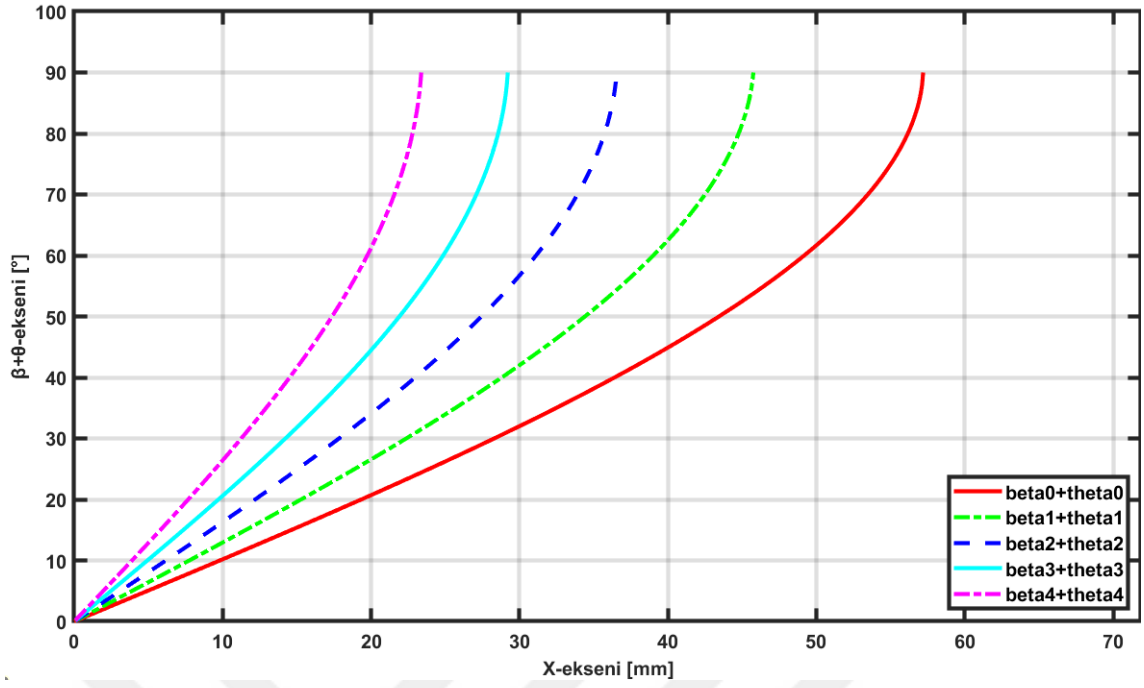
Şekil 3.11 İki adet uydurma katmanlı dairesel yapı için $\beta+\theta$ kırılma açılarının x-ekseni üzerindeki besleme noktasına göre değişimi

Şekil 3.11’de verilen 2 uydurma katmanlı dairesel lens için $\beta_k + \theta_k$ tam yansımaya uğrayan sınır değerlerinde x_k değerleri azalmıştır. İlk tam yansıma açısı $x_0=49,07$ mm noktasında olurken, 3. kırılma için $x_3=23,09$ mm noktasında gerçekleşmektedir. Burada bizim dikkat ettiğimiz husus, artan uydurma katmanlı yapılarda sistematik olarak son kritik değerler olan x_n değerlerinin x_{n-1} değerlerine göre biraz daha artmasıdır. Şekil 3.12’de sırasıyla 3, 4 ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan yapılar için kritik x değerlerine ait grafiklerde bu kayma miktarı elde edilmeye çalışılmıştır.



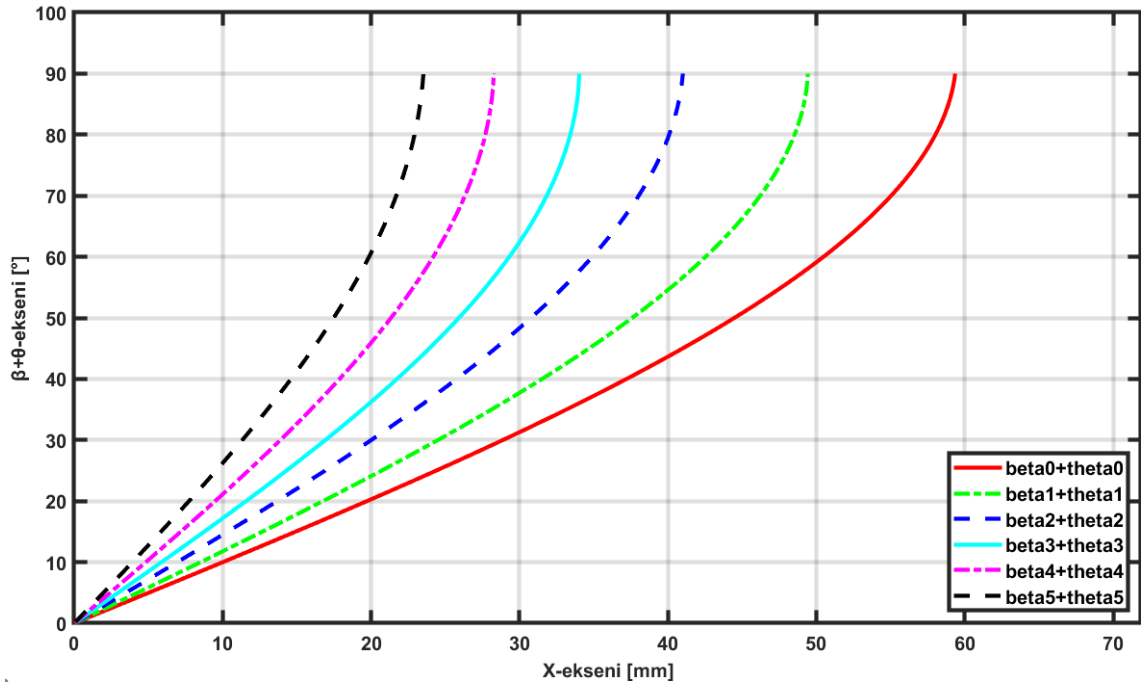
(a)

Şekil 3.12 Artan uydurma katmanlı dairesel lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre kırılma açılarının değişimi (a) UK-3 (b) UK-4 (c) UK-5



(b)

2



(c)

Şekil 3.12 Artan uydurma katmanlı dairesel lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre kırılma açılarının değişimi (a) UK-3 (b) UK-4 (c) UK-5 (devamı)

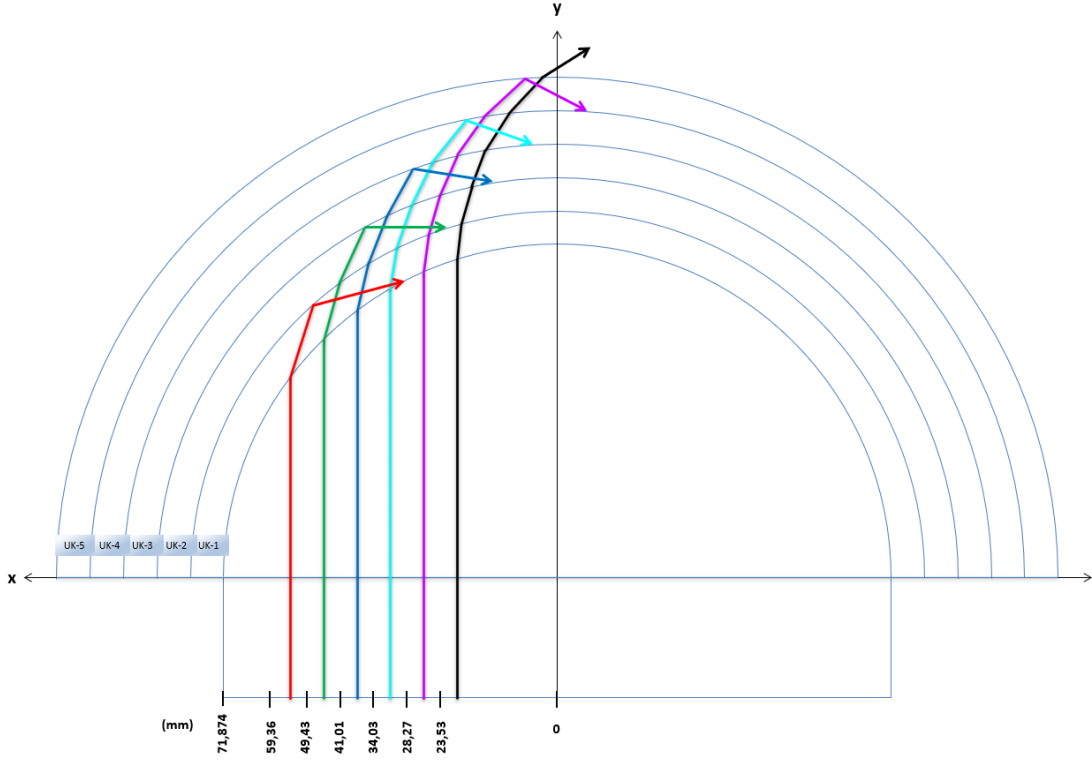
Şekil 3.12’de grafikler genel olarak dairesel uydurma katman sayılarındaki artışla beraber çekirdek lenste ilk kırılma için elde edilen kritik x_0 noktasının 5 uydurma katmanlı lenste 6. kırılma noktası olan x_5 noktasının merkezden uzaklaştığı görülmektedir. Bunu daha iyi gözlemleyebilmek için Tablo 3.1’deki değerler incelenebilir.

Tablo 3.1 25,5 GHz merkez frekansında 5 farklı uydurma katmanlı dielektrik lensler üzerinde gönderilen ışınların kritik x değerleri

UK sayıları	x_0 [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]	x_3 [mm]	x_4 [mm]	x_5 [mm]
Çekirdek	22,9508	-	-	-	-	-
1 UK	40,5775	22,9508	-	-	-	-
2 UK	49,0671	33,6707	23,0946	-	-	-
3 UK	54,0314	40,7934	30,7209	23,2385	-	-
4 UK	57,197	45,7576	36,5485	29,2101	23,3824	-
5 UK	59,3554	49,4269	41,0092	34,0304	28,2748	23,5263

Tablo 3.1’deki verilerden yola çıkarak uydurma katmanları arttıkça her farklı yapı için son kırılma noktalarını veren x_n kritik değerlerinin merkezden biraz daha uzaklaştığını ve $|x_5 - x_0| = 0,58$ mm kayma olduğunu söyleyebiliriz. Burada uydurma katman kalınlıklarının artmasıyla bir ötelenme olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 3.1’deki 5 uydurma katmanlı yarı-dairesel lens üzerindeki kırılma olaylarına ilişkin sayısal verilerin geometrik optik modeli Şekil 3.13’te resmedilmiştir.



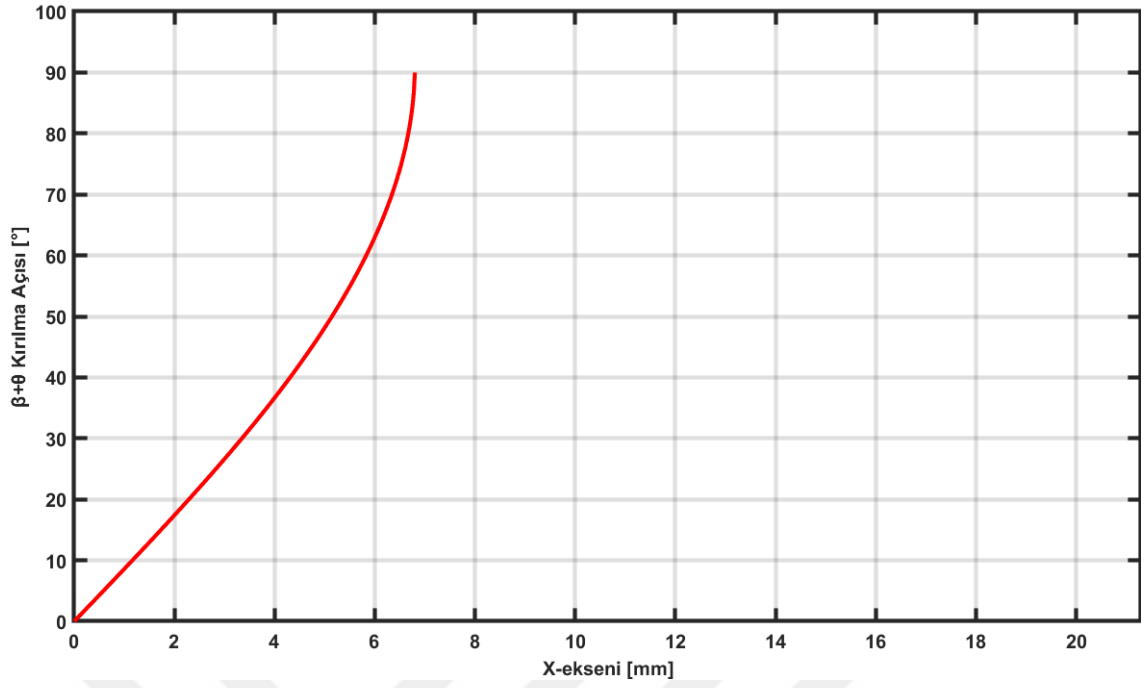
Şekil 3.13 25,5 GHz merkez frekansı için 5 adet uydurma katmanı kullanılan dielektrik lens üzerine besleme yapısından gönderilen ışınların geometrik optik modeli

Sonuç itibariyle iç yansımaya uğramadan bütün uydurma katmanlarından geçebilecek ışınlar maksimum $x_5=23,53$ mm noktasına kadar konumlandırılan besleme yapılarından gönderilebilmektedir. Bu yaklaşımla maksimum hüzmeye yönlendiriciliğine sahip besleme noktası elde edilmiştir.

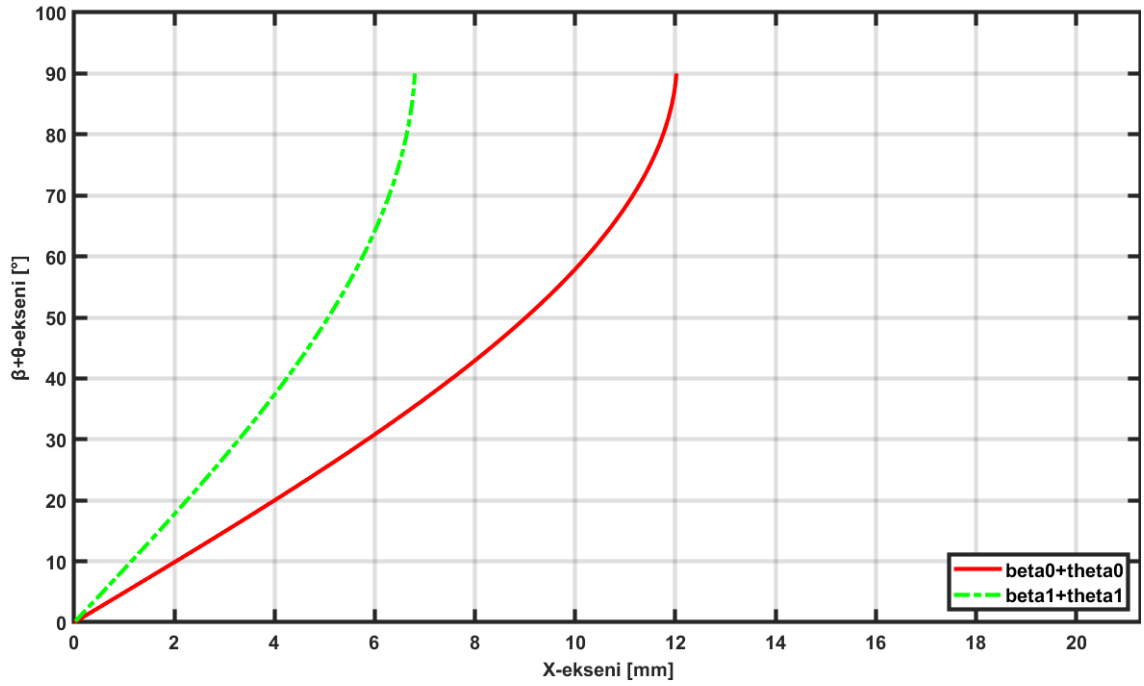
3.2.2 78,5 GHz Merkez Frekansı için MATLAB Sonuçları

Bu alt başlıkta, 76-81 GHz frekans bant aralığında merkez frekans değeri olan 78.5 GHz için $r_0=18\lambda_{81\text{GHz}}=21,296$ mm baz alınarak tasarlanan dielektrik lens üzerinde gönderilen ışınların MATLAB grafik sonuçları ele alınmıştır. Daha önce 24-27 GHz bant aralığı için elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği için elde edilen grafikler paylaşılmış ve son değerlendirmeleri yapılmıştır.

Uydurma katmansız (sadece lens çekirdeği) yapıdan 5 adet uydurma katmanlı yapıya kadar elde edilen grafikler Şekil 3.14'te verilmiştir.

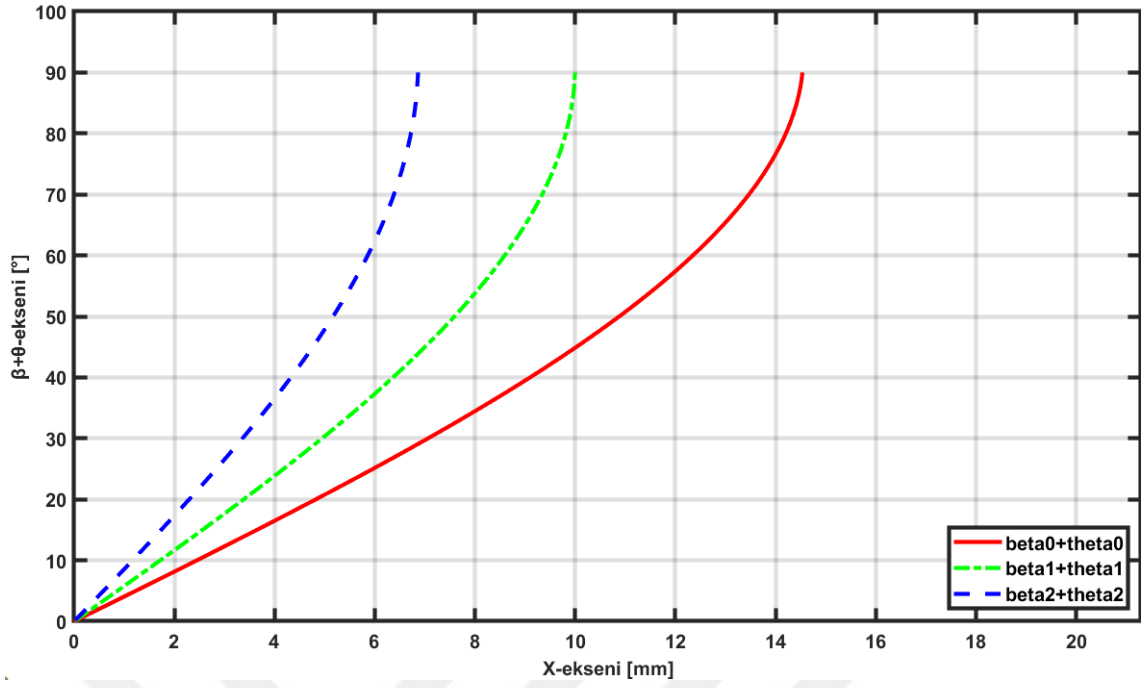


(a)

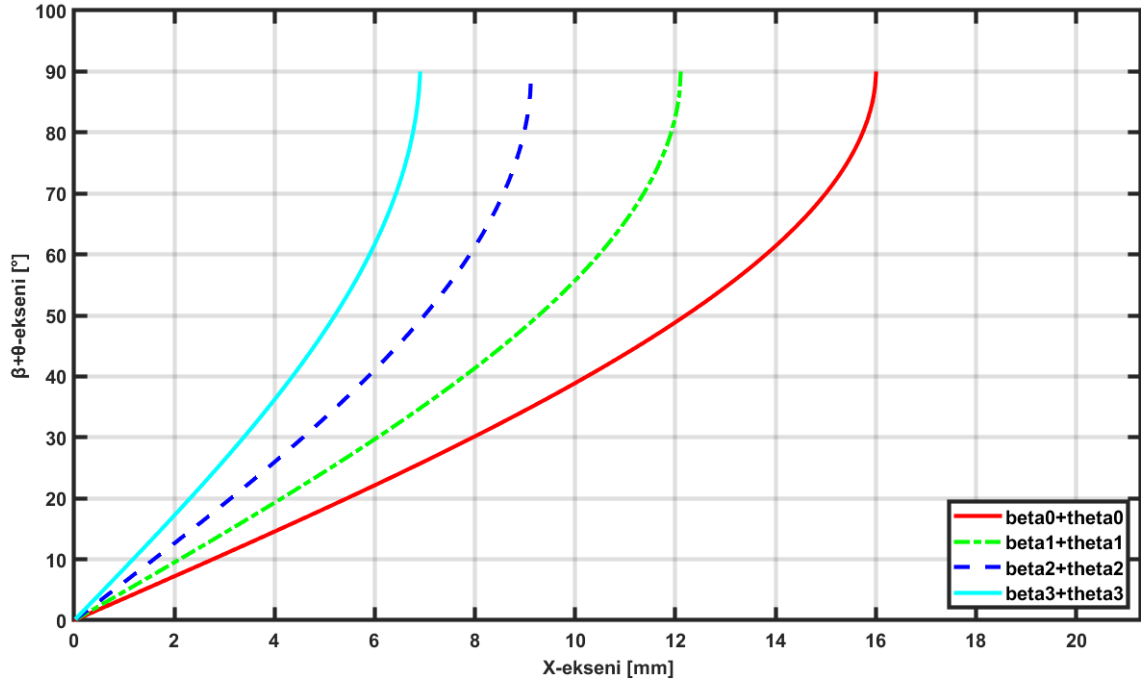


(b)

Şekil 3.14 Artan uydurma katmanlı dairesel lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre $\beta + \theta$ kırılma açılarının değişimi (a) çekirdek (b) UK-1 (c) UK-2 (d) UK-3 (e) UK-4 (f) UK-5

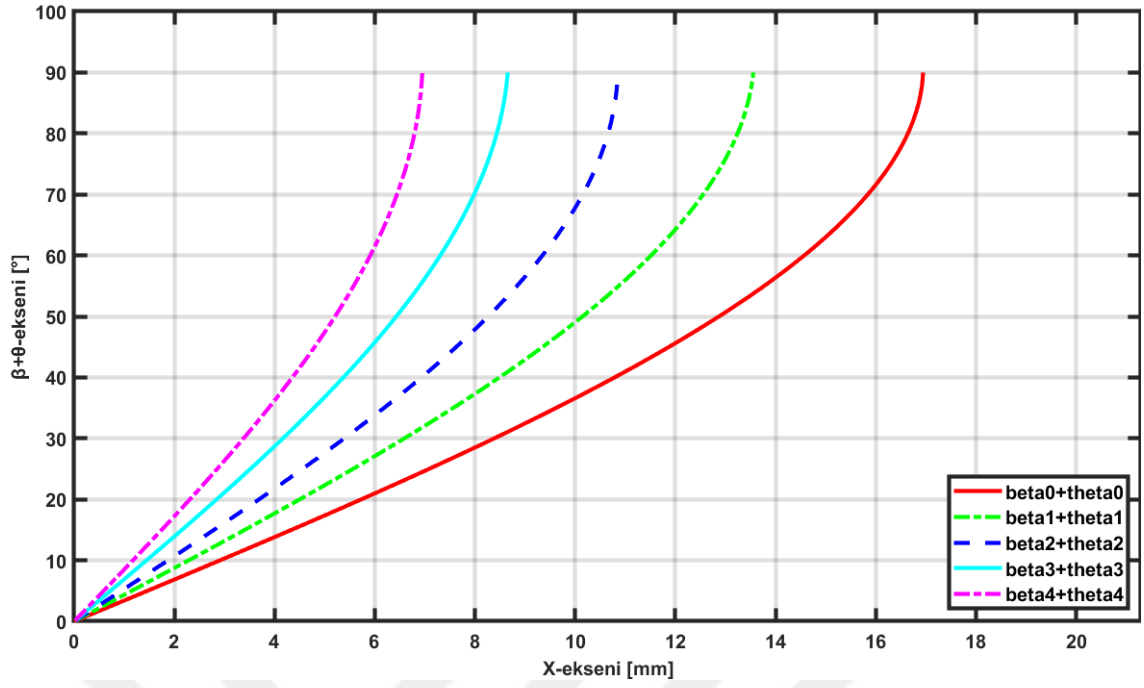


(c)

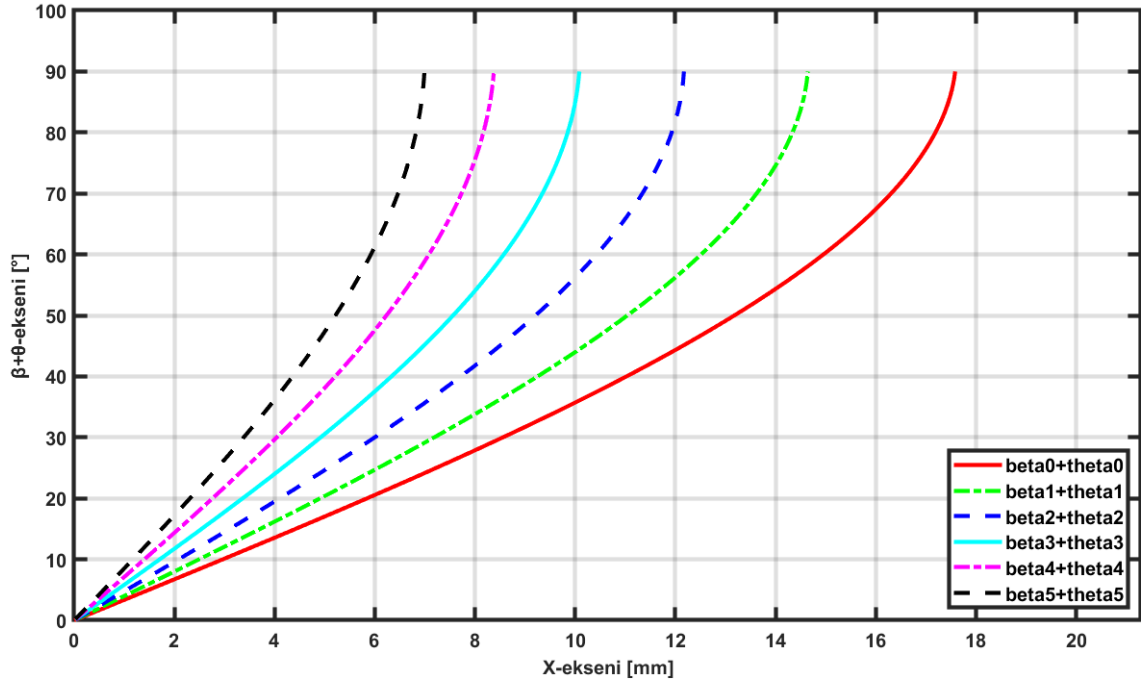


(d)

Şekil 3.14 Artan uydurma katmanlı dairesel lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre $\beta+\theta$ kırılma açılarının değişimi (a) çekirdek (b) UK-1 (c) UK-2 (d) UK-3 (e) UK-4 (f) UK-5 (devamı)



(e)



(f)

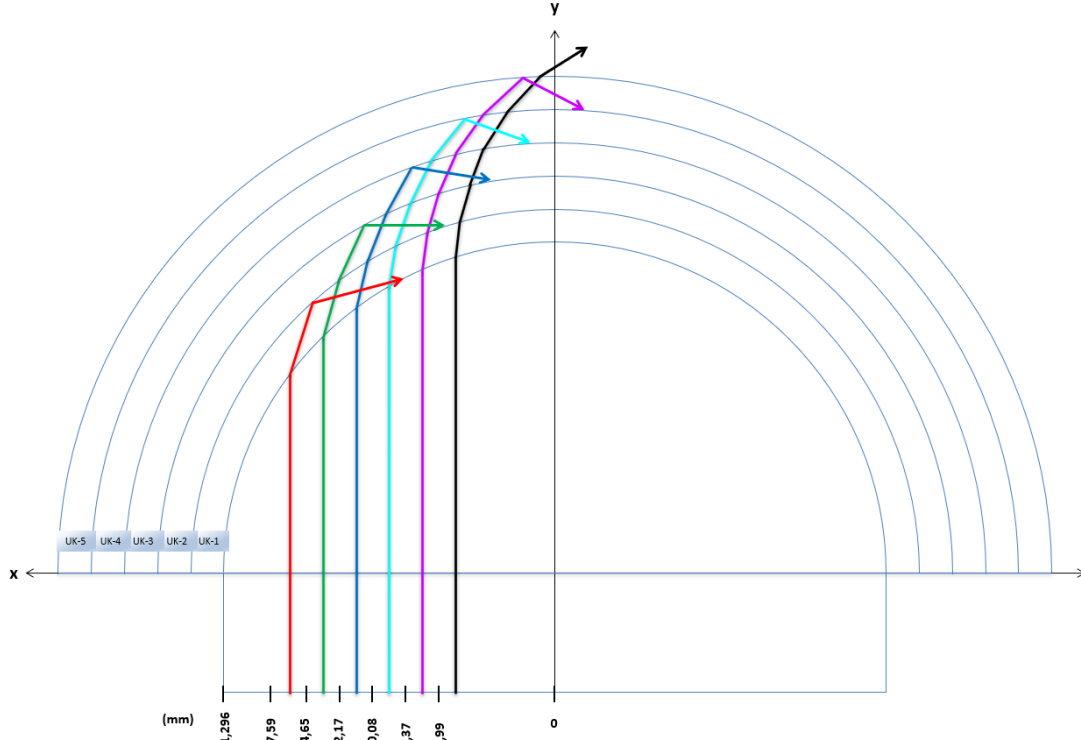
Şekil 3.14 Artan uydurma katmanlı dairesel lens yapıları için besleme noktasının orijinden olan uzaklığı x değerlerine göre $\beta+\theta$ kırılma açılarının değişimi (a) çekirdek (b) UK-1 (c) UK-2 (d) UK-3 (e) UK-4 (f) UK-5 (devamı)

6 farklı lens yapısı için x_0 besleme noktasından tam yansımaya uğradığı son değerler olan kritik x_n değerlerine kadar detaylı sayısal veriler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 78,5 GHz merkez frekansında 5 farklı uydurma katmanlı dielektrik lensler üzerinde gönderilen ışınların kritik x değerleri

UK sayıları	x_0 [mm]	x_1 [mm]	x_2 [mm]	x_3 [mm]	x_4 [mm]	x_5 [mm]
Çekirdek	6,8002	-	-	-	-	-
1 UK	12,023	6,8002	-	-	-	-
2 UK	14,5384	9,9978	6,8642	-	-	-
3 UK	16,0093	12,1082	9,1238	6,9068	-	-
4 UK	16,9473	13,5578	8,6548	8,6548	6,9495	-
5 UK	17,5868	14,645	12,1722	10,0832	8,3777	6,9921

Elde edilen x_n değerleri arasında yüksek frekansa bağlı olarak çok küçük bir artış gözlenmiştir. Çekirdek lensin tam yansımaya uğradığı x_0 kritik noktası ile 5 uydurma katmanlı lensin 6. ve son kırılmasının gerçekleştiği x_5 kritik noktası arasında $|x_5 - x_0| = 0,19$ mm kadar bir ötelenme söz konusudur. Bu kayma miktarı uydurma katman kalınlıklarının $m \cdot \lambda / 2$ $m=1,2,3...$ kadar artırılmasıyla biraz daha artırılabilir.



Şekil 3.15 78,5 GHz merkez frekansı için beş adet uydurma katmanı kullanılan dielektrik lens üzerine besleme yapısından gönderilen ışınların geometrik optik modeli

Tablo 3.2’de verilen 5 adet uydurma katmanlı lens yapısı üzerine gönderilen ışınların geometrik optik modeli Şekil 3.15’te verilmiştir. Burada $x_5=6,99$ mm noktasına kadar gönderilen bütün ışınlar 5 adet uydurma katmanından iç yansımaya uğramadan geçebilmekteyken x ’in daha büyük değerleri için iç yansımaya uğradıklarını görebiliriz. H-düzlemi üzerinde elektromanyetik dalgaların yoğunlaştığı doğrultuların kestirimi ve kritik besleme noktalarının tayini için bu benzetimler kullanışlıdır. Bu kritik x_0 besleme noktalarından yapılan ışımalarda ana lob yönlülük seviyelerinde minimal kayıplarla maksimum yönlendirme açısı (θ_n) elde edilmesi amaçlanmaktadır. Besleme noktası, x_0 kritik noktasından uzaklaştıkça daha fazla iç yansımaya uğrayacak ve dolayısıyla aktif yansımaya katsayısı değerlerinde artış gözlenecektir.

Buraya kadar üzerinde durulan hüzmeye yönlendirme için analitik yaklaşımlar, en etkin ışıma verimliliği ve yönlülüğüne etki edecek anten besleme konumunun belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bölüm 4’te farklı uydurma katmanlı bir

elemanlı dielektrik lens antenler ve 8 elemanlı dielektrik lens anten dizileri için farklı besleme konumlarındaki ışıma paternleri üzerinde durulmuştur.



UZAK ALAN IŞIMA PATERNLERİNİN VE YANSIMA KATSAYILARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

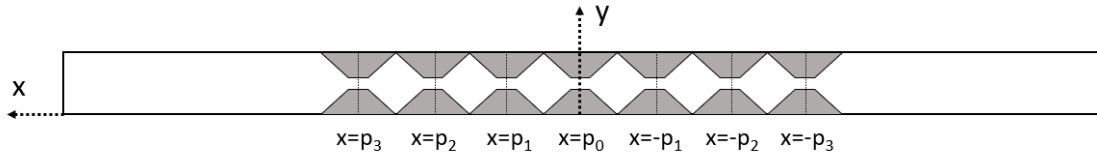
Bu bölümde bir önceki bölümde geometrik analizi yapılan elektromanyetik dalgaların farklı besleme noktaları için oluşan yansımaya katsayıları ve uzak alanda ışıma örüntüleri incelenmiştir. H-düzlemi üzerinde ($\varphi=0$) antenin görüş açısı aralığında (90° , -90°) farklı besleme pozisyonları için ışıma paternleri elde edilmiştir. Bu paternler için yüksek yönlülük elde edilmeye çalışılmıştır. Burada belirleyici etken besleme yapısının en uygun pozisyonda konumlandırılmasıdır. Daha önce geometrik optik yaklaşımıyla elektromanyetik dalgalar, yüksek yoğunluklu dielektrik ortam içinde ışın formunda modellenmiştir. Klasik yaklaşımla Snell yasası kullanılarak kırılma, tam yansımaya ve iç yansımaya gibi optik olgular çerçevesinde ele alınmıştır. Ancak gerçekte eş fazlı anten dizisinin yaydığı elektromanyetik dalgaların kuplaj etkisiyle bazı durumlarda girişim desenleri oluşturması veya bazı durumlarda birbirini sönmülendirmeleri gibi durumlar neticesinde istenilen hüzmeye yönlendirme açısı elde edilemeyebilir. Bu açıdan besleme kaynağından yayılan dalgaların farklı yoğunluklu dielektrik ortamlar arası sınır yüzeylerde davranışlarının en iyi şekilde modellenenebilmesi için CST Studio Suite® 3D EM simülasyon ve analiz yazılımı kullanılmıştır.

Bu yazılım üzerinde yüksek frekanslar için zaman domen çözümleyicisi (Time Domain Solver) kullanılarak besleme portları eş zamanlı olarak çalıştırılmış ve ışıma paternleri elde edilmiştir. Lensin içyapısı için dalga boyu başına 10 hekzagonal hücre ayarlanmış ve kenarlarda ve yüzeylerde sınır koşullarında iyileştirmeler aktif edilmiştir.

Tek elemanlı antende ve 8 elemanlı anten dizisinde besleme yapıları için ayrı portlar kullanılmıştır. Giriş gücü 1 W olan portlar, eş fazlı ve eş genlikli olarak program üzerindeki öntanımlı değerlerinde bırakılmıştır. Referans empedansları ise yine aynı şekilde 50Ω değerinde bırakılmıştır. 8 elemanlı anten dizisi için yapılan simülasyonlarda besleme portları eş zamanlı olarak çalıştırılmıştır.

4.1 Tek Elemanlı Anten için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları

Simülasyonlar önce tek elemanlı dielektrik lens anten için yapılmış, başarılı bulunan tasarımların 8 elemanlı anten dizisi oluşturularak uzak alan ışıma paternlerinin daha iyi yönlülük değerlerine ulaştığı gözlenmiştir.



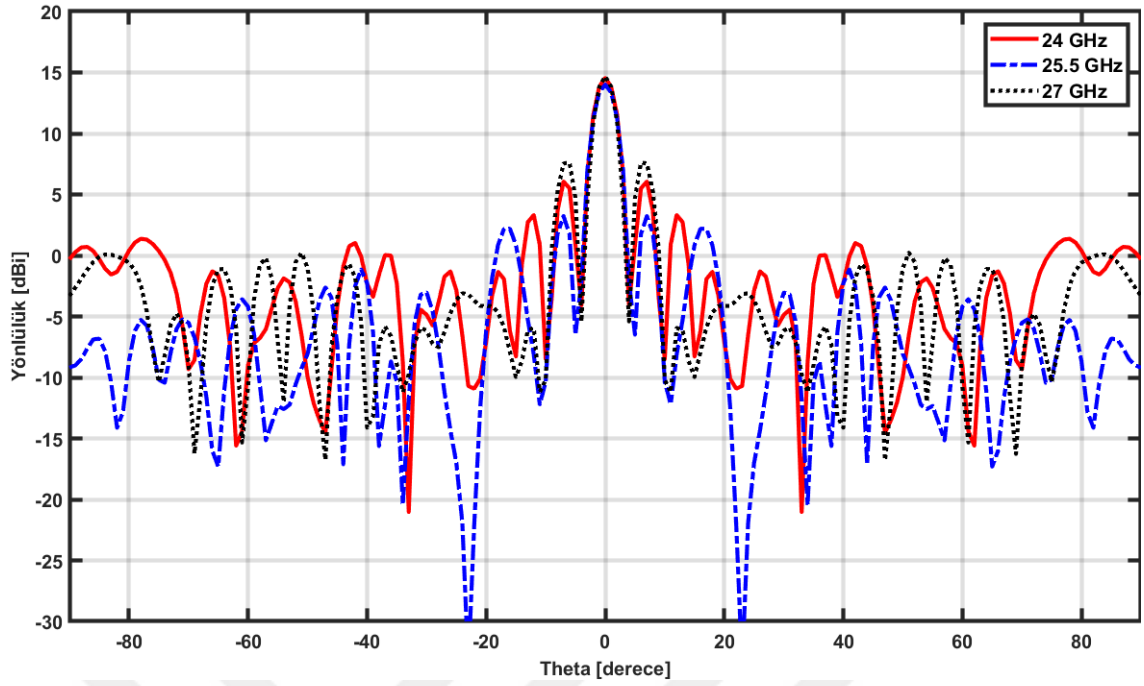
Şekil 4.1 Besleme yapısı pozisyonları

Her iki frekans bandı için tek elemanlı anten tipleri daha önce Bölüm 2’de bahsedildiği şekliyle en iyi yönlülük değeri veren $\lambda_{24\text{GHz}}$ ve $\lambda_{81\text{GHz}}$ birim değerleri cinsinden parametrik olarak tasarlanmıştır. Optimizasyon sürecinde maksimum yönlülük değerleri elde edilecek olan $x=0$ noktasında çalışılmıştır. Burada ise Şekil 4.1’de gösterilen $x=p_0$, $x=p_1$, $x=p_2$ ve $x=p_3$ besleme noktalarında yapılan ışımlar için elde edilen paternler üzerinde durulmuştur. Bölüm 3’te yapılan analitik çalışmalar sonucunda bulunan x_0 kritik besleme noktası, her iki frekans bandında tasarlanan lensler için yaklaşık olarak $x=p_3=6\lambda$ noktasına tekabül etmektedir. 8 elemanlı anten dizisi için yapılan simülasyonlarda özellikle bu besleme noktasında elde edilen yönlülük değerleri incelenmiştir.

4.1.1 24-27 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları

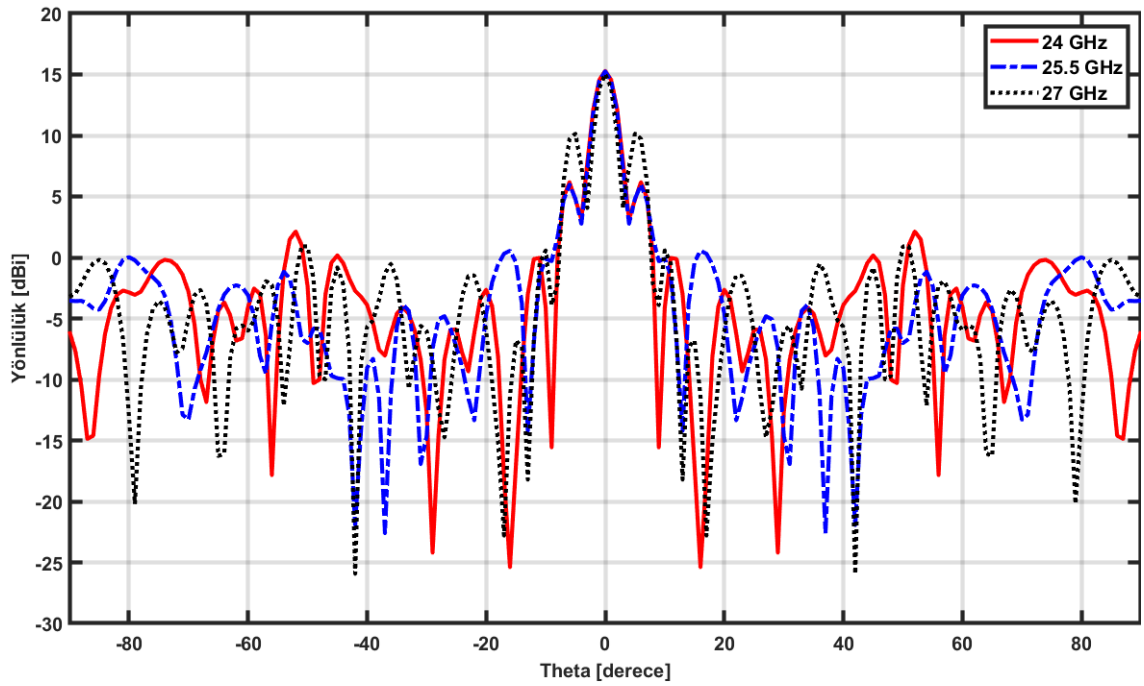
Merkezi besleme konumu olan $x=p_0$ noktasından başlayarak teorik hesaplamalarla maksimum yönlendiricilik elde edilen $x=p_3$ noktasına kadar 4 farklı besleme noktasındaki ışıma paternleri sırasıyla bu alt başlıkta ele alınmıştır.

İlk besleme noktası olan $x=p_0=0$ noktasında çekirdek lens için ışıma paterni Şekil 4.2’de verilmiştir.



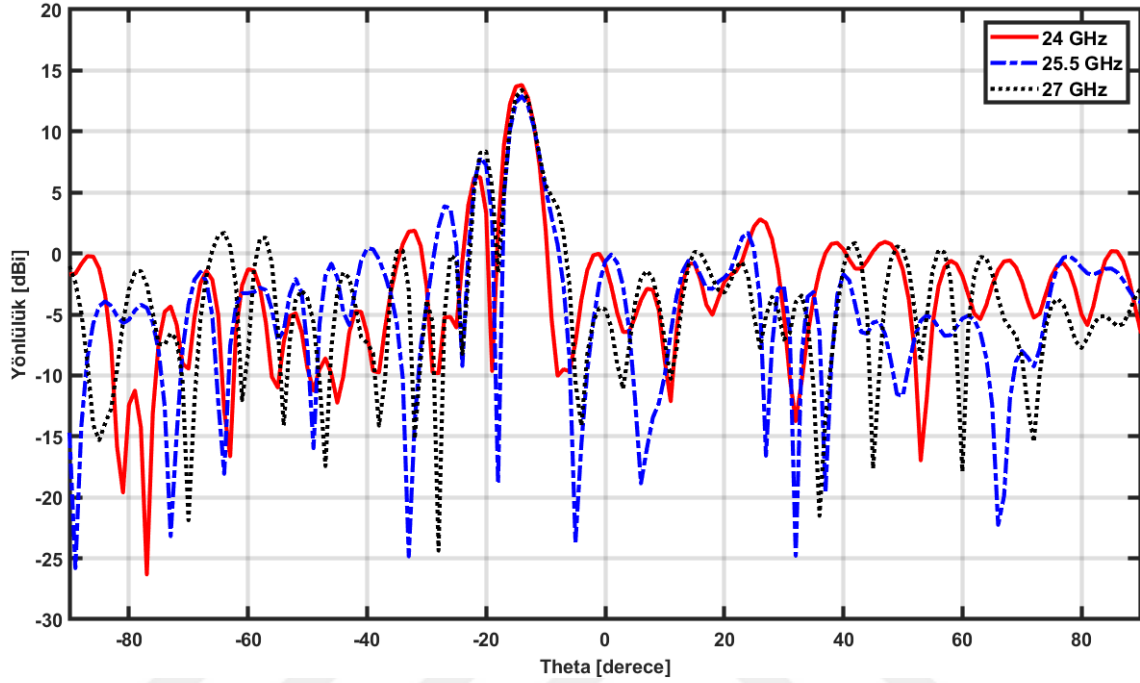
Şekil 4.2 Çekirdek lensin $x=0$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

Şekil 4.2’de görüleceği üzere başlangıç, merkez ve bitiş frekanslarının tamamı için $\theta=0^\circ$ değerinde yarım güç hüzmeye genişliği (YGHG) yaklaşık 4° olup, maksimum yönlülük değeri 24 GHz’de maksimum 14,6 dBi olarak elde edilmiştir.



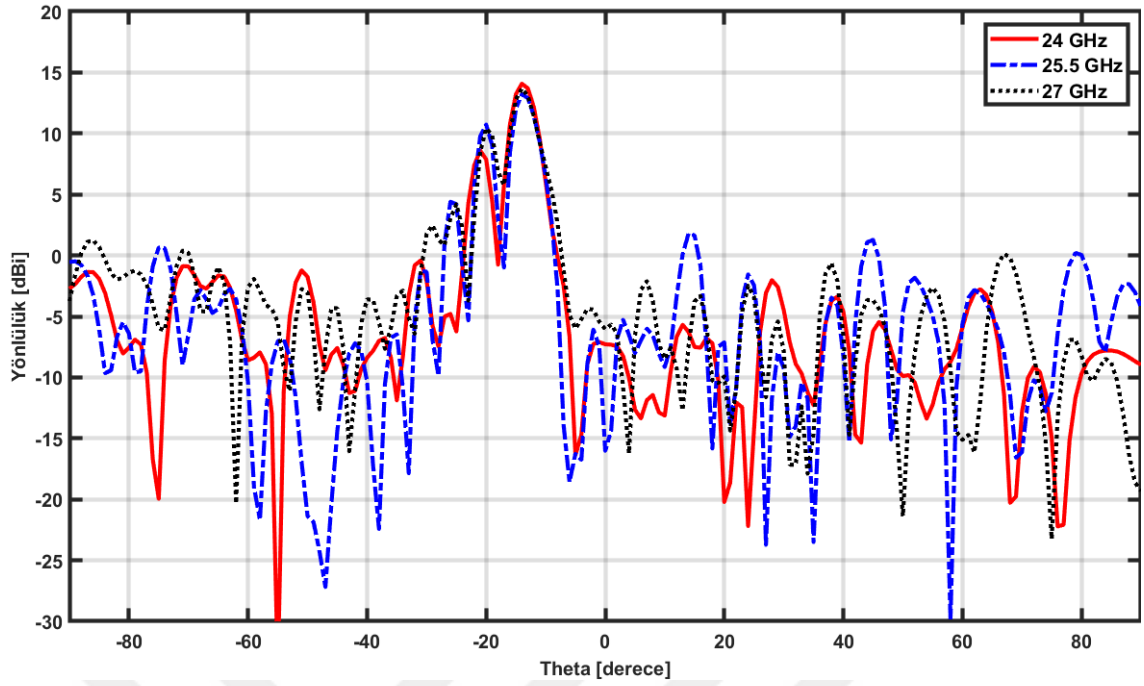
Şekil 4.3 Beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin $x=0$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

Şekil 4.3'te ise yönlülük değeri artarak maksimum 15,3 dBi değerine ulaşmıştır. Burada yarım güç hüzmeye genişliği 3,9°'ye kadar düşmekle beraber 24 GHz'de yan lob seviyesi -8,5 dB değerinden -9,1 dB seviyesine düşmüştür. Bununla beraber genel olarak diğer frekanslar için de yan lobların bastırıldığı söylenebilir.



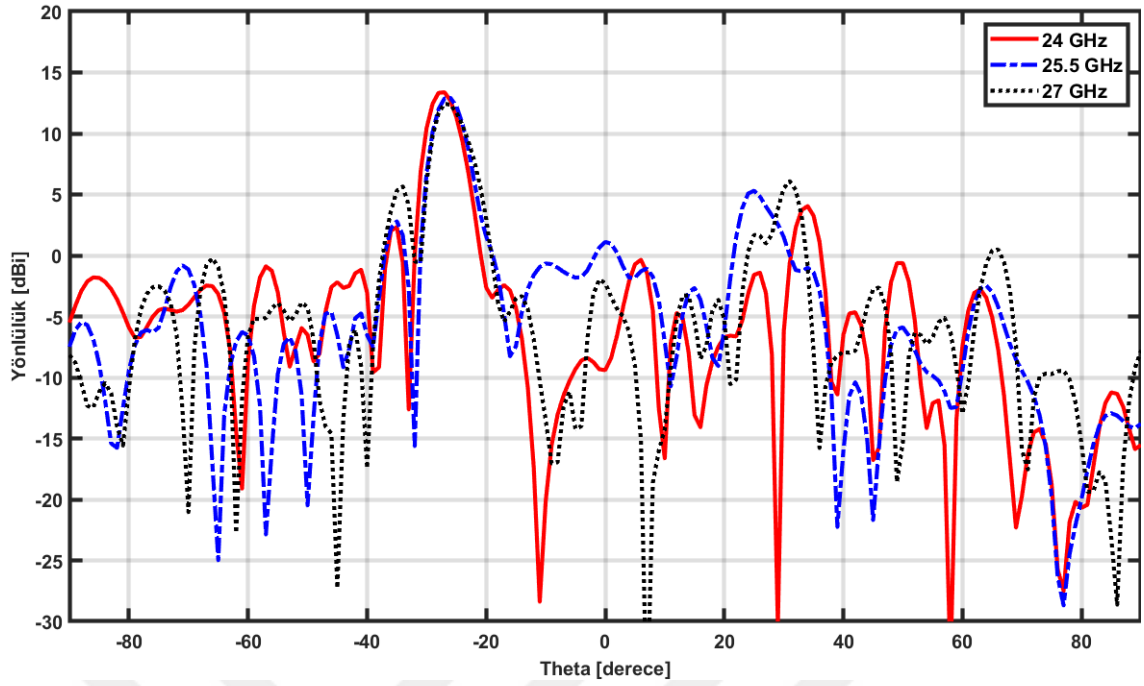
Şekil 4.4 Çekirdek lensin $x=p_1$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

İkinci besleme noktası olan $x=p_1=2\lambda_{24\text{GHz}}$ noktası için Şekil 4.4'te görüleceği üzere her üç frekans için ana lob yönlendirme dereceleri $\theta=-14^\circ$ olarak gerçekleşmiştir. 24 GHz için 13,8 dBi maksimum yönlülük elde edilmiştir. Şekil 4.5'te ise 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens için özellikle 24 GHz frekansında ana lob seviyesi 14,1 dBi seviyesine kadar yükselmiştir. Her iki yapı için de yarım güç hüzmeye genişlikleri yaklaşık 4° elde edilmiştir. Bununla beraber yan lob seviyelerinde artış gözlenmektedir.

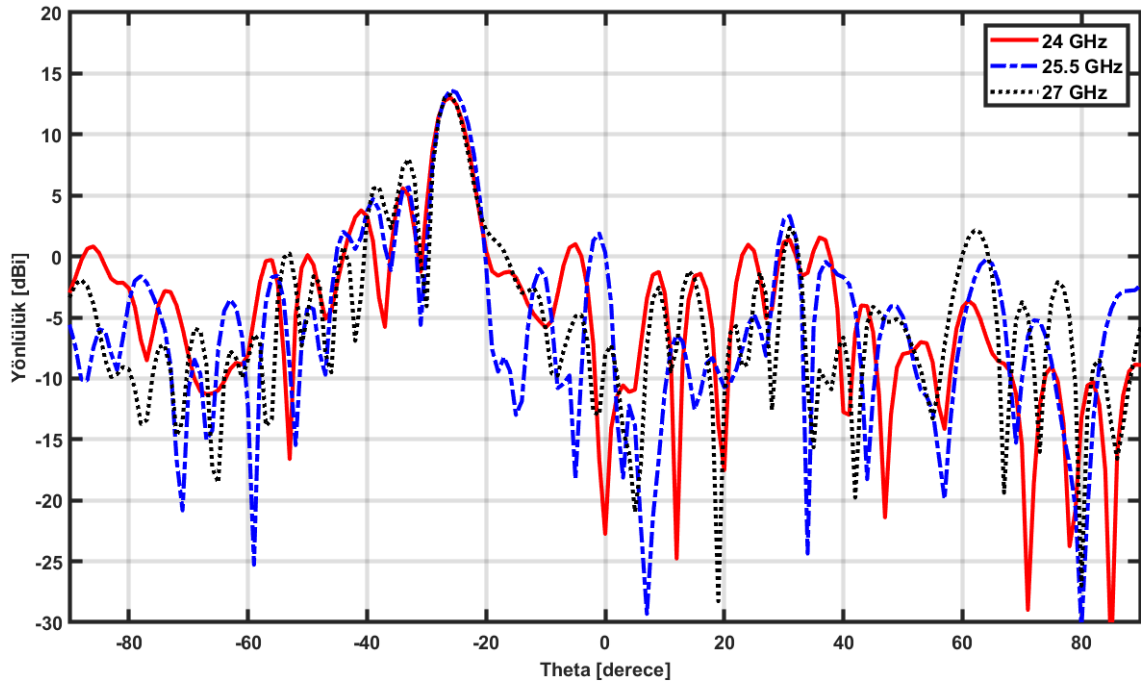


Şekil 4.5 Beş adet uydurma katmanı kullanılan çekirdek lensin $x=p_1$ noktasından beslenmesiyle oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

Uydurma katmanlı yapıların hüzme yönlendiriciliğinin çekirdek lens yapısına göre daha iyi olduğunu gözlemleyebileceğimiz noktalardan biri olan $x=p_2=4\lambda_{24\text{GHz}}$ noktasında her iki yapının ışıma paternleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Yönlülük değerleri 24 GHz'de çekirdek lens için maksimum 13,8 dBi seviyesindeyken, 5 adet uydurma katmanı kullanılan lenste 14,1 dBi seviyesindedir. Diğer çalışma frekanslarında da ana lob şiddetlerinde artış gözlenmekle beraber yan lob seviyelerinde de artış gözlenmiştir. Her iki yapı için yönlendirme yaklaşık $\theta=-26^\circ$ doğrultusuna yönelmiştir. Işımaya ait yarım güç hüzme genişliği ise ortalama $4,2^\circ$ olarak karşımıza çıkmaktadır.



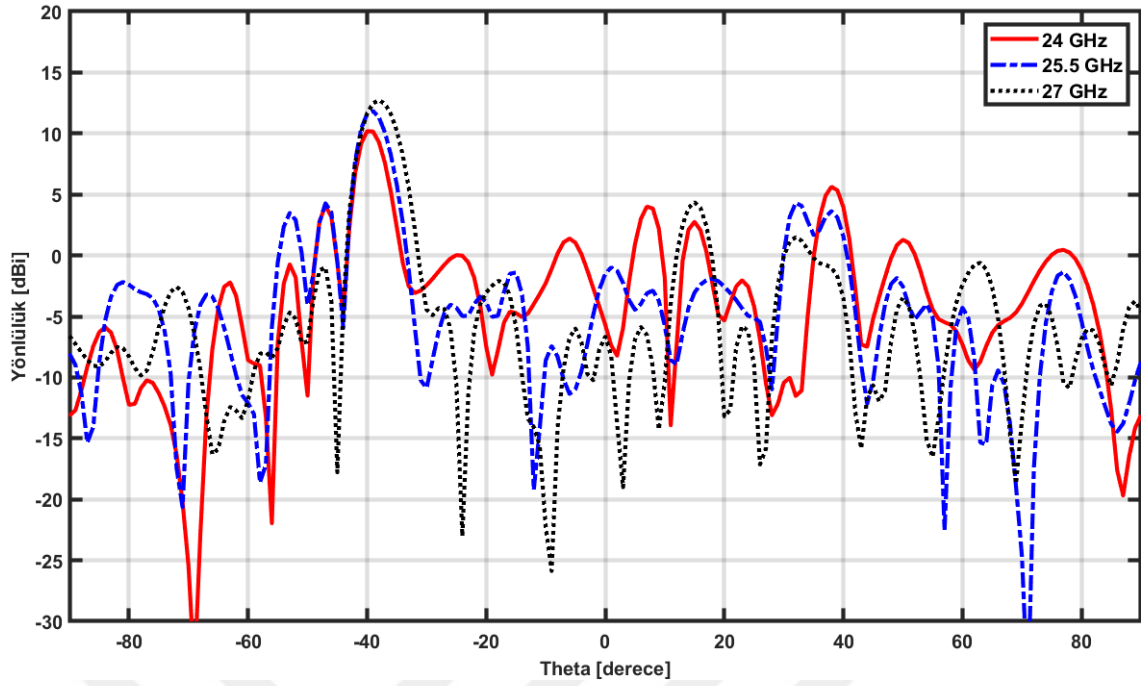
(a)



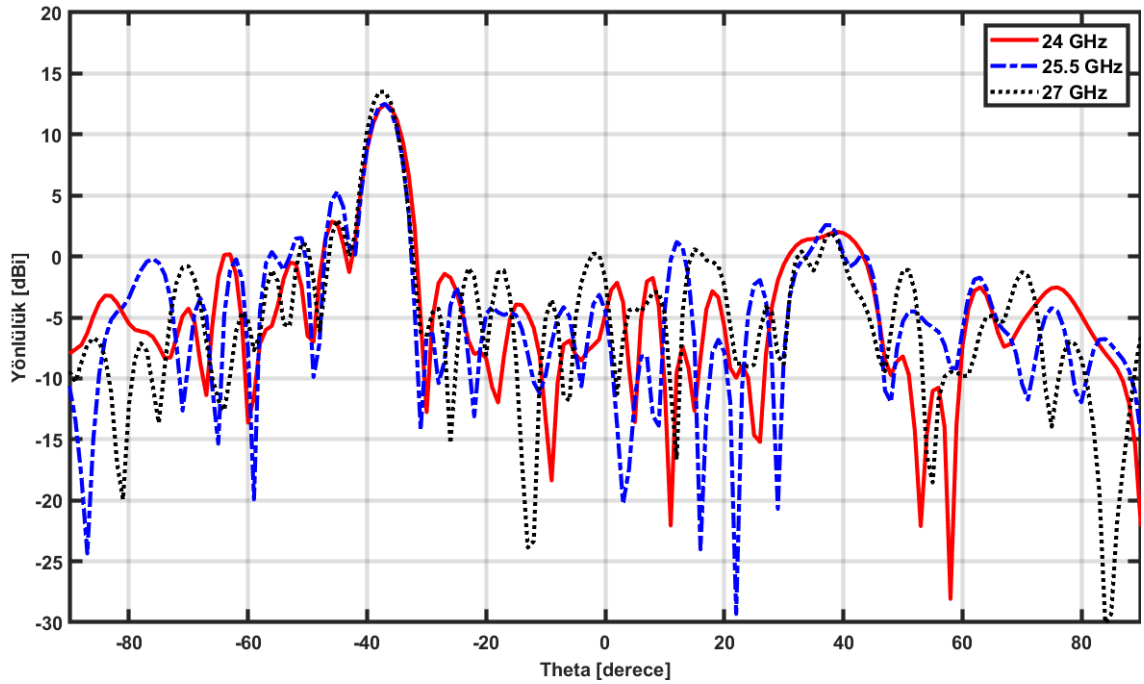
(b)

Şekil 4.6 $x=p_2$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens

Bu frekans aralığındaki çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lenslerde bir diğer besleme noktası olan $x=p_3=6\lambda_{24\text{GHz}}$ için elde edilen ışıma paternlerinin θ ile değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.7’de verilmiştir.



(a)



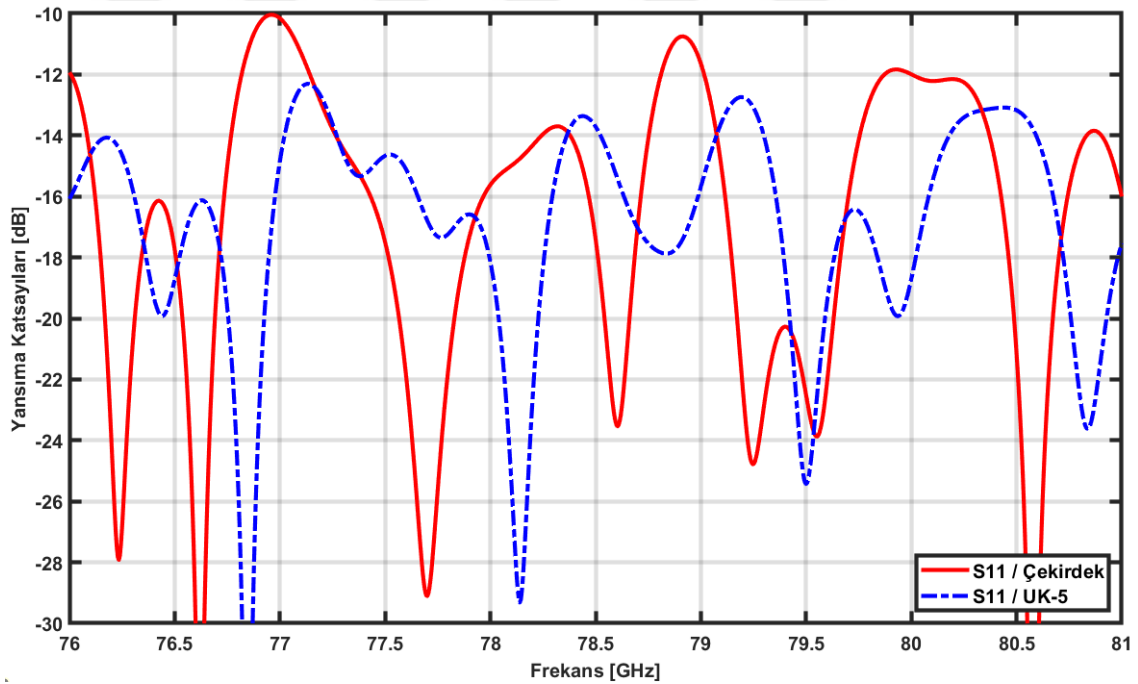
(b)

Şekil 4.7 $x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanlı kullanılan lens

Analitik yaklaşımla elde ettiğimiz maksimum yönlendirme noktası olan $x_5=23,53$ mm değerine çok yakın olan $6\lambda_{24\text{GHz}}=23,96$ mm noktasındaki ışıma örüntüleri karşılaştırıldığında uydurma katmanlı yapının genel olarak yan loblarının bastırılmış olması dikkat çekmektedir. Özellikle $\theta=-10^\circ$ ile $\theta=30^\circ$ arasındaki yan

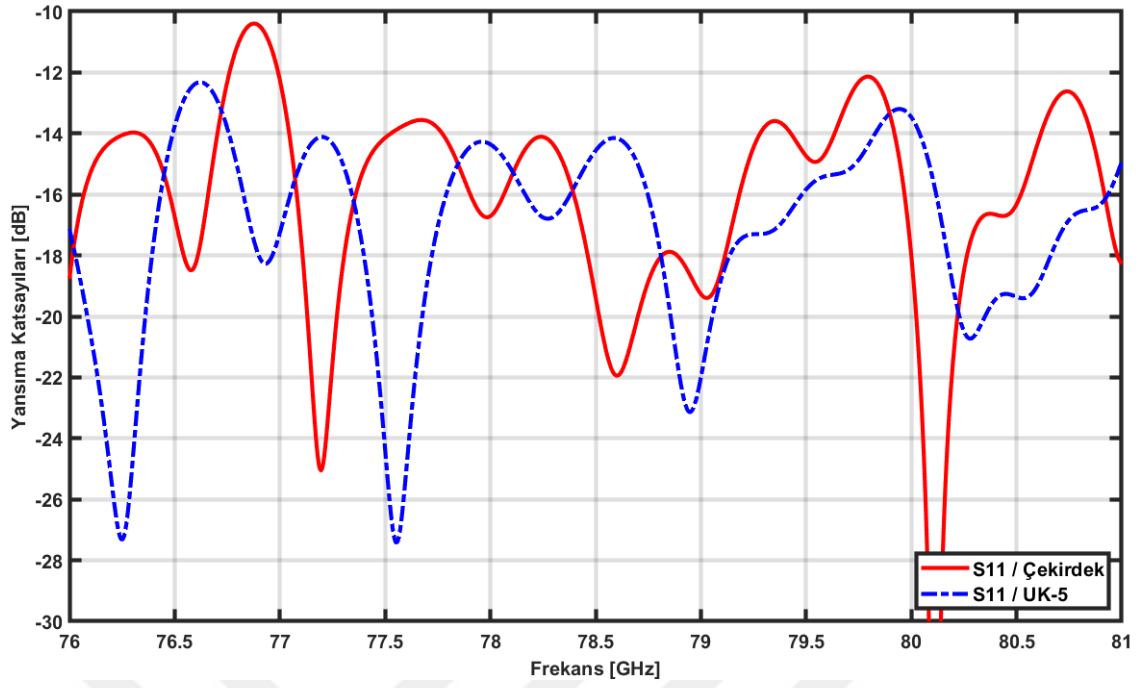
loblar 0 dBi değerinin altına, $\theta=40^\circ$ civarındaki loblar ise 6 dBi değerinden 3 dBi değerine düşürülmüştür. 27 GHz'de, çekirdek lens için $\theta=40^\circ$ 'de yönlülük değeri 10,2 dBi iken, 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens için $\theta=37^\circ$ 'de 13,5 dBi olarak elde edilmiştir. Yarım güç hüzme genişlik değerleri ise $6,4^\circ$ 'den 5° 'ye kadar daralmıştır.

Anten besleme konumu merkezden uzaklaştıkça iç yansımalar ve kırılmalar artacağı için doğal olarak ana lob sevelerinde yükselme gerçekleşmektedir. Ancak uydurma katmanlarının eklenmesiyle yönlülüğün daha fazla azalması önlenabilmekte ve istenmeyen yan lobların bastırılması sağlanabilmektedir. Bu durumu daha iyi gözlemleyebilmek adına her bir besleme noktasındaki ışımlar için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayıları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.8'de verilmiştir.

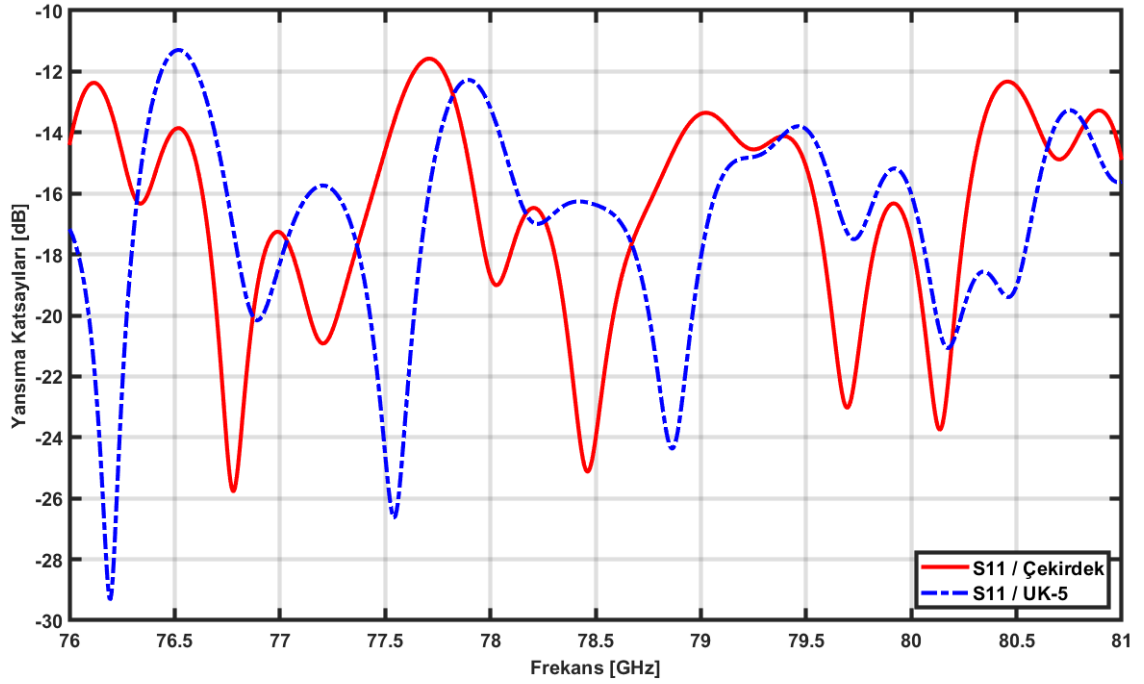


(a)

Şekil 4.8 24-27 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$

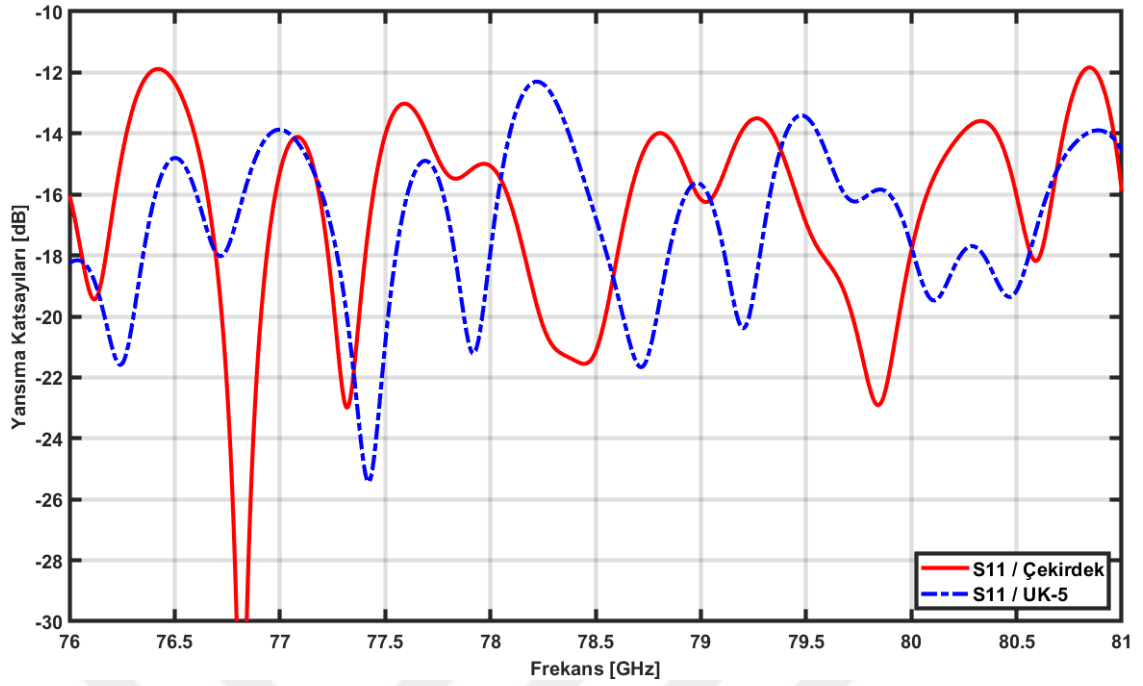


(b)



(c)

Şekil 4.8 24-27 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$ (devamı)



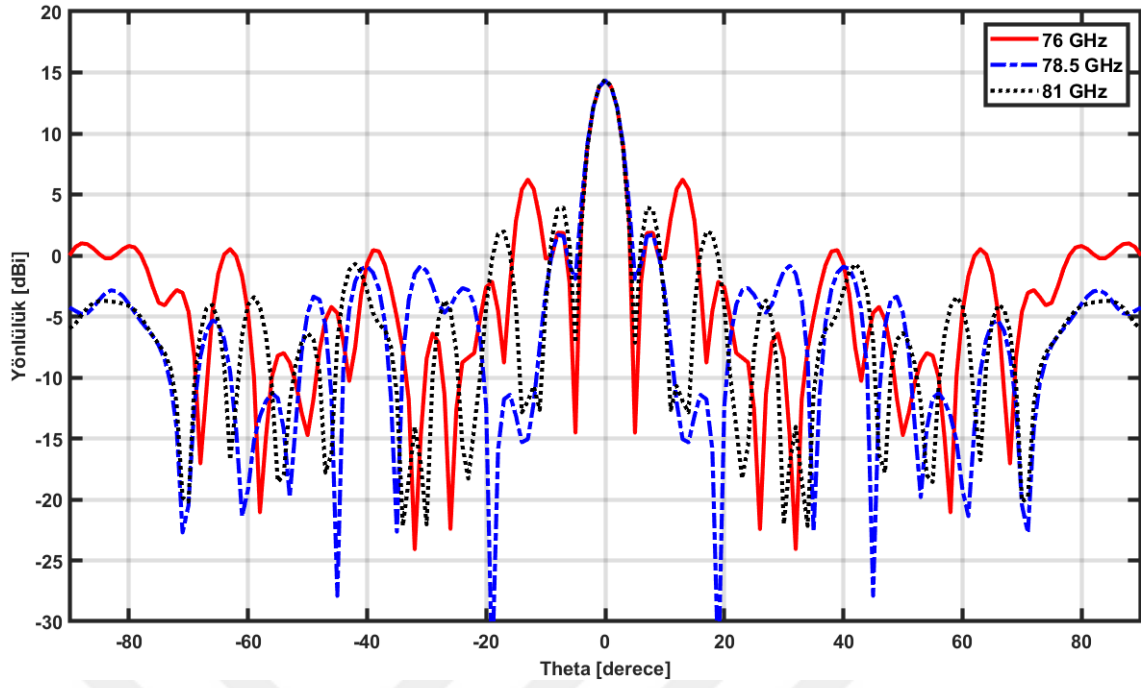
(d)

Şekil 4.8 24-27 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$ (devamı)

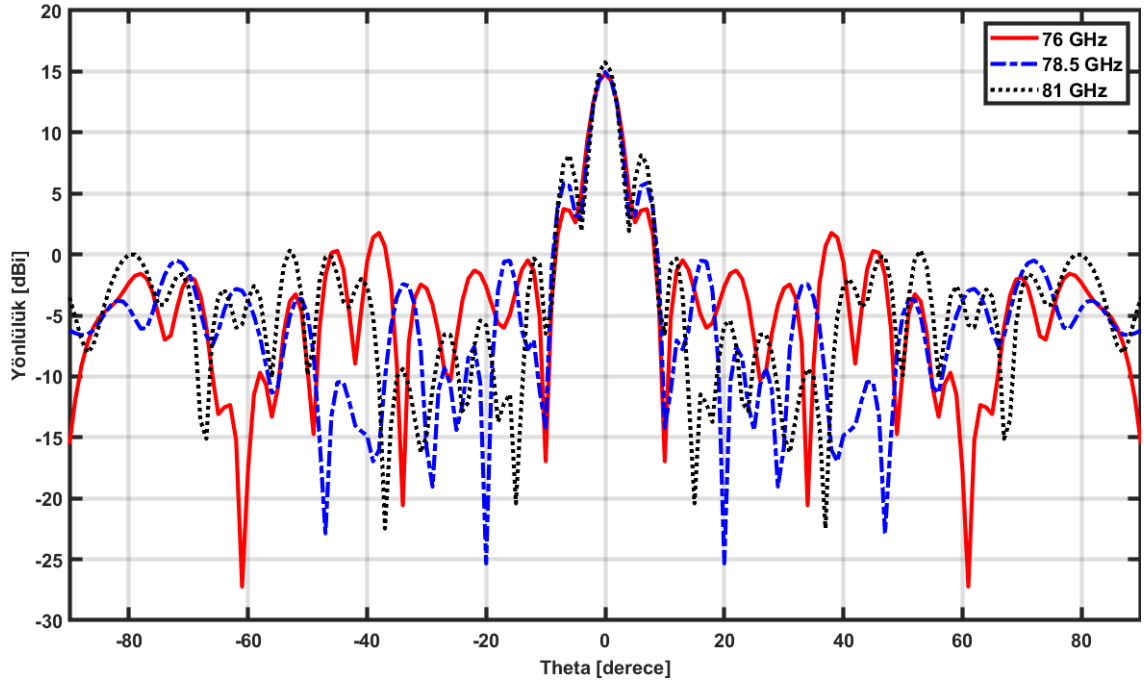
Şekil 4.8(a) incelendiğinde çekirdek lens için en yüksek yansıma katsayısı değeri -10 dB'in üzerinde gerçekleşirken uydurma katmanlarıyla -13 dB'in altına çekilmiştir. Besleme kaynağı merkezden uzaklaştıkça, Şekil 4.8(d)'de görülebileceği üzere yansıma katsayısı değerleri her iki yapı için de neredeyse -12 dB seviyesinin altına düşmekle beraber uydurma katmanlarının etkisiyle genel olarak bir azalma söz konusudur.

4.1.2 76-81 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları

Bu frekans aralığında bir önceki frekans aralığında olduğu gibi sistematik bir yaklaşımla $x=p_0$, $x=p_1$, $x=p_2$ ve $x=p_3$ noktalarındaki ışıma örüntüleri ele alınacaktır. İlk besleme noktası için ışıma paternleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



(a)

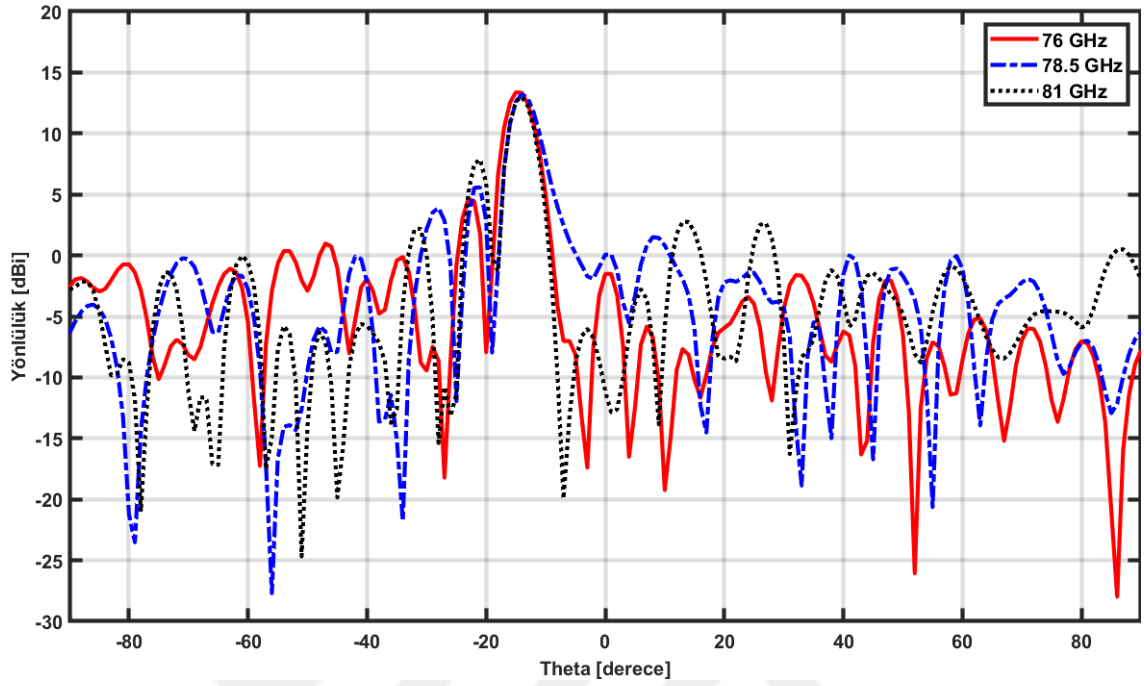


(b)

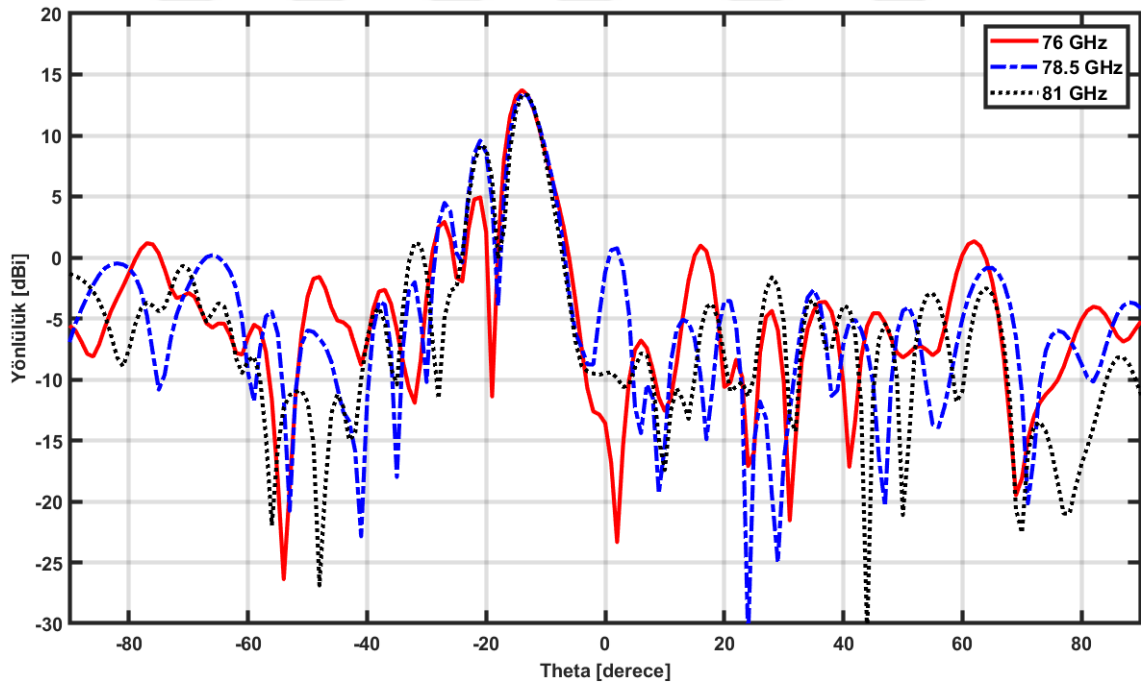
Şekil 4.9 $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanlı kullanılan lens

Şekil 4.9'daki grafikler incelendiğinde 76 GHz'de, çekirdek lens yapısı için ana lob şiddeti 14,3 dBi seviyesindeyken, 5 adet uydurma katmanlı lenste ise 14,8 dBi seviyesinde elde edilmiştir. Bunun yanı sıra uydurma katmanı eklendiğinde, 76

GHz'de yan lob seviyeleri -8,1 dBi seviyesinden -11,1 dBi seviyesine kadar düşmüş, yarım güç hüzmeye genişliği neredeyse $4,5^\circ$ gibi bir değerde sabit kalmıştır.



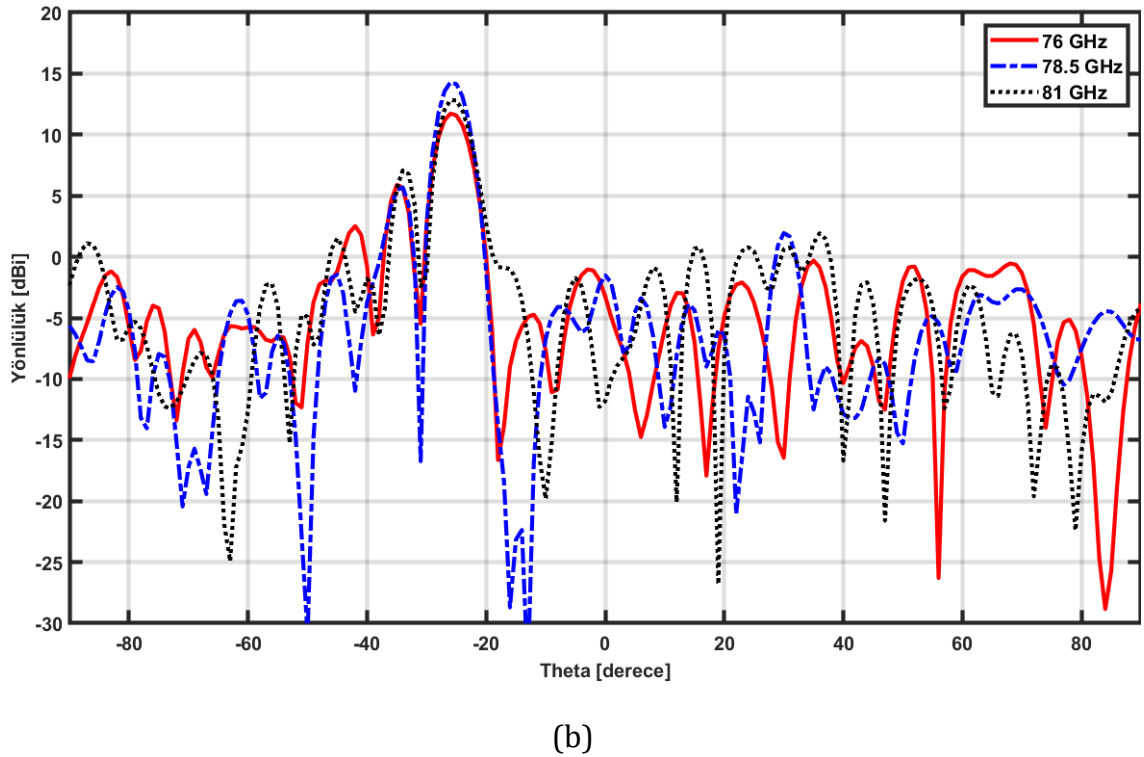
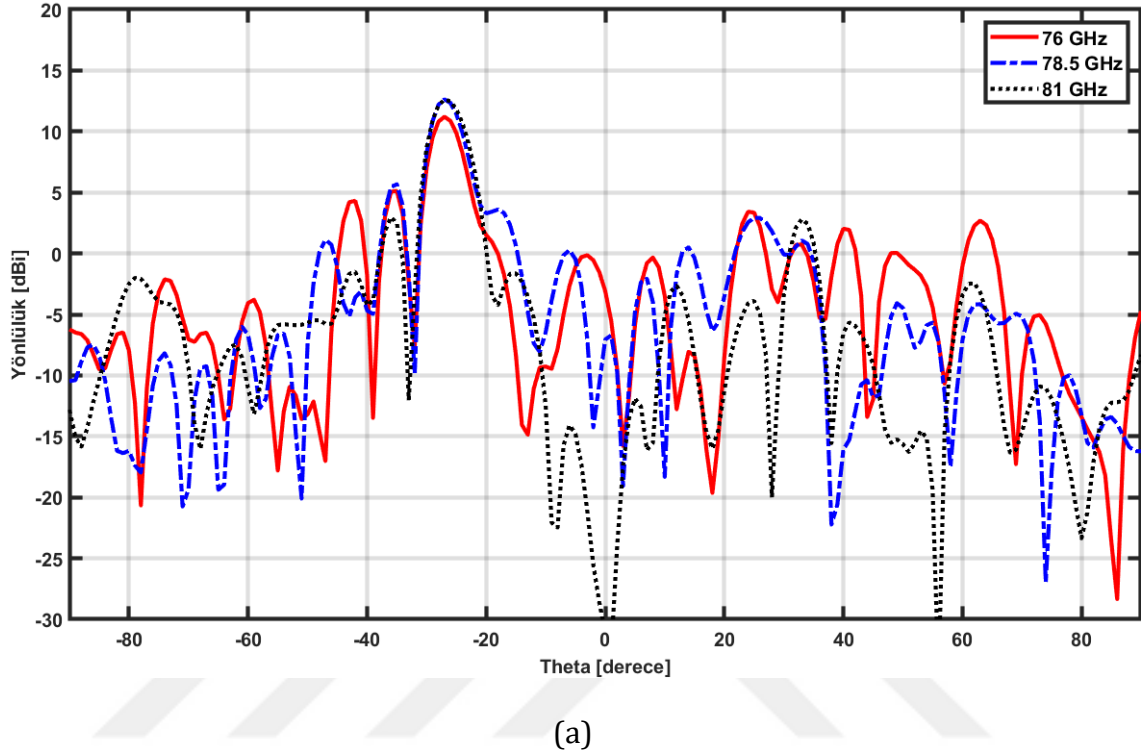
(a)



(b)

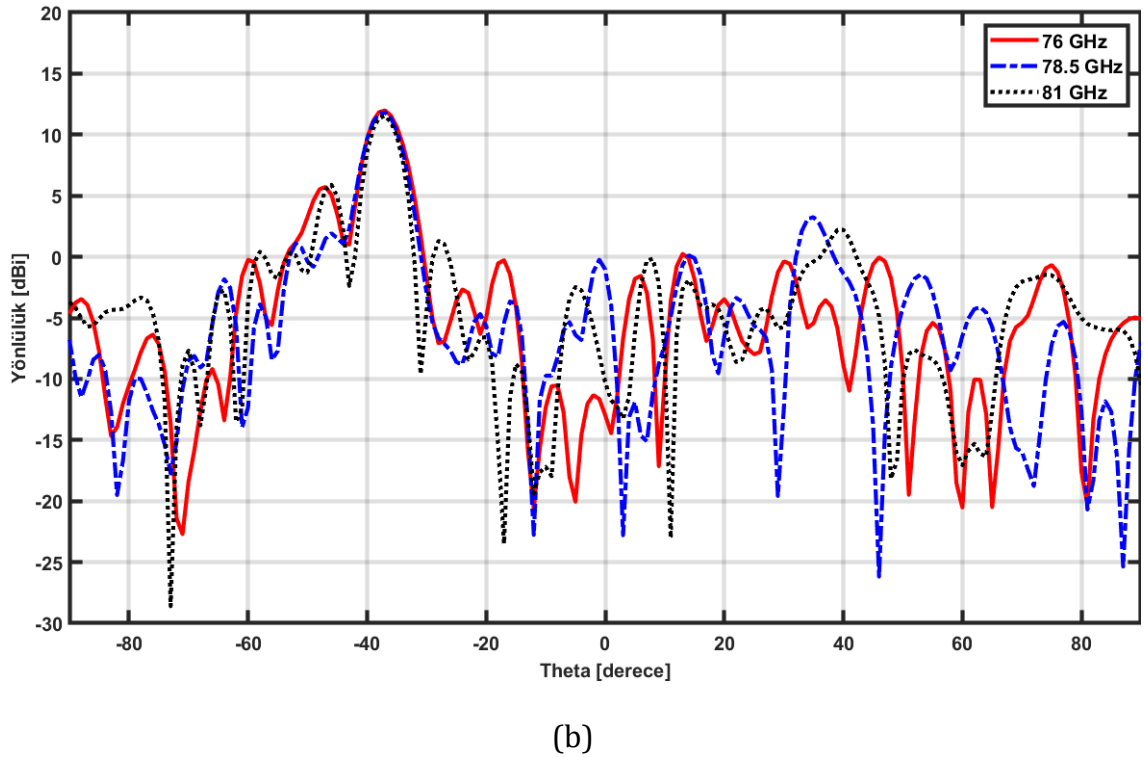
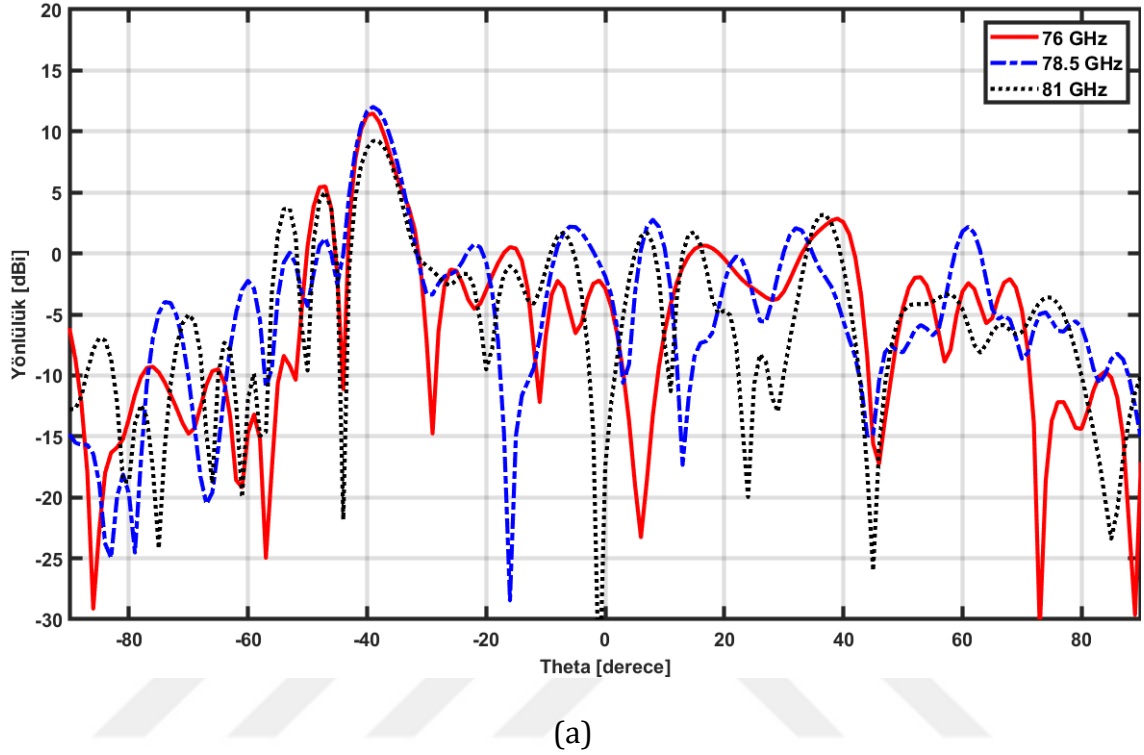
Şekil 4.10 $x=p_1$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens

Bir diğer besleme noktası olan $x=p_1=2\lambda_{81\text{GHz}}$ noktasındaki ışıma paternleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.10'da verilmiştir. Burada her iki yapı için $\theta=-14^\circ$ 'de yaklaşık 13,5 dBi seviyelerinde ana lob yönlülüğü elde edilmiş, diğer loblarda düşük seviyelerde de olsa azalma gerçekleşmiştir.



Şekil 4.11 $x=p_2$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens

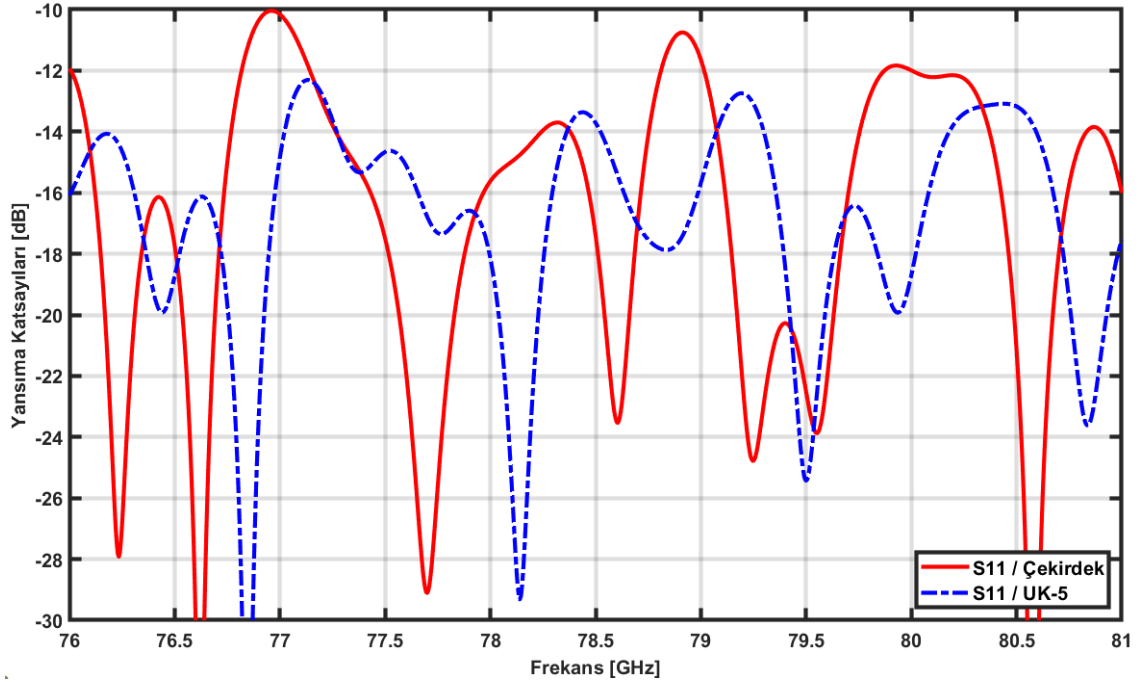
Şekil 4.11’de $x=p_2=4\lambda_{81\text{GHz}}$ noktasındaki ışıma örüntüleri verilmiştir. Burada 76 GHz’de, $\theta=-27^\circ$ ’de çekirdek lenste ana lob seviyesi 11,2 dBi değerindeyken uydurma katmanlarının eklenmesiyle 11,7 dBi değerine yükselmiş, yan lob seviyeleri neredeyse aynı kalmıştır. Aynı zamanda yarım güç hüzme genişliği azalmıştır.



Şekil 4.12 $x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens

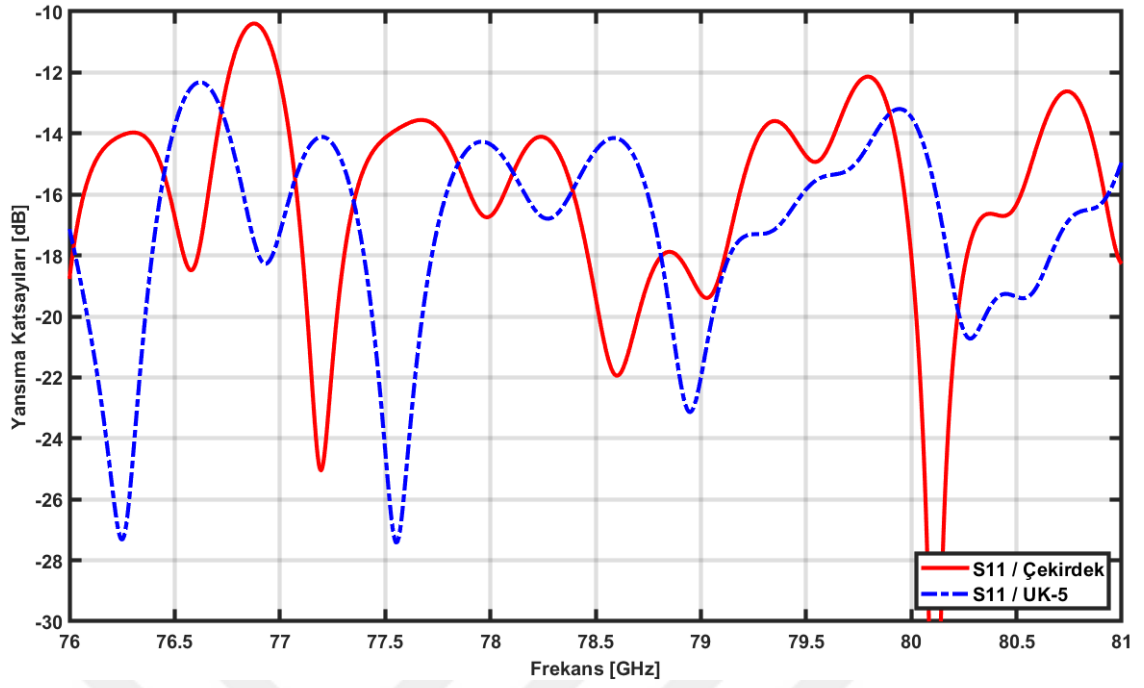
Bu frekans aralığının son besleme konumu olan $x=p_3=6\lambda_{81\text{GHz}}$ noktasında yapılan ışımlar Şekil 4.12’de verilmiştir. Beş adet uydurma katmanı kullanılan lenste ana lob seviyesi 76 GHz’de 11,5 dBi değerinden 12 dBi değerine yükselmiştir. Yönlenme açısı $\theta=-37^\circ$ olup yan lob seviyeleri neredeyse aynıdır.

76-81 GHz frekans bandı için buraya kadar ele alınan besleme noktalarındaki ışımların aktif S-parametreleri kıyaslamalı olarak Şekil 4.13’te verilmiştir.

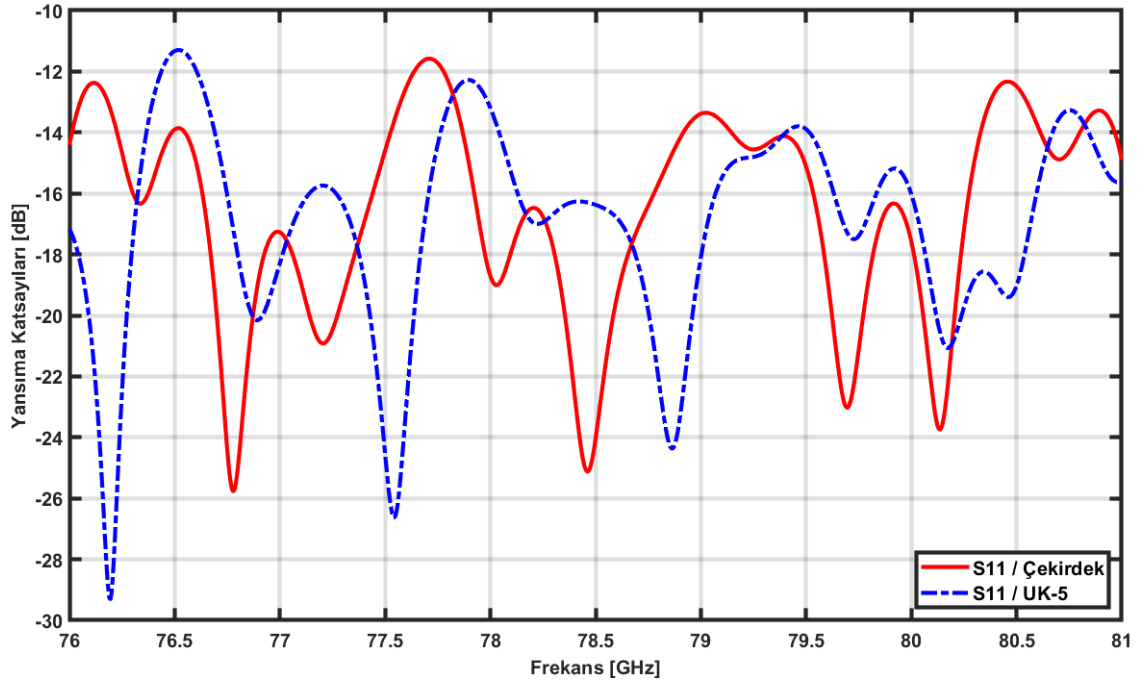


(a)

Şekil 4.13 76-81 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansımaya katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$

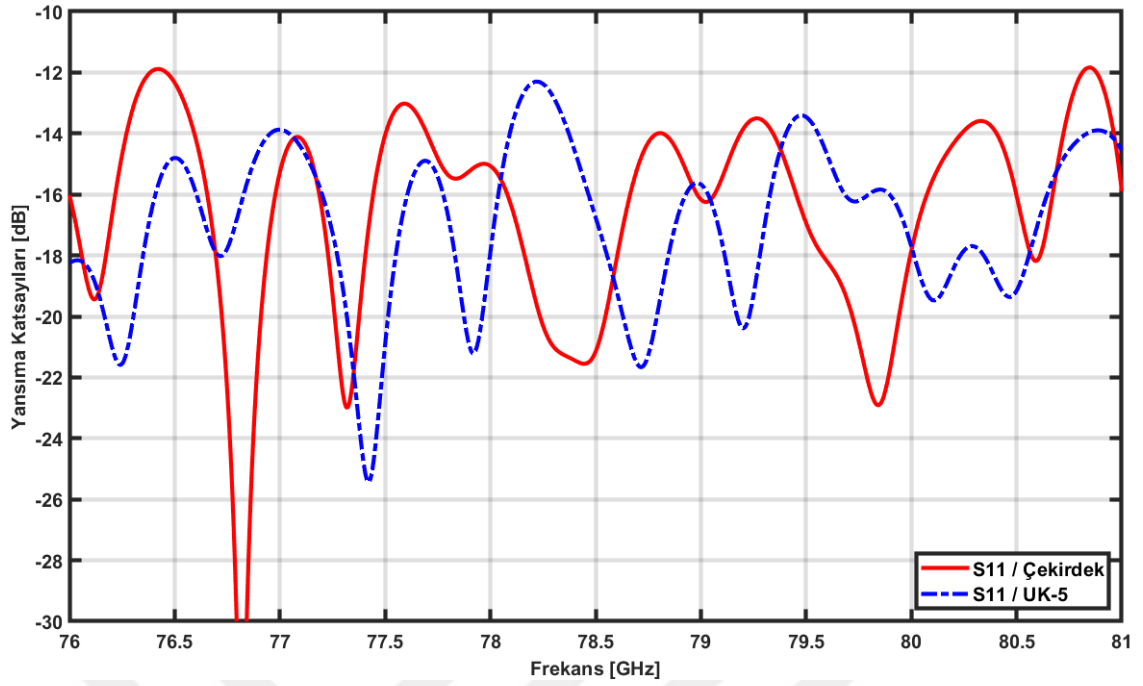


(b)



(c)

Şekil 4.13 76-81 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansımaya katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$ (devamı)



(d)

Şekil 4.13 76-81 GHz frekans bandında 4 farklı besleme noktası için çekirdek lens ve beş adet uydurma katmanı kullanılan lensin yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$ (devamı)

Sonuç itibariyle 76-81 GHz frekans aralığının bütün değerlerinde 5 uydurma katmanlı bir elemanlı dielektrik lens anten, yönlendiricilik bakımından genel olarak başarımlı göstermektedir. Buradaki nihai amaç yönlendiricilik artarken yönlülükten kaybetmemektir. Çünkü bir elemanlı anten için minimum iç yansımalarla maksimum hüzme yönlendirme amaçlanırken 8 elemanlı anten dizisiyle yönlülük seviyelerinin artırılması hedeflenmektedir.

4.2 8 Elemanlı Anten Dizisi için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları

Tek elemanlı dielektrik lens anten tasarımı, ışıma kazanç ve yönlülüğünü artırmak için eş fazlı, eş genlikli beslemesi olan 8 elemanlı doğrusal anten dizisi şeklinde yeniden dizayn edilince ışıma paternlerinde kayda değer iyileşmeler gözlenmektedir. Bu başlık altında her iki çalışma frekans aralığı için gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen veriler üzerinde durulmuştur.

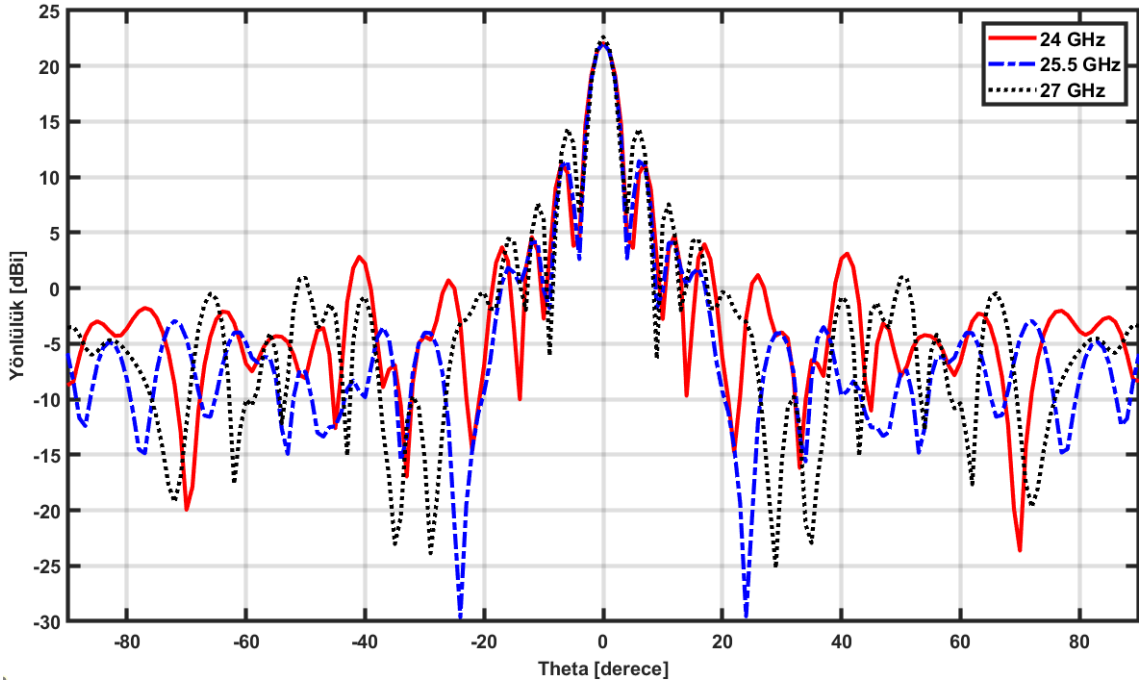
Tasarımı yapılan bu anten dizisi için eş fazlı, eş genlikli ve eş zamanlı besleme dikkate alındığında genel yansıma katsayılarını veren formül şu şekilde olacaktır [29]:

$$\Gamma_m(\theta) = \sum_{n=1}^N S_{mn} e^{-jknd \sin \theta} \quad (4.1)$$

Burada $k=(2\pi/\lambda)$, S_{mn} n portundan m portuna iletim katsayısı, d dizi elemanları arası uzaklık ve θ ise hüzme yönlendirme açısıdır. Bu eşitlik $\theta=0^\circ$ için S_{mn} değerlerinin genliklerinin toplamı olacaktır. Kuplaj etkisiyle her bir m portu için diğer portların geri dönüş kayıpları toplamı 8 elemanlı dizi için dizi merkezine göre simetrik bir dağılım oluşturacak şekilde sırasıyla Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 ve Γ_4 yansımaya katsayısı değerleri Γ_8 , Γ_7 , Γ_6 ve Γ_5 değerleriyle eşit büyüklükte olacaktır. Burada lensin alt ve üst kenarlarına yakın olan elemanlar için daha büyük değerler, merkeze daha yakın olan portlar için daha küçük yansımaya katsayıları oluşacaktır. Her iki çalışma frekans aralığı için yansımaya katsayılarına ilişkin açıklamalar ilgili alt başlık altında ele alınmıştır.

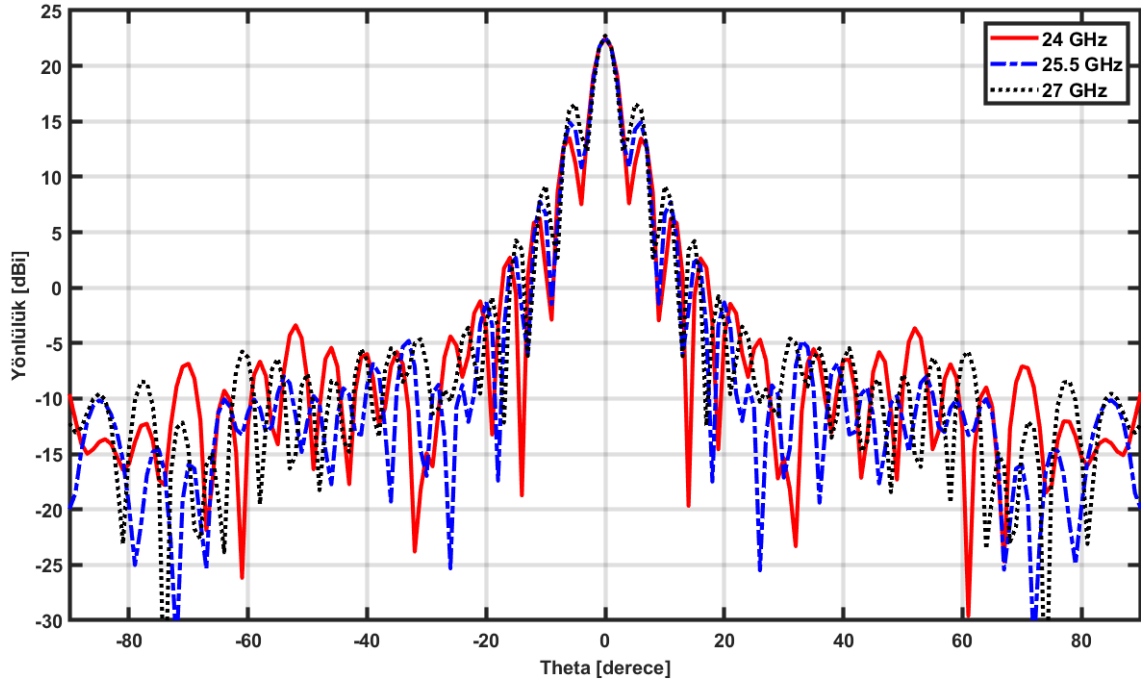
4.2.1 24-27 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansımaya Katsayıları

İlk çalışma frekans aralığı olan 24-27 GHz bandında 8 elemanlı dielektrik lens anten dizisi için farklı besleme noktalarına ve uydurma katmanı olup olmamasına bağlı olarak değişen sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 4.14 Sekiz elemanlı çekirdek lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

Merkez besleme konumu için bir elemanlı anten için maksimum yönlülük 14,7 dBi seviyesindeyken, Şekil 4.14'te görüleceği üzere anten dizisiyle 27 GHz için maksimum 22,6 dBi seviyesine ulaşılmıştır. Yan lobların biraz daha bastırıldığı ve yarım güç hüzmeye genişliğinin biraz daha daraldığı 8 elemanlı, 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens anten için ışıma paternleri Şekil 4.15'te verilmiştir. 22,7 dBi seviyesi ile ana lob şiddetinde pek bir değişiklik olmamış, yan lob seviyeleri kısmen aynı kalmıştır.

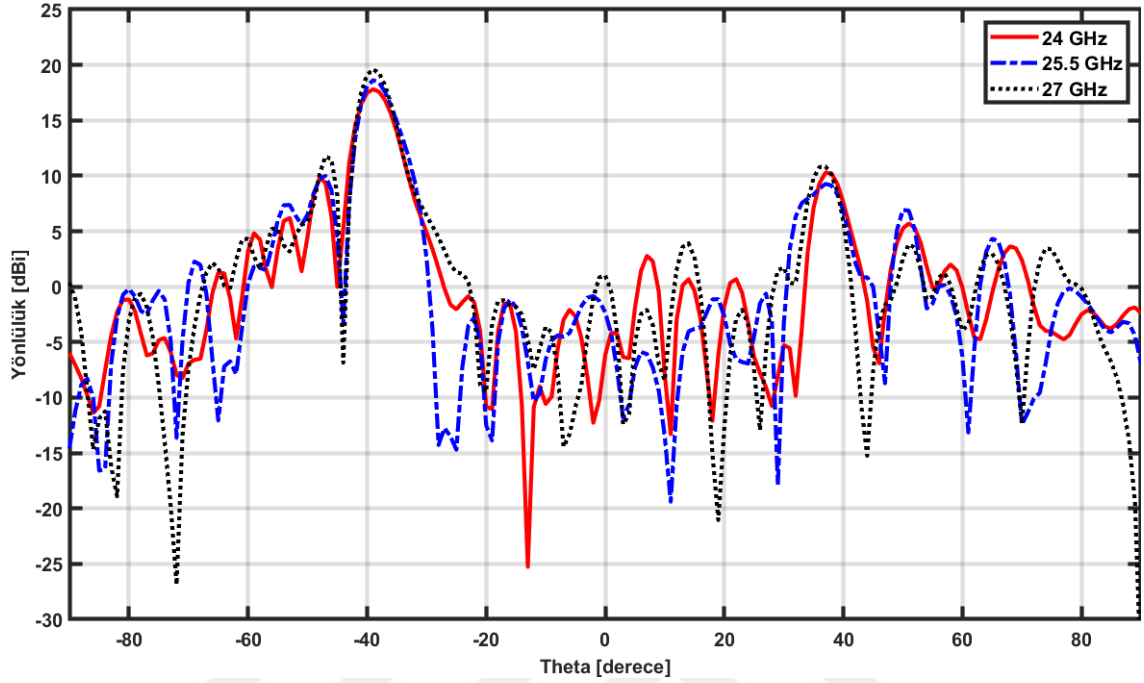


Şekil 4.15 Sekiz elemanlı 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

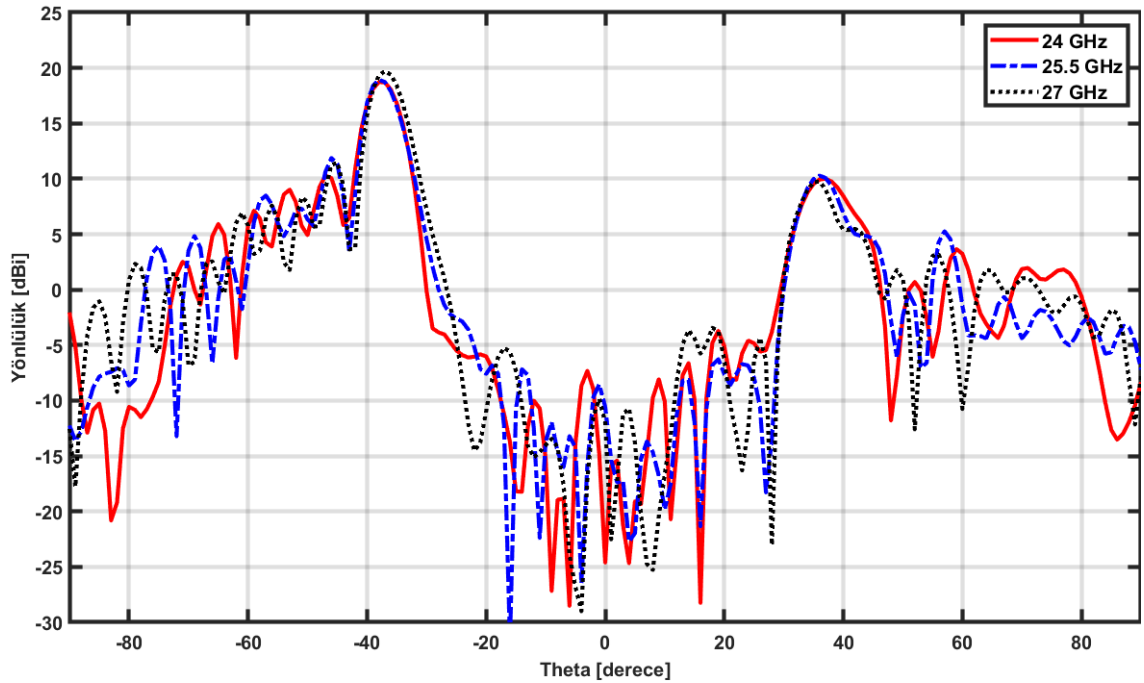
Uydurma katmanlı yapının ışıma paterni incelendiğinde H-düzlemi üzerinde $\theta=(-20^{\circ}-20^{\circ})$ aralığı dışındaki lobların neredeyse tamamına yakınının 0 dBi seviyesinden -5 dBi seviyesine kadar düştüğü gözlenmektedir.

Bir sonraki besleme noktası olan $x=p_3=6\lambda=23,96$ mm noktasındaki ışıma paterni Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu nokta tek elemanlı lens modelinde belirtildiği üzere 5 uydurma katmanlı lensin gönderilen bütün ışınları iç yansımaya uğramaksızın gönderilebilecek maksimum nokta olan $x_5=23,53$ noktasının biraz ilerisinde yer almaktadır. Bu noktadan yapılan ışımlar karşılaştırıldığında 24 GHz frekansı için yönlülük şiddeti 17,8 dBi değerinden 18,7 dBi değerine çıkmıştır. Ayrıca yan lob seviyesi -7,5 dBi değerinden -8,4 dBi değerine düşmüştür. Aslında normalize yönlülük değerleri düşünüldüğünde aradaki 0,9 dB farkın sabit kaldığı ve yan

lobların artması engellenirken ana lob şiddetinin arttığı söylenebilir. Çekirdek lens için $\theta=39^\circ$ yönlendirme söz konusuyken 5 uydurma katmanlı lens için $\theta=37^\circ$ ile yaklaşık aynı değerler elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.16 Sekiz elemanlı 5 adet uydurma katmanlı kullanılan lens anten dizisi için $x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanlı kullanılan lens

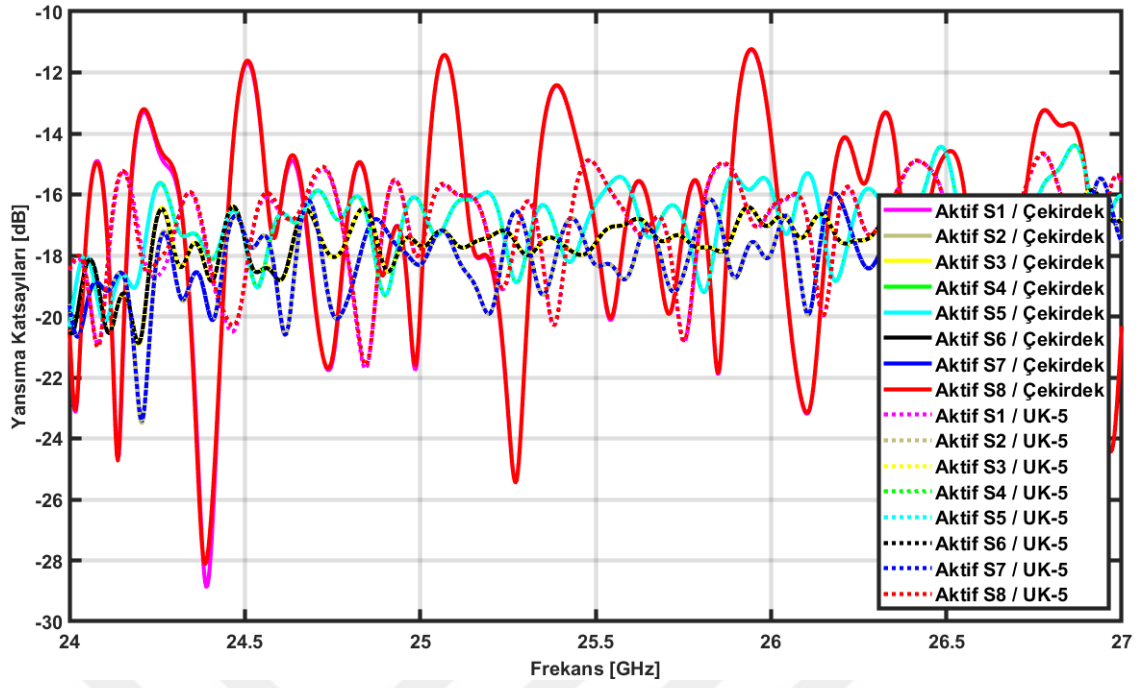
Tablo 4.1’de bu frekans aralığında lens yapılarına göre maksimum yönlülük değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1 24-27 GHz frekans bandında farklı lens yapıları için maksimum yönlülük değerleri

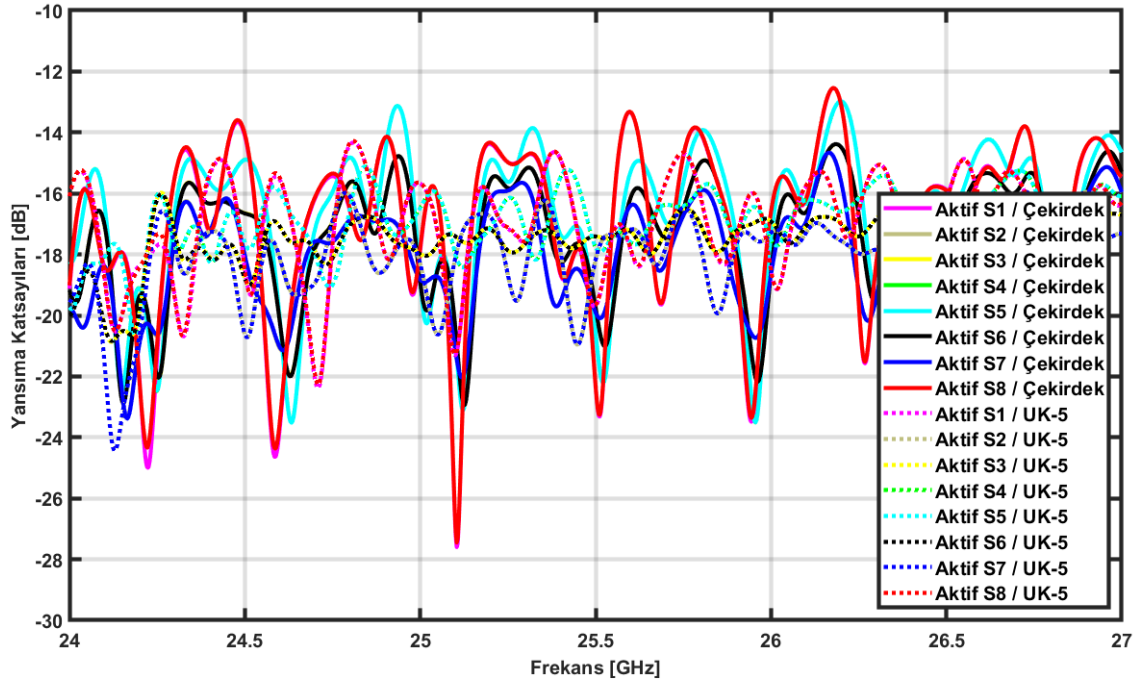
Besleme Noktası	Frekans [GHz]	Çekirdek Lens		5 Adet Uydurma Katmanlı Lens	
		Ana Lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana Lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
x=p ₀	24	22,1	-10,8	22,5	-9
	25,5	22,1	-10,7	22,6	-7,7
	27	22,6	-8,3	22,7	-6,2
x=p ₃	24	17,8	-7,5	18,7	-8,4
	25,5	18,6	-7,6	18,9	-7,1
	27	19,6	-7,9	19,7	-8,3

Tablodaki değerler incelendiğinde uydurma katmanlarının eklenmesiyle genel olarak ana lob şiddetlerinde bir artış olduğu gözlenmektedir. Hüzme yönlendirmenin daha net görülebileceği x=p₃ noktası için başlangıçta çekirdek lens için daha yüksek yan lob seviyeleri elde ediliyorken uydurma katmanlarının eklenmesiyle yan lob seviyelerinde kısmen azalma görülmektedir.

Bu frekans aralığında farklı besleme noktaları için aktif S-parametreleri Şekil 4.17’de verilmiştir.

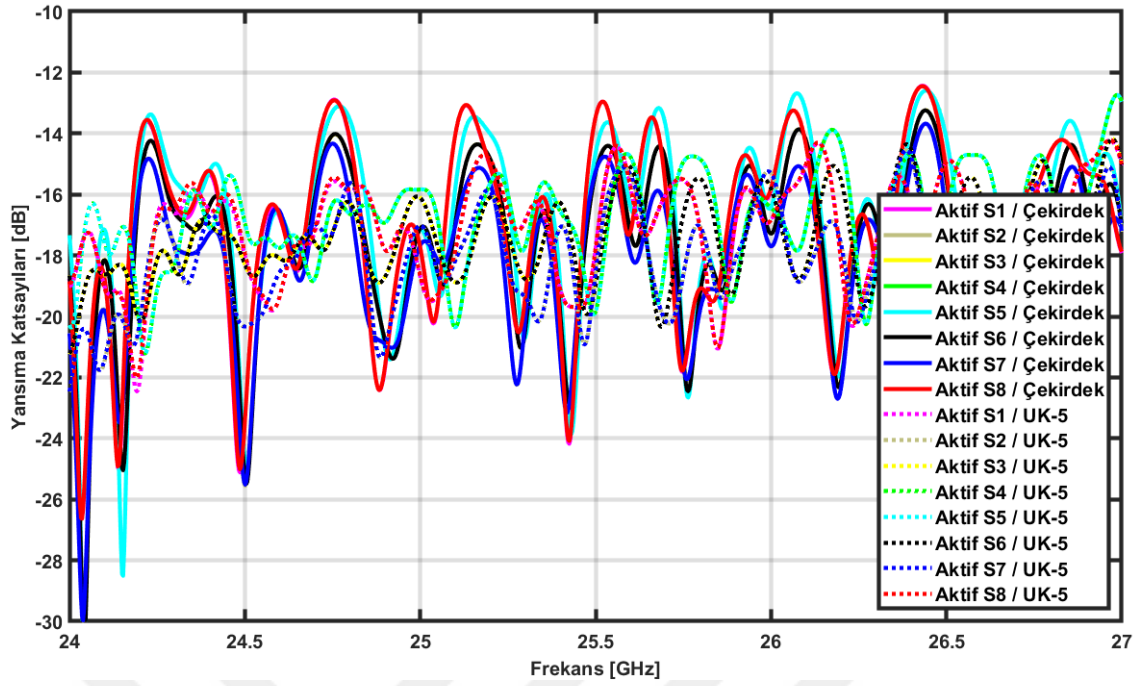


(a)

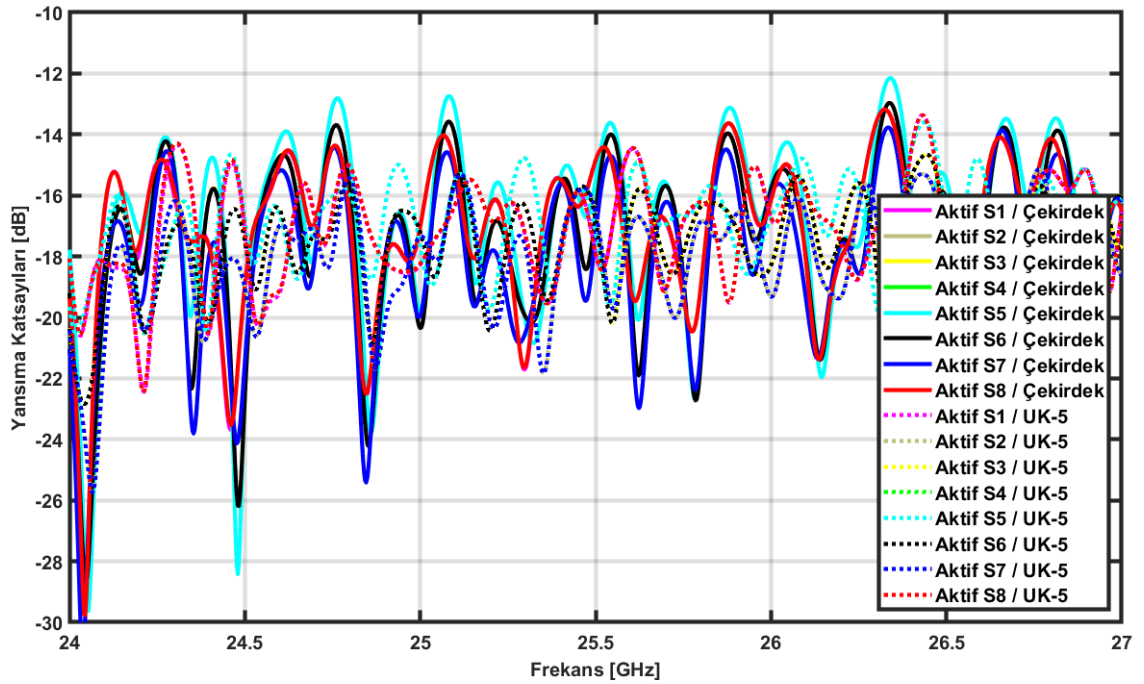


(b)

Şekil 4.17 24-27 GHz frekans bandında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens üzerindeki yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$



(c)



(b)

Şekil 4.17 24-27 GHz frekans bandında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet ıydurma katmanını kullanılan lens ızerindeki yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$ (devamı)

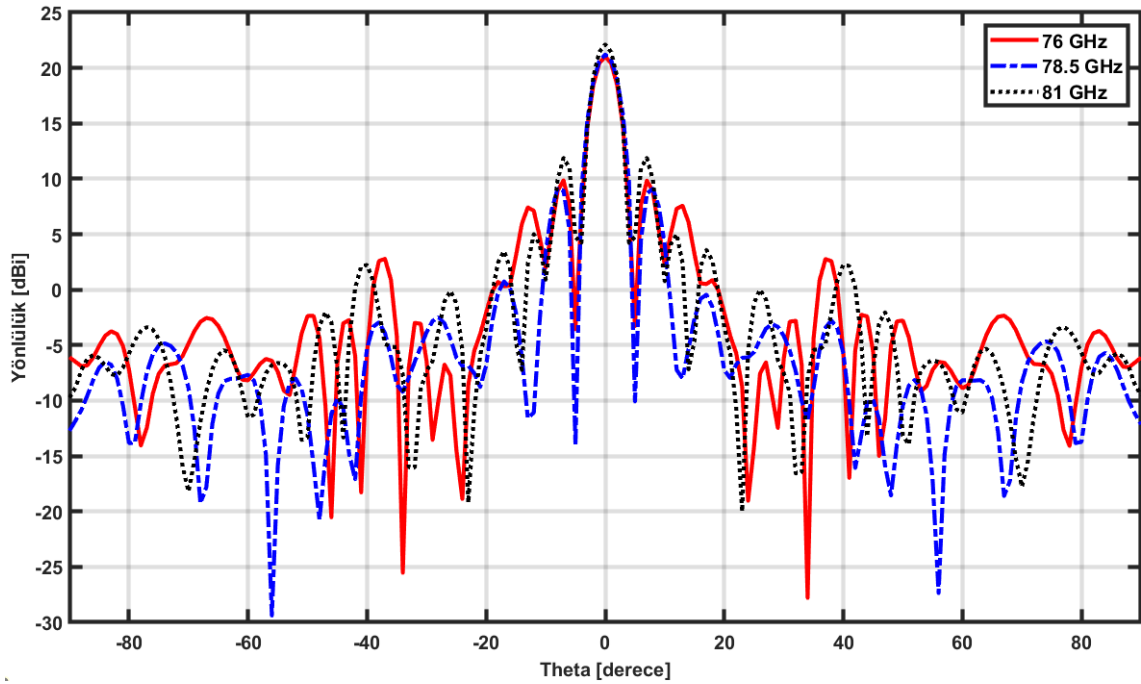
Şekil4.17’de verilen grafikler genel olarak incelendiğinde aktif S-parametreleri bu frekans aralığında çekirdek lens ızerinde yapılan ısımalarda -11 dB seviyelerinden 5 ıydurma katmanlı lens için -14 dB seviyelerinin altına düşüş gözlenmektedir.

Merkezi besleme için bu değer -15 dB değerinin altını bulabilmektedir. Besleme noktaları merkezden uzaklaştıkça bu bastırma oranlarında kısmen bir azalma görülmekle beraber genel olarak iç yansımaların azaldığı söylenebilir. Ayrıca bütün besleme noktaları için uydurma katmanlı yapıda yansıma katsayılarındaki dalgalanmaların geniş bant boyunca daha stabil olduğunu vurgulamak gerekir. Şekil 4.17'deki her bir grafik için, neredeyse bütün geniş bant boyunca, ilk dört yansıma katsayısı değeri olan Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 ve Γ_4 değerleri anten dizi merkezine göre sırasıyla simetrikleri olan Γ_8 , Γ_7 , Γ_6 ve Γ_5 değerleriyle aynı eğrileri çizmişlerdir.

24-27 GHz frekans bandında tek elemanlı, 5 uydurma katmanlı anten için 15,4 dBi seviyesinden; 8 elemanlı, 5 adet uydurma katmanlı anten dizisi için 22,7 dBi seviyesine ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra -14 dB seviyesinin altında elde edilen yansıma katsayısı değerleriyle genel bir başarımdan bahsedilebilir.

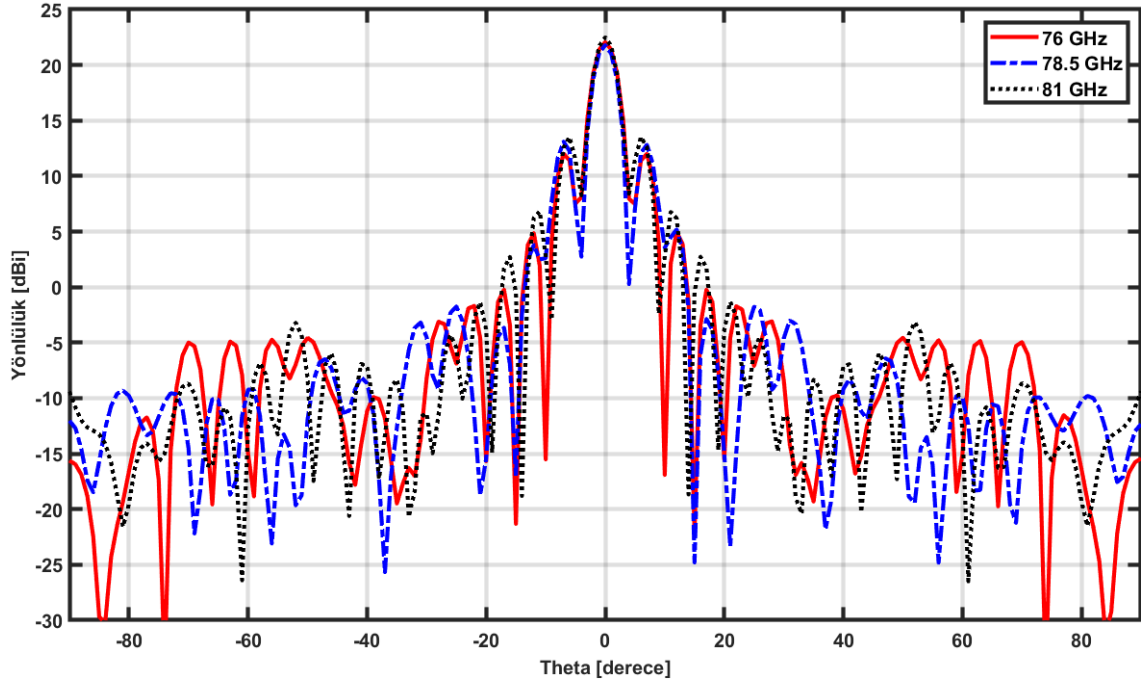
4.2.2 76-81 GHz Bandı için Uzak Alan Işıma Paternleri ve Yansıma Katsayıları

Bu frekans aralığında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens üzerindeki farklı besleme noktalarından yapılan ışımalara ait paternler üzerinde durulmuştur.



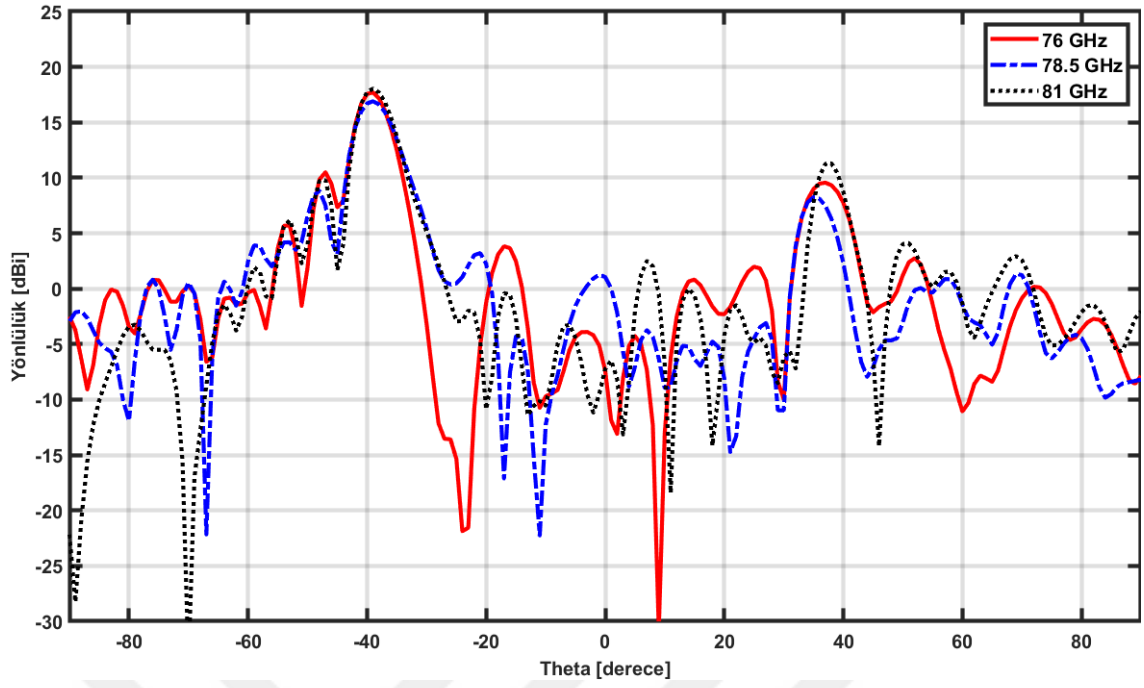
Şekil 4.18 Sekiz elemanlı çekirdek lens anten dizisi için x=0 noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

İlk besleme noktası olan $x=p_0$ besleme noktasındaki ışıma paternleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Burada, çekirdek lens için 81 GHz’de, 22,1 dBi yönlülük seviyesi ve -10,2 dB yan lob seviyesi elde edilmiştir. Şekil 4.19’da ise yine 81 GHz için ise 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens üzerinde yapılan ışımalarda 22,5 dBi yönlülük ve -9 dB yan lob seviyesi gözlenmektedir. Ayrıca $\theta=[-20^\circ-20^\circ]$ aralığı dışındaki lob seviyelerinin yaklaşık 4 dBi bastırıldığı görülmektedir.

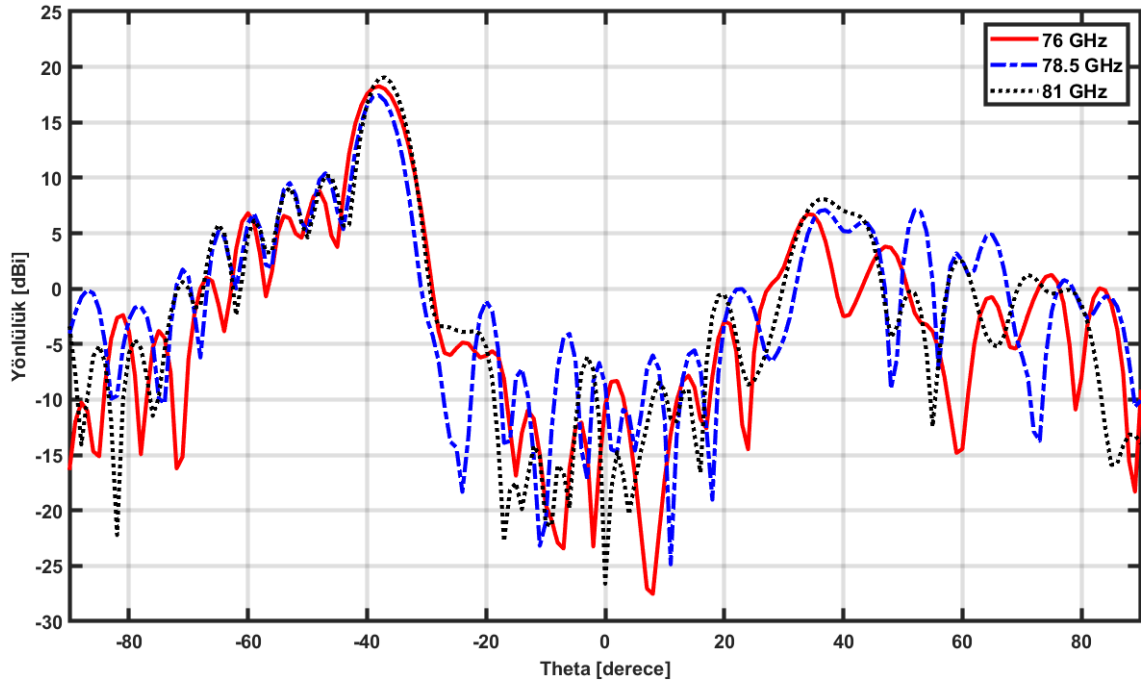


Şekil 4.19 Sekiz elemanlı 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens anten dizisi için $x=0$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi

Bir diğer besleme noktasını olan $x=p_3=6\lambda$ noktası için ışıma paternleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Çekirdek lens için merkezi beslemeye göre ana lob şiddetinde 81 GHz’de 18 dBi değerine kadar düşme görülmektedir. Bununla beraber 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens için bu değer 19,1 dBi seviyesine çıkmaktadır. Yan lob seviyeleri ise -6,7 dB seviyelerinden -8,8 dB seviyelerine kadar bastırılmıştır. Ayrıca bütün tarama açısı değerleri için diğer lob seviyelerinde genel bir düşüş gözlenmektedir. Bunların yanı sıra 81 GHz için $\theta=39^\circ$ yönlendirme açısı elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.20 Sekiz elemanlı anten dizisi için $x=p_3$ noktasından beslendiğinde oluşan yönlülüğün θ ile değişimi (a) çekirdek lens (b) beş adet uydurma katmanı kullanılan lens

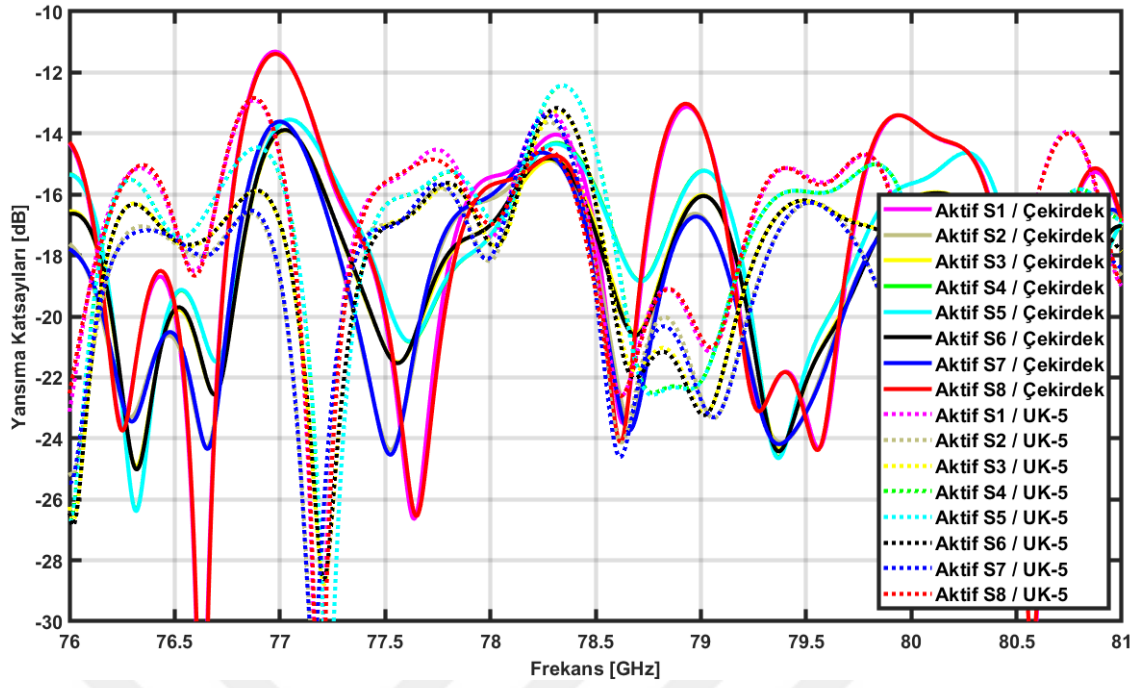
Yönlülük değerlerinin besleme noktalarına ve uydurma katmanı olup olmasına göre değişimleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 76-81 GHz frekans bandında farklı lens yapıları için yönlülük değerlerinin karşılaştırılması

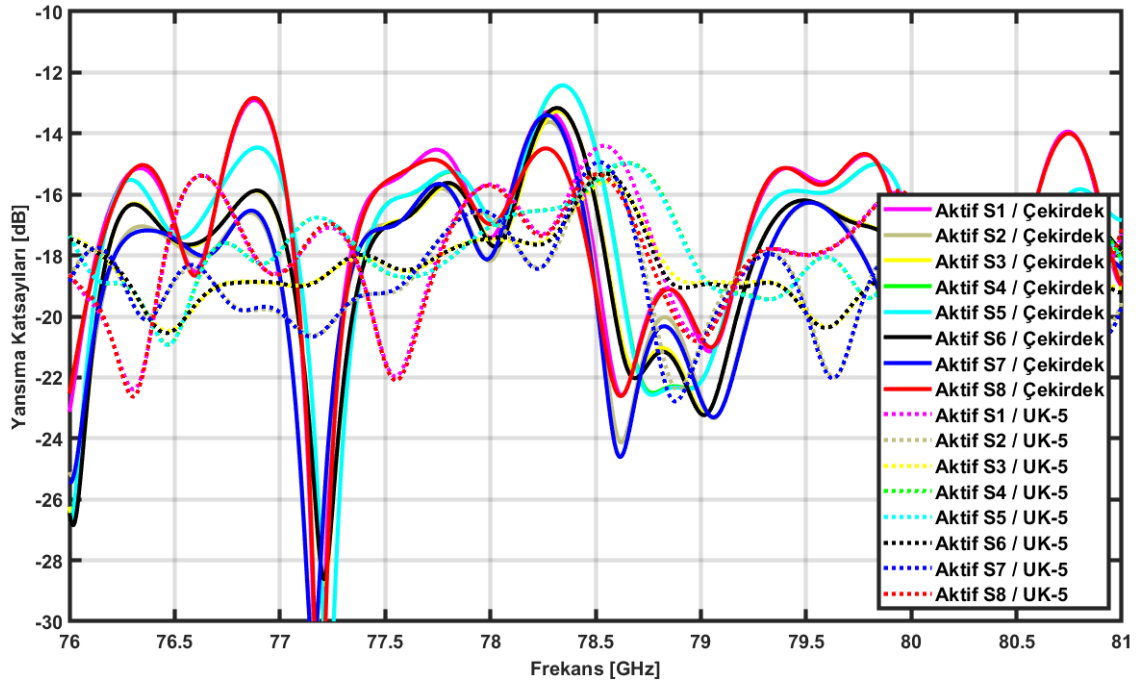
Besleme Noktası	Frekans [GHz]	Çekirdek Lens		5 Adet Uydurma Katmanlı Lens	
		Ana Lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]	Ana Lob Şiddeti [dBi]	Yan Lob Seviyesi [dB]
x=p ₀	76	21	-11,2	22,1	-10
	78,5	21,2	-12,1	21,8	-8,7
	81	22,1	-10,2	22,5	-9
x=p ₃	76	17,7	-7,2	18,3	-9,3
	78,5	16,9	-7,6	17,4	-7
	81	18	-6,7	19,1	-8,8

Genel itibariyle çalışma frekanslarından bağımsız olarak 5 adet uydurma katmanlı lens için yönlülük seviyelerinde artış gözlenmektedir. Merkezi besleme konumu için yapılan ışımalarda yan lob seviyelerinde düşme olmasına rağmen kritik besleme noktası olarak belirlenen x=p₃ için bu değerlerin aşağı çekildiği söylenebilir.

8 elemanlı anten dizisinin yansıma katsayılarına ilişkin grafikler Şekil 4.21’de verilmiştir.

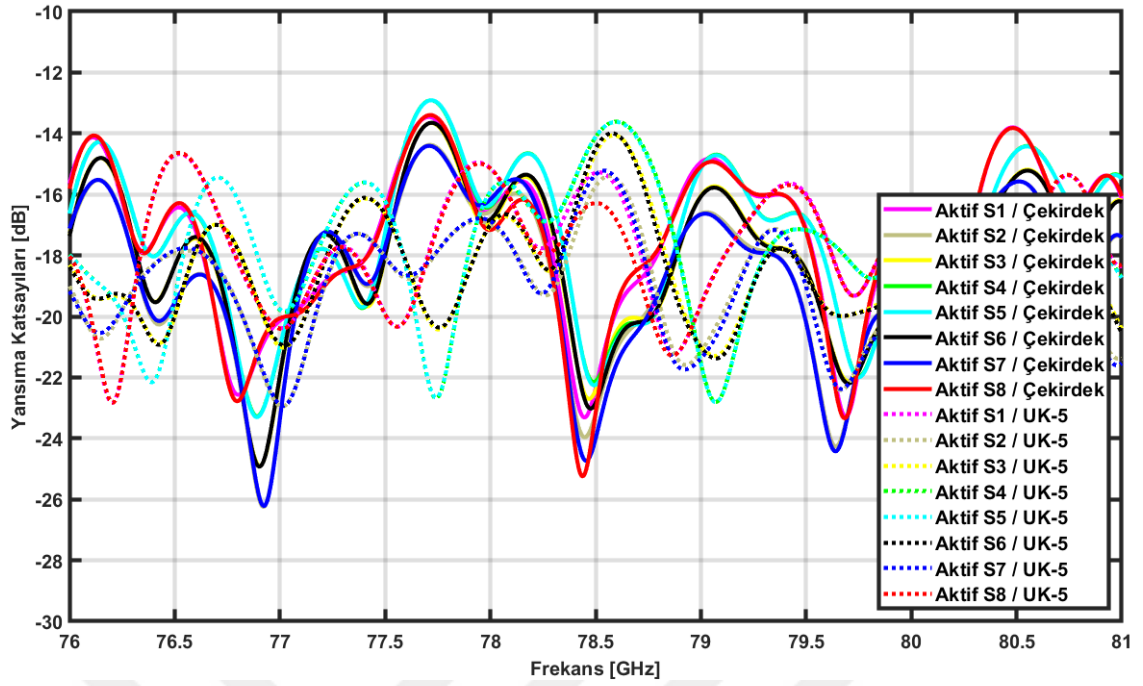


(a)

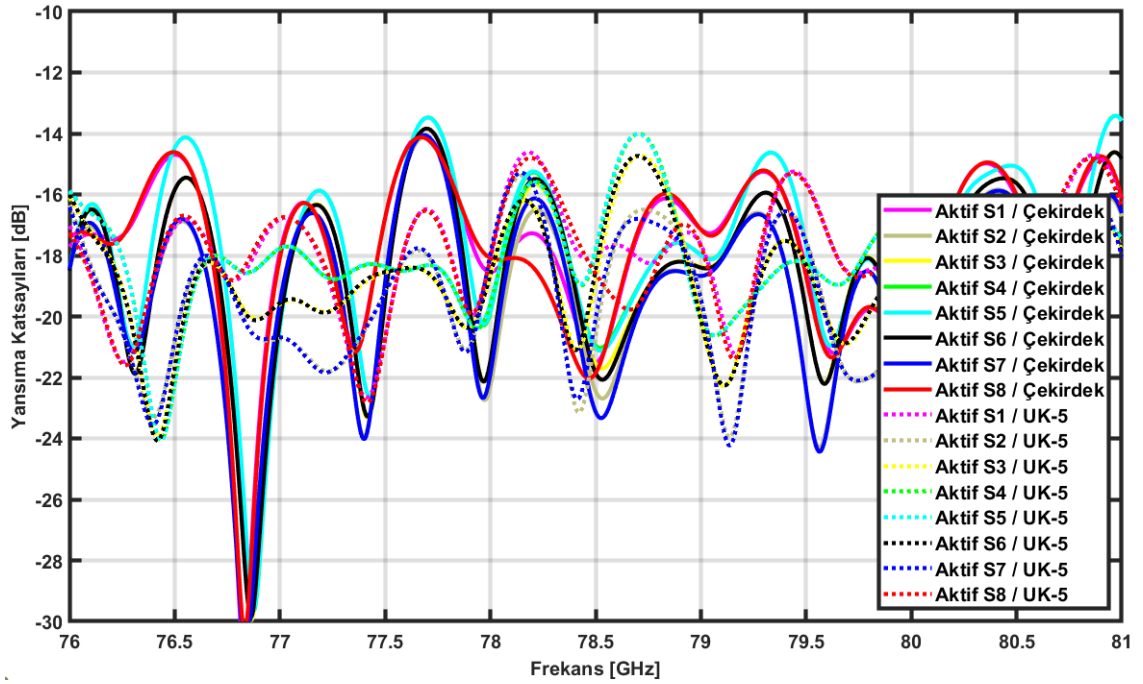


(b)

Şekil 4.21 76-81 GHz frekans bandında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanı kullanılan lens üzerindeki yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$



(c)



(d)

Şekil 4.21 76-81 GHz frekans bandında 8 elemanlı anten dizisi için çekirdek lens ve 5 adet uydurma katmanını kullanılan lens üzerindeki yansıma katsayılarının karşılaştırılması (a) $x=p_0$ (b) $x=p_1$ (c) $x=p_2$ (d) $x=p_3$ (devamı)

Grafiklerde verilen yansıma katsayılarından görüleceği üzere bu frekans aralığında uydurma katmanlarının eklenmesiyle beraber aktif S-parametreleri için yaklaşık olarak -2 dB daha düşük değerler elde edilmiştir. Besleme kaynakları merkezden

uzaklaştıkça bu bastırma oranları azalmakla beraber spektrumun büyük bir bölümünde iç yansımaların azaldığından bahsedilebilir.

Sonuç itibariyle tek elemanlı anten için elde edilen yönlülük değerleri 8 elemanlı anten dizisi ile daha çok artırılmış ve uydurma katmanlarının eklenmesiyle aktif s-parametreleri -14 dB seviyelerinin altına çekilmiştir.



5 3B PROTOTİP ÜRETİMİ

Üretim aşamasında dielektrik uydurma katmanlarının oluşturulması için birkaç farklı yöntem kullanılabilmektedir. Bunlardan ilki farklı dielektrik sabitlerine sahip materyallerin lensin dalga cephesine yapıştırılması olabilir. Fakat yapıştırma esnasında oluşacak kabarcıklardaki havanın oluşturacağı parazitik etki ışıma sırasında istenmeyen elektromanyetik dalga saçılmalarına sebep olacağı için tercih edilmemektedir. Bir diğer yöntem olarak yalnızca bir dielektrik materyal kullanılıp malzeme-hava karışımının oranı ayarlanarak istenilen bağlı dielektrik sabiti değerleri elde etmektir. Bunun için CNC makineleri kullanılarak talaşlı üretim metotlarıyla uydurma katmanları üzerinde belli bir geometrik desen oluşturacak şekilde boşluklu yapılar açılmalıdır. Ancak ne var ki malzemenin kırılkan yapısıyla beraber dielektrik lensin ön ucundaki bu delikli uydurma katmanlarının kırılkanlığı daha fazla artmaktadır. Son olarak daha pratik ve uygulanabilir yöntem olan 3B yazıcı kullanılarak eritilmiş malzemenin istenilen sıcaklık ve hızlarla aktarılmasıyla, istenilen boşluklu yapılar elde edebileceğimiz olan ergiyik biriktirmeli modelleme (FDM) yöntemidir. Eklemeli üretimin bir çeşidi olan bu yöntemle delikli hava boşluklarına kıyasla daha homojen hava boşlukları elde edilebilmektedir. Baskı süresi ise talaşlı üretim süresinden çok daha kısadır.

Daha önce boyutlarını belirlediğimiz 24-27 GHz frekans bandında çalışacak lens anten için FDM yöntemi tercih edilmiştir. Dielektrik lensin çekirdek kısmı ve malzeme-hava karışımı uydurma katmanları tek parça olarak elde edilmiştir. Prototip tasarımında özellikle RF uygulamalarında tercih edilen yüksek dielektrik sabiti değerine sahip filament (Preperm® ABS1000, $\epsilon_r=10\pm0.35$) kullanılarak dielektrik lens için yarı-eliptik düzlemsel tabaka oluşturulmuştur. Bu tabakanın uydurma katmanlarının olduğu kısımlar için boşluk oranları kademeli olarak artırılmış ve daha az yoğun dielektrik malzeme elde edilmiştir.

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_m f_m + \epsilon_{hava} f_{hava} \quad (5.1)$$

$$f_m + f_{hava} = 1 \quad (5.2)$$

Hava-malzeme karışımı bu yeni malzemenin efektif dielektrik sabiti bulunurken (5.1)'de verilen eşitlik kullanılır. Burada, (5.2)'de verildiği gibi birim hacim için malzemenin bağıl hacim oranı (f_m) ve havanın bağıl hacim oranı (f_{hava}) toplamı 1 olacak şekilde bir ağırlıklandırma yapılır. Bu sayede 3B baskı için seçilen malzeme ($\epsilon_m=10$) ile havanın ($\epsilon_{hava}=1$) dielektrik sabitleri arasında istenilen efektif dielektrik sabitleri (ϵ_{eff}) elde edilebilmektedir.

Bu tasarımda 5 uydurma katmanı için bağıl hacim oranları, efektif dielektrik sabitleri ve kalınlık değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Lens antenin bağıl hacim oranları, dielektrik sabitleri ve kalınlık değerleri

	f_m	f_{hava}	ϵ_{eff}	Kalınlıklar [mm]
Çekirdek	1	0	10	$r_0=71,87$
UK-1	0,633	0,367	6,7	1,14
UK-2	0,398	0,602	4,58	1,37
UK-3	0,237	0,763	3,13	1,66
UK-4	0,127	0,873	2,14	2,01
UK-5	0,051	0,949	1,46	2,43

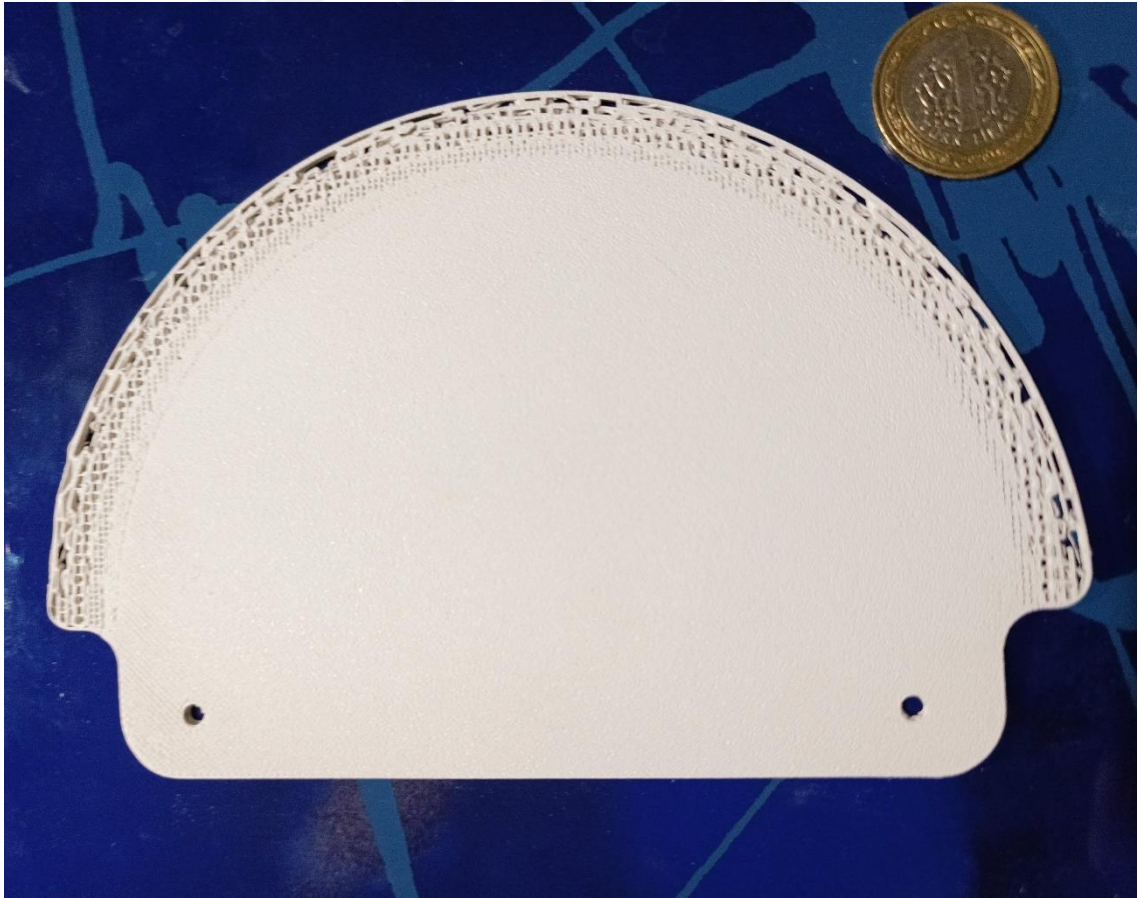
Tabloda verilen değerlere ek olarak yarım dalga boyu uzunluğunda olan lensin yüksekliği $h=2$ mm'dir. Teorikte elde edilen bu boşluk oranlarının eklemeli üretim yöntemiyle uygulamaya geçirilebilmesi için 3B baskı için uygun ayarlamalar yapılması gereklidir. Baskı sürecinde kullanılan filamentin ısıtıcı ucunun (hotend) sıcaklığı, xy-düzleminde kavisli yapılarda hassasiyeti sağlamak için uygun baskı hızları gibi değişkenlerin optimal seviyede tutulması gerekmektedir. Bu değerler çeşitli testler sonucunda elde edilmiştir.

Test aşamasında elde edilen baskı hız ve sıcaklık değerleri, CURA programı üzerinde lensin pozisyon bilgileriyle beraber işlenerek g-code formatına çevrilip 3B yazıcıya aktarılmış ve üretime hazır hale getirilmiştir. Baskı için yazıcı parametrelerinden bazıları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 3B dielektrik lens anten baskı parametreleri

3B yazıcı parametreleri	Değerler
Hotend sıcaklığı	240 °C
Baskı hızı	10 mm/s
Boştaki hız	100 mm/s

Bu çalışma değerleri kullanılarak üretimi tamamlanan dielektrik lens antene ait üstten görünüşü Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 Dielektrik lens anten prototipinin 3B baskısı

Şekil 5.2’de ise üretimi tamamlanan ve nikel kaplaması anten dizisinin perspektif görünüşünü verilmiştir.

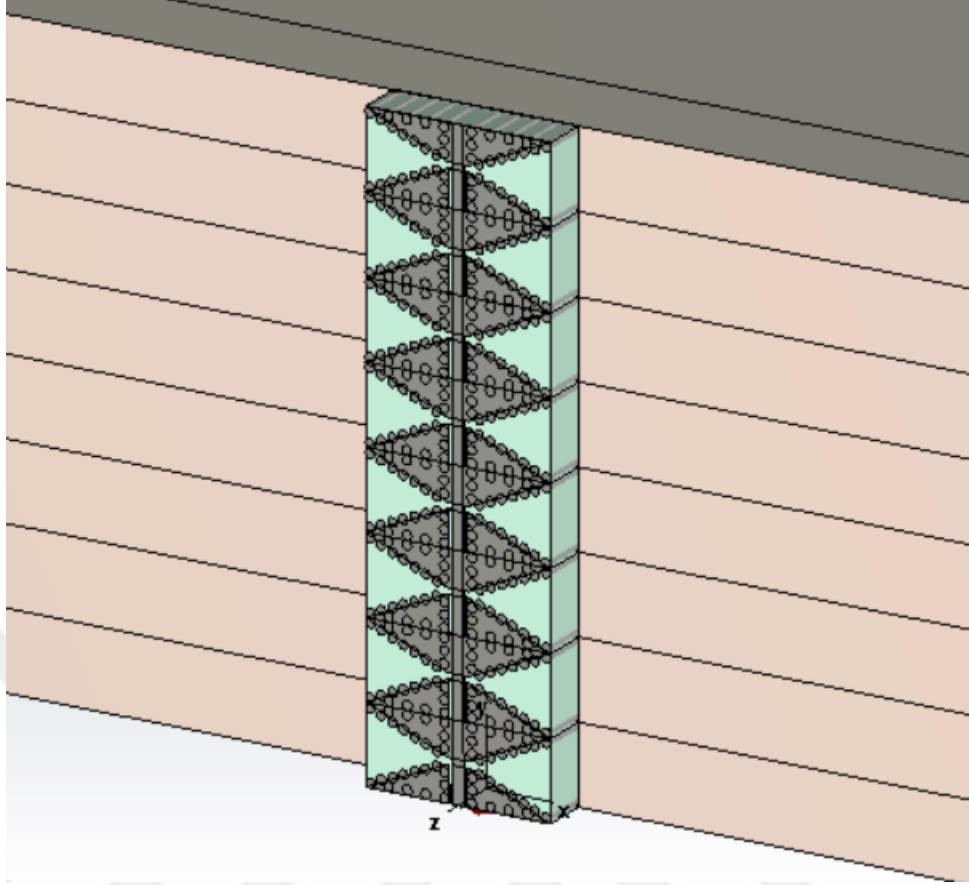


Şekil 5.2 Sekiz elemanlı dielektrik lens anten dizisinin 3B prototipi

Üretim sürecinde bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Bunlardan biri xy-düzleminde uygun başlama noktasının belirlenmesidir. Bir diğeri ise uydurma katmanlarının olduğu kavisli yüzeylerde tarama yönünün dolayısıyla ergimiş filament atımlarının anten görüş yönüne (z-ekseni) göre simetrik yapılı olmasıdır. Böylece daha homojenize ve parazitik etkilerin kısmen azaltıldığı dielektrik lens üretilmiştir.

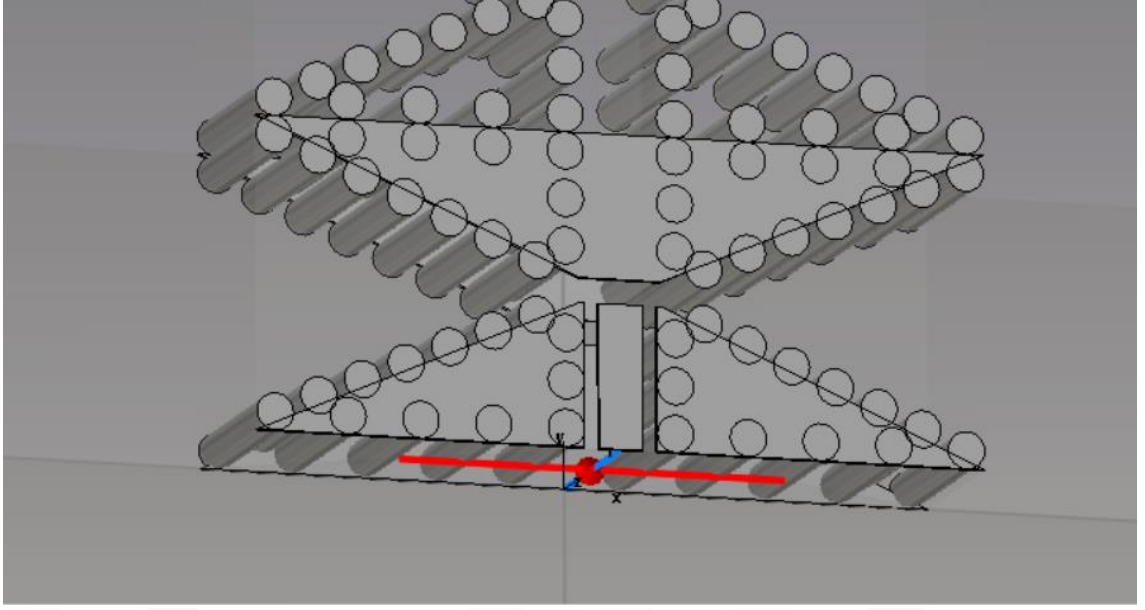
Düzlemsel dielektrik lens anten dizisi oluşturulurken her bir anten elemanının alt ve üst yüzeyleri nikel spreyle kullanılarak kaplanmıştır. Böylece anten elemanları arasında kullanılması planlanan mükemmel iletken için harici olarak metal plaka kullanılmasına gerek kalmayacaktır. Ayrıca düzlemsel anten elemanları daha pürüzsüz yüzeylere sahip oldukları için aralarında boşluk kalmayacak şekilde birleştirilebilmiştir.

Bu tasarım için kullanılması planlanan tek besleme girişli ve 8 portlu bow-tie besleme dizisinin perspektif görünüşü Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.3 Tek girişli 8 portlu besleme yapısı

Simülasyonlar için kullanılan portlar ayrı portlar olup eş zamanlı olarak çalışmaktadır. Prototipleme aşamasında ise faz farkı olmayacak şekilde tek bir besleme girişinin 8 porta dağıtılması gerekmektedir. Bu besleme yapısının bir yüzündeki elemanlar bow-tie kollarından birini beslerken diğer yüzündeki elemanlar ise diğer bow-tie kollarını besleyecek şekilde paralel konumlandırılmıştır. Her bir elemanın ön arka bileşenleri dielektrik malzeme içinden geçen vialar ile birbirine sabitlenmiştir. Bir tek bow-tie beslemesi için sadece iletkenlerin gösterildiği görsel Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4 Bir elemanlı besleme yapısı

Sonuç itibariyle her bir dielektrik lensin önce 3B baskısı alınmış daha sonra nikel spreyle yüzeyleri kaplanmıştır. Kaplanan bu parçalar plastik cıvata ve somunlar kullanılarak birbirine sabitlenmiştir. Böylece prototipleme aşaması tamamlanmıştır.

Tasarım sürecinden simülasyonların elde edilmesi sürecine kadar, günümüz otomotiv radar sensörleri için yaygın olarak kullanılan 24-27 GHz ve 76-81 GHz yüksek frekans geniş bant aralıklarında düzlemsel dielektrik lens anten ve anten dizileri üzerinde çalışılmıştır. Özellikle uzun ve kısa menzil uygulamalarının tamamını (76-77 GHz/77-81 GHz) kapsayacak tek bir sensör için anten dizisi tasarlanmıştır. Öte taraftan dünya genelinde bazı bölgelerde, kısa menzil radarları için tercih edilen 24 GHz UWB (21-26 GHz) bandına bir alternatif olarak 24-27 GHz bandı için de anten tasarımı yapılmıştır.

Bu frekans aralıklarında bir elemanlı anten ve 8 elemanlı anten dizisi için farklı uzunluk parametreleri değerlendirilmiştir. Özellikle uzak alan ışıma paternleri incelenmiş ve yüksek yönlülüğe sahip tasarımlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bow-tie besleme yapısının ve uydurma katmanlarının uzunluk parametreleri simülasyonlar sonucunda optimize edilmiştir. Optimizasyon için referans olarak $x=0$ noktasındaki maksimum yönlülük değerleri dikkate alınmıştır. Ana lob şiddetlerinin yüksek, yan lob seviyelerinin düşük olması beklenmiş, bunların yanı sıra aktif S-parametrelerinin düşük seviyede olması hedeflenmiştir.

Işıma sırasında oluşan iç yansımaları minimize etmek için kullanılan dielektrik uydurma katmanlarının kalınlıkları, çalışılan frekansın bir fonksiyonu olarak ölçeklendirilmiştir. Bu sayede anten ışınlarının daha yumuşak bir geçiş yapmaları sağlanmıştır. Bu kalınlıklar bulunurken kullanılan malzemelerin dielektrik sabitleri, çekirdek kısmından son uydurma katmanına doğru geometrik ortalamalı olarak azalan sırayla bir dizi oluşturacak şekilde ilgili katman için kullanılmıştır.

MATLAB benzetim ortamında geometrik optik yaklaşımla x-ekseni üzerindeki besleme antenlerinin bulundukları konumların merkezden yarıçap değerine alabileceği maksimum kırılma değerlerine kadar fonksiyonları çizdirilmiştir. Son uydurma katmanında tam yansıma değerlerine ulaşılan noktaları veren kritik besleme noktaları tespit edilmiştir.

Aynı zamanda hem minimum iç yansıma hem de maksimum yönlendiricilik hedeflendiğinden dolayı uydurma katmanları kullanılmıştır. Aktif S-parametreleri çekirdek lens yapısına göre olabildiğince düşürülmüştür. Çekirdek lens için -10 dB seviyelerinin altında olan yansıma katsayıları her iki frekans bandında -14 dB seviyelerinin altına çekilmiştir. Bu sayede bir elemanlı anten için besleme yapısı, merkez noktasına olabildiğince uzakta konumlandırılabilmiş $\theta=\pm 40^\circ$ 'ye kadar ana lob yönlendiriciliği sağlanmıştır.

Tasarım ve simülasyon süreçlerinin akabinde üretim aşamasına geçilmiş, 3B yazıcı ile eklemeli üretim yöntemi kullanılarak dielektrik lensin prototipi yapılmıştır. Prototipleme aşamasında yazıcı hotend sıcaklığı ve baskı hızı değerleri; çekirdek ve uydurma katmanları için optimum seviyelerde belirlenmiştir. Böylece lens boyutları ve lensin ilgili bölümleri için efektif dielektrik sabiti değerleri, düşük toleranslar ile tasarım değerlerine olabildiğince benzer elde edilmeye çalışılmıştır.

Yapılan bu anten tasarımları ile Tablo 1.1'de verilen otomotiv radar teknolojisinin gereksinim duyduğu tarama açıları elde edilmiştir. Uzak menzil radarı için $\theta=\pm 15^\circ$ ve orta mesafe radarı için $\theta=\pm 40^\circ$ tarama açısı değerleri her iki frekansta da yaklaşık olarak karşılanmaktadır. 24-27 GHz bandında, 24 GHz'de $\theta=0^\circ$ doğrultusunda 22,5 dBi ana lob şiddeti ve -9 dB yan lob seviyesi elde edilmiştir. Yine 24 GHz'de $\theta=\pm 38^\circ$ doğrultusunda maksimum 18,7 dBi yönlülük ve -8,4 dB yan lob seviyesi elde edilmiştir. Ana lob şiddetlerinde 2,8 dB seviyesinde bir tarama kaybıyla 76° görüş açısı kabiliyetine sahiptir.

76-81 GHz geniş bandında ise 76 GHz'de $\theta=0^\circ$ doğrultusunda 22,1 dBi ana lob şiddeti ve -10 dB yan lob seviyesi elde edilmiştir. Yine 76 GHz için $\theta=\pm 38^\circ$ doğrultusunda maksimum 18,3 dBi yönlülük ve -9,3 dB yan lob seviyesi elde edilmiştir. Bu anten dizi ile ana lob şiddetlerinde 3,8 dB seviyesinde bir tarama kaybıyla 76° görüş açısı sağlanabilmektedir.

Bu çalışmada her iki frekans bandı için yapılan tasarımlarda daha büyük yönlülük değerlerinin elde edilebilmesi adına 16 elemanlı dielektrik lens anten dizisi üzerinde çalışılabilir. Yarı dairesel bir yapı üzerinde çalışıldığı için besleme noktaları sinüzoidal bir dizi oluşturacak şekilde seçilip yönlülük değerlerindeki değişimler incelenebilir. Doğrusal dizi yerine düzlemsel diziler oluşturulup farklı faz açıları ve genlik değerleri için daha kompleks çalışmalar yapılabilir.

- [1] C. Waldschmidt, J. Hasch, and W. Menzel, "Automotive radar — from first efforts to Future Systems," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 135–148, 2021.
- [2] M. Schneider, "Automotive Radar – Status and Trends," *German Microwave Conference*, 2005, pp. 144–147.
- [3] H. Mizuno, N. Tomioka, A. Kawakubo, and T. Kawasaki, "A forwardlooking sensing millimeter-wave radar," in *Proc. JSAE Ann. Congr.*, 2004, no. 33-04, pp. 5–8.
- [4] D. Freundt and B. Lucas, "Long range radar sensor for high-volume driver assistance systems market," in *Proc. SAE World Congress & Exhibition*, 2008, pp. 117–124.
- [5] W. Menzel, "Millimeter-wave radar for civil applications," in *Proc. Eur. Radar Conf.*, Oct. 2010, pp. 89–92.
- [6] W. Menzel and A. Moebius, "Antenna Concepts for millimeter-wave automotive radar sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2372–2379, 2012.
- [7] European Telecommunications Standards Institute, Short Range Devices; Transport and Traffic Telematics (TTT); Short Range Radar Equipment Operating in the 77 GHz to 81 GHz Band; Harmonised Standard Covering the Essential Requirements of Article 3.2 of Directive 2014/53/E, Sophia Antipolis: ETSI, 2017.
- [8] Federal Communications Commission, FCC-CIRC1707-07, [Çevrimiçi]. Available: <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-345476A1.pdf>. [Erişildi: 15 12 2022].
- [9] M. Köhler, J. Hasch, H. L. Blöcher, and L.-P. Schmidt, "Feasibility of automotive radar at frequencies beyond 100 GHz," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 49–54, 2012.
- [10] J. Hasch, E. Topak, R. Schnabel, T. Zwick, R. Weigel, and C. Waldschmidt, "Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 3, pp. 845–860, 2012.
- [11] Z. Peng, C. Li, and F. Uysal, "Principles of automotive radar systems," in *Modern Radar for automotive applications*, Edison: SciTech Publishing, 2022, p. 15.
- [12] W. Menzel, D. Pilz, and M. Al-Tikriti, "Millimeter-wave folded reflector antennas with high gain, low loss, and low profile," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 3, pp. 24–29, 2002.
- [13] P. Hallbjorner, Zhongxia He, S. Bruce, and Shi Cheng, "Low-profile 77-GHz lens antenna with array feeder," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 205–207, 2012.
- [14] A. Artemenko, A. Mozharovskiy, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, and V. Ssorin, "Experimental characterization of E-band two-dimensional

- electronically beam-steerable integrated lens antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1188–1191, 2013.
- [15] S. B. Yeap, X. Qing, and Z. N. Chen, "77-GHz dual-layer transmit-array for automotive radar applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 6, pp. 2833–2837, 2015.
 - [16] M. Imbert, A. Papio, F. De Flaviis, L. Jofre, and J. Romeu, "Design and performance evaluation of a dielectric flat lens antenna for millimeter-wave applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 342–345, 2015.
 - [17] O. Khan, J. Meyer, K. Baur, and C. Waldschmidt, "Hybrid thin film antenna for automotive radar at 79 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 10, pp. 5076–5085, 2017.
 - [18] J. Xu, W. Hong, H. Zhang, G. Wang, Y. Yu, and Z. H. Jiang, "An array antenna for both long- and medium-range 77 GHz automotive radar applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 7207–7216, 2017.
 - [19] E. Arneri, F. Greco, L. Boccia, and G. Amendola, "A reduced size planar grid array antenna for automotive radar sensors," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2389–2393, 2018.
 - [20] Y. Yu, W. Hong, H. Zhang, J. Xu, and Z. H. Jiang, "Optimization and implementation of SIW slot array for both medium- and long-range 77 GHz Automotive Radar Application," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 7, pp. 3769–3774, 2018.
 - [21] H. Tian, C. Liu, and X. Gu, "Proximity-coupled feed patch antenna array for 79 ghz automotive radar," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 19, pp. 6244–6246, 2019.
 - [22] J. Xu, W. Hong, Z. H. Jiang, and H. Zhang, "Low-profile circular patch array fed by slotted substrate integrated waveguide," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 2, pp. 960–970, 2019.
 - [23] G. F. Hamberger, S. Spath, U. Siart, and T. F. Eibert, "A mixed circular/linear dual-polarized phased array concept for automotive radar—planar antenna designs and system evaluation at 78 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1562–1572, 2019.
 - [24] S. Yoo, Y. Milyakh, H. Kim, C. Hong, and H. Choo, "Patch array antenna using a dual coupled feeding structure for 79 ghz automotive radar applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 676–679, 2020.
 - [25] C. M. Rappaport and B. Gonzalez-Valdes, "The blade beam reflector antenna for stacked nearfield millimeter-wave imaging," *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 1–4, Jul. 2012.
 - [26] D. M. Sheen, D. L. McMakin, and T. E. Hall, "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 9, pp. 1581–1592, Sep. 2001.]

- [27] F. Tokan, N. T. Tokan, A. Neto, and D. Cavallo, "The lateral wave antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 6, pp. 2909–2916, Jun. 2014.
- [28] F. T. Ulaby and U. Ravaioli, in Fundamentals of Applied Electromagnetics, 7th ed., Upper Saddle River: Pearson, 2014, pp. 72–72.
- [29] D. M. Pozar, "A relation between the active input impedance and the active element pattern of a phased array," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 9, pp. 2486–2489, 2003.



Konferans Bildirileri

1. S. M. Taranci and F. Tokan, "Otomotiv Radarı İçin Dielektrik Lens Anten Dizisi Tasarımı," in 2. Global Conference on Engineering Research, 2022, pp. 432–433, [online].

