

**RADAR UYGULAMALARINDA BİRDEN FAZLA
HÜZMEYLE TARAMA YAPAN DİZİ ANTEN VE ROTMAN
LENS TASARIMI**

**ARRAY ANTENNA AND ROTMAN LENS DESIGN FOR
MULTI-BEAM SCANNING IN RADAR APPLICATIONS**

YASEMİN ESTEKİN

PROF. DR. BİRSEN SAKA TANATAR

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

Şubat 2024

ÖZET

RADAR UYGULAMALARINDA BİRDEN FAZLA HÜZMEYLE TARAMA YAPAN DİZİ ANTEN VE ROTMAN LENS TASARIMI

Yasemin ESTEKİN

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Şubat 2024, 157 sayfa

Bu tez çalışmasında, dizi anten hüzmesini farklı zamanlarda veya aynı anda yönlendirme ve şekillendirme kabiliyetine sahip analog hüzme şekillendirme tekniği olan Rotman lens tasarımı yapılmıştır. Lens, sırayla yedi hüzme portunun uyarılmasıyla, yükseliş ekseninde -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 41° 'ye hüzme yönlendirme yapabilmektedir. Lens hüzme portlarının aynı anda beslendiği durumda ise lens, kendine bağlanan dizi antenin hüzmesini -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 41° 'de aynı anda oluşturma yeteneğine sahiptir. Rotman lens, gerçek zaman gecikmesi prensibine göre çalıştığından, lens çalışma frekans bandı ideal koşulda sonsuz kabul edilmektedir. Ancak lense bağlanan dizi antenin bir çalışma frekans bandı olması, lens ve anten sisteminin verimli kullanılabileceği frekans bandını sınırlamaktadır. Dizi anten elemanları arasındaki mesafenin hem anten dizisi hem de lens tasarımında kullanılan bir parametre olması, sistemin verimli kullanılabileceği frekans bandını sınırlayan ana etkidir.

Tez kapsamında, iki farklı Rotman lens tasarımı yapılmıştır. İki lens için de simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen lens verileri, anten dizi faktörlerinin çizdirilmesinde kullanılmıştır. Elde edilen anten dizi faktörü grafikleri kıyaslanmıştır.

Rotman lens ile kullanılmak üzere X bantta çalışan üç farklı dizi anten tasarımı yapılmıştır. Farklı tür antenlerle birlikte lens performansını değerlendirebilmek adına, dizi anten, seri beslemeli Chebyshev dizi anten ve lotus dizi anten tasarımları yapılmıştır. Tasarlanan antenlerin lens bağlantısı yapılarak, anten ve lens sistemi performansı değerlendirilmiştir. Ölçülen ve simülasyonu yapılan verilerin tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Keywords: Rotman lens, analog hüzme şekillendirici, dizi anten, seri beslemeli Chebyshev dizi anten, lotus dizi anten, hüzme şekillendirme, X bant, gerçek zaman gecikmesi

ABSTRACT

ARRAY ANTENNA AND ROTMAN LENS DESIGN FOR MULTI-BEAM SCANNING IN RADAR APPLICATIONS

Yasemin ESTEKİN

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Birsen SAKA TANATAR

February 2024, 157 pages

In this thesis, Rotman lens, which is an analog beamforming technique capable of directing and forming the array antenna beam at different times or simultaneously, has been designed. The lens, sequentially excited by the seven beam ports, can direct the beam in the elevation axis to -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° , and 41° . When the beam ports of the lens are fed simultaneously, the lens has the ability to simultaneously form beams at -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° , and 41° for the array antenna connected to it. Since the Rotman lens operates based on the true time delay principle, the operating frequency band of the lens is considered infinite under ideal conditions. However, the existence of an operating frequency band for the array antenna connected to the lens limits the frequency band in which the lens and antenna system can be efficiently utilized. The distance between array antenna elements is a parameter used in both the array antenna and lens design, and it is the main factor limiting the frequency band in which the system can be efficiently used.

Within the scope of the study, two different Rotman lens designs have been developed. The lens data obtained from simulation and measurement results for both lenses have been utilized in plotting antenna array factors. The obtained antenna array factor graphs have

been compared.

Three different array antenna designs operating in the X-band were developed for use with a Rotman lens. To evaluate the lens performance with different types of antennas, array, series-fed Chebyshev array, and lotus array antenna designs were created. The designed antennas were connected to the lens, and the performance of the antenna and lens system was evaluated. It was observed that the measured and simulated data were consistent.

Keywords: Rotman lens, analog beamforming, antenna array, series-fed Chebyshev antenna array, lotus antenna array, beamforming, X band, true time delay

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının başından itibaren sabırlı ve anlayışlı bir şekilde beni destekleyen ve yönlendiren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR'a çok teşekkür ederim.

Tez jürisinde yer alıp kıymetli görüşleriyle katkıda bulunan değerli jüri üyeleri Prof. Dr. Erdem YAZGAN'a, Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN'e, Prof. Dr. Çiğdem SEÇKİN GÜREL'e ve Prof. Dr. Cenk TOKER'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca malzeme temini, simülasyon, üretim ve ölçüm altyapısı desteği sağlayan şirketim Meteksan Savunma Sanayii A.Ş.'ye teşekkür ederim. Bu tezin yazılmasında katkıları olan Alper ÜNAL'a, Mustafa Engin ESTEKİN'e, Yiğitcan KABA'ya, Denizhan KOLCU'ya, Mücahit ŞİMŞEK'e çok teşekkür ederim.

Bu meşakkatli ve fedakarlık gerektiren süreçte bana olan destekleri için aileme; Nuran YENİ'ye, Mustafa Engin ESTEKİN'e ve Zeynep GÜNEY'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar	x
ŞEKİLLER	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xx
SÖZLÜK.....	xxii
1. GİRİŞ	1
2. HÜZME ŞEKİLLENDİRİCİLER.....	4
2.1. Analog Hüzme Şekillendirme.....	5
2.1.1. Butler Matris	7
2.1.2. Blass Matris	7
2.1.3. Nolen Matris	8
2.1.4. Rotman Lens	9
2.2. Sayısal Hüzme Şekillendirme	11
2.3. Hibrit Hüzme Şekillendirme	12
3. ROTMAN LENS TEORİSİ	13
3.1. Lens Tasarım Yaklaşımları	13
3.1.1. Ruze'un Tasarımı (1950)	13
3.1.2. Rotman'ın Tasarımı (1963)	16
3.1.3. Archer'ın Tasarımı (1973)	20
3.1.4. Shelton'ın Tasarımı (1978)	22
3.1.5. Maybell'in Tasarımı (1981)	24
3.1.6. Katagi'nin Tasarımı (1984)	24
3.1.7. Musa ve Smith'nin Tasarımı (1986-1989)	25
3.1.8. Gagnon'un Tasarımı (1989)	27

3.1.9. Hansen'ın Tasarımı (1991)	28
3.1.10. Singhal, Gupta ve Sharma'nın Tasarımı (1998)	29
4. ROTMAN LENS TASARIMI	31
4.1. Rotman Lens Tasarım Eşitlikleri	31
4.2. Optik Sapma	33
4.3. Eşitliklerin MATLAB Üzerinden Çözümü	35
4.4. Tasarım Parametreleri Üzerine Parametrik MATLAB Çalışması	35
4.4.1. Odak Açısının Lens Üzerindeki Geometrik Etkisi	36
4.4.2. Odak Oranı g 'nin Lens Üzerindeki Geometrik Etkisi	36
4.4.3. Dizi Elemanları Arasındaki Mesafenin Lens Üzerindeki Etkisi	38
4.4.4. Dielektrik Taban Malzemenin Lens Üzerindeki Etkisi	41
4.4.5. Değişen Tarama ve Odak Açısının Lens Üzerindeki Etkisi	43
4.4.6. Odak Mesafesinin Lens Üzerindeki Etkisi	45
4.5. Rotman Lens Uygulaması	46
4.5.1. Sistem Gereklilikleri	46
4.5.2. Tasarım Parametrelerinin Seçimi	47
4.5.3. Lens Portlarının Tasarımı	49
4.5.4. Yan Duvar Tasarımı	50
4.5.5. Lens Tasarımı	52
4.5.6. Lens Üzerinde Port Numaralandırması ve Boyutlar	54
4.5.7. Lens1 Tasarımında Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Genlik Dağılımı	54
4.5.8. Lens2 Tasarımında Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Genlik Dağılımı	56
4.5.9. Lens1 Tasarımında Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Faz Dağılımı	58
4.5.10. Lens2 Tasarımı için Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Faz Dağılımı	61
4.5.11. Anten Dizi Faktörü ve Hesaplanması	62
5. ANTEN DİZİSİ TASARIMLARI	72

5.1. Dizi Anten Tasarımı	72
5.1.1. Yansıma Katsayısı Sonucu	73
5.1.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri	74
5.2. Seri Beslemeli Chebyshev Dizi Anten Tasarımı	77
5.2.1. Yansıma Katsayısı Sonucu.....	78
5.2.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri	79
5.3. Lotus Dizi Anten Tasarımı	82
5.3.1. Yansıma Katsayısı Sonucu.....	82
5.3.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri	83
6. ROTMAN LENS İLE DİZİ ANTENLERİN BİRLEŞTİRİLMESİ	92
6.1. Rotman Lens ve Dizi Antenin Birleştirilmesi	92
6.1.1. Geri Dönüş Kaybı Sonucu	93
6.1.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri	93
6.2. Rotman Lens ve Seri Beslemeli Chebyshev Dizi Antenin Birleştirilmesi	97
6.2.1. Yansıma ve İletim Katsayısı Sonucu	97
6.2.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri	98
6.3. Rotman Lens ve Lotus Dizi Antenin Birleştirilmesi	101
6.3.1. Yansıma ve İletim Katsayısı Sonucu	102
6.3.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (8 GHz)	103
6.3.3. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (9 GHz)	105
6.3.4. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (10 GHz)	106
6.3.5. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (11 GHz)	109
6.3.6. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (12 GHz)	110
7. ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI	113
7.1. Üretim Süreci	113
7.2. Network Analizör Üzerinden Lens Ölçümü ve Verilerin İşlenmesi	114
7.2.1. Lens1 Dizi Portlarında Elde Edilen Genlik Değeri.....	115
7.2.2. Lens1 Dizi Portlarında Elde Edilen Faz Değeri	118
7.2.3. Lens1'e Ait Dizi Faktörlerin Çizdirilmesi	119
7.2.4. Lens2'ye Ait Dizi Faktörlerin Çizdirilmesi	123

7.3. Lens1 ile Birleştirilen Dizi Antenler ve Yankısız Oda Uzak Alan Ölçüm	
Sonuçları	126
7.3.1. Dizi Anten Yankısız Oda Ölçüm Sonucu	131
7.3.2. Seri Beslemeli Chebyshev Dizi Anten Yankısız Oda Ölçüm Sonucu	133
7.3.3. Lotus Dizi Anten Yankısız Oda Ölçüm Sonucu	135
8. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI.....	147
9. KAYNAKLAR	150
EKLER.....	154
ÖZGEÇMİŞ	157

TABLULAR

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1 Dizi Anten Elemanları Arasındaki Mesafeye Bağlı, Ara Port Hata ve Optimum g Değeri	39
Tablo 4.2 Dielektrik Taban Malzemeye Bağlı, Ara Port Hata ve Optimum g Değeri	42
Tablo 4.3 Odak ve en yüksek tarama açısının hata değeri ve optimum g değerine etkisi	44
Tablo 4.4 Farklı frekans bileşenleri için dizi anten hüzmelerini yönlendirecek, komşu dizi anten elemanları arasındaki gerekli faz farkı	59
Tablo 4.5 Lens1 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği açı değeri	68
Tablo 4.6 Lens2 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği açı değeri	69
Tablo 4.7 Lens1 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği	70
Tablo 4.8 Lens2 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği	70
Tablo 4.9 Lens1 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yan lob seviyesi	71
Tablo 4.10 Lens2 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yan lob seviyesi	71
Tablo 7.1 Dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	133
Tablo 7.2 Chebyshev dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	135
Tablo 7.3 8.5 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	138
Tablo 7.4 9 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	140

Tablo 7.5	10 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	142
Tablo 7.6	11 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	144
Tablo 7.7	12 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları	146

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Analog Hüzme Şekillendirme Şeması	6
Şekil 2.2 Butler Matris	7
Şekil 2.3 Blass Matris	8
Şekil 2.4 Nolen Matris.....	9
Şekil 2.5 Rotman Lens Hüzme Şekillendirici	10
Şekil 2.6 Sayısal Hüzme Şekillendirici kullanılan alıcı iletişim kanalı	11
Şekil 3.1 Ruze'un Lens Tasarımı	14
Şekil 3.2 Rotman lens ve tasarım parametreleri.....	16
Şekil 3.3 Lens beslemeli çoklu hüzme anten dizisi ve oluşturduğu dalga kılavuzu	20
Şekil 3.4 Shelton'ın simetrik lens konfigürasyonu	23
Şekil 3.5 Shelton'ın yansıtıcı yüzeyli simetrik lens konfigürasyonu	23
Şekil 3.6 Dizi portu ve iletim hattı arasındaki doğrusal empedans geçişi.....	27
Şekil 4.1 Rotman lens ve tasarım parametreleri.....	32
Şekil 4.2 Optik sapma denklemi için kullanılan lens konfigürasyonu	34
Şekil 4.3 Odak açısı α 'nın lens üzerindeki geometrik etkisi($\beta = 40^\circ, G = 4\lambda$)	36
Şekil 4.4 Odak oranı g 'nin lens üzerindeki geometrik etkisi($\beta = 40^\circ$)	37
Şekil 4.5 Ara portun g 'ye bağlı hata değeri	38
Şekil 4.6 Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak ara port hata değeri .	40
Şekil 4.7 Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak optimum g değeri...	40
Şekil 4.8 Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak lens kontürü.....	41
Şekil 4.9 Taban malzeme dielektrik sabitine bağlı optimum g değişimi	42
Şekil 4.10 Taban malzeme dielektrik sabitine bağlı ara port hata değişimi	42
Şekil 4.11 Taban malzeme dielektrik sabitine bağlı dizi ve hüzme kontürü değişimi	43
Şekil 4.12 Farklı odak (α) ve hüzme (β) açısı kombinasyonları için lens kontürleri	45
Şekil 4.13 Farklı tarama açıları için optimum g	45

Şekil 4.14 Odak mesafesine göre hata grafiği	46
Şekil 4.15 Mikroşerit hat ve port arasında doğrusal empesans geçişi	49
Şekil 4.16 Doğrusal empedans geçişinin iletim ve yansıma katsayısı grafiği	50
Şekil 4.17 Port Hizalaması	51
Şekil 4.18 Lens üzerinde yan duvarlar ve yükler	52
Şekil 4.19 Rotman Lens	53
Şekil 4.20 Rotman Lens ve Port Numaralandırması	54
Şekil 4.21 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen genlik dağılımı	56
Şekil 4.22 Lens2 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen genlik dağılımı	57
Şekil 4.23 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen faz dağılımı ...	60
Şekil 4.24 Lens2 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen faz dağılımı ...	62
Şekil 4.25 Lens1 farklı hüzmeye portlarının uyarılmasıyla simülasyon sonucunda elde edilen a) 6 GHz b) 8 GHz c) 10 GHz d) 12 GHz'deki normalize dizi faktörleri	65
Şekil 4.26 Lens2 farklı hüzmeye portlarının uyarılmasıyla simülasyon sonucunda elde edilen a) 6 GHz b) 8 GHz c) 10 GHz d) 12 GHz'deki normalize dizi faktörleri	67
Şekil 5.1 a) Dizi antenin önden görünümü, b) Dizi antenin arkadan görünümü ve port numaraları	73
Şekil 5.2 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) tüm hüzmeye portları uyarıldığında lens çıktıları ile beslenen dizi antenin yansıma katsayıları (dB)	74
Şekil 5.3 Dizi antenin Lens1 hüzmeye portu çıktılarıyla uyarılması sonucunda yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	75

Şekil 5.4	Dizi antenin Lens2 hüzme portu çıktılarıyla uyarılması sonucunda yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışırma örüntüsü	76
Şekil 5.5	Dizi antenin Lens1 ve Lens2'nin tüm hüzme portları aynı anda uyarıldığında elde edilen çıktılarla uyarılması sonucunda yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışırma örüntüsü ..	76
Şekil 5.6	a) Seri Beslemeli Chebyshev dizi antenin önden görünümü, b) Seri Beslemeli Chebyshev dizi antenin arkadan görünümü ve port numaraları	78
Şekil 5.7	Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) tüm hüzme portları uyarıldığında lens çıktıları ile beslenen seri beslemeli Chebyshev dizi antenin yansıma katsayıları (dB)	79
Şekil 5.8	Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin Lens1 çıktıları için tüm portlar ayrı ayrı beslendiğindeki yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışırma örüntüsü.....	80
Şekil 5.9	Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin Lens2 çıktıları için tüm portlar ayrı ayrı beslendiğindeki yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışırma örüntüsü.....	81
Şekil 5.10	Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin Lens1 ve Lens2 çıktıları için tüm portlar aynı anda beslendiğindeki yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışırma örüntüsü	81
Şekil 5.11	a) Lotus dizi antenin önden görünümü, b) Lotus dizi antenin yandan görünümü, c) Lotus dizi antenin arkadan görünümü ve port numaraları .	82
Şekil 5.12	Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) tüm hüzme portları uyarıldığında 10 GHz'deki lens çıktıları ile beslenen lotus dizi antenin yansıma katsayıları (dB)	83
Şekil 5.13	Lotus dizi antenin 8 GHz'de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışırma örüntüsü.....	86

Şekil 5.14 Lotus dizi antenin 8 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	86
Şekil 5.15 Lotus dizi antenin 9 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	87
Şekil 5.16 Lotus dizi antenin 9 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	87
Şekil 5.17 Lotus dizi antenin 10 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	88
Şekil 5.18 Lotus dizi antenin 10 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	88
Şekil 5.19 Lotus dizi antenin 10 GHz’de tüm Lens1 ve Lens2 hüzme portlarının aynı anda uyarılması sonucunda elde edilen çıktılarla uyarılmasıyla elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	89
Şekil 5.20 Lotus dizi antenin 11 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	89
Şekil 5.21 Lotus dizi antenin 11 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	90
Şekil 5.22 Lotus dizi antenin 12 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	90
Şekil 5.23 Lotus dizi antenin 12 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü.....	91

Şekil 6.1	Dizi anten ile birleştirilen Lens1'in önden ve arkadan gösterimi	92
Şekil 6.2	Dizi anten ile birleştirilen Lens2'nin önden ve arkadan gösterimi	92
Şekil 6.3	a) Lens1'in b) Lens2'nin dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen yansıma katsayısı (dB)	93
Şekil 6.4	Lens1'in a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) tüm hüzmeye portları beslendiğinde dizi antene ait 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüleri	95
Şekil 6.5	Lens1'in dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış Kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü..	96
Şekil 6.6	Lens2'nin dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış Kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü..	96
Şekil 6.7	Seri Beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilen Lens1'in önden ve arkadan gösterimi	97
Şekil 6.8	Seri Beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilen Lens2'nin önden ve arkadan gösterimi	97
Şekil 6.9	a) Lens1'in b) Lens2'nin seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen yansıma katsayısı (dB)	98
Şekil 6.10	Lens1'in a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) tüm hüzmeye portları beslendiğinde seri beslemeli Chebyshev dizi antene ait 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüleri	100
Şekil 6.11	Lens1'in seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış Kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	101
Şekil 6.12	Lens2'nin seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış Kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	101
Şekil 6.13	a) Lens1'in önden görünümü b) Lotus dizi antenin pin vasıtasıyla Lens1'e bağlantısı c) Lens1'in lotus dizisi ile sol arka yukarıdan görünümü	102

Şekil 6.14 a) Lens2'nin önden görünümü b) Lotus dizi antenin pin vasıtasıyla Lens2'ye bağlantısı c) Lens2'nin lotus dizisi ile sol arka yukarıdan görünümü	102
Şekil 6.15 a) Lens1'in b) Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen yansımaya katsayısı (dB)	103
Şekil 6.16 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 8 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	104
Şekil 6.17 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 8 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	104
Şekil 6.18 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 9 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	105
Şekil 6.19 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 9 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	106
Şekil 6.20 Lens1'in a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) tüm hüzmeye portları beslendiğinde lotus dizi antene ait 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüleri .	108
Şekil 6.21 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	108
Şekil 6.22 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	109
Şekil 6.23 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 11 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	110

Şekil 6.24	Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 11 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	110
Şekil 6.25	Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 12 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	111
Şekil 6.26	Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 12 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü	112
Şekil 7.1	Üretilen Lens1'in önden görünümü	114
Şekil 7.2	Üretilen Lens2'nin önden ve Network Analizör ile görünümü	114
Şekil 7.3	Lens1 çıkışında a) 1. c) 2. e) 3. g) 4. i) 5. k) 6. m) 7. hüzme portundan 6 ve 8 GHz'de, b) 1. d) 2. f) 3. h) 4. j) 5. l) 6. n) 7. hüzme portundan 10 ve 12 GHz'de elde edilen genlik değerleri	117
Şekil 7.4	a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. hüzme portunun uyarılmasıyla Lens1 çıkışında elde edilen faz değerleri	119
Şekil 7.5	6 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü	120
Şekil 7.6	8 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü	121
Şekil 7.7	9 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü	121
Şekil 7.8	10 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü	122
Şekil 7.9	11 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü	122
Şekil 7.10	12 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü	123
Şekil 7.11	6 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü	124
Şekil 7.12	8 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü	124
Şekil 7.13	9 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü	124
Şekil 7.14	10 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü	125
Şekil 7.15	11 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü	125
Şekil 7.16	12 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü	125
Şekil 7.17	Lens1'in önden görünümü	126

Şekil 7.18	Lens1 ile birleştirilen a) Dizi anten b) Chebyshev dizi anten c) Lotus dizi antenin yan üstten d) Lotus dizi antenin üstten gösterimi	128
Şekil 7.19	Yankısız oda ölçümünde dizi anten gösterimi	129
Şekil 7.20	Yankısız oda ölçümünde chebyshev dizi anten gösterimi	129
Şekil 7.21	Yankısız oda ölçümünde lotus anten gösterimi	130
Şekil 7.22	Yankısız oda ölçümünde kullanılan aparat	130
Şekil 7.23	Lens1'in dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	132
Şekil 7.24	Lens1'in Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	135
Şekil 7.25	Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 8.5 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	137
Şekil 7.26	Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 9 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	139
Şekil 7.27	Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	142
Şekil 7.28	Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 11 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	144
Şekil 7.29	Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 12 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışırma örüntüleri	146

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ADC	Analog to Digital Converter
AHŞ	Analog Hüzme Şekillendirme
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ÇFB	Çalışma Frekans Bandı
DAC	Digital to Analog Converter
DDC	Digital Down Converter
DFT	Discrete Fourier Transform
FFT	Fast Fourier Transform
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GZG	Gerçek Zaman Gecikmesi
HHŞ	Hibrit Hüzme Şekillendirme
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LPKF	Leiterplatten-Kopierfräsen
PA	Power Amplifier
PLL	Phase Locked Loop
RF	Radyo Frekans

SGO	Sinyal Gürültü Oranı
SHŞ	Sayısal Hüzme Şekillendirme
SSİ	Sayısal Sinyal İşleme
STBS	Sayısal Temel Bant Sinyali
TEM	Transverse Mod

Simgeler

k	Dalga Sayısı
ϵ_0	Boş Uzay Elektrik Geçirgenliği
μ_0	Boş Uzay Manyetik Geçirgenliği
ϵ_{eff}	Etkin Dielektrik Sabiti
λ	Dalga Boyu

SÖZLÜK

Anahtarlama	Switching
Anten Dizisi	Antenna Array
Anten Hüzmesi	Antenna Beam
Ara Frekans	Intermediate Frequency
Araya Girme Kaybı	Insertion Loss
Bağlaşım	Coupling
Converter	Dönüştürücü
Çeyrek Dalga Eşleyici	Quarter Wave Matching
Çoklu Hüzme	Multiple Beam
Dalga Sayısı	Wavenumber
Dengeli Mod	Balanced Mode
Dengesiz Mod	Unbalanced Mode
Doğrusal Empedans Geçişi	Linear Tapered Impedance
Düz Ön Yüz Lens	Straight Front Face Lens
Elektriksel Geçirgenlik Katsayısı	Permittivity
Enine Işıma Örüntüsü	Broadside Radiation Pattern
Eş yük	Matched Load
Evre Kenetleme Döngüsü	Phase Locked Loop

Faz Kaydırıcı	Phase Shifter
Frekans Bandı	Frequency Band
Hüzme Genişliği	Beamwidth
Hüzme Şaşılığı	Beam Squint
Izgara Lob	Grating Lobe
İkinci Derece Olmayan Lens	No-Second-Order Lens
Kırınım Lensi	Refracting Lens
Kuplör	Coupler
Kodlanmış Evredeş ve	Coded Base-Band
Çeyrek Dalga Eşleme Yapısı	Quarter Wave Matching Section
Çeyrek Evre Farklı	In-Phase and Quadrature
Temel Bant Sayısal Bitleri	(I/Q) Digital Bits
Manyetik Geçirgenlik Katsayısı	Permeability
Mükemmel Odak Noktası	Perfect Focal Point
Odak Boyu	Focal Length
Optik Yol Boyu	Optic Path Length
Uyumlu Yük	Matched Load
Radyo Frekans	Radio Frequency
Radyo Frekans Zinciri	Radio Frequency Chain

RF Ön Uç	RF Front End
Sayısal	Digital
Sınırlandırılmış Lens	Constrained Lens
Soğurucu	Absorber
Temel Bant	Baseband
Temel Bant Sinyali	Baseband Signal
Yan Lob	Sidelobe
Yanca Eksenı	Azimuth Axis
Toprak Katmanı	Ground Plane
Yönlü Çapraz Kuplör	Directional Cross Coupler
Yükseliş Eksenı	Elevation Axis

1. GİRİŞ

Radar ve haberleşme uygulamalarında, yüksek veri hızında düşük kayıplı ve yüksek çözünürlüklü veri alış-verişi yapabilmek kritik öneme sahiptir. Bu gerekliliklerin karşılanabilmesi için sistemdeki gücün bir anten dizisi aracılığıyla odaklanması gerekmektedir. Elektronik olarak anten dizisinin tarama yapabilmesi ve ilgili tarama açısında odaklanabilmesi için anten dizisindeki her bir anten elemanına giden akımın genlik ve fazını kontrol eden bir hüzme şekillendirici ağına ihtiyaç vardır. Hüzme şekillendiriciler; analog, dijital ve hibrit olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [1–4]. 20.yy'ın başlarında radarın icat edilmesiyle birlikte yüksek doğruluklu hedef tespiti yapabilmek için dizi anten hüzmesini yönlendirecek analog hüzme şekillendiriciler kullanılmaya başlanmıştır. Analog hüzme şekillendirici, analog olarak dizi anten elemanlarına, anten hüzmesini ilgili tarama açısına yönlendirmek için gerekli olan genlik ve faz bilgisini sağlamakla görevlidir. Bu amaçla, Butler, Blass, Nolan matrisleri kullanılmakla birlikte Rotman lens gibi lens tipi analog hüzme şekillendiriciler de kullanılmıştır [5]. Mikrodalga lens, ilk kez 1950'de Ruze'un [6]'da yaptığı çalışma sonucunda hüzme şekillendirici ağı olarak kullanılmıştır. Rotman lens, 1963 yılında Rotman ve Turner tarafından, daha önce yapılmış olan lens tipi analog hüzme şekillendiricilerin geliştirilmiş bir versiyonu olarak tasarlanmıştır [7]. Rotman ve Turner, Ruze'un lens tasarım eşitliklerindeki bazı kısıtlamaları kaldırarak lens tasarımına esneklik kazandırmışlardır [7]. Lensin, gerçek zaman gecikmesi özelliğine sahip olması, lensi hüzme şaşılığına sebep olmaması dolayısıyla diğer analog hüzme şekillendirme türlerinden ayırmıştır. 1973 yılında Archer'ın yaptığı çalışma sonucunda, Rotman'ın hava taban malzeme üzerine tasarladığı lens, havadan farklı dielektrik sabite sahip bir malzeme üzerinde tasarlanarak, daha küçük boyutlu bir lens tasarımı yapılmıştır [8]. Archer çalışmasında Rotman'dan farklı olarak, odak ve tarama açısını farklı kabul etmiş ve artan tarama açısı sonucunda artan ara port faz hatasını dizi anten elemanları arasındaki mesafeyi küçülterek azaltmıştır [8]. 1978'de Shelton, hüzme ve dizi portları, lens merkez noktasına göre hem yukarı-aşağı hem de sağ-sol simetriye sahip olan lens tasarımını yapmıştır [9]. Shelton tasarımında, Rotman'ın lens kontürleri için zorunlu tuttuğu dairesel kontür şekli yerine farklı lens kontürü şekillerinin kullanılabilceğini öngörerek tasarım sınırlarını genişletmiştir [9].

1981'de Maybell, anten ışına örüntüsündeki yan lob seviyesini yükselten, lens içi yansımalar ile dizi ve hüzmeye portları arasındaki bağlaşım etkisini incelemiştir [10]. Katagi 1984'te, dairesel hüzmeye ve dizi kontürü kullanmak yerine yeniden odaklama tekniğini kullanarak lens kontürü şekillerini, ara port hata değerlerini azaltacak şekilde değiştirmiştir [11]. Ardından Musa ve Smith 1986-1989 yılları arasında yaptıkları çalışmalarda, lens performansını, yan duvar ve port tasarımını geliştirerek iyileştirmiştir [12, 13]. Gagnon 1989'da, en az ara port hata değerini veren odak oranı değerini ve yeniden odaklama tekniğini kullanarak elde ettiği port konumlarını lens tasarımında kullanmıştır [14]. Hansen 1991'de yaptığı çalışmada, lens tasarım parametrelerinin lens dizi portlarında elde edilen genlik ve faz değerlerine etkisini incelemiştir [15]. Singhal, Gupta ve Sharma 1998'deki çalışmasında, lens parametrelerinin lens geometrisi ve yol boyu hataları üzerindeki etkilerinin iki boyutlu Elektromanyetik (EM) alan analizini, kontür integral methodu kullanılarak incelenmiştir [16].

Bu tez çalışmasında, Rotman lens ve X bantta çalışan üç farklı dizi anten tasarımı yapılmıştır. Daha sonra lens ve dizi antenler birleştirilerek bir lens sistemi kurulmuştur. Lens tasarımında yapılan tasarımsal bir hata dolayısıyla, Lens1 ve Lens2 olarak isimlendirilen ve farklı faz eşleme hattı uzunluklarına sahip olan iki Rotman lens tasarımı yapılmış ve aralarındaki performans farkı incelenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, hüzmeye şekillendiricilerin gruplandırılması ve detaylı incelemesi yapılmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümde, Rotman lensin zaman içindeki gelişimi ve teorisi kronolojik olarak incelenmiştir. Bu bölümde, lens tasarım eşitlikleri, optik yol boyu eşitliklerini sağlayacak şekilde çıkarılmıştır. Eşitlikler incelendiğinde, frekansa bağlı hiçbir değişken görülmemektedir. Bu da gerçek zaman gecikmesi özelliğinin sağlandığını göstermektedir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümde, Rotman lens tasarım eşitliklerinin detaylı incelemesi yapılarak, optik sapma kavramı tanımlanmıştır. Bu bölümde, eşitliklerin MATLAB üzerinden çözümüne değinilmiş ve MATLAB kodu daha sonra EKLER bölümünde paylaşılmıştır. Dördüncü bölümde aynı zamanda lens tasarım eşitliklerindeki lens tasarım

parametrelerinin lens üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelenen bu tasarım parametrelerine göre sistem gereklilikleri çıkarılmış ve tasarım parametreleri seçilmiştir. Lens portu ve yan duvar tasarımı yapıldıktan sonra lens tasarımı, CST Microwave Studio 2017 kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan Lens1 ve Lens2'nin hüzmeye portları uyarıldığında, dizi portlarında elde edilen genlik ve faz bilgileri 6-12 GHz arasında 2 GHz örnekleme aralığı ile çizdirilmiştir. Bu frekans aralığında anten hüzmelerini istenen tarama açısına yönlendirmek için komşu dizi anten elemanları arasındaki gerekli faz farkı hesaplanmış ve hesaplanan değerler ile CST simülasyonu sonucunda elde edilen değerler kıyaslanmıştır. CST simülasyonları sonucunda dizi portlarında elde edilen araya girme kaybı genlik ve faz değerleri, dizi faktör denkleminde yerine yazılarak, Lens1 ve Lens2'nin yedi farklı hüzmeye portu için gözlem açısına bağlı dizi faktör grafiği çizdirilmiştir.

Tez çalışmasının beşinci bölümde, lense bağlanacak dizi antenlerin CST simülasyonu sonuçları, yansımaya katsayısı ve uzak alan ışınım örüntüsüne bakılarak incelenmiştir.

Tez çalışmasının altıncı bölümünde, tasarlanan Lens1 ve Lens2 ile dizi antenler birleştirilmiş ve CST simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, yansımaya katsayısı ve uzak alan ışınım örüntüsü olarak incelenmiştir. Bu bölümde, lenssiz simülasyonu lens dizi portlarındaki genlik ve faz bilgisinin anten portlarına elden girilmesiyle yapılan dizi anten simülasyonu sonucu ile lens bağlantısı yapılan dizi anten simülasyonu sonucu karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının yedinci bölümünde, Lens1, Lens2 ve dizi antenlerin üretim süreçlerinden bahsedilmiştir. Üretilen lenslerin Network Analizör üzerinden ölçümü yapılmış ve elde edilen veriler dizi faktör denkleminde kullanılmıştır. Bu şekilde lens dizi faktörleri çizdirilmiştir. Daha sonra, üretilen antenlerin yankısız oda ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen yankısız oda ölçüm sonuçları ile CST simülasyonu sonucunda elde edilen uzak alan ışınım örüntüsü sonuçları, hüzmeye yönü, anten kazancı, yarı güç hüzmeye genişliği ve yan lob seviyesi cinsinden karşılaştırılmıştır.

2. HÜZME ŞEKİLLENDİRİCİLER

Son yıllarda kablosuz veri trafiğindeki artış, yüksek veri hızına sahip iletişim sistemlerine olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu ihtiyaç doğrultusunda, sistem için hayati önem teşkil eden yüksek veri hızı ve düşük enerji tüketimi, anten dizisi örüntüsünün odaklanması ve yönlendirilmesi gerekliliklerini beraberinde getirmiştir. Elektronik olarak anten dizisinin tarama yapabilmesi ve ilgili tarama açısında odaklanabilmesi için anten dizisindeki her bir anten elemanına giden akımın genlik ve fazını kontrol eden bir ağa ihtiyaç vardır. Bu ağ "Hüzme Şekillendirici Ağ" olarak isimlendirilir.

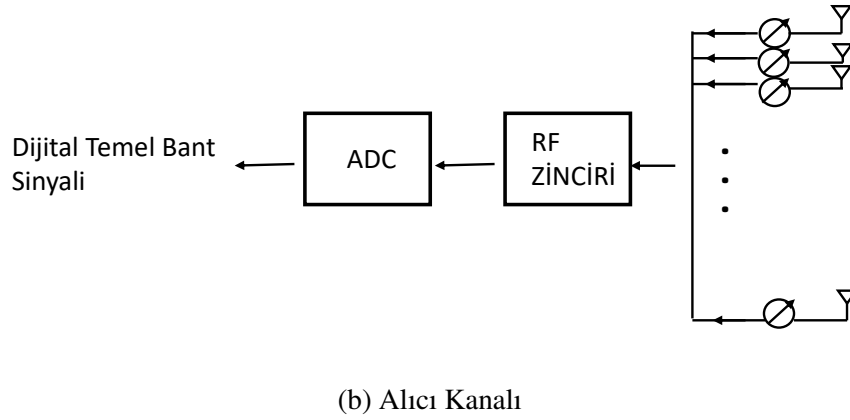
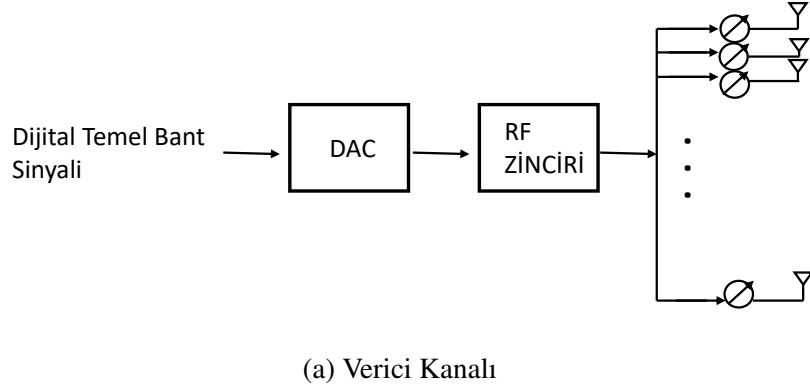
Hüzme şekillendiriciler ile birlikte kullanılan anten dizileri, yüksek boş uzay yol kaybı ve atmosferik kayıpları anten kazancındaki artış ile tolere ederek, gerekli link kapasitesini sağlamakla görevlidir. Anten dizisi hüzmesinin yönlendirilmesi sırasında sistemin yüksek veri hızı, yüksek çözünürlük, çalışma frekans bandı içerisinde homojen tarama açısı dağılımı, düşük maliyet, düşük güç tüketimi ve küçük boyut gibi gerekliliklerinin korunması gerekir. Bu gereklilikleri sağlaması ve kolay üretilebilirliği dolayısıyla çoklu hüzme anten sistemleri radar ve haberleşme uygulamalarında çokça tercih edilmektedir. Birden fazla anten hüzmesinin aynı anda sistem tarafından oluşturulması birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Anten hüzmesinin uzay koordinatlarına göre açısal dağılımının, sinyal ve girişim yönüne göre sırasıyla, yüksek ve düşük kazanç sağlayacak şekilde şekillendirilmesi, sistem Sinyal Gürültü Oranı (SGO) değerinin artmasını sağlamaktadır. Birden fazla hüzme aracılığıyla aynı frekansta sinyal iletimi ve alımı yapılarak frekansın yeniden kullanılması sistem kapasitesini arttırmaktadır. Dolayısıyla sistem performans ve kapasitesi çoklu hüzme şekillendirme teknikleriyle büyük ölçüde geliştirilmektedir.

Hüzmenin yönlendirilmesi elektronik veya mekanik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Mekanik tarama; geniş tarama açısı içerisinde anten kazancı ve örüntüsündeki bozunumu en aza indirgeyerek, elektrik motorlar yardımıyla tarama kabiliyeti sağlamaktadır. Ancak sistemin boyut ve ağırlığındaki artış, elektronik taramaya kıyasla daha yavaş dönüş hızı ve mekanik parçalardaki eskime kaynaklı arızalar, mekanik taramanın kullanım alanını kısıtlamaktadır [1–4].

Elektronik tarama; elektronik olarak genlik ve faz ayarları yapılan sinyallerin anten dizi elemanlarına iletilmesi ile tarama kabiliyeti sağlamaktadır. Elektronik tarama, mekanik taramaya kıyasla daha kompakt hacim ve daha hızlı hüzmeye tarama kapasitesine sahiptir. Elektronik taramaya dayalı hüzmeye şekillendirme teknikleri, Analog Hüzmeye Şekillendirme (AHŞ), Sayısal Hüzmeye Şekillendirme (SHŞ) ve Hibrit Hüzmeye Şekillendirme (HHŞ) olarak üçe ayrılmaktadır.

2.1. Analog Hüzmeye Şekillendirme

Analog Hüzmeye Şekillendirici, verici konumundaki bir iletişim kanalı için sırasıyla Sayısal Temel Bant Sinyali (STBS), Dijital-Analog Dönüştürücü (DAC), Radyo Frekans (RF) zinciri, faz kaydırıcı ve anten dizisinden oluşmaktadır. Alıcı iletişim kanalı için ise aynı sıralamanın tersten diziminde, DAC yerine Analog-Dijital Dönüştürücü (ADC) kullanılmaktadır. Kodlanmış evredeş ve çeyrek evre farklı temel bant sayısal bitleri, DAC kullanılarak, kanal girişinde analog sinyale dönüştürülmektedir. Analog sinyal, RF zinciri içerisinde, yüksek frekans bileşenlerini filtreleyen bir filtreden geçerek, Evre Kenetleme Döngüsü (EKD) tarafından üretilen yüksek frekanslı Local Oscillator (LO) sinyali tarafından modüle edilmektedir. Modüle edilen sinyal, Power Amplifier (PA) kullanılarak iletim için yeterli güç seviyesine yükseltilmektedir. Anten girişlerinde bulunan farklı faz kaydırıcılar, komşu anten elemanları arasında, sabit faz farkını sağlayarak, dizi anten hüzmelerinin arzu edilen açı değerine yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde analog hüzmeye şekillendirme evresi tamamlanmaktadır [3]. Şekil 2.1'de analog hüzmeye şekillendirme şeması gösterilmektedir. Faz kaydırıcıların RF Ön Uç içerisindeki konumlarına göre analog hüzmeye şekillendiriciler kendi içerisinde Analog RF Hüzmeye Şekillendirici, Analog Ara Frekans Temel Bant Hüzmeye Şekillendirici ve Analog LO Hüzmeye Şekillendirici olarak üçe ayrılmaktadır [4]. Bu gruplandırma ve detayları bu tezin kapsamının dışında olduğu için ayrıca bu grupların detaylarına değinilmeyecektir.



Şekil 2.1 Analog Hüzme Şekillendirme Şeması

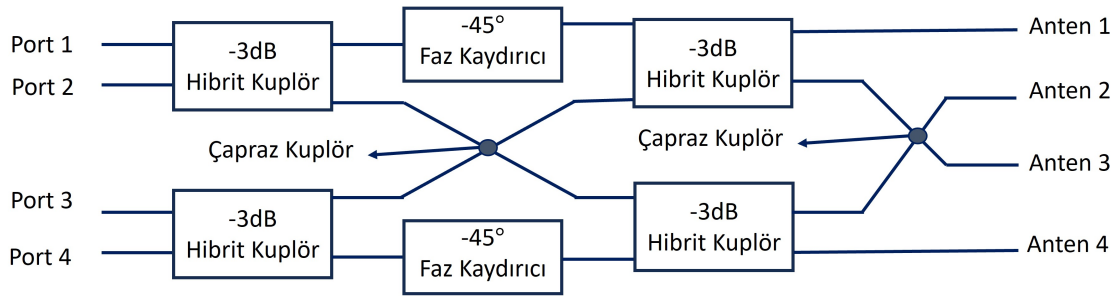
Analog hüzme şekillendiriciler, dalga sayısının frekansa bağlı olmasının bir sonucu olarak Çalışma Frekans Bandı (ÇFB) içinde dizi anten elemanlarına değişken fazlar sağlamaktadır. ÇFB içindeki istenmeyen faz değişimi, anten hüzmesini ÇFB içinde farklı açılara yönlendirmektedir. Bu etkiye "Hüzme Şaşılığı" adı verilmektedir [17]. Hüzme Şaşılığı dolayısıyla geniş çalışma frekans bandına sahip analog hüzme şekillendirici tasarlamak çeşitli zorluklara sahiptir.

Dizi anten elemanları üstünde faz dağılımı sağlamanın bir diğer yolu Butler, Blass, Nolen Matris ve Rotman lens gibi "Statik Analog Hüzme Şekillendirici" yapıları kullanmaktır. Butler, Blass ve Nolen Matris devre tipi analog hüzme şekillendirme teknikleri iken Rotman Lens, lens tipi analog hüzme şekillendirme tekniğidir [1]. Matris yapıları analog hüzme şekillendiriciler ve güç bölücü gibi faz kaydırıcı yapılar, frekansa bağlı değişen faz dağılımını

dizi anten elemanları üzerinde oluşturduğundan, bu yapıların analog hüzme şekillendirme için kullanılması, dizi antenin hüzme şaşılığına sahip olmasına neden olmaktadır. Ancak Rotman lens gibi lens tipi hüzme şekillendiriciler dizi anten hüzmesini faz gecikmesi yerine zaman gecikmesi kullanarak yönlendirdiğinden, lens tipi analog hüzme şekillendirici ile beslenen dizi anten, hüzme şaşılığına sahip değildir. Rotman lensin aynı anda birden fazla farklı yönlerde yönlendirilmiş dizi anten hüzmesini oluşturabiliyor olması da diğer analog hüzme şekillendiricilerde rastlanmayan bir özelliktir [1].

2.1.1. Butler Matris

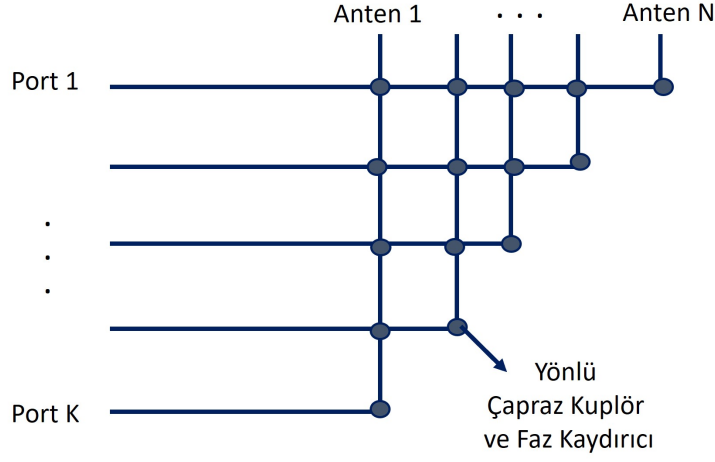
Butler matris, dört tane çeyrek dalga boyu 3dB kuplör, iki çapraz kuplör ve iki 45° faz kaydırıcının anten dizisi ile sistem girişindeki portlar arasında konumlandırılmasıyla oluşturulan analog hüzme şekillendirme tekniğidir. Farklı giriş portlarının beslenmesi, anten hüzmesinin farklı açı değerlerine yönelmesini sağlamaktadır. Butler matris, Fast Fourier Transform'un (FFT) devre tipi gerçeğemesidir [18, 19]. Bu tekniğin dezavantajı çeyrek dalga kuplörlerin özellikle düşük çalışma frekansları için yapı boyutunu arttırmasıdır [20]. Port sayısının her zaman ikinin katı olması gerekliliği uygulama alanını kısıtlamaktadır. Şekil 2.2'de Butler matris şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Butler Matris

2.1.2. Blass Matris

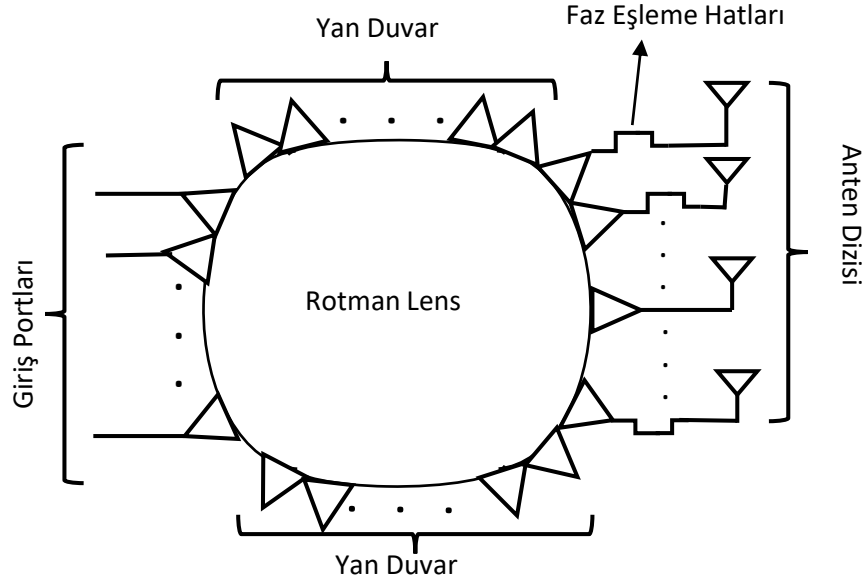
Blass Matris, yansımayı önlemek adına uyumlu yükler ile sonlandırılmış ızgara şekline benzeyen yatay ve dikey iletim hatları ile hatların kesişim noktalarında konumlandırılmış yönlü çapraz kuplörlerden oluşan analog hüzme şekillendirme tekniğidir [21]. Yatay hat



Şekil 2.4 Nolen Matris

2.1.4. Rotman Lens

Rotman lens; anahtarlama, kuplör ve faz kaydırıcı gibi aktif devre elemanlarına ihtiyaç duymadan dizi anten hüzmesini farklı açılarda, farklı veya aynı zamanlarda oluşturma yeteneğine sahip lens tabanlı bir analog hüzme şekillendirme tekniğidir. Rotman lensin aynı anda oluşturabileceği en fazla çoklu hüzme sayısı giriş portu sayısına denktir. Faz kaydırma işlevini, Gerçek Zaman Gecikmesi (GZG) kullanarak gerçekleştirdiği için frekanstan bağımsız olarak hüzme taraması yapabilmektedir. Dolayısıyla teorik olarak sonsuz çalışma frekans bant genişliğine sahiptir. Hüzme şaşılığına sahip olmaması, diğer faz gecikme tabanlı hüzme oluşturma tekniklerine göre Rotman lensi avantajlı kılmaktadır [7].



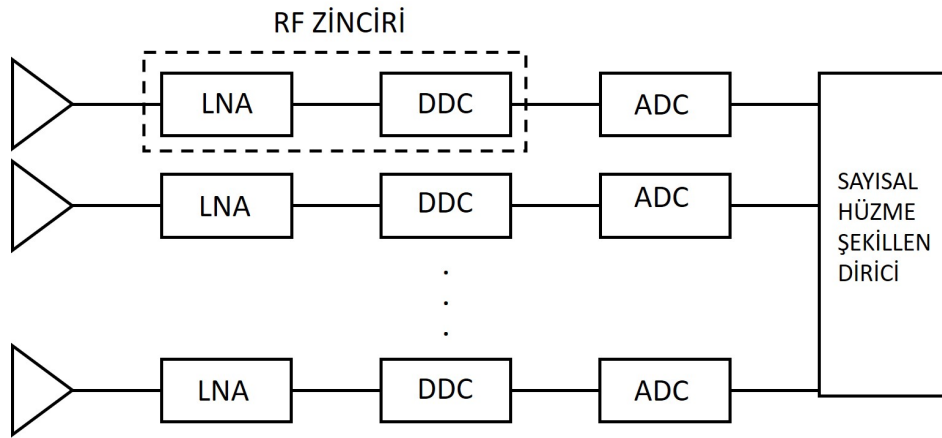
Şekil 2.5 Rotman Lens Hüzme Şekillendirici

Şekil 2.5'te basit bir Rotman lens şeması gösterilmiştir. Lens; giriş portları, yan duvarlar ve anten dizisine giden çıkış portları olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Lensin sol kontürü, hüzme kontürü ve bu kontüre bağlı portlar da hüzme portları veya giriş portları olarak isimlendirilmektedir. Lensin sağ kontürü, dizi kontürü olarak isimlendirilmektedir. Dizi kontürü, üzerindeki dizi portları veya çıkış portlarına bağlanan faz eşleme hatları aracılığı ile anten dizisine bağlanmaktadır. Lens tasarımına bağlı olarak, hüzme portlarından üçü veya dördü, lens odakları arasındaki optik yol boyu eşitsizliğini ifade eden faz hatasından arınmış seçilebilmektedir. Faz hatasından arınmış olan bu odak portları, "mükemmel odak portu" olarak isimlendirilmektedir. Teorik olarak mükemmel odak portları için faz hatası sıfırdır. Ancak mükemmel odak portları dışında kalan ara hüzme portları, faz hatasına sahiptir. Lensin sağ ve sol dış kontürünü oluşturan eğriler, mükemmel odaklar dışında kalan ara hüzme portlarının faz hatasını azaltacak ve mükemmel odaklar için hatayı sıfıra indirecek şekilde tasarlanmakta ve genellikle eliptik şekilde olmaktadır. Alt ve üst yan duvarlar, lens içindeki yansımayı önlemek adına uyumlu yükler veya soğurucu malzeme ile sonlandırılmaktadır. Lens içindeki uyarım sinyallerinin, anten dizisi elemanlarına ulaşana kadar katettikleri optik yol boyu mesafeleri arasındaki fark, zaman gecikmeli sinyallerin

anten dizisi elemanlarına ulaşarak hüzmeyi yönlendirmesiyle sonuçlanmaktadır. Rotman lens ve dizi antenden oluşan lens sistemi, hem alıcı hem de verici olarak çalışabilmektedir. 3. Bölüm tamamen Rotman lens teorisine adanmış için bu bölümde daha fazla lens teorisinin detaylarına girilmemiştir [6, 7, 11].

2.2. Sayısal Hüzme Şekillendirme

RF Ön Uç tasarımlarındaki fark, hüzme şekillendirme tekniklerini analog ve sayısal olarak ayırıştırılmaktadır [24]. Sayısal hüzme şekillendirici, her biri kendi RF zincirine bağlı dizi anten elemanlarından oluşmaktadır [25]. Dolayısıyla yapının karmaşıklık, güç tüketimi, maliyeti ve boyutu yüksektir. Bu dezavantajlara rağmen analog ve hibrit hüzme şekillendirmeye göre daha esnek genlik ve faz dağılımı sağlandığı için radar ve haberleşme uygulamalarında çokça tercih edilmektedir [26].



Şekil 2.6 Sayısal Hüzme Şekillendirici kullanılan alıcı iletişim kanalı

Şekil 2.6'de gösterildiği üzere alıcı iletişim kanalı sırasıyla anten dizisi, LNA, DDC, ADC ve sayısal hüzme şekillendiriciden oluşmaktadır. Antenin hemen arkasında, antenden gelen sinyali yükseltmek için LNA kullanılmaktadır. LNA arkasında, alınan, taşıyıcı frekans bandındaki sinyali, ara frekans bandına indirecek DDC kullanılmaktadır. Analog devrenin sonunda bulunan ADC, analog olan sinyali sayısal sinyale dönüştürmektedir. Frekans dönüşümü yapılan sinyalin yüksek frekanslı bileşenleri ADC arkasındaki filtre ile filtrelenmektedir. Sayısal hüzme şekillendiricinin bir parçası olan Sayısal Sinyal İşleme (SSİ) kısmı arzu edilen sinyal örüntüsünün elde edilebilmesi için dizi anten elemanlarına iletilmesi

gereken sinyallerin genlik ve faz dağılımlarını ayarlamaktadır. ASIC veya FPGA gibi donanım SSİ tekniklerinin yanı sıra CPU/MPU gibi yazılımlar da SSİ için kullanılmaktadır [26].

2.3. Hibrit Hüzme Şekillendirme

SHŞ'nin karmaşıklık ve güç tüketimini azaltarak, AHŞ'nin performansını yükseltmek için her iki hüzme şekillendirme tekniğinin aynı sistemde kullanılmasıyla Hibrit Hüzme Şekillendirici yapı elde edilmektedir. Yapının SHŞ kısmı, temel bant sinyal işleme ile ön kodlama yaparak çoklu veri kanallarının performansını geliştirmektedir. Yapının AHŞ kısmı ise her bir anten elemanına giden sinyalin fazını kontrol etmektedir [27].

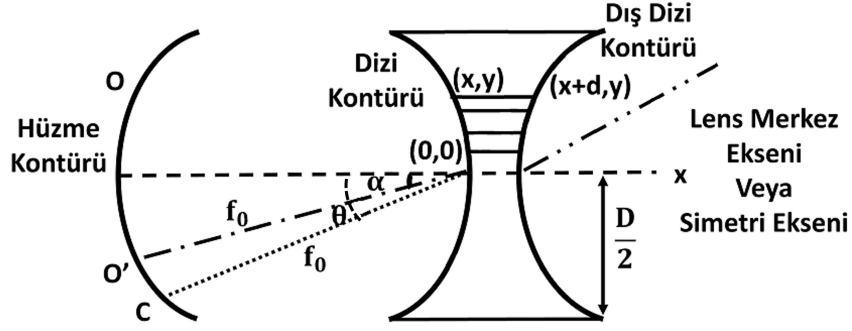
3. ROTMAN LENS TEORİSİ

Rotman lens, farklı hüzme portlarının beslenmesi sonucunda doğrusal bir anten dizisi üzerinde farklı faz dağılımları oluşturarak anten hüzmesinin farklı açılara yönlenmesini sağlayan analog hüzme şekillendirme tekniğidir. Lens hüzme portlarının aynı anda beslenmesi, beslenen hüzme portlarının oluşturduğu dizi anten hüzmelerinin eş zamanlı olarak oluşmasını sağlamaktadır [7]. W.Rotman ve R.F.Turner'ın geliştirdiği Rotman lens, anten dizisini yönlendirmek için kullanılan ve yıllar içinde farklı tasarımcılar tarafından geliştirilen lens beslemeli anten dizisi tasarımlarından sadece biridir. Bu bölümün ilk kısmında John Ruze'dan başlayarak lens beslemeli dizi anten hüzmesini şekillendirme çalışmalarının tarihsel gelişim sürecine değinilecektir.

3.1. Lens Tasarım Yaklaşımları

3.1.1. Ruze'un Tasarımı (1950)

Ruze, 1950 yılında yayınladığı çalışmasında [6], Snell yasasına uymayan ve lens içindeki dalga iletimi lens dalga kılavuzları tarafından sınırlandırılarak yönlendirilen "Sınırlandırılmış Lens (Constrained Lens)" üzerine çalışmıştır. Lens, hüzme kontürü üzerinde bulunan, giriş portları veya hüzme portları olarak adlandırılan portlara sahiptir. Şekil 3.1'de Ruze'un tasarladığı lensin basit bir görünümü verilmiştir [6]. Lensi ortasından bölen lens merkez eksenine veya simetri eksenine göre simetrik iki mükemmel odak, şekilde O ve O' ile gösterilmiştir. Mükemmel odak noktalarından orijine çizilen doğru ile lens simetri eksenine arasında kalan odak açısının radyan cinsinden karşılığı α ile temsil edilmektedir. Mükemmel odaklar dışında kalan ve faz hatasına sahip olan hüzme portu C harfi ile temsil edilmektedir. C hüzme portundan orijine çizilen doğru ile lens simetri eksenine arasında kalan açının radyan cinsinden karşılığı θ ile temsil edilmiştir. Dizi kontürü üzerindeki dizi portları temsilen (x,y) koordinatları ile gösterilmiştir. Dizi portu, d uzunluğundaki iletim hattı ile dış dizi kontürüne ve anten dizisine bağlanmaktadır. Anten dizisine ait en dıştaki iki eleman arasındaki mesafe D değişkeni ile temsil edilmektedir.



Şekil 3.1 Ruze'un Lens Tasarımı

Hüzme kontürü üzerinde faz hatasına sahip olmayan iki mükemmel odak portu (O, O') ve faz hatasına sahip ara hüzme portları (C) bulunmaktadır. Lensin ara hüzme portları uyarıldığında, dizi anten elemanları üzerine ulaşan ElektroManyetik (EM) dalganın, anten açıklığı boyunca oluşturduğu faz dağılımı, komşu anten elemanları arasında sabit faz farkını oluşturamamaktadır. İdeal dağılımdan sapan faz eğrisi, faz hatasına sahiptir. Ruze, bu faz hatasını lens açıklığı boyunca güç serisi açılımını kullanarak 1 numaralı eşitlikteki gibi temsil etmiştir [6].

$$\delta = ay + by^2 + cy^3 + dy^4 + \dots \quad (1)$$

Bu eşitlikte δ faz hatasını, y değişkeni hem dizi elemanları ile lens eksenini arasındaki düşey mesafeyi hem de lens dizi kontürü üzerindeki dizi portlarının lens eksenini ile arasındaki düşey mesafeyi temsil etmektedir. Diğer parametreler, besleme noktası ve lens parametrelerinin fonksiyonu olan katsayıları temsil etmektedir. Mükemmel odak noktaları için faz hatası sıfır olduğundan bu katsayılar sıfıra eşittir. Anten dizisine ait hüzme örüntüsünde meydana gelen bozulmaları anlamlandırabilmek için bu serinin doğası ve genlik terimlerinin değişimi incelenmiştir. Açılımdaki ilk terim, y 'ye bağlı doğrusal değişimi temsil ettiği için hüzme örüntüsünde bozulma yerine istenen yönden sapmaya neden olmaktadır. İkinci dereceden terimin sebep olduğu değişim, ara hüzme portlarının konumlarının, dizi anten açıklığı üzerinde en az hataya sahip faz dağılımını oluşturabilmek için radyal olarak hareket ettirilmesiyle hafifletilebilmektedir. Bu teknik "yeniden odaklanma" olarak isimlendirilmektedir. Yeniden odaklanma tekniği ile konumları değiştirilen ara hüzme portlarının yeni konumları üzerinden Eşitlik 1 kullanılarak tekrar

bir hata hesabı yapıldığında, hatanın büyük oranda azaldığı gözlenmektedir. Eşitlikteki kübik terim, optik yönlendirme uygulamalarında baskın bozucu hata olan "coma" hatasını temsil etmektedir. Yüksek dereceli terimlerin etkisi birleştiğinde, ciddi bir hata katkısında bulunsalar da bu hata katkısı, coma hatasından küçüktür. Dolayısıyla coma hatasının azaltılması bu yüksek dereceli terimlerin de öneminin azalması anlamına gelmektedir.

Ruze çalışmasında, farklı lens tipleri ve yeniden odaklama karakteristikleri üzerine çalışmıştır. Bu çalışma sonucunda Eşitlik 2, C ara hüzmeye portunun, dizi anten açıklığı üzerinde en az faz sapması ile faz dağılımını sağlamak için radyal olarak ne kadar hareket etmesi gerektiğini göstermektedir. Bu radyal mesafe "Yeniden Odaklanma Mesafesi" olarak isimlendirilmiştir.

$$\text{Yeniden Odaklanma Mesafesi} = \frac{\alpha^2 - \theta^2}{2} f_0 \quad (2)$$

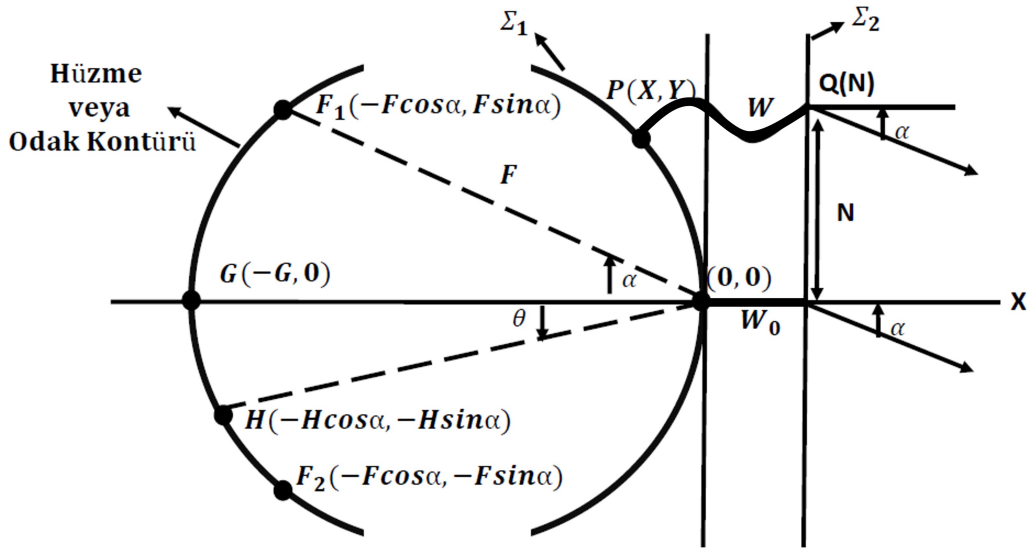
Eşitlik 2'ye göre yeniden konumlanan ara hüzmeye portlarından ve mükemmel iki odakta geçen hüzmeye kontürü kullanılarak, lensin dar dizi anten hüzmeye genişliği ile geniş açı aralığında tarama yapma kapasitesi artmaktadır. Ruze, dizi anten elemanları ile lens simetri eksenini arasındaki düşey mesafe ile hüzmeye kontürü üzerindeki mükemmel odak portlarının lens simetri eksenini ile arasındaki düşey mesafeyi eşit ve hüzmeye kontürünü dairesel kabul etmiştir. Bu gereklilikler tasarımı zorlaştırmakta ve faz hatasını azaltmaya katkı sağlamamaktadır.

Ruze'un üzerine çalıştığı lens tiplerinden biri ikinci derece olmayan lens (no-second-order lens)'tir. Bu lensin odak noktaları, lens simetri merkezine göre simetrik iki odak ve lens simetri eksenini üzerinde bir odak olmak üzere üç odak noktasından oluşmaktadır. Eksene göre simetrik olan iki mükemmel odak noktası faz hatasına sahip değildir. Eksen üzerinde bulunan odak noktası ise faz hatası açılımındaki ikinci dereceden hataya sahip değilken yüksek dereceli faz hatası terimlerine sahiptir. Dolayısıyla eksen üzerindeki odak faz hatasına sahiptir. Ruze'un üzerinde çalıştığı diğer bir lens tipi düz ön yüz lens (straight front face lens)'tir. Bu lens iki mükemmel odak ve simetri eksenini üzerinde bir yüksek faz doğruluklu odak noktasından oluşmaktadır. Ara hüzmeye portları yeniden odaklanma tekniği kullanılarak

faz hatasını en aza indirmekte ve mükemmel tarama kabiliyeti sunmaktadır. Ancak çok dar hüzmeye genişliğine sahip antenler için "coma" hatası yüksektir.

3.1.2. Rotman'ın Tasarımı (1963)

Rotman, Ruze tarafından geliştirilen üç odaklı düz ön yüz lens sisteminde Gent'in geliştirdiği lens tasarım prensibini kullanarak "coma" hatasının nasıl azaltılabileceği üzerine çalışmıştır [7, 28]. Bu yeni tasarımda, lens simetri eksenine göre simetrik iki odak ve lens simetri ekseninde bir odak olmak üzere toplam üç mükemmel odak bulunmaktadır. Rotman ve Turner çalışmalarında bu yeni lens tasarımı için eşitlikler türeterek, tasarlanan lensin faz sapması ve açısal tarama yeteneğini incelemiştir [7].



Şekil 3.2 Rotman lens ve tasarım parametreleri

Şekil 3.2 'de basit bir Rotman lens çizimi üzerinde lens parametreleri gösterilmiştir. Lens yatay eksene göre simetriktir. Lensin sol kontürü, mükemmel odaklar ile ara odakların konumlandığı hüzmeye kontürü, odak kontürü veya giriş kontürü olarak adlandırılmaktadır. Sağ kontürü (Σ_1), dizi anten elemanlarına koaksiyel kablo, mikroşerit hat veya dalga kılavuzu aracılığıyla bağlanan dizi portlarının konumlandığı dizi kontürüdür ve kontürün şekli tasarım eşitliklerinin çözümüyle elde edilmektedir. Bu iki kontür arasında kalan ve

lensin alt ve üst kontüründe bulunan kısımlar lens yan duvarlarıdır. Hüzme kontürü üzerinde $F_1(-F\cos\alpha, F\sin\alpha)$, $F_2(-F\cos\alpha, -F\sin\alpha)$ ve $G(-G, 0)$ odak noktaları bulunmaktadır. Simetrik odak noktalarının lens eksenine yaptığı açının derece cinsinden karşılığı α 'dır. Hüzme kontürü üzerinde faz hatası sıfır olan mükemmel odak portları dışında faz hatasına sahip ara portlar vardır. Ara portlar, şekilde $H(-H\cos\alpha, -H\sin\alpha)$ noktası ile temsil edilmiştir. Bu portun merkeze olan uzaklığı H, eksenle yaptığı açının derece cinsinden karşılığı θ olarak gösterilmiştir. Dizi kontürü Σ_1 üzerindeki P(X,Y) noktası Σ_1 'in merkezi olan orijine göre dizi portlarının konumlarını temsil etmektedir. Dizi portları, uzunluğu W olan iletim hattı aracılığıyla Σ_2 ile gösterilen doğru üzerindeki anten dizisi elemanlarına bağlanmaktadır. x ekseninde bulunan merkez dizi portu ile anten elemanı arasındaki hattın uzunluğu W_0 ile ifade edilmektedir. Anten elemanlarının konumları Q(N), x eksenine olan düşey mesafeleri ise tek değişken N ile temsil edilmiştir. Rotman'ın tasarımında Ruze'un varsaydığı Y=N zorunluluğu bulunmaması tasarımına esneklik sağlamıştır. Ancak odak açısı α ile anten hüzmesi yönünün enine ışına yönünden sapma açısını eşit kabul etmiştir. Dolayısıyla bu kabul tasarım esnekliğini sınırlamıştır [7].

Gent'in genel ışın ve orijinden geçen ışın arasındaki optik yol boyu eşitliğini sağlamak için türettiği eşitlikler kullanılarak Rotman Lens tasarım eşitlikleri elde edilmiştir [28]. Genel ışın; dalganın sırasıyla mükemmel odak noktası, dizi portu P(X,Y), Q(N) ve yönlendirilmiş dizi anten hüzmesine karşılık gelen dalga kılavuzu üzerine dik gelecek şekilde izlediği yolu ifade etmektedir [28]. Orijinden geçen ışın; dalganın sırasıyla mükemmel odak noktası, orijin (0,0) noktası, tek sayı anten elemanına sahip dizi anten için x ekseninde bulunan merkez anten elemanı ve yönlendirilmiş dizi anten hüzmesine karşılık gelen dalga kılavuzu üzerine dik gelecek şekilde izlediği yolu ifade etmektedir. Gent'in genel ışın ve orijinden geçen ışın için türettiği optik yol boyu eşitliği kullanılarak aşağıdaki tasarım eşitlikleri elde edilmiştir [7, 28].

$$\left| \overrightarrow{F_1P} \right| + W + N\sin\alpha = F + W_0 \quad (3)$$

$$\left| \overrightarrow{F_2P} \right| + W - N\sin\alpha = F + W_0 \quad (4)$$

$$\left| \overrightarrow{GP} \right| + W = G + W_0 \quad (5)$$

$$\left| \overrightarrow{F_1P} \right| = \sqrt{F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha - 2FY \sin \alpha} \quad (6)$$

$$\left| \overrightarrow{F_2P} \right| = \sqrt{F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha + 2FY \sin \alpha} \quad (7)$$

$$\left| \overrightarrow{GP} \right| = \sqrt{(G + X)^2 + Y^2} \quad (8)$$

Eşitlik 3, 4 ve 5 genel ışın ve orijinden geçen ışın arasındaki optik yol boyu eşitliklerini ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafı genel ışın, sağ tarafı ise orijinden geçen ışın ile ilişkilidir. Eşitlik 6,7 ve 8 sırasıyla F_1 , F_2 ve G odak noktalarından $P(X,Y)$ noktasına olan yol boylarının geometrik karşılığıdır. Eşitliklerin çözümünü kolaylaştırmak adına parametreler odak boyu F 'e göre normalize edilmiştir. Normalize edilen yeni lens parametreleri; $n = \frac{N}{F}$, $x = \frac{X}{F}$, $y = \frac{Y}{F}$, $w = \frac{W-W_0}{F}$, $g = \frac{G}{F}$, $a_0 = \cos \alpha$, $b_0 = \sin \alpha$, $h = \frac{H}{F}$ eşitlikleri ile ifade edilmiştir. Eşitlik 6,7 ve 8'in normalizasyon çalışması için aşağıdaki eşitlikler yazılmıştır.

$$\frac{\left| \overrightarrow{F_1P} \right|^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x - 2b_0y \quad (9)$$

$$\frac{\left| \overrightarrow{F_2P} \right|^2}{F^2} = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x + 2b_0y \quad (10)$$

$$\frac{\left| \overrightarrow{GP} \right|^2}{F^2} = (g + x)^2 + y^2 \quad (11)$$

Yukarıdaki 9, 10 ve 11 numaralı eşitlikler optik yol boyu eşitlikleriyle (Eşitlik 3, 4, 5) birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik seti ortaya çıkmaktadır.

$$\frac{\left| \overrightarrow{F_1P} \right|^2}{F^2} = (1 - w - b_0n)^2 = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x - 2b_0y \quad (12)$$

$$\frac{\left| \overrightarrow{F_2P} \right|^2}{F^2} = (1 - w + b_0n)^2 = 1 + x^2 + y^2 + 2a_0x + 2b_0y \quad (13)$$

$$\frac{\left| \overrightarrow{GP} \right|^2}{F^2} = (g - w)^2 = (g + x)^2 + y^2 \quad (14)$$

Tasarımcı tarafından tasarımın başında belirlenen α , g ve n değişkenlerine göre 12, 13 ve 14 numaralı eşitlikler aşağıdaki eşitlikler vasıtasıyla çözümlenerek w , y ve x bilinmeyenleri elde edilmektedir.

$$a = 1 - n^2 - \frac{(g-1)^2}{(g-a_0)^2} \quad (15)$$

$$b = 2g \frac{g-1}{g-a_0} - b_0^2 n^2 \frac{g-1}{(g-a_0)^2} + 2n^2 - 2g \quad (16)$$

$$c = \frac{gb_0^2 n^2}{g-a_0} - \frac{b_0^4 n^4}{4(g-a_0)^2} - n^2 \quad (17)$$

$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (18)$$

Eşitlik 15, 16 ve 17 hesaplandıktan sonra bulunan katsayılar Eşitlik 18’de yerine yazılmaktadır. Eşitlik 18’nin çözümü sonucunda w elde edilmektedir.

$$y = n(1-w) \quad (19)$$

$$x^2 + y^2 + 2gx = w^2 - 2gw \quad (20)$$

Elde edilen w değeri 19 eşitliğinde yerine koyularak y bilinmeyeni elde edilmektedir. Bu y değeri diğer bilinen değişkenler ile birlikte Eşitlik 20’de yerine koyulduğunda bu değişkenlerin olduğu duruma karşılık gelen x değeri elde edilmektedir. Lens, bu aşamalar katedilerek tasarlanabilir ancak bu tasarım aşamaları g değişkeninin anten açıklığı üzerinde en az faz hatasını verebilecek optimum değeri için herhangi bir çözümde bulunmamaktadır. Rotman, Ruze’un ara portlardaki faz hatasını en aza indirmek için kullandığı Eşitlik 2’de θ ’yı 0’a eşitleyerek eşitliği düzenlemiş ve Eşitlik 21’i elde etmiştir. Eşitlik 21, bilinen tasarım parametresi α değeri için en az faz hatasını verecek olan g değişkenini vermektedir [7].

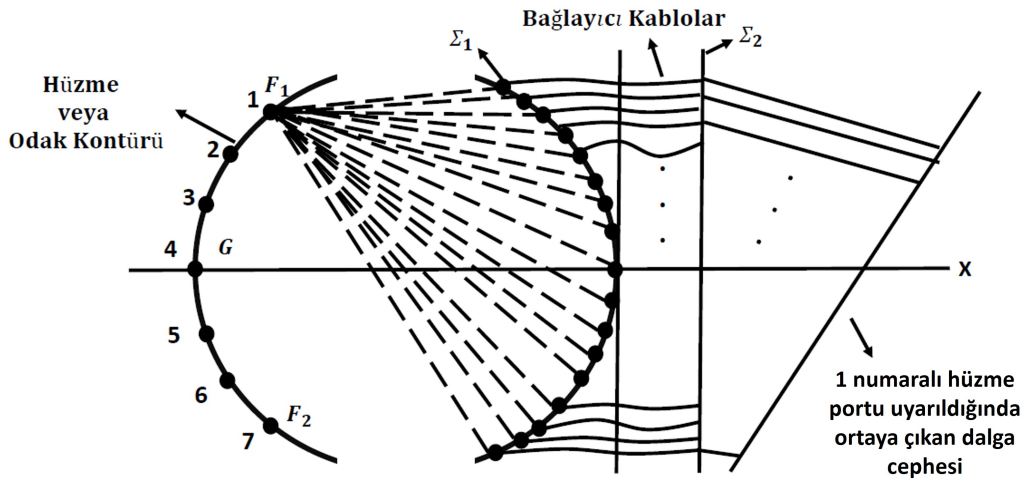
$$g = \frac{G}{F} = 1 + \frac{\alpha^2}{2} \quad (21)$$

Odak noktasının uyarılması yerine hüzmeye kontürü üzerindeki bir ara portun uyarılması sonucunda orijinden geçen ışın ile genel ışının lens boyunca paralel plaka bölgesinde ilerleyip dizi portlarına, daha sonra iletim hatları aracılığıyla anten dizi elemanları ve en son

dalga kılavuzuna dik olacak şekilde izledikleri yollar arasındaki zaman farkı beraberinde faz farkını meydana getirmektedir. Bu iki ışın farklı yolları izleyerek farklı zamanlarda dalga kılavuzuna ulaşmaktadır [7]. Normalize faz farkı, Eşitlik 22 ile ifade edilmiştir. Bu faz farkının lens ara portlarında oluşturduğu faz hatası, dizi anten elemanlarına ulaşan EM dalgaların genlik ve fazlarında bozulmalara sebep olarak, anten ışınma örüntüsünde bozulmalara yol açmaktadır.

$$\Delta l = \frac{L\Delta}{F} = \sqrt{h^2 + x^2 + y^2 + 2hx\cos\theta - 2hy\sin\theta} - h + w + n\sin\theta \quad (22)$$

Rotman, hüzme portları dairesel hüzme kontürü boyunca horn antenler tarafından uyarılan, odak açısı dizi anten hüzmesinin yönlenim açısıyla aynı olan bir lens tasarımı üzerine çalışmıştır [7].



Şekil 3.3 Lens beslemeli çoklu hüzme anten dizisi ve oluşturduğu dalga kılavuzu

Yukarıdaki görsel, tipik bir Rotman lensin görseldeki 1 numaralı mükemmel odak noktası uyarıldığında anten dizisi çıkışında oluşturduğu dalga cephesi göstermektedir.

3.1.3. Archer'ın Tasarımı (1973)

Archer çalışmasında, geniş frekans bandında çalışan bir lensi, anten dizisine bağlayarak sistem çıkışında birbirinden bağımsız, eş zamanlı çoklu anten hüzmeleri oluşturan bir sistem

tasarımı yapmıştır [8]. Anten dizisi tarafından oluşturulan bu çoklu hüzmeye grubunun her bir hüzmeye elemanı oluşturulduğu dizi antenin kazanç ve bant genişliğine sahiptir. Lens içindeki sınırlandırılmış elektriksel yollar, hüzmeye portlarının uyarılması sonucu lens içinde yayılan EM dalganın anten dizisi çıkışında oluşan dalga cephesi üzerindeki bütün noktalara eş zamanlı ulaşmasını sağlamakla görevlidir [8].

Rotman, lens tasarımını havadaki bir lens için yapmıştır [7]. Bu durum lens boyutlarını oldukça büyütme ve dolayısıyla uygulama alanını sınırlamaktadır. Archer, dielektrik sabiti havadan farklı ve büyük olan bir taban malzeme kullanarak lens tasarımı yapmış ve lens boyutlarını taban malzeme dielektrik sabitinin kareköküyle orantılı olarak küçülmüştür [8]. Ancak böyle bir dielektrik taban malzeme kullanımının, sistem çalışma frekans bant genişliğini sınırlayacağından, lens içindeki empedans uyumsuzlukları ve iç yansımaları arttırması sonucunda anten hüzmesinde yan lobları arttırarak hüzmeye örüntüsünü bozacağından bahsetmiştir [8]. Archer, mükemmel odak hüzmeye portlarından birinin uyarılması sonucunda dizi anten çıkışında oluşan dalga cephesinin lens simetri eksenine yaptığı açının odak açısına oranını "Hüzmeye Tarama Faktörü" olarak ifade etmiştir [8]. Rotman lens gibi geleneksel lens uygulamalarında hüzmeye tarama faktörü 1'e eşittir ve bu eşitlik hüzmeye yönünün en fazla tarama yapabileceği açıyı özellikle 30° üzerindeki tarama açısı gereklilikleri için sınırlamaktadır [8]. Archer, geniş çalışma frekans bant genişliği ve geniş tarama açısı kabiliyetine sahip dielektrik taban malzeme üzerinde kurgulanmış anten dizisi ve lensten oluşan bir sistem tasarımı yapmıştır [8]. Bu tasarımda kullanılacak konnektör sayısını azaltmaya çalışmıştır. Tarama açısı 35°'nin üzerine çıktığında, Rotman ve Turner'ın tasarımında faz hatası yükselmektedir [7]. Archer, tarama açısındaki faz hatasına bağlı sınırlamanın dizi anten elemanları arasındaki mesafe azaltılarak belli bir oranda kaldırılabileceğini savunmuştur. b 'nin arzu edilen hüzmeye tarama açısını, a 'nın hüzmeye portlarından herhangi birinin lens simetri eksenine yaptığı açıyı, S 'in b tarama açısını dizi anten çıkışında elde edebilmek için dalga boyu cinsinden dizi anten elemanları arasındaki mesafeyi ve S_{RT} 'nin Rotman ve Turner'ın tasarımına göre dalga boyu cinsinden dizi anten elemanları arasındaki mesafeyi temsil ettiği durumda 23 eşitliği bu parametreler arasındaki

bağlantıyı göstermektedir [8].

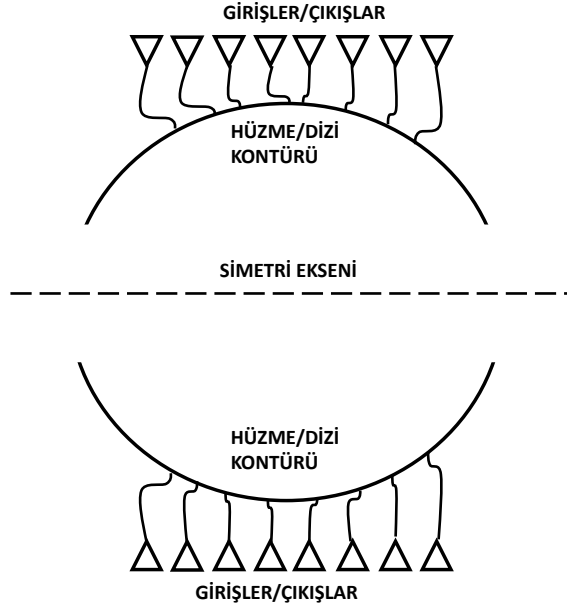
$$\frac{S_{RT}}{S} = \frac{\sin(b)}{\sin(a)} \quad (23)$$

Eşitlik 23 kullanılarak doğrusal dizi anten sistemi için dizi anten elemanları arasındaki mesafe azaltılarak sistemin faz hatası artırılmadan 90°'ye kadar tarama açısı elde edilebilmektedir. Ancak anten elemanları arasındaki mesafesinin azaltılması anten rezonant frekansı üzerindeki frekanslarda "grating lobe" oluşmasına neden olmaktadır [8].

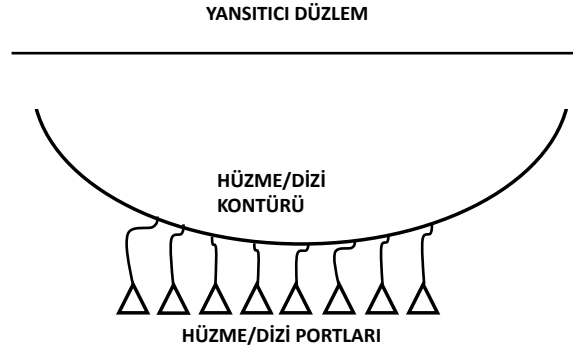
Dizi anten elemanlarının, lensin dizi portlarına empedans uyumlu olarak bağlanabilmeleri için lens paralel plaka bölgesi ile 50 Ω'luk iletim hatları arasında kademeli empedans geçişine ihtiyaç vardır. Bu geçiş için frekansa bağlı değişim gösteren empedans dönüştürücü elemanlar kullanılırsa lensin geniş çalışma frekans bandı sınırlandırılmış olmaktadır. Bu yüzden frekansa bağlı uyumlama birimleri kullanmak yerine hatlar arasındaki geçiş en iyi sonucu elde edecek şekilde kademeli empedans geçişi ile tasarlanabilmektedir [8].

3.1.4. Shelton'ın Tasarımı (1978)

Shelton, Rotman'ın tasarımındaki dairesel hüzme kontürü konseptinin tasarımı sınırladığı ve gerekli olmadığını savunmuştur. Lens simetri eksenine göre simetrik hüzme ve dizi kontürlerinden oluşan bir lens tasarımı üzerine çalışmıştır. Bu tasarımda dizi ve hüzme kontürlerine ek olarak kontürler üzerindeki port konumları da aynıdır. Dolayısıyla kontürler, üzerlerindeki port konumları dahil olmak üzere iki kontürün orta noktasından geçen simetri eksenine göre tamamen simetriktir. Ayrıca portları 50Ω'luk iletim hatlarına bağlayan kademeli geçiş bölgesi ve iletim hatları da simetri eksenine göre tamamen simetriktir. Böylece lens hem sağ-sol hem de yukarı-aşağı simetriye sahiptir. Dolayısıyla bu konfigürasyonda hüzme ve dizi portları yer değiştirmeli olarak kullanılabilir [9]. Şekil 3.4'te Shelton'ın simetrik lens konfigürasyonu gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Shelton'ın simetrik lens konfigürasyonu



Şekil 3.5 Shelton'ın yansıtıcı yüzeyli simetrik lens konfigürasyonu

Shelton, bu tasarıma eklenen Şekil 3.5'teki yansıtıcı düzlemlerle tek lens kontürü ve bu kontür üzerindeki hüzmeye/dizi portlarını hem hüzmeye hem de dizi tarafı için kullanabileceğini göstermiştir [9]. Bu tasarımın sistem performansı incelendiğinde asimetrik bir lense

oranla daha iyi faz sapması karakteristiği ve daha küçük boyuta sahip olduğu görülmüştür. Shelton'ın tasarımı hüzmeye ve dizi portu sayılarının eşit veya yakın olduğu durumlar için kullanışlıdır. Ancak tasarım eşitlikleri ve çözümleri Rotman'ın tasarımından daha karmaşıktır [9].

3.1.5. Maybell'in Tasarımı (1981)

Rotman lense bağlı anten dizisine ait hüzmeye örüntüsünde yan lob seviyesinin düşürülmesi için hüzmeye ve dizi portları arasındaki karşılıklı bağlaşımın incelenmesi gerekmektedir. Lens içindeki iç yansımalar ve portlar arasındaki bağlaşım dizi anten elemanları üzerindeki genlik ve faz dağılımını etkilemektedir [10]. Lens kontürü üzerinde bulunan hüzmeye ve dizi portları 50 Ω 'luk iletim hattına kademeli empedans geçişi ile bağlanmaktadır. Bu geçiş sırasında mikroşerit hat üzerindeki EM alan modu, lens birleşim noktasında ani bir şekilde Transverse Mod (TEM) ile değişmektedir. Maybell çalışmasında, bağlaşım katsayısını, port genişliği ve port açısına bağlı olarak formülize etmiştir [10]. Hava taban malzemeli bir lens tasarımı yaparak lens üzerinde ölçülen port S parametrelerinden aktif yansıma katsayılarını hesaplamış ve yayın yapılan portun ışımaya örüntüsünü incelemiştir [10].

3.1.6. Katagi'nin Tasarımı (1984)

Katagi, Rotman'ın geliştirdiği lens tasarım denklemlerine yeni bir değişken ekleyerek doğrusal anten dizisi boyunca meydana gelen faz hatasını azaltmaya çalışmıştır. Dielektrik sabiti birden farklı ve büyük taban malzeme kullanımı ve odak açısı ile hüzmeye açısının farklı değerlere sahip olabileceği bakış açısını Snell yasasını kullanarak ifade etmiş ve Rotman'ın lens tasarım eşitliklerini geliştirmiştir [11]. β 'nin Şekil 3.2'deki F_1 odağının uyarılması sonucunda elde edilen hüzmeye yönünü, ϵ_r 'nin lens taban malzemesine ait dielektrik sabitini, N 'nin doğrusal anten dizisindeki anten elemanlarının lens eksenine düşey uzaklığını, N_{max} 'in doğrusal anten dizisindeki en dıştaki dizi anten elemanının lens eksenine düşey uzaklığını, α 'nın odak açısını, G 'nin simetri eksenini üzerindeki mükemmel odak noktasının orijine olan uzaklığını, (X,Y) 'nin dizi kontürü üzerindeki dizi portlarına ait noktaların koordinatlarını, W 'nin simetri merkezinde bulunan dizi portu dışında kalan dizi portlarını,

dizi anten elemanlarına bağlayan iletim hatlarının uzunluğunu, W_0 'nun simetri merkezinde bulunan dizi portunu merkez anten elemanına bağlayan iletim hattının uzunluğunu, k 'nin dalga sayısını temsil ettiği durumda Katagi'nin eklediği yeni değişken \bar{n} 'dir. \bar{n} 'nin açılımı Eşitlik 24 ile aşağıda verilmiştir. Katagi'nin değişkenleri; $g = \frac{G}{F}$, $x = \frac{X}{N_{max}}$, $y = \frac{Y}{N_{max}}$, $f = \frac{F}{N_{max}}$, $n = \frac{N}{N_{max}}$, $w = \frac{W-W_0}{N_{max}k} \frac{1}{f}$, $x = \frac{X}{N_{max}}$, $a_0 = \cos\alpha$, $b_0 = \sin\alpha$, $b_1 = \sin\beta$ 'dir. Katagi, Eşitlik 25'teki Snell yasasını kullanarak Rotman'ın lens tasarım eşitliklerini geliştirmiştir.

$$\bar{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \frac{n}{f} \quad (24)$$

$$\sqrt{\epsilon_r} \sin\alpha = \sqrt{1} \sin\beta \quad (25)$$

Rotman'ın varsaydığı dairesel hüzme kontürü kullanmak yerine ara hüzme portlarında faz hatasını azaltacak yeniden odaklanma tekniğini kullanarak bu kısıttan uzaklaşmıştır. Yine Rotman'ın varsaydığı hüzme açısı ile odak açısının eşit olma koşulunun iyi lens performansı için gerekli olmadığını savunmuş, bu doğrultuda tasarım eşitliklerini geliştirmiştir [11].

3.1.7. Musa ve Smith'nin Tasarımı (1986-1989)

Musa ve Smith'in çalışmaları daha çok lens performansını iyileştirmeye yönelik olmuştur. Çalışmalarında yan duvarlar ve port hizalaması üzerine çalışmışlardır [12]-[13].

Rotman ve Ruze lensin genlik performansı, iki boyutlu açıklık anten teorisi kullanılarak incelenebilmektedir. Anten dizisi açıklığı üzerinde daha simetrik bir genlik ve faz dağılımı elde edebilmek için lens kontürleri üzerindeki mikroşerit dizi portları, lens eğrisini takip ederek karşı kontürün merkez noktasına bakacak şekilde hizalanmaktadır [12].

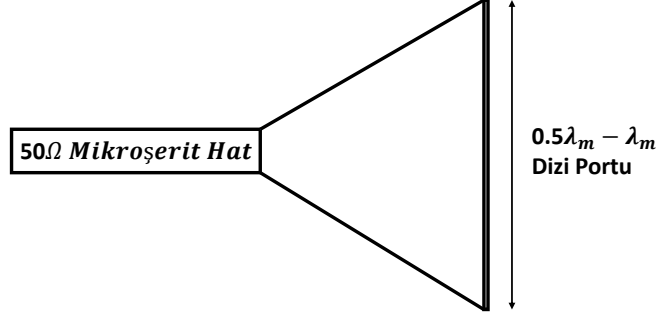
Lens dizi kontürünü dizi anten elemanlarına bağlayan iletim hatlarının boyları Ruze lens için eşittir [6]. Dolayısıyla Ruze lens sadece iki odağa sahiptir. Ancak iletim hatlarının boyları Rotman lenste eşit değildir. Dolayısıyla Rotman Lens, üç mükemmel odak portu arasında kalan ara hüzme portlarındaki faz hatasını azaltacak şekilde tasarlanabilmektedir [7].

Mikroşerit lens tasarımında, tasarımın verimliliğini düşüren iki ana etken vardır. Bunlar yan

duvar yansımaları ve portların hizalanmasıdır [13]. Lens yan duvarlarından meydana gelecek yansımalar lens performansını ciddi ölçüde düşürmektedir. Yan duvarlardan kaynaklanan yansımaları önlemek için yan duvarlar boyunca mikrodalga soğurucu malzemeler, çeyrek dalga eşleme yapıları veya yan duvarlar boyunca 50 Ω'luk yüklerle sonlandırılmış portlar kullanılmaktadır [13]. Mikrodalga soğurucu malzeme kullanımı, lens taban malzemesinin dielektrik sabiti 2-3 gibi küçük değerlere sahip olduğunda havadan yayılımı kesmek için kullanışlı olmaktadır. Ancak pahalı ve bulunması zordur. Yan duvar portlarının 50 Ω'luk yüklerle sonlandırılması ise yan duvarlar kaynaklı iç yansımayı, duvar üzerine gelen dalganın sadece dar bir açı aralığı için kesmektedir [13]. Yan duvar üzerine gelen dalganın kritik açısı Eşitlik 26'da ifade edilmiştir. EM dalganın geliş açısı bu kritik açıdan yüksek olduğunda dalga, yansıtıcı yüzey tarafından tamamen yansıtılmaktadır [12].

$$\sin\theta_c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (26)$$

Eşitlik 26 kullanılarak dielektrik sabiti 2.55 olan bir taban malzeme için kritik açı 38.77° olarak hesaplanır. Dolayısıyla yan duvarlar üzerine gelen EM dalganın verimli sönümlenme açı aralığı 2.55 dielektrik sabite sahip bir taban malzeme için ±38.77°'dir. Lens performansını geliştirmek için yan duvarlardan meydana gelen yansımalara ek olarak hüzmeye ve dizi portlarının açısal hizalanması da önemlidir. Musa ve Smith'in [13]'teki çalışmasında dizi portları ile dizi anten elemanları arasındaki iletim hatları arasındaki optimum geçişin 0.5 $\lambda_m - \lambda_m$ genişliğindeki dizi portlarından 50 Ω'luk iletim hatlarına kademeli empedans geçişi olduğu gösterilmiştir [12]-[13].



Şekil 3.6 Dizi portu ve iletim hattı arasındaki doğrusal empedans geçişi

Şekil 3.6'da 50 Ω 'luk iletim hattı ve dizi portu arasındaki doğrusal empedans geçişi gösterilmiştir.

3.1.8. Gagnon'un Tasarımı (1989)

Gagnon, dielektrik taban malzeme üzerinde ve hüzmeye portu konumları, Eşitlik 25'teki Snell yasasına göre belirlenen bir lens tasarımı yapmıştır [14]. Bu tasarımda Rotman'ın lens tasarım eşitliklerinin dielektrik taban malzeme ve Snell yasası kullanılarak geliştirilmiş hali kullanılmıştır. Şekil 3.2 üzerinde tanımlanmış lens parametreleri bu tasarımda geçerliliğini korumaktadır ancak tek fark, odak açısı β ile hüzmeye açısı α 'nın farklı olmasıdır. Yeni eşitlikler aşağıda verilmiştir. Tasarımın ilk adımında lens tarama açısı Eşitlik 25'te yerine yazılarak mükemmel odak açısı β hesaplanmaktadır. Daha sonra aşağıdaki eşitlikler çözülerek dizi kontürü ve iletim hatları uzunlukları hesaplanmaktadır. Ayrıca Eşitlik 21'i kullanarak lensteki faz sapmasını en aza indirecek g değeri saptanmaktadır [14].

$$\left| \overrightarrow{F_1 P} \right| \sqrt{\epsilon_r} + W + N \sin \alpha = F \sqrt{\epsilon_r} + W_0 \quad (27)$$

$$\left| \overrightarrow{F_2 P} \right| \sqrt{\epsilon_r} + W - N \sin \alpha = F \sqrt{\epsilon_r} + W_0 \quad (28)$$

$$\left| \overrightarrow{G P} \right| \sqrt{\epsilon_r} + W = G \sqrt{\epsilon_r} + W_0 \quad (29)$$

$$\left| \overrightarrow{F_1 P} \right|^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \alpha} - 2FY \sin \alpha \sqrt{\epsilon_r} \quad (30)$$

$$\left| \overrightarrow{F_2 P} \right|^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \alpha} + 2FY \sin \alpha \sqrt{\epsilon_r} \quad (31)$$

$$\left| \overrightarrow{GP} \right|^2 = \sqrt{(G + X)^2 + Y^2} \quad (32)$$

$$a_0 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\epsilon_r}} \quad (33)$$

$$b_0 = \sin \alpha \quad (34)$$

$$y\sqrt{\epsilon_r} = \eta(\sqrt{\epsilon_r} - w) \quad (35)$$

$$\epsilon_r x^2 + \epsilon_r y^2 + 2\epsilon_r gx = w^2 - 2\sqrt{\epsilon_r} gw \quad (36)$$

$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (37)$$

$$a = 1 - \eta^2 - \frac{(g - 1)^2}{(g - a_0)^2} \quad (38)$$

$$b = 2g\sqrt{\epsilon_r} \frac{g - 1}{g - a_0} - \frac{(g - 1)\eta^2 b_0^2}{\sqrt{\epsilon_r}(g - a_0)^2} + 2\eta^2 \sqrt{\epsilon_r} - 2g\sqrt{\epsilon_r} \quad (39)$$

$$c = \frac{g\eta^2 b_0^2}{g - a_0} - \frac{\eta^4 b_0^4}{4\epsilon_r(g - a_0)^2} - \epsilon_r \eta^2 \quad (40)$$

Gagnon'un, Snell yasası ve dielektrik taban malzeme kullanarak geliştirdiği lens tasarım denklemlerinin çözümü, en dıştaki hüzmeye portları arasındaki bağlantıyı azaltacak şekilde dizi ve hüzmeye portları konumlarını vermektedir. Gagnon'un tasarımında bütün hüzmeye portlarının konumları Snell yasasına göre yeniden odaklama yolu vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu yeni lense Gagnon, "Kırınım Lensi (Refracting Lens)" adını vermiştir [14].

3.1.9. Hansen'in Tasarımı (1991)

Hansen, lens tasarım parametrelerindeki değişimlerin, lens geometrisi ile genlik ve faz hataları üzerindeki etkisini incelemiştir [15]. Eşitlik 41'de dizi antenler arasındaki mesafenin, ızgara lob oluşturmayacak şekilde en yüksek tarama açısı Ψ_m ile ilişkisi gösterilmiştir. Izgara lob oluşmaması için dizi antenler arasındaki mesafenin dalga boyu

cinsinden karşılığı en fazla Eşitlik 41'deki gibi olmalıdır.

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{2 + \sin \Psi_m} \quad (41)$$

Hansen, Rotman'dan farklı olarak odak açısı ile tarama açısını farklı ve lens kontürü şeklini eliptik olarak ele almıştır. Bu lens üzerinde yaptığı çalışmalarda, sadece geometrik etkiler yerine lens parametrelerinin, genlik ve faz hatası üzerindeki etkilerini de incelemiştir [15]. Faz hatası sadece mükemmel olmayan odak noktalarında mevcutken genlik hatası bütün hüzmeye portlarında mevcuttur. Bu genlik hatası, hüzmeye portlarını bir horn anten açıklığı gibi kabul ederek yayılan EM dalga dağılımı incelenerek elde edilmektedir. Hüzmeye portlarının hüzmeye kontürü üzerindeki hizalanmalarının nasıl yapıldığı, dizi kontürü üzerindeki genlik dağılımını etkilemektedir. Dizi kontürü üzerinde oluşturulan genlik dağılımının en az asimetriye sahip olması için hüzmeye portları hüzmeye kontürüne dik olacak şekilde değil, dizi kontürünün merkez noktasına bakacak şekilde hizalandırılmalıdır [15].

3.1.10. Singhal, Gupta ve Sharma'nın Tasarımı (1998)

[16]'daki makalede lens parametrelerinin lens geometrisi ve yol boyu hataları üzerindeki etkilerinin iki boyutlu EM alan analizi, kontür integral yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada parabolik, hiperbolik, eliptik ve düz hüzmeye kontürlerinin lens performansına etkisi incelenmiştir. Hiperbol ve parabol şekle sahip hüzmeye kontürü düz veya eliptik şekle sahip hüzmeye kontürüne göre daha yüksek yol boyu hatasına sahiptir. Hüzmeye ve dizi kontürlerinin yüksekliklerinin, en yüksek güç iletimini sağlamak için yakın veya eşit olması gerekmektedir. Eliptik hüzmeye kontürü için elde edilen yansıma katsayıları, diğer kontür şekillerine göre, hüzmeye portları üzerinde daha homojen dağılıma sahiptir. Yan duvarlardaki güç kaybı, en çok düz ön yüz hüzmeye kontürüne sahip lenste görülmüştür. En az lens içi güç kaybı ve en fazla dizi anten üzerine güç iletimi, parabolik lenste görülmüştür. Eliptik lenste, bütün hüzmeye portları ve dizi portları arasındaki bağlaşım daha homojen dağılmıştır. Bu çalışmada Rotman'ın dairesel hüzmeye kontürüne sahip lens tasarımı ile eliptik lens kontürüne sahip bir lens kıyaslaması da yapılmıştır. Eliptik hüzmeye kontürüne sahip lens, dairesel hüzmeye kontürlü lense göre daha küçük g değeri ile daha az faz hatası dağılımı elde ettiğinden daha

kompakt yapıdadır. Diğer bir avantajı, hüzme portları ve dizi portları arasında daha homojen bir bağlaşım sağlamaktadır. Bu incelemeler sonucunda, faz hatası, genlik ve faz dağılımları, yan duvar kayıpları göz önüne alınarak incelemesi yapılan dört farklı hüzme kontürü şekli için eliptik kontür, performans olarak en iyi olarak gözlenmiştir.

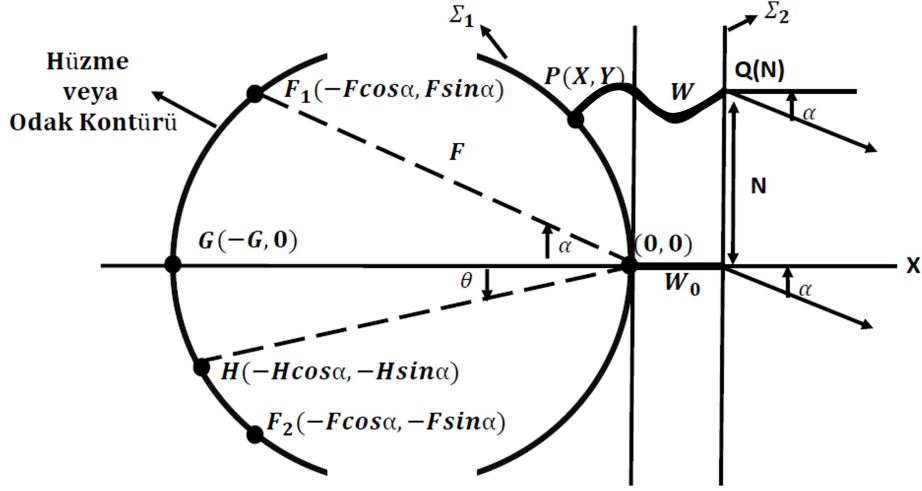
[29]'da; tarama uzayı içinde olmayan yan loblar yan duvar yansımalarından kaynaklanırken, tarama uzayı içindeki yan loblar hüzme portu ağız açıklığının dalga boyu cinsinden büyük olması sonucu oluşan yüksek dereceli modların geri yansımından kaynaklanmaktadır.

4. ROTMAN LENS TASARIMI

4.1. Rotman Lens Tasarım Eşitlikleri

Hava dolgulu lens plakaları arasında oluşan kavite için Bölüm 3.1.2.'de verilen tasarım eşitlikleri ve çözüm adımları takip edilerek bilinmeyen tasarım parametreleri elde edilmektedir. Lens boyutlarını küçültmek ve lens içindeki ışınma kaybını en aza indirmek için dielektrik sabiti birden farklı bir taban malzeme üzerinde, lensin odak açısı ile tarama açısının eşit olduğu koşul gözetilerek tasarlanan bir tasarım için Gagnon'un Bölüm 3.1.8.'deki tasarım eşitlikleri, Bölüm 3.1.2.'de Rotman'ın uyguladığı çözüm basamakları takip edilerek çözülebilmektedir.

Bu bölümde lens odak (α) açısı ile tarama açısı (β) farklı olan ve dielektrik sabiti birden büyük dielektrik taban malzeme üzerinde tasarımı yapılan bir Rotman lense ait tasarım eşitliklerinin çözümü sunulacaktır. En dıştaki anten dizisi elemanının, lens simetri eksenine olan dikey mesafesini N , dizi portlarına ait koordinatları (X, Y) ; simetri ekseninde bulunan odağın odak boyunu F , simetri ekseninde bulunan odağın odak boyu G , simetri ekseninin merkezindeki faz hattı dışındaki hatların fiziksel uzunluğunu W , simetri ekseninde bulunan faz hattının fiziksel uzunluğunu W_0 , normalize lens parametrelerini $n = \frac{N}{F}$, $x = \frac{X}{F}$, $y = \frac{Y}{F}$, $w = \frac{W-W_0}{F}$, $g = \frac{G}{F}$, lens odak noktalarını $F1, F2$ ve G , taban malzeme dielektrik sabitini ϵ_r , etkin dielektrik sabitini ϵ_{eff} temsil etmektedir. Şekil 4.1'de bu parametreler, lens üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Rotman lens ve tasarım parametreleri

$$\left| \overrightarrow{F_1 P} \right| \sqrt{\epsilon_r} + W \sqrt{\epsilon_{eff}} + N \sin \beta = F \sqrt{\epsilon_r} + W_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (42)$$

$$\left| \overrightarrow{F_2 P} \right| \sqrt{\epsilon_r} + W \sqrt{\epsilon_{eff}} - N \sin \beta = F \sqrt{\epsilon_r} + W_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (43)$$

$$\left| \overrightarrow{G P} \right| \sqrt{\epsilon_r} + W \sqrt{\epsilon_{eff}} = G \sqrt{\epsilon_r} + W_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (44)$$

$$\left| \overrightarrow{F_1 P} \right|^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha - 2FY \sin \alpha \quad (45)$$

$$\left| \overrightarrow{F_2 P} \right|^2 = F^2 + X^2 + Y^2 + 2FX \cos \alpha + 2FY \sin \alpha \quad (46)$$

$$\left| \overrightarrow{G P} \right|^2 = \sqrt{(G + X)^2 + Y^2} \quad (47)$$

$$a_0 = \cos \alpha \quad (48)$$

$$b_0 = \sin \alpha \quad (49)$$

$$a_0 = \cos \beta \quad (50)$$

$$b_0 = \sin \beta \quad (51)$$

$$a = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r} - n^2 \left(\frac{b1}{b0} \right)^2 \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r^2} - \frac{\epsilon_{eff}(g-1)^2}{\epsilon_r(g-a_0)^2} \quad (52)$$

$$b = 2 \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{g(g-1)}{g-a_0} - \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}(g-1)b_1^2 n^2}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_r}(g-a_0)^2} + 2 \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{b_1}{b_0}\right)^2 - 2 \sqrt{\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r}} g \quad (53)$$

$$c = \frac{(b_1 n)^2 g}{\epsilon_r (g-a_0)} - \frac{(b_1 n)^4}{4(\epsilon_r)^2 (g-a_0)^2} - \left(\frac{b_1}{b_0}\right)^2 \frac{n^2}{\epsilon_r} \quad (54)$$

$$aw^2 + bw + c = 0 \quad (55)$$

$$y = \frac{b_1}{b_0} n \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} - \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}} w}{\epsilon_r} \right) \quad (56)$$

$$x^2 + y^2 + 2gx = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r} w^2 - 2 \sqrt{\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_r}} gw \quad (57)$$

Eşitlik 42, 43 ve 44 genel ve orijinden geçen ışınların optik yol boyu eşitliği kullanılarak elde edilmiş lens tasarım eşitlikleridir. Eşitlik 45, 46 ve 47 odak noktaları ile dizi kontürü üzerindeki bir nokta arasındaki uzaklığın geometrik karşılığını göstermektedir. Eşitlik 52, 53 ve 54 bilinen tasarım parametreleri kullanılarak hesaplanmakta ve elde edilen değerler Eşitlik 55'te yerine yazılmaktadır. Eşitlik 55'in çözülmesi ile w değeri elde edilmektedir. Bu değer Eşitlik 56'da yerine yazılarak uygun y değeri elde edilmektedir. Bulunan y ve w değerleri Eşitlik 57'de yerine yazılarak x değeri hesaplanmaktadır.

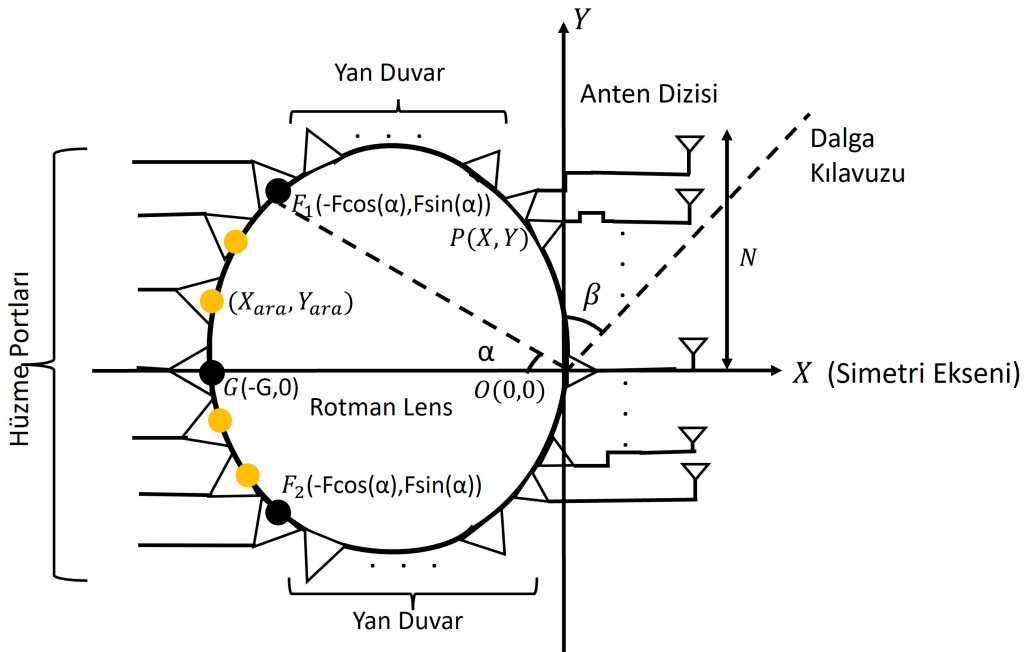
4.2. Optik Sapma

Mükemmel odak portlarının uyarılması sonucunda lens üzerinde yayılan EM dalga, faz eşleme hatları üzerinden geçerek dizi anten dalga cephesi üzerinde sonlanmaktadır. İdealde, mükemmel odak portunun uyarılmasıyla merkezdeki dizi portu üzerinden yayılan EM dalga ile merkez dışında kalan tüm dizi portları üzerinden yayılan EM dalganın optik yol boyları eşit olacak şekilde dizi port konumları seçilmektedir. Optik yol boyu eşitliğinin sağlanması sonucunda mükemmel odak portları için faz hatası görülmemektedir. Ancak ara hüzmeye portlarının uyarılmasıyla, dizi anten elemanlarının her biri için bu eşitlikler sağlanamamaktadır. Eşitsizlik sonucunda ortaya çıkan değer, "Faz Hatası" veya "Optik Sapma" olarak isimlendirilmektedir.

Lens tasarımı, sadece hata değerine sahip olmayan mükemmel odak portları için tasarlanabilmektedir. Ancak uygulamada, hüzmeye kontürü üzerinde mükemmel odak

sayısından daha fazla hüzme portu bulunması gerekebilmektedir. Bu gereklilik, hüzme portu sayısının aynı zamanda sistem çıkışında oluşturulabilecek en fazla anten hüzmesi sayısına eşit olmasından kaynaklanmaktadır. Ara hüzme portları için lens eşitliği yazıldığında, eşitliğin sağlanmadığı görülmektedir.

Uygulanmak istenen lens yapısına göre odak sayısı değişmektedir. Bu çalışmada üç mükemmel odağa sahip bir lens için lens tasarımı yapılmıştır. Lens tasarım eşitlikleri Eşitlik 42, 43 ve 44 ile ifade edilmiştir. Bu eşitliklerin tek tarafa toplanarak sıfıra eşitlenmesi, hata değerinin sıfır olduğunu ifade etmektedir. Mükemmel odaklar dışında kalan ara hüzme portları için faz hatası eşitliği, Eşitlik 58 ile ifade edilmiştir. Bu eşitlik odak boyuna göre normalize edilmemiştir. Eşitliğin normalizasyonu, odak boyu (F)'na bölünerek yapılabilmektedir. Şekil 4.2'de bir Rotman lens yapısı ve yapı üzerinde tasarım parametreleri gösterilmiştir. Şekildeki (X_{ara}, Y_{ara}) koordinatı ara hüzme portunun koordinatını ifade etmektedir.



Şekil 4.2 Optik sapma denklemi için kullanılan lens konfigürasyonu

$$\text{Faz Hatası} = \sqrt{\epsilon_r(((Y - Y_{ara})^2) + ((X - X_{ara})^2))} + \sqrt{\epsilon_{eff}}(W - W_0) + N \sin(\beta) - \sqrt{\epsilon_r(((Y_{ara})^2) + ((X_{ara})^2))} \neq 0 \quad (58)$$

4.3. Eşitliklerin MATLAB Üzerinden Çözümü

EKLER bölümündeki MATLAB kodu; tasarımcı tarafından tasarımın başında belirlenen odak mesafesi, odak ve hüzmeye açısı, dizi anten eleman sayısı, dizi anten elemanları arasındaki mesafe ve taban malzeme bilgilerini kullanarak, optik yol boyu eşitliklerinin çözümü sonucunda bilinmeyen lens tasarım parametrelerini hesaplamaktadır. Bu eşitliklerin çözümü sonucunda, dizi kontürü üzerinde bulunan dizi portlarının (x,y) koordinatları ve çözümü yapılmış ilgili dizi portunu anten elemanına bağlayan iletim hattının fiziksel uzunluk bilgisi elde edilmektedir.

Bu çalışmada; dış odak portunun orijine olan mesafesi 150 mm, odak açısı 30°, hüzmeye açısı 40° olarak seçilmiş, taban malzeme olarak dielektrik sabiti 2.55, kayıp faktörü 0.0013, kalınlığı 0.508 mm olan ROGERS AD255C kullanılmıştır. Anten dizisi 17 eş anten elemanının 10 GHz'e göre $\frac{\lambda_0}{2}$ mesafede konumlandırılmasıyla elde edilmiştir. Odakların orijine uzaklıklarının oranını temsil eden g değeri Eşitlik 21 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değer 30°'lik odak açısı için 1.137 olarak hesaplanmıştır.

Kodun detaylı açıklaması EKLER bölümü altındaki "Lens Tasarım Parametrelerinin Hesaplanması İçin MATLAB Kodu" kısmında yapılmıştır. Anlatımı güçleştirmemek adına bu alt bölümde detaylı açıklamaya yer verilmemiştir.

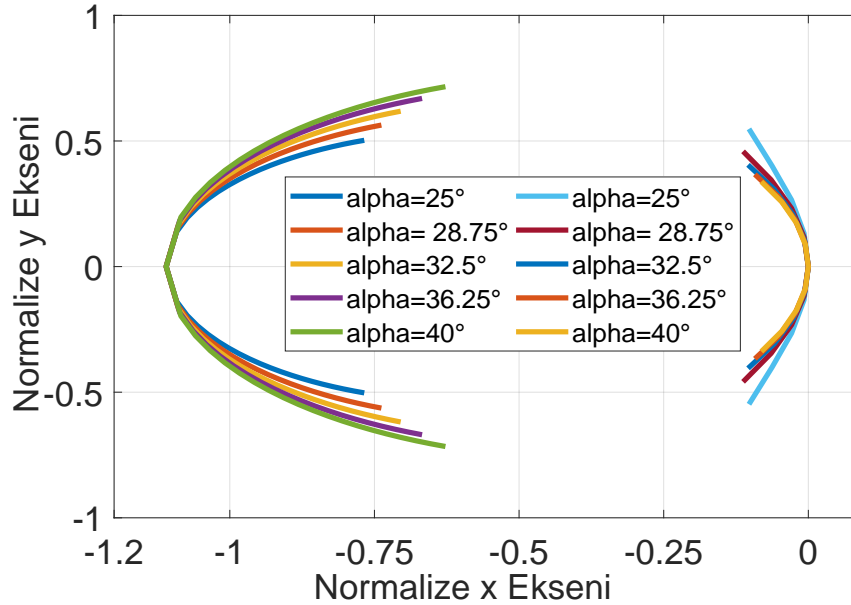
4.4. Tasarım Parametreleri Üzerine Parametrik MATLAB Çalışması

Bu alt bölümde sırasıyla odak açısı α , odak oranı g , dizi anten elemanları arasındaki mesafe d , dielektrik taban malzeme, tarama açısı β ile odak açısı α 'nın birlikte değişimi ve odak mesafesinin değişiminin lens üzerindeki geometrik ve performans etkisi incelenmiştir. İncelenen performans parametrelerinden ara port hata değeri, Eşitlik 58'deki

faz hatası değerinin, odak boyu (F)'na bölünmesiyle odak boyuna göre normalize olarak incelenmektedir. Dolayısıyla incelenen ara port hata değerleri birimsizdir.

4.4.1. Odak Açısının Lens Üzerindeki Geometrik Etkisi

En yüksek tarama açısı 40° iken odak açısı 25° ile 40° arasında değiştirilmiştir. Beklendiği şekilde, odak açısının artması ile birlikte hüzmeye kontürü dışa doğru açılmaktadır. Bu artış ile birlikte dizi kontürü kısalarak kıvrılmaktadır. Odak açısının değişimi, faz hatlarının boylarında önemli bir değişime sebep olmamaktadır. Bu değişiklikler Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Odak açısı α 'nın lens üzerindeki geometrik etkisi ($\beta = 40^\circ, G = 4\lambda$)

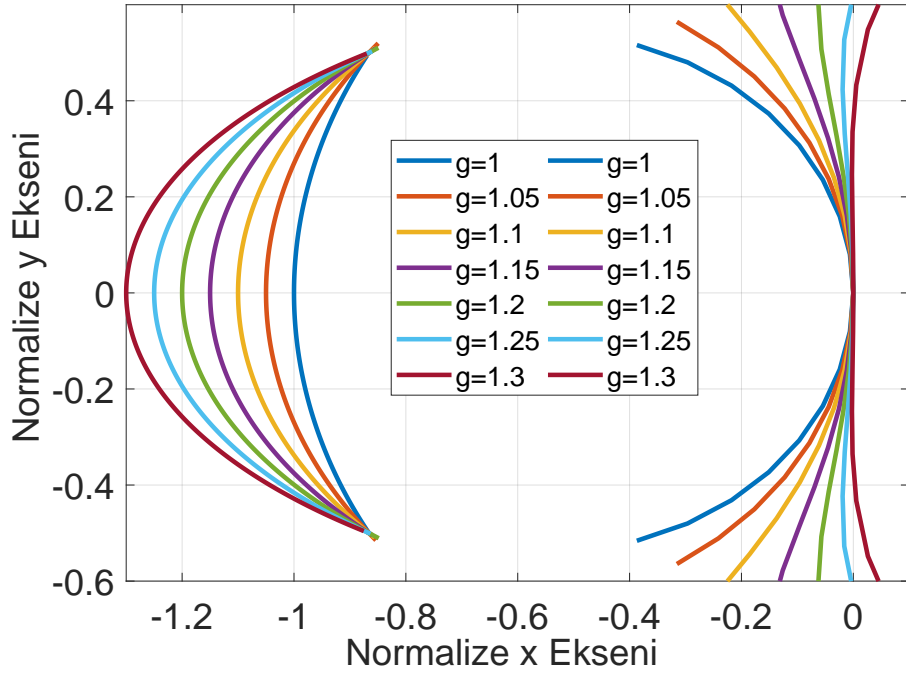
4.4.2. Odak Oranı g'nin Lens Üzerindeki Geometrik Etkisi

Odak oranı, g, lens kontürünün ortasından geçen simetri eksenini üzerinde bulunan odağın (G) orijine olan mesafesinin, hüzmeye kontürü üzerindeki diğer odağın (F_1 veya F_2) orijine olan mesafesine oranıdır. Ruze, [6]'da düz ön yüz lensleri için ara port hata değerini azaltacak yeniden odaklanma mesafesini $\frac{1}{2}(\alpha^2 - \theta^2)F$ olarak ifade etmiştir. Bu eşitlikte α , ara hüzmeye portunun lens simetri ekseniniyle yaptığı açıyı, θ dış hüzmeye odak portunun (F_1) lens simetri eksenini ile yaptığı açıyı temsil etmektedir. Bu eşitliği, ara port hata değerini en aza

indirecek optimum g değerini hesaplamak için uygun forma getirdiğimizde Eşitlik 21 elde edilmektedir.

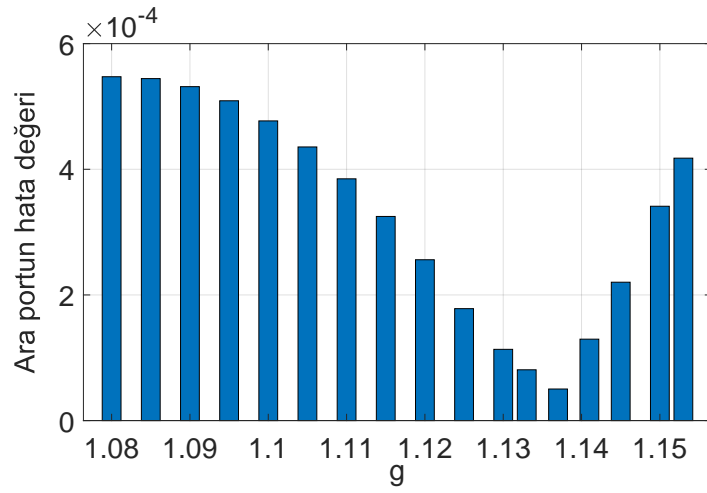
g 'nin değişimi odak boyuna bağlı olarak lens boyutlarını, dizi portlarının konumlarını ve faz hatlarının boylarını değiştirmektedir. g değeri küçükken merkez iletim hattı uzunluğuna göre, merkezden uzaktaki dizi portlarını anten elemanları ile birleştiren iletim hattı uzunluklarının gerçek zaman gecikmesi özelliğini karşılayabilmek için daha uzun olması gerekmektedir. $g=1.1$ ve üzerindeki değerler için, merkezdeki dizi portunu antene bağlayan iletim hattının uzunluğuna göre merkez dışında kalan dizi portlarını anten elemanlarına bağlayan iletim hatlarının daha kısa olması gerekmektedir. g 'nin artışıyla hatların kısalma miktarı artmaktadır.

Lens kontürlerindeki geometrik değişim incelendiğinde; artan g değeri ile birlikte hüme kontürünün daha kıvrımlı, dizi kontürünün ise daha düz bir forma dönüştüğü gözlemlenmiştir. Bu değişim, Şekil 4.4'te açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4 Odak oranı g 'nin lens üzerindeki geometrik etkisi ($\beta = 40^\circ$)

Şekil 4.5'te, odak açısı ile en yüksek tarama açısı, birbirine eşit ve 30° iken g 'ye bağlı ara port hata değeri gösterilmektedir. Bu durum için Eşitlik 21 kullanılarak elde edilen optimum g değeri 1.137'dir. Grafik incelendiğinde, hesaplanan optimum g değeri ile ölçülen optimum g değerinin aynı olduğu gözlemlenmektedir. Grafik, çok küçük bir g aralığı için çizilmiştir. Bunun nedeni, bu aralık dışında, ara port hata değerindeki ani artış dolayısıyla gözlemlenmek istenen aralığa ait barların, diğer hata değerlerinin yanında gözlemlenemeyecek kadar küçük kalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.5 Ara portun g 'ye bağlı hata değeri

4.4.3. Dizi Elemanları Arasındaki Mesafenin Lens Üzerindeki Etkisi

Anten dizisine ait anten elemanları arasındaki mesafe arttırıldığında anten açıklığı artmaktadır. Dolayısıyla anten kazancı da artmaktadır. Ancak dizi anten elemanları arasındaki mesafeyi sınırlayan bir üst sınır bulunmaktadır. Bu sınır, anten görünür uzayı içerisinde ızgara lob oluşturmayacak dizi anten eleman mesafesi olarak Eşitlik 59 ile tanımlanmıştır. Bu eşitlikte, λ_{min} , dizi anten çalışma frekans bandı içindeki en yüksek frekans bileşenine ait dalga boyunu, θ_{max} , dizi anten hüzmesinin yönlendirildiği en yüksek tarama açısını temsil etmektedir. Bu çalışmada anten hüzmesi, en fazla 40° 'ye yönlendirildiği için Eşitlik 59 kullanılarak elde edilen mesafe sınırı $d < 0.6\lambda_{min}$ 'dir.

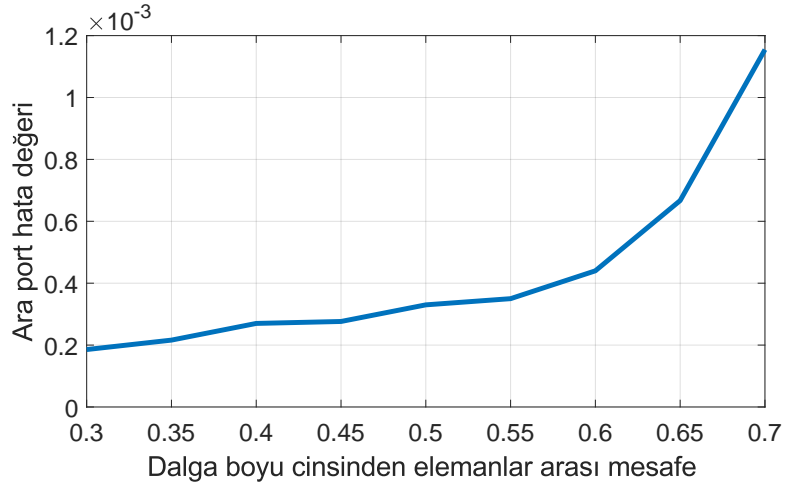
$$d < \frac{\lambda_{min}}{1 + \sin(\theta_{max})} \quad (59)$$

Dizi anten elemanları arasındaki mesafe değiştikçe ara portta en az hata değerini veren optimum g değeri değişmektedir. Bu değişim Tablo 4.1'de gsterilmiştir. Artan dizi eleman mesafesi, optimum g değerinde duişuşe sebep olmaktadır.

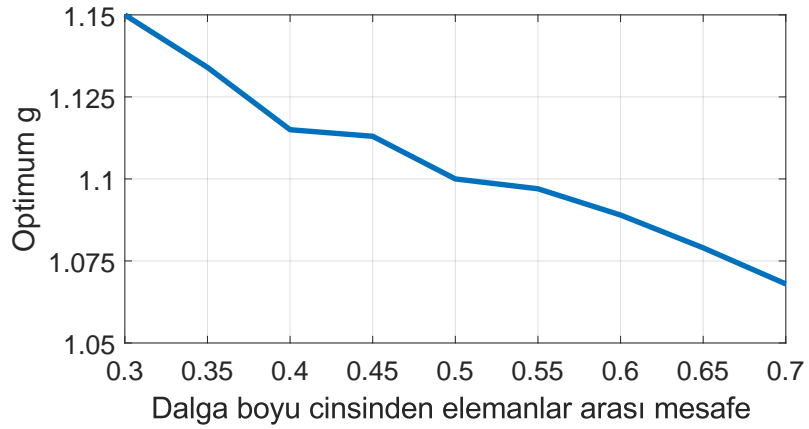
Tablo 4.1 Dizi Anten Elemanları Arasındaki Mesafeye Bağlı, Ara Port Hata ve Optimum g Değer

Elemanlar Arası Mesafe	Ara Port Hata Değer	Optimum g
$0.3\lambda_0$	1.856×10^{-4}	1.15
$0.35\lambda_0$	2.1609×10^{-4}	1.134
$0.4\lambda_0$	2.7×10^{-4}	1.115
$0.45\lambda_0$	2.763×10^{-4}	1.113
$0.5\lambda_0$	3.3×10^{-4}	1.1
$0.55\lambda_0$	3.5×10^{-4}	1.097
$0.6\lambda_0$	4.4×10^{-4}	1.089
$0.65\lambda_0$	6.67×10^{-4}	1.079
$0.7\lambda_0$	11.547×10^{-4}	1.068

şekil 4.6 ve şekil 4.7'de dizi anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak ara port hata değer ve optimum g değer gsterilmiştir. Bu grafiklere gbre artan eleman mesafesi ara portlarda daha yksek faz hatasına sebep olmaktadır. Dizi eleman mesafesinin artmasıyla faz eşleme hatlarının merkez iletim hattına gbre kısalma miktarı ciddi olçüde artmaktadır. Dolayısıyla artan eleman mesafesi, merkez iletim hattı uzunluğuunda ciddi bir artışa ve bu artışın bir getirisi olarak hat kaybına sebebiyet vermektedir.

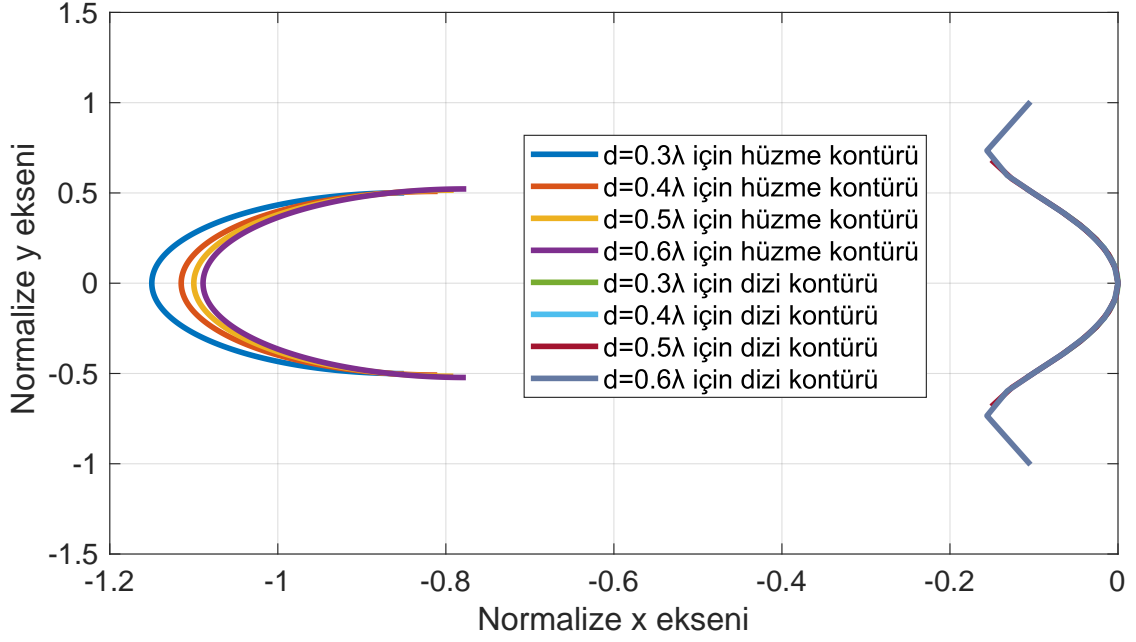


Şekil 4.6 Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak ara port hata değeri



Şekil 4.7 Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak optimum g değeri

Şekil 4.8’de dizi anten elemanları arasındaki mesafesinin değişimine bağlı olarak lens kontürlerinin değişimi gösterilmektedir. Bu grafiğe göre dizi anten elemanları arasındaki mesafe arttığında, hüzmeye kontürü içe doğru küçülürken, dizi kontürü ise bu değişimden az miktarda etkilenmektedir.



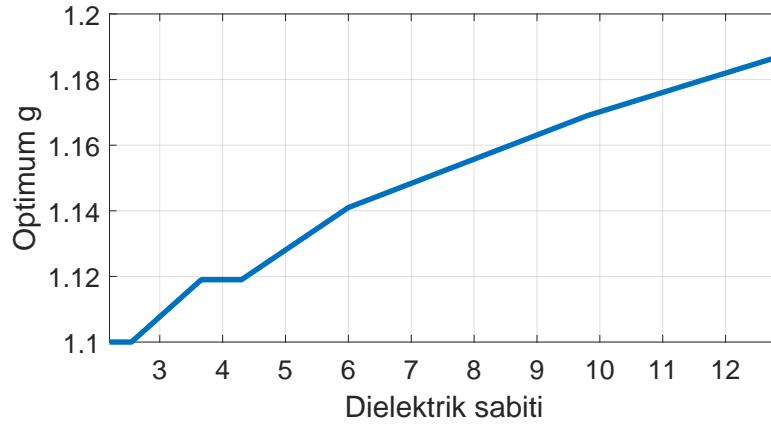
Şekil 4.8 Anten elemanları arasındaki mesafeye bağlı olarak lens kontürü

4.4.4. Dielektrik Taban Malzemenin Lens Üzerindeki Etkisi

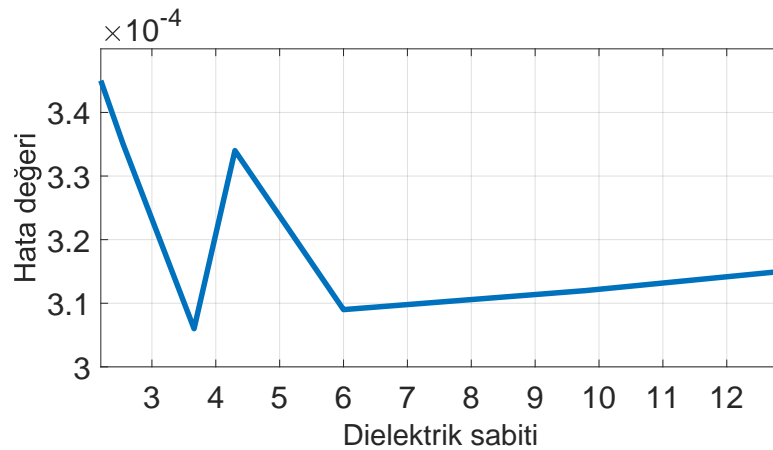
Bu bölümde kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0009 olan ROGERS DiClad880, kayıp tanjantı 0.0013 olan ROGERS AD255C, kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0037 olan ROGERS 4350B, kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.039 olan FR-4, kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0023 olan ROGERS TMM6, kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0020 olan ROGERS TMM10i ve kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0019 olan ROGERS TMM 13i için incelemelerde bulunmaktadır. Tablo 4.2, bu malzemeler için malzeme bilgisi, hesaplanan ara port hata değeri ve optimum g değerini içermektedir. Lens tasarımında kullanılan taban malzemenin verimli dielektrik sabiti arttıkça ara portta en az hatayı verecek optimum g değeri artmaktadır. Ancak elde edilen optimum g değerleri kullanıldığında en yüksek hata değerleri arasında kayda değer bir fark görülmemektedir. Bu gözlemler Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 incelenerek elde edilebilmektedir.

Tablo 4.2 Dielektrik Taban Malzemeye Bağlı, Ara Port Hata ve Optimum g Değeri

Taban Malzeme	Kalınlık(mm)	ϵ_r	ϵ_{eff}	Hata Değeri	Optimum g
<i>DiClad880</i>	0.762	2.2	1.8712	3.45×10^{-4}	1.1
<i>AD255C</i>	0.508	2.55	2.112	3.35×10^{-4}	1.1
<i>RO4350B</i>	0.762	3.66	2.852	3.06×10^{-4}	1.119
<i>FR – 4</i>	1	4.3	3.266	3.34×10^{-4}	1.119
<i>TMM6</i>	2.54	6	4.334	3.09×10^{-4}	1.141
<i>TMM10i</i>	0.64	9.8	6.6063	3.12×10^{-4}	1.169
<i>TMM13i</i>	1.27	12.85	8.3691	3.15×10^{-4}	1.187

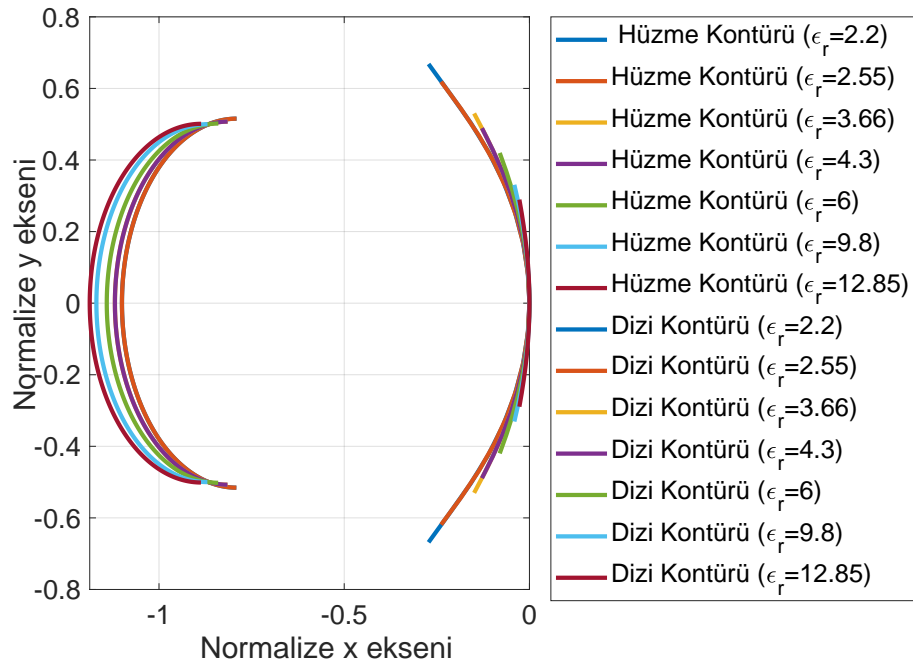


Şekil 4.9 Taban malzeme dielektrik sabitine bağlı optimum g değişimi



Şekil 4.10 Taban malzeme dielektrik sabitine bağlı ara port hata değişimi

Şekil 4.11’de farklı taban malzeme dielektrik sabitleri için lens kontürlerinin değişimi gösterilmektedir. Bu grafiğe göre, taban malzeme dielektrik sabiti arttıkça dizi kontürü küçülerek düzleşmekteyken, hüzme kontürü daha kıvrımlı bir hale dönüşmektedir. Bu grafikler, sabit odak mesafesi baz alınarak çizdirildiği için hüzme kontürü yüksekliğinin, dielektrik sabiti artışına göre değişmediği görülmektedir. Ancak taban malzeme dielektrik sabitinin artışı lens boyutunu dielektrik sabitinin kareköküyle orantılı olarak küçültmektedir. Bu durumda odak mesafesi de dielektrik sabitinin kareköküyle orantılı olarak küçültülmelidir.



Şekil 4.11 Taban malzeme dielektrik sabitine bağlı dizi ve hüzme kontürü değişimi

4.4.5. Değişen Tarama ve Odak Açısının Lens Üzerindeki Etkisi

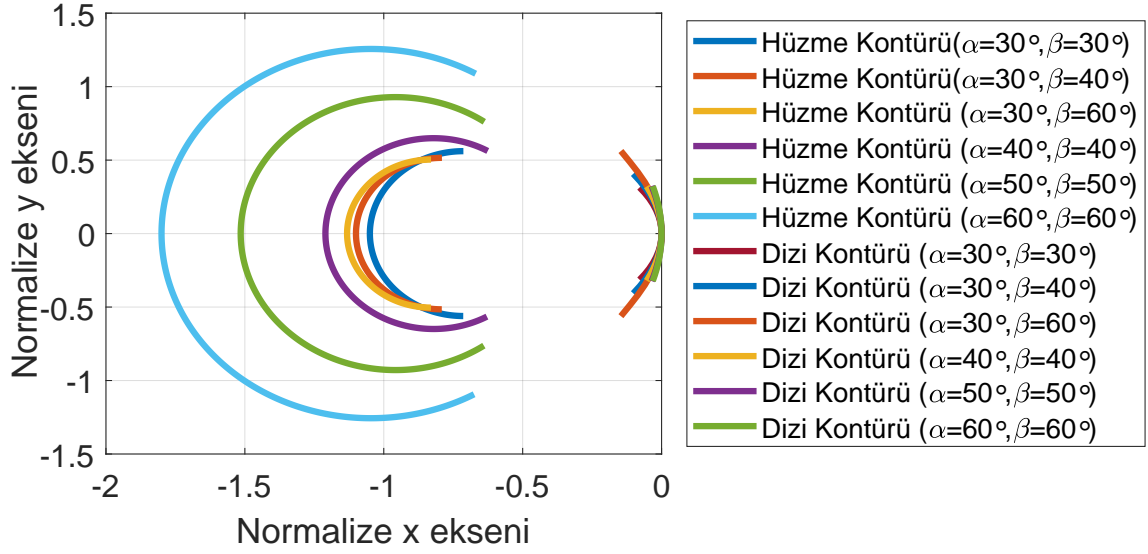
Tablo 4.3’te, değişen odak ve hüzme açıları için ölçülen optimum g, hata ve hesaplanan optimum g değerleri gösterilmiştir. Eşitlik 21, tablodan görüldüğü üzere, odak ve hüzme açısının eşit olduğu koşul için kullanışlıdır. Tabloda optimum g ile gösterilen sütunun satır girdileri, MATLAB’da koşturulan ara hüzme portu hata değeri hesaplama kodundan elde edilmiştir. Odak açısı sabit tutulurken hüzme açısı arttırıldığında optimum g değeri artmaktadır. Benzer bir şekilde odak açısının tarama açısına eşit olduğu durumda da artan

açı değeri daha yüksek optimum g değerini vermektedir.

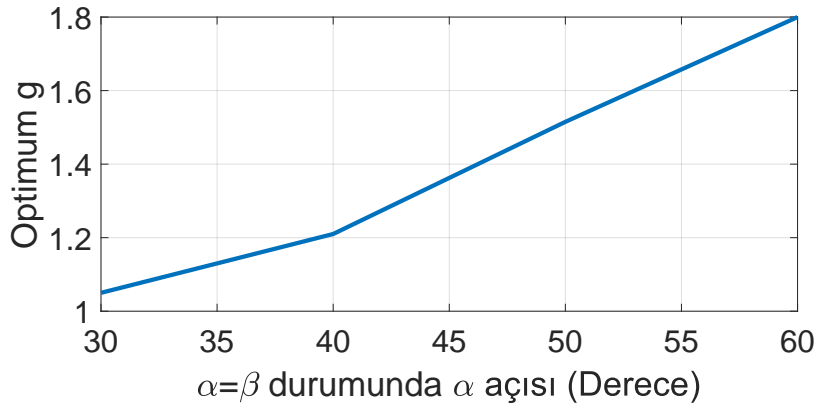
Tablo 4.3 Odak ve en yüksek tarama açısının hata değeri ve optimum g değerine etkisi

Odak Açısı (α , derece)	En Yüksek Tarama Açısı (β , derece)	Hata Değeri	Optimum g	Eşitlik 21'e Göre Hesaplanan g
30	20	8.61×10^{-5}	1.04	1.137
30	25	2.8×10^{-4}	1.06	1.137
30	30	1.86×10^{-2}	1.05	1.137
30	40	3.35×10^{-4}	1.1	1.137
30	50	1.72×10^{-3}	1.12	1.137
30	60	1.15×10^{-2}	1.132	1.137
40	40	4.92×10^{-4}	1.21	1.12437
50	50	9.15×10^{-4}	1.515	1.3808
60	60	6.52×10^{-4}	1.8	1.5483

Şekil 4.12'de açı değişimlerinin lens kontürü üzerindeki etkisi görülmektedir. Değişen açı değerleriyle birlikte optimum g değeri de değişmekte olduğundan hüzme kontürünün merkez noktası da değişmektedir. Açı değeri arttıkça hüzme kontürü genişlemekte, dizi kontürü ise küçülmektedir. Şekil 4.13'te hüzme ve dizi açılarının eşit olduğu koşulda optimum g değerinin açıya bağlı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Farklı odak (α) ve hüzmeye (β) açıları kombinasyonları için lens kontürleri



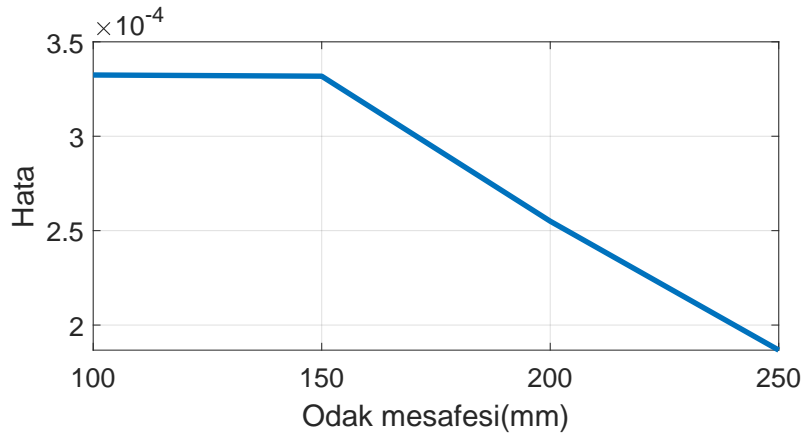
Şekil 4.13 Farklı tarama açıları için optimum g

4.4.6. Odak Mesafesinin Lens Üzerindeki Etkisi

Rotman lens tasarımında odak mesafesini belirlemek için kesin bir kriter olmamakla birlikte odak mesafesi; lensin hüzmeye yönlendirme gerekliliği, çalışma frekansı, lens boyutları ve geometrisi, dizi anten konfigürasyonu ve üretim gereklilikleri göz önünde tutularak seçilmektedir. Tasarımcının, tasarım sürecinde sistem gerekliliklerine uygun olarak odak mesafesini seçmesi gerekmektedir.

Genelde Rotman lensin odak mesafesini arttırmak, lenste oluşan hatayı azaltarak daha

doğru hüzme yönlenmesi ve bozuluma uğramamış hüzme oluşmasını sağlamaktadır. Artan odak mesafesi, lens üzerindeki dizi portlarında meydana gelebilecek değişime daha duyarlı olduğundan daha küçük hata oluşturmaktadır. Ancak hatayı azaltmak için odak mesafesini gereğinden fazla büyütmek, lensin üretim maliyetini arttırmakla beraber lensin daha ağır ve hacimli bir yapıya dönüşmesine sebep olarak üretimini ve kullanımını zorlaştırmaktadır. Şekil 4.14'te odak mesafesinin değişimine bağlı olarak ara port hata değeri gösterilmektedir. Bu grafikte de görüldüğü üzere, lens odak mesafesindeki artış ara port hata değerini düşürmektedir.



Şekil 4.14 Odak mesafesine göre hata grafiği

4.5. Rotman Lens Uygulaması

4.5.1. Sistem Gereklilikleri

Rotman lensin kullanım amacı; birlikte çalıştığı anten dizisi elemanlarına, teoride frekanstan bağımsız olarak, beslenen hüzme portunun yönlendirmesi gereken açı değerine dizi anten hüzmesini yönlendirecek genlik ve faz dağılımını sağlamaktır. Birden fazla hüzme portu aynı anda beslendiğinde ise beslenen hüzme portlarının ayrı ayrı beslendiğinde oluşturdukları hüzme örüntüleri daha düşük kazançlı olarak aynı anda oluşturulabilmektedir. Bu amaç gözetilerek lens ve anten birlikteliğinden oluşan bir sistem tasarlanmıştır. İlk tasarım hedefi; anten hüzmesini -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 41° olmak üzere 7 farklı yönde aynı anda veya farklı zamanlarda oluşturabilen ve yönlendirebilen, 7 hüzme portuna sahip

bir lens tasarlamaktır. Anten dizisi hüzmelerinin aynı anda elde edildiği durumda, anten dizisi hüzmelerinin kesişim noktası, istenen gözlem yönlerinde veri doğruluğunu arttırmak adına önem taşımaktadır. Yapının kullanım amacı, hem yüksek kapsama alanı hem de geniş açı aralığında yüksek kazanç sağlamak ise bu kesişim noktalarının, anten en yüksek kazanç noktasına yakın olması istenmektedir. Ancak uygulamaya göre, farklı açılardaki anten hüzmelerini aynı anda oluşturmak ve kesişim noktalarının, hüzmeler arasında kalan bölgedeki girişimi en aza indirecek şekilde, anten en yüksek kazancının olabildiğince altında olması da istenebilmektedir. Uydu haberleşmesi, bu tür kullanımlar için iyi bir örnektir. Bu uygulamalarda bilginin uyduya doğruluğu yüksek şekilde odaklanabilmesi için anten hüzmeleri genişliğinin dar, uydular veya yer istasyonları arasındaki girişimin düşük olabilmesi için ise anten dizisine ait farklı yönlerdeki hüzmelerin kesişim noktalarının düşük olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra bu amaç doğrultusunda anten dizisinin kullanıldığı diğer uygulamalardan birkaçı; savunma sistemleri, su altı akustik sistemler, gözlem ve güvenlik sistemleri, kablosuz noktadan noktaya iletişim ağlarıdır.

Bu çalışmada, anten dizisi hüzmelerine ait kesişim noktalarını düşürebilmek için anten dizisi hüzmeleri daraltılmıştır. Hüzmelerin daraltılabilmesi için anten dizisi eleman sayısı artırılarak 17 elemanlı bir dizi seçilmiştir. Dizideki eleman sayısının artışı, dizi anten kazancının artmasına, dizi anten hüzmeleri genişliğinin ise azalmasına sebep olmaktadır. Daha dar dizi anten hüzmeleri genişliği, dizi tarafından oluşturulan anten hüzmelerinin kesişim noktasını düşürerek, hüzmeler arasındaki ara açı bölgelerinde girişimi azaltmaktadır. Dizideki anten elemanları arasındaki mesafe, merkez frekans 10 GHz'de $\frac{\lambda_0}{2}$ olacak şekilde 15 mm olarak seçilmiştir.

4.5.2. Tasarım Parametrelerinin Seçimi

Bir önceki alt bölümde, hüzmeleri ve dizi portlarının seçiminden bahsedilmiştir. Bu alt bölümde; taban malzeme, odak mesafesi (F), odak oranı (g), odak açısı (α) ve hüzmeleri açısının (β) seçimi üzerinde durulacaktır.

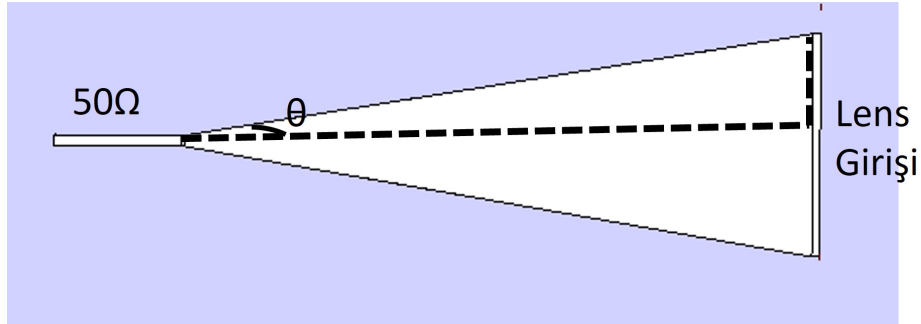
Önemli tasarım parametrelerinden biri dielektrik taban malzeme seçimidir. Lens boyutları, sistem çalışma frekans bandında dalga boyu cinsinden büyük olduğundan lens boyutlarını

küçültmek için yüksek dielektrik sabitli malzemeler kullanılabilir. Ancak taban malzeme dielektrik sabiti yükseldikçe, lens kavitesi içerisinde oluşan yüzey dalgaları daha baskın bir hale gelmektedir. Tablo 4.2’de değişen taban malzeme dielektrik sabiti değerleri için optimum g değerleri verilmiştir. Optimum g değeri tablodan seçilerek, yapının hata değeri azaltılabilmektedir. Dolayısıyla bu seçim için hata değeri incelenmemektedir. Taban malzeme dielektrik sabiti dışındaki bir diğer önemli parametre ise taban malzeme kalınlığıdır. Artan kalınlık, taban malzeme içinde yüzey dalgaları oluşumunu artırarak enerji kaybına sebep olmaktadır. Bu sınırlamalar göz önünde bulundurularak, tasarımda kayıp tanjantı 10 GHz’de 0.0013 olan 20 mil kalınlıklı ROGERS AD255C kullanılmıştır. Bu malzemenin seçilme nedeni; düşük kayıp tanjantı, ince yapısı ve küçük dielektrik sabiti sayesinde dielektrik kaybını büyük bir lens için en aza indirecek olmasından kaynaklanmaktadır. Bir diğer neden ise, anten kartı ile lens kartının aynı kartta mikroşerit iletim hattı geçişi veya farklı kartta via geçişiyle kullanılacak olmasından kaynaklanmaktadır. Anten dizisi elemanları arasındaki mesafe λ_0 ile orantılıdır. Dolayısıyla λ_0 ve λ_g arasındaki farkın açılması, iki kartın birlikte mikroşerit hat ile birleştirilerek kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Seçilen dielektrik malzeme için etkin dielektrik sabiti 2.17’dir. Dielektrik malzeme seçimi yapıldıktan ve anten dizisi boyutu belirlendikten sonra lens boyutlarını kesinleştirmek için F, g ve α değerlerinin seçilmesi gerekmektedir. F ve α değerleri, lens boyutları mantıklı bir formda olacak şekilde sırasıyla 150 mm ve 30° olarak seçilmiştir. F değerinin seçimi için kesin bir kriter bulunmamaktadır. g değeri Ruze’un Eşitlik 21’deki eşitliği kullanılarak 30° ’lik odak açısı için 1.137 olarak hesaplanmıştır. Dizi antenin en yüksek tarama açısı, odak açısından farklı olarak 40° olarak seçilmiştir. Tarama açısının 40° üzerinde seçilmemesinin nedeni, artan tarama açısının, sabit anten dizi mesafesi için çalışma frekans bandını sınırlamasından kaynaklanmaktadır. Eşitlik 60’ta bu etki gösterilmektedir. λ_{min} , çalışma frekans bandı içindeki en yüksek değere sahip frekans bileşenine karşılık gelen dalga boyunu, β_{max} ise dizi antenin hüzmelerini tarayabildiği en yüksek açı değerini göstermektedir.

$$\text{Antenler Arası Mesafe} < \frac{\lambda_{min}}{1 + \sin(\beta_{max})} \quad (60)$$

4.5.3. Lens Portlarının Tasarımı

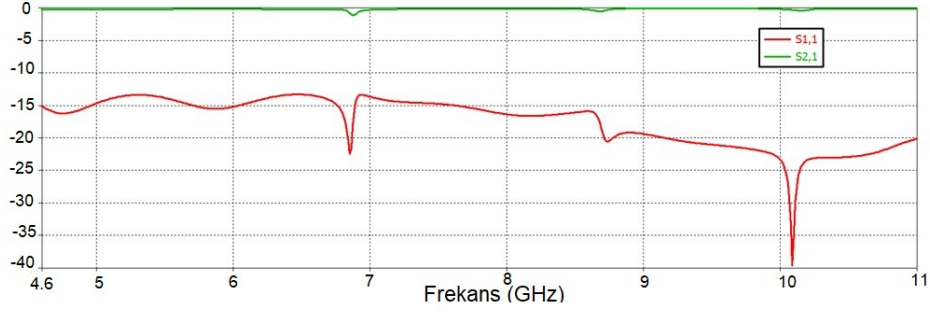
Lens yüzeyi, çalışma frekansındaki dalga boyunun 5 katı büyüklüğündeki odak mesafesi ile dalga boyu cinsinden büyük boyutlara sahiptir. Ancak lense bağlanacak giriş ve çıkış portlarının bağlandığı hatlar 50Ω empedans değerine sahip, kullanılan taban malzeme için kalınlığı dalga boyunun yirmide birinden küçük olan hatlardır. Büyük lens yapısı ile ince hatları birbirlerine bağlamak için iki yapı arasında kademeli bir empedans geçişi gerekmektedir. Kademeli empedans geçişi, doğrusal veya eksponansiyel olarak sağlanabilmektedir. İki yöntem de farklı hat empedanslarını en az kayıpla birleştirebilmek için kullanışlı olmaktadır. Eksponansiyel geçiş, daha kısa mesafede hat empedansını dönüştürmek için kullanılmaktadır. Lens boyutlarının büyük olması dolayısıyla eksponansiyel geçiş yerine aynı performansı veren doğrusal geçiş kullanılmıştır. Böylece tasarım basitleştirilmiştir.



Şekil 4.15 Mikroşerit hat ve port arasında doğrusal empedans geçişi

Şekil 4.15'te doğrusal empedans geçişi kullanılarak 50Ω 'luk mikroşerit hat ve hüzmeye portunun lense bağlandığı nokta arasında empedans uyumluluğu sağlanmıştır. Bu tasarımda lense doğrudan bağlanan mikroşerit hattın kalınlığı, lens hüzmeye kontürü üzerinde port bağlantıları kesintisiz yapılacak ve portlar arasında yansıtıcı yüzeyi arttıracak boşluk olmayacak şekilde seçilmiştir. Empedans geçişi için kullanılan Θ açısı küçüldükçe, daha uzun bir mesafede, daha küçük kademeli ve daha kontrollü empedans geçişi sağlanmaktadır. Ancak geçiş sırasındaki artan iletim hattı boyu, hat kaynaklı ışıma kaybını arttırmaktadır. Işıma kaybını azaltmak ve kontrollü empedans geçişini sağlamak için şekilde görülen geçiş açısı, Θ , 9.64° olarak seçilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde, empedans geçişi sırasında

yansıma ve iletim katsayısının, sırasıyla, çalışma frekans bandı içerisinde -10 dB altında ve -0.5 dB üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Geçiş için seçilen açı değeri, yansıma ve iletim katsayısının sırasıyla -10 dB altında ve 0 dB'ye yakın olacak şekilde ve ışınım kaybının artmasına mahal vermeyecek şekilde seçilmiştir.

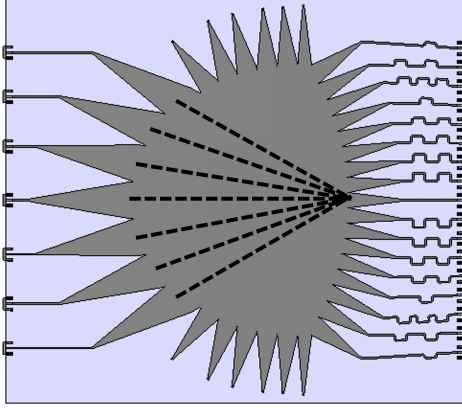


Şekil 4.16 Doğrusal empedans geçişinin iletim ve yansıma katsayısı grafiği

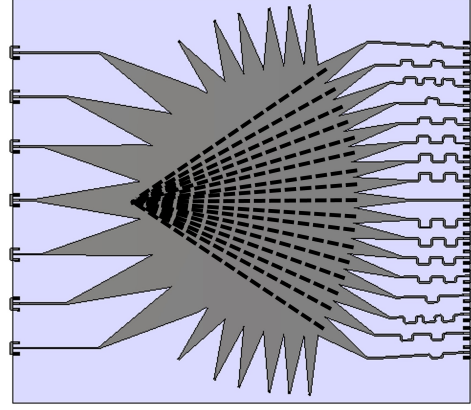
Port tasarımı yapıldıktan sonra portun, lens ile birleştirilmesi gerekmektedir. Lens yüzeyi eğimli bir yüzey olduğu için portların lens yüzeyine yerleştirilmesi, portların farklı açılarda lens yüzeyine hizalandırılması ile mümkün olmaktadır. Hüzme portunun uyarılması sonucunda, port çıkışında iki boyutlu ışınım örüntüsü oluşmaktadır [12]. Dizi anten elemanları arasında olabildiğince simetrik genlik dağılımı sağlamak ve portlar arasındaki araya girme kaybını azaltmak için portun oluşturduğu iki boyutlu ışınım örüntüsünün maksimum kazanca sahip olduğu noktanın karşı lens kontürünün merkez noktasına hizalı olması gerekmektedir [12, 13]. Yukarıda bahsedilen port tasarımı, hüzme portu için yapılmıştır. Ancak aynı tasarım gereklilikleri dizi portu için de geçerlidir. Şekil 4.17'de Rotman Lens üzerinde port hizalamaları gösterilmiştir. Şekil 4.17a ve 4.17b'de sırasıyla hüzme portlarının dizi kontürü merkez noktasına göre hizalanması ve dizi portlarının hüzme kontürü merkez noktasına göre hizalanması gösterilmiştir.

4.5.4. Yan Duvar Tasarımı

Lens yan duvarları, lens hüzme portu veya portlarının uyarılması sonucu lens içinde yayılan EM dalganın, üzerine gelen bir kısmını lens içine yansıtmaktadır. İstenmeyen yansımayı önlemek için lens yan duvarlarında soğurucu malzeme, çeyrek dalga eşleyici yüzey veya yan



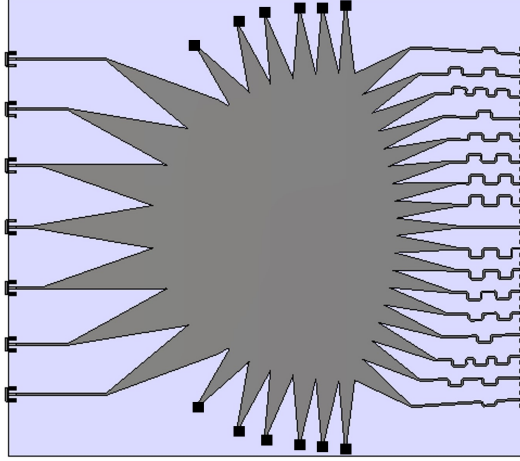
(a) Hüzme portlarının dizi eksenini merkez noktasına göre hizalanması



(b) Dizi portlarının hüzme eksenini merkez noktasına göre hizalanması

Şekil 4.17 Port Hizalaması

duvar hat empedansı ile eş yükler kullanılmaktadır. Niazi, [30]'da yan duvar hatlarının ve yan duvar portlarının üzerini kayıplı bir malzemeyle boyayarak yan duvar kaybını azaltmaya çalışmıştır. Ancak bu uygulama, lens dielektrik sabitinin 2-3 gibi havaya yakın değerlere sahip olduğu, gücün bir miktarının havadan taşındığı koşulda en iyi sonucu vermektedir. Yan duvarlarda mikrodalga soğurucu malzeme kullanmak, eş yük kullanma zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır. Aynı zamanda mikrodalga soğurucu malzeme, farklı açılardan gelen EM dalgayı, eş yükler göre daha iyi sönmülemektedir. Ancak yüksek maliyete sahiptir. Çeyrek dalga eşleyici yüzeyler ise dar bantta çalışan lensler için kullanışlıdır. Yan duvar portlarının, yan duvar hat empedansı ile eş yükler kullanılarak sonlandırılması da iyi bir sönmüleme tekniğidir. Ancak EM dalganın geliş açısına bağlı performans karakteristiğine sahiptir [13]. Bu seçenekler göz önüne alınarak, yan duvarlar altı parçaya bölünmüş, tüm yan duvar portlarının 50Ω 'luk iletim hatlarına doğrusal geçiş yoluyla empedans geçişi sağlanmış ve hatlar 50Ω 'luk eş yükler ile sonlandırılmıştır. Şekil 4.18'de tasarımı yapılan Rotman lens üzerinde yan duvar portları ve siyah kareler ile yan duvarların sonlandırıldığı 50Ω 'luk eş yükler gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Lens üzerinde yan duvarlar ve yükler

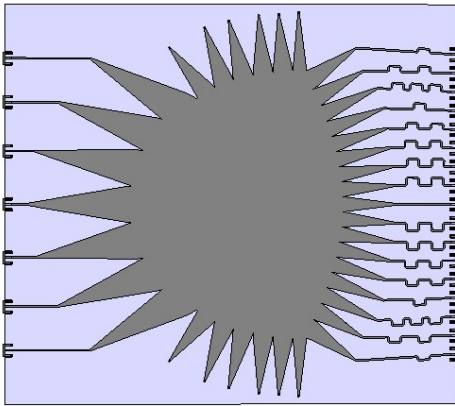
4.5.5. Lens Tasarımı

Radar uygulamalarında geniş frekans bandında çalışmak ve anten hüzmesini geniş frekans aralığında yüksek doğrulukla yönlendirebilmek önemlidir. Dizi anten elemanları arasındaki mesafenin sabit olması, geniş frekans aralığında anten hüzmesinin yönünü sabit bir açıda tutmayı zorlaştırmaktadır. Değişen frekans değerleriyle anten hüzmesinin istenen yönden sapmasına "hüzme şaşılığı" denmektedir. Rotman lens gibi gerçek zaman gecikmesi sistemleri, ideal koşulda, bu hüzme şaşılığı etkisinden yoksundur. İdeal koşulda, bu sistemler sonsuz frekans bandında çalışmaktadır. Bölüm 4.1.'deki tasarım eşitliklerinde, frekansa bağlı değişken olmaması, lensin gerçek zaman gecikmesi prensibinde çalıştığı bir göstergesidir. Lens eşitlikleri, frekansa bağımsız optik yol boyu eşitlikleri üzerinden oluşturulmuştur. Dolayısıyla eşitliklerin çözümüyle elde edilen hiçbir değişken frekansa bağlı değildir. Eşitliklerin çözümüyle dizi portlarının koordinatları ve dizi portları ile anten dizisine ait anten elemanlarını birbirine bağlayan iletim hatlarının fiziksel boyları elde edilmektedir. Merkez eleman dışında kalan tüm iletim hatlarının uzunluğu, merkezdeki faz eşleme hattının uzunluğuna göre hesaplanmaktadır.

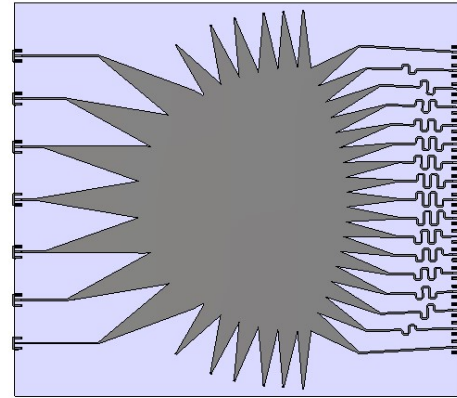
Bundan sonraki bölümlerde, iki farklı lens modeli üzerinde durulacaktır. İlk tasarım ve

ikinci tasarım için Bölüm 4.5.2.'deki seçilen tasarım parametreleri birebir aynıdır. Ancak aralarındaki fark, faz eşleme hatlarının tasarımıdır. İlk tasarım, faz eşleme hatları 10 GHz merkez frekansında üç mükemmel odak noktası için anten dizisi çıkışlarında fazlar eşlenerek dolayısıyla gerçek zaman gecikmesi özelliği gözetilmeden tasarlanmıştır. İkinci tasarım ise gerçek zaman gecikmesi özelliği gözetilerek tasarlanmış iletim hatları için tasarlanmıştır. Bölüm 4.1.'deki tasarım eşitliklerinin çözülmesi sonucunda, faz eşleme hatlarının, merkez faz eşleme hattının uzunluğuna göre ne kadar kısa veya ne kadar uzun olacağı bilgisi elde edilmektedir. Dolayısıyla çözümler sonucunda faz kavramı ortadan kalkmaktadır. İlk tasarımda, faz kavramı üzerinde durulması, lensin geniş frekans bandında, hüzme şaşılığına sahip olmayacak şekilde çalışmasına engel olmaktadır. Bu tasarım için aşağıdaki bölümlerde, 10 GHz merkez frekans dışındaki frekans değerleri için hatalı faz değerleri gözlenecektir. Anlatının basitleştirilmesi adına ilk tasarımı yapılan lens, Lens1 ve ikinci tasarımı yapılan lens ise Lens2 olarak adlandırılmıştır.

Şekil 4.19a'da, yapılan Lens1, Şekil 4.19b'de ise Lens2 gösterilmiştir. Alınan görüntüler, CST Mikrodalga Stüdyo 2017 yazılımı kullanılarak çizimi yapılmış lens tasarımlarına aittir.



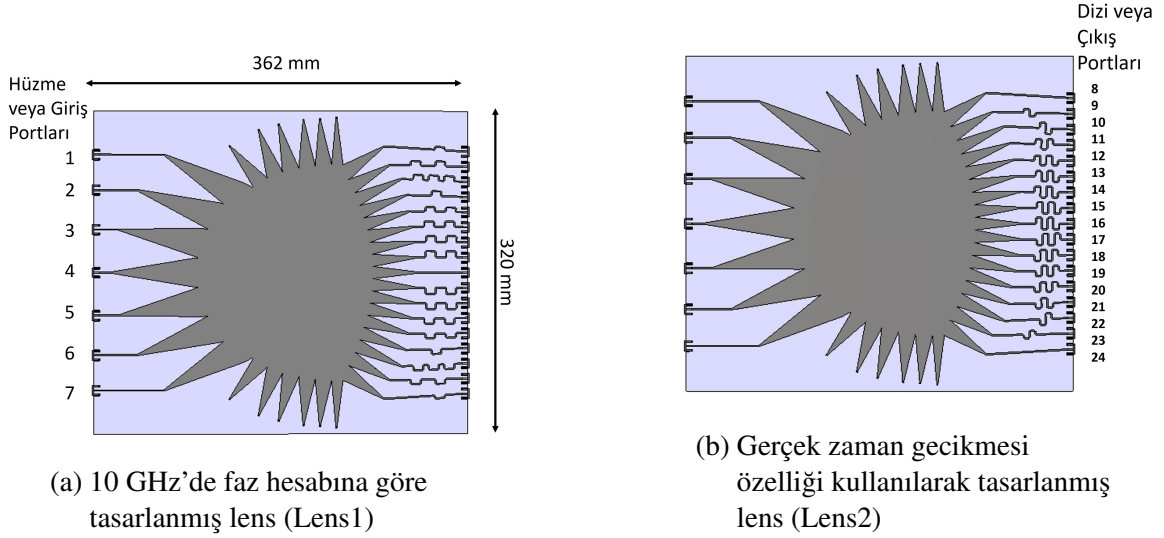
(a) 10 GHz'de faz hesabına göre tasarlanmış lens (Lens1)



(b) Gerçek zaman gecikmesi özelliği kullanılarak tasarlanmış lens (Lens2)

Şekil 4.19 Rotman Lens

4.5.6. Lens Üzerinde Port Numaralandırması ve Boyutlar



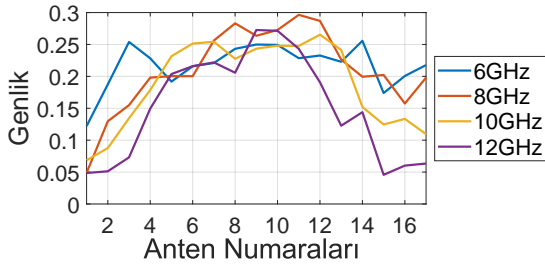
Şekil 4.20 Rotman Lens ve Port Numaralandırması

Şekil 4.20a ve Şekil 4.20b'de yapılan iki farklı tasarıma ait Rotman lens gösterilmiştir. İki tasarımda da lens genişliği 362 mm, lens boyu 320 mm olarak eşit ölçülerde tasarlanmıştır. İki lens tasarımı için de port numaralandırılması, hüzme, yan duvar ve dizi port sayısı aynıdır. Şekil 4.20a'daki Lens1 üzerinde hüzme portlarının numaralandırılması, Şekil 4.20b'deki Lens2'de ise dizi portlarının numaralandırılması gösterilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere hüzme portları yukarıdan aşağıya doğru 1'den 7'ye kadar numaralandırılmıştır. Dizi portlarının numaralandırılması ise yukarıdan aşağıya doğru 8'den 24'e kadar yapılmıştır. Yan duvardan ayrılan portlar 50Ω empedansa sahip mikroşerit hat ve hat ucunda 50Ω 'luk yük ile sonlandırıldığından bu portlar için numaralandırma yapma gereği görülmemiştir.

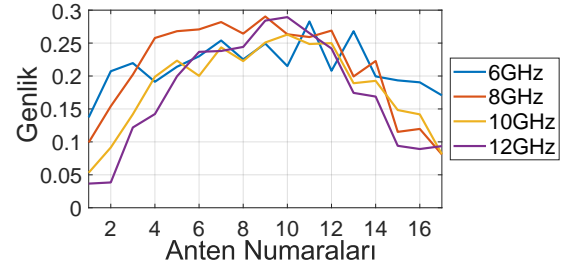
4.5.7. Lens1 Tasarımında Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Genlik Dağılımı

Hüzme portunun uyarılması ile lens içinde yayılan EM dalga, dizi anten elemanları üzerinde uygun genlik ve faz dağılımını oluşturmaktadır. Hüzme portunun, iki boyutlu bir horn antene olan benzerliği dolayısıyla hüzme portları horn anten ışına örüntüsüne benzeyen iki boyutlu ışına örüntüsüne sahiptir. Uyarılan hüzme portunun sahip olduğu iki boyutlu

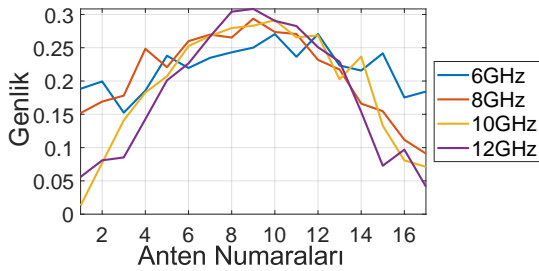
ışıma örüntüsü, dizi anten elemanları üzerinde genlik eğrisi oluşturmaktadır [13]. Lens şekli, hüme portlarının hizalanması ve hüme portu iki boyutlu ışına örüntüsü göz önünde bulundurulduğunda, hüme portunun uyarılması sonucu dizi anten elemanları üzerinde oluşan genlik dağılımının, en yüksek genlik, merkez dizi anten elemanında, en düşük genlik ise en dış dizi anten elemanlarında gözlenecek şekilde olması beklenmektedir. İncelenen anten dizisi elemanları, Şekil 4.20b’de 7’den 24’e kadar numaralandırılmış ancak bu alt bölümde yukarıdan aşağıya 1’den 17’ye kadar numaralandırılarak kullanılmıştır. Şekil 4.21’de bu numaralandırma göz önüne alınarak, farklı hüme portlarının beslenmesi sonucunda, anten dizisi elemanları üzerinde oluşan genlik dağılımları gösterilmiştir. Grafikte yatay eksen anten dizisi elemanlarına ait numaraları, dikey eksen ise doğrusal genlik değerini göstermektedir. Tüm grafikler 6-12 GHz arasında, 2 GHz örnekleme aralığıyla çizdirilmiştir. Grafikler incelendiğinde, beklenen genlik dağılımı tüm hüme portları için gözlemlenmiştir.



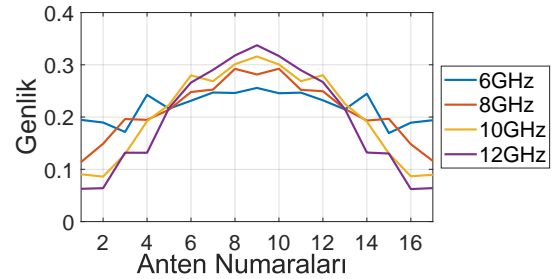
(a)



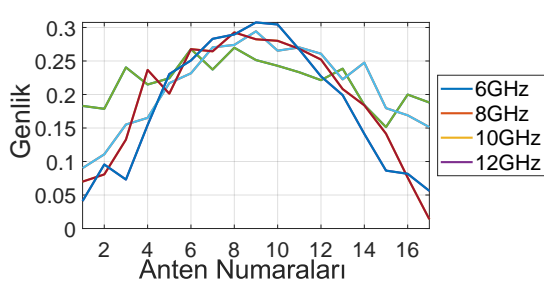
(b)



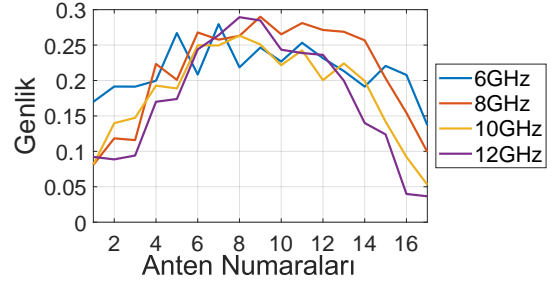
(c)



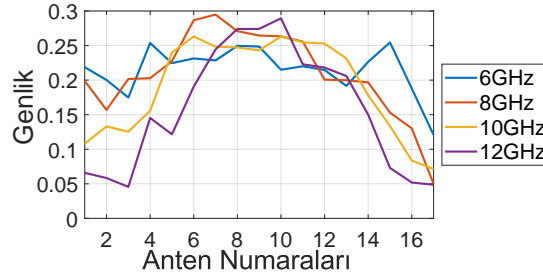
(d)



(e)



(f)

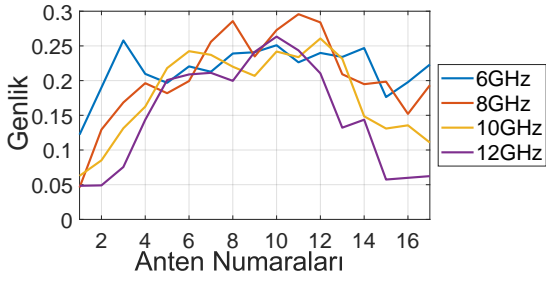


(g)

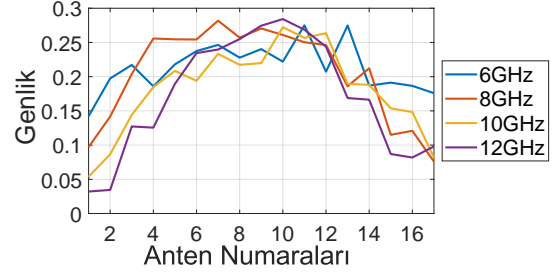
Şekil 4.21 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen genlik dağılımı

4.5.8. Lens2 Tasarımında Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Genlik Dağılımı

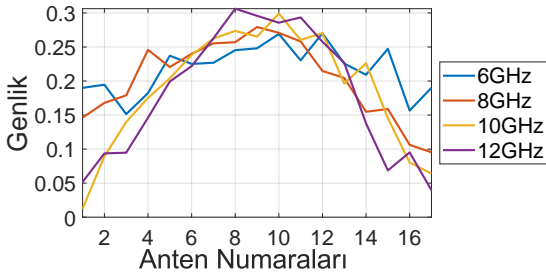
Şekil 4.22’de Lens2 için farklı hüzmeye portlarının beslenmesi sonucunda dizi anten elemanları üzerinde oluşan genlik dağılımı gösterilmiştir. Grafikte yatay eksen anten dizisi elemanlarına ait numaraları, dikey eksen ise doğrusal genlik değerini göstermektedir. Tüm grafikler 6-12 GHz arasında, 2 GHz örnekleme aralığıyla çizdirilmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 incelendiğinde, iki lens için de en simetrik genlik dağılımının merkezdeki merkezdeki 4 numaralı hüzmeye portunun beslenmesi sonucunda sağlandığı görülmektedir. Dizi antenler üzerindeki genlik dağılımı, uyarılan hüzmeye portu, merkezden en dıştaki hüzmeye portlarına (1 ve 7 numaralı hüzmeye portları) doğru ilerledikçe, bozulmaktadır. İncelenen frekans bileşenleri için her iki lenste de genlik dağılımı, benzer bir örüntü sergilemiştir.



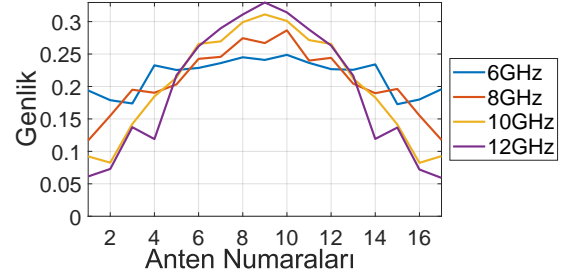
(a)



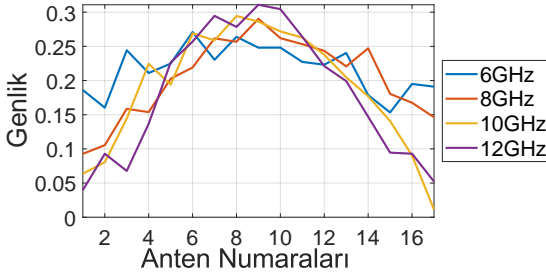
(b)



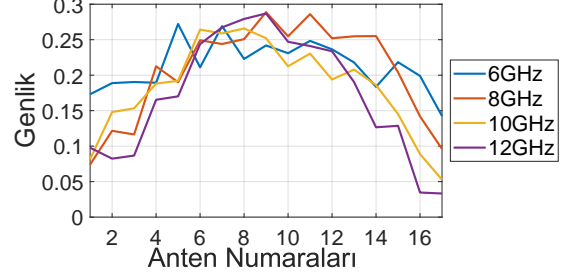
(c)



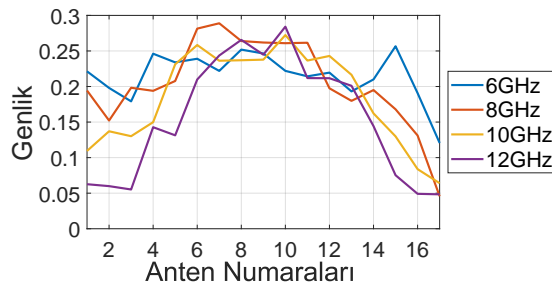
(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 4.22 Lens2 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüme portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen genlik dağılımı

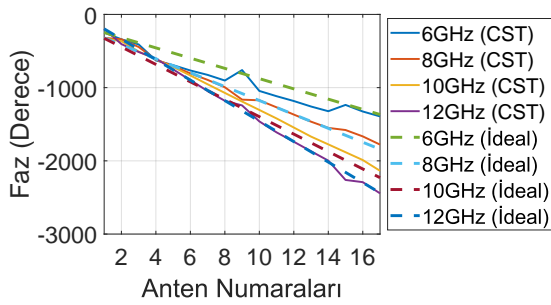
4.5.9. Lens1 Tasarımında Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Faz Dağılımı

Şekil 4.23'de farklı hüzme portlarının uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen faz dağılımı ve ideal durumda anten hüzmesini aynı açı değerine yönlendirmek için dizi anten elemanları arasındaki gerekli faz dağılımı gösterilmiştir. Grafikte yatay eksen anten dizisi elemanlarına ait numaraları, dikey eksen ise derece cinsinden faz değerini göstermektedir. Rotman lensin hüzme portları, sırasıyla 1 numaradan 7 numaraya doğru uyarıldığında, anten dizisi hüzmesi enine ışın yönünden -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° , 41° saparak yönlenebilir. Bu yönlenebilirliği, sabit dizi anten elemanı mesafesi ile hüzme şaşıllığı olmadan gerçekleştirebilmek için farklı frekans bileşenlerinde anten dizisi elemanları, farklı faz dağılımıyla uyarılmalıdır. Tablo 4.4'te farklı frekans değerleri için anten dizisi elemanları arasındaki mesafe sabit ve 15 mm olarak tutulduğunda, dizi anten hüzmesini yönlendirmek için komşu anten elemanları arasında olması gereken faz farkı ifade edilmiştir. Frekans yükseldikçe anten dizisi hüzmesini olduğu açı değerinde sabit tutabilmek için komşu dizi anten elemanları arasına uygulanan faz farkını arttırmak gerekmektedir. Anten dizisi hüzmesinin dönüş açısı arttıkça komşu dizi anten elemanları arasına uygulanan faz farkı artmalıdır.

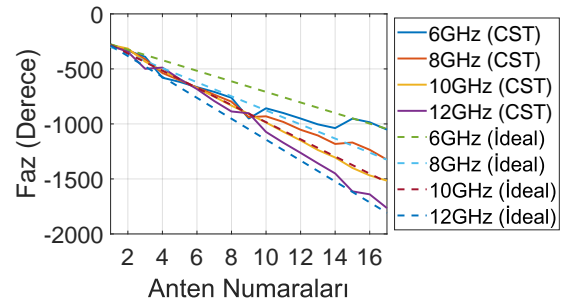
Tablo 4.4'deki komşu dizi anten elemanları arasındaki ideal faz farkı değerleri, Şekil 4.23'te lens simülasyon sonucu ile birlikte kıyaslama yapılabilmesi için birlikte çizdirilmiştir.

Tablo 4.4 Farklı frekans bileşenleri için dizi anten hüzmesini yönlendirecek, komşu dizi anten elemanları arasındaki gerekli faz farkı

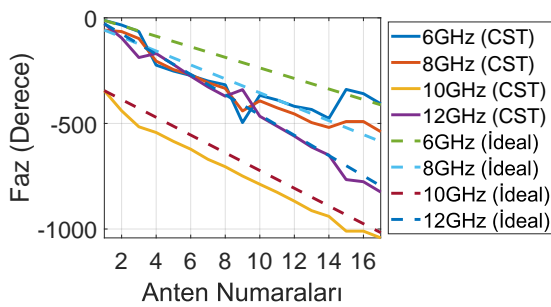
Frekans (GHz)	Anten Hüzmesini 41° yönlendirmek için komşu dizi anten elemanları arasında gerekli faz farkı (Derece)	Anten Hüzmesini 26° yönlendirmek için komşu dizi anten elemanları arasında gerekli faz farkı (Derece)	Anten Hüzmesini 13° yönlendirmek için komşu dizi anten elemanları arasında gerekli faz farkı (Derece)	Anten Hüzmesini 0° yönlendirmek için komşu dizi anten elemanları arasında gerekli faz farkı (Derece)
6	70	48	25	0
8	95	64	33	0
10	119	78	42	0
12	140	95	48	0



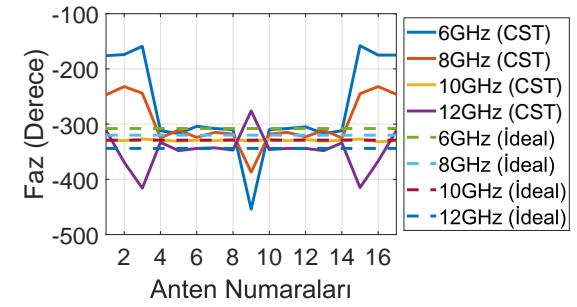
(a)



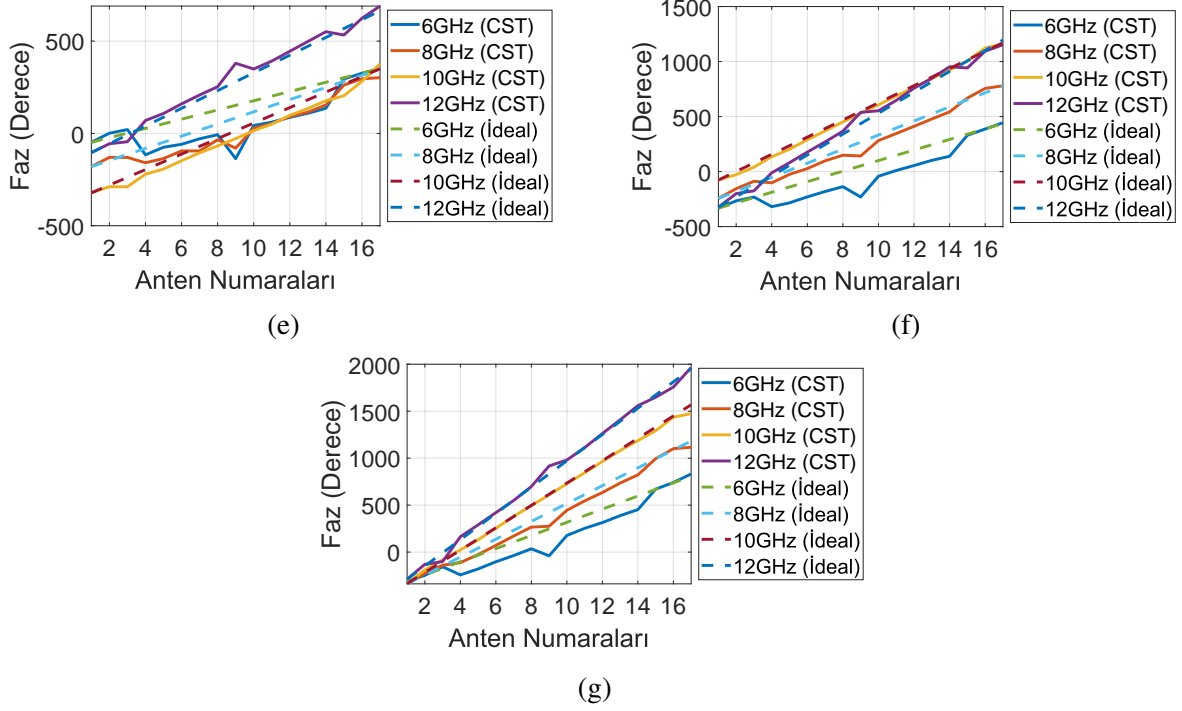
(b)



(c)



(d)



Şekil 4.23 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen faz dağılımı

Şekil 4.23 incelendiğinde, 1, 2 ve 3 numaralı hüzmeye portu için izlenen faz eğrisinin eğim yönü ile 5, 6 ve 7 numaralı hüzmeye portu için izlenen faz eğrisinin eğim yönünün ters olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedeni; lens simetri eksenine göre simetrik olan hüzmeye portlarının, dizi anten hüzmelerini, enine ışınım yönüne göre simetrik olarak yönlendirmek için dizi anten elemanları arasında sağlamaları gereken faz farkının ters işaretli olmasından kaynaklanmaktadır.

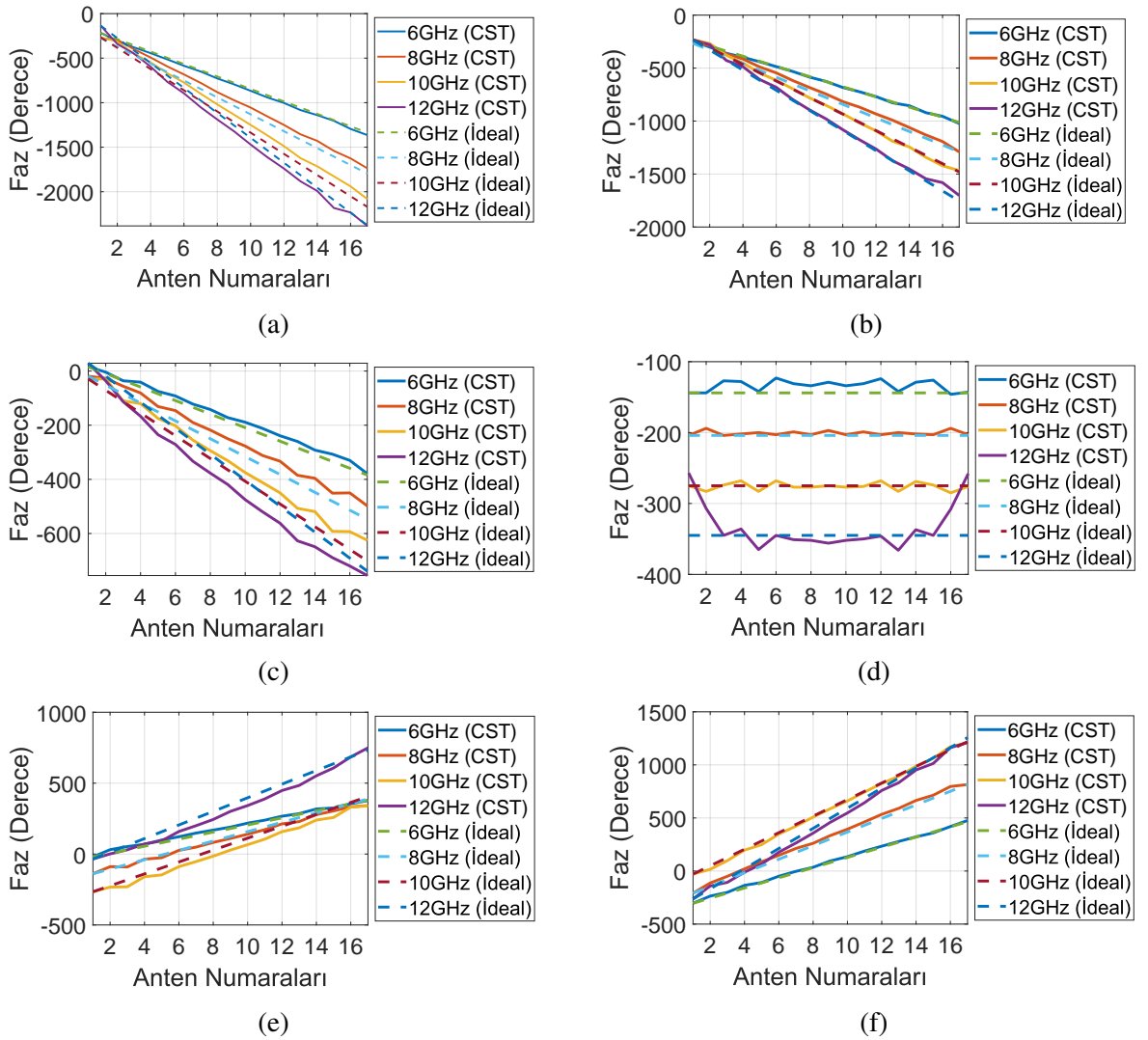
Bu tasarımında özellikle 10 GHz merkez frekansı için farklı hüzmeye portlarının uyarılması sonucu elde edilen faz eğrileri, idealde anten hüzmelerini yönlendirmek için gerekli olan faz dağılımı eğrileriyle tutarlı davranış sergilemektedir. Ancak 10 GHz dışında kalan diğer frekans bileşenleri için faz dağılımı eğrileri ideal koşullardan sapmaktadır. Bu sapma değeri, özellikle dış anten dizisi elemanlarına doğru artmaktadır.

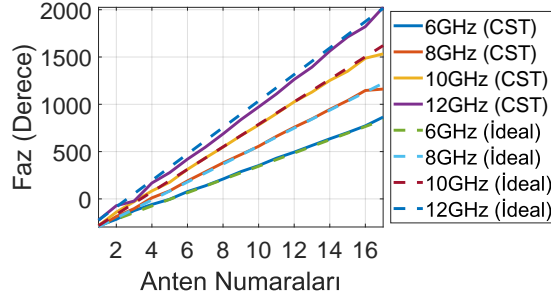
Lens1'in tasarımı 10 GHz'de faz eğrileri incelenerek yapıldığı için geniş frekans aralığında gerçek zaman gecikmesi prensibi ile hüzmeye şaşılığında sahip olmayacak şekilde

çalışmamaktadır. Faz eğrilerinin farklı frekans bileşenleri için ideal koşuldaki sapması gerçek zaman gecikmesi özelliğinin sağlanmadığının bir göstergesidir.

4.5.10. Lens2 Tasarımı için Dizi Anten Elemanları Üzerinde Elde Edilen Faz Dağılımı

Şekil 4.24'te farklı hüzmeye portlarının uyarılması sonucunda dizi anten elemanları üzerinde elde edilen faz dağılımları ve Tablo 4.4 kullanılarak elde edilen ideal faz dağılımı eğrileri gösterilmiştir. Grafiklerde yatay eksen, dizi anten elemanlarına ait numaraları, dikey eksen, derece cinsinden faz değerini göstermektedir.





(g)

Şekil 4.24 Lens2 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5 f) 6 g) 7 numaralı hüzmeye portunun uyarılmasıyla dizi anten elemanları üzerinde elde edilen faz dağılımı

Şekil 4.24 incelendiğinde, ilk tasarımda olduğu gibi sadece 10 GHz için ideal faz eğrileriyle tutarlı simülasyon faz eğrileri yerine ilgilenilen frekans bileşenlerinin tümü için tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bütün frekans bileşenleri için simülasyon ve ideal faz eğrilerinin tutarlı olması, lensin gerçek zaman gecikmesi özelliğini sağladığını göstermektedir. Bu lens tasarımında optik yol boyu kavramı kullanılarak, lens çıkışındaki faz eşleme hatlarının uzunlukları gerçek zaman gecikmesi özelliği sağlanacak şekilde ayarlanmıştır.

Her iki lens tasarımı incelendiğinde, lensin vadettiği şekilde hüzmeye şaşılığınaya sahip olmadan geniş frekans bandında yüksek doğrulukla çalışabilmesi için dizi portları ve dizi anten elemanları arasındaki faz eşleme hatlarının tasarımı kritik öneme sahiptir.

4.5.11. Anten Dizi Faktörü ve Hesaplanması

Eş anten elemanlarına sahip dizi antene ait uzak alan ışınma örüntüsü, tek bir anten elemanının uzak alanda oluşturduğu elektrik alan ile dizi faktörünün çarpılması sonucunda elde edilmektedir [31]. Dizi faktörü; dizi anten elemanları arasındaki mesafeye, dalga sayısına, komşu dizi elemanları arasındaki faz farkına ve gözlem açısına bağlıdır. Anten dizi faktörünün hesaplanabilmesi için dizi anten elemanlarına gelen sinyallerin, genlik ve faz bilgilerinin bilinmesi gerekmektedir. Genlik ve faz bilgileri, lens hüzmeye portları ile dizi portları arasındaki araya girme katsayısı (S_{21}) verilerinden elde edilmektedir. Eşitlik 61'de herhangi bir hüzmeye portu ile N. dizi anten elemanı arasındaki araya girme katsayısına bağlı kompleks dizi faktör genliği ifade edilmiştir. Bu eşitlikte, $GenlikMatrix_N$, herhangi bir

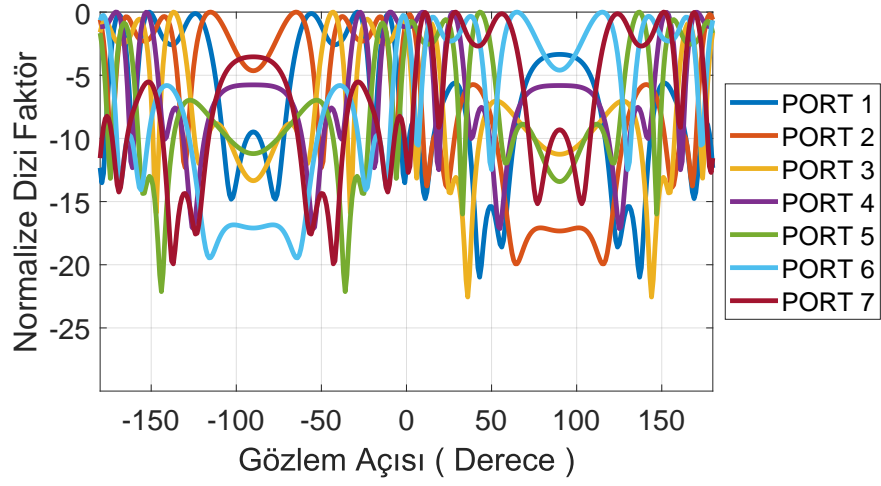
hüzme portu ile N. dizi anten elemanı arasındaki araya girme katsayısının genlik değerini, $FazMatrix_N$, herhangi bir hüzme portu ile N. dizi anten elemanı arasındaki araya girme katsayısının faz değerini temsil etmektedir. Eşitlik 61, eşitlik 62’de yerine yazıldığında dizi faktör elde edilmektedir. Eşitlik 61 ve 62’de ifade edilen N, ilgili dizi anten elemanı numarasını, eşitlik 62’de ifade edilen θ , gözlem açısını, k, dalga sayısını, d_N ise N. dizi anten elemanının lens eksenine olan düşey mesafesini temsil etmektedir.

$$KomplexMatrix_N = GenlikMatrix_N e^{jFazMatrix_N} \quad (61)$$

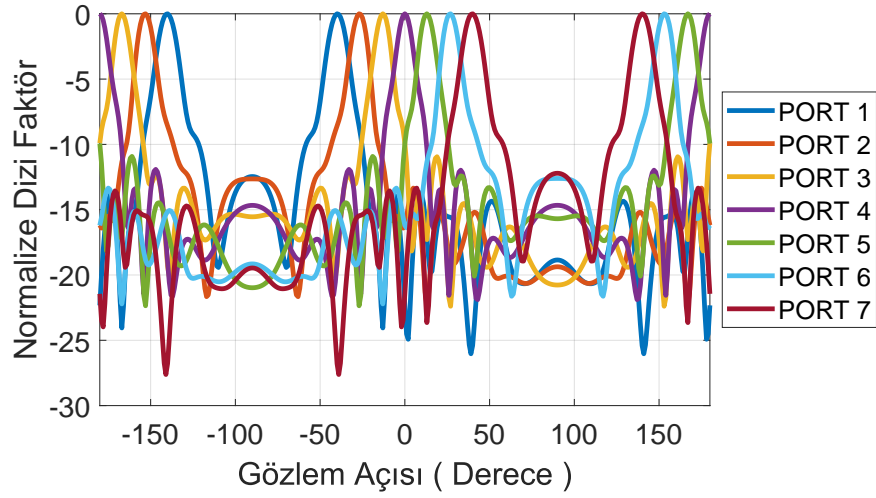
$$DiziFaktor_N = \sum_{i=1}^N KomplexMatrix_N e^{jsin(\theta)kd_N} \quad (62)$$

Eşitlik 62’nin çözülmesi sonucunda, tüm gözlem açıları için dizi faktör hesaplanmaktadır. Bu eşitliklerin, tüm hüzme portlarının ayrı ayrı oluşturduğu uzak alan ışınma örüntüsünü tespit etmek için tüm hüzme portları için ayrıca çözülmesi gerekmektedir. Dalga sayısı ve $KomplexMatrix_N$ frekansa bağlı değişkenler olduğu için elde edilen anten dizi faktörü değeri tek bir frekans için elde edilmektedir.

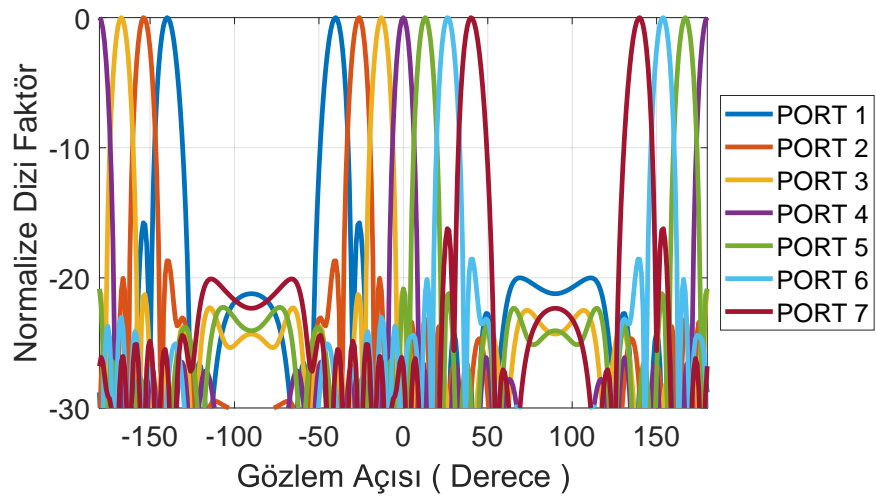
Şekil 4.25’te Lens1 için yapılan CST simülasyonları sonucunda elde edilen araya girme katsayısı sonuçları ile hesaplanan, enine ışınma yönündeki anten hüzmesi en yüksek kazancına göre normalize edilmiş dizi faktör çizimleri gösterilmektedir. Sonuçlar, ilgilenilen frekans bölgesi olan 6-12 GHz arasında 2 GHz’lik örnekleme basamağı ile verilmiştir.



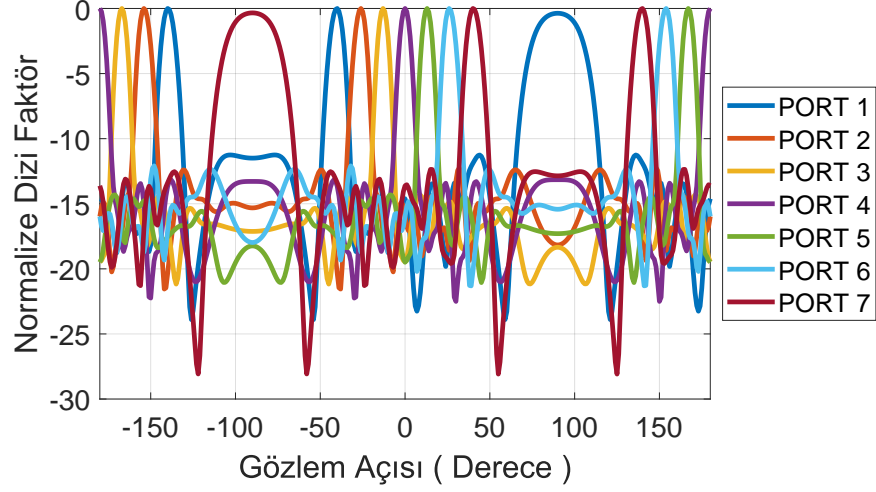
(a)



(b)



(c)



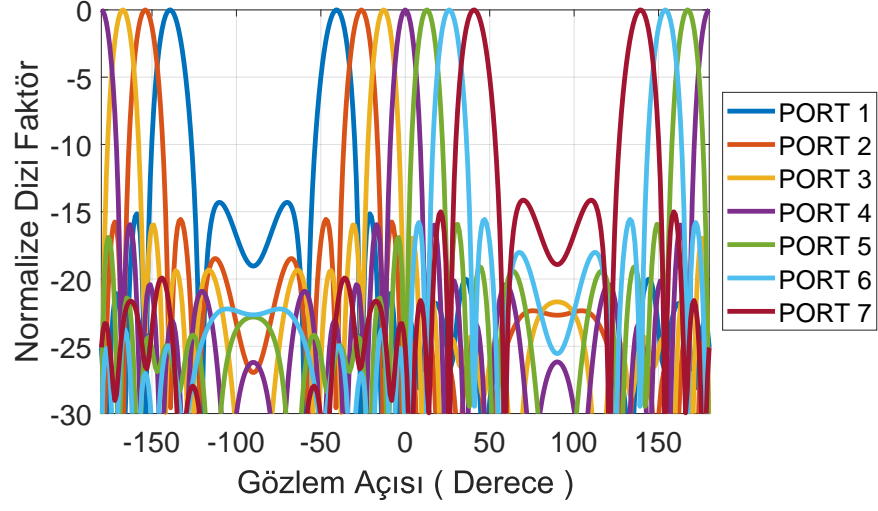
(d)

Şekil 4.25 Lens1 farklı hüzme portlarının uyarılmasıyla simülasyon sonucunda elde edilen a) 6 GHz b) 8 GHz c) 10 GHz d) 12 GHz'deki normalize dizi faktörleri

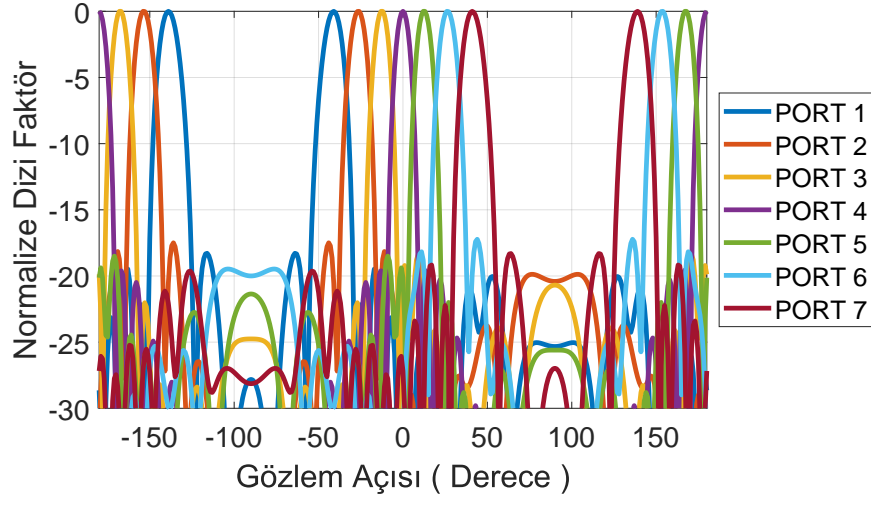
Şekil 4.25'teki şekiller incelendiğinde lensin, 10-12 GHz aralığında gerçek zaman gecikmesi özelliğini sağladığı ancak diğer frekanslarda bu özelliği sağlamadığı görülmektedir. Bu farklılığın nedeni bu lens için tasarlanan faz eşleme hatlarının sadece bu frekans aralığı için uygun genlik ve faz değerlerini dizi anten elemanlarına sağlamasıdır. Hat uzunlukları, lens eşitliklerinin çözümüyle elde edilen faz eşleme hattı uzunlukları yerine 10 GHz'de dizi anten elemanları üzerinde farklı hüzme portları için uygun faz dağılımı elde edilecek şekilde tasarlanmıştır. Dolayısıyla lens, asli özelliği olan gerçek zaman gecikmesi özelliğini sonsuz frekans aralığı için sağlayamamaktadır. Bir diğer husus ise 12 GHz'de anten görünür uzayına yakın bulunan ızgara loblarıdır. Anten görünür uzayı içinde ızgara lob oluşmaması için dizi anten elemanları arasındaki mesafe ve tarama açısı arasındaki ilişkiyi veren 60 numaralı eşitlik kullanıldığında 41° 'lik en yüksek tarama açısı için anten görünür uzayında ızgara lob çıkarmayacak en yüksek frekans değeri 12.07 GHz'dir. Dolayısıyla 12 GHz'de anten görünür uzayı içerisinde ızgara lob oluşmamaktadır. Ancak anten görünür uzayına yakın ızgara loblar gözlemlenmektedir.

Şekil 4.26'da Lens2 için 6-12 GHz arasında 2 GHz'lik örnekleme basamağı ile tüm dizi portlarının ayrı ayrı uyarılması sonucu dizi portları ve hüzme portları arasında elde edilen

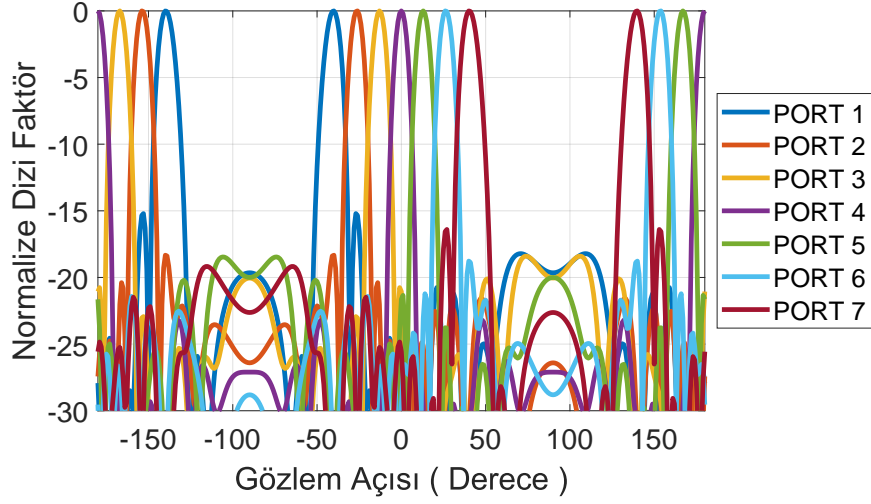
araya girme katsayılarına göre çizilen ve enine ışına yönündeki en yüksek dizi anten kazancına göre normalize edilmiş dizi faktör grafikleri gösterilmiştir.



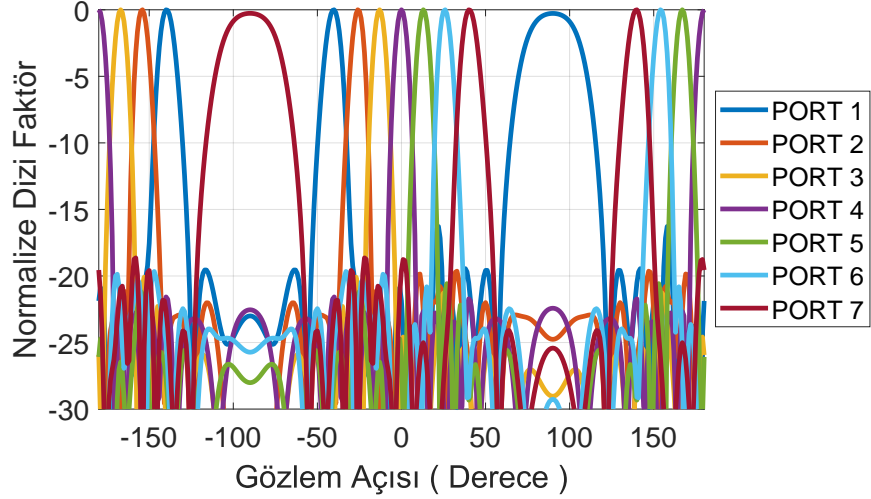
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.26 Lens2 farklı hüzme portlarının uyarılmasıyla simülasyon sonucunda elde edilen a) 6 GHz b) 8 GHz c) 10 GHz d) 12 GHz'deki normalize dizi faktörleri

Şekil 4.26 incelendiğinde, incelenen tüm frekans bileşenleri için lensin, gerçek zaman gecikmesi özelliğini koruyarak çalıştığı görülmektedir. Elde edilen tüm dizi faktörler, ana hüzenin en fazla 12 dB altında yan lob seviyesine sahiptir. Her iki lens sonucunda elde edilen dizi faktörler incelendiğinde, lens tasarım eşitliklerinin çözümü sonucunda elde edilen faz eşleme hattı uzunlukları dikkate alınarak tasarlanan Lens2'nin, 10 GHz'de faz ayarlaması yapılan Lens1'e oranla daha geniş frekans aralığında ve gerçek zaman gecikmesi özelliğini sağlayarak çalıştığı görülmektedir.

Lens çalışma performansını değerlendirebilmek için, dizi anten hüzmesi yönlülüğü, yarı güç hüzme genişliği ve yan lob seviyesi incelenmiştir. Lenslerin hüzme yönlerinin tüm frekans bileşenleri için sabit, 3 dB hüzme genişliklerinin artan frekans değerleri için yükselen dizi anten elektriksel boyutları göz önüne alındığında daha dar ve yan lob seviyelerinin -10 dB altında olması beklenmektedir. Tablo 4.5 ve 4.6'da farklı hüzme portlarının beslenmesi sonucunda oluşan dizi faktör grafiklerinde en yüksek kazançta sahip olan açı değerleri veya bir diğer deyişle hüzme yönleri, derece cinsinden verilmiştir. 5-6 GHz'de Lens1'in çalışmaması nedeniyle Lens1'e ait tablolarda bu satırlar boş bırakılmıştır. Ancak tablolar incelendiğinde diğer frekans bileşenleri için hüzme yönlerinin Lens1 ve Lens2 için tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Hüzme yönleri, beklendiği şekilde sırasıyla 1. hüzme portundan 7. hüzme portuna, -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° , 41° olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 4.5 Lens1 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği açı değeri

Frekans (GHz)	Hüzme Portları (Derece)						
	1	2	3	4	5	6	7
5	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—
7	-41	-26	-13	0	13	26	41
8	-40	-27	-13	0	13	27	40
9	-40	-26	-13	0	13	26	40
10	-40	-26	-13	0	13	26	40
11	-41	-26	-13	0	13	26	41
12	-40	-26	-13	0	13	26	40

Tablo 4.6 Lens2 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği açı değeri

Frekans (GHz)	Hüzme Portları (Derece)						
	1	2	3	4	5	6	7
5	-41	-27	-13	0	13	27	41
6	-41	-26	-13	0	13	26	41
7	-40	-26	-12	0	12	26	40
8	-41	-26	-12	0	12	26	41
9	-41	-26	-13	0	13	26	40
10	-40	-26	-13	0	13	26	41
11	-41	-26	-13	0	13	26	41
12	-40	-26	-13	0	13	26	40

Tablo 4.7 ve 4.8'de sırasıyla Lens1 ve Lens2 için farklı hüzme portlarının beslenmesi sonucunda elde edilen yarı güç hüzme genişlikleri verilmiştir. Yarı güç hüzme genişliğinin, frekans arttıkça düşen dalga boyu sonucunda fiziksel boyutları sabit ancak elektriksel boyutları büyüyen dizi anten için düşmesi beklenmektedir. Her iki lenste de bu beklenti karşılanmaktadır. Lens1 ve Lens2 için elde edilen veriler 8-12 GHz aralığında oldukça tutarlıdır. Ancak Lens1'in çalışmadığı aralık olan 5-6 GHz bandına yaklaşıldığında, 7 GHz'de Lens1'in Lens2'ye göre daha geniş yarı güç hüzme genişliğine sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, yüksek doğruluklu genlik ve faz dağılımının 7 GHz'de Lens1 dizi anten elemanlarına sağlanamamasıdır.

Tablo 4.7 Lens1 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği

Frekans (GHz)	Hüzme Portları (Derece)						
	1	2	3	4	5	6	7
5	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—
7	18	17	13	14	13	20	19
8	12	10	10	10	10	10	12
9	11	9	9	8	9	9	12
10	10	8	8	8	8	8	9
11	9	8	8	8	8	8	9
12	9	8	7	8	8	7	9

Tablo 4.8 Lens2 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği

Frekans (GHz)	Hüzme Portları (Derece)						
	1	2	3	4	5	6	7
5	17	14	13	12	13	14	17
6	14	12	10	10	12	12	14
7	12	12	9	10	9	9	12
8	11	10	9	8	9	9	11
9	10	9	8	8	8	9	10
10	9	8	8	8	8	7	9
11	10	8	8	8	8	8	10
12	9	8	8	8	8	7	9

Tablo 4.9 ve 4.10'da beslenen farklı hüzmeye portları için Lens1 ve Lens2'ye ait yan lob seviyeleri verilmiştir. Her iki lensin de 8-12 GHz aralığında -12 dB'nin altında yan lob seviyesine sahip olduğu görülmektedir. Ancak 7 GHz'de Lens1, Lens2'den 10 dB daha

yüksek yan lob seviyesine sahiptir. Bu fark, lenslerin dizi anten elemanlarına sağladıkları genlik ve faz dağılımlarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır.

Tablo 4.9 Lens1 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yan lob seviyesi

Frekans (GHz)	Hüzme Portları (dB)						
	1	2	3	4	5	6	7
5	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—
7	5.6	5	5.3	6.4	5.7	5	6
8	12.46	12.64	11	12	10.84	12.6	12.2
9	16	18.2	14.7	17.3	15.2	18.27	16
10	15.7	18.7	22	26.3	20.8	18.5	16.2
11	15.8	17.5	16.3	16.9	15.5	17.8	16.3
12	11.2	12.4	14.4	13.3	14.3	12.3	12.3

Tablo 4.10 Lens2 tasarımı için simülasyonla elde edilen dizi anten hüzmelerinin yan lob seviyesi

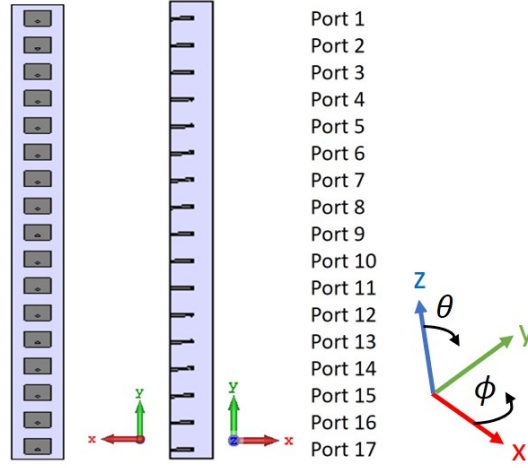
Frekans (GHz)	Hüzme Portları (dB)						
	1	2	3	4	5	6	7
5	13.67	13.52	12.64	14	13.24	13.88	13.8
6	14.46	15.4	16	15.42	15.94	15.8	15
7	14.32	15.6	14.3	15.6	15.94	16	14.5
8	18	17	18.4	19.8	18.5	17.3	18.3
9	15.3	19.3	20.46	19.8	19.2	18.27	16
10	15.35	17.54	18.4	23.4	19.8	18.87	19.2
11	19	20	19	18.2	18	20.5	19.8
12	16.2	20	19	21.7	21.45	21	18.7

5. ANTEN DİZİSİ TASARIMLARI

Lens tasarımlarının çalışma performansını değerlendirmek için lens hüzme portları ve lens dizi portları arasındaki araya girme katsayıları kullanılarak dizi faktör hesabı yapılmaktadır. Eş elemanlı ve eleman mesafesi sabit olan dizi anten için uzak alanda oluşan alan, tek bir dizi anten elemanının alanı ile dizi faktör çarpımına eşittir [31]. Dolayısıyla Bölüm 4.5.11.'de Lens1 ve Lens2 için hesaplanan dizi faktörlerin, anten uzak alanının hesaplanabilmesi için birim eleman alanı ile çarpılması gerekmektedir. Bu çalışmada, Lens1 ile kullanılmak üzere üç farklı anten dizisi tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan tüm dizi antenler, 17 eş eleman ve sabit dizi anten elemanı mesafesine (15 mm) sahiptir. 10 GHz merkez frekansında %7.5 bant genişliğinde çalışan dizi anten ve 10 GHz merkez frekansında %1 bant genişliğinde çalışan seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile 8-12 GHz frekans aralığında yaklaşık %40 bant genişliğinde çalışan lotus dizi anten tasarımı yapılmıştır. Dizi anten tasarımında, kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0013 olan 1.574 mm kalınlıklı ARLON IsoClad 917, seri beslemeli Chebyshev dizi anten tasarımında kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.0013 olan 0.508 mm kalınlıklı ROGERS AD255C, lotus dizi anten tasarımında kayıp tanjantı 10 GHz'de 0.039 olan 1 mm kalınlıklı FR-4 taban malzeme kullanılmıştır. Tüm dizi anten çalışmalarındaki anten portları, Lens1 ve Lens2 çıkışında aynı numaraya karşılık gelen dizi portlarından elde edilen genlik ve faz bilgisiyle uyarılmaktadır. Bu bölümde tasarlanan üç farklı dizi antenin, daha sonra Bölüm 6.'da Lens1 ile birleştirilerek uzak alan davranışı incelenmiştir.

5.1. Dizi Anten Tasarımı

1.574 mm kalınlıklı ARLON IsoClad 917 taban malzeme üzerinde, 17 eş eleman ve sabit dizi anten elemanı mesafesine (15mm) sahip dizi anten tasarımı yapılmıştır. Şekil 5.1'de dizi anten ve dizi anten elemanlarının port numaraları gösterilmiştir. Burada kullanılan 1'den 17'ye kadarki port numaraları Alt Bölüm 4.5.7. ve sonraki alt bölümlerde kullanılan dizi port numaralarıyla aynıdır. Dizi anten, alt kartta bulunan 50 Ω 'luk hatların pin yoluyla dizi anteni uyarmasıyla beslenmektedir. Besleme kartı, Lens1 çıkışındaki dizi portlarına giden hatların ve lens kartının kesilmesiyle elde edilmiştir. Dolayısıyla besleme kartı, lens kartı ile aynı elektriksel özelliklere sahip ve anten kartından farklıdır.

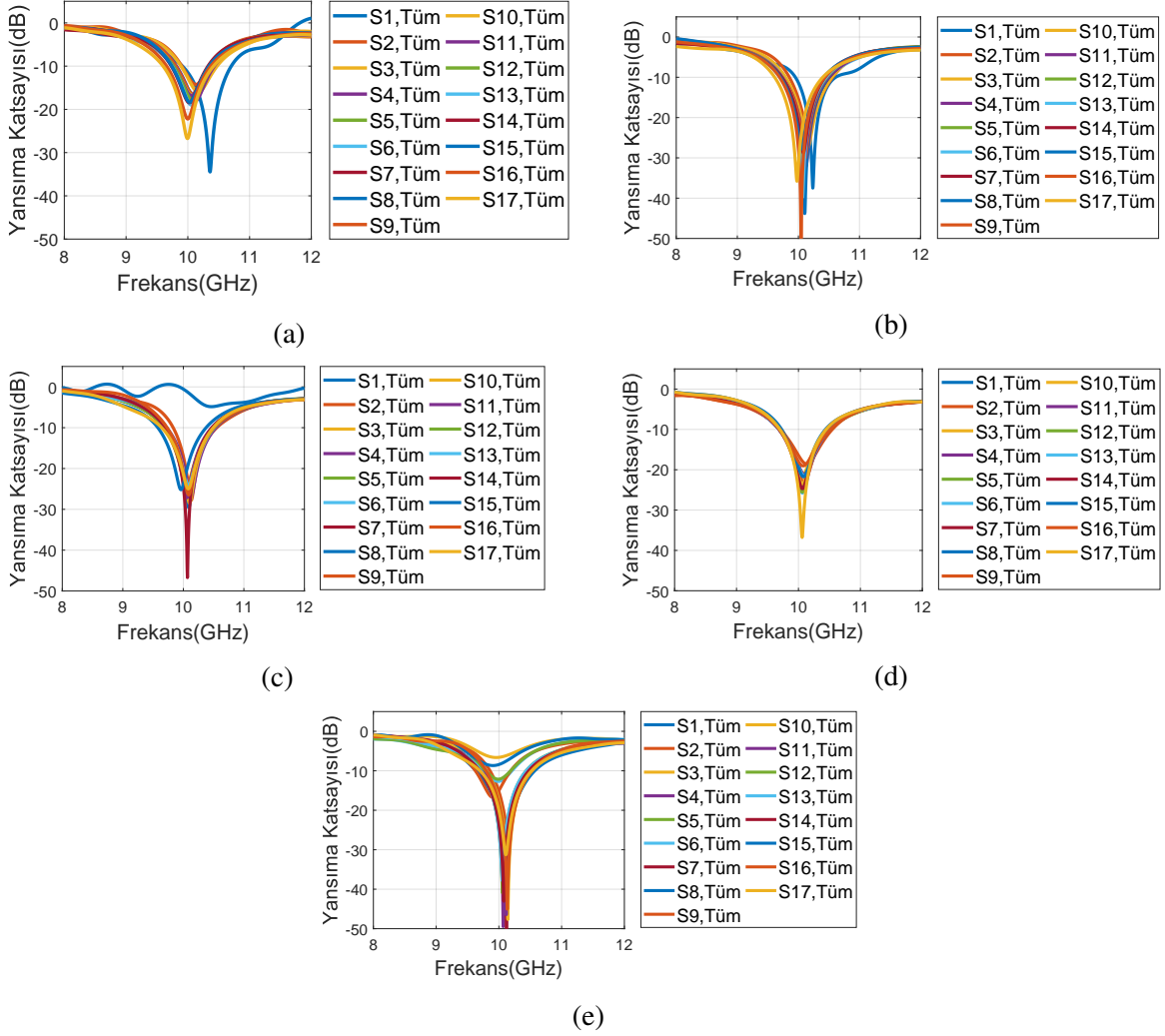


Şekil 5.1 a) Dizi antenin önden görünümü, b) Dizi antenin arkadan görünümü ve port numaraları

5.1.1. Yansıma Katsayısı Sonucu

Şekil 5.2’de Lens1’in 1.hüzme portundan 4. hüzme portuna kadar ki hüzme portlarının ayrı ayrı ve 7 hüzme portunun aynı anda beslenmesiyle lens dizi portlarında oluşan genlik ve faz bilgisinin, dizi anteni uyarması sonucunda elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Benzer sonuçlar elde edildiğinden grafik yoğunluğunu azaltmak için Lens2’ye ait yansıma katsayısı grafikleri paylaşılmamıştır. Grafiklerde etiket bölümünde gösterilen grafik isimlendirmelerindeki Tüm ifadesi, Lens1 çıkışındaki dizi portlarından elde edilen genlik ve faz bilgilerinin, dizi anten portlarını aynı anda beslemesini ifade etmektedir. Etiket kısmında gösterilen 1’den 17’ye kadar ki numaralandırmalar, dizi portu numaralarını göstermektedir. Dizi antenin, Lens1 çıkışındaki iletim hatları ve besleme tipiyle uyumlu olarak çalışmasının bir sonucu olarak yansıma katsayısının ilgili frekansta -10 dB’nin altında olması beklenmektedir. Şekil 5.2’deki grafikler incelendiğinde, incelenen tüm hüzme ve dizi portları için bu gerekliliğin sağlandığı görülmüştür. En dışta kalan dizi anten elemanlarına karşılık gelen 1 ve 17 numaralı dizi anten elemanları için gözlenen bozulma olağan bir bozulmadır. Dizi anten tasarımı yapılırken özellikle dış elemanlar için yeniden uyumlama yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, yeniden uyumlama tüm hüzme

portlarının beslenmesi sonucunda yapılmıştır. Gözlenen bozulmanın baskın bozucu bir etkisi yoktur.

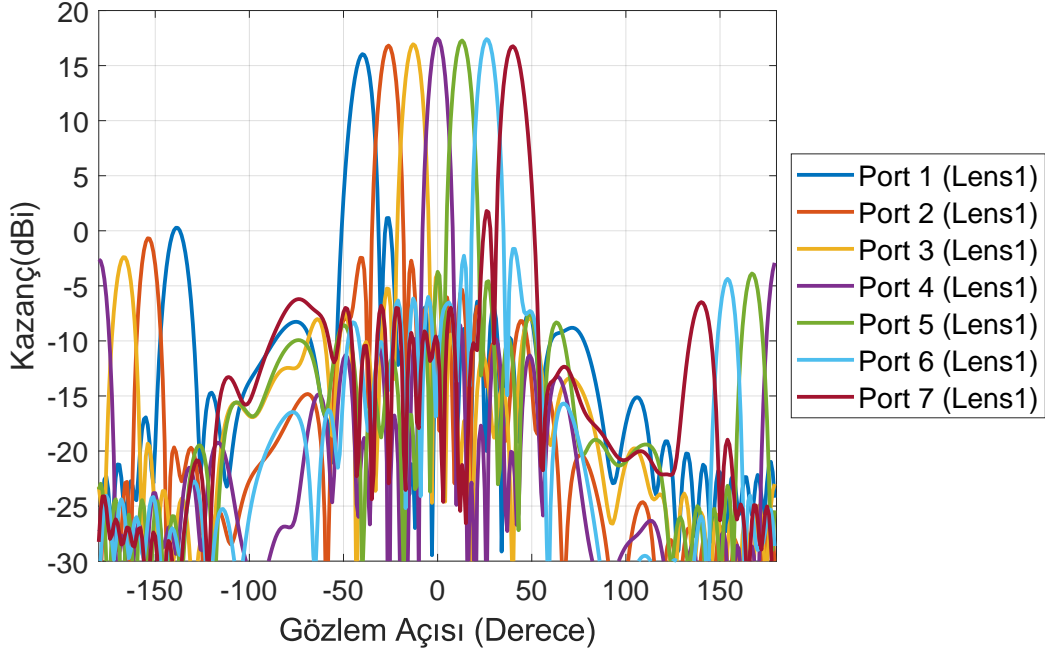


Şekil 5.2 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) tüm hüzmeye portları uyarıldığında lens çıktıkları ile beslenen dizi antenin yansıma katsayıları (dB)

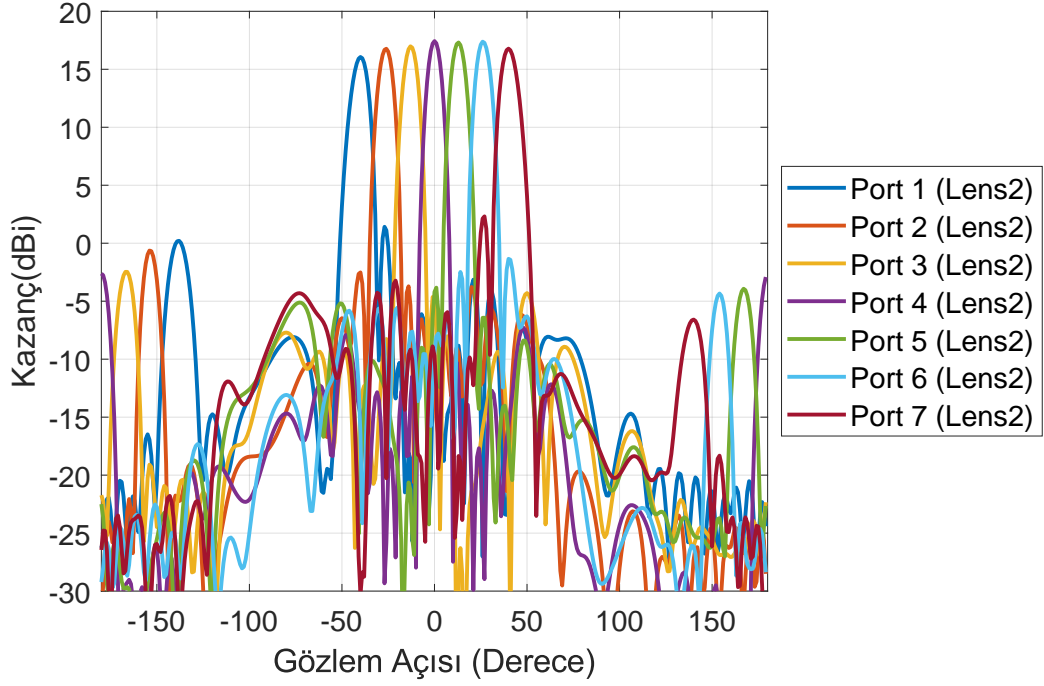
5.1.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri

Şekil 5.3'te Lens1 ve Şekil 5.4'te Lens2 hüzmeye portlarının ayrı ayrı uyarılması sonucunda, lens dizi portlarında elde edilen genlik ve faz bilgisiyle uyarılan dizi antene ait yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışınım örüntüleri gösterilmiştir. İki grafik de incelendiğinde, Lens1 ve Lens2 için tüm sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Her iki lens de 10 GHz'de benzer performans sergilediği için bu sonuç beklenen bir sonuçtur.

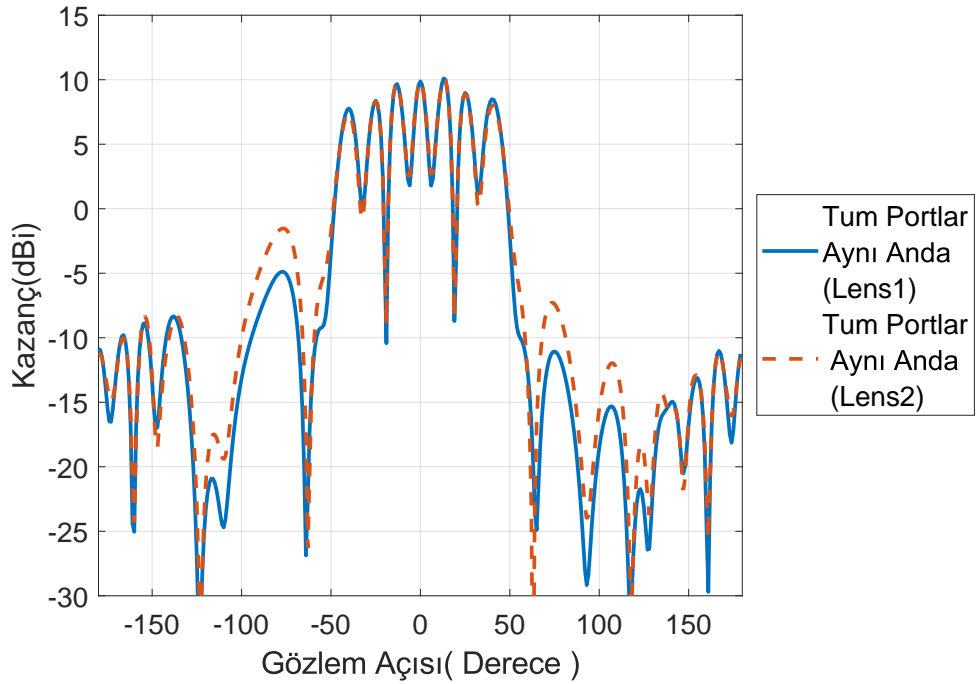
Her iki lens için de elde edilen uzak alan ışıma örüntülerinde, hüzme portlarının ayrı ayrı beslendiği durumda, merkez hüzme portu olan 4. portun uyarılmasıyla en yüksek kazanç olan 17.4 dBi, en dışta kalan 1 ve 7 numaralı hüzme portlarının uyarılmasıyla en düşük kazanç olan 16 dBi elde edilmiştir. Merkez hüzme portundan dış hüzme portlarına gittikçe, dizi anten hüzmesini yönlendirmek için gerekli dizi anten elemanları arasındaki faz farkı artmaktadır. Artan faz farkı ve hüzme kontürü üzerindeki hizalı hüzme portu eğim açısı dolayısıyla hata miktarı artmaktadır. Yan duvar yansımaları artan lenste faz farkı hatasına daha yatkın olan dış hüzme portlarında, merkez hüzme portuna oranla daha düşük kazanç değeri gözlemlenmesi beklenen bir sonuçtur.



Şekil 5.3 Dizi antenin Lens1 hüzme portu çıktılarıyla uyarılması sonucunda yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışıma örüntüsü



Şekil 5.4 Dizi antenin Lens2 hüme portu çıktılarıyla uyarılması sonucunda yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü

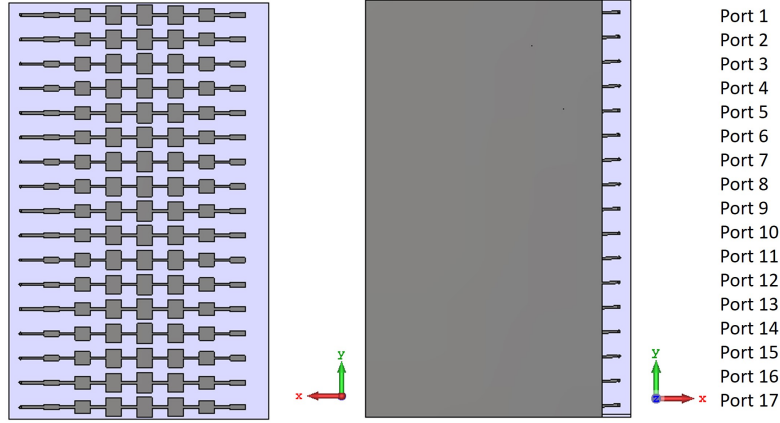


Şekil 5.5 Dizi antenin Lens1 ve Lens2'nin tüm hüme portları aynı anda uyarıldığında elde edilen çıktılarıyla uyarılması sonucunda yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü

Şekil 5.5'te tüm hüzme portlarının birlikte beslenmesi sonucunda elde edilen anten ışıma örüntüsünde gözlenen hüzme yönleri, hüzme portlarının ayrı ayrı beslenmesi sonucunda gözlenen hüzme yönleri ile tutarlıdır. Tüm hüzme portları aynı anda beslendiğinde elde edilen anten örüntüsü en yüksek kazanç değerleri, hüzme portlarının ayrı ayrı beslenmesi sonucunda elde edilen anten örüntüsü en yüksek kazanç değerlerinden 7-8 dB daha düşüktür. Anten hüzme genişliğinin artması dolayısıyla, bu kazanç düşüşü beklenen bir düşüştür.

5.2. Seri Beslemeli Chebyshev Dizi Anten Tasarımı

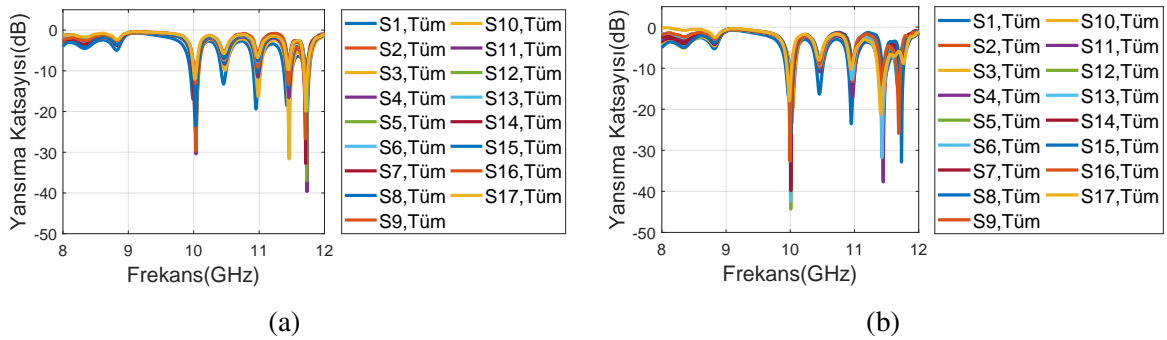
10 GHz merkez frekansında, -20 dB yan lob seviyesi ve 15 dBi dizi anten kazancına sahip olacak şekilde yedi adet dizi elemanının seri besleme yoluyla beslenmesi sonucunda, seri beslemeli Chebyshev dizi anten tasarlanmıştır. -20 dB yan lob seviyesinin elde edilebilmesi için seri beslemeli dizi antenin her bir elemanının genişliği, ilgili Chebyshev katsayısıyla bağlantılı olarak ayarlanmıştır [32]. Seri beslemeli dizi anten elemanlarının eş fazlı ışıyabilmesi için elemanlar arasındaki elektriksel mesafenin λ_g 'ye eşit olması gerekmektedir [32]. Elemanlar arasındaki mesafe ve eleman genişlikleri optimize edilerek tasarım yapılmıştır. Tasarlanan tek bir seri beslemeli dizi antenin y ekseninde boyunca 17 adet, eş eleman mesafesinde konumlandırılmasıyla, yanca ve yükseliş ekseninde yönlü seri beslemeli Chebyshev anten dizisi elde edilmiştir. Şekil 5.6'da, dizi anten ve dizi anten portlarının numaralandırılması gösterilmiştir. Besleme kartı, Lens1 çıkışındaki dizi port bölümünün kesilmesiyle elde edilmiştir. Bu portlar, Lens1 hüzme portlarının aynı anda ve farklı zamanlarda beslenmesi sonucunda elde edilen faz ve genlik bilgisi kullanılarak uyarılmaktadır. Uyarılan dizi portları, 50 Ω 'luk iletim hattı ucundaki pin vasıtasıyla dizi anteni uyarmaktadır.

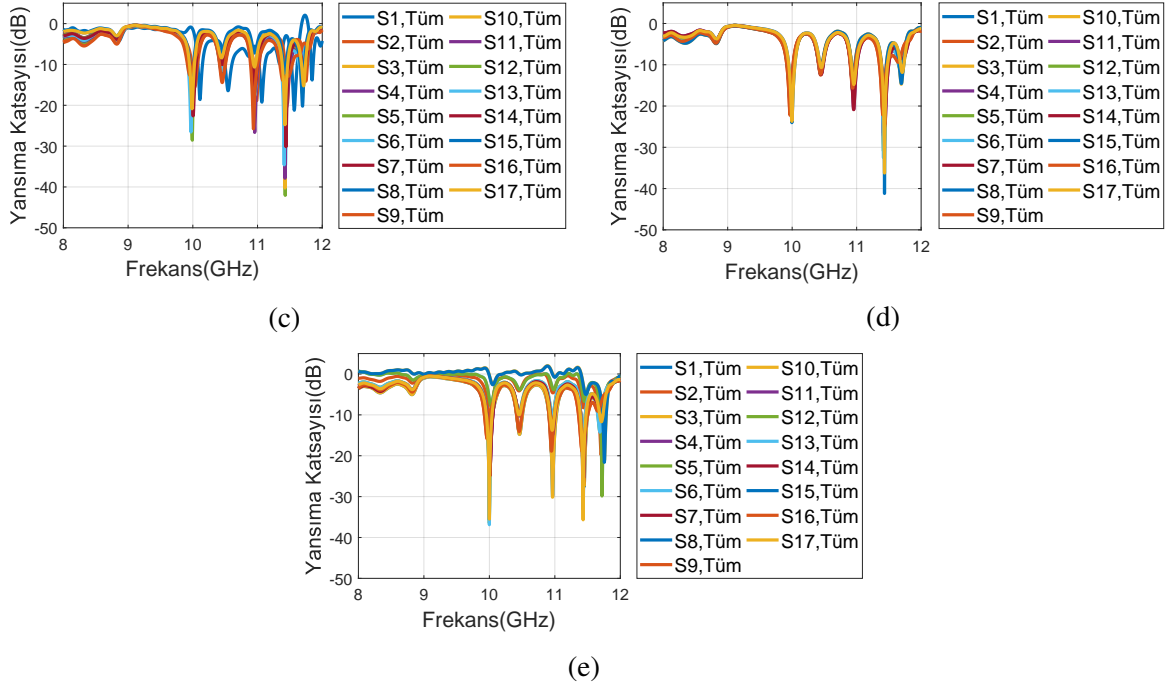


Şekil 5.6 a) Seri Beslemeli Chebyshev dizi antenin önden görünümü, b) Seri Beslemeli Chebyshev dizi antenin arkadan görünümü ve port numaraları

5.2.1. Yansıma Katsayısı Sonucu

Şekil 5.7’de Lens 1’in 1. hüzmeye portundan 4. hüzmeye portuna kadar ki hüzmeye portlarının ayrı ayrı ve 7 hüzmeye portunun aynı anda beslenmesiyle lens dizi portlarında oluşan genlik ve faz bilgisinin, seri beslemeli Chebyshev dizi anteni uyarması sonucunda elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Hüzmeye portlarının ayrı ayrı beslendiği tüm sonuçlarda, yansıma katsayıları 10 GHz’de -10 dB altındadır. Dolayısıyla seri beslemeli Chebyshev dizi antenin, besleme hattı ve pin geçişiyle uyumlu olarak çalıştığı gözlemlenmiştir. Hüzmeye portlarının aynı anda beslendiği durumda, en dış dizi portuna karşılık gelen 1 numaralı dizi portu için yansıma katsayısı 10 GHz’de -10 dB üzerindedir. Ancak ışınma örüntüsünde bozulmaya sebep olmamaktadır.





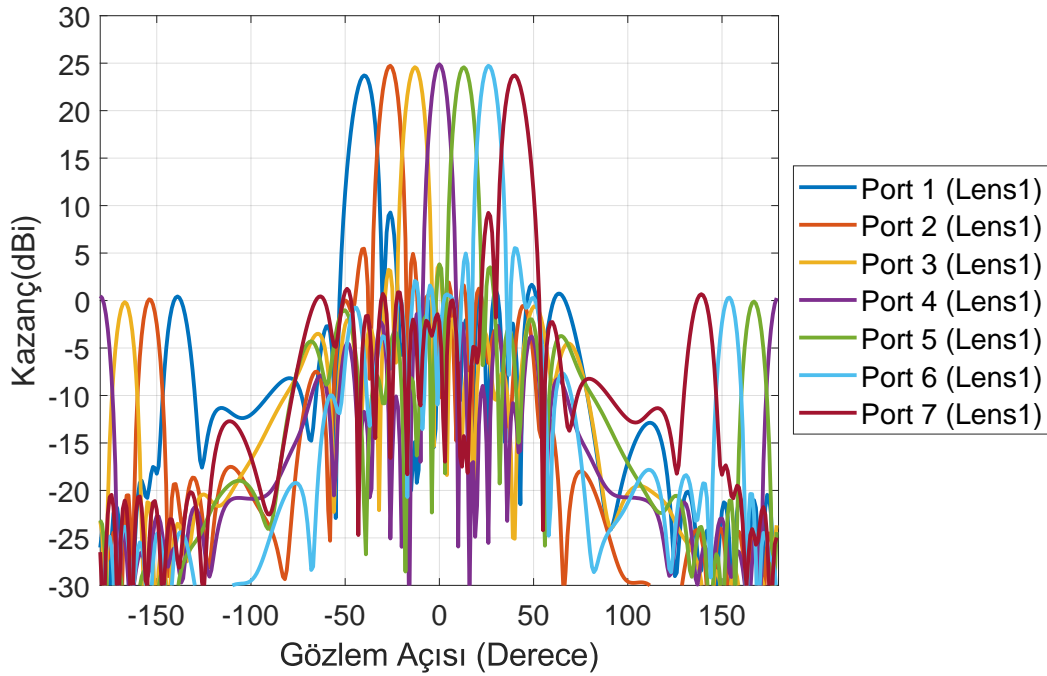
Şekil 5.7 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) tüm hüzmeye portları uyarıldığında lens çıktıları ile beslenen seri beslemeli Chebyshev dizi antenin yansıma katsayıları (dB)

5.2.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri

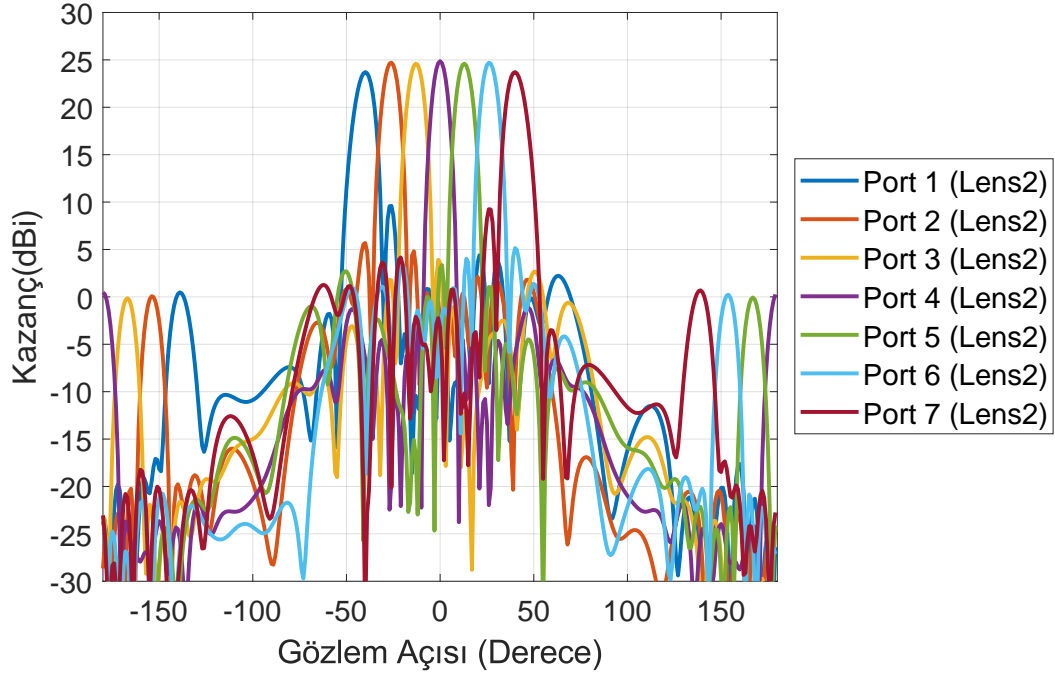
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da Lens1 ve Lens2 hüzmeye portlarının ayrı ayrı beslenmesi sonucunda, lens dizi portlarında elde edilen genlik ve faz bilgisiyle uyarılan seri beslemeli Chebyshev dizi antenin yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, Lens1 ve Lens2 için tüm sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Her iki lens de 10 GHz’de benzer performans sergilediği için bu sonuç beklenen bir sonuçtur. Her iki lens için de elde edilen uzak alan ışınma örüntülerinde, hüzmeye portlarının ayrı ayrı beslendiği durumda, merkez hüzmeye portu olan 4. portun uyarılmasıyla en yüksek kazanç olan 24.86 dBi, en dışta kalan 1 ve 7 numaralı hüzmeye portlarının uyarılmasıyla en düşük kazanç olan 23.7 dBi elde edilmiştir. Merkez hüzmeye portundan dış hüzmeye portlarına gidildikçe, dizi anten hüzmelerini yönlendirmek için gerekli dizi anten elemanları arasındaki faz farkı artmaktadır. Artan faz farkı ve hüzmeye kontürü üzerindeki hizalı hüzmeye portu eğim açısı dolayısıyla hata miktarı artmaktadır. Yan duvar yansıması artan lenste faz farkı hatasına daha yatkın olan dış hüzmeye portlarında, merkez

hüzme portuna oranla daha düşük kazanç değeri gözlemlenmesi beklenen bir sonuçtur.

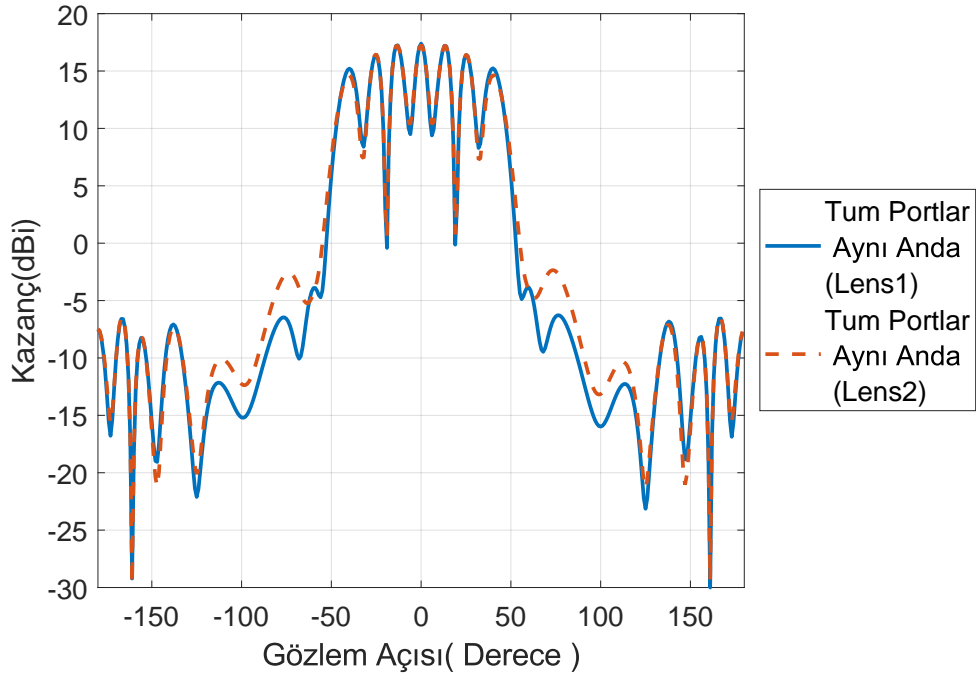
Şekil 5.10’da tüm hüzme portlarının birlikte beslenmesi sonucunda elde edilen anten ışıma örüntüsünde gözlenen hüzme yönleri, hüzme portlarının ayrı ayrı beslenmesi sonucunda gözlenen hüzme yönleri ile tutarlıdır. Tüm hüzme portları aynı anda beslendiğinde elde edilen anten örüntüsü en yüksek kazanç değerleri, hüzme portlarının ayrı ayrı beslenmesi sonucunda elde edilen anten örüntüsü en yüksek kazanç değerlerinden 7-8 dB daha düşüktür. Anten hüzme genişliğinin artması dolayısıyla, bu kazanç düşüşü beklenen bir düşüştür.



Şekil 5.8 Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin Lens1 çıktıları için tüm portlar ayrı ayrı beslendiğindeki yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışıma örüntüsü



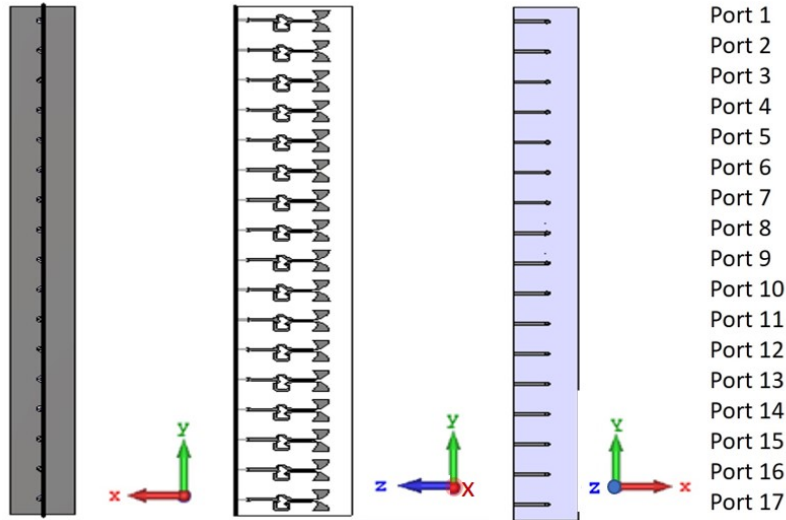
Şekil 5.9 Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin Lens2 çıktıları için tüm portlar ayrı ayrı beslendiğindeki yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



Şekil 5.10 Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin Lens1 ve Lens2 çıktıları için tüm portlar aynı anda beslendiğindeki yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

5.3. Lotus Dizi Anten Tasarımı

Lotus dizi anten, dengesiz moda sahip bir pin vasıtasıyla beslenen 17 adet dengeli vivaldi veya lotus antenin eş eleman mesafesinde x eksenini boyunca konumlandırılmasıyla elde edilmektedir. Lens1 çıkışındaki dizi port bölümünün kesilmesiyle elde edilen besleme kartı üzerindeki 50 Ω 'luk besleme hatları, pin vasıtasıyla üst anten kartı üzerindeki anten dizisi elemanlarına bağlanmaktadır. Pindeki dengesiz mod ile lotus antendeki dengeli modun dönüşümü için pin ve anten arasında balun yapısı kullanılmıştır. Dizi anten 8-12 GHz aralığında çalışacak şekilde 1 mm kalınlıklı FR-4 taban malzeme üzerinde tasarlanmıştır. Dizi antenin en verimli çalıştığı frekans aralığı 9-11 GHz'dir.

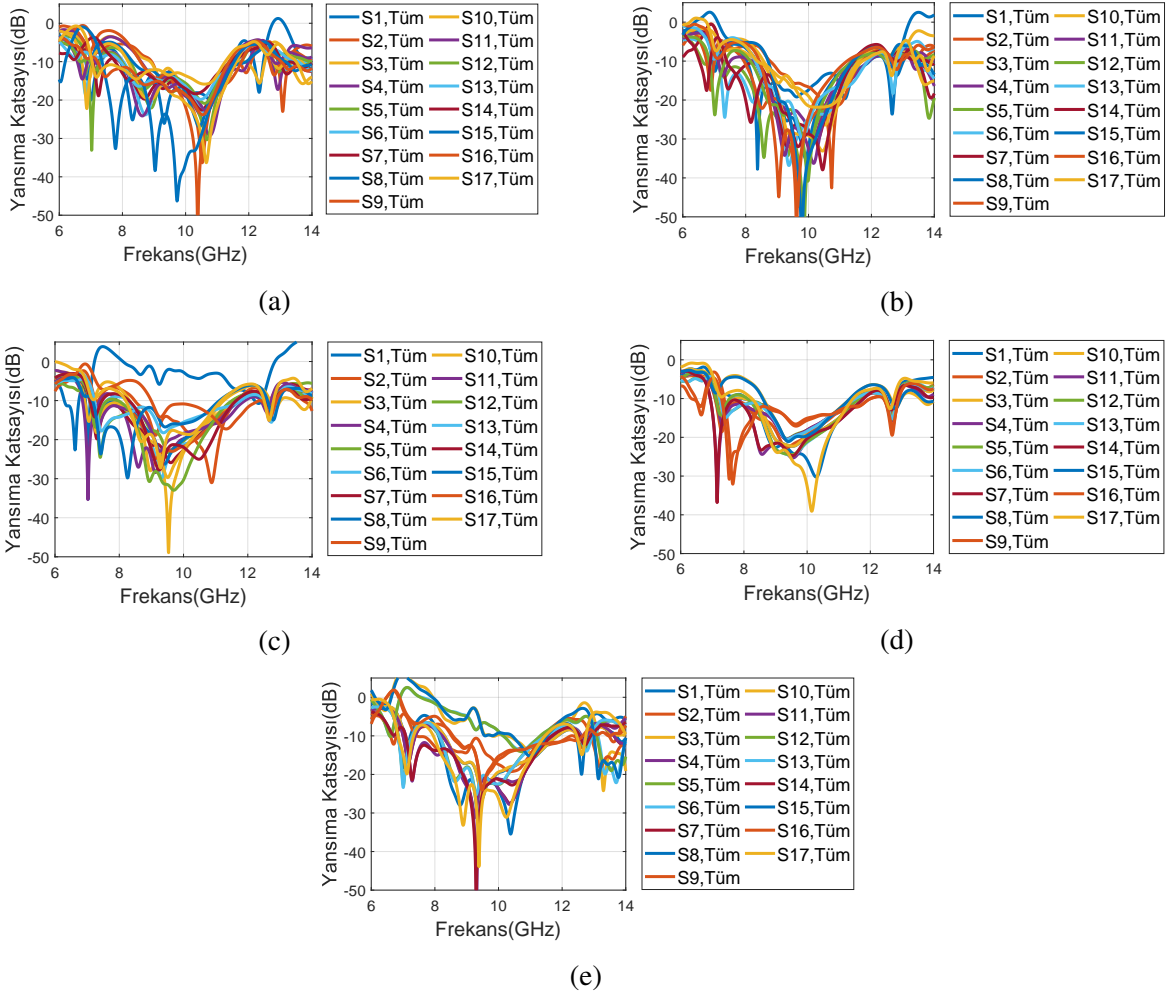


Şekil 5.11 a) Lotus dizi antenin önden görünümü, b) Lotus dizi antenin yandan görünümü, c) Lotus dizi antenin arkadan görünümü ve port numaraları

5.3.1. Yansıma Katsayısı Sonucu

Şekil 5.12'de Lens1'in 1. hüzmeye portundan 4. hüzmeye portuna kadar ki hüzmeye portlarının ayrı ayrı ve 7 hüzmeye portunun aynı anda beslenmesiyle lens dizi portlarında oluşan genlik ve faz bilgisinin, lotus dizi anteni uyarması sonucunda elde edilen frekansa bağlı yansıma katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Hüzmeye portlarının ayrı ayrı beslendiği tüm sonuçlarda, yansıma katsayıları 9-11 GHz aralığında -10 dB altındadır. Bant başı ve sonuna karşılık gelen 8 ve 12 GHz'deki anten performansı, merkez frekans aralığı 9-11 GHz'e göre daha yüksek

yansıma katsayısına sahiptir. Tüm hüzme portlarının aynı anda beslendiği durumda elde edilen yansıma katsayısı grafikleri diğer grafiklere göre daha çok bozulmaktadır. Bu bölümde grafik yükünü arttırmamak adına 8, 9, 11 ve 12 GHz’de lens çıkışında elde edilen sinyalin genlik ve faz bilgisiyle uyarılan dizi antene ait yansıma katsayısı grafikleri gösterilmemiştir. Ancak bu grafikler de 10 GHz’de elde edilen grafikler ile tutarlıdır.



Şekil 5.12 Lens1 a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) tüm hüzme portları uyarıldığında 10 GHz’deki lens çıktıkları ile beslenen lotus dizi antenin yansıma katsayıları (dB)

5.3.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri

Şekil 5.13 ile Şekil 5.23 arasındaki tüm görseller, Lens1 ve Lens2 için lotus dizi antenin, lens dizi port çıkışlarındaki genlik ve faz bilgisiyle uyarılması sonucunda sırasıyla 8, 9, 10,

11 ve 12 GHz’de elde edilen yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışına örüntülerini göstermektedir.

8 GHz için Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 incelendiğinde, Lens1 için Port1’den Port4’e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 10.14 dBi, 9.34 dBi, 10.46 dBi ve 8.6 dBi, Lens2 için Port1’den Port4’e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 13.3 dBi, 13.17 dBi, 13.37 dBi ve 14.07 dBi’dir. Lens1 için Port1’den Port4’e kadar ki anten hüzmeleri yönleri -35° , -24° , -8° ve 0° ’yken Lens2 için Port1’den Port4’e kadar ki anten hüzmeleri yönleri -37° , -24° , -13° ve 0° ’dir. İki lensten elde edilen en yüksek kazanç değerleri arasında farklı hüzmeleri portları için 3.2 ile 5.4 dB arasında bir fark gözlemlenmiştir. Anten hüzmeleri yönleri Lens1 için 1° ile 6° , Lens2 için 1° ile 4° arasında beklenen açı değerinden sapmıştır.

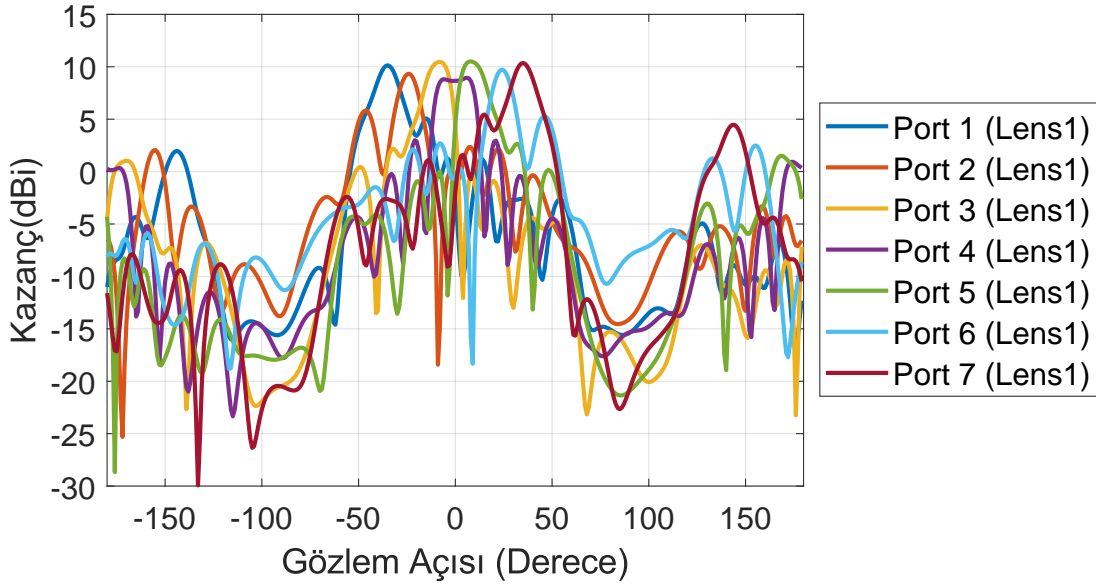
9 GHz için Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 incelendiğinde, Lens1 için Port1’den Port4’e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 12.53 dBi, 13.2 dBi, 13.24 dBi ve 12.6 dBi, Lens2 için Port1’den Port4’e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 14.11 dBi, 14.05 dBi, 14.1 dBi ve 13.8 dBi’dir. Lens1 için Port1’den Port4’e kadar ki anten hüzmeleri yönleri -37° , -25° , -13° ve 0° ’yken Lens2 için Port1’den Port4’e kadar ki anten hüzmeleri yönleri -38° , -25° , -13° ve 0° ’dir. İki lensten ayrı ayrı elde edilen en yüksek kazanç değerleri arasında 0.8 ile 1.5 dB arasında bir fark gözlemlenmiştir. Anten hüzmeleri yönleri Lens1 için 1° ile 4° , Lens2 için 1° ile 3° arasında beklenen açı değerinden sapmıştır. 9 GHz’de Lens1’in Lens2’ye göre daha idealden uzak bir eğri faz eğrisi oluşturması dolayısıyla Lens1’le beslenen anten dizisinin, Lens2 ile beslenen anten dizisine göre daha geniş hüzmeleri genişliğine sahip olması dolayısıyla daha düşük anten kazancına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

10 GHz için Şekil 5.17 ve Şekil 5.18 incelendiğinde, Lens1 ve Lens2 için Port1’den Port4’e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları, sırasıyla, 14.65 dBi, 14.63 dBi, 14.14 dBi ve 14.41 dBi’dir. Lens1 ve Lens2 için Port1’den Port4’e kadar ki anten hüzmeleri yönleri -41° , -26° , -13° ve 0° ’dir. Her iki lensten elde edilen sonuçlar birbirleriyle tutarlıdır. Dizi anten hüzmeleri beklenen açı değerlerinde sapma olmadan oluşmaktadır. Şekil 5.19’da tüm hüzmeleri portları aynı anda uyarıldığında elde edilen uzak alan ışına örüntüsündeki en yüksek

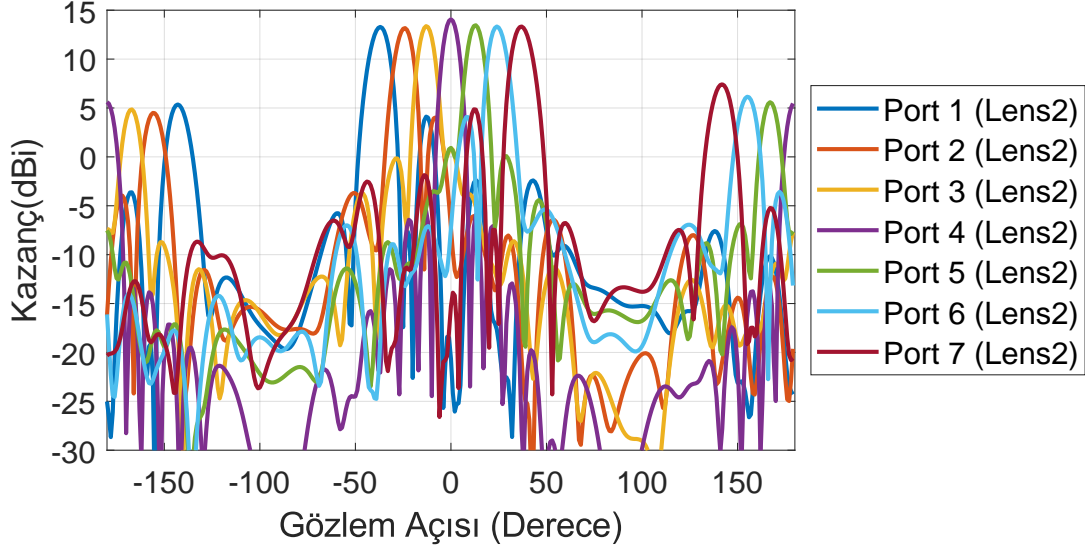
kazanç yönleri, hüzme portları ayrı ayrı uyarıldığında elde edilen en yüksek kazanç yönleri ile tutarlıdır. Tüm hüzme portları aynı anda beslendiğinde 7.5 ile 8.5dB arasında tüm hüzme yönlerinde kazanç düşüşü görülmüştür. Anten hüzme genişliğinin artması dolayısıyla, bu kazanç düşüşü beklenen bir düşüştür.

11 GHz için Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 13.17 dBi, 13.15 dBi, 12.5 dBi ve 12.6 dBi'dir. Lens2 için Port1'den Port4'e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 13.851 dBi, 13.61 dBi, 12.93 dBi ve 12.93 dBi'dir. Lens1 için Port1'den Port4'e kadar ki anten hüzmesi yönleri -43° , -28° , -14° ve 0° 'yken Lens2 için Port1'den Port4'e kadar ki anten hüzmesi yönleri -43° , -27° , -14° ve 0° 'dir. İki lensten ayrı ayrı elde edilen en yüksek kazanç değerleri arasında 0.3 ile 0.6 dB arasında bir fark gözlemlenmiştir. Anten hüzmesi yönleri her iki lens için de 1° ile 2° arasında beklenen açı değerinden sapmıştır. 11 GHz'de yakın bir genlik ve faz dağılım performansına sahip olan Lens1 ve Lens2'nin, beklendiği gibi benzer ışınma örüntüleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Her iki lens için de elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, 10 GHz'de elde edilen değerlere göre daha düşük olmasının nedeni anten verimliliğinin 11 GHz ve 12 GHz'de 10 GHz'e göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Lens1 ve Lens2 kullanılarak elde edilen dizi anten hüzme yönleri, birbirleriyle tutarlılık göstermektedir.

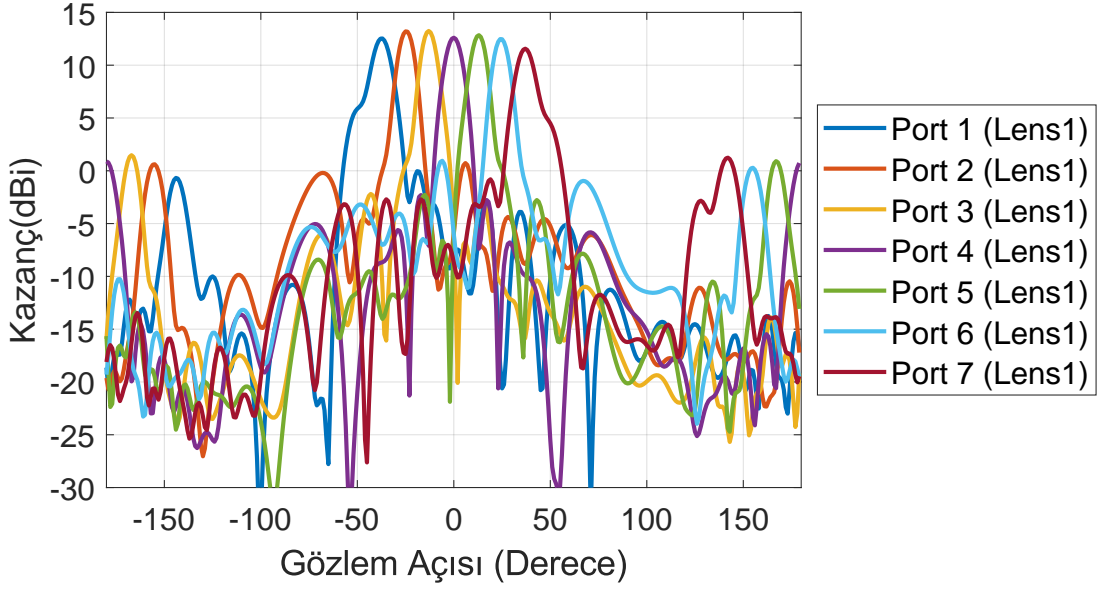
12 GHz için Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 8.5 dBi, 10.45 dBi, 10.36 dBi ve 8.9 dBi'dir. Lens2 için Port1'den Port4'e kadar ki en yüksek dizi anten kazançları sırasıyla, 10.9 dBi, 13.4 dBi, 11.6 dBi ve 11.2 dBi'dir. Lens1 için Port1'den Port4'e kadar ki anten hüzmesi yönleri -47° , -32° , -16° ve 0° 'yken Lens2 için Port1'den Port4'e kadar ki anten hüzmesi yönleri -46° , -29° , -13° ve 0° 'dir. İki lensten ayrı ayrı elde edilen en yüksek kazanç değerleri arasında 1.3 ile 3 dB arasında bir fark gözlemlenmiştir. Anten hüzmesi yönleri her iki lens için de 2° ile 6° arasında beklenen açı değerinden sapmıştır.



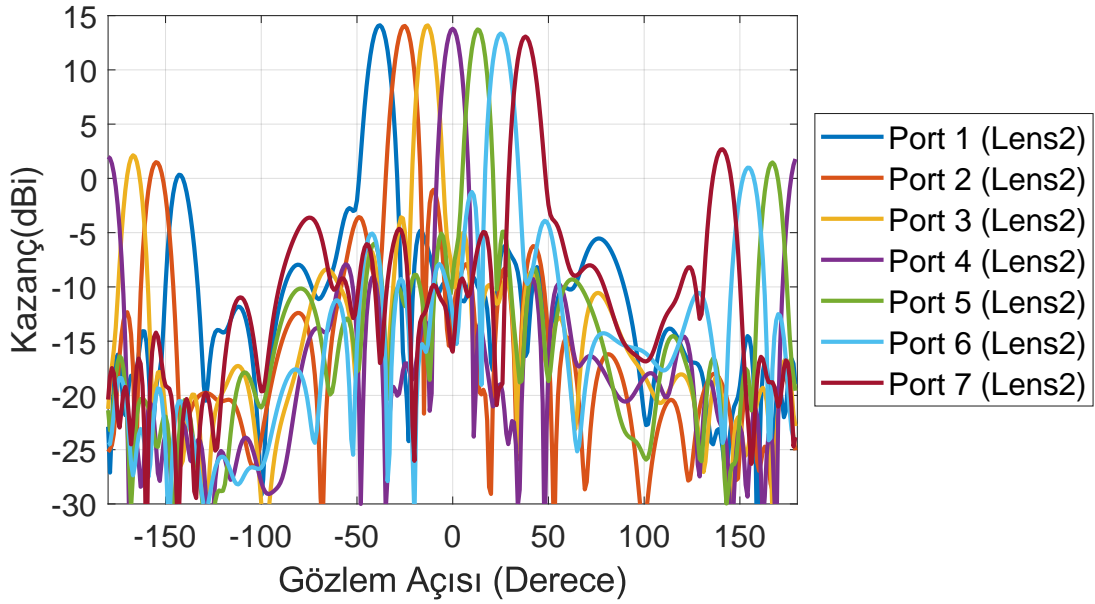
Şekil 5.13 Lotus dizi antenin 8 GHz’de farklı Lens1 hüzmeye portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



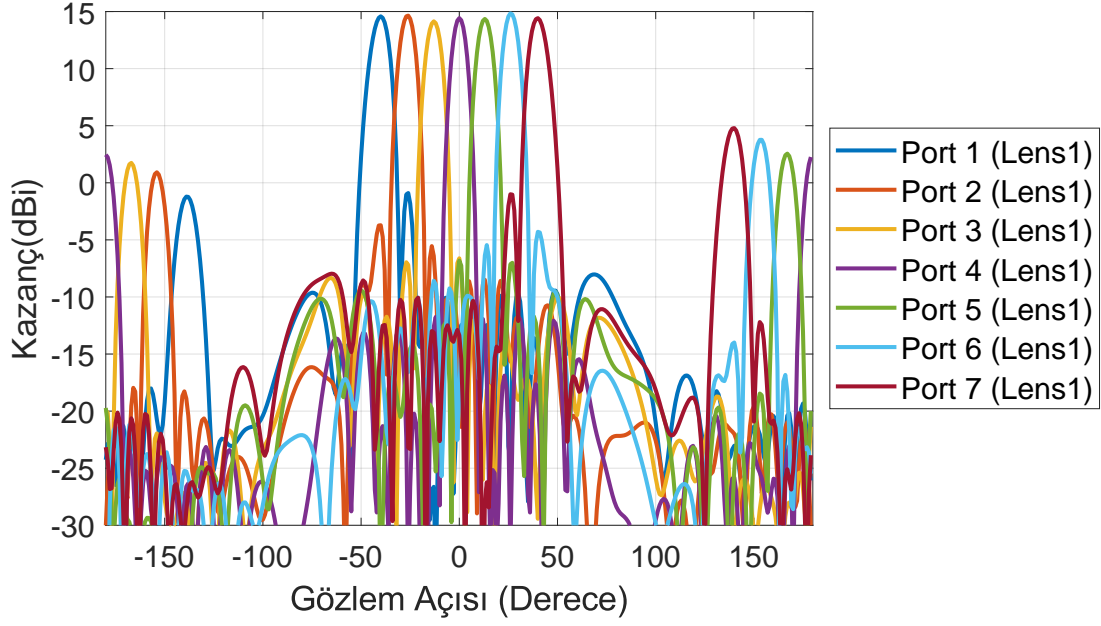
Şekil 5.14 Lotus dizi antenin 8 GHz’de farklı Lens2 hüzmeye portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



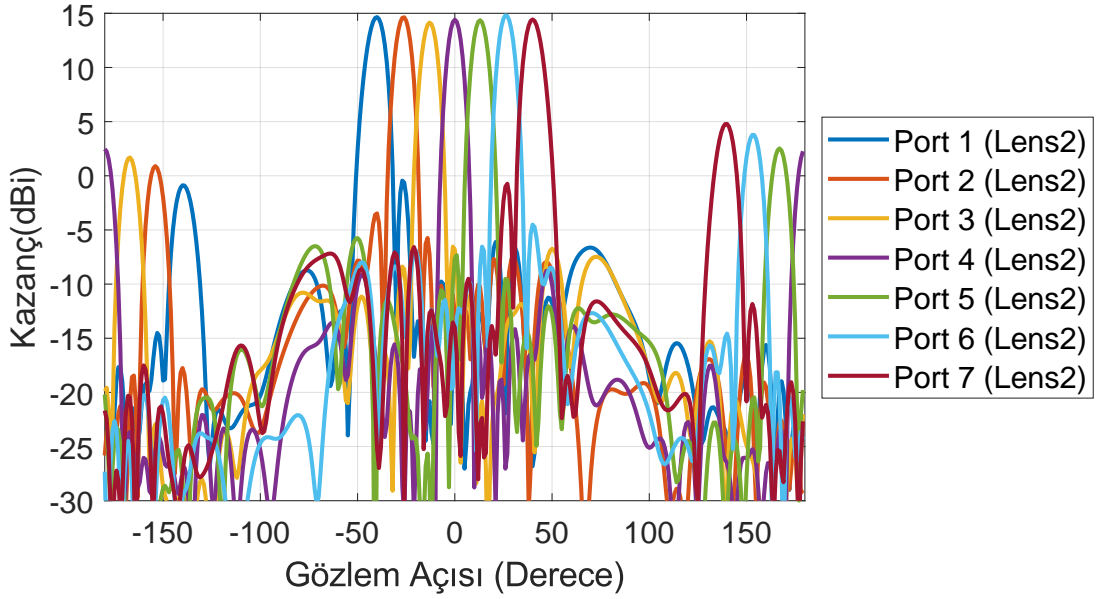
Şekil 5.15 Lotus dizi antenin 9 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



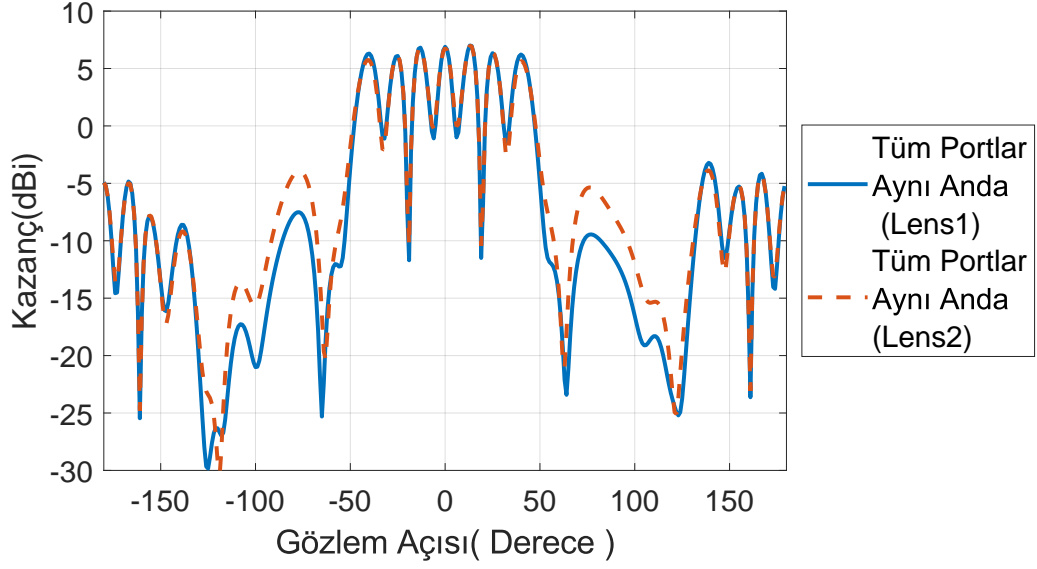
Şekil 5.16 Lotus dizi antenin 9 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



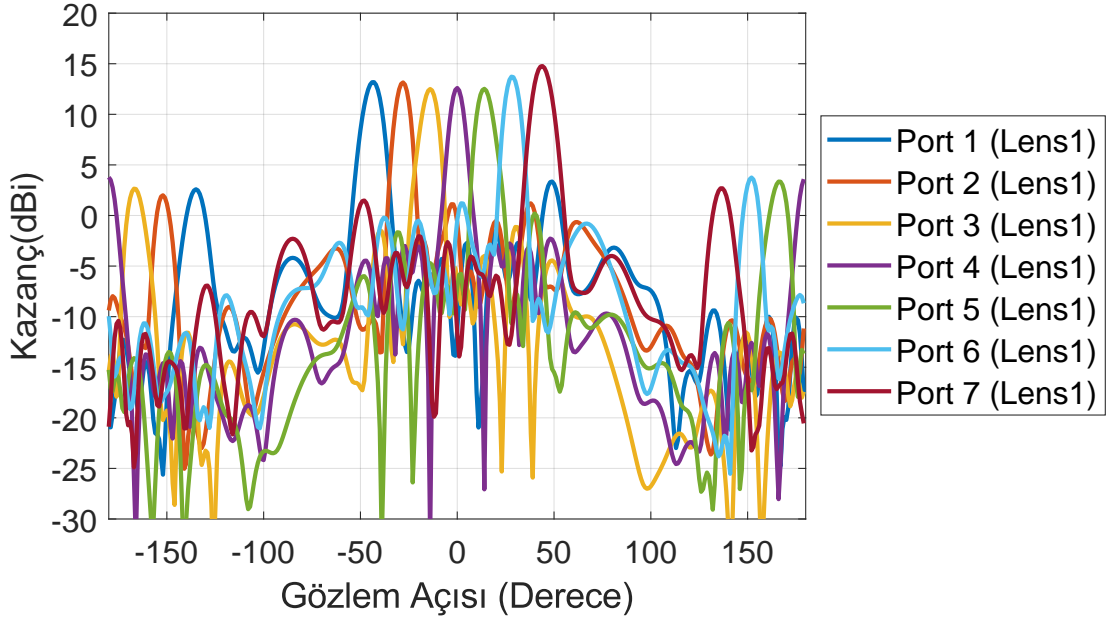
Şekil 5.17 Lotus dizi antenin 10 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



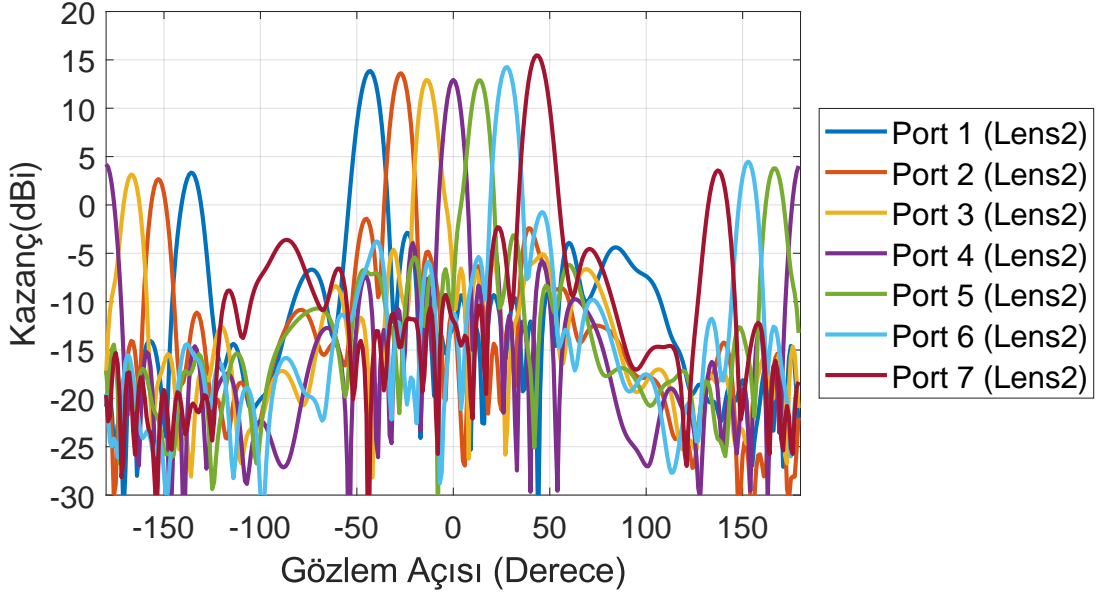
Şekil 5.18 Lotus dizi antenin 10 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



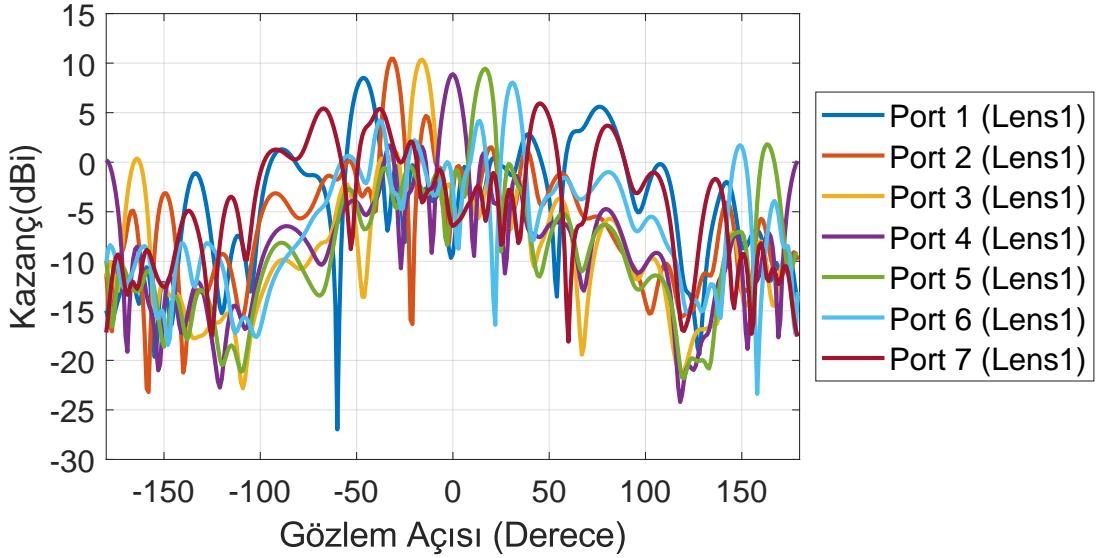
Şekil 5.19 Lotus dizi antenin 10 GHz’de tüm Lens1 ve Lens2 hüzmeye portlarının aynı anda uyarılması sonucunda elde edilen çıktılarla uyarılmasıyla elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



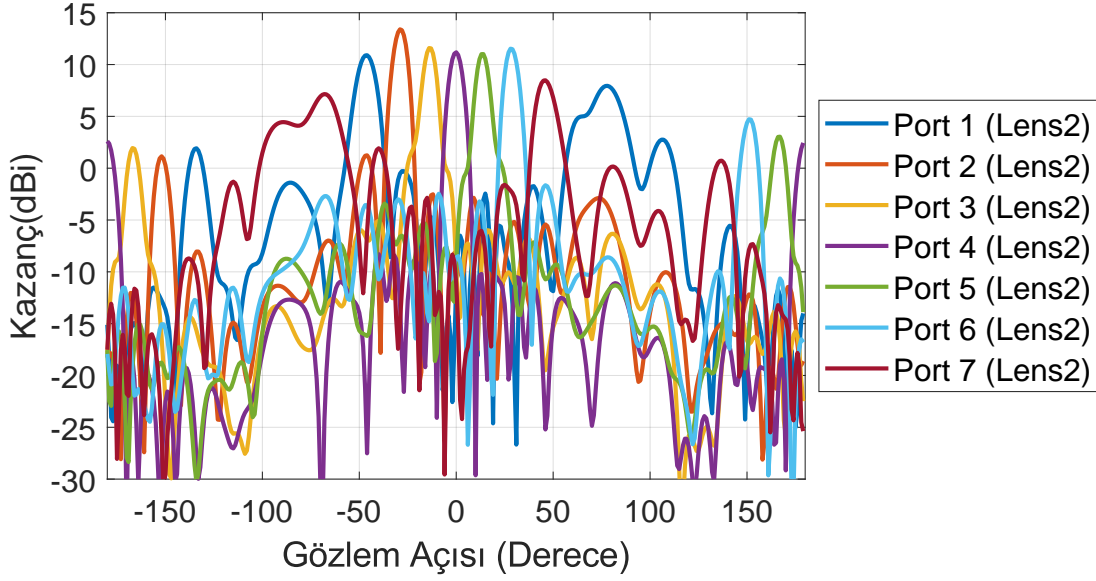
Şekil 5.20 Lotus dizi antenin 11 GHz’de farklı Lens1 hüzmeye portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



Şekil 5.21 Lotus dizi antenin 11 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



Şekil 5.22 Lotus dizi antenin 12 GHz’de farklı Lens1 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



Şekil 5.23 Lotus dizi antenin 12 GHz’de farklı Lens2 hüzme portları çıktılarıyla uyarılması sonucunda elde edilen yükseliş eksenini ($\phi = 90^\circ$) kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

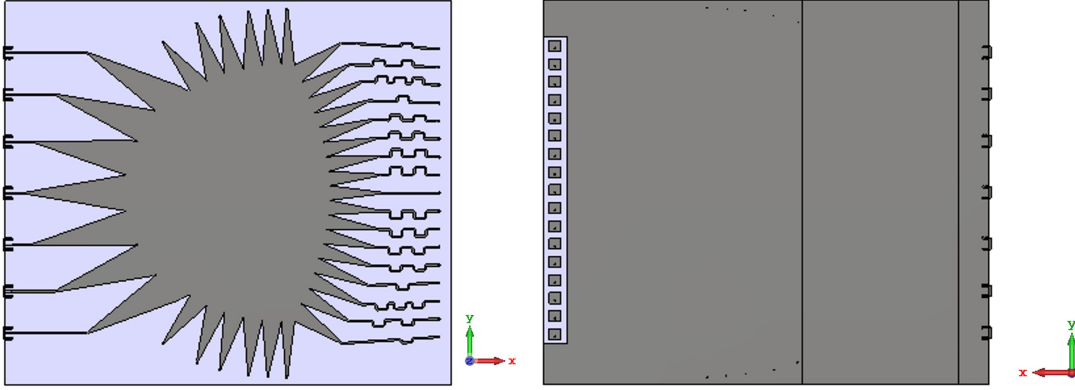
Lenslerin 9 GHz ve 11 GHz’deki faz performansı, Alt Bölüm 4.5.9. ve Alt Bölüm 4.5.10.’daki veri yükünü arttırmamak için paylaşılmamıştır. Ancak paylaşılan 6-8-10-12 GHz’deki faz davranışları incelenerek bu frekanslar için yorum yapılabilir. Lens1, 10 GHz’de faz hesabı yapılarak tasarlandığı için Lens1’in en iyi çalıştığı frekans bölgesi 10 GHz ve 10 GHz’e yakın frekanslardır. Dolayısıyla 9, 10 ve 11 GHz’de Lens1’in hüzme şekillendirme performansının, 8 ve 12 GHz’e göre daha iyi olması gerekmektedir. Lens2 için ise gerçek zaman gecikmesi özelliği kullanılarak frekansa bağımsız bir tasarım yapıldığından, Lens2’nin tüm frekans değerleri için benzer bir performans göstermesi beklenmektedir. Grafikler incelendiğinde, Lens2, Lens1’e göre dizi anten elemanları üzerinde daha yüksek doğruluklu genlik ve faz dağılımı oluşturduğundan, Lens2’nin Lens1’e göre daha dar hüzme genişliği ve daha yüksek kazanç değerine sahip, beklenen tarama açılarından daha az sapan dizi anten hüzmelerini oluşturduğu gözlemlenmiştir. 10 GHz’de tüm hüzme portları aynı anda beslendiğinde, her iki lensin de yelpaze şeklinde -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 41° ’de dizi anten hüzmelerini aynı anda oluşturabildiği gözlemlenmiştir.

6. ROTMAN LENS İLE DİZİ ANTENLERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

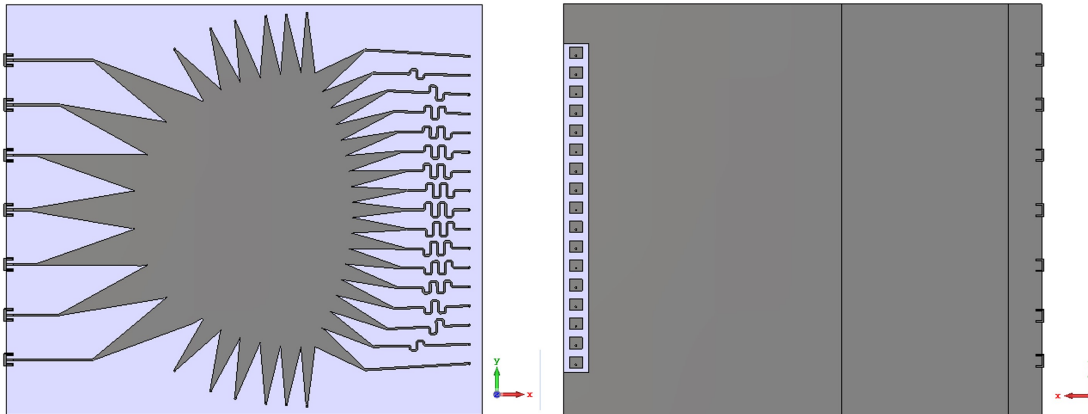
Bu bölümde, önceki bölümlerde tasarımı ve performansı anlatılan dizi antenlerin Lens1 ve Lens2 ile bağlantısı yapılarak oluşturulan sistemin çalışma performansı değerlendirilmiştir. İncelemeler, CST Microwave Studio 2017 kullanılarak yapılmıştır.

6.1. Rotman Lens ve Dizi Antenin Birleştirilmesi

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de sırasıyla Lens1 ve Lens2 ile birleştirilen dizi anten ve lens sistemi gösterilmiştir. Lens1 ve Lens2 çıkışlarındaki dizi portları, pin vasıtasıyla alt karttaki dizi antene bağlanmaktadır.



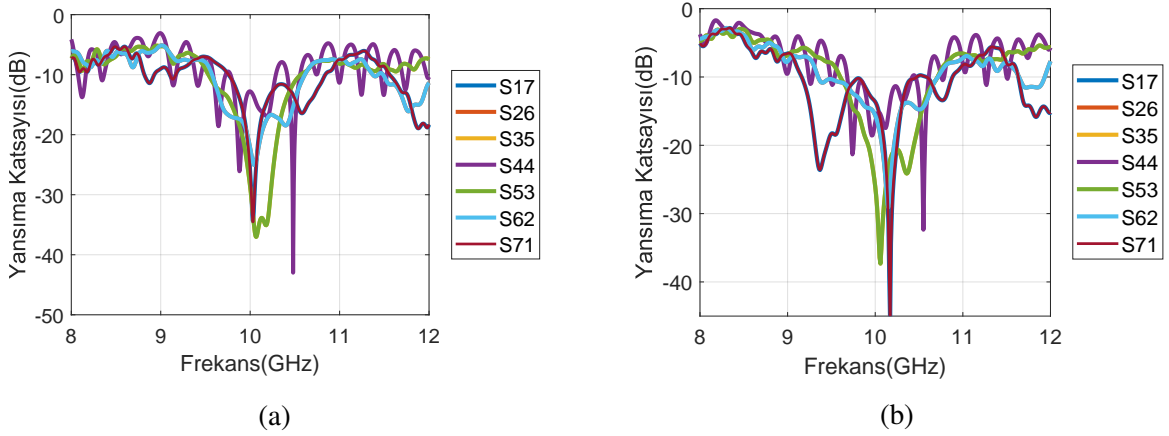
Şekil 6.1 Dizi anten ile birleştirilen Lens1'in önden ve arkadan gösterimi



Şekil 6.2 Dizi anten ile birleştirilen Lens2'nin önden ve arkadan gösterimi

6.1.1. Geri Dönüş Kaybı Sonucu

Şekil 6.3'te Lens1 ve Lens2 ile birleştirilmiş dizi antenin frekansa bağlı yansımaya katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerde, lens simetri eksenine göre simetrik hüzmeye portlarının birbirlerine etkisi gösterilmiştir. Lens simetri eksenine göre 1-7, 2-6, 3-5 numaralı hüzmeye portu çiftleri simetriklerdir. Ayrıca simetri ekseninde bulunan 4 numaralı hüzmeye portu da eksene göre simetriklerdir. Lense bağlanan dizi antenin, anten çalışma frekans bandı içerisinde bulunmadığı ve simetrik port çiftleri içindeki herhangi bir hüzmeye portunun uyarıldığı durumda, uygulanan gücün büyük bir kısmı çift içindeki diğer hüzmeye portuna gitmektedir. Şekil 6.3'teki iki grafikte de 10 GHz dışında kalan frekans bileşenleri için portlar arasındaki iletim ve yansımaya katsayıları -5 dB seviyesine yükselmektedir. Bu davranış, dizi antenin yansımaya katsayısı davranışıyla paralel bir davranıştır.



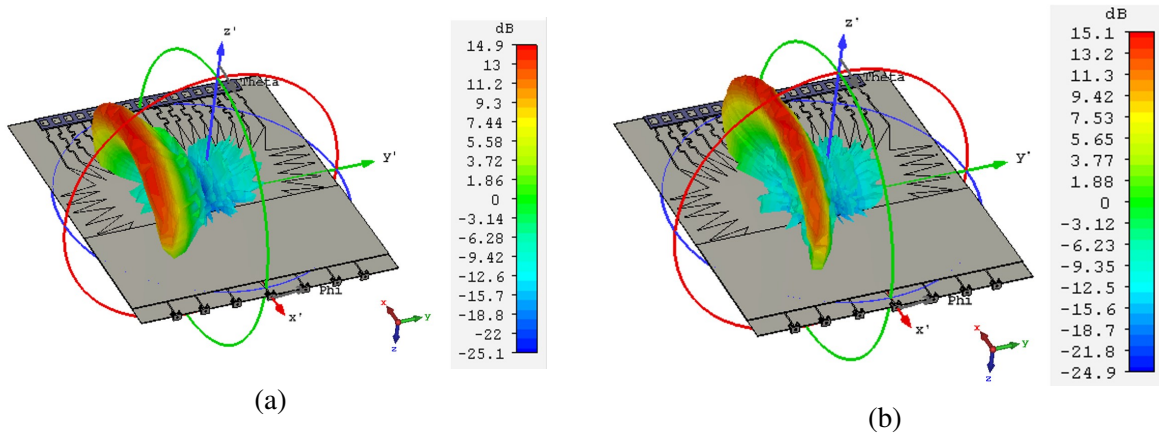
Şekil 6.3 a) Lens1'in b) Lens2'nin dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen yansımaya katsayısı (dB)

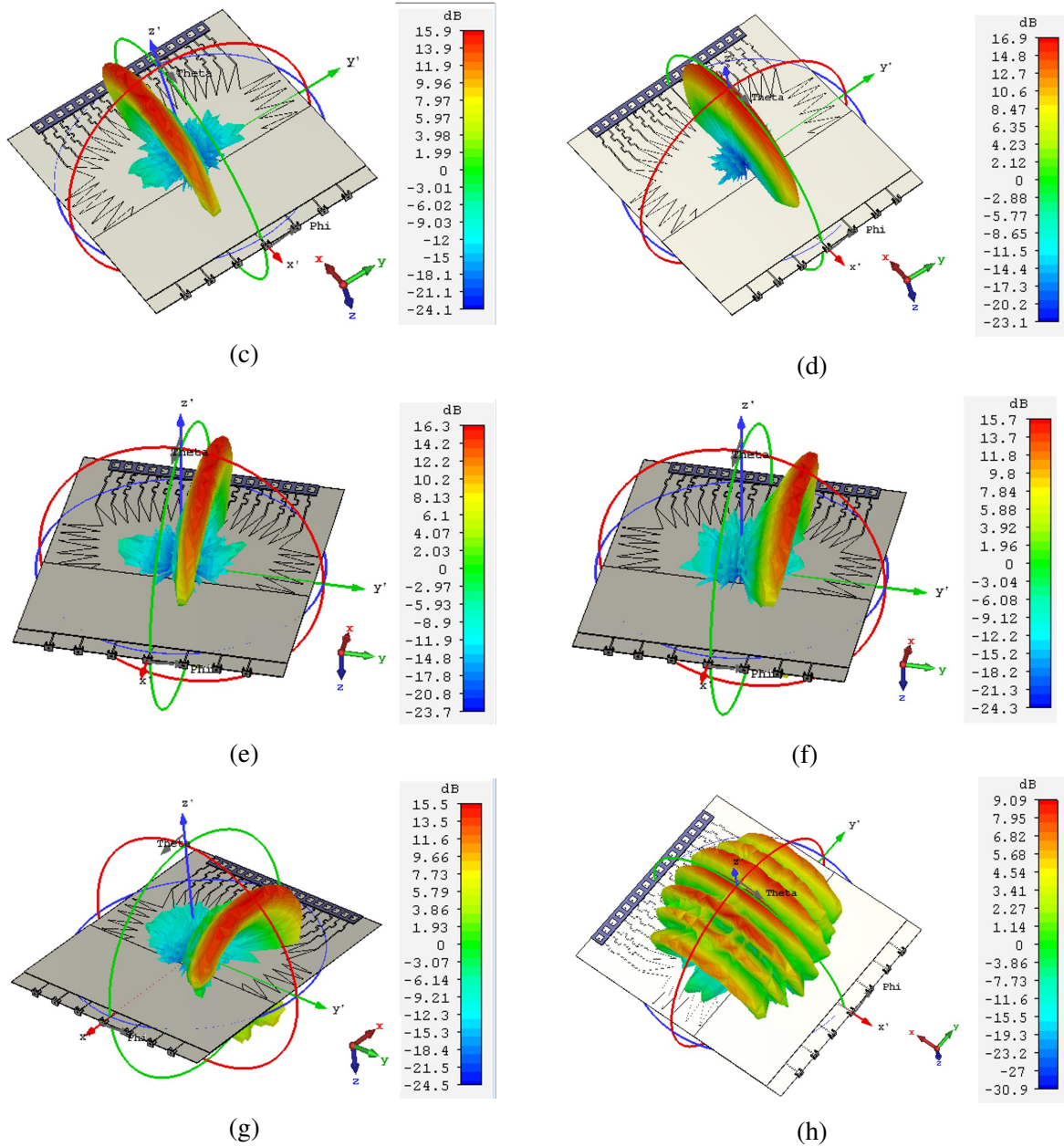
6.1.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri

Bu alt bölümde, Lens1 bağlantılı dizi antenin üç boyutlu ışımaya örüntüsü, Lens1 bağlantılı dizi anten ve sadece dizi antenin yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü ve Lens2 bağlantılı dizi anten ve sadece dizi antenin yükseliş ekseninde ($\phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü incelenmiştir. Veri yükünü arttırmamak için Lens2 bağlantılı dizi antenin üç boyutlu ışımaya örüntüleri paylaşılmamıştır. Örüntüler, hüzmeye portlarının aynı anda ve ayrı ayrı beslenmesi sonucunda elde edilmiştir. Şekil 6.4'te

Lens1 bağlantılı dizi antene ait üç boyutlu uzak alan ışınım örüntüleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde 4 numaralı merkez hüzmeye portunun beslenmesi sonucunda dizi anten kazancı 16.9 dBi, 1 numaralı en dış hüzmeye portunun beslenmesi sonucunda elde edilen dizi anten kazancı 14.9 dBi'dir. Alt Bölüm 5.1.2.'de Lens1 çıktılarına göre simüle edilen dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde 0.5 dB ile 1 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması ve plakanın ışınması dolayısıyla dizi anten kazancındaki düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir.

Şekil 6.4h'de tüm hüzmeye portlarının aynı anda uyarılması sonucunda elde edilen uzak alan ışınım örüntüsü gösterilmiştir. Şekilde, tüm hüzmeye portlarının ayrı ayrı uyarılmasıyla elde edilen uzak alan ışınım örüntülerinin yelpaze şeklinde yan yana aynı anda oluşturulabildiği gözlemlenmiştir. Tüm portların aynı anda beslenmesiyle oluşturulan anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, ayrı ayrı elde edilen dizi anten hüzmelerinden 7 dB daha düşüktür. Şekil 6.5'te iki boyutlu olarak gözlenen uzak alan davranışı, Şekil 6.4h incelenerek daha rahat anlaşılabilir.

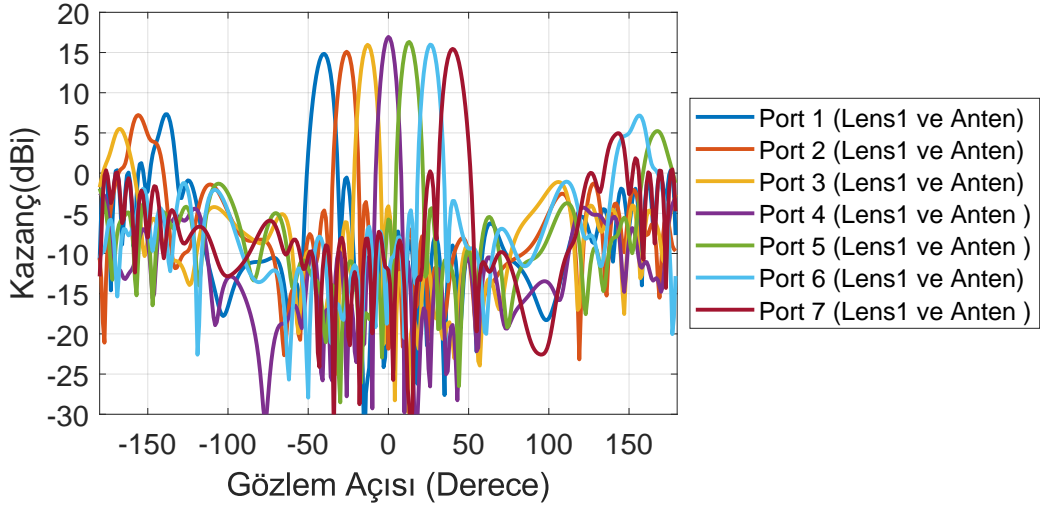




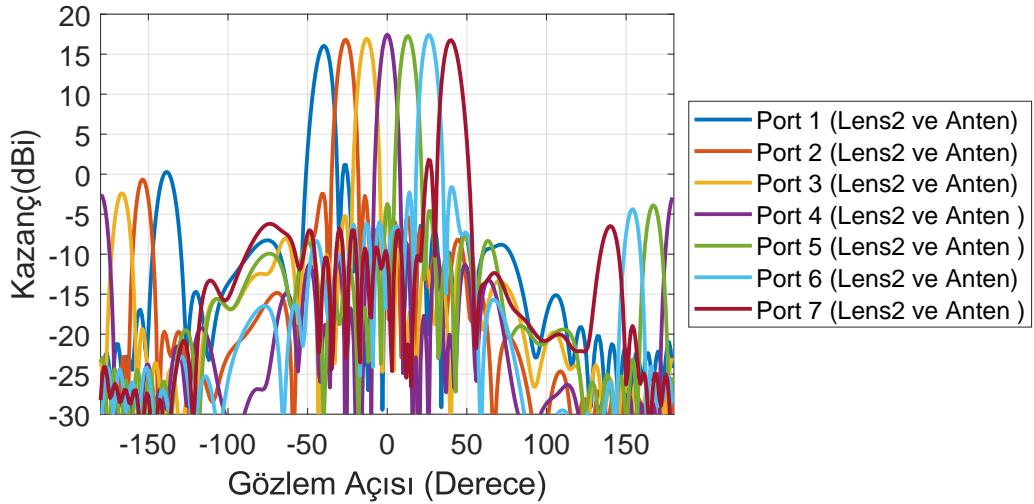
Şekil 6.4 Lens1'in a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) tüm hüzmeye portları beslendiğinde dizi antene ait 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüleri

Şekil 6.5'te Lens1 bağlantılı dizi antenin tüm hüzmeye portları ayrı ayrı uyarıldığında, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Şekil 6.6'da Lens2 bağlantılı dizi antenin tüm hüzmeye portları ayrı ayrı uyarıldığında, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak

alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6 ile birlikte Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde, lensle birlikte çalışan dizi antene ait en yüksek kazanç değerlerinin, tek başına çalışan bir dizi anten en yüksek kazanç değerine göre 0.5 ile 1 dB arasında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Alt Bölüm 5.1.2.'deki gibi 10 GHz'de her iki lensin de birbiriyle tutarlı davrandığı gözlemlenmiştir.



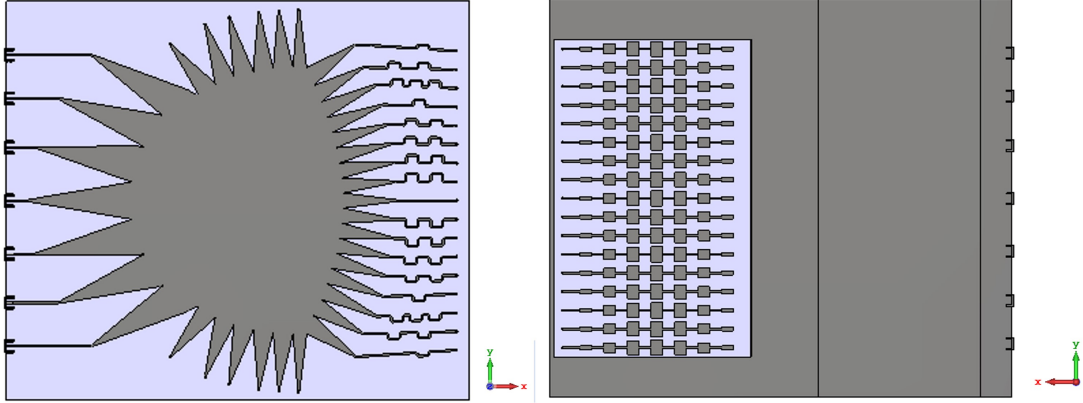
Şekil 6.5 Lens1'in dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



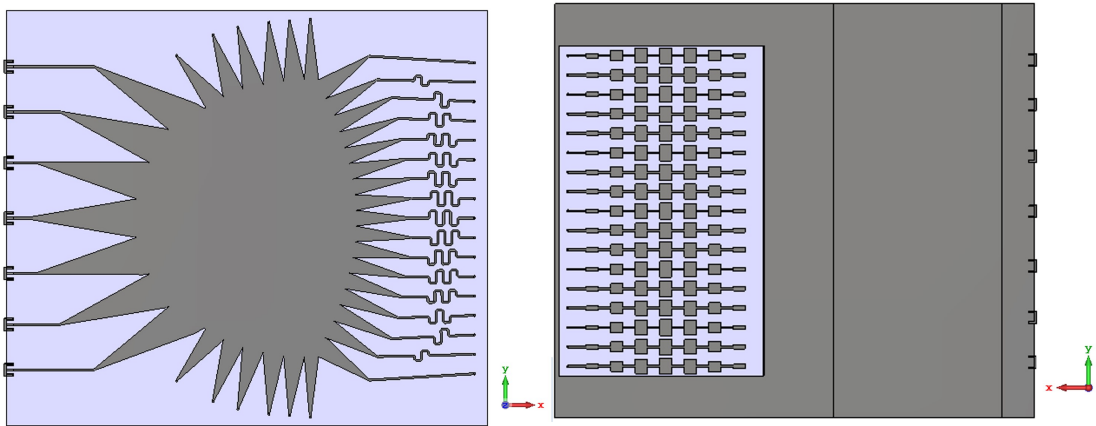
Şekil 6.6 Lens2'nin dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

6.2. Rotman Lens ve Seri Beslemeli Chebyshev Dizi Antenin Birleştirilmesi

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de sırasıyla Lens1 ve Lens2 ile birleştirilen seri beslemeli Chebyshev dizi anten ve lens sistemi gösterilmiştir. Lens1 ve Lens2 çıkışlarındaki dizi portları, pin vasıtasıyla alt karttaki dizi antene bağlanmaktadır.



Şekil 6.7 Seri Beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilen Lens1'in önden ve arkadan gösterimi

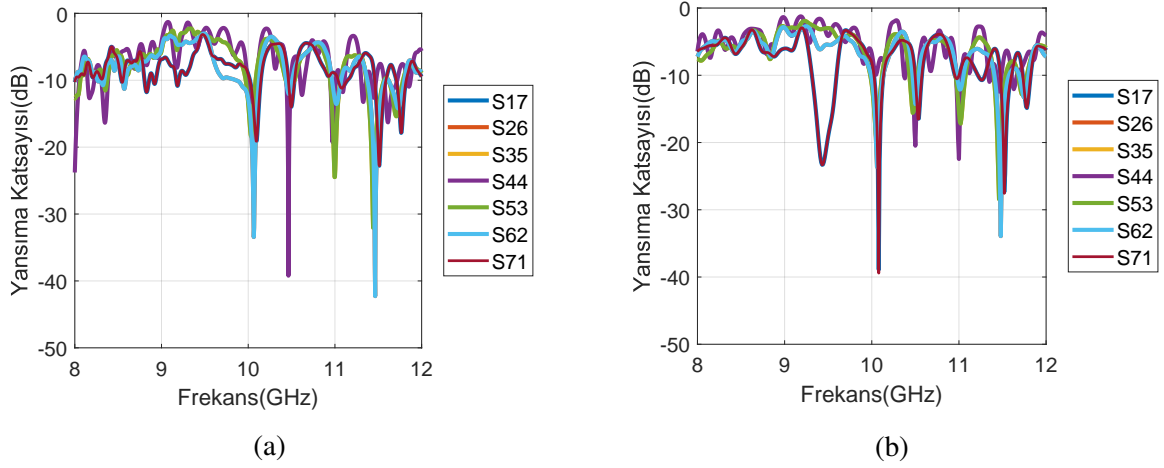


Şekil 6.8 Seri Beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilen Lens2'nin önden ve arkadan gösterimi

6.2.1. Yansıma ve İletim Katsayısı Sonucu

Şekil 6.9’da Lens1 ve Lens2 ile birleştirilmiş seri beslemeli Chebyshev dizi antenin frekansa bağlı yansıma katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerde, lens simetri eksenine göre

simetrik hüzme portlarının birbirlerine etkisi gösterilmiştir. Lens simetri eksenine göre 1-7, 2-6, 3-5 numaralı hüzme portu çiftleri simetriktir. Ayrıca simetri ekseninde bulunan 4 numaralı hüzme portu da eksene göre simetriktir. Lense bağlanan dizi antenin, anten çalışma frekans bandı içerisinde bulunmadığı ve simetrik port çiftleri içindeki herhangi bir hüzme portunun uyarıldığı durumda, uygulanan gücün büyük bir kısmı çift içindeki diğer hüzme portuna gitmektedir. Şekil 6.9'daki iki grafikte de 10 GHz dışında kalan frekans bileşenleri için portlar arasındaki iletim ve yansımaya katsayıları -5 dB seviyesine yükselmektedir. Bu davranış, dizi antenin yansımaya katsayısı davranışıyla paralel bir davranıştır.



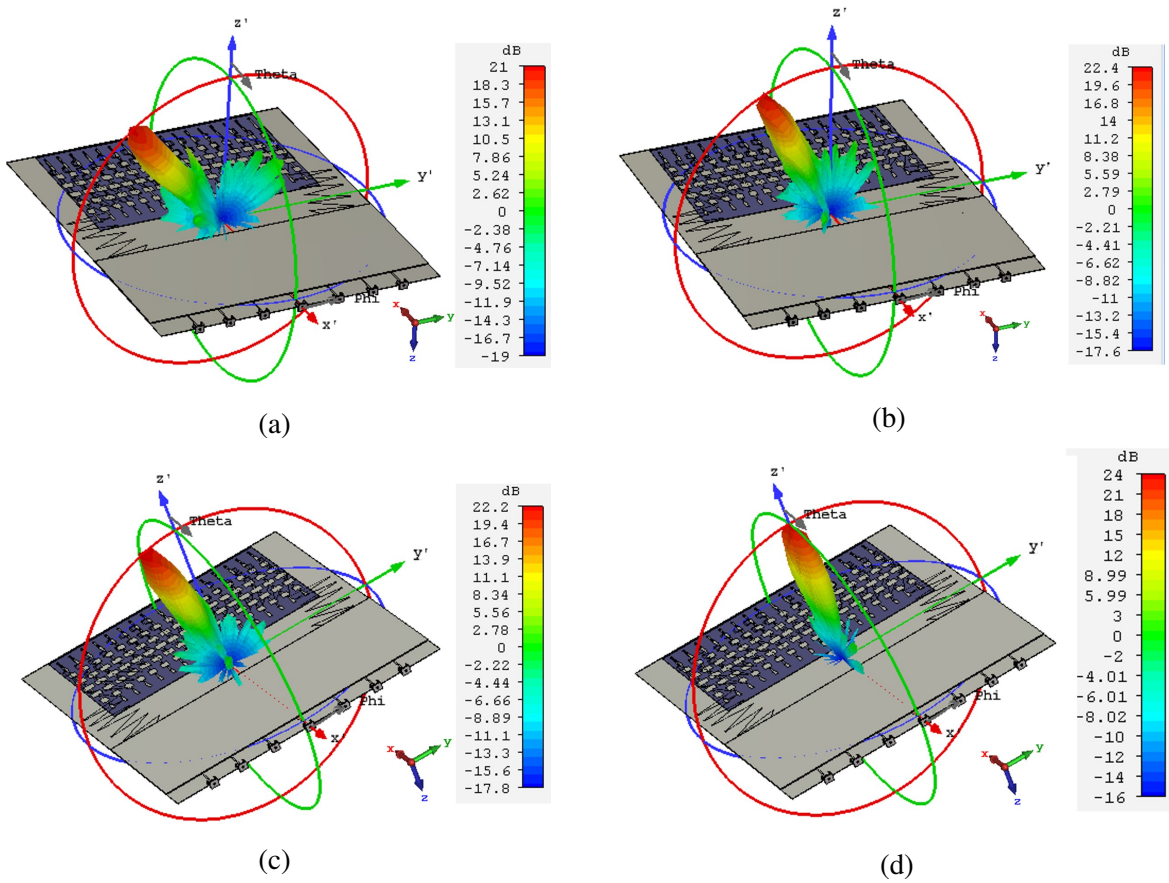
Şekil 6.9 a) Lens1'in b) Lens2'nin seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen yansımaya katsayısı (dB)

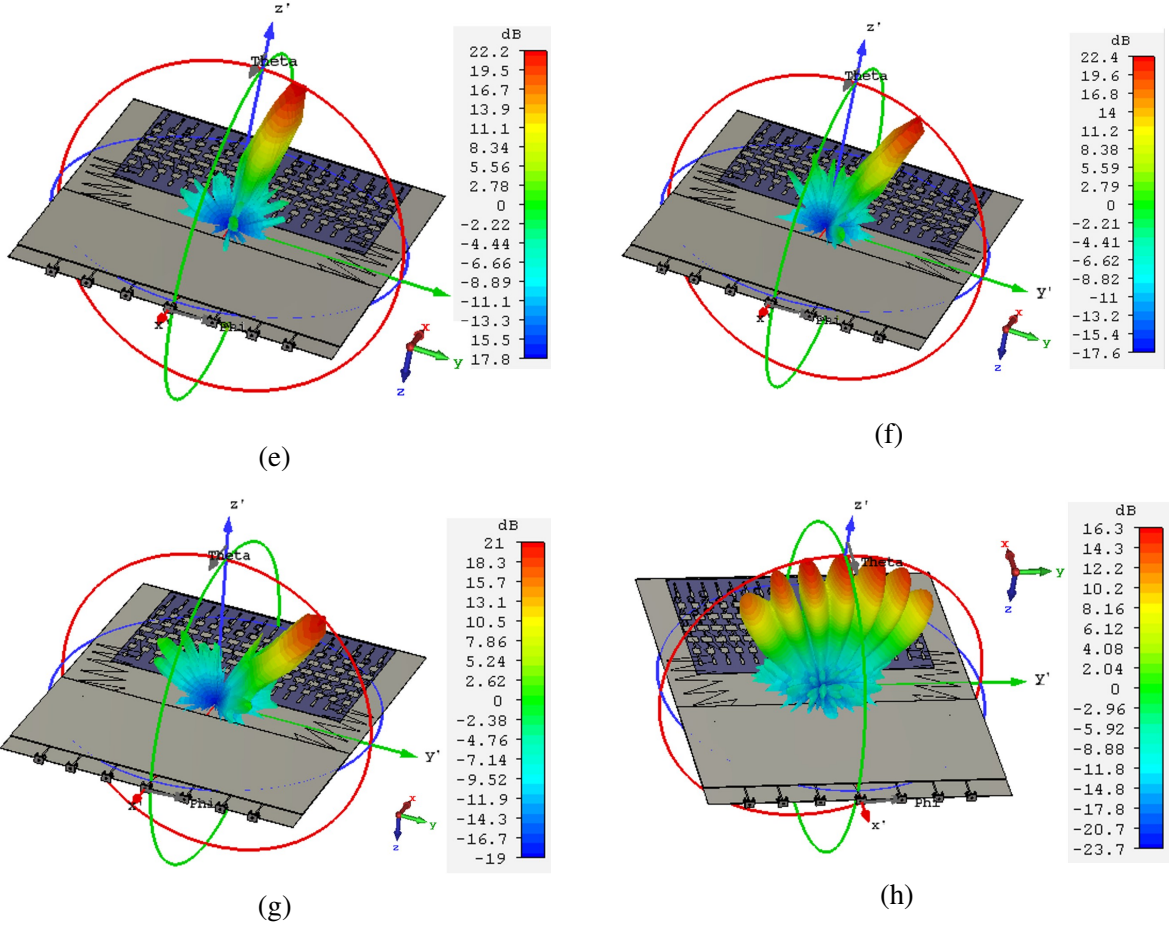
6.2.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri

Bu alt bölümde, Lens1 bağlantılı seri beslemeli Chebyshev dizi antenin üç boyutlu ışımaya örüntüsü, Lens1 bağlantılı seri beslemeli Chebyshev dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü ve Lens2 bağlantılı dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü incelenmiştir. Veri yükünü arttırmamak için Lens2 bağlantılı dizi antenin üç boyutlu ışımaya örüntüsü paylaşılmamıştır. Örüntüler, hüzme portlarının aynı anda ve ayrı ayrı beslenmesi sonucunda elde edilmiştir. Şekil 6.10'da Lens1 bağlantılı seri beslemeli Chebyshev dizi antene ait üç boyutlu uzak alan ışımaya örüntüleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde 4 numaralı merkez hüzme portunun beslenmesi sonucunda dizi anten kazancı 24 dBi, 1 numaralı en

dış hüzme portunun beslenmesi sonucunda elde edilen dizi anten kazancı 21 dBi'dir. Alt Bölüm 5.2.2.'de Lens1 çıktılarına göre simüle edilen seri beslemeli Chebyshev dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde 0.9 dB ile 2.7 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması ve plakanın ışınması dolayısıyla dizi anten kazancındaki düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir.

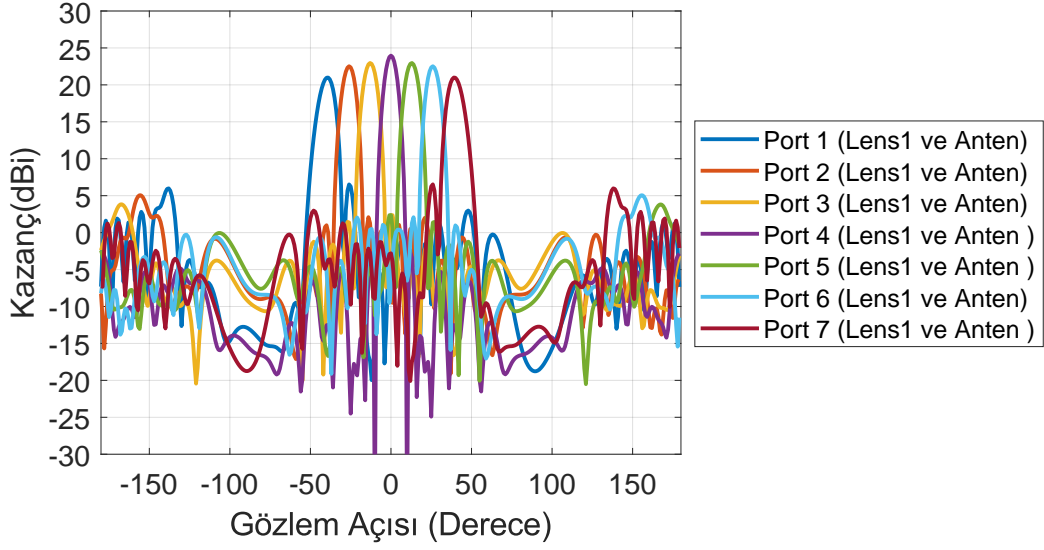
Şekil 6.10h'de tüm hüzme portlarının aynı anda uyarılması sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Şekilde, tüm hüzme portlarının ayrı ayrı uyarılmasıyla elde edilen uzak alan ışınma örüntülerinin yelpaze şeklinde yan yana aynı anda oluşturulabildiği gözlemlenmiştir. Tüm portların aynı anda beslenmesiyle oluşturulan anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, ayrı ayrı elde edilen dizi anten hüzmelerinden 8 dB daha düşüktür. Şekil 6.11'de iki boyutlu olarak gözlenen uzak alan davranışı, Şekil 6.10h incelenerek daha rahat anlaşılabilir.



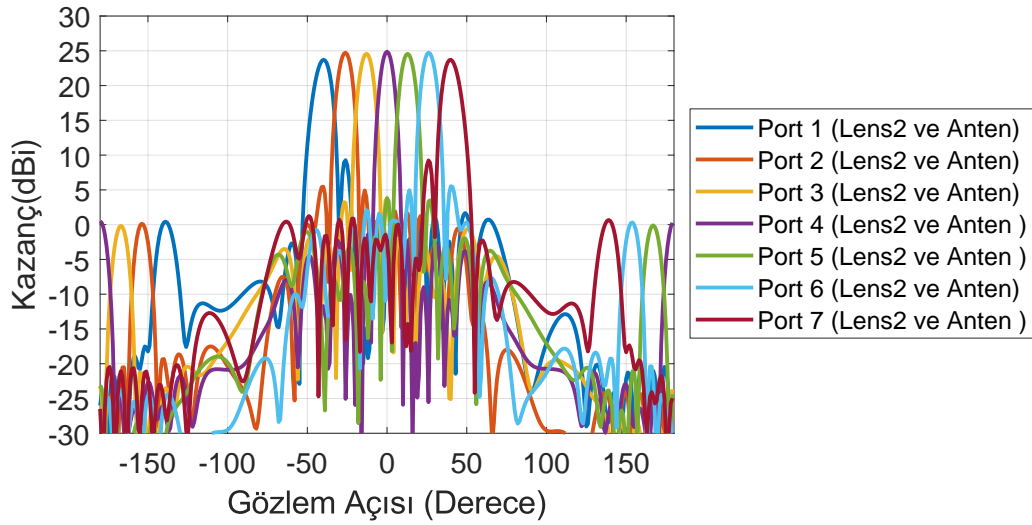


Şekil 6.10 Lens1'in a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) tüm hüzmeye portları beslendiğinde seri beslemeli Chebyshev dizi antene ait 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüleri

Şekil 6.11'de Lens1 bağlantılı seri beslemeli Chebyshev dizi antenin tüm hüzmeye portları ayrı ayrı uyarıldığında, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Şekil 6.12'de Lens2 bağlantılı dizi antenin tüm hüzmeye portları ayrı ayrı uyarıldığında, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Her iki grafikte de, lensle birlikte çalışan seri beslemeli Chebyshev dizi antene ait en yüksek kazanç değerlerinin, tek başına çalışan bir dizi anten en yüksek kazanç değerine göre 0.9 ile 2.7 dB arasında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Alt Bölüm 5.2.2.'deki gibi 10 GHz'de her iki lensin de birbiriyle tutarlı davrandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.11 Lens1'in seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

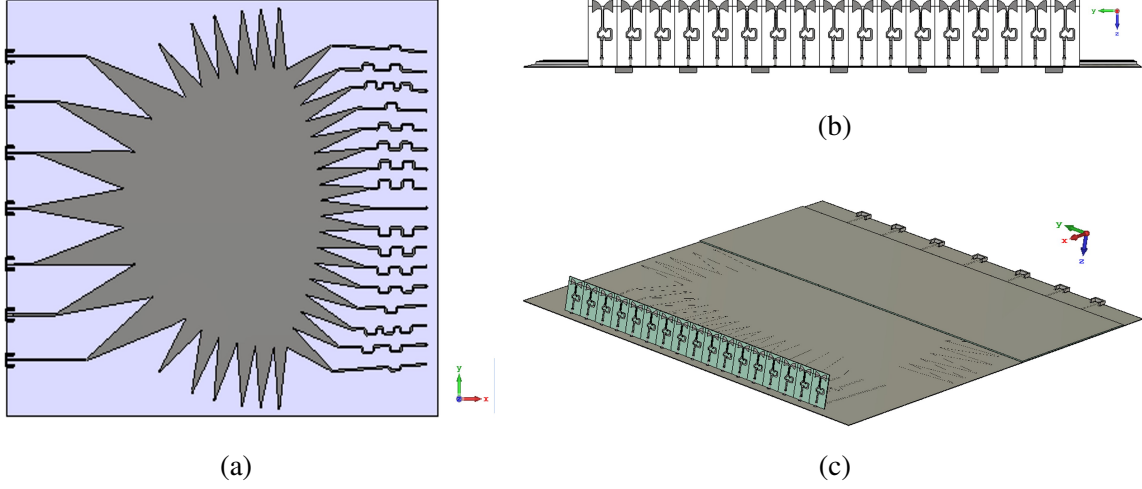


Şekil 6.12 Lens2'nin seri beslemeli Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda dizi antenin yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

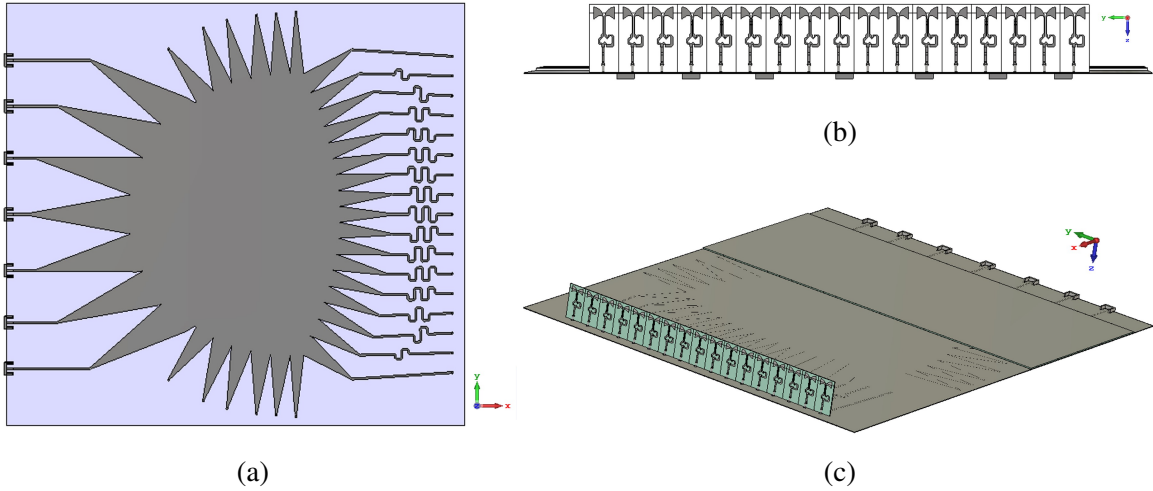
6.3. Rotman Lens ve Lotus Dizi Antenin Birleştirilmesi

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te, sırasıyla, Lens1 ve Lens2 ile birleştirilen lotus dizi anten ve lens sistemi gösterilmiştir. Lens1 ve Lens2 çıkışlarındaki dizi portları, pin vasıtasıyla alt karttaki

lotus dizi antene bağlanmaktadır. Lotus dizi anten, Şekil 6.13b ve Şekil 6.14b’de gösterildiği gibi lense, dik şekilde bağlanmaktadır. Şekil 6.13c ve Şekil 6.14c’de lens ve lotus dizi anten sol yukarıdan gösterilmiştir.



Şekil 6.13 a) Lens1’in önden görünümü b) Lotus dizi antenin pin vasıtasıyla Lens1’e bağlantısı c) Lens1’in lotus dizisi ile sol arka yukarıdan görünümü

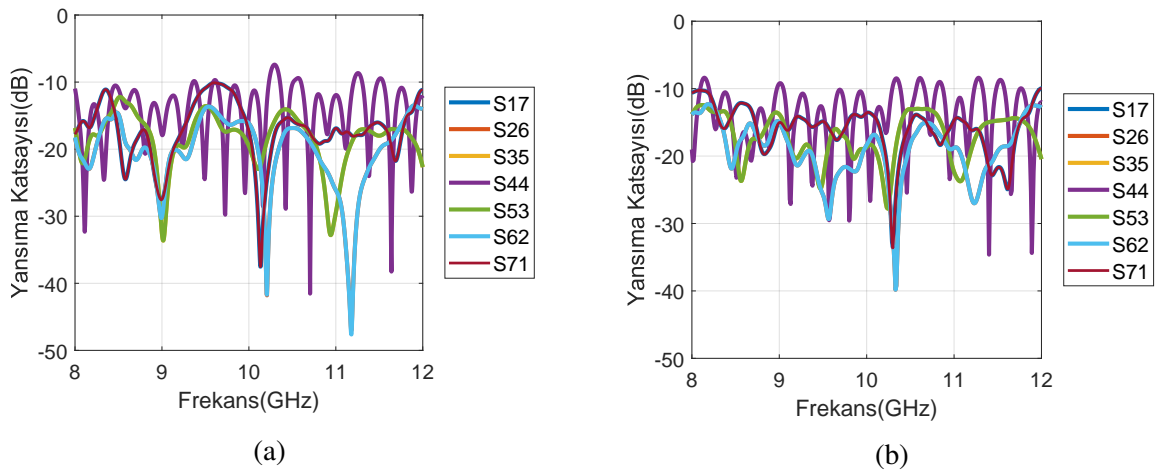


Şekil 6.14 a) Lens2’nin önden görünümü b) Lotus dizi antenin pin vasıtasıyla Lens2’ye bağlantısı c) Lens2’nin lotus dizisi ile sol arka yukarıdan görünümü

6.3.1. Yansıma ve İletim Katsayısı Sonucu

Şekil 6.15’te Lens1 ve Lens2 ile birleştirilmiş lotus dizi antenin frekansa bağlı yansıma katsayısı grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerde, lens simetri eksenine göre simetrik hüzmeye

portlarının birbirlerine etkisi gösterilmiştir. Lens simetri eksenine göre 1-7, 2-6, 3-5 numaralı hüzmeye portu çiftleri simetriktir. Ayrıca simetri ekseninde bulunan 4 numaralı hüzmeye portu da eksene göre simetriktir. Lense bağlanan dizi antenin, anten çalışma frekans bandı içerisinde bulunmadığı ve simetrik port çiftleri içindeki herhangi bir hüzmeye portunun uyarıldığı durumda, uygulanan gücün büyük bir kısmının çift içindeki diğer hüzmeye portuna gitmesi beklenmektedir. Şekil 6.15'teki iki grafikte de, 8-12 GHz aralığında, lotus dizi antenin frekansa bağlı yansımaya katsayısı davranışına benzer bir davranış gözlemlenmiştir.

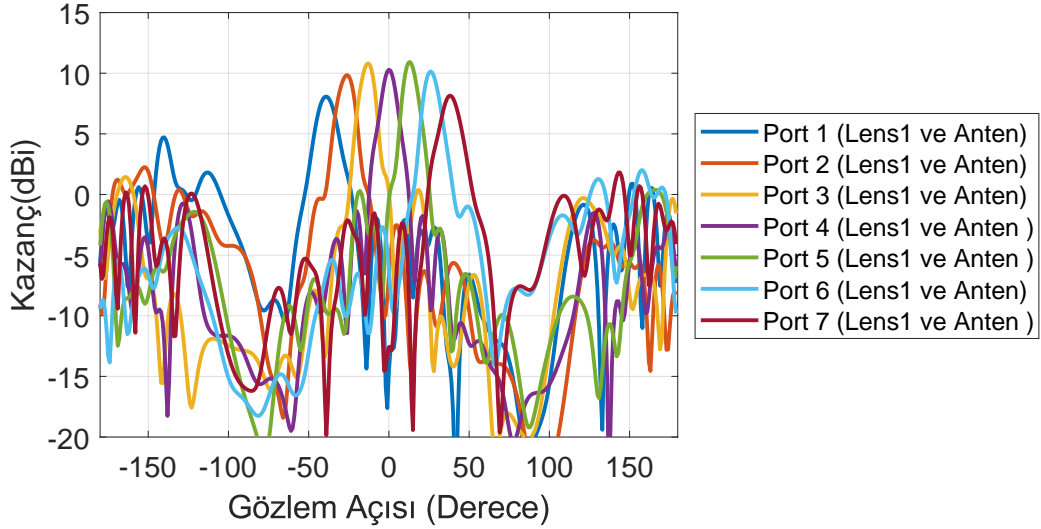


Şekil 6.15 a) Lens1'in b) Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen yansımaya katsayısı (dB)

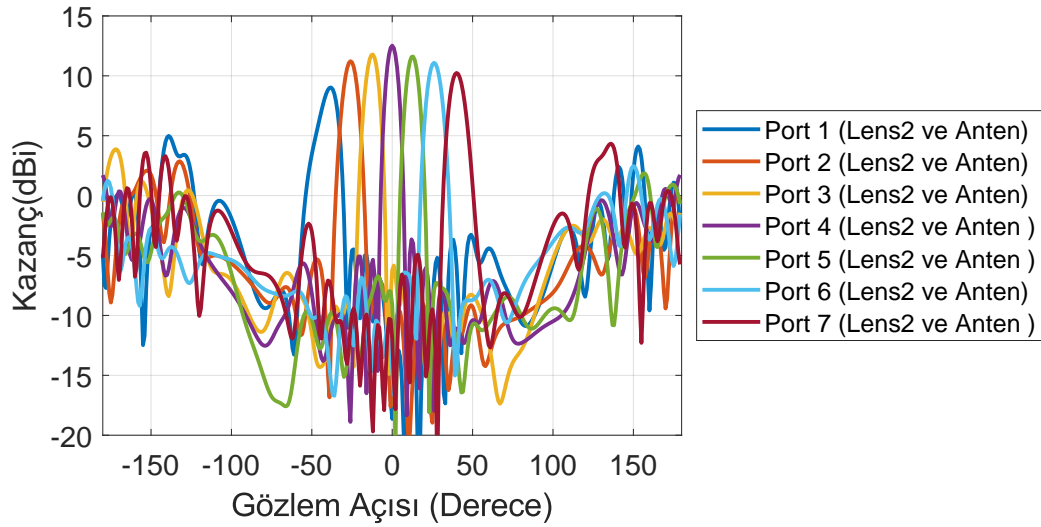
6.3.2. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (8 GHz)

Bu alt bölümde, sırasıyla Şekil 6.16 ve 6.17'de Lens1 ve Lens2 bağlantılı lotus dizi antenin 8 GHz'deki yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 8 dBi, 9.75 dBi, 10.6 dBi ve 10 dBi, Lens2 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 9 dBi, 11.2 dBi, 11.8 dBi ve 12.5 dBi'dir. Alt Bölüm 5.3.2.'de Lens1 ve Lens2 çıktılarına göre simüle edilen lotus dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde, Lens1 için 0.2 dB ile 2.1 dB arasında, Lens2 için 2.7 dB ile 4.3 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması, plakanın ışınması ve lens ile dizi anten arasındaki pin geçişindeki modelleme zorluğu dolayısıyla, dizi anten kazancındaki

düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir. Anten hüzmesi yönleri ve yan lob seviyeleri incelendiğinde, lens-anten sistemi ile anten dizisi sonuçları tutarlılık göstermektedir.



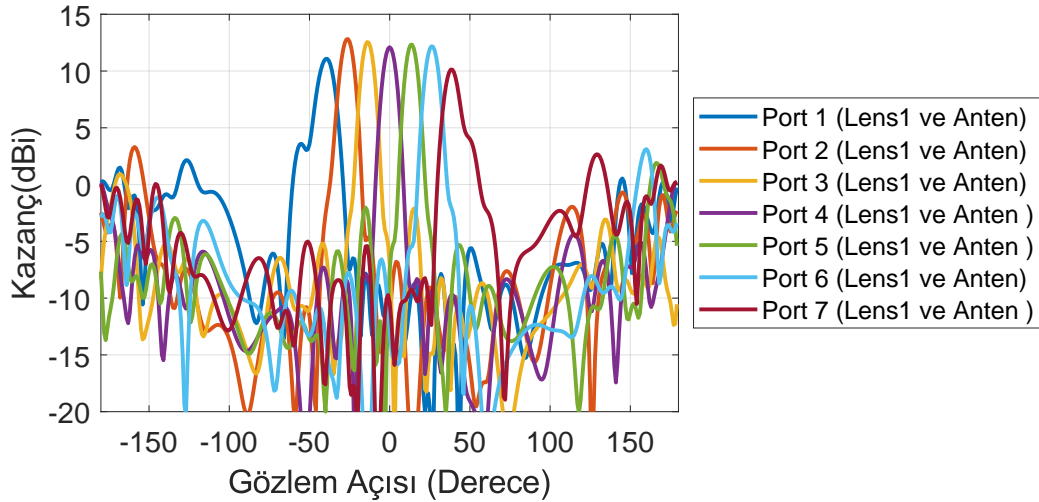
Şekil 6.16 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 8 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



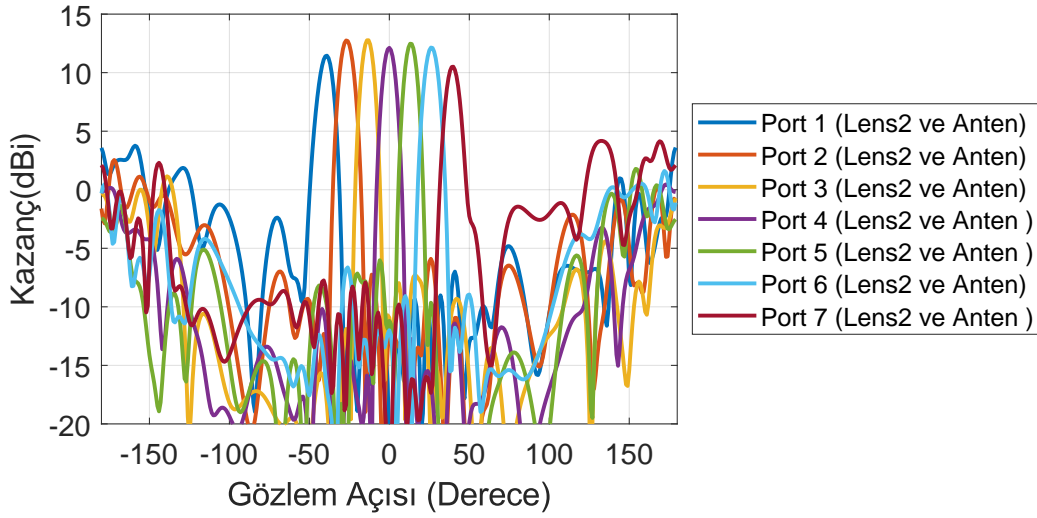
Şekil 6.17 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 8 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

6.3.3. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (9 GHz)

Şekil 6.18 ve 6.19'da Lens1 ve Lens2 bağlantılı lotus dizi antenin 9 GHz'deki yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 11 dBi, 12.8 dBi, 12.6 dBi ve 12.1 dBi, Lens2 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 11.45 dBi, 12.75 dBi, 12.8 dBi ve 12.1 dBi'dir. Alt Bölüm 5.3.2.'de Lens1 ve Lens2 çıktılarına göre simüle edilen lotus dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde, Lens1 için 0.5 dB ile 1.5 dB arasında, Lens2 için 1.3 dB ile 2.6 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması, plakanın ışınması ve lens ile dizi anten arasındaki pin geçişindeki modelleme zorluğu dolayısıyla, dizi anten kazancındaki düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir. Anten hüzmeleri yönleri ve yan lob seviyeleri incelendiğinde, lens-anten sistemi ile anten dizisi sonuçları tutarlılık göstermektedir.



Şekil 6.18 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 9 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışımaya örüntüsü

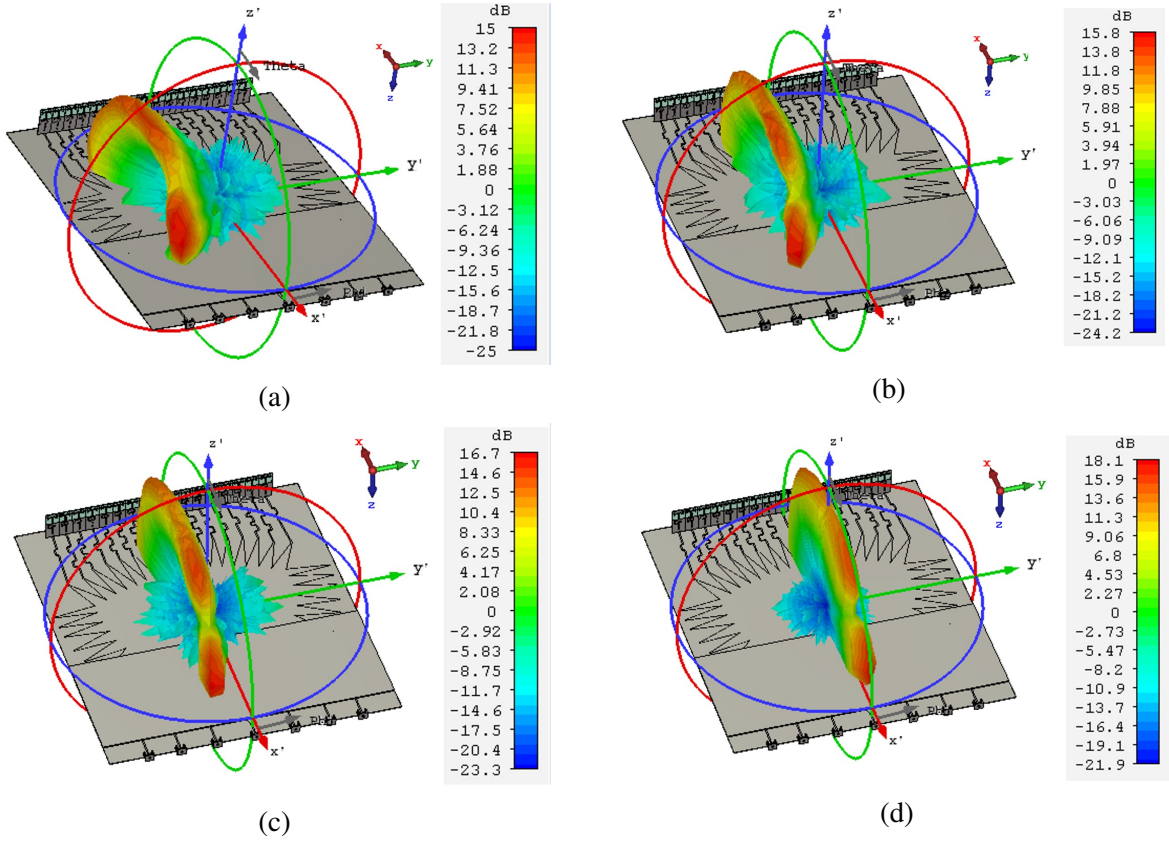


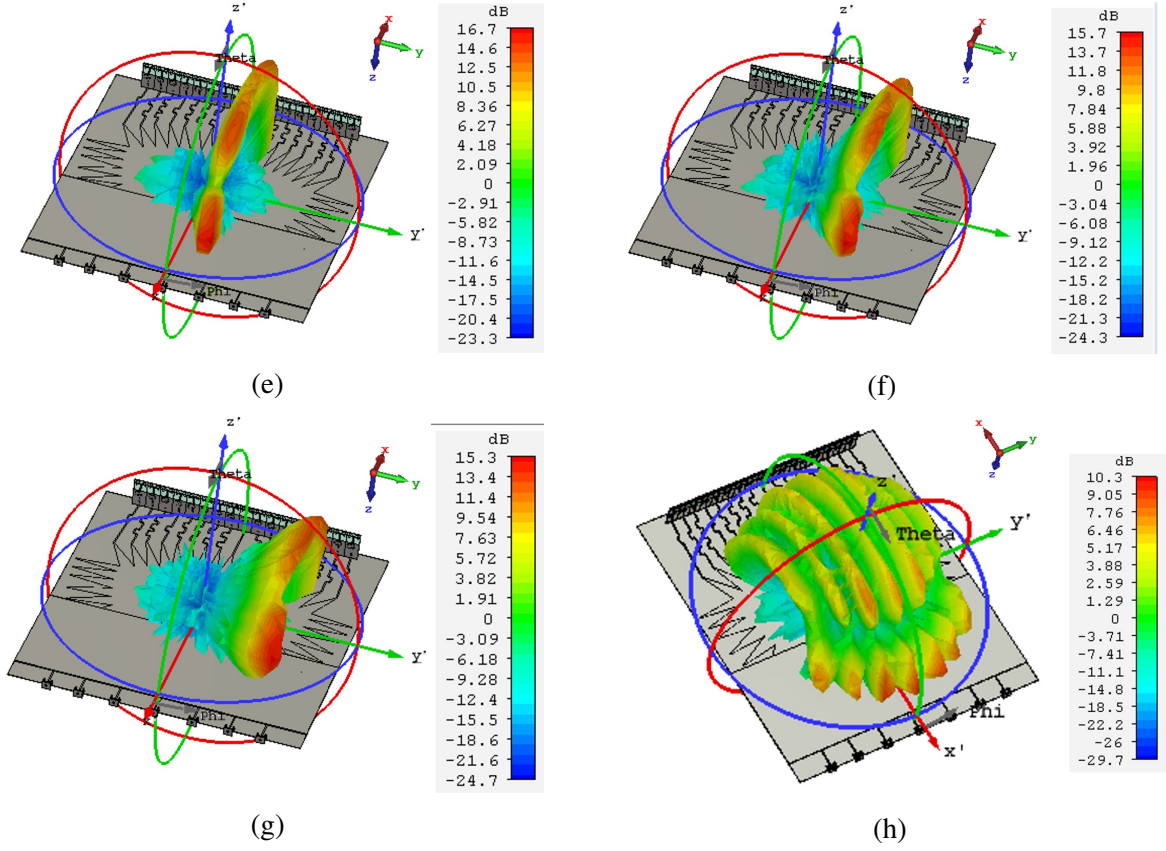
Şekil 6.19 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 9 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

6.3.4. Uzak Alan Işınma Örüntüleri (10 GHz)

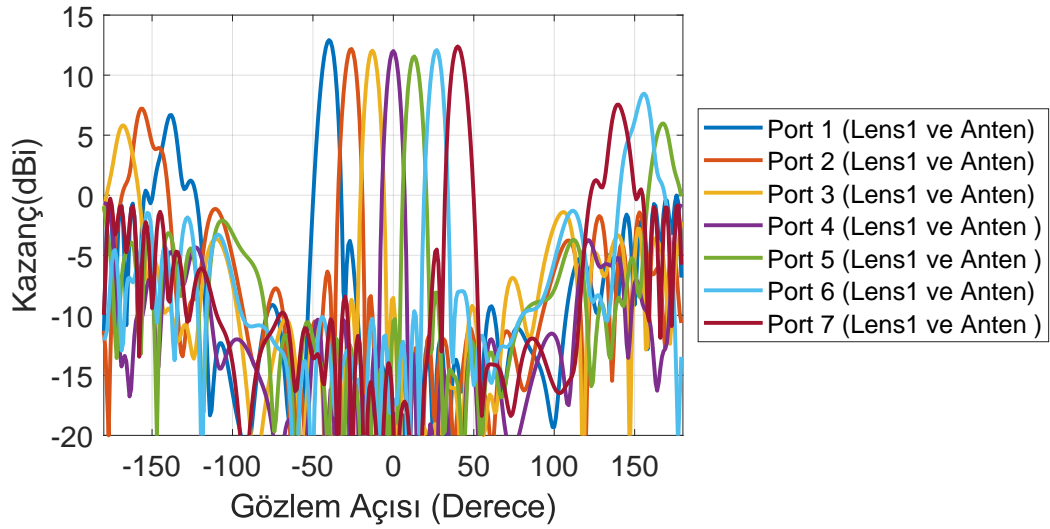
Bu alt bölümde, Şekil 6.20'de Lens1 bağlantılı lotus dizi antenin 10 GHz'deki üç boyutlu uzak alan ışınma örüntüsü ile Şekil 6.21 ve Şekil 6.22'de Lens1 ve Lens2 bağlantılı lotus dizi antenin 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü incelenmiştir. Örüntüler, hüzmeye portlarının aynı anda ve ayrı ayrı beslenmesi sonucunda elde edilmiştir. Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e lotus dizi anten kazançları 12.9 dBi, 12.2 dBi, 12 dBi ve 12 dBi, Lens2 için Port1'den Port4'e lotus dizi anten kazançları 12.6 dBi, 12.8 dBi, 11.85 dBi ve 12 dBi'dir. Alt Bölüm 5.3.2.'de Lens1 ve Lens2 çıktıklarına göre simülasyonu yapılan lotus dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde, Lens1 ve Lens2 için 1.7 dB ile 2.4 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması, plakanın ışınması ve lens ile dizi anten arasındaki pin geçişindeki modelleme zorluğu dolayısıyla, dizi anten kazancındaki düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir. Her iki lens de 10 GHz'de benzer performansa sahiptir.

Şekil 6.20h’de Lens1’in tüm hüzme portlarının aynı anda uyarılması sonucunda elde edilen 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüsü gösterilmiştir. Tüm hüzme portlarının ayrı ayrı uyarılmasıyla elde edilen uzak alan ışınma örüntülerinin aynı anda yelpaze şeklinde yan yana oluşturulabildiği gözlemlenmiştir. Aynı anda çalıştırılan hüzme portları sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüsündeki en yüksek kazanç değerleri, ayrı ayrı beslenen hüzme portlarıyla elde edilen en yüksek kazanç değerlerine göre 7-8 dB daha düşüktür. Şekil 6.20’de anten kazancını gösteren barın en yüksek değerinin kartezyen incelenen grafiklerdeki en yüksek kazanç değerlerinden yüksek olması, anten ışınma örüntüsünde saçılma kaynaklı gözlenen yüksek kazançlı ışınma bölgesinden kaynaklanmaktadır.

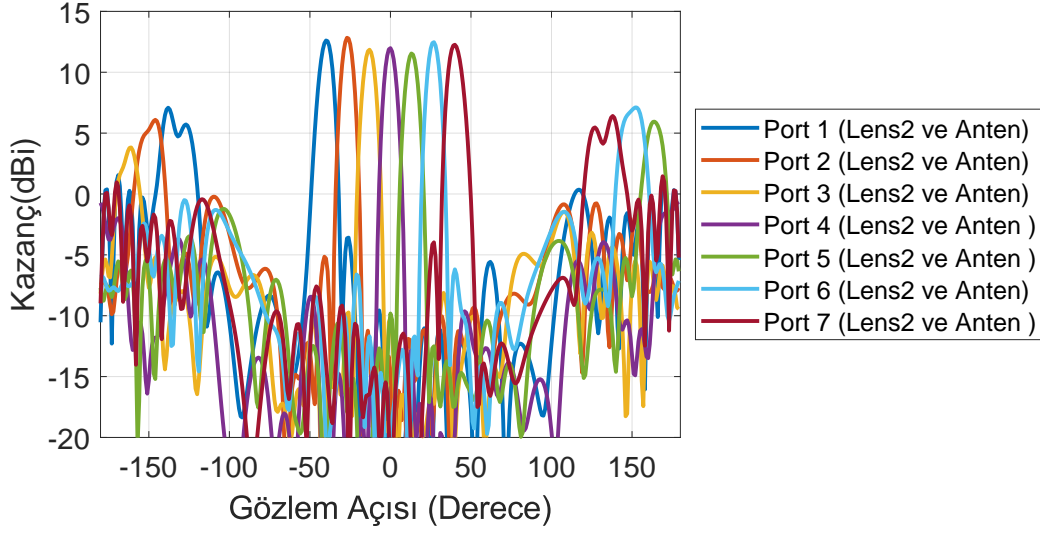




Şekil 6.20 Lens1'in a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. h) tüm hüzmeye portları beslendiğinde lotus dizi antene ait 3 boyutlu uzak alan ışınma örüntüleri



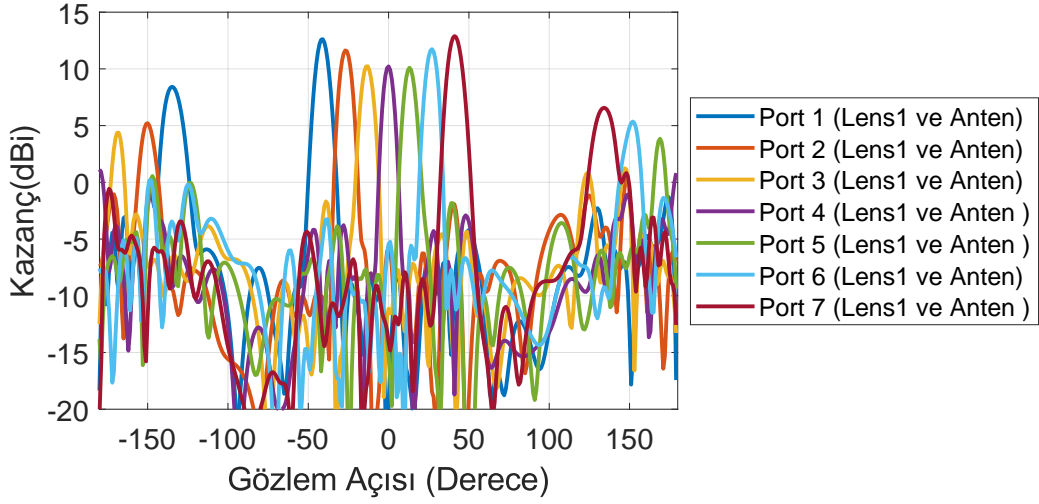
Şekil 6.21 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



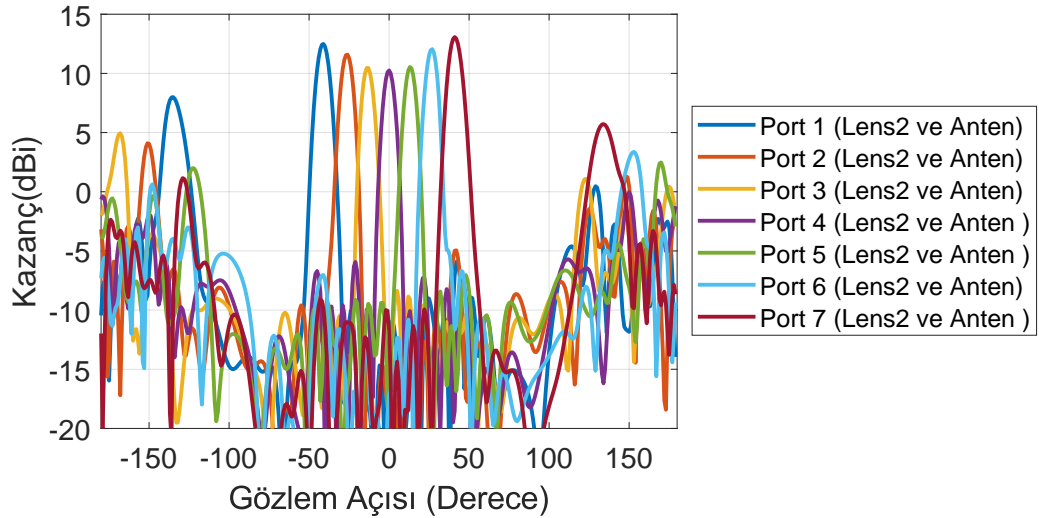
Şekil 6.22 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü

6.3.5. Uzak Alan Işınma Örüntüleri (11 GHz)

Şekil 6.23 ve 6.24'te Lens1 ve Lens2 bağlantılı lotus dizi antenin 11 GHz'deki yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 12.6 dBi, 11.6 dBi, 10.2 dBi ve 10.2 dBi, Lens2 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 12.5 dBi, 11.6 dBi, 10.5 dBi ve 10.3 dBi'dir. Alt Bölüm 5.3.2.'de Lens1 ve Lens2 çıktılarına göre simüle edilen lotus dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde, Lens1 için 0.7 dB ile 2.4 dB arasında, Lens2 için 1.3 dB ile 2.6 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması, plakanın ışınması ve lens ile dizi anten arasındaki pin geçişindeki modelleme zorluğu dolayısıyla, dizi anten kazancındaki düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir. Anten hüzmesi yönleri ve yan lob seviyeleri incelendiğinde, lens-anten sistemi ile anten dizisi sonuçları tutarlılık göstermektedir.



Şekil 6.23 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 11 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışıma örüntüsü

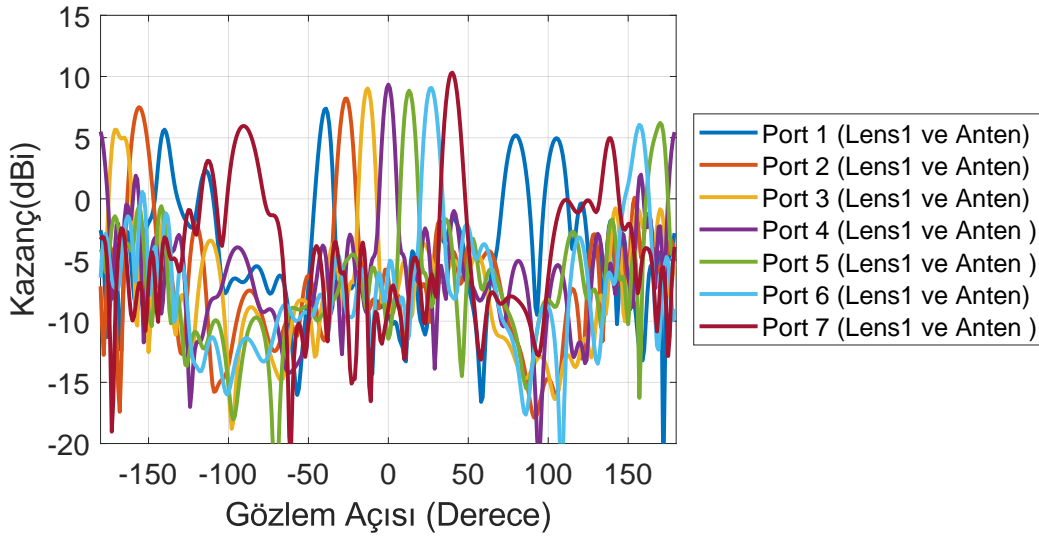


Şekil 6.24 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 11 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışıma örüntüsü

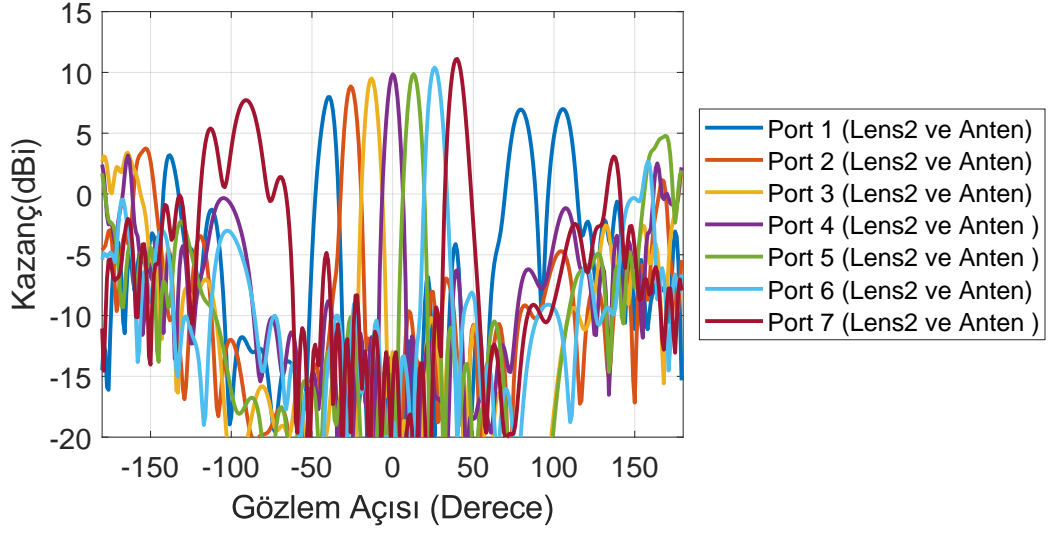
6.3.6. Uzak Alan Işıma Örüntüleri (12 GHz)

Şekil 6.25 ve 6.26'da Lens1 ve Lens2 bağlantılı lotus dizi antenin 12 GHz'deki yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesiti alınmış kartezyen uzak alan ışıma örüntüsü incelenmiştir.

Grafikler incelendiğinde, Lens1 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 7.4 dBi, 8.2 dBi, 9 dBi ve 9.4 dBi, Lens2 için Port1'den Port4'e dizi anten kazançları 8 dBi, 8.9 dBi, 9.5 dBi ve 9.9 dBi'dir. Alt Bölüm 5.3.2.'de Lens1 ve Lens2 çıktıklarına göre simüle edilen lotus dizi antene ait kazanç değeri sonuçları ile kıyaslandığında, lensle simülasyonu yapılan dizi antenin en yüksek kazanç değerlerinde, Lens1 için 0.5 dB ile 2.2 dB arasında, Lens2 için 1.3 dB ile 4.5 dB arasında düşüş gözlemlenmiştir. Lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması, plakanın ışınması ve lens ile dizi anten arasındaki pin geçişindeki modelleme zorluğu dolayısıyla, dizi anten kazancındaki düşüş beklenmekte ve gözlemlenmektedir. Kaybın diğer frekanslara göre daha yüksek olması, 12 GHz'de sabit dizi anten elemanı mesafesi dolayısıyla dizi faktöründe gözlenen ve tarama uzayı içinde olmayan yüksek yan lob seviyesinden kaynaklanmaktadır. Anten hüzmeleri yönleri ve yan lob seviyeleri incelendiğinde, lens-anten sistemi ile anten dizisi sonuçları tutarlılık göstermektedir.



Şekil 6.25 Lens1'in lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 12 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışınma örüntüsü



Şekil 6.26 Lens2'nin lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda lotus dizi antenin 12 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınmış kartezyen uzak alan ışıma örüntüsü

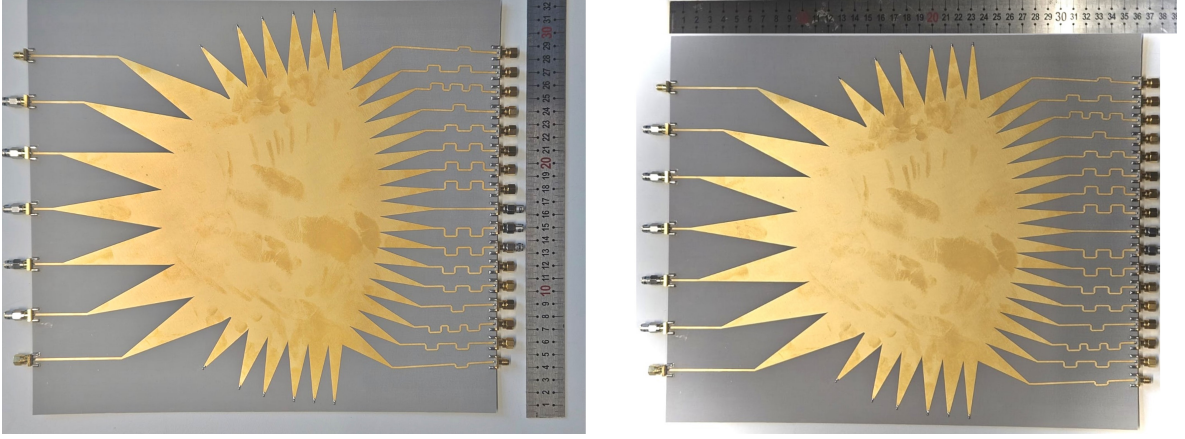
7. ÜRETİM VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

7.1. Üretim Süreci

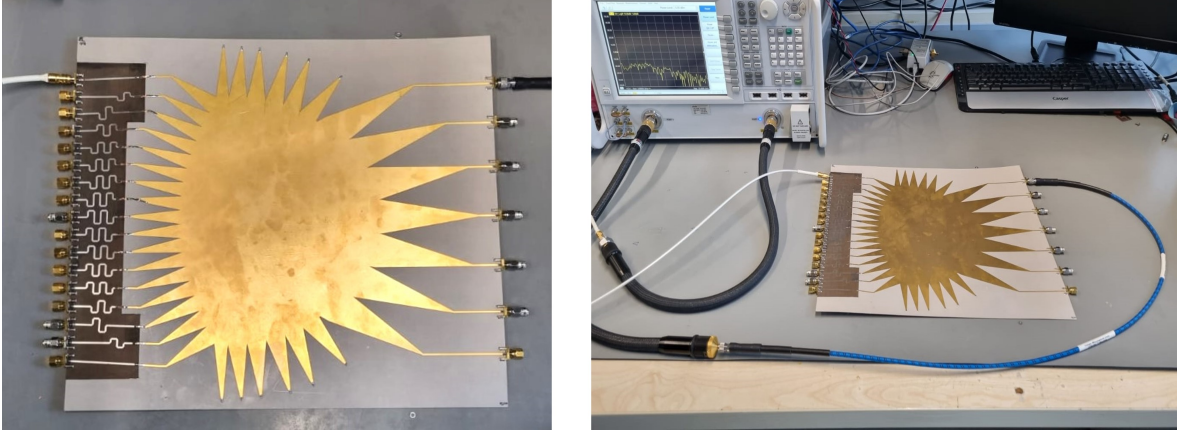
Üretilen Lens1 ve Lens2'ye ait 7 hüzmeye ve 17 dizi portuna, sistem girişi ve çıkışı için, BRACKE BM60937 SMA konnektör lehimlenmiştir. Lens yan duvarları kaynaklı lens içi yansımayı önlemek adına, lens yan duvarlarına 6 adet üstte, 6 adet altta olmak üzere toplam 12 adet 50 Ohm'luk direnç lehimlenmiştir.

Şekil 7.1'de bir cetvel yardımıyla Lens1 boyutları ve Lens1 gösterilmiştir. Cetvelden de okunabileceği gibi, lensin dikey eksenindeki boyutu 320 mm, yatay eksenindeki boyutu ise 362 mm'dir. Şekil 7.1'de görülen Lens1'in ölçümü, her bir hüzmeye ve dizi portuna karşılık, tüm dizi portları çıkışı olacak şekilde, S_{21} ölçümleri alınarak tamamlanmıştır. Tüm ölçümler yapılırken, ölçümü alınan portlar haricindeki diğer tüm portlar 50 Ohm'luk yüklerle sonlandırılmıştır. Dolayısıyla toplamda 119 adet S_{21} verisi alınmıştır.

Lens1 faz hattı uzunlukları, lens eşitlikleri çözümü ve CST simülasyonları doğrulamasıyla birlikte değiştirilerek, yeni hat uzunlukları hesaplanmış ve Lens2, yeni hat uzunluklarına göre tasarlanmıştır. Belirlenen yeni hat uzunluklarıyla birlikte yeni hatların çalışma davranışını incelemek için, üretilen Lens1'in dizi portlarına giden hat kısmı kesilmiş ve yerine yeni üretilen hat kartı monte edilmiştir. Şekil 7.2'de Lens2 gösterilmiştir. Lens kartı ile hat kartı, iki muadil malzeme kullanılarak üretildiği için görüntü olarak farklı gözükmesine rağmen elektriksel olarak aynı karakteristiğe sahiptir. Lens kartının LPKF'ye sığmaması dolayısıyla kesilen Lens1 kartı manuel olarak ince bir işçilikle kesilmiştir. Kesilen lens kartına uyacak şekilde yeni hat kartı üretilmiştir. Üretilen hat kartı ile kesilen Lens1'in montajı, ilk önce toprak katmanının sürekliliğini sağlamak için, bakır bant üzerine kesilen bakır levhaların toprak katmanına lehimlenmesi yoluyla yapılmıştır. Toprak katmanının sürekliliği sağlanan Lens2'nin, dizi portlarına giden iletim hatları lehimlenmiştir. Bu işlemler sonucunda üretilen Lens2, Şekil 7.2'de görüldüğü şekilde Network Analizör'e bağlanarak ölçülmüştür.



Şekil 7.1 Üretilen Lens1'in önden görünümü



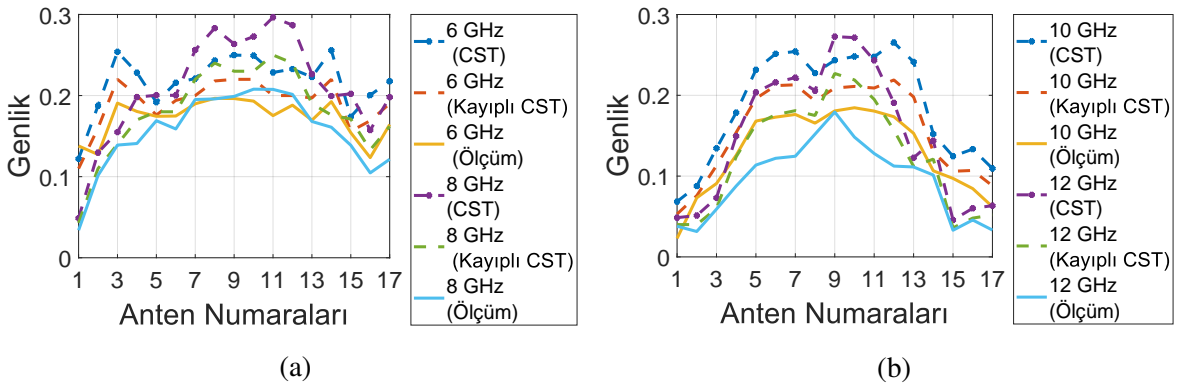
Şekil 7.2 Üretilen Lens2'nin önden ve Network Analizör ile görünümü

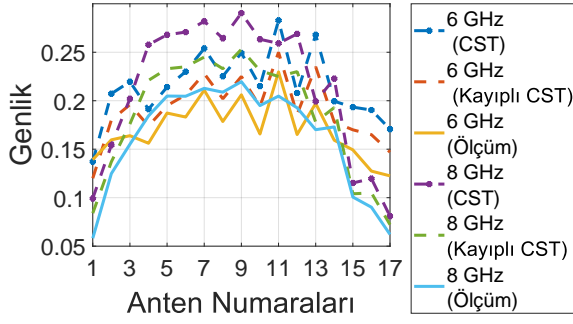
7.2. Network Analizör Üzerinden Lens Ölçümü ve Verilerin İşlenmesi

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'de görülen Lens1 ve Lens2 için ayrı ayrı yuzdokuzar adet S_{21} ölçüm verisi alınmıştır. Alınan bu verilerdeki genlik ve faz değerleri, lens davranışını anlamak adına incelenmiştir. Alt bölüm 7.2.1. ve 7.2.2.'de, sırasıyla, Lens1 ölçümüyle dizi port çıkışında elde edilen genlik ve faz değerleri, farklı frekanslar için incelenmiştir. Alt bölüm 7.2.1. ve 7.2.2.'de yapılan çalışma, Lens2'nin anten bağlantısı ile kullanılmayacak olması dolayısıyla, Lens2 için yapılmamıştır. Alt bölüm 7.2.1. ve 7.2.2.'de Lens1 için elde edilen genlik ve faz değerleri ile Lens2 için gösterimi yapılmayan ölçüm verileri 7.2.3. bölümünde dizi faktörlerin çizdirilmesi için kullanılmıştır.

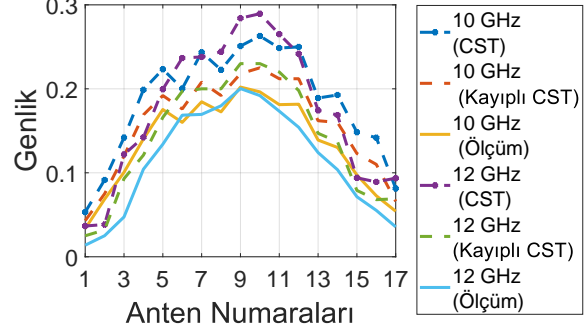
7.2.1. Lens1 Dizi Portlarında Elde Edilen Genlik Değeri

Lens1'in 7 hüzmeye girişi karşılık, 17 dizi portu çıkışı incelendiğinde, 17 dizi portunun her birine farklı genlik değerinin ulaştığı gözlemlenmiştir. Alt bölüm 4.5.7.'de sadece kayıpsız formda kullanılan taban malzeme ve metal yüzey için yapılan CST simülasyonunun yanı sıra, bu alt bölümde tasarımı derinlemesine anlamak adına, taban malzeme kayıp faktörü ve bakır iletkenliği, CST'de hesaba katılarak, lens çıkış portlarına ulaşan EM dalganın genlik değeri üzerine ek bir değerlendirme yapılmıştır. Değerlendirme yapılan veriler, kayıp faktörü göz önünde bulundurulmuş ve bulundurulmayan CST simülasyon sonuçları ile Network Analizör üzerinden ölçümü yapılan lense aittir. İnceleme, 4 ayrı frekans ve 3 farklı durum için yapılmıştır. İncelenen veriler, 6-12 GHz aralığında 2 GHz örnekleme aralığı ile incelenmiştir. Şekil 7.3'te, yukarıdan aşağı lens çıkış portu numaraları 1'den 17'ye numaralandırıldığında, çıkış portlarına karşılık gelen doğrusal genlik değerleri gösterilmiştir. Şekil 7.3'teki tüm sonuçlar incelendiğinde, kayıpsız CST simülasyon sonucunun en yüksek doğrusal genlik değerini verdiği, ölçüm sonucunda elde edilen verilerin ise en düşük doğrusal genlik değerini verdiği gözlemlenmiştir. CST'de kayıplı ve kayıpsız yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen genlik farkı, kayıplı CST simülasyonu ile ölçüm sonucu arasındaki genlik farkına benzer bir sonuç vermiştir. Kayıplar gözeten CST simülasyonu ile ölçüm sonucu arasındaki genlik farkı, CST'de varsayılan kayıp değerlerinin gerçek değerlere göre daha küçük olmasından ve CST'nin yüzey pürüzlülüğü gibi kritik kayıp faktörlerini hesaba katmamasından kaynaklanmaktadır.

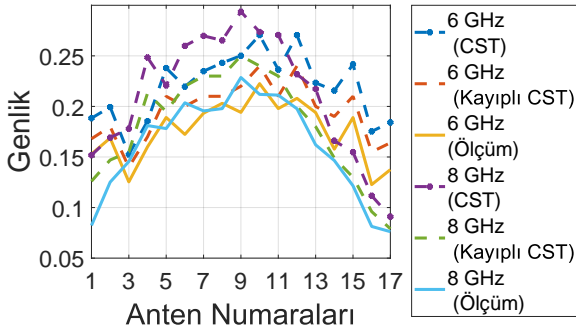




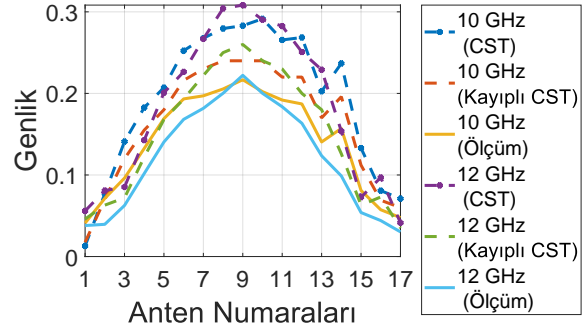
(c)



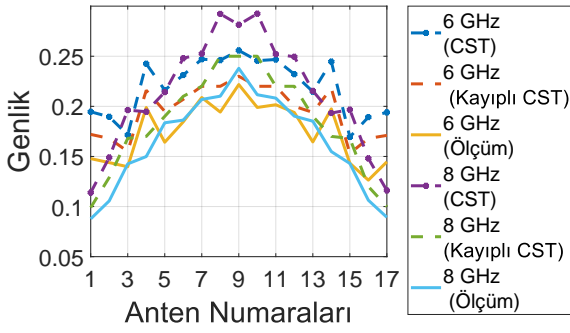
(d)



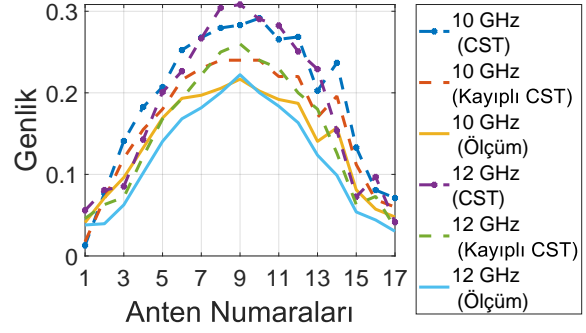
(e)



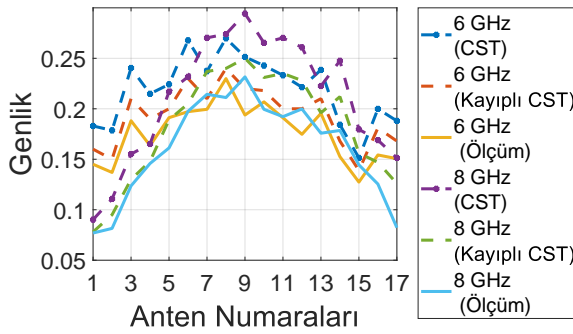
(f)



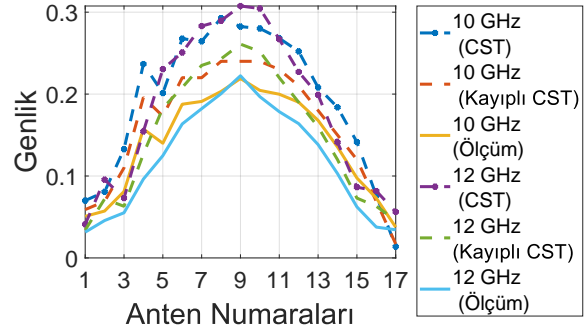
(g)



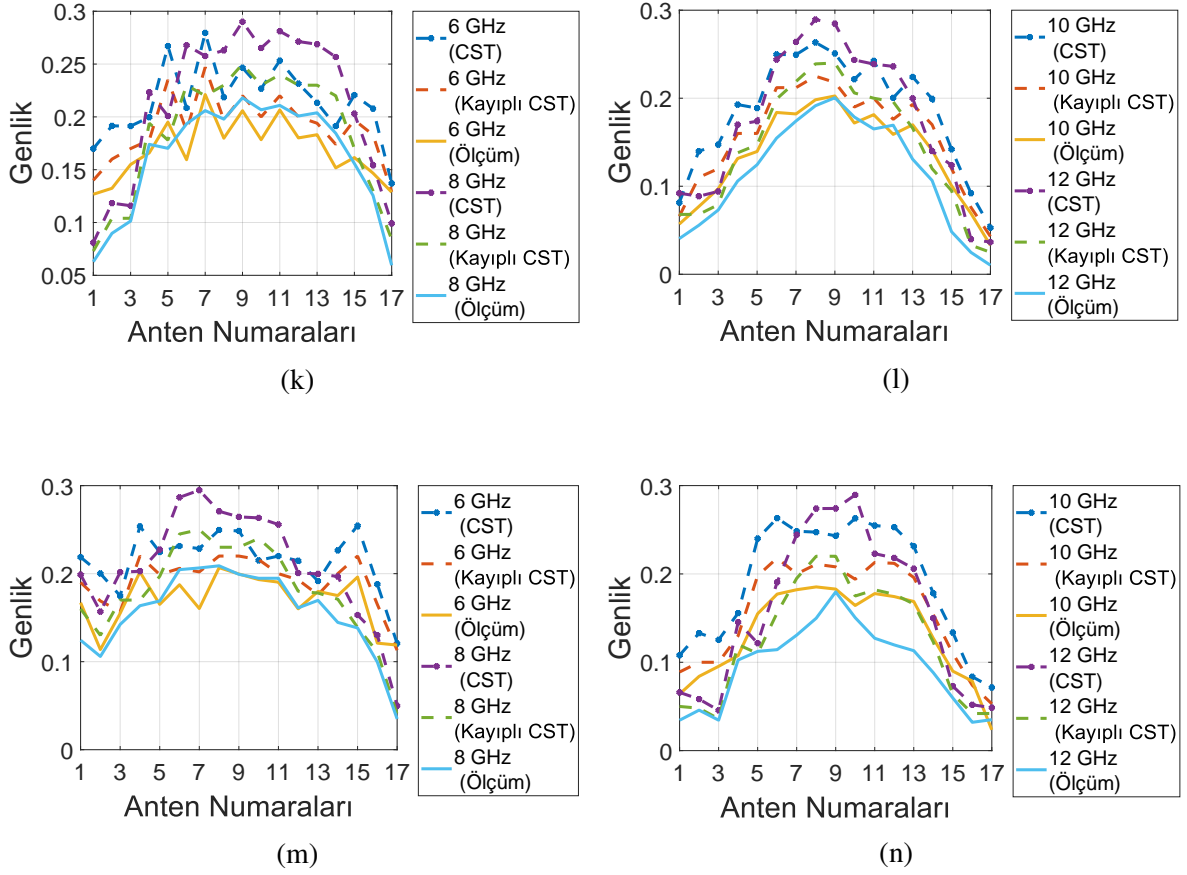
(h)



(i)



(j)



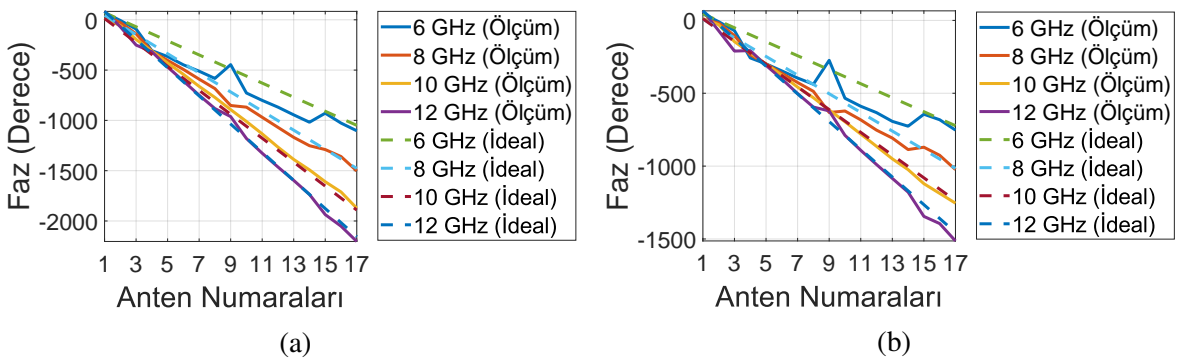
Şekil 7.3 Lens1 çıkışında a) 1. c) 2. e) 3. g) 4. i) 5. k) 6. m) 7. hüzme portundan 6 ve 8 GHz'de, b) 1. d) 2. f) 3. h) 4. j) 5. l) 6. n) 7. hüzme portundan 10 ve 12 GHz'de elde edilen genlik değerleri

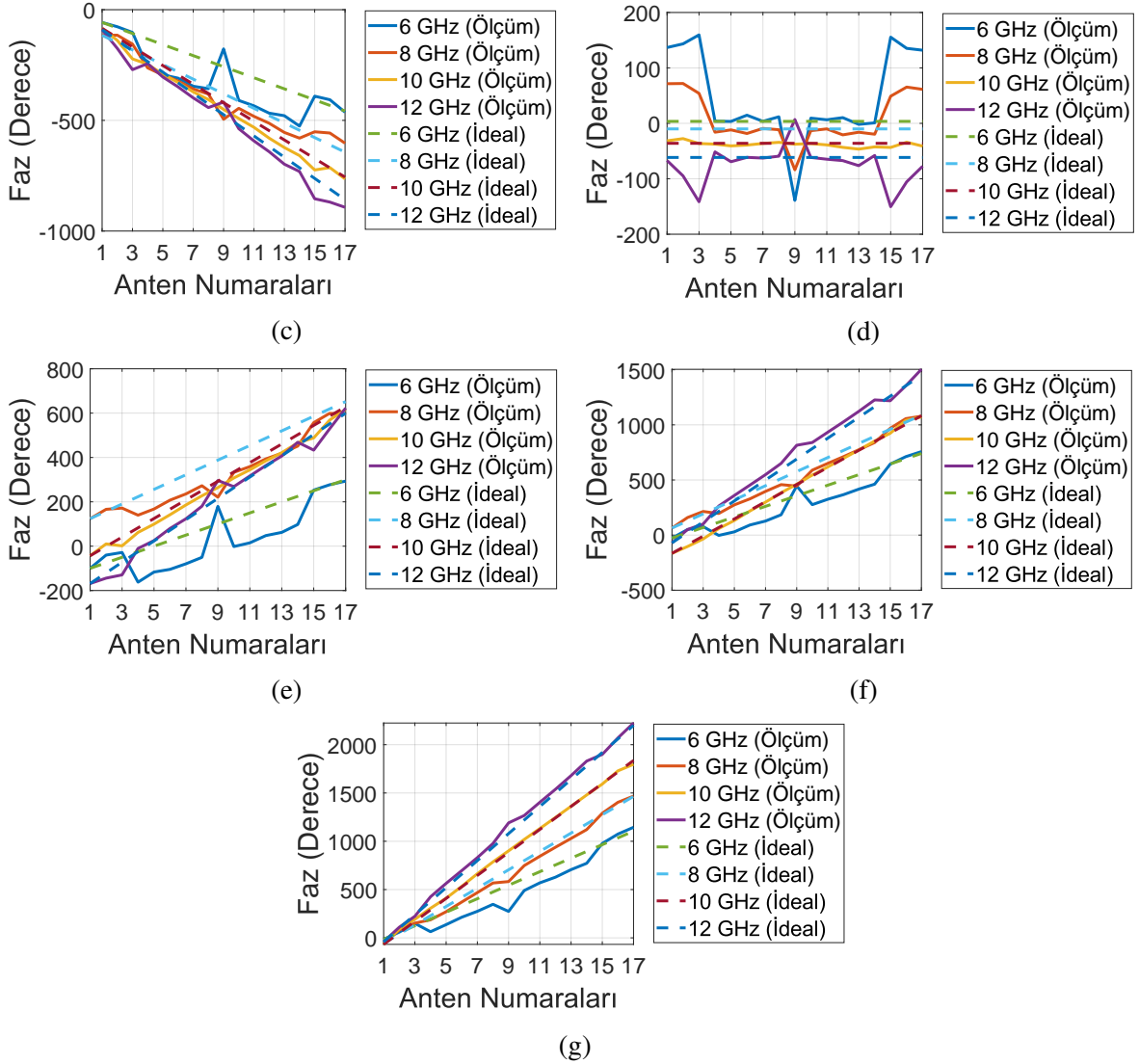
Şekil 7.3'te kayıpsız CST sonucu ile ölçüm sonucu arasındaki genlik farkı dB cinsinde incelendiğinde lens çıkışında; 8.5 GHz'de, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.4 dB, 2.5 dB, 2.5 dB, 1.8 dB, 2.1 dB, 2.5 dB, 3.4 dB, 10 GHz'de, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.7 dB, 3.7 dB, 2.8 dB, 3.25 dB, 3 dB, 2.75 dB, 4.2 dB, 12 GHz'de, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 4 dB, 2.8 dB, 3.54 dB, 2.7 dB, 2.7 dB, 3.3 dB, 5.65 dB genlik düşüşü gözlemlenmiştir. Genlik düşüşü, Lens1 girişindeki hüzme portlarının empedans uyumsuzluğundan veya lensin ışınım ve iletim kaybından kaynaklanabilmektedir. Lens1 girişinde empedans uyumsuzluğu olup olmadığını kontrol etmek için tüm lens dizi portları 50 Ohm'luk yüklerle sonlandırılarak, hüzme portlarının yansımaya katsayıları, Network Analizör üzerinden ölçülmüştür. 7 hüzme portu için incelenen 7 yansımaya katsayısı grafiği incelendiğinde, 5-15 GHz arasında yansımaya katsayısının bütün bantta -10 dB altında olduğu gözlemlenmiştir.

Lens1 çıkışındaki genlik düşüşünün, empedans uyumsuzluğundan kaynaklanmadığı bu şekilde kanıtlanmıştır. Lens1 çıkışında ışıma, malzeme ve iletkenlik kayıpları dolayısıyla genlik düşüşü gözlemlenmektedir.

7.2.2. Lens1 Dizi Portlarında Elde Edilen Faz Değeri

Lens1'in 7 hüme portu girişine karşılık, 17 dizi portu çıkışı incelendiğinde, 17 dizi portu üzerindeki faz dağılımları ve Tablo 4.4'te ifade edilen komşu dizi portları arasında beklenen ideal faz dağılımları, Şekil 7.4'te gösterilmiştir. Alt bölüm 4.5.9.'da sadece kayıpsız formda kullanılan taban malzeme ve metal yüzey için yapılan CST incelemesinin yanı sıra, bu alt bölümde, ölçümü yapılan lens, çıkış portlarına ulaşan EM dalganın faz değeri üzerine ek bir değerlendirme yapılmıştır. Değerlendirme yapılan veriler, Network Analizör üzerinden ölçümü yapılan lense ve ideal olarak komşu dizi anten elemanları arasında beklenen faz değerlerine aittir. İnceleme, 4 ayrı frekans için, 6-12 GHz aralığında 2 GHz örnekleme aralığı ile yapılmıştır. Şekil 7.4'te, yukarıdan aşağı lens çıkış portu numaraları 1'den 17'ye numaralandırıldığında, çıkış portlarına karşılık gelen derece cinsinden faz değerleri gösterilmiştir. Şekil 7.4'te gözlenen faz davranışı, daha önce alt bölüm 4.5.9.'da gözlenen faz davranışı ile benzerlik göstermiştir. Dolayısıyla ölçülen Lens1'in, CST simülasyonu ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.



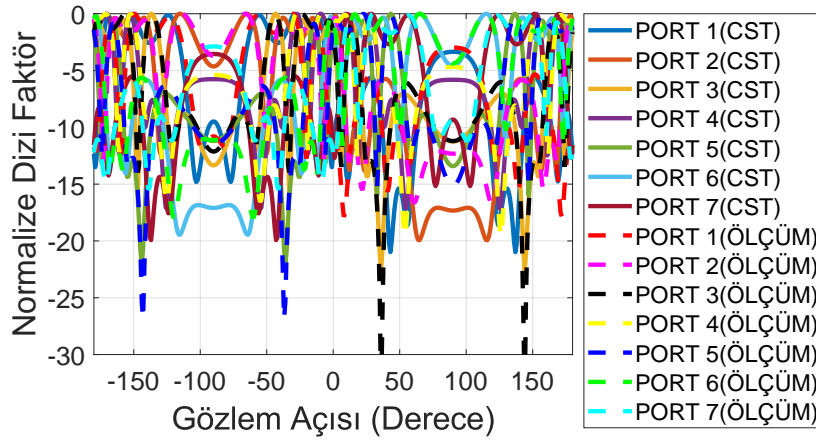


Şekil 7.4 a) 1. b) 2. c) 3. d) 4. e) 5. f) 6. g) 7. hüzme portunun uyarılmasıyla Lens1 çıkışında elde edilen faz değerleri

7.2.3. Lens1'e Ait Dizi Faktörlerin Çizdirilmesi

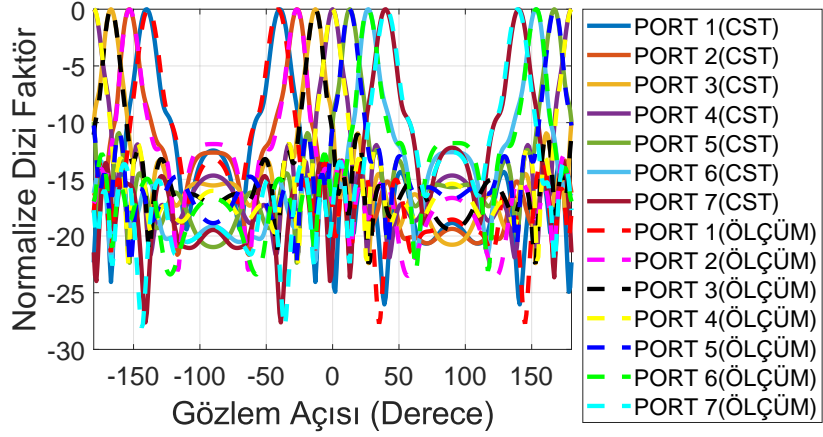
Bu alt bölümde, Şekil 7.3'teki kayıp faktörü göz önünde bulundurulmadan yapılan CST simülasyon sonucu ile Network Analizör ölçümü sonucunda elde edilen dizi port genlik değerleri ve Şekil 7.4'teki Network Analizör ölçüm sonucu ile alt bölüm 4.5.9.'daki kayıp faktörü göz önünde bulundurulmadan yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi port faz değerleri kullanılarak 6, 8, 9, 10, 11 ve 12 GHz'de anten dizi faktörleri çizdirilmiştir. Şekil 7.4 ve Şekil 4.23'deki faz grafikleri incelendiğinde,

Lens1 için elde edilen faz davranışının, Lens1'in gerçek zaman gecikmesi özelliğini tam olarak yerine getirememesi dolayısıyla, 10 GHz merkez frekansından uzaklaştıkça bozulmaya uğradığı gözlemlenmektedir. Aynı zamanda bu grafikler incelendiğinde, üretilen Lens1 ile CST üzerinden simülasyonu yapılan Lens1'in benzer bir faz eğrisine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasındaki temel fark, genlik değerlerindeki düşüş olarak gözlemlenmiştir. Ancak genlik davranışı, benzer bir karakteristiğe sahiptir. Dolayısıyla bu alt bölümde incelenecek olan dizi faktörlerin, bu bilgiler ışığında değerlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 7.5'te 6 GHz'de çizdirilen dizi faktör grafiği gösterilmektedir. Faz grafiklerinde de görüldüğü üzere, bu frekansta ideal faz eğrisi ile elde edilen faz eğrileri arasındaki sapma miktarındaki artış, anten dizi faktörünü bozmaktadır. Beklendiği şekilde, hem CST simülasyonu sonucunda elde edilen hem de Network Analizör ölçümü sonucunda elde edilen dizi faktör grafikleri benzer bir davranış sergilemiştir.



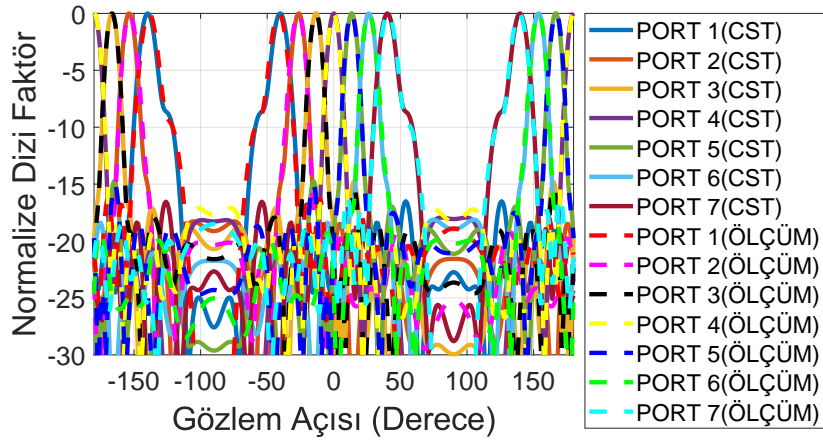
Şekil 7.5 6 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü

Şekil 7.6'da 8 GHz'de CST simülasyonu ve Network Analizör ölçümü sonucunda elde edilen dizi port genlik ve faz değerlerine göre çizdirilmiş normalize anten dizi faktör grafiği gösterilmiştir. Bu frekanstan itibaren, -10 dB altında yan lob seviyesi ve doğru tarama açısıyla birbirlerinden ayırt edilebilir anten hüzmeleri oluşturulabilmiştir.

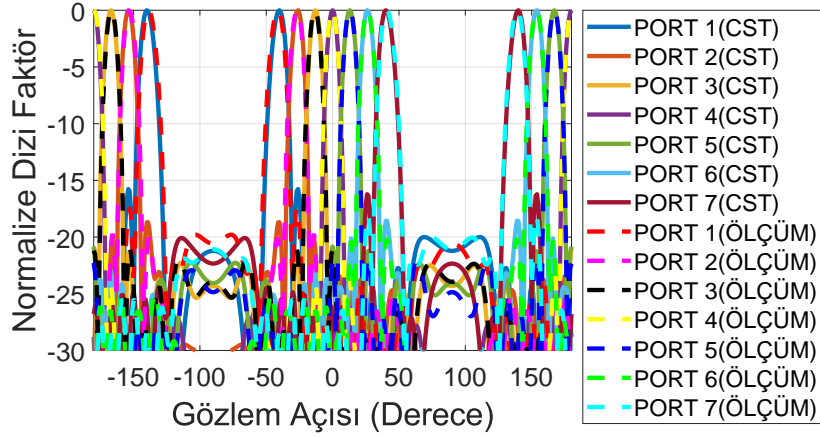


Şekil 7.6 8 GHz’de Lens1 Dizi Faktörü

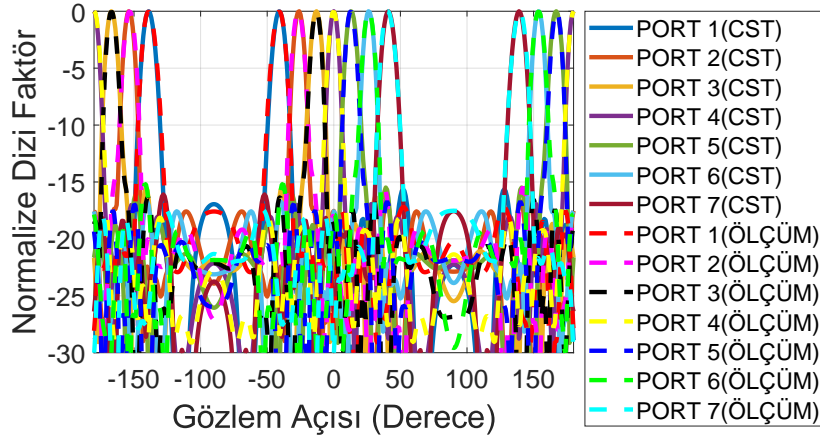
Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9’da, ideal faz eğrisi ile ölçülen ve simülasyon sonucu elde edilen faz eğrileri arasındaki sapmanın çok düşük olması dolayısıyla, beklenen normalize dizi faktör grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerde, yan lob seviyesi -15 dB ile -20 dB arasında değişmektedir. Ölçüm sonucu ile simülasyon sonucunun birbirlerine yakın sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği açı değerleri beklendiği gibi 1. hüzmeye portundan 7. hüzmeye portuna, -41° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 41° ’dir.



Şekil 7.7 9 GHz’de Lens1 Dizi Faktörü



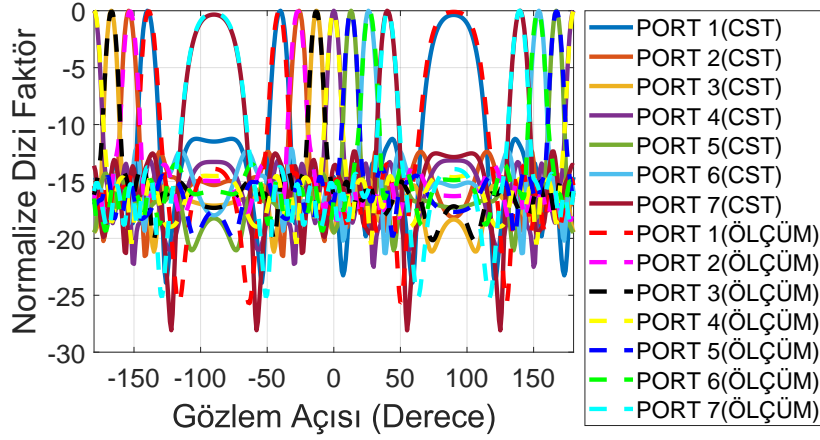
Şekil 7.8 10 GHz’de Lens1 Dizi Faktörü



Şekil 7.9 11 GHz’de Lens1 Dizi Faktörü

Şekil 7.10’da 12 GHz’de CST simülasyonu ve Network Analizör ölçümü sonucunda elde edilen dizi port genlik ve faz değerlerine göre çizdirilmiş normalize anten dizi faktör grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, ölçüm sonucu elde edilen dizi faktör grafiklerinin, simülasyon sonucu elde edilen dizi faktör grafikleri ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. 12 GHz’de dizi anten elemanları arasındaki sabit fiziksel mesafenin daha düşük frekanslara göre elektriksel olarak uzun olması dolayısıyla, grafikte görünen ızgara loblar oluşmuştur. Rotman lens, teorik olarak gerçek zaman gecikmesi özelliği dolayısıyla sonsuz frekans bandında çalışmaya uygun gibi görünmesine rağmen lens çıkışlarındaki anten bağlantısının

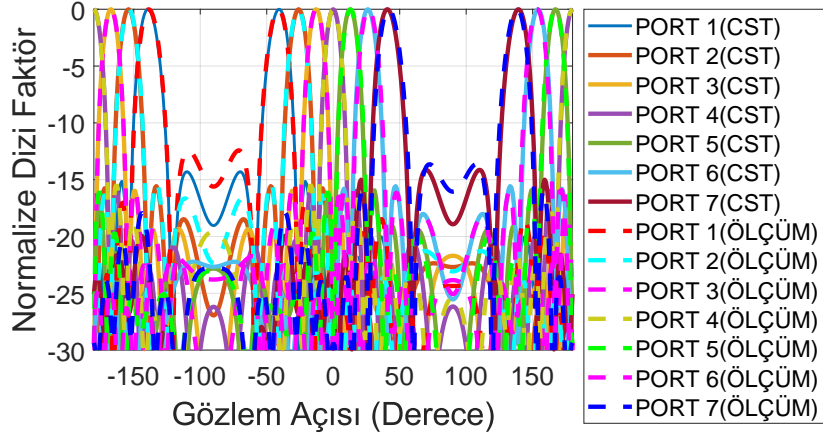
bu şekilde ızgara lob oluşturması, lensin verimli kullanılabileceği frekans bölgesini sınırlamaktadır.



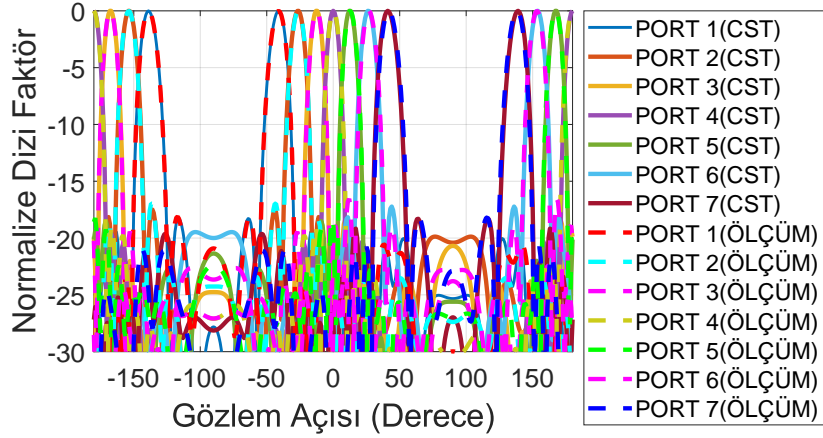
Şekil 7.10 12 GHz'de Lens1 Dizi Faktörü

7.2.4. Lens2'ye Ait Dizi Faktörlerin Çizdirilmesi

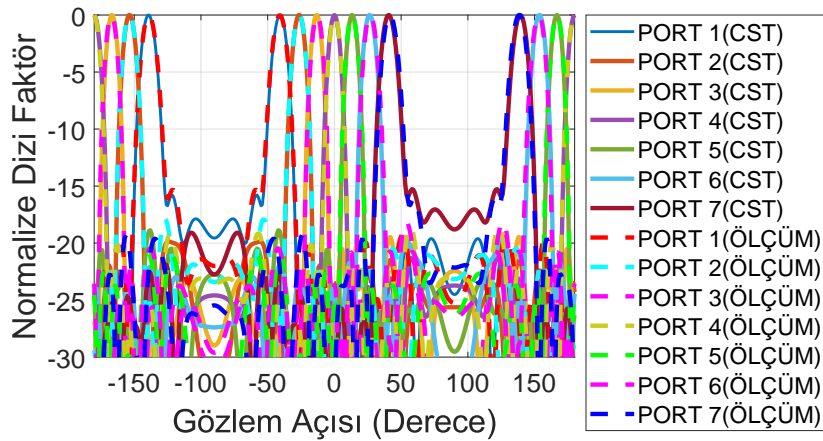
Lens2'deki dizi portlarına giden faz hatlarının uzunlukları, gerçek zaman gecikmesi özelliğiyle hesaplandığından, Lens2'nin sadece dizi antenin komşu elemanları arasındaki mesafenin sınırlayıcı etkisiyle frekans bandında sınırlanması beklenmektedir. Dolayısıyla Lens2 çıkışında elde edilen frekansa bağlı faz eğrilerinin, ideal faz eğrileri ile uyum içinde olması beklenmektedir. Bu beklentinin, alt bölüm 4.5.10.'daki Şekil 4.24 incelendiğinde, karşılağığı gözlenmiştir. Şekil 7.11 ile Şekil 7.16 arasında, sırasıyla 6, 8, 9, 10, 11 ve 12 GHz'de CST simülasyonu ve Network Analizör ölçümü sonucunda elde edilen dizi port genlik ve faz değerlerine göre çizdirilmiş normalize anten dizi faktör grafikleri gösterilmiştir. Tüm grafiklerde, oluşan anten hüzmeleri doğru açıda en yüksek kazanç seviyesine ve -12 dB altında yan lob seviyesine sahiptir. Grafiklerin tümünde, CST simülasyon sonucu ve ölçüm sonucunda elde edilen dizi faktör grafikleri tutarlı bir davranış sergilemiştir.



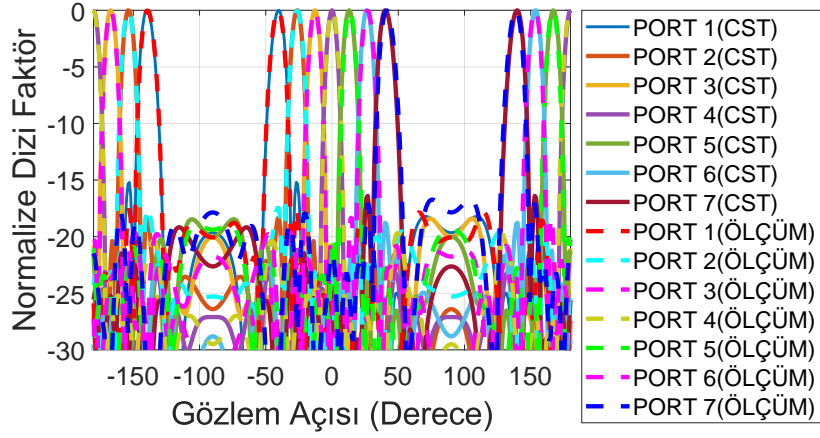
Şekil 7.11 6 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü



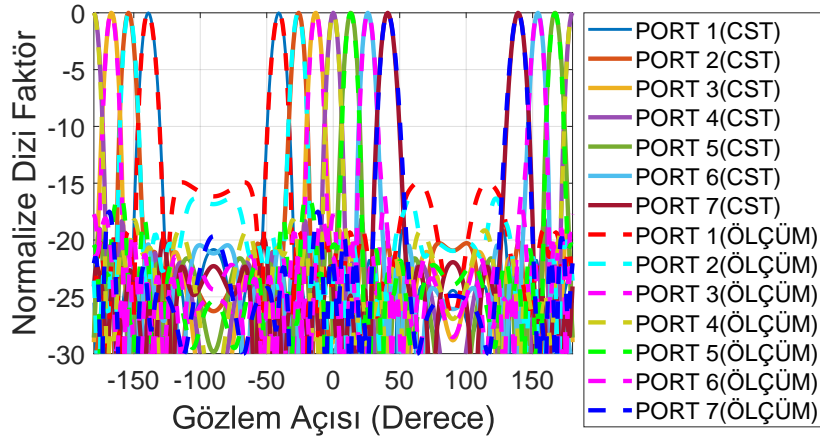
Şekil 7.12 8 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü



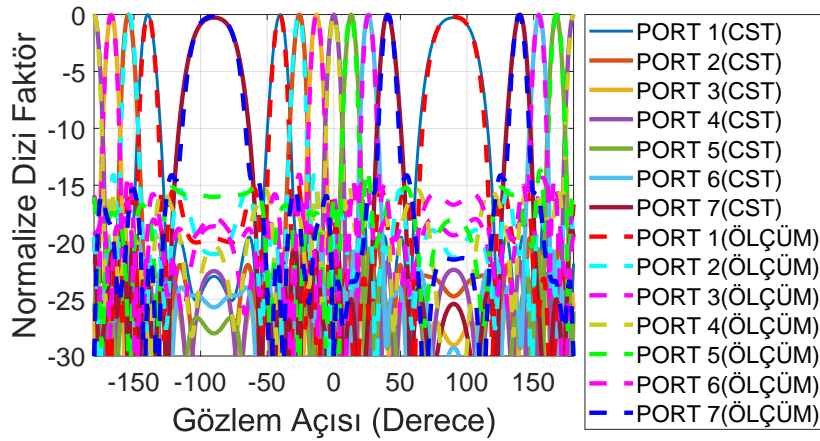
Şekil 7.13 9 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü



Şekil 7.14 10 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü



Şekil 7.15 11 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü

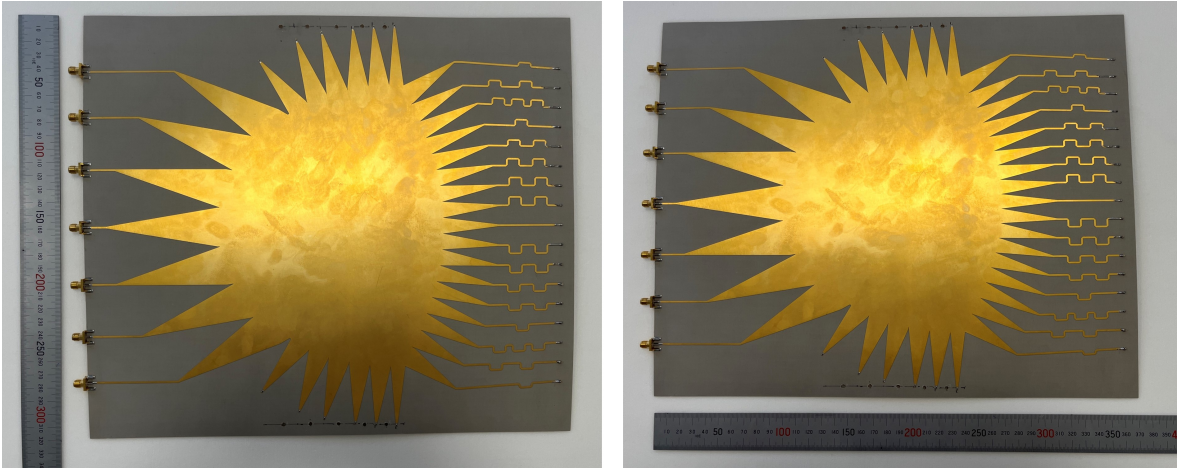


Şekil 7.16 12 GHz'de Lens2 Dizi Faktörü

Bu bölümde elde edilen dizi faktörü grafikleri, alt bölüm 7.2.3.'teki grafiklerle kıyaslandığında Lens2'nin Lens1'e göre çok daha iyi lens performansı sergilediği gözlemlenmiştir.

7.3. Lens1 ile Birleştirilen Dizi Antenler ve Yankısız Oda Uzak Alan Ölçüm Sonuçları

Şekil 7.17'de, Lens1 anten kartı gösterilmiştir. Görselde, lens boyutlarının anlaşılabilmesi için yatay ve dikey ekseninde bir cetvel kullanılmıştır.



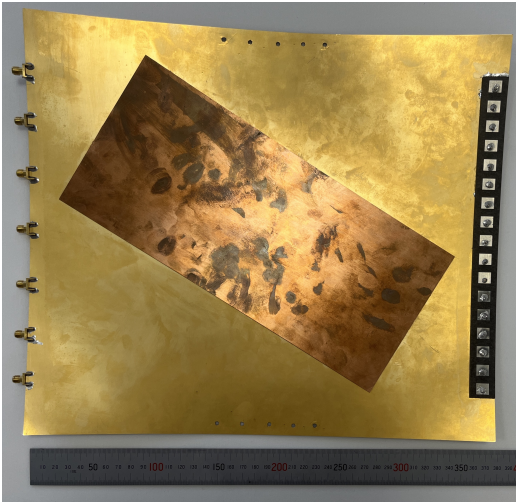
Şekil 7.17 Lens1'in önden görünümü

Lens1, lens ön yüzündeki dizi portlarına giden hatların sonunda bulunan via delikleri vasıtasıyla arka yüzeyinde konumlanacak olan anten dizisine bağlanmaktadır. Lens arka yüzeyi ve lense bağlanan anten dizileri, Şekil 7.18'de gösterilmiştir. Şekil 7.18a'da, bakır renkte görünen çapraz plaka, lens kartının büyük olması dolayısıyla kartın eğilmesini önlemek adına, çift taraflı bant ile lens plakasına yapıştırılmış, 1 mm'lik FR-4 plakadır. Plaka yanında görünen anten dizisinin, lense montajı sırasında, lens ve anten toprak plakasının teması kritik öneme sahip olduğundan, tüm dizi anten elemanlarının lehimlenmesi sırasında bir mandal yardımıyla lens ve anten kartı birbirlerine sıkıca tutturulmuştur.

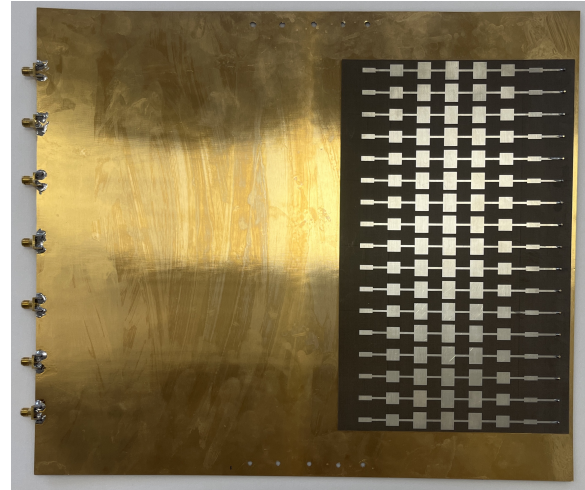
Şekil 7.18b'de lens arka yüzeyinde, lense lehimlenmiş Chebyshev dizi anten gösterilmiştir. Chebyshev dizisiyle birlikte kullanılan lensin arka yüzeyinde, lens mukavemetini arttırmak adına herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Chebyshev dizisinin, lense yakın uzunluğa ve lensin yarısına yakın genişliğe sahip olması, ek bir mukavemet gerekliliği doğurmamıştır.

Chebyshev anten plakasının büyük boyutları, lens kartı ile arasında oluşabilecek toprak plaka süreksizliği ihtimalini azaltmıştır.

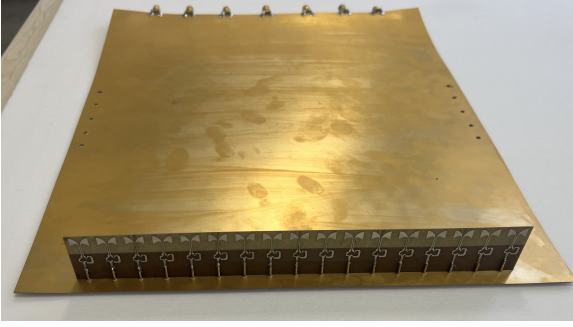
Şekil 7.18c'de, lens bağlantısı yapılan lotus antenin, lensin yan yüzeyi üzerinden görüntüsü, Şekil 7.18d'de ise üstten görüntüsü gösterilmiştir. Lotus dizi antenin yatay formda lense lehimlendiği durumda, CST simülasyonlarında lens yüzeyinin anten dizisi tarafından parazitik olarak uyarıldığı gözlemlenmiştir. Beklenmedik lens ışınması, anten kazancını düşürerek ve yan lob seviyelerini yükselterek anten ışınma örüntüsünü bozmuştur. Anten ışınma örüntüsünde istenmeyen bu bozulma, lotus antenin lense dik konumda lehimlenmesi gerekliliğini doğurmuştur. Lotus antenin, lens toprak plakası ile bağlantısını sağlayabilmek adına, lotus antenin arkasında bulunan kesik toprak plaka ile lens toprak plakası, lehim vasıtasıyla birbirlerine bağlanmıştır. Bu bağlantının yapılması sırasında, anten kartının pin delikleri ile hizalı olması çok büyük öneme sahiptir. Toprak plakası lehimlenen lotus dizi antenin, pin lehimleri yapılmıştır. Bu şekilde anten ve lens kartı birbirine bağlanmıştır.



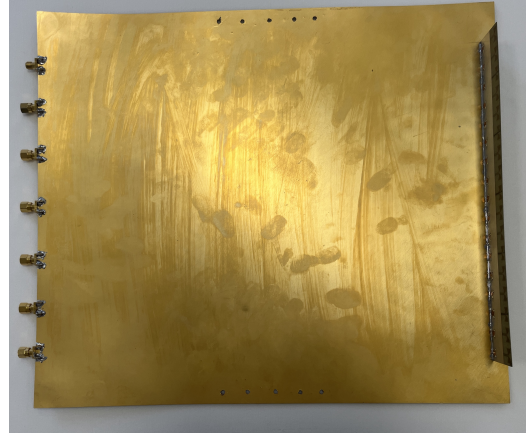
(a)



(b)



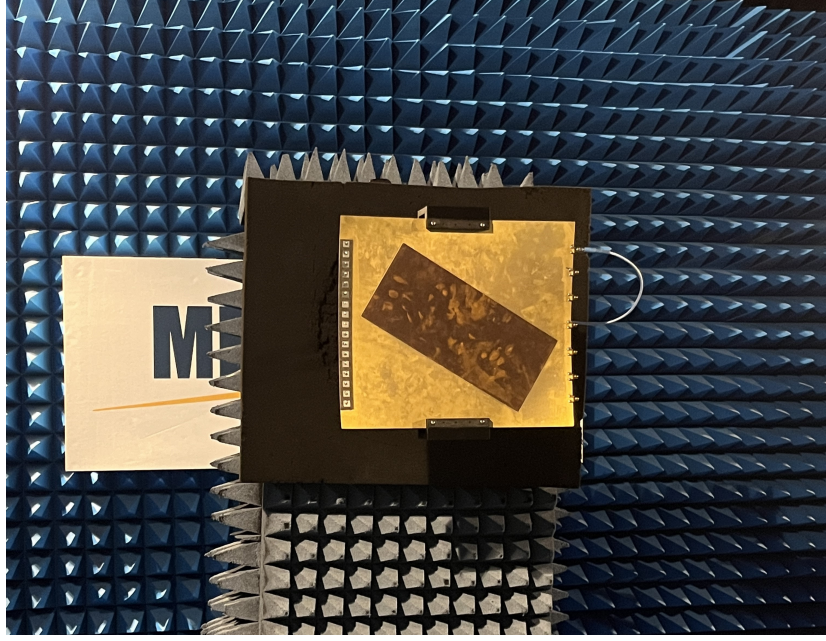
(c)



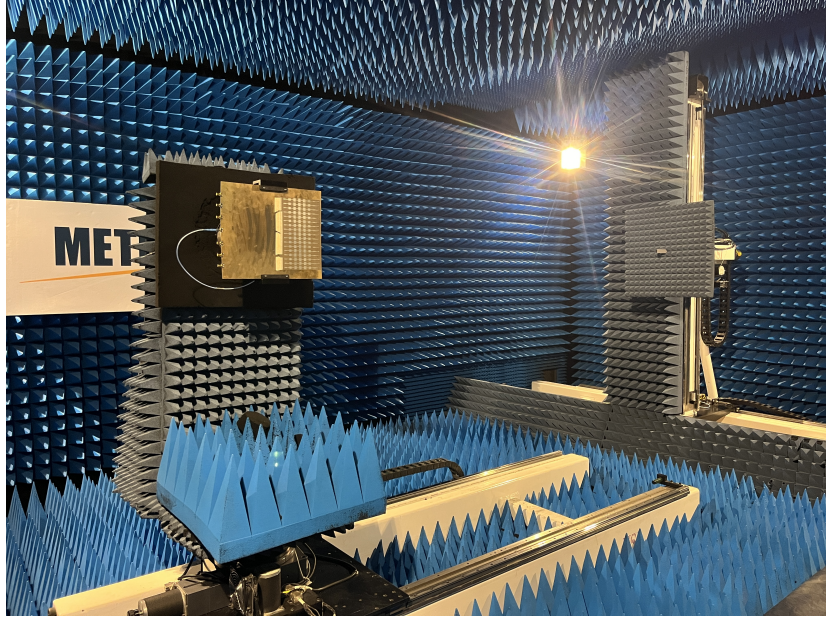
(d)

Şekil 7.18 Lens1 ile birleştirilen a) Dizi anten b) Chebyshev dizi anten c) Lotus dizi antenin yan üstten d) Lotus dizi antenin üstten gösterimi

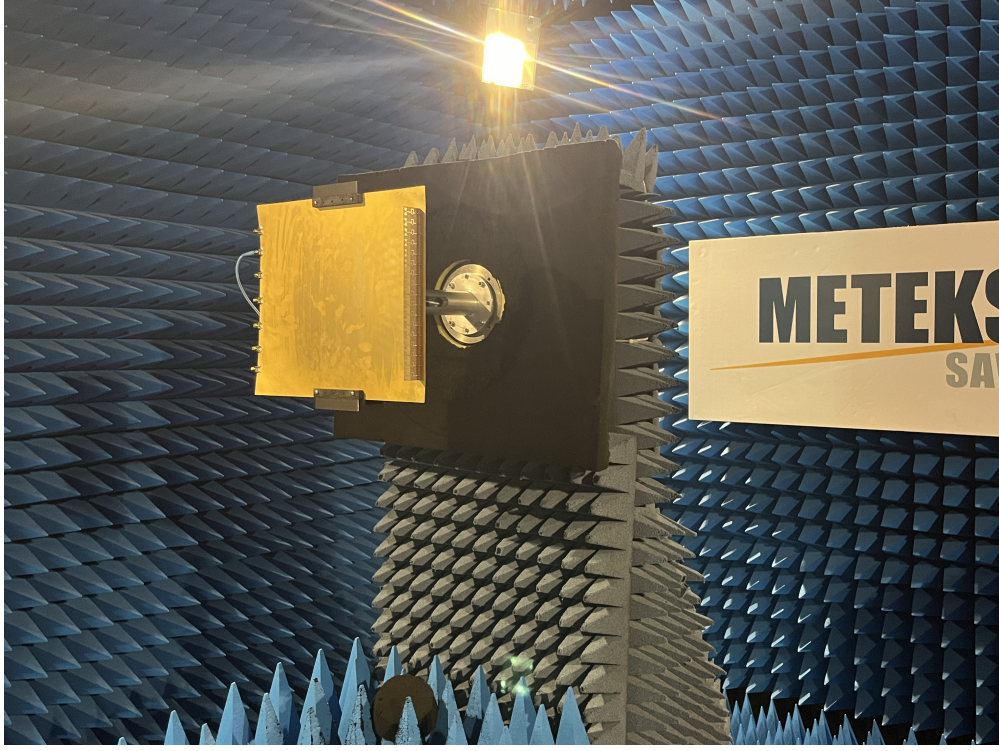
Şekil 7.19, Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de, sırasıyla dizi anten, Chebyshev dizi anten ve lotus dizi antenin yankısız oda ölçüm kurulumu gösterilmiştir. Lens1 ile birleştirilen dizi antenlerin, yankısız oda ölçümlerinin yapılabilmesi ve lensin, ölçüm arayüzüne bağlanabilmesi için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak bir aparat üretilmiştir. Üretilen aparat, Şekil 7.21’de görünen metal tutacak bölümü ile lens arasında, aracı görevi üstlenmektedir. Lensin aparatla olan bağlantısı, lens yan duvarları arasına açılan vida deliklerine monte edilen vidalar ile sağlanmaktadır. Lens üzerine açılan vida delikleri, Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de görülebilmektedir. Üretilen aparat, Şekil 7.22’de gösterilmektedir.



Şekil 7.19 Yankısız oda ölçümünde dizi anten gösterimi



Şekil 7.20 Yankısız oda ölçümünde chebyshev dizi anten gösterimi



Şekil 7.21 Yankısız oda ölçümünde lotus anten gösterimi



Şekil 7.22 Yankısız oda ölçümünde kullanılan aparat

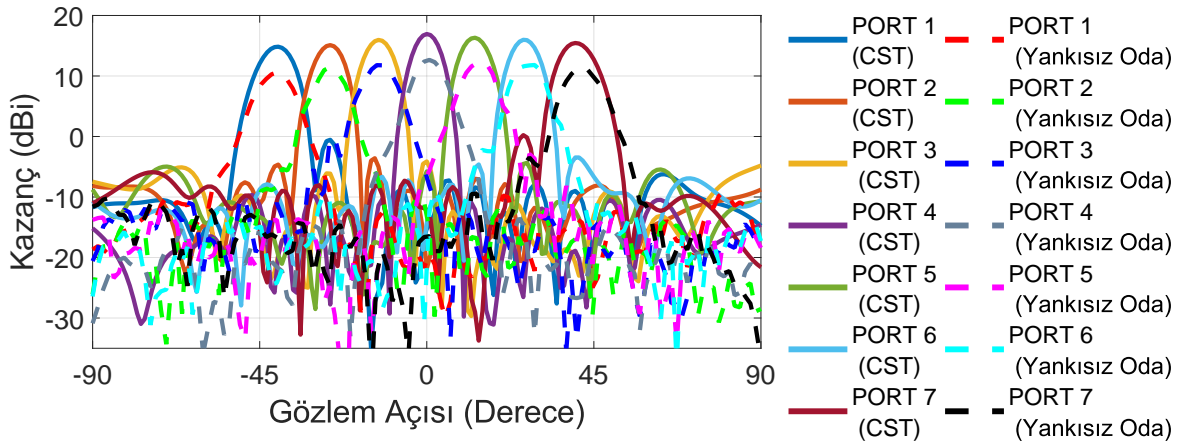
7.3.1. Dizi Anten Yankısız Oda Ölçüm Sonucu

Lens1 ile birleştirilen dizi antenin yankısız oda ölçümleri, 7 ayrı hüzmeye için yapılmıştır. Yankısız oda ölçümünde tüm hüzmeye portlarının aynı anda beslenmesi mümkün olmadığından, uzak alan ışınma örüntüleri, her bir hüzmeye portunun ayrı ayrı uyarılmasıyla elde edilmiştir. Şekil 7.23'te yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonucunda, 7 hüzmeye için elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Bu grafikte ve bundan sonraki alt bölümlerde gösterilen CST sonucu, kayıp faktörü göz önüne alınmayan simülasyona aittir. Alt bölüm 7.2.1.'de tartışıldığı üzere, dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıp faktörü hesaba katılmadan yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden, 10 GHz'de, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.7 dB, 3.7 dB, 2.8 dB, 3.25 dB, 3 dB, 2.75 dB ve 4.2 dB daha düşük olması beklenmektedir. Bu kazanç düşüşü, daha önce alt bölüm 7.2.1.'de de tartışıldığı üzere, lens üzerinde simülasyonun iyi modelleyemediği dielektrik, iletken ve ışınma kaybından kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.23 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -40° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 40° 'dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -41° , -26° , -13° , 0° , 14° , 27° ve 41° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 10° , 8° , 9° , 8° , 9° , 8° ve 10° 'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 11° , 11° , 10° , 8.5° , 10° , 11° ve 11° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 14.84 dBi, 15.1 dBi, 15.96 dBi, 16.94 dBi, 16.32 dBi, 15.98 dBi ve 15.45 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 11 dBi, 11.47 dBi, 12 dBi, 12.73 dBi, 12.53 dBi, 12.42 dBi ve 11.51 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.84 dB, 3.6 dB, 4 dB, 4.3 dB, 3.8 dB,

3.6 dB ve 4 dB düşüş gözlenmiştir. Beklenen ve gözlenen dizi anten kazanç düşüşleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 0.1 dB, 0.1 dB, 1.2 dB, 1 dB, 0.8 dB, 0.85 dB ve 0.2 dB fark gözlemlenmiştir. Beklenen ve gözlenen kazanç düşüşleri arasındaki fark, anten plakasındaki kayıpların hesaba katılmamasından, CST'nin lens ile anten arasındaki geçişi iyi modelleyememesinden, ek saçılma ve ışımalardan kaynaklanmaktadır. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -15 dB altında gözlenmektedir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri; hüzme yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzme genişlikleri cinsinden kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.1'de tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.23 Lens1'in dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.1 Dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-40	-26	-13	0	13	26	40
	Anten Kazancı (dBi)	14.84	15.1	15.96	16.94	16.32	15.98	15.45
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	10	8	9	8	9	8	10
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-41.8	-26.2	-13.46	0	14.88	27.63	41.8
	Anten Kazancı (dBi)	11	11.47	12	12.7	12.5	12.4	11.5
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	11	11	10	8.5	10	11	11

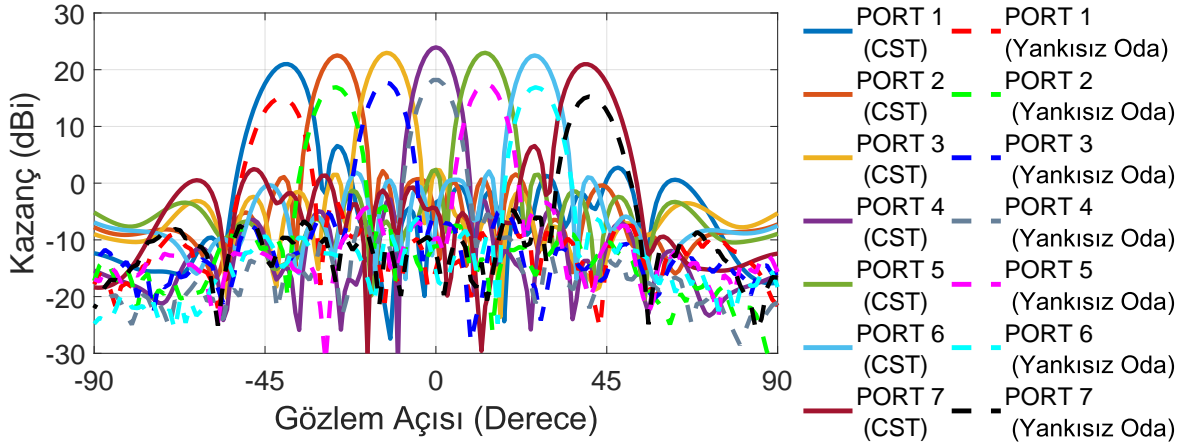
7.3.2. Seri Beslemeli Chebyshev Dizi Anten Yankısız Oda Ölçüm Sonucu

Lens1 ile birleştirilen seri beslemeli Chebyshev dizi antenin yankısız oda ölçümleri, 7 ayrı hüzme portu için yapılmıştır. Şekil 7.24'te yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonucunda, 7 hüzme portu için elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Alt bölüm 7.2.1.'de tartışıldığı üzere, seri beslemeli Chebyshev dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıp faktörsüz yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden 10 GHz'de, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.7 dB, 3.7 dB, 2.8 dB, 3.25 dB, 3 dB, 2.75 dB ve 4.2 dB daha düşük olması beklenmektedir. Bu kazanç düşüşü, daha önce alt bölüm 7.2.1.'de de tartışıldığı üzere, lens üzerinde simülasyonun iyi modelleyemediği dielektrik, iletken ve ışınma kaybından kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.24 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -39° , -26° , -13° , 0° , 13° , 26° ve 39° 'dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin

en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -40.4° , -26.2° , -13.5° , 0° , 13.5° , 26.2° ve 40.4° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 10° , 8° , 8° , 8° , 8° , 8° ve 10° 'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 7° , 7° , 7° , 7° , 7° , 7° ve 7° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 21 dBi, 22.52 dBi, 23 dBi, 23.94 dBi, 23 dBi, 22.5 dBi ve 21 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 15.25 dBi, 17 dBi, 17.6 dBi, 18.2 dBi, 17.8 dBi, 17 dBi ve 15.1 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 5.75 dB, 5.5 dB, 5.4 dB, 5.7 dB, 5.2 dB, 5.5 dB ve 6.1 dB düşüş gözlenmiştir. Beklenen ve gözlenen dizi anten kazanç düşüşleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 2 dB, 1.8 dB, 2.6 dB, 2.45 dB, 2.2 dB, 2.7 dB ve 1.9 dB fark gözlemlenmiştir. Beklenen ve gözlenen kazanç düşüşleri arasındaki fark, anten plakasındaki kayıpların hesaba katılmamasından, ek saçılma ve ışımalardan kaynaklanmaktadır. Bu bölümde gözlenen ve beklenen anten kazancındaki düşüşün, bir önceki bölümdeki dizi antene göre daha yüksek olmasının nedeni, seri beslemeli Chebyshev dizi anten plakasının boyutlarının dizi anten plakası boyutlarına göre büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Seri beslemeli Chebyshev dizi antenin daha büyük taban malzeme kartı ve metal plakaya sahip olması, üzerinde oluşan kayıp miktarını arttırmıştır. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -15 dB altında gözlenmiştir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri; hüzmeye yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzmeye genişlikleri cinsinden kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.2'de tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.24 Lens1'in Chebyshev dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.2 Chebyshev dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-39	-26	-13	0	13	26	39
	Anten Kazancı (dBi)	21	22.52	23	23.94	23	22.5	21
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	10	8	8	8	8	8	10
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-40.4	-26.2	-13.46	0	13.46	26.2	40.4
	Anten Kazancı (dBi)	15.25	17	17.6	18.2	17.8	17	15.1
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	7	7	7	7	7	7	7

7.3.3. Lotus Dizi Anten Yankısız Oda Ölçüm Sonucu

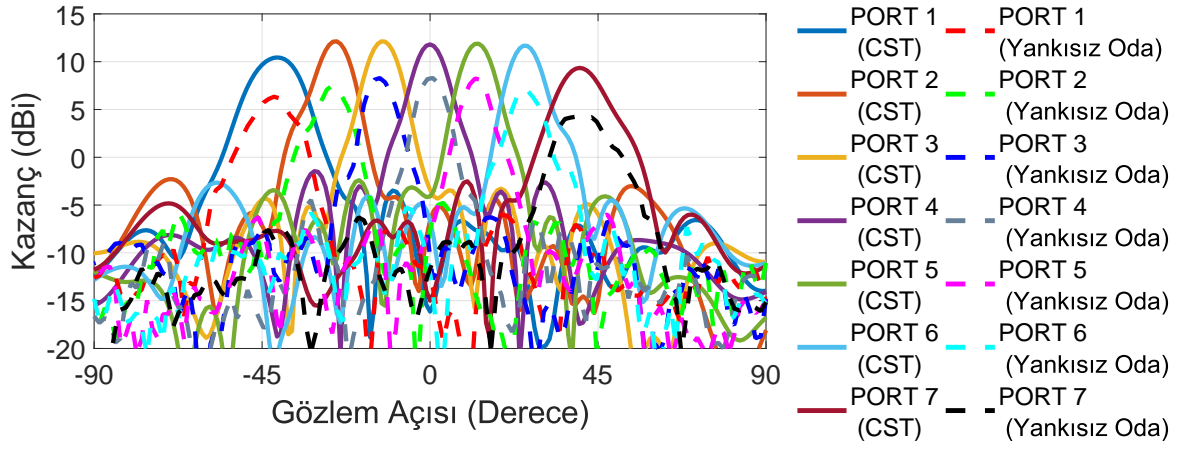
Bu alt bölümde, sırasıyla, 8.5, 9, 10, 11 ve 12 GHz'de Lens1 ile birleştirilen lotus anten dizisinin yankısız oda ölçümleri, 7 ayrı hüzme portu için gösterilmiştir. Şekil 7.25'te yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonucunda, 7 hüzme portu için elde edilen uzak alan ışınma

örüntüleri, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Alt bölüm 7.2.1.'de tartışıldığı üzere, lotus dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıp faktörsüz yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden, 8.5 GHz'de, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.4 dB, 2.5 dB, 2.5 dB, 1.8 dB, 2.1 dB, 2.5 dB ve 3.4 dB daha düşük olması beklenmektedir. Bu kazanç düşüşü, daha önce alt bölüm 7.2.1.'de de tartışıldığı üzere, lens üzerinde simülasyonun iyi modelleyemediği dielektrik, iletken ve ışımaya kayıptan kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.25 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -41° , -25° , -13° , 0° , 13° , 25° ve 40° 'dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -41.8° , -26.2° , -13.5° , 0° , 12° , 24.8° ve 40.4° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 15° , 11° , 8.5° , 8.5° , 8.5° , 11° ve 15° 'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 15° , 11° , 9.5° , 9° , 9.5° , 11° ve 15° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 10.44 dBi, 12.13 dBi, 12.13 dBi, 11.8 dBi, 11.9 dBi, 11.7 dBi ve 9.35 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 6.33 dBi, 7.5 dBi, 8.3 dBi, 8.3 dBi, 8.2 dBi, 7.1 dBi ve 4.25 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 4.1 dB, 4.6 dB, 3.8 dB, 3.5 dB, 3.7 dB, 4.6 dB ve 5.1 dB düşüş gözlenmiştir. Beklenen ve gözlenen dizi anten kazanç düşüşleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 0.6 dB, 2.1 dB, 1.3 dB, 1.7 dB, 1.6 dB, 2.1 dB ve 1.7 dB fark gözlemlenmiştir. Beklenen ve gözlenen kazanç düşüşleri arasındaki fark, anten plakasındaki kayıpların hesaba katılmamasından, simülasyonda anten ve lens arasındaki geçişin iyi modellenememesinden, ek saçılma ve ışımalarından kaynaklanmaktadır. Lotus antenin lens kartı bağlantısı, dik pinler aracılığıyla yapıldığından, pin ve anten bağlantısında empedans uyumsuzluğunu meydana

getirebilmektedir. Bir miktar güç, empedans uyumsuzluğu sonucu kaybedilebilmektedir. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -10 dB altında gözlenmektedir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri; hüzme yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzme genişlikleri cinsinden kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.3'te tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.25 Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 8.5 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.3 8.5 GHz’de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

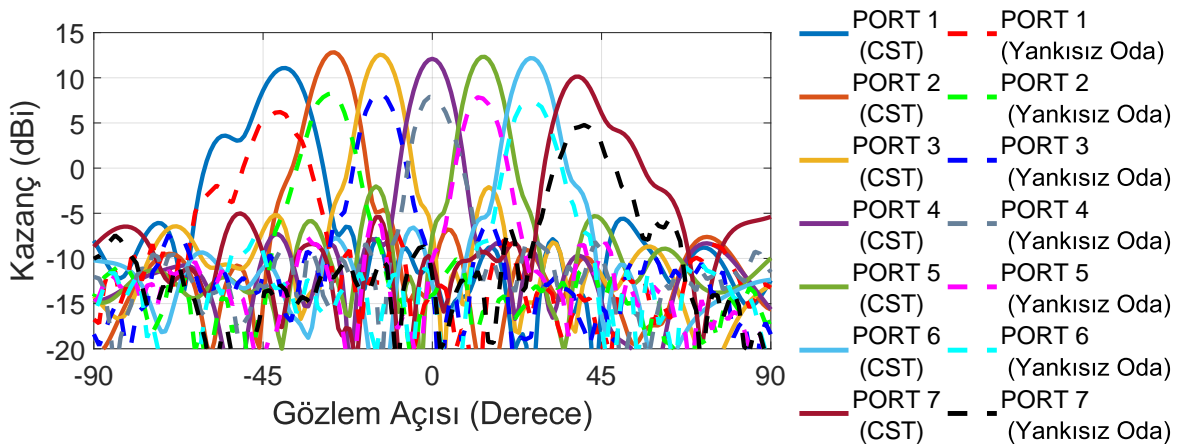
	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-41	-25	-13	0	13	25	40
	Anten Kazancı (dBi)	10.44	12.13	12.13	11.8	11.9	11.7	9.35
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	15	11	8.5	8.5	8.5	11	15
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-41.8	-26.2	-13.46	0	12	25	41
	Anten Kazancı (dBi)	6.33	7.5	8.3	8.3	8.2	7.1	4.25
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	15	11	9.5	9	9.5	11	15

Şekil 7.26’da, 9 GHz’de yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu yapılan Lens1’le birleştirilen lotus dizi antenin, 7 hüzme portu için elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Alt bölüm 7.2.1.’de tartışıldığı üzere, lotus dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıp faktörsüz yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden, 9 GHz’de sırasıyla Port1’den Port7’ye, 3.4 dB, 2.5 dB, 2.5 dB, 1.8 dB, 2.1 dB, 2.5 dB ve 3.4 dB daha düşük olması beklenmektedir.

Şekil 7.26 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1’den Port7’ye, -39° , -26° , -14° , 0° , 14° , 26° ve 39° ’dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1’den Port7’ye, -40.4° , -26.2° , -13.5° , 0° , 12° , 26.2° ve 40.4° ’dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzme genişliği, sırasıyla Port1’den Port7’ye, 11° , 9.5° , 8.5° , 9° , 8.5° , 9.5° ve 11° ’dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzme genişliği, sırasıyla Port1’den Port7’ye, 10° , 10° , 9° ,

8°, 8°, 9° ve 10°'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 11 dBi, 12.8 dBi, 12.6 dBi, 12.1 dBi, 12.3 dBi, 12.2 dBi ve 10.1 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 6.2 dBi, 8.3 dBi, 8.3 dBi, 7.9 dBi, 7.9 dBi, 7.25 dBi ve 4.8 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 4.8 dB, 4.5 dB, 4.3 dB, 4.2 dB, 4.4 dB, 4.95 dB ve 6.3 dB düşüş gözlenmiştir. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -10 dB altında gözlenmektedir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri; hüzmeye yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzmeye genişlikleri cinsinden kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.4'te tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.26 Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 9 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.4 9 GHz’de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

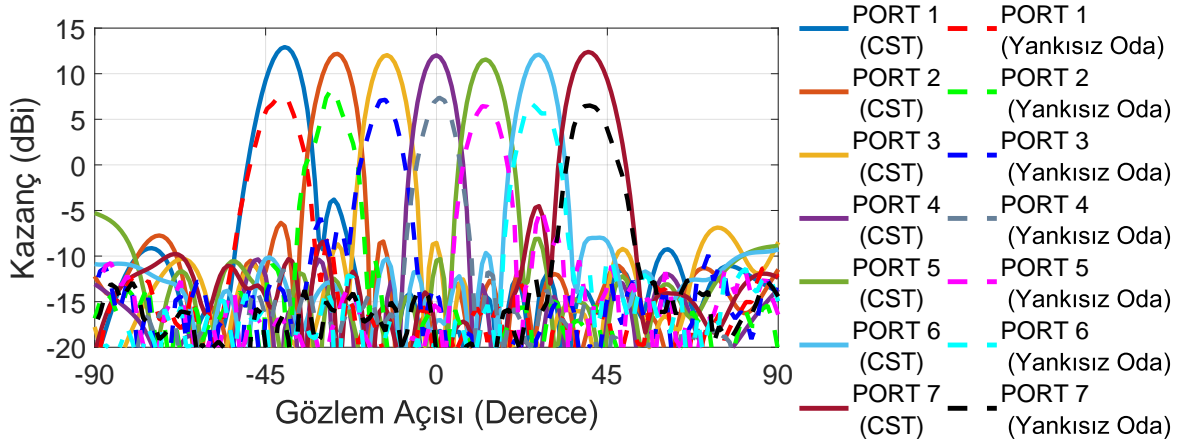
	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-39	-26	-14	0	14	26	39
	Anten Kazancı (dBi)	11	12.8	12.6	12.1	12.3	12.2	10.1
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	11	9.5	8.5	9	8.5	9.5	11
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-40.4	-26.2	-13.46	0	12	26.2	40.4
	Anten Kazancı (dBi)	6.2	8.3	8.3	7.9	7.9	7.25	4.8
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	10	10	9	8	8	9	10

Şekil 7.27’de yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonucunda 10 GHz’de, 7 hüzme portu için elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Alt bölüm 7.2.1.’de tartışıldığı üzere, lotus dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıp faktörsüz yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden, 10 GHz’de sırasıyla Port1’den Port7’ye, 3.7 dB, 3.7 dB, 2.8 dB, 3.25 dB, 3 dB, 2.75 dB ve 4.2 dB daha düşük olması beklenmektedir. Bu kazanç düşüşü, daha önce alt bölüm 7.2.1.’de tartışıldığı üzere, lens üzerinde simülasyonun iyi modelleyemediği dielektrik, iletken ve ışınma kaybından kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.27 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1’den Port7’ye, -40° , -26° , -13° , 0° , 13° , 27° ve 40° ’dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1’den Port7’ye, -40.4° , -27.6° , -13.5° , 0° , 12° , 24.8° ve 40.4° ’dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzme genişliği, sırasıyla Port1’den Port7’ye, 9° , 8° , 8° , 7.5° , 8° , 8°

ve 9°'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 9.5°, 8°, 8.5°, 7°, 8.5°, 8° ve 9.5°'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 12.9 dBi, 12.2 dBi, 12 dBi, 12 dBi, 11.6 dBi, 12 dBi ve 12.4 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 7.6 dBi, 8.3 dBi, 7.1 dBi, 7.4 dBi, 6.45 dBi, 6.8 dBi ve 6.5 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 5.3 dB, 3.9 dB, 4.8 dB, 4.6 dB, 5 dB, 5.2 dB ve 5.9 dB düşüş gözlenmiştir. Beklenen ve gözlenen dizi anten kazanç düşüşleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 1.6 dB, 0.2 dB, 2 dB, 1.3 dB, 2 dB, 2.4 dB ve 1.7 dB fark gözlemlenmiştir. Beklenen ve gözlenen kazanç düşüşleri arasındaki fark, anten plakasındaki kayıpların hesaba katılmamasından, ek saçılma ve ışımalardan kaynaklanmaktadır. Lotus antenin lens kartı bağlantısı, dik pinler aracılığıyla yapıldığından, pin ve anten bağlantısında empedans uyumsuzluğunu meydana getirebilmektedir. Bir miktar güç, empedans uyumsuzluğu sonucu kaybedilebilmektedir. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -10 dB altında gözlenmektedir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri; hüzmeye yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzmeye genişlikleri cinsinden kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.5'te tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.27 Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 10 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.5 10 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

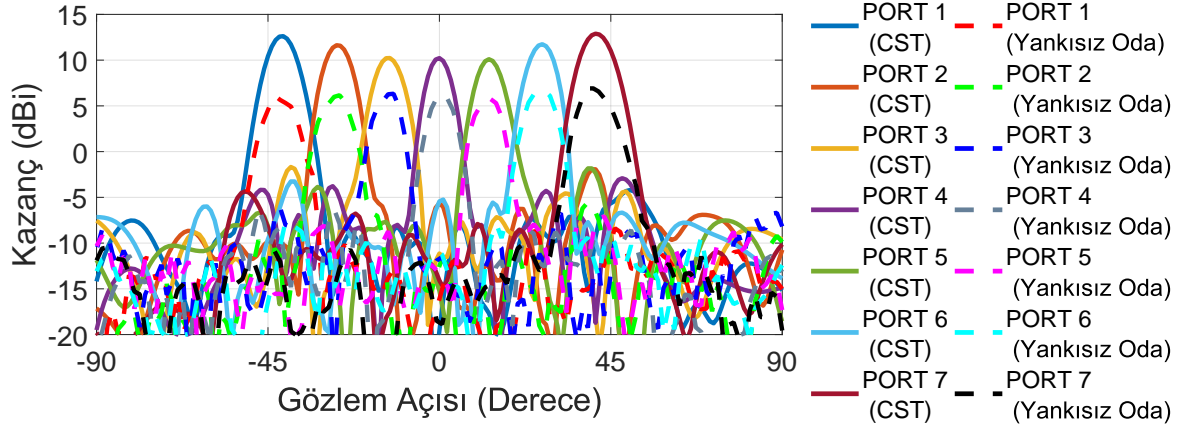
	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-40	-26	-13	0	13	27	40
	Anten Kazancı (dBi)	12.9	12.2	12	12	11.6	12	12.4
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	9	8	8	7.5	8	8	9
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-40.4	-27.6	-13.46	0	12	24.8	40.4
	Anten Kazancı (dBi)	7.6	8.3	7.1	7.4	6.45	6.8	6.5
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	9.5	8	8.5	7	8.5	8	9.5

Şekil 7.28'de yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonucunda 11 GHz'de, 7 hüzme portu için elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri, yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Lotus dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıpsız yapılan CST simülasyonu sonucunda

elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden, 11 GHz'de sırasıyla Port1'den Port7'ye, 3.8 dB, 3 dB, 3.6 dB, 3.25 dB, 3 dB, 2.75 dB ve 5 dB daha düşük olması beklenmektedir. Bu kazanç düşüşü, daha önce alt bölüm 7.2.1.'de de tartışıldığı üzere, lens üzerinde simülasyonun iyi modelleyemediği dielektrik, iletken ve ışımaya kayıbdan kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.28 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -41° , -27° , -13° , 0° , 13° , 27° ve 41° 'dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -43.2° , -26.2° , -12° , 0° , 13.5° , 27.6° ve 43.2° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 9° , 8° , 8° , 7° , 8° , 8° ve 9° 'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 9.5° , 10° , 8° , 7° , 8° , 10° ve 9.5° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 12.6 dBi, 11.6 dBi, 10.2 dBi, 10.2 dBi, 10.2 dBi, 11.6 dBi ve 12.6 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 6.1 dBi, 6.1 dBi, 6.3 dBi, 6.2 dBi, 5.7 dBi, 6.6 dBi ve 6.9 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 6.5 dB, 5.5 dB, 3.9 dB, 4 dB, 6.5 dB, 5 dB ve 5.7 dB düşüş gözlenmiştir. Beklenen ve gözlenen dizi anten kazanç düşüşleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 2.7 dB, 2.5 dB, 0.3 dB, 0.75 dB, 3.5 dB, 2.25 dB ve 0.7 dB fark gözlemlenmiştir. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -10 dB altında gözlenmektedir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışımaya örüntüleri; hüzmeye yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzmeye genişlikleri cinsinden kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.6'da tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.28 Lens1'in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 11 GHz'de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.6 11 GHz'de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-41	-27	-13	0	13	27	41
	Anten Kazancı (dBi)	12.6	11.6	10.2	10.2	10.2	11.6	12.6
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	9	8	8	7	8	8	9
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-43.2	-26.2	-12	0	13.5	27.6	43.2
	Anten Kazancı (dBi)	6.1	6.1	6.3	6.2	5.7	6.6	6.9
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	9.5	10	8	7	8	10	9.5

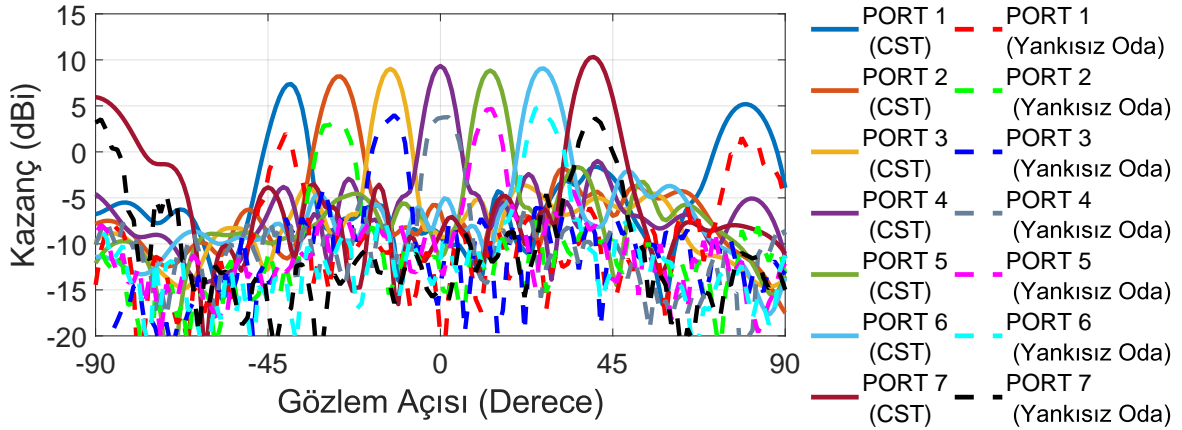
Şekil 7.29'da yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonucunda 12 GHz'de, 7 hüzme portu için elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri; yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak kartezyen formda gösterilmiştir. Alt bölüm 7.2.1.'de tartışıldığı üzere, lotus dizi antenin yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinin, kayıp faktörsüz

yapılan CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten en yüksek kazanç değerlerinden, 12 GHz'de sırasıyla Port1'den Port7'ye, 4 dB, 2.8 dB, 3.5 dB, 2.7 dB, 2.7 dB, 3.3 dB ve 5.65 dB daha düşük olması beklenmektedir. Bu kazanç düşüşü, daha önce alt bölüm 7.2.1.'de tartışıldığı üzere, lens üzerinde simülasyonun iyi modelleyemediği dielektrik, iletken ve ışıma kaybından kaynaklanmaktadır.

Şekil 7.29 incelendiğinde, CST simülasyonu sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -39° , -26° , -13° , 0° , 13° , 27° ve 40° 'dir. Yankısız oda ölçümleri sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazancı verdiği gözlem açıları, sırasıyla Port1'den Port7'ye, -40.4° , -27.6° , -12° , 0° , 13.5° , 26.2° ve 40.4° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 8° , 8° , 7° , 7° , 7° , 8° ve 8° 'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin yarı güç hüzmeye genişliği, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 8° , 10° , 7.5° , 7° , 7.5° , 10° ve 8° 'dir. CST simülasyonu sonucunda elde edilen lotus dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 7.38 dBi, 8.2 dBi, 9 dBi, 9.33 dBi, 8.85 dBi, 9 dBi ve 10.3 dBi'dir. Yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen dizi anten hüzmelerinin en yüksek kazanç değerleri, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 2 dBi, 3.3 dBi, 4 dBi, 3.8 dBi, 4.7 dBi, 4.95 dBi ve 3.65 dBi'dir. CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen kazanç değerleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 5.3 dB, 4.9 dB, 5 dB, 5.5 dB, 4.17 dB, 4 dB ve 6.7 dB düşüş gözlenmiştir. Beklenen ve gözlenen dizi anten kazanç düşüşleri arasında, sırasıyla Port1'den Port7'ye, 1.3 dB, 2.1 dB, 1.5 dB, 2.8 dB, 2.5 dB, 0.7 dB ve 1 dB fark gözlemlenmiştir. Beklenen ve gözlenen kazanç düşüşleri arasındaki fark, anten plakasındaki kayıpların hesaba katılmamasından, ek saçılma ve ışımalardan kaynaklanmaktadır. Lotus antenin lens kartı bağlantısı, dik pinler aracılığıyla yapıldığından, pin ve anten bağlantısında empedans uyumsuzluğunu meydana getirebilmektedir. Bir miktar güç, empedans uyumsuzluğu sonucu kaybedilebilmektedir. Her iki durum için de anten yan lob seviyeleri, -10 dB altında gözlenmektedir.

Bu bölümde CST simülasyonu ve yankısız oda ölçümü sonucunda elde edilen uzak alan ışıma örüntüleri, hüzmeye yönü, anten kazancı ve yarı güç hüzmeye genişlikleri cinsinden

kıyaslanmıştır. Bu parametreler için elde edilen veriler, Tablo 7.7’de tablo formunda gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde, üretilen ve simülasyonu yapılan tasarımın tutarlı bir davranış sergilediği gözlenmiştir.



Şekil 7.29 Lens1’in Lotus dizi anten ile birleştirilmesi sonucunda 12 GHz’de yükseliş ekseninde ($\Phi = 90^\circ$) kesit alınarak elde edilen kartezyen uzak alan ışınma örüntüleri

Tablo 7.7 12 GHz’de Lotus dizi anten yankısız oda ölçümü ve CST simülasyonu sonuçları

	Port Numarası	1	2	3	4	5	6	7
CST	Hüzme Yönü (Derece)	-39	-26	-13	0	13	27	40
	Anten Kazancı (dBi)	7.38	8.2	9	9.33	8.85	9	10.3
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	8	8	7	7	7	8	8
Yankısız Oda	Hüzme Yönü (Derece)	-40.4	-27.62	-12	0	13.5	26.2	40.4
	Anten Kazancı (dBi)	2	3.3	4	3.8	4.7	4.95	3.65
	3 dB Hüzme Genişliği (Derece)	8	10	7.5	7	7.5	10	8

8. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Tasarlanan Lens1 ve Lens2'ye ait dizi portlarda elde edilen genlik ve faz değerlerinin kullanılmasıyla 6-12 GHz arasında 2 GHz örnekleme aralığı ile anten dizi faktör grafikleri çizdirilmiştir. Lens1 için 6 GHz'de elde edilen dizi faktör grafiği anlamsızken, 8-12 GHz aralığında anlamlı dizi faktörü grafikleri elde edilmiştir. 8-12 GHz arasında elde edilen anten dizi faktörleri, anten görünür uzayında -10 dB altında yan lob seviyesi, beklenen yarı güç hüzmeye genişliği ve tarama açısına sahiptir. Lens2 için 6-12 GHz arasında elde edilen tüm anten dizi faktörleri, anten görünür uzayında -10 dB altında yan lob seviyesi ile beklenen yarı güç hüzmeye genişliği ve tarama açısına sahiptir.

Lens dizi portları üzerinde elde edilen sinyalin genlik ve faz değerlerinin dizi anten elemanlarını uyarmak için kullanılmasıyla, Lens1 ve Lens2 için elde edilen dizi anten uzak alan ışınma örüntüleri incelenmiş ve Lens1'in, 9, 10 ve 11 GHz'de Lens2 ile benzer lens performansı göstererek, beklenen tarama açılarında beklenen yarı güç hüzmeye genişliği, kazanç ve yan lob seviyesine sahip dizi anten hüzmeleri oluşturduğu gözlemlenmiştir. 10 GHz'de, lens hüzmeye portlarının hepsi birlikte uyarıldığında, yedi ayrı hüzmeye portunun beklenen tarama açılarında beklenen yarı güç hüzmeye genişliği, kazanç ve yan lob seviyesine sahip dizi anten hüzmelerini aynı anda oluşturduğu gözlemlenmiştir. Lens1 performansı, 8 ve 12 GHz'de gerçek zaman gecikmesi özelliğinden uzaklaşması dolayısıyla Lens2 performansına göre bozulmaktadır.

Lens1 ve Lens2, dizi antenler ile birleştirilerek kayıp faktörü gözlemlenmeden, 8-12 GHz aralığında CST simülasyonu yapılmıştır. Lens1 ve Lens2 için 10 GHz'de lensle birleştirilen dizi antenlerin en yüksek kazanç değerlerinin, lenssiz anten dizisi sonucunda elde edilen en yüksek kazanç değerlerinden 0.5 dB ile 4.3 dB arasında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak tarama açısı ve yarı güç hüzmeye genişliğinin benzer sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Buradaki anten kazançlarında meydana gelen düşüş, uzak alan ışınma örüntüsündeki yan lob seviyelerinin de yükselmesinden anlaşılabilineceği üzere, lensin ve lens üzerindeki iletim hatlarının ışınmasından kaynaklanmaktadır. Lotus dizi anten ile birleştirilen Lens1 ve Lens2 arasındaki fark, 8 ve 12 GHz'de elde edilen uzak alan ışınma örüntüleri incelenerek

gözlemlenmektedir. 8 ve 12 GHz'de Lens2, Lens1'e göre anten hüzmelerini, beklenen tarama açısında oluşturabilmiştir. Ancak Lens1 ile birleştirilen lotus dizi antenin 8 ve 12 GHz'de oluşturduğu anten hüzmeleri beklenen tarama açısı, yarı güç hüzmeye genişliği ve yan lob seviyesini karşılamamaktadır. Beklendiği gibi 10 GHz'de, anten hüzmeleri istenen tarama açısı, yarı güç hüzmeye genişliği ve yan lob seviyesine sahip şekilde oluşturulmuştur.

Lens1 için kayıplı ve kayıpsız yapılan CST simülasyonu sonucu ile ölçüm sonucunda elde edilen dizi port genlik ve faz verileri, 6-12 GHz aralığında 2 GHz örnekleme aralığı ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, kayıpsız CST simülasyonu ile ölçüm sonucu arasında 1. hüzmeye portundan 7. hüzmeye portuna tüm hüzmeye portları ayrı ayrı uyarıldığında dizi portlarına ulaşan EM dalganın genlik değerleri arasında 8.5 GHz'de 1.8 dB ile 3.4 dB, 10 GHz'de 2.8 dB ile 4.2 dB, 12 GHz'de 2.7 dB ile 5.65 dB arasında bir fark gözlemlenmiştir. Bu fark, lens plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olması dolayısıyla lensin ışınım, dielektrik ve iletkenlik kaybından kaynaklanmaktadır. Ölçülen Lens1'in hüzmeye portlarının uyarılmasıyla, dizi portlarında elde edilen EM dalganın faz dağılımı incelendiğinde, alt bölüm 4.5.9.'da CST simülasyonu sonucunda elde edilen faz davranışıyla benzer bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu grafiklerdeki ideal faz eğrisi ile ölçüm sonucunda elde edilen faz eğrilerinin 10 GHz'den uzaklaştıkça birbirlerinden uzaklaştıkları gözlemlenmiştir. Dolayısıyla Lens1'in 10 GHz'den uzaklaştıkça gerçek zaman gecikmesi özelliğini yitirdiği gözlemlenmiştir. Lens1 ve Lens2 dizi portlarında elde edilen genlik ve faz değerleri, 6, 8, 9, 10, 11 ve 12 GHz'de dizi faktör grafiklerini çizdirmek için kullanılmıştır. CST simülasyonu ve ölçüm sonucunda elde edilen dizi faktörlerin birbirleri ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Lens1 için 6 GHz'de, ideal faz eğrisi ile CST simülasyonu ve ölçüm sonucunda elde edilen faz eğrileri arasındaki sapma miktarındaki artışın, anten dizi faktörünü bozduğu gözlemlenmiştir. Dizi faktör grafiği incelendiğinde 8-12 GHz arasında, Lens1 dizi portlarına bağlanan bir anten dizisinin bu aralıkta beklenen tarama açısı, yan lob seviyesi ve yarı güç hüzmeye genişliğine sahip anten hüzmeleri oluşturması gerekmektedir. Lens2, 6-12 GHz arasında 2 GHz örnekleme aralığıyla beklenen tarama açısı, yarı güç hüzmeye genişliği ve yan lob seviyesine sahip anten dizi faktörleri oluşturmuştur. Lens1, dizi antenlerle birleştirilerek, lens-anten sisteminin yankısız odada ölçümü alınmıştır. Dizi anten,

seri beslemeli Chebyshev dizi anten ve lotus antenin yankısız oda ölçümlerinde elde edilen tüm ışıma örüntülerinin yarı güç hüzmeye genişliği, yan lob seviyesi ve tarama açısı cinsinden kayıpsız CST simülasyonu sonuçları ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Kayıplı CST simülasyonu sonucu ile ölçüm sonucunda elde edilen ışıma örüntülerinin en yüksek kazanç değerleri arasında; dizi anten için 10 GHz'de 0.1 dB ile 1.2 dB, seri beslemeli Chebyshev dizi anten için 10 GHz'de 1.8 dB ile 2.8 dB, lotus dizi anten için sırasıyla 8, 10, 11 ve 12 GHz'de, 0.6 dB ile 2.1 dB, 0.2 dB ile 2.4 dB, 0.3 dB ile 3.5 dB, 0.7 dB ile 2.8 dB arasında fark gözlemlenmiştir. Ölçüm sonucunda beklenen kazanç düşüşü sadece lens plakası üzerindeki kayıplar hesaba katılarak hesaplanmıştır ancak kıyaslanan ölçüm verilerinde dizi anten plakasında da kayıp söz konusudur. Gözlenen fazladan kayıp değerleri, anten plakasındaki kayıplar ile lens ve anten kartı arasındaki geçiş uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. Dizi anten için bu farkın lotus ve seri beslemeli Chebyshev antene göre düşük olması, anten plakasının boyutlarının elektriksel olarak daha küçük ve lens-anten bağlantısının lotus antene göre daha basit olmasından kaynaklanmaktadır. Seri beslemeli Chebyshev dizisi için elde edilen fark, anten plakasının elektriksel olarak büyük boyutlara sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Lotus anten için elde edilen fark, lens-anten bağlantısının, antenin lense dik konumlanması dolayısıyla ucu açık pinler vasıtasıyla bağlanması sırasında meydana gelen olası uyumsuzluktan ve anten plakasındaki kayıplardan kaynaklanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, analog hüzmeye şekillendirici olarak kullanılan Rotman lens tasarımı ve lens bağlantılı çalışan üç farklı dizi anten tasarımı yapılmıştır. Lens-anten sisteminin yankısız oda ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve sistemin beklendiği şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Tezin ilerleyen çalışmalarında, lensin kullanılabilirliğini sınırlayan elektriksel olarak büyük boyutlarını, sadece taban malzemenin dielektrik sabitini yükseltmek yerine Shelton'ın simetrik lens tasarımına benzer bir lens tasarımıyla küçültme çalışması yapılacaktır.

9. KAYNAKLAR

- [1] Wei Hong, Zhi Hao Jiang, Chao Yu, Debin Hou, Haiming Wang, Chong Guo, Yun Hu, Le Kuai, Yingrui Yu, Zhengbo Jiang, Zhe Chen, Jixin Chen, Zhiqiang Yu, Jianfeng Zhai, Nianzu Zhang, Ling Tian, Fan Wu, Guangqi Yang, Zhang-Cheng Hao, and Jian Yi Zhou. The role of millimeter-wave technologies in 5g/6g wireless communications. *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1):101–122, **2021**. doi:10.1109/JMW.2020.3035541.
- [2] Mingming Cai. *Modeling and Mitigating Beam Squint in Millimeter Wave Wireless Communication*. Ph.D. thesis, University of Notre Dame, **2012**.
- [3] Saswati Ghosh and Debarati Sen. An inclusive survey on array antenna design for millimeter-wave communications. *IEEE Access*, 7:83137–83161, **2019**. doi:10.1109/ACCESS.2019.2924805.
- [4] Iyemeh Uchendu and James Kelly. Survey of beam steering techniques available for millimeter wave applications. *Progress In Electromagnetics Research B*, 68:35–54, **2016**. doi:10.2528/PIERB16030703.
- [5] Shruti Vashist, M. Soni, and P.K. Singhal. A review on the development of rotman lens antenna. *Chinese Journal of Engineering*, 2014:1–9, **2014**. doi:10.1155/2014/385385.
- [6] J. Ruze. Wide-angle metal-plate optics. *Proceedings of the IRE*, 38(1):53–59, **1950**. doi:10.1109/JRPROC.1950.232789.
- [7] W. Rotman and R. Turner. Wide-angle microwave lens for line source applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 11(6):623–632, **1963**. doi:10.1109/TAP.1963.1138114.
- [8] Donald H. Archer, Robert J. Prickett, and Curtis P. Hartwig. Multi-beam array antenna, **1973**. US Patent 3,761,936.

- [9] J. Shelton. Focusing characteristics of symmetrically configured bootlace lenses. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 26:513–518, **1978**.
- [10] M. Maybell. Ray structure method for coupling coefficient analysis of the two dimensional rotman lens. In *1981 Antennas and Propagation Society International Symposium*, volume 19, pages 144–147. **1981**. doi:10.1109/APS.1981.1148557.
- [11] T. Katagi, S. Mano, and S. Sato. An improved design method of rotman lens antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32(5):524–527, **1984**. doi:10.1109/TAP.1984.1143353.
- [12] L. Musa and M. Smith. Microstrip rotman lens port design. In *1986 Antennas and Propagation Society International Symposium*, volume 24, pages 899–902. **1986**. doi:10.1109/APS.1986.1149578.
- [13] L. Musa and M. S. Smith. Microstrip port design and sidewall absorption for printed rotman lenses. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, **1989**.
- [14] D.R. Gagnon. Procedure for correct refocusing of the rotman lens according to snell's law. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 37(3):390–392, **1989**. doi:10.1109/8.18736.
- [15] R.C. Hansen. Design trades for rotman lenses. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 39(4):464–472, **1991**. doi:10.1109/8.81458.
- [16] Pramod Kumar Singhal, Ritambhra Gupta, and P. C. Sharma. Recent trends in design and analysis of rotman-type lens for multiple beamforming. *International Journal of Rf and Microwave Computer-aided Engineering*, 8:321–338, **1998**.
- [17] Mariam Q. Abdalrazak, Asmaa H. Majeed, and Raed A. Abd-Alhameed. A critical examination of the beam-squinting effect in broadband mobile

- communication: Review paper. *Electronics*, 12(2), **2023**. ISSN 2079-9292. doi:10.3390/electronics12020400.
- [18] Branka Jokanovic, Vojislav Milosevic, Milos Radovanovic, and Nikola Boskovic. Advanced antennas for next generation wireless access. In *2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, pages 87–94. **2017**. doi:10.1109/TELSIKS.2017.8246235.
- [19] A. Skrivervik A. Abolfazl and H. Aliakbarian. Design of a novel wide-angle rotman lens beamformer for 5g mmwave applications. *Scientific Reports*, 14, **2024**. doi:10.1038/s41598-024-51733-0.
- [20] Yaesuk Jeong and Tae Kim. Design and analysis of swapped port coupler and its application in a miniaturized butler matrix. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **2010**. doi:10.1109/TMTT.2010.2041571.
- [21] Federico Casini, Roberto Vincenti Gatti, Luca Marcaccioli, and Roberto Sorrentino. A novel design method for blass matrix beam-forming networks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation - IEEE TRANS ANTENNAS PROPAGAT*, 50:232 – 235, **2007**. doi:10.1109/EURAD.2007.4404979.
- [22] Ardavan Rahimian. Investigation of nolen matrix beamformer usability for capacity analysis in wireless mimo systems. In *2013 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, pages 622–623. **2013**. doi:10.1109/APCC.2013.6766023.
- [23] Y. Guo, Maral Ansari, and Nelson Fonseca. Circuit type multiple beamforming networks for antenna arrays in 5g and 6g terrestrial and non-terrestrial networks. *IEEE Journal of Microwaves*, PP:1–19, **2021**. doi:10.1109/JMW.2021.3072873.
- [24] ZM PETERSON. Types of beamforming and their uses in rf pcbs, **2020**.

- [25] Waqas Ahmad, Haibo Zhang, Yawen Chen, and Naveed Iqbal. Low rf-complexity digital transmit beamforming for large-scale millimeter wave mimo systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(10):8308–8321, **2022**. doi:10.1109/TWC.2022.3165577.
- [26] Zhi Ning Chen, Duixian Liu, Hisamatsu Nakano, Xianming Qing, and Thomas Zwick, editors. *Handbook of Antenna Technologies*. Springer Singapore, **2016**. doi:10.1007/978-981-4560-44-3.
- [27] Qazwan Qazwan Abdullah, Adeb Salh, Nor Shahida Mohd Shah, Noorsaliza Abdullah, Lukman Audah, shipun anuar Hamzah, Nabil Farah, Maged Aboali, and Shahilah Nordin. A brief survey and investigation of hybrid beamforming for millimeter waves in 5g massive mimo systems. *Solid State Technology*, 63, **2020**.
- [28] H. Gent. The bootlace aerial. *Roy. Radar Establishment J.*, pages 47–57, **1957**.
- [29] E.O. Rausch and A.F. Peterson. Rotman lens design issues. In *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, volume 2B, pages 35–38 vol. 2B. **2005**. doi:10.1109/APS.2005.1551928.
- [30] A.Y. NIAZI. *A new type of microwave band branching filter*. Phd thesis, University of London, London, UK, **1979**.
- [31] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, Hoboken, NJ, 3rd edition, **2005**.
- [32] Abdullah Omar, Saud Al-Saif, Muhammad Ahmad Ashraf, and Saleh Alshebeili. Design and analysis of millimeter wave series fed microstrip patch array for next generation wireless communication systems. In *2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, pages 1–2. **2016**. doi:10.1109/ANTEM.2016.7550139.

EKLER

LENS TASARIM PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI İÇİN MATLAB KODU

Aşağıdaki kod; tasarımcı tarafından tasarımın başında belirlenen odak mesafesi, odak ve hüzmeye açısı, dizi anten eleman sayısı, dizi anten elemanları arasındaki mesafe ve taban malzeme bilgilerini kullanarak, bilinmeyen lens tasarım parametrelerini (dizi portlarının konumları ve iletim hatlarının fiziksel uzunluğu), kod içindeki eq1, eq2 ve eq3 eşitliklerinin çözümü vasıtasıyla elde etmektedir. Bu eşitliklerin çözümü sonucunda, dizi kontürü üzerinde bulunan dizi portlarının (x,y) koordinatları ve çözümü yapılmış ilgili dizi portunu anten elemanına bağlayan iletim hattının fiziksel uzunluk bilgisi elde edilmektedir.

Bu çalışmada; dış odak portunun orijine olan mesafesi 150 mm, odak açısı 30°, hüzmeye açısı 40° olarak seçilmiş, taban malzeme olarak dielektrik sabiti 2.55, kayıp faktörü 10 GHz’de 0.0013, kalınlığı 0.508 mm olan ROGERS AD255C kullanılmıştır. Anten dizisi 17 eş anten elemanının 10 GHz’e göre $\frac{\lambda_0}{2}$ mesafede konumlandırılmasıyla elde edilmiştir. Odakların orijine uzaklıklarının oranını temsil eden g değeri Eşitlik 21 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değer 30°’lik odak açısı için 1.137 olarak hesaplanmıştır. Koddaki N=15*8 ifadesindeki 15; 10 GHz’deki serbest uzay dalga boyunun yarısının mm cinsinden karşılığını, diğer bir deyişle antenler arasındaki mesafenin mm karşılığını temsil etmektedir. Aynı eşitlikteki 8 değeri; 8. dizi portuna karşılık gelmektedir. Kodda kullanılan dizi portları; merkezdeki dizi portu üzerindeki ilk port 1 numaralı port ve merkezden en uzaktaki port 8. port olacak şekilde numaralandırılmıştır. Merkezde bulunan dizi portu, referans port olduğu için merkez port için bu işlemlerin yapılmasına gerek yoktur. Lens, simetrik yapıya sahip olduğundan 17 dizi portuna sahip bir lens için bu kodun 8 farklı dizi portu için çalıştırılması, tüm dizi portlarının hesaplanması için yeterlidir. eq1, eq2 ve eq3 ile ifade edilen eşitlikler, dizi portları (x1,y1) ve dizi portları ile anten elemanları arasındaki faz doğrulama hatlarının fiziksel uzunluğunu (faz1) hesaplamak için kullanılmaktadır. Kod kullanılarak elde edilen bu değerler doğrudan CST üzerinde modellenmektedir.

```

clear all
clc
F=150; %Odak Mesafesi
alpha=30*pi/180; %Odak Açısı
beta=40*pi/180; %Hüzme Açısı
c1=cos(alpha); %c1,s1,c2,s2; Odak ve Hüzme açısına bağlı
kosinüs ve sinüs fonksiyonları
s1=sin(alpha);
c2=cos(beta);
s2=sin(beta);
g=1.137; %Simetrik olmayan odak portunun orijine olan
uzaklığına göre normalize edilmiş merkezportun orijine olan
mesafesi
G=g*F; %G; Merkezi odak portunun orijine olan uzaklığı
%F; Simetrik olmayan odak portunun orijine olan uzaklığı
er=2.55; %Lensin üzerinde bulunduğu kartın dielektrik sabiti
eff=2.1741; %Kartın faz eşitleme hatlarına göre hesaplanan
verimli dielektrik sabiti
N=15*8; % Antenler arasındaki mesafe (mm)* Çözüm yapılacak
olan dizi portu (Bu kod için 8.port)
syms x y faz
eq1 = sqrt(((F * c1 + x)^2) + (F * s1 - y)^2) * sqrt(er) + faz * sqrt(ef f) + N * s2 - F *
sqrt(er) == 0;
eq2=sqrt(((F * c1 + x)^2) + ((F * s1 + y)^2)) * sqrt(er) + faz * sqrt(ef f) - N * s2 -
F * sqrt(er) == 0;
eq3=sqrt(((G + x)^2) + y^2) * sqrt(er) + faz * sqrt(ef f) - G * sqrt(er) == 0;
%eq1,eq2 ve eq3 çözümü yapılacak lens tasarım eşitlikleridir.
result=solve(eq1,eq2,eq3,x,y,faz)
x1=vpa(result.x) %8. dizi portu için hesaplanan x koordinatı
y1=vpa(result.y) %8. dizi portu için hesaplanan y koordinatı

```

```
faz1=vpa(result.faz)
```

```
%faz1;8. dizi portuna bağlanan iletim hattı ile merkez  
portun iletim hattı arasındaki fiziksel mesafe farkı
```