

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FAZ MODLARI KULLANILARAK SİLİNDİRİK DİZİ
ANTENLERİNİN HIZLI TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan AYDIN

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon Mühendisliği Programı**

HAZİRAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FAZ MODLARI KULLANILARAK SİLİNDİRİK DİZİ
ANTENLERİNİN HIZLI TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan AYDIN
(504201240)**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon Mühendisliği Programı**

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Özgür Özdemir

HAZİRAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504201240 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hasan AYDIN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FAZ MODLARI KULLANILARAK SİLİNDİRİK DİZİ ANTENLERİNİN HIZLI TASARIMI VE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. Özgür Özdemir**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Funda Akleman Yapar**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Ahmet Öncü
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : 12 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 5 Haziran 2023





Eşim Beyda Nur'a ve yeni doğmuş oğlum Selçuk'a,



ÖNSÖZ

Günümüz dünyasında her geçen gün önemi daha çok artan radar ve haberleşme sistemleri üzerine yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Askeri ve sivil uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip sistemlere olan talep ve ihtiyaçlar sürekli artmaktadır. Bu sistemlerin performans kabiliyetine belirleyici etki yapan en önemli sistem elemanlarından biri hiç kuşkusuz antenlerdir. Sistemin ihtiyacına göre farklı türleri olan antenler, karakteristik özellikleri sayesinde bulundukları sistemin özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Bu sebeple haberleşme ve radar sistemleri gibi önemli alanlarda gelişim gösterebilmek için farklı karakteristik özelliklere sahip anten tasarımı çalışmaları önem kazanmaktadır. Özellikle son yıllarda gelişmiş radar sistemlerinde kullanılan ve elektronik olarak geniş alan kapsamı sağlamak için tercih edilen antenlerin başında dizi antenler gelmektedir. İhtiyaca göre düzlemsel veya silindirik şekillerde olabilen dizilerin oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olması bu konudaki dizi anten tasarım çalışmalarına dikkate değer bir ivme kazandırmıştır. Antenin ve antenin bulunduğu sistemlerin popüler olduğu bu dönemde beni bu alana yönlendiren ve gelişimime katkısı olan Aselsan'da yöneticim olan Doğanay DOĞAN'a ve İsmail GÜNGÖR'e, Faz modu kullanarak silindirik dizilerin hızlı tasarımı ve analizi konusunda beni bilgilendiren ve bu konuda önemli tecrübeler edinmemi sağlayan, bilgi birikimi ve tecrübesiyle tezin her aşamasında bana yol gösterip, bu alandaki çalışmalarımı her koşulda destekleyen değerli danışman hocam Doç.Dr. Özgür Özdemir'e ve yöneticim Doğanay DOĞAN'a tekrardan teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2023

Hasan AYDIN
(Elektronik Ve Haberleşme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
1.3 Hipotez	5
2. DİZİ ANTENLER.....	7
2.1 İki Elemanlı Dizi	7
2.2 Lineer Dizi.....	10
2.2.1 Geniş Kenar (Broadside) Dizi.....	11
2.2.2 Uçtan Işımalı (End-fire) Dizi	12
2.3 Düzlemsel Dizi	13
2.4 Silindirik/Dairesel Dizi	21
3. FAZ MODU TEORİSİ	27
3.1 Sürekli Elemanlar	27
3.2 Ayrık Elemanlar	29
4. FAZ MODU TEKNİĞİN UYGULANMASI VE SONUÇLARI	31
4.1 Lineer/Düzlemsel Dizilerde Master/Slave Sınır Koşulları.....	33
4.2 Silindirik Dizi Tasarımı Ve Analizi	35
4.2.1 Birim Hücre Modeli Ve Periyodik Sınır Tanımları	37
4.2.2 Birim Hücre Tasarımı	39
4.2.3 Gömülü Eleman Örüntü Hesaplanması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	63



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Şekil 4.8 boyut değerleri.	40
---	----





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Z eksenı boyunca konumlandırılmış iki elemanlı bir dizinin geometrisi [9].	8
Şekil 2.2 : Aynı faz uyarımına ($\beta = 0^\circ$, $d = \lambda/4$) sahip sonsuz küçük yatay dipollerden oluşan iki öğeli bir dizinin, (a) eleman faktörü, (b) dizi faktörü ve (c) toplam elektrik alan öşüntüsü [9].	10
Şekil 2.3 : Z eksenı boyunca konumlandırılmış izotropik kaynakların N elemanlı dizisinin uzak alan geometrisi ve faz diyagramı [9].	11
Şekil 2.4 : Düzlemsel dizi geometrisi [9]	13
Şekil 2.5 : $5 \times 5 = 25$ elemanı düzlemse dizi konumları.	14
Şekil 2.6 : 5×5 düzlemsel dizinin nişan hattında, (a) yanca ekseninde dizi faktörü, (b) yükseliş ekseninde dizi faktörü.	15
Şekil 2.7 : 5×5 düzlemsel dizinin yanca 45° ve yükseliş 30° tarama için, (a) yanca ekseninde dizi faktörü, (b) yükseliş ekseninde dizi faktörü.	15
Şekil 2.8 : Dikdörtgen dizilim formasyonlu düzlemsel diziler için grating lobe spektrumu [10].	17
Şekil 2.9 : Üçgen dizilim formasyonlu düzlemsel diziler için grating lobe spektrumu [10].	17
Şekil 2.10 : Dikdörtgen dizilime sahip düzlemsel dizinin nişan hattında grating lobe analizi, (a) Elemanlar arasında ki mesafe $d=0.5\lambda$, (b) Elemanlar arasında ki mesafe $d=1\lambda$	19
Şekil 2.11 : Dikdörtgen dizilime sahip düzlemsel dizinin $d=0.5 \lambda$ eleman mesafesi için yapabildiği maksimum tarama analizi, (a) 60° tarama, (b) 70° tarama. .	19
Şekil 2.12 : Üçgensel dizilime sahip düzlemsel dizinin 60° tarama için grating lobe analizi, (a) elemanlar arasın mesafe $d=0.5\lambda$, (b) elemanlar arası mesafe $d=0.6\lambda$	20
Şekil 2.13 : N-elemanlı Dairesel dizi geometrisi [9]	21
Şekil 2.14 : 90° 'lik çevre üzerine yerleştirilmış dairesele bir sektör dizi geometrisi..	22
Şekil 2.15 : $a = 1\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesele sektör dizisi anteninin dizi faktörü yayılım öşüntüsü.....	23
Şekil 2.16 : $a = 5\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesele sektör dizisi anteninin dizi faktörü yayılım öşüntüsü.....	23
Şekil 2.17 : $a = 15\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesele sektör dizisi anteninin dizi faktörü yayılım öşüntüsü.....	24
Şekil 2.18 : $a = 5\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesele sektör dizisi anteninin $\phi_0 = 30^\circ$ taramalı dizi faktörü yayılım öşüntüsü.	24
Şekil 2.19 : (a) Lineer dizi geometrisi; (b) Dairesel dizi geometrisi [2].....	26
Şekil 3.1 : Birinci dereceden Bessel foksionu $J_m(ka)$, $m=0, 1, 2, \dots, 10$	29
Şekil 4.1 : (a) N-dairesel dizi ile oluşan silindirik dizi, (b) Silindirik dizinin bir sırası alınmış, a yarıçaplı N elemanlı dairesele dizi, tüm dizi elemanlarını ve birim hücre sınırını gösterilmiştir.	32
Şekil 4.2 : (a) Düzlemsel bir dizi geometrisi,(b) Düzlemsel dizinin master/slave sınır koşullu uygulanmış birim hücresi [3].....	33
Şekil 4.3 : 'Master/Slave' çiftinin birim hücre üzerinde tanımlanması [3].	34
Şekil 4.4 : (a) Silindirik yama dizi, (b) Silindirik diziden dairesele diziye geçmek için alınan kesit.....	35

Şekil 4.5 : (a) Dairesel bir dizini geometrisi ve sınır koşulları,(b) Dairesel bir diziden alınan kesitle elde edilen birim hücre sınırı.....	36
Şekil 4.6 : (a) Birim hücre yama anten karşıdan görünüm, (b) Birim hücre yama anten üstten görünüm.	38
Şekil 4.7 : Birim hücre bağlantı sınır koşulları tanımlama.	39
Şekil 4.8 : Birim hücre yama antenin detaylı görünümü, (a) yandan kesiti,(b) üstten kesiti.	40
Şekil 4.9 : Mod 0'da optimize edilmiş birim hücrenin,(a) nişan hattı geri dönüş kaybı,(b) yükseliş ekseninde taramaya göre geri dönüş kaybı.	41
Şekil 4.10 : Mod 0'da, nişan hattında birim hücre örüntüleri, (a) yanca örüntüsü, (b) yükseliş örüntüsü.	42
Şekil 4.11 : Faz modu konsepti kullanılarak farklı frekanslar için elde edilen gömülü eleman örüntüleri.	44
Şekil 4.12 : Tam dizi simülasyonu ile birim hücre simülasyonunu geri dönüş kaybı karşılaştırılması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.	45
Şekil 4.13 : 11 GHz frekansında, dairese dizinin eleman konumları ve uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), ...	46
Şekil 4.14 : Silindirik yama dizi anteninin 11 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanın uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.	47
Şekil 4.15 : Silindirik yama dizi anteninin 10 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanın uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.	47
Şekil 4.16 : Silindirik yama dizi anteninin 9 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanın uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.	48
Şekil 4.17 : Silindirik yama dizi anteninin 8 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanın uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.	48
Şekil 4.18 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) 4 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) 4 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.	50
Şekil 4.19 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) 8 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) 8 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.	51
Şekil 4.20 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) 16 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) 16 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.	52
Şekil 4.21 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) simetrik uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) simetrik 8 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) simetrik 8 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.	54
Şekil 4.22 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) simetrik uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) simetrik 16 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü,	

(c) simetrik 16 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.

..... 55

Şekil 4.23 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) simetrik uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) simetrik 24 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) simetrik 24 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.

..... 56





FAZ MODLARI KULLANILARAK SİLİNDİRİK DİZİ ANTENLERİNİN HIZLI TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Askeri ve sivil uygulamalarda yaygın olarak kullanılan antenler, sistemin karakteristiğini ve performansını etkileyen önemli bir sistem elemanıdır. Askeri uygulama alanı olan radar sistemlerinde farklı amaçları ve gereksinimleri karşılamak için farklı karakteristiğe sahip antenler kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda gelişmiş radar sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan anten çeşidi faz dizili antenlerdir. Farklı boyut ve türlerde olabilen dizi antenler, geniş kapsama alanı, yüksek yönlülük, etkin radar menzili, hassas doğruluk ve yön bulma gibi özellikleri sayesinde askeri ve sivil uygulamalarda kullanımı artmaktadır.

Faz dizili antenler radyo dalgalarını alma veya iletmek için tek bir anten olarak birlikte çalışan anten kümesi olarak tanımlanabilir. Yüksek kazanç, yönlülük ve geniş kapsama alanına sahip olması önemli özellikleridir. Genel olarak dizi antenlerde, kullanılan bireysel anten elemanlarının sayısı ne kadar fazlaysa, kazanç o kadar yüksek ve huzme o kadar dardır. Tekil antenlerin kullanıldığı radar sistemleri hüzmeyi mekanik olarak yönlendirirken, dizi antenlerin kullanıldığı sistemler hüzmeyi mekanik olarak değil elektriksel olarak yönlendirebilmektedir. Ayrıca faz dizili antenler aynı anda birden çok ve farklı tipte hüzmeler oluşturabilmektedir. Dizi antenlerin sisteme kazandırdığı geniş kabiliyetlerin yanı sıra platform şekillerine uygun olarak, düzlemsel/dogrusal, silindirik/dairesel ve konformal gibi geometrik şekillerde kullanılmaktadır. Dizi anten oluşturabilmek için yaygın olarak kullanılan anten çeşitleri yama ve vivaldi antenlerdir. Bu antenler tekil olarak çalıştığı gibi dizi olarakta çalışmaya uygun antenlerdir.

Anten elemanlarının aralarında belirli bir periyodiklik ile yanyana dizilmeleriyle oluşan faz dizili antenlerin tasarımları ve analizleri dizinin boyutuna göre farklılık gösteren zor bir problemdir. Büyük faz dizili antenlerin tasarımı ve analizi, kullanılan elektromanyetik simülasyon araçlarının hesaplamak için kullanacağı kaynağın limiti, maliyeti ve zamanıyla ilgili zorluklar içermektedir. Dizi antenlerin çözümünde kullanılan geleneksel elektromanyetik simülasyon programları yüksek ram ve hafıza kullanmaktadır. Dizinin boyutu büyüdükçe kullanılan ram ve hafıza da artmaktadır ve çözüm çok zor bir hale gelebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan simülasyon araçları problemin çözümü için belirli yaklaşımlar kullanarak fazlı dizi tasarımları mümkün hale getirmiştir. Simülasyon tekniği olarak, faz dizili antenlerin kendi içindeki simetrisinden yararlanan sonsuz dizi yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yöntemle hesaplama alanı, anten dizisinin dizilimi boyunca sonsuz bir periyodik uzantıyı simüle eden uygun sınır koşullarına sahip tek bir anten elemanına indirger. Dizinin boyutu arttıkça yaklaşımın doğruluğu artmaktadır. Bu yaklaşım düzlemsel/dogrusal diziler için kullanışlıyken, silindirik/dairesel diziler için kullanışlı değildir. Bu durumun temel sebebi mevcut teknik, tüm elemanları aynı olarak ele alır ve kenar elemanları göz ardı eder. Düzlemsel/dogrusal dizilerde ortak bir eleman örüntüsü varken, Silindirik/dairesel diziler için ortak bir eleman örüntüsü yoktur.

Bu çalışmada, silindirik/dairesel dizi anten tasarımını düzlemsel/dogrusal dizilerdeki gibi yaklaşımla tasarlamak için numerik bir yöntem sunmak amaçlanmıştır. Elektromanyetik çözücü olarak ANSYS HFSS kullanan Matlab tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Düzlemsel/dogrusal dizi tasarımında olduğu gibi hesaplama alanını tek

bir elemana indirgemeye çalışılmıştır. Faz modu konseptini kullanan bu yöntemle silindirik bir dizinin tamamını çözmek yerine birim hücre olarak adlandırılan tek bir elemanın tasarlayarak ve analiz ederek, sonlu dizi çözümüyle aynı sonuca ulaşmak hedeflenmiştir. Birim hücre çözümünün faz modu kullanarak elde edilen gömülü eleman örüntüsünü, dairesel dizideki tüm elemanlarla olan sonlu çözümündeki eleman örüntüsüyle, nişan hattında ve yükseliş eksenindeki herhangi bir tarama açısı için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada anten dizisi etrafındaki birden fazla elemanın uyarılmasıyla elde edilecek olan örüntü şekilleride incelenmiştir. Ayrıca geri dönüş kaybı S11 karşılaştırılıp yöntem doğrulanmaya çalışılmıştır.



FAST ANALYSIS AND DESIGN OF CYLINDRICAL ARRAY ANTENNAS VIA PHASE MODES

SUMMARY

An antenna array (or array antenna) is a cluster of multiple connected antennas that work together as a single antenna to transmit or receive radio waves. The radio waves emitted by each antenna are combined and overlapped to increase the radiated power in the desired directions. An antenna array can achieve higher gain, a narrower beam of radio waves than a single element can achieve. In general, the more individual antenna elements used, the higher the gain and the narrower the beam.

Arrays are popular because they can shape the pattern according to the spacing and excitation setting used. Also, scan the pattern in angular space by dynamically adjusting the excitation phases electronically. Such an array is referred to as a phased array. The traditional method of scanning a directional beam is to mechanically steer an aperture antenna. Unlike the traditional method, a Phased array usually steers the beam electronically. The beam of radio waves can be electronically steered to point in any direction instantly over a wide angle without moving the antennas. Arrays can be defined for many geometric surfaces, including non-planar surfaces. Such as cylindrical, planar, conformal, etc. There are many applications for phased arrays, most notably in radar.

Array antennas in radar systems are frequently preferred in recent years due to their high gain, wide coverage, sensitive directivity and electronic scanning features. They have the unique ability to electronically scan the beam in angular space by dynamically adjusting the excitation phases, as well as beamforming by appropriate adjustment of arrays, element spacing, and excitation coefficients. Such an array is called a phased array. The conventional method for guiding the beam is to mechanically steer an aperture antenna such as aperture antenna. Therefore, the problem of mechanically rotating a large antenna can be solved by properly excitation of many small antennas in the array.

Phased arrays can scan a beam at electronic speeds and even have multiple simultaneous main beams, in addition to eliminating the need for a mechanical structure needed to steer a large antenna. Despite a feeder network required to create the desired direction and type of beam with array antennas, today's low cost electronics make electronic scanning more affordable with computing and digital signal processing hardware and software. Arrays are used for all kinds of geometric surfaces. Sequences can be defined for many geometries, including surfaces such as planar/linear, cylindrical/circular, as well as non-planar surfaces to fit existing contours such as aircraft skin.

The first widely used array antenna was the Yagi-Uda array invented in 1926. The Yagi was followed by other fixed-phase arrays that were mechanically steered. Phased arrays emerged during World War II using mechanical phase shifters. With the invention of the ferrite phase shifter in the 1950s, full electronic scanning became possible. Both array element advances and solid-state phase shifters allowed for more affordable, compact phased arrays beginning in the 1960s. The recent innovation in arrays is the active phased array in which each element has transmit/receive electronics including phase adjustment.

The design and analysis of a large phase array antenna is a difficult problem that is often limited by computational resources, cost and time. The common simulation technique used to speed up planar/linear array designs uses the infinite array approach that takes advantage of the natural symmetry in the array. This approach is limited to planar/linear arrays and is not suitable for circular and cylindrical arrays. A cylindrical/circular array does not have a progressive phase like a linear array, which means that the simplification of calculating the radiation pattern as the product of an average element radiation pattern and the array factor cannot be used. Therefore, a simulation, design and optimization method is required for cylindrical/ circular phased array design, similar to the techniques used in planar/linear array design.

As in every antenna design, electromagnetic simulation programs have a very important place in studies for array antenna design. Thanks to the developed programs, the performance of the designed antenna can be achieved very close to reality. In this way, it has been possible to carry out antenna designs easily, quickly and inexpensively.

With today's advanced electromagnetic simulation programs, thanks to the boundary conditions used to design a planar/linear array antenna, instead of designing the array antenna together with all its elements, the unit cell is reduced to a single element by designing the computational area, and thus a planar/linear array antenna design is quickly realized. This simulation method is only performed for planar/linear arrays. Cylindrical/circular arrays cannot be solved with this method. In this study, it is emphasized to apply a numerical method that will allow the designing of a cylindrical/circular array using the unit cell instead of solving it with all its elements using the phase mode concept. This method used is general and can be applied in conformal arrays.

In this work, a computer-aided technique is proposed to accelerate the design and analysis of a circular/cylindrical array using a unit cell approach in the Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS). The proposed technique uses the concept of phase modes, is general, and can use periodic boundary conditions.

The concept of phase modes is useful in explaining the radiation of circular and cylindrical arrays and is especially valuable in the synthesis of desired patterns. Linked boundary conditions are used in Ansys HFSS to simulate phase mode analysis in azimuth and to simulate scanning of an infinitely long cylindrical array in the elevation plane. Then the embedded element patterns of the cylindrical arrays are computed in a Matlab-based framework for each elevation scan using the phase mode concept.

Using the phase mode concept, it is possible to achieve the same result as a finite sequence solution by designing and analyzing a single element, called a unit cell, instead of solving an entire cylindrical array. It provides a numerical method to design the cylindrical/circular array antenna design with the same approach as the linear/planar arrays. It can reduce the computational space to a single element, as in the linear/planar array design.

Unlike the general approach, this analysis is synthesis of embedded element patterns for boresight and elevation scanning. The embedded element pattern and return loss obtained using the phase mode of the simulation solution of the unit cell patch antenna can be found in the sight line and for any scan angle in the elevation axis. Here, the pattern shapes to be obtained by the excitation of more than one element around the antenna array can also be calculated.

The application of the technique is discussed in detail and the method is applied step by step. The results of the method are verified by comparing the results of the unit cell analysis of the patch antenna with the results of the full array patch antenna analysis in HFSS. Embedded element model and active reflection coefficient data are compared and validated with the result of unit cell analysis by full array patch antenna analysis.





1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi kadar eski olan iletişim ve iletişim sistemleri, tarih boyunca insan yaşamında oldukça önemli bir yere sahip olmuştur. İletişim için kullanılan yöntemler ve araçlar yüzyıllara göre farklılık gösterebilir, temel amacı olan bilgi gönderme işlevi her zaman aynıdır. Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalarla iletişim sistemleri ile ilgili oldukça önemli gelişmeler olmuştur. Özellikle uzak mesafeler arasında haberleşmeyi sağlayabilmek için geliştirilen kablosuz iletişim sistemleri yakın geçmişte ortaya çıkan en önemli bilimsel gelişmelerden biridir.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde önemli bir yere sahip olan sistem elemanları başında antenler gelmektedir. Gönderme ve alma işlemlerini yerine getiren antenler, sisteme kazandırdıkları özelliklerle veriyi çeşitli formlarda iletebilme imkanı sunar. Antenler sivil alanda olduğu kadar askeri alanda da sıklıkla kullanımı olan sistem elemanlarıdır. Özellikle II. Dünya savaşı sırasında ve sonrasında kullanılan radar sistemlerinde oldukça önemli bir yere sahip olmuştur.

Radar sistemlerinde dizi antenler, yüksek kazanç, geniş kapsama, hassas yönlülük ve elektronik tarama özelliklerinden dolayı son yıllarda sıklıkla tercih edilmektedir. Dizilerin, eleman aralıklarını ve uyarılma katsayılarını uygun ayarlanmasıyla hüzmeye şekillendirme yapılmasının yanı sıra uyarılma fazlarını dinamik olarak ayarlayarak hüzmeyi elektronik olarak acısal uzayda taramaya yönelik benzersiz yeteneğe sahiptirler. Böyle bir diziye fazlı dizi denir. Hüzmeyi yönlendirmek için kullanılan geleneksel yöntemde, çanak anten gibi bir açıklık antenini mekanik olarak yönlendirmektir. Bu nedenle, büyük bir antenin mekanik olarak döndürülmesi sorunu, dizideki birçok küçük antenin uygun şekilde uyarılmasıyla çözülebilmektedir. Fazlı diziler, büyük bir anteni yönlendirmek için gereken mekanik bir yapıya olan ihtiyacı ortadan kaldırmanın yanı sıra, elektronik hızlarda bir hüzmeyi tarayabilir ve hatta birden çok eşzamanlı ana hüzmeye sahip olabilir. Dizi antenleriyle istenilen yön ve çeşitte hüzmeye oluşturmak için gerekli olan bir besleme ağına rağmen, günümüzün düşük maliyetli elektronik, bilgi işlem ve dijital sinyal işleme donanımı ve yazılımıyla elektronik taramayı daha uygun hale getirmektedir. Diziler, her türlü geometrik

yüzeyler için kullanılmaktadır. Düzlemsel/dogrusal, silindirik/dairesel gibi yüzeylerin yanı sıra uçak dış yüzeyi gibi mevcut dış hatlara uyması için düzlemsel olmayan yüzeyler de dahil olmak üzere birçok geometri için dizi tanımlanabilir.

Her anten tasarımıda olduğu gibi dizi anten tasarımı için de yapılan çalışmalarda, elektromanyetik simülasyon programları oldukça önemli bir yere sahiptir. Geliştirilen programlar sayesinde, tasarlanan antenin performansı gerçeğe çok yakın bir şekilde elde edilebilmektedir. Bu sayede kolay, hızlı ve maliyetsiz bir şekilde anten tasarımları gerçekleştirmek mümkün olmuştur. Bu projede gerçekleştirilmeye çalışılan antenin hızlı tasarımı ve analizi için önerilen numerik bir yöntemi geliştirmek için simülasyon programları etkin bir şekilde kullanılmıştır.

İlerleyen bölümlerde silindirik/dairesel bir dizi anteninin hızlı tasarımı için kullanılan sayısal bir yöntem olan faz modu konsepti ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Daha sonra fazlı dizi anten yapısını ve çalışma prensipleri üzerinde durulup, faz modu konsepti kullanılarak geniş bantlı bir yama anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Faz modu konseptini kullanarak elde edilecek sonuçların dizinin tamamını çözerek elde edilecek olan sonuçlarla karşılaştırılıp yöntemin doğruluğu ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve doğrulanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, silindirik/dairesel dizilerin tasarımını ve analizini hızlandırmak için bilgisayar destekli sayısal bir yaklaşım geliştirmek amaçlanmıştır. Günümüzün gelişmiş elektromanyetik simulasyon programlarıyla, düzlemsel/dogrusal bir dizi anten tasarlamak için kullanılan sınır koşulları sayesinde dizi anteni bütün elemanlarıyla birlikte tasarlamak yerine, birim hücrelerini tasarlayarak hesaplama alanını tek bir elemana indirgenir ve böylece düzlemsel/dogrusal bir dizi anten tasarımı hızlı bir şekilde gerçekleştirilir. Bu simulasyon yöntemi sadece düzlemsel/dogrusal diziler için gerçekleştirilir. Silindirik/dairesel diziler bu yöntem ile çözülememektedir. Bu çalışmada, faz modu konseptini kullanarak silindirik/dairesel bir diziyi tüm elemanlarıyla birlikte çözmek yerine birim hücrelerini kullanarak tasarlamaya imkan sağlayacak numerik bir yöntem uygulamak üzerinde durulmuştur. Kullanılan bu yöntem geneldir ve konformal diziler içinde uygulanabilir.

Elektromanyetik çözücü olarak ANSYS HFSS kullanan Matlab tabanlı bir yöntem uygulanmıştır. Düzlemsel/dogrusal dizi tasarımında olduğu gibi hesaplama alanını tek bir elemana indirgemeye çalışılmıştır. Birim hücre çözümünün faz modu kullanarak elde edilen gömülü eleman örüntüsünü, silindirik/dairesel dizideki tüm elemanlarla olan sonlu çözümündeki eleman örüntüsüyle, nişan hattında ve yükseliş eksenindeki herhangi bir tarama acısı için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yöntem dogrulanmaya çalışılmıştır. Burada anten dizisi etrafındaki birden fazla elemanın uyarılmasıyla elde edilecek olan örüntü şekilleride incelenmiştir. Ayrıca geri dönüş kaybı S_{11} karşılaştırılıp yöntem dogrulanmaya çalışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Yaygın olarak kullanılan ilk dizi anten, 1926'da icat edilen Yagi-Uda dizisiydi. Yagi'yi, mekanik olarak yönlendirilen diğer sabit fazlı diziler izledi. II. Dünya savaşında radar sistemlerinin kullanılmasına ve gelişmesine paralel olarak dizi antenlerde de gelişme yaşanmıştır. Fazlı diziler, II. Dünya Savaşı sırasında mekanik faz kaydırıcılar kullanılarak ortaya çıktı. 1950'lerde ferrit faz kaydırıcının icadıyla tam elektronik tarama mümkün hale geldi. Hem dizi elemanı ilerlemeleri hem de katı hal faz kaydırıcılar, 1960'lardan başlayarak daha uygun fiyatlı, kompakt fazlı dizilere izin verdi. Dizilerdeki son yenilik, faz ayarı dahil olmak üzere her elemanın verici/alıcı elektroniğe sahip olduğu aktif fazlı dizidir [1].

Aerodinamik veya benzeri nedenlerle değişik şekillerde olan yüzeylere, silindir/daire, küre veya koni vb. yüzeyinde yayın yapan elemanlara sahip dizi antenlerine genellikle konformal diziler denir. Antenlerin şekli, anten huzmesi şekli ve/veya açısal kapsama alanı gibi belirli bir elektromanyetik gereksinim tarafından belirlenebilir. Konformal dizinin bir çeşidi olarak ifade edilen silindirik/dairesel diziler ilk olarak, Chireix tarafından 1930'larda analize edilen dairesele bir dizi oluşturan dipol elemanlar sistemidir. Dairesel dizi, dönme simetrisi nedeniyle dikkat çekicidir. Doğru fazlama, azimutta 360° taranabilen yönlü bir ışın oluşturabilir. Uygulama alanları yayın, iletişim ve daha sonra navigasyon, yön bulma ve günümüzde radar sistemleri olarak giderek yaygınlaşmaktadır [2].

Lineer/Düzlemsel dizi anten tasarımları için geniş bir dizi oluşturmak ve simüle etmek için farklı yöntemler vardır. Dizinin tüm halinin kullanıp çözdürmek bir yöntemdir ama büyük diziler için çok kullanışlı olmayan bir yöntemdir. Bu, bir diziyi simüle etmenin en doğru yöntemi olsa da, hesaplama açısından kapsamlıdır ve zordur. Bu nedenle, lineer/düzlemsel dizilerin tasarımında birim hücre yaklaşımı kullanılır. Birim hücre ve dizi teorisinin kullanımı, dizi performansının birkaç varsayımla tasarıma başlanmasına ve hızlıca tasarlanmasına yardımcı olur. Sonlu Dizi Etki Alanı Ayrışımı (veya FADDM), birim hücre basitliğinden yararlanır ve birim hücrede oluşturulan ağ oluşturma bilgisini kullanarak tam bir model oluşturur. Bir birim hücre, hücre etrafındaki Ana/Bağımlı (Master/Slave) sınırına dayalı olarak çalışır. Master/Slave sınırları her zaman eşlenir. Bu sınırlar, sonsuz bir diziyi simüle ediyormuş gibi bir yaklaşım kullanır ve nispeten büyük dizilerin performansını analiz etmek için iyi bir yöntem sunar. Birim hücrenin kullanılması, gerekli RAM'i ve çözme süresini azaltır [3], [4], [5].

Diziler için yaygın olarak kullanılan birim hücre yaklaşımı düzlemsel/dogrusal diziler için kullanışlıyken, silindirik/dairesel diziler için kullanışlı değildir. Bu durumun temel sebebi mevcut teknik, tüm elemanları aynı olarak ele alır ve kenar elemanları göz ardı eder. Düzlemsel/dogrusal dizilerde ortak bir eleman örüntüsü varken, Silindirik/dairesel diziler için ortak bir eleman örüntüsü yoktur [3].

Konformal dizilerin tasarımı ve analizi lineer/düzlemsel dizilerin tasarımına göre zor ve karmaşık bir yapıdadır. Lineer/düzlemsel dizi alanına göre konformal diziler alanında, elektromanyetik modeller ve tasarım bilgisinin daha fazla geliştirilmesi gerekiyordu. Son yıllarda, sayısal teknikler, elektromanyetik analiz yöntemleri ve kavisli yüzeylerdeki antenlerin daha iyi anlaşılmasıyla gelişti. Yüzey dalgası kırınımının analizi ve kavisli yüzeyler üzerinde yayın yapan kaynakların modellenmesi dahil olmak üzere yüksek frekans tekniklerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Son dönemlerde yapılan çalışmalarla, verimli örüntü sentez yöntemleri, pratik besleme ve hüzme kontrol yöntemleri üzerine yeni bir kavram geliştirildi. Faz modları konsepti olarak adlandırılan bu çalışmada dairesele diziler için, uyarım katsayıları yanca (azimut) eksende 2π ile periyodik bir fonksiyon olarak tanımlanabilir [6]. Bu nedenle uyarma bir fourier serisi olarak ifade edilebilir. Bir faz modu, sabit genliğe sahiptir ancak bir yayılan elemandan diğerine doğrusal bir faz

ilerlemesine sahiptir ve çevre üzerinde toplam 2π 'nin katıdır. Faz modu konsepti, model sentezinde etkili bir araç olarak kullanılmaktadır.

Genel olarak silindirik dizi anten tasarımı tüm dizi elemanları kullanılarak yapılmaktadır. Bu nedenle büyük bir silindirik dizinin tasarımını gerçekleştirmek bir çok yönden zorlukları da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle, silindirik dizi veya en genel haliyle konformal dizilerin kullanım alanı ve yaygınlaşması lineer/düzlemsel dizilerin her zaman gerisinde kalmıştır. Silindirik dizinin tasarım alanında ki zorluklar sebebiyle, sistemsal olarak bir çok önemli özelliği olmasına rağmen, uzun bir süre tercih edilmemiştir. Tasarımı kadar analiz edilmesi de zor olan silindirik dizi antenler için, ilk olarak örüntü şekilleri elde etmekte kullanılan faz modu konsepti giderek yaygınlaşmıştır.

Son dönemlerde yapılan çalışmalarda, faz modu konsepti kullanılarak silindirik/dairesel anten tasarımları yapılması üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmalarda tek bir eleman için, birim hücre çözümü ile dizinin tamamının çözümü arasında gömülü eleman örüntüleri karşılaştırılmıştır [7], [8]. Gömülü eleman örüntüleri elde edilmesi üzerinde durulan bu çalışmalar, silindirik dizi tasarımını kolaylaştıran bir yöntem olarak faz modu konsepti sunulmuştur. Mevcut çalışmalar çoklu eleman uyarılma örüntüleri ve geri dönüş kaybı değerleri için herhangi bir çalışma mevcut değildir. Ayrıca yapılan çalışmalar antenin nişan hattında ki örüntü sentezi için yapılmıştır, antenin yükseliş tarama eksenini için herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Faz modu konsepti kullanılarak bu işlemleri gerçekleştirmek mümkündür.

1.3 Hipotez

Silindirik diziler çok sayıda anten elemanları içeren büyük problemlerdir. Dizinin boyutu arttıkça, anteni tasarlamak ve analiz etmekte ki zorlukta o kadar artmakta ve tasarım çok zor bir hale gelebilmektedir. Geleneksel yaklaşımla silindirik bir dizi tasarımı hesaplama kaynaklı zorluklar, zaman ve maliyet açısından oldukça güç hale gelmektedir. Bu çalışmada, faz modu konseptini kullanarak, silindirik bir dizinin tamamını çözmek yerine birim hücre olarak adlandırılan tek bir elemanını tasarlayarak ve analiz ederek, sonlu dizi çözümüyle aynı sonuca ulaşmak hedeflenmiştir. Silindirik/dairesel dizi anten tasarımını lineer/düzlemsel dizilerdeki gibi yaklaşımla tasarlamak için sayısal bir yöntem sunmak amaçlanmıştır. Lineer/düzlemsel dizi tasarımında olduğu gibi hesaplama alanını tek bir elemana indirgemeye çalışılmıştır.

Elektromanyetik çözücü olarak ANSYS HFSS kullanan Matlab tabanlı bir yöntem uygulanacaktır. Bu yöntemi kullanarak geniş bantlı bir silindirik/dairesel yama dizi anten tasarlanmıştır. Birim hücre çözümünün faz modu kullanarak elde edilen gömülü eleman örüntüsünü, dairesel dizideki tüm elemanlarla olan sonlu çözümündeki eleman örüntüsüyle, nişan hattında ve yükseliş eksenindeki herhangi bir tarama açısı için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada anten dizisi etrafındaki birden fazla elemanın uyarılmasıyla elde edilecek olan örüntü şekilleride incelenmiştir. Ayrıca geri dönüş kaybı S_{11} karşılaştırılıp yöntem doğrulanmaya çalışılmıştır.



2. DİZİ ANTENLER

Anten elemanlarının aralarında belirli bir periyodiklik ile yanyana dizilmeleriyle oluşan dizi antenler, yüksek kazanç, geniş kapsama, hassas yönlülük ve elektronik tarama gibi özelliklere sahiptir. Genellikle, tek bir elemanın ışıma örüntüsü nispeten geniştir ve her bir eleman düşük yönlülük (kazanç) değerleri sağlar. Birçok uygulamada, uzun mesafe iletişim taleplerini karşılamak için çok yönlendirici özelliklere (çok yüksek kazanç) sahip antenler tasarlamak gerekir. Bu, yalnızca antenin elektriksel boyutunu artırarak gerçekleştirilebilir. Tek bir anten elemanının boyutunu büyütme yerine, elektriksel ve geometrik bir konfigürasyonda ışıma yapan elemanlardan oluşan bir takım oluşturmak antenin boyutlarını büyütmenin başka bir yoludur. Çoklu elemanlardan oluşan bu yeni antene dizi adı verilir. Çoğu durumda, bir dizinin öğeleri aynıdır. Bu gerekli değildir, ancak genellikle uygun, daha basit ve daha pratiktir.

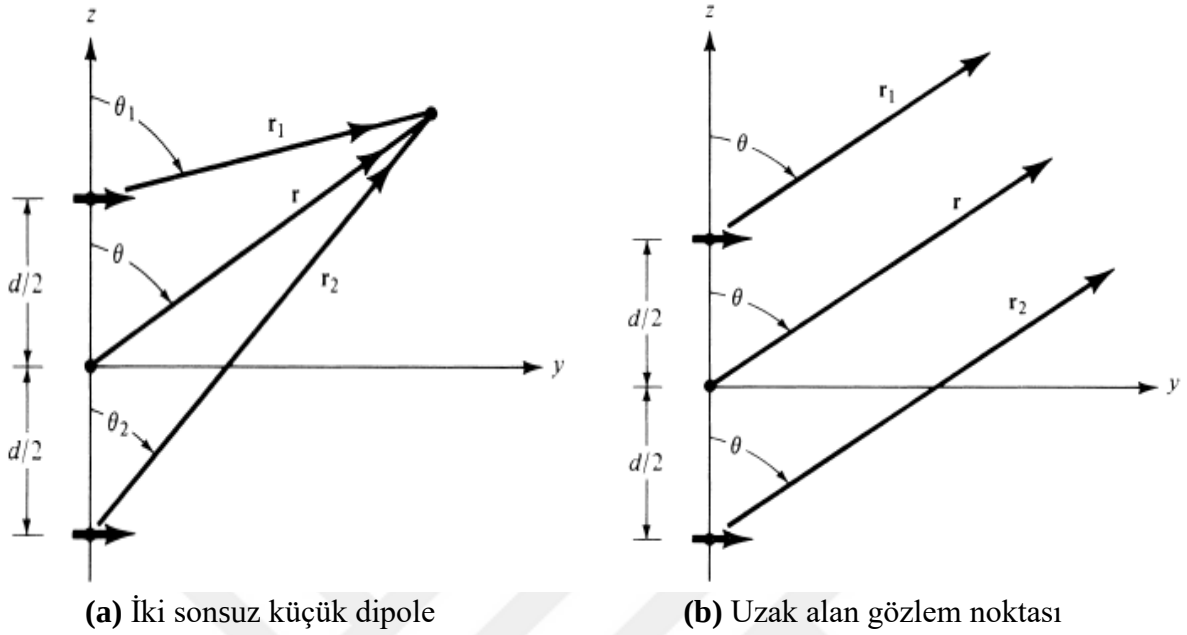
Dizinin toplam alanı, tek tek elemanlar tarafından yayılan alanların vektörel toplamı ile belirlenir. Dizideki anten elemanlarının uygun faz ve genlik ile uyarılmasıyla değişik şekil ve özelliklerde hüzmeye sentezlemek mümkündür. Toplam hüzmeye, fark hüzmeye, kosekant hüzmeye, geniş hüzmeye, düşük yan-lob seviyesine sahip hüzmeye, hüzmeye null oluşturma gibi pek çok işlemi dizi antenler gerçekleştirebilmektedir.

Dizi antenlerin birim elemanları genellikle, dipol anten, acıklık anten, horn anten, mikrostrip yama anten, vivaldi anten vb. bir çok çeşit anten kullanılabilir. Çeşitli yüzey ve geometrilere uyum sağlama ve dizi oluşturmaya daha yatkın olmalarından dolayı en yaygın kullanılan anten tipleri, mikroşerit yama antenleri ve vivaldi antenleridir. Her türlü geometrik yüzeylerde kullanılabilen dizi antenler kullanılan yerleşime göre, lineer dizi, düzlemsel dizi ve silindirik diziler ya da en genel haliyle konformal diziler olarak adlandırılırlar [9].

2.1 İki Elemanlı Dizi

En basit ve pratik dizilerden biri, elemanların bir çizgi boyunca yerleştirilmesiyle oluşturulur. İki elemanlı diziler, dizi antenlerin teorisini ve fiziksel yorumunu basit bir şekilde incelemeye yardımcı olan bir dizilimdir.

Şekil 2.1 de görülen iki elemanlı bir dizi, iki tane sonsuz küçük yatay dipollerin z eksenini boyunca belirli aralıklarda dizilmesiyle oluşmaktadır [9].



Şekil 2.1 : Z eksenini boyunca konumlandırılmış iki elemanlı bir dizinin geometrisi [9].

İki eleman tarafından yayılan toplam elektrik alan, iki eleman arasında kuplaj olamadığı kabul edilerek, ikisinin toplamına eşittir ve y-z düzleminde şu şekilde ifade edilir [9]:

$$E_t = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 - (\beta/2)]}}{r_2} \cos\theta_2 \right\} \quad (2.1)$$

B: elemanlar arasında ki faz uyarımıdır, k: dalga sayısı, l: dipo anten boyu, I_0 : elektrik akımı. Şekil 2.1(b) uzak alan gözlem noktası için açılar arasında $\theta_1 \cong \theta_2 \cong \theta_3$ ilişkisi vardır. Bu yüzden faz değişimleri,

$$r_1 \cong r - \frac{d}{2} \cos\theta \quad (2.2a)$$

$$r_2 \cong r + \frac{d}{2} \cos\theta \quad (2.2b)$$

Genlik değişimleri için mesefeler arasında $r_1 \cong r_2 \cong r$ ilişkisi vardır.

Uzak alan için bu yaklaşımları denklem 2.1 kullanıldığında,

$$E_t = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta [e^{j(k\cos\theta + \beta)/2} + e^{-j(k\cos\theta + \beta)/2}] \quad (2.3a)$$

$$E_t = \hat{a}_\theta j\eta \frac{kI_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \left\{ 2\cos\left[\frac{1}{2}(kdcos\theta + \beta)\right] \right\} \quad (2.3b)$$

Denklem 2.3'te görüldüğü gibi, Dizinin toplam elektrik alanı, orijinde konumlandırılan tek bir elemanın elektrik alanı ile yaygın olarak dizi faktörü olarak anılan bir faktör ile çarpılarak hesaplanır. Bu nedenle, sabit genlikteki iki elemanlı dizi için dizi faktörü şu şekilde verilir [9]:

$$AF = 2\cos\theta \left[\frac{1}{2}(kdcos\theta + \beta) \right] \quad (2.4)$$

Dizi faktörü, dizi geometrisinin ve uyarım fazının bir fonksiyonudur. Dizi elemanları arasındaki mesafe d ve faz β değiştirilerek, dizi faktörünün ve dizinin toplam elektrik alanının karakteristiği ve özellikleri kontrol edilebilir.

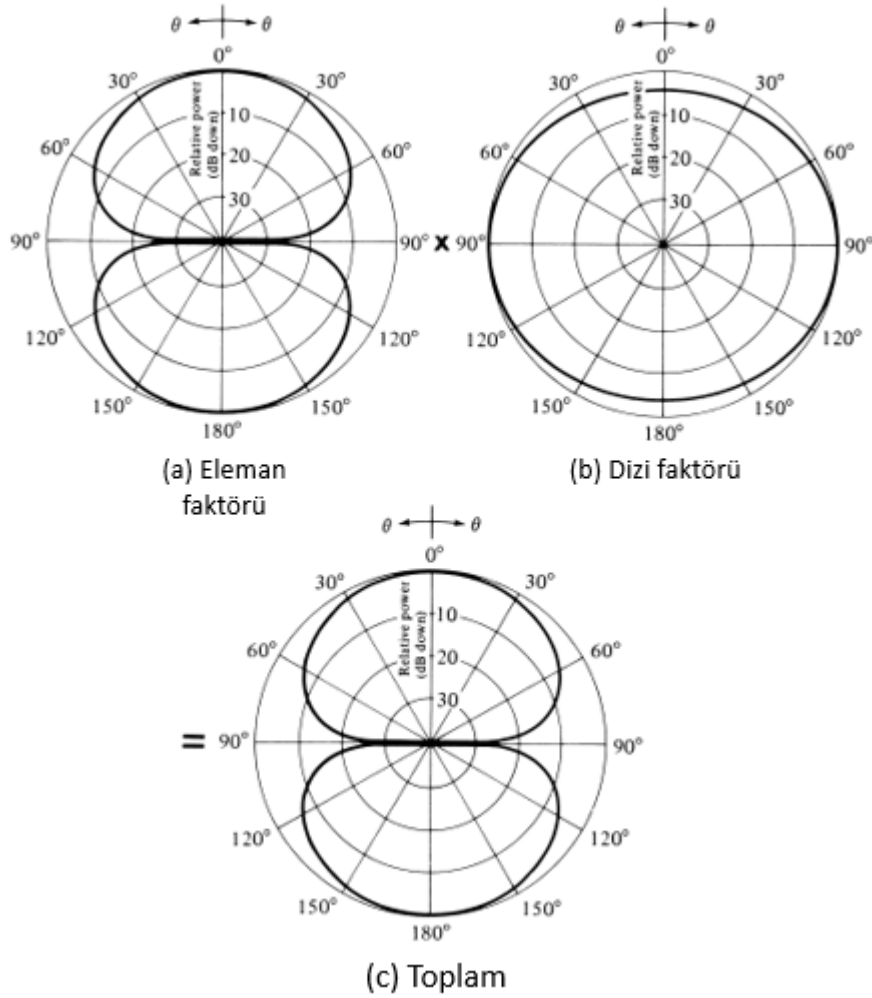
Özdeş ve iki aynı tür anten elemanından oluşan iki elemanlı bir dizinin, seçilen bir referans noktasında oluşan elektrik alanı, tek bir elemanın etkisi ile dizi faktörünün çarpılmasıyla elde edilir [9].

$$E(\text{toplama}) = [E(\text{Eleman faktörü})] \times [Dizi Faktörü] \quad (2.5)$$

Bu denklemde ifade edilen yaklaşım, aynı anten elemanlarından oluşan ve benzer eleman örüntüsüne sahip iki elemanlı bir dizi için çıkarılmış olmasına rağmen, aynı eleman örüntüsüne sahip farklı boyut ve şekillerde ki diziler için de geçerlidir. Her dizinin kendi dizi faktörü vardır. Genel olarak dizi faktörü, elemanların sayısına, geometrik yerleşimlerine, aralarında ki genlik ve faz değişimine ve anten elemanları arasında ki mesafeye bağlı olan bir fonksiyondur. Dizi faktörü, yayın yapan elemanların yön özelliklerine bağlı olmadığından, gerçek elemanları izotropik kaynaklarla değiştirerek formüle edilebilir ve böylece izotropik kaynak kullanılarak dizi faktör türetildikten sonra denklem 2.5 kullanılarak toplam elektrik alan elde edilir.

Denklem 2.5'i daha iyi anlamak için, normalize edilmiş tek bir elemanın örüntüsünü dizi faktörü ile çarparak toplam eleman örüntüsü elde edilmesi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Şekil 2.2'deki örnek için dizi faktörü neredeyse izotropik olduğundan (3 dB içinde), eleman örüntüsü ve toplam örüntü şekil olarak hemen hemen aynıdır. İkisi arasındaki en büyük büyüklük farkı yaklaşık 3 dB'dir.

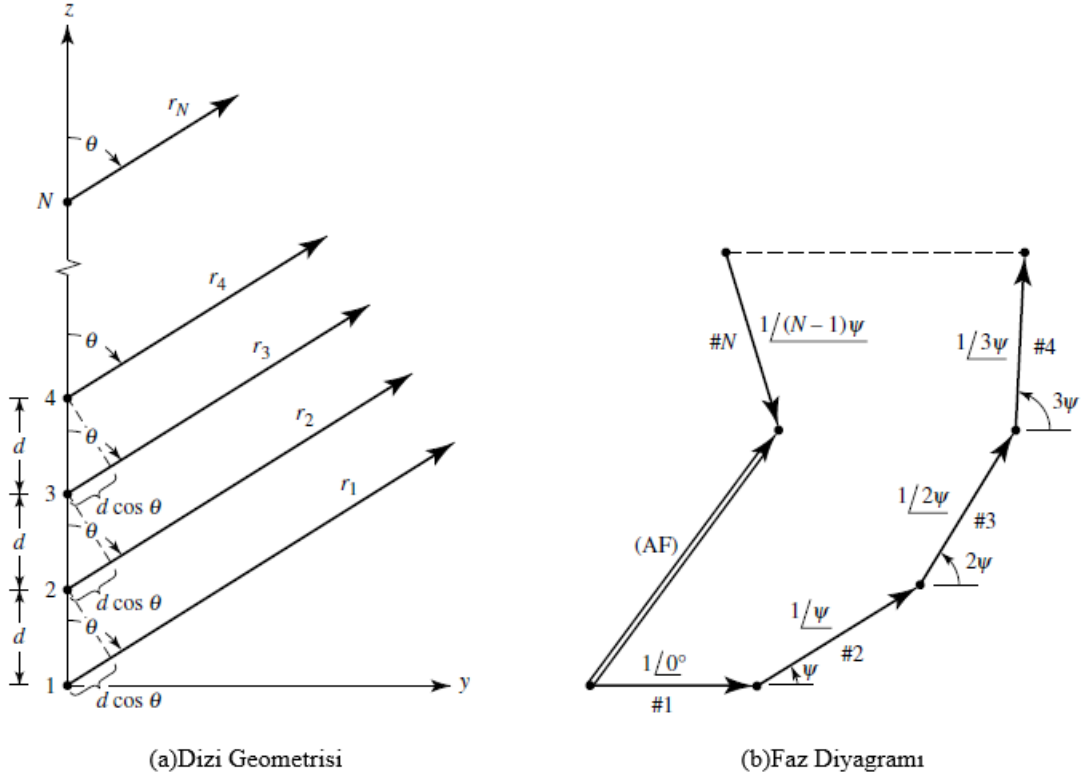


Şekil 2.2 : Aynı faz uyarımına ($\beta = 0^\circ$, $d = \lambda/4$) sahip sonsuz küçük yatay dipollerden oluşan iki öğeli bir dizinin, (a) eleman faktörü, (b) dizi faktörü ve (c) toplam elektrik alan örüntüsü [9].

Bu örnekte dizi elemanları sayısı 2 tane olduğu için toplam örüntüyü oluşturmada eleman faktörü belirleyici olmuştur. Dizide ki eleman sayısı arttıkça bu durumun değiştiğini görmek mümkündür.

2.2 Lineer Dizi

N elemanlı lineer diziler, hepsi aynı büyüklükte ve her biri aşamalı bir faza sahip özdeş öğeler dizisine sahip üniform bir dizidir. İki elemanlı dizi için yapılan çalışmalar N-elemanlı bir diziyi genelleştirilebilir. Z ekseni boyunca dizilmiş N-elemanlı lineer bir dizinin geometrisi ve faz diyagramı Şekil 2.3'teki gibidir [9].



Şekil 2.3 : Z eksenı boyunca konumlandırılmış izotropik kaynakların N elemanlı dizisinin uzak alan geometrisi ve faz diyagramı [9].

Dizinin toplam örüntüsünü oluşturmak için kullanılan denklem 2.5'in dizi faktörü kısmı incelendiğinde, Dizi faktörü şu şekilde verilir [9]:

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(k \cos \theta + \beta)} = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.6)$$

Burada $\psi = k d \cos \theta + \beta$ aşamalı faz ifadesidir. Üniform lineer bir dizinin toplam dizi faktörü, üstellerin bir toplamı olduğundan, her biri bir öncekine göre birim genlik ve aşamalı faz ψ olan N tane fazörün vektör toplamı ile temsil edilebilir. Şekil 2.3(b)'de bu fazörlerin vektörel olarak toplanması görölmektedir. Buradan da görüleceği gibi, AF'nin fazı ve genliğinin, elemanlar arasında ki bağılı fazın ψ uygun şekilde seçilerek uniform dizilerde kontrol edilebileceği açıktır.

2.2.1 Geniş Kenar (Broadside) Dizi

Bir dizinin maksimum radyasyonunun dizinin eksenine göre farklılık göstermektedir. Denklem 2.6(c) incelendiği zaman, dizi faktörün ilk maksimum olduğu değer [9], [10];

$$\psi = k d \cos \theta + \beta = 0 \quad (2.7a)$$

Geniş kenerlı dizilerde ilk maksimumun $\theta_0 = 90^\circ$ yönünde olması istendiğinden,

$$\psi = kdcos\theta + \beta|_{\theta=90^\circ} = \beta = 0 \quad (2.7b)$$

Bu sonuca göre, dizinin ekseninin geniş kenarına yönlendirilmiş üniform lineer bir dizinin dizi faktörünün maksimumuna sahip olmak için, tüm elemanların aynı faz ve genlik uyarımına sahip olması gerekir. Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus, elemanlar arasında ki yerleşimin, ana hüzmeye dışında, ana hüzmeye seviyesi kadar olan istenmeyen başka bir hüzmelerin oluşmayacağı kadar elemanlar arasında ki mesafenin belirlenmesidir. İngilizce tanımı grating lobe olarak bilinmektedir. Geniş kenarlı dizilerde elemanlar arası mesafe dalga boyunun katları olmamalıdır ($d \neq n\lambda, n = 1, 2, 3 \dots$) [11].

Birçok dizi anten tasarımındaki hedeflerden biri, örüntünün ana maksimumuna ek olarak grating lobe olarak adlandırılan çoklu maksimumlardan kaçınmaktır. İngilizcede grating lobe olarak adlandırılan bu etki istenmeyen bir durumdur. Genellikle yüksek yönlülük için elemanlar arasındaki en büyük aralığın seçilmesi gerekebilir, ancak grating lobe oluşmamasına dikkat edilmelidir. Herhangi bir grating lobe kaçınmak için, elemanlar arasındaki en büyük boşluk bir dalga boyundan ($d_{max} < \lambda$) daha az olmalıdır [11].

2.2.2 Uçtan Işımalı (End-fire) Dizi

Uçtan ışmalı dizilerde örüntünün ilk maksimumu $\theta_0 = 0^\circ$ ve $\theta_0 = 180^\circ$ yönünde olması için;

$$\psi = kdcos\theta + \beta|_{\theta=0^\circ} = kd + \beta = 0 \Rightarrow \beta = -kd \quad (2.8a)$$

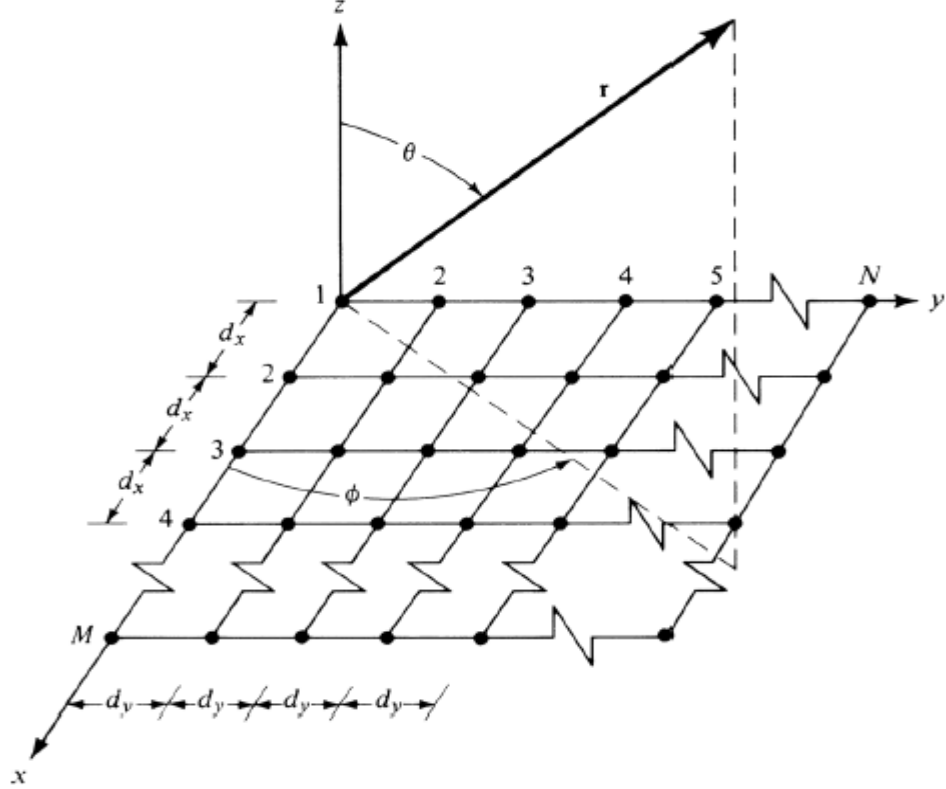
$$\psi = kdcos\theta + \beta|_{\theta=180^\circ} = -kd + \beta = 0 \Rightarrow \beta = kd \quad (2.8b)$$

Uçtan ışmalı dizilerde örüntünün tek bir maksimumuna sahip olmak ve grating lobe oluşmasından kaçınmak için elemanlar arasında ki boşluk $d_{max} < \lambda/2$ olmalıdır.

Belirli bir θ açısı dışında, dizinin maksimum ışımmasını $0^\circ \leq \theta_0 \leq 180^\circ$ açısında yönlendirmek için, elemanlar arasındaki faz uyarımı β ayarlanarak yapılır. Böylece, elemanlar arasındaki aşamalı faz farkı kontrol edilerek, maksimum ışımayı, bir tarama dizisi oluşturmak için arzu edilen herhangi bir yöne yönlendirilebilir. Bu elektronik tarama aşamalı dizinin temel ilkesidir. Faz dizi teknolojisinde fazı sürekli değiştiren sistem elemanları sayesinde, bu taramayı sürekli olarak değiştirebilmektedir.

2.3 Düzlemsel Dizi

Elemanlar lineer bir şekilde dizilebildiği gibi, dikdörtgen veya düzlemsel bir dizi oluşturmak için dikdörtgen bir eksen boyunca da konumlanabilir. Düzlemsel diziler örüntünün şeklini kontrol etmek ve şekillendirmek için ek özellikler sunar. Düzlemsel diziler daha çok yönlüdür ve yan lob seviyeleri daha simetriklerdir. Ayrıca uzayda antenin hüzmesini herhangi bir noktaya doğru taramaya olanak tanır.



Şekil 2.4 : Düzlemsel dizi geometrisi [9]

Şekil 2.4'te görülen x-y eksenini boyunca dizili elemana sahip olan düzlemsel bir antenin x ve y eksenli dizi faktörü [9];

$$AF = \sum_{m=1}^M I_m e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \Rightarrow x \text{ eksenli} \quad (2.9a)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N I_n e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y)} \Rightarrow y \text{ eksenli} \quad (2.9b)$$

I_m her bir elemanın uyarılma katsayısıdır. d_x ve β_x , x eksenini boyunca elemanlar arasındaki mesafe ve ilerleyici fazlardır. Aynı durum y eksenini boyunca da geçerlidir.

Tüm düzlem için dizi faktörü;

$$AF = \sum_{n=1}^N I_n \sum_{m=1}^M I_m e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y)} \quad (2.10a)$$

$$AF = \sum_{n=1}^N I_n \sum_{m=1}^M I_m e^{j(m-1)\psi_x} e^{j(n-1)\psi_y} \quad (2.10b)$$

Burada;

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x \quad (2.11a)$$

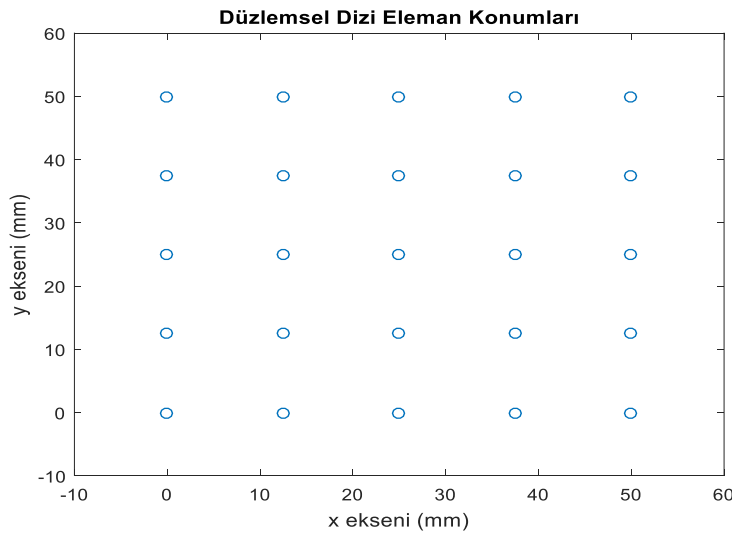
$$\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y \quad (2.11b)$$

Denklem 2.10'da görüldüğü gibi, dikdörtgen bir dizinin örüntüsü, dizilerin x ve y yönlerindeki dizi faktörlerinin bir ifadesi olduğunu belirtir.

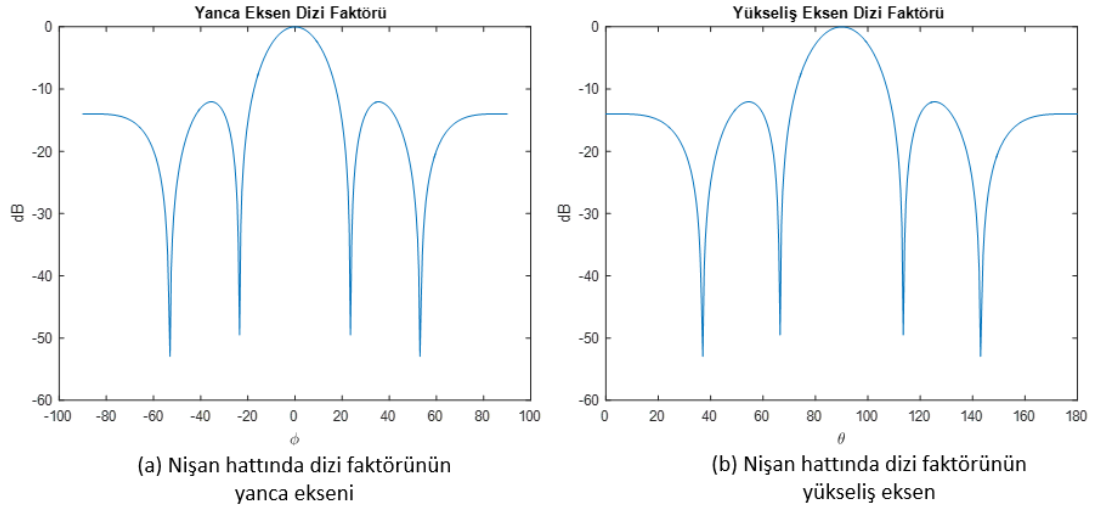
Şekil 2.5'te örnek bir düzlemsel dizi yerleşimi görülmektedir. Dizinin anten elemanları arasındaki mesafe 12 GHz frekansına göre $d=\lambda/2$ olarak belirlenmiş $5 \times 5=25$ anten elemanından oluşmaktadır.

Şekil 2.5'te verilen 5×5 elemanlı örnek bir düzlemsel dizinin normalize dizi faktörü, anten yerleşimi y-z eksenine, yönelimi x eksenine bakacak şekilde nişan hattında yanca ve yükseliş eksenini içeren oluşan örüntüler Şekil 2.6'da görülmektedir.

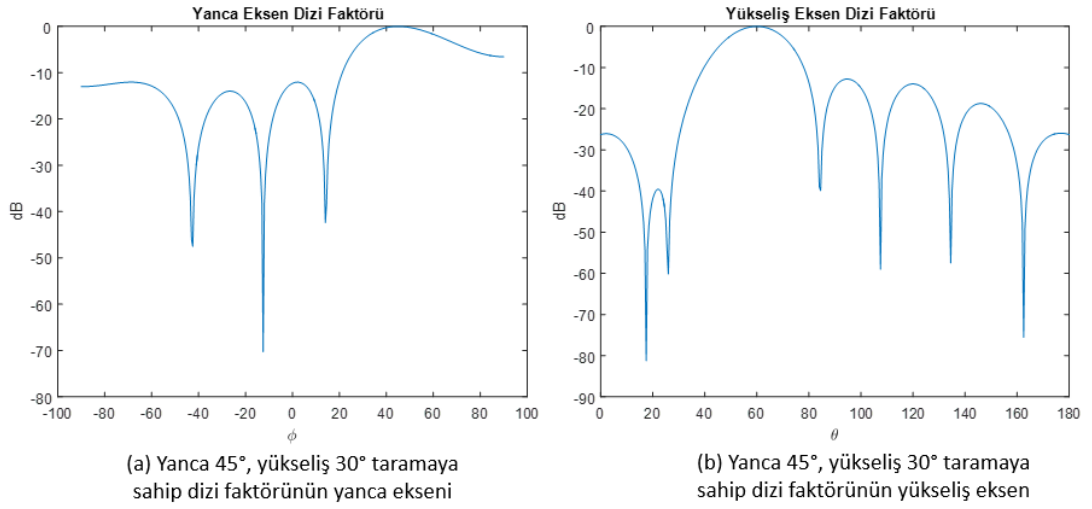
Denklem 2.11(a)-2.11(b) kullanılarak oluşturulmuş, yönlendirilmiş örüntü Şekil 2.7'de görülmektedir. Yanca ekseninde 45° , yükseliş ekseninde 30° yönlendirilmiş örüntüler, düzlemsel dizilerin iki ekseninde de tarama yapabilme özelliğini göstermektedir.



Şekil 2.5 : $5 \times 5=25$ elemanlı düzlemsel dizi konumları.



Şekil 2.6 : 5x5 düzlemsel dizinin nişan hattında, (a) yanca ekseninde dizi faktörü, (b) yükseliş ekseninde dizi faktörü.



Şekil 2.7 : 5x5 düzlemsel dizinin yanca 45° ve yükseliş 30° tarama için, (a) yanca ekseninde dizi faktörü, (b) yükseliş ekseninde dizi faktörü.

Lineer dizilerde de olduğu gibi, örüntünün ilk ana maksimum, ana lob olarak adlandırılır. Dizilerde elemanlar arasındaki mesafe oldukça önemlidir. Örüntülerde, elemanlar arasındaki boşluk $d = \lambda/2 \geq 0$ olduğunda, eşit büyüklükte çoklu maksimumlar oluşturulabilir. Bu maksimumların ana lob dışındaki maksimumlar grating lobe olarak adlandırılır. Bir grating lobe, elemanlar arası boşluk birden fazla yönde yayılan alanların faz içi eklenmesine izin verecek kadar büyük olduğunda, bir dizi anten tarafından üretilen, ana lob dışında bir lob, olarak tanımlanır. Dikdörtgen bir dizide grating lobe oluşumundan kaçınmak için, x-z ve y-z düzlemlerinde, sırasıyla x- ve y-yönündeki öğeler arasındaki boşluk, $\lambda/2$ 'den küçük olmalıdır ($d_x < \lambda/2$ ve $d_y < \lambda/2$) [11].

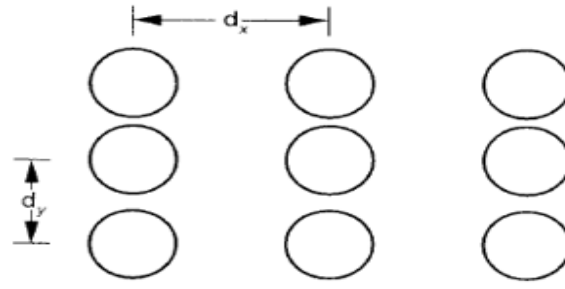
Grating lobe eleman deseninin nişan hattında bir şekilde bastırılabilir. Bununla birlikte, dizi tarandığında grating lobe oluşmaya başlayabilir ve önemli bir ışıma kaynağı olabilir. f frekansında belirli bir θ_0 tarama açısına taranan bir dizi için maksimum eleman aralığını belirleme kriteri, aralığı en yakın grating lobe ufukta olacak şekilde ayarlamaktır. Elemanlar arasında ki maksimum mesafeyi belirlemek için [9];

$$\frac{d_x}{\lambda_0} \leq \frac{1}{1 + \sin\theta_0} \quad (2.12)$$

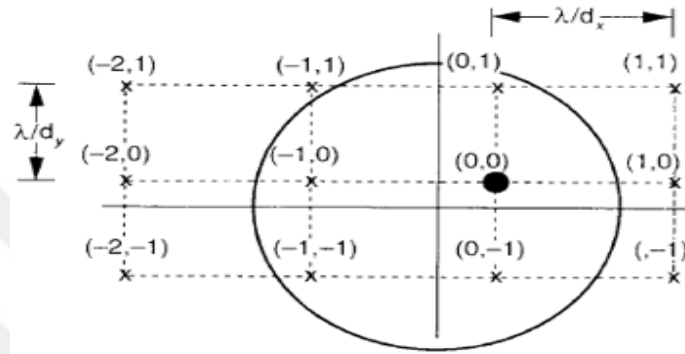
Bu koşul, maksimum çalışma frekansında, geniş tarama açısı için yarım dalga boyunda büyük olmayan elemanlar arasında boşluk gerektirir. Benzer ilişkiler düzlemsel bir dizi için geçerlidir, çünkü bu durumlarda da dx ve dy mesafesini uygun ayarlanmaması sebebiyle grating lobe fenomeni meydana gelir. Grating Lobe spektrumu, dikdörtgen bir dizi için u , v uzayındaki grating lobe konumlarını gösteren Şekil 2.8'deki grating lobe kafesinde grafiksel olarak gösterilmiştir. Birim çemberin içindeki loblar θ gerçek açılara karşılık gelir ve ışıma yapar, ancak birim çemberin dışındakiler bunu yapmaz. Doğrusal dizide olduğu gibi, bu, eleman aralıklarını çoğu uygulama için yaklaşık yarım dalga boyu veya biraz daha fazlası ile sınırlar. Elemanlar arasındaki mesafe artırılırsa, birim çember içine giren lobların sayısı artar yani grating lobe oluşma durumu gerçekleşir [10],[11].

Dizilerde, dizi elemanları arasındaki mesafenin, grating lobe oluşturmada, maksimum mesafede olması genelde istenen bir durumdur. Antenin açıklığına etkilediği için, dizi antenin kazancını artırır ve ayrıca antenin altına gelecek RF sistemlerin yerleşimi için de alan yaratmaktadır. Bu nedenle, grating lobe oluşturmada elemanlar arasındaki maksimum mesafeyi arttırmak için çeşitli dizilim formasyonu denenebilir. Bunların en yaygın olarak kullanılan formasyon şekli üçgensel dizilim formasyonudur. Şekil 2.9'da görülen bu formasyonda, dikdörtgen dizilim formasyonuna göre, grating lobe oluşturmada elemanlar arası mesafeyi artırabilmektedir.

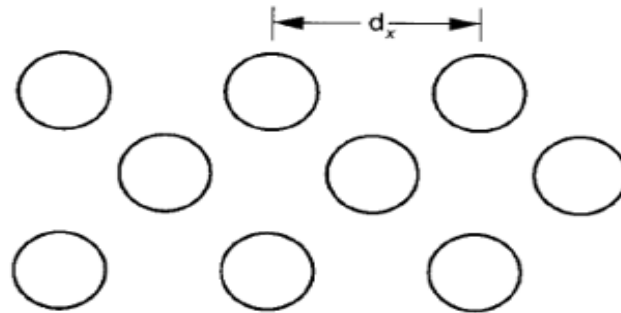
Geniş açı taramalarında ($\theta=70^\circ$) grating lobe oluşmaması için, dikdörtgen formasyonlu dizilim şeklinde elemanlar arasındaki maksimum mesafe en yüksek çalışma frekansında 0.5λ oluyorken, üçgen dizilim formasyonuna sahip dizilimlerde bu değer 0.63λ değerlerine kadar çıkmaktadır.



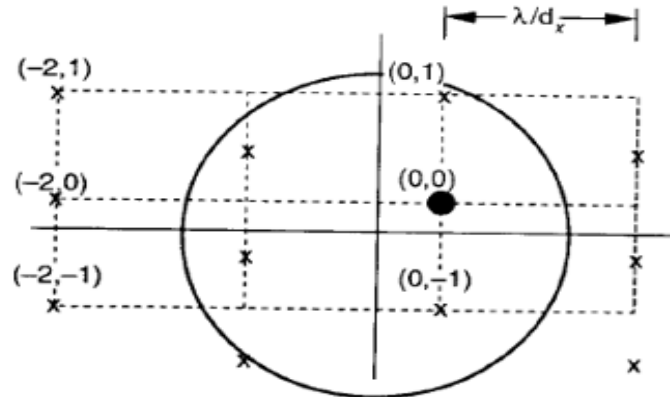
Dikdörtgen dizilim
formasyonlu dizi



Şekil 2.8 : Dikdörtgen dizilim formasyonlu düzlemsel diziler için grating lobe spektrumu [10].



Üçgen dizilim formasyonlu
dizi



Şekil 2.9 : Üçgen dizilim formasyonlu düzlemsel diziler için grating lobe spektrumu [10].

Bu durum tasarlanan dizinin daha az elemanla daha fazla alanı kapsamasına olanak tanımaktadır. Anten dizilimi değişmesi örüntü sentezi olarak bir farklılık oluşturmadan, tasarımcıya elemanlar arasında ki mesafeyi büyütme imkanı vermektedir. Dizi elemanları arasında ki mesafenin artması anten kazancını etkilediği gibi, anten elemanların altına gelecek olan sistem elemanları için de alan yaratmış olacaktır.

Dikdörtgen bir dizi için, ana lobu;

$$kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x = \pm 2m\pi \quad m = 0,1,2,3,\dots \quad (2.13a)$$

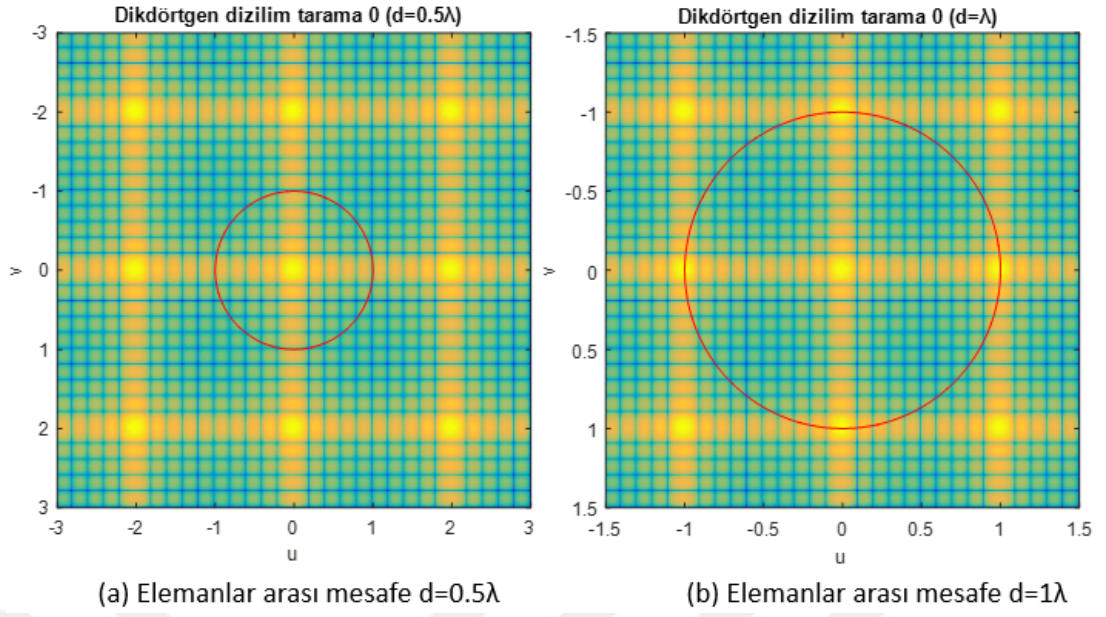
$$kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y = \pm 2n\pi \quad n = 0,1,2,3,\dots \quad (2.13b)$$

Buradaki, β_x ve β_y birbirinden bağımsız fazlardır. Hüzme örüntüsünü uzayda, istenilen açıya yönlendirmek için ayrı ayrı hesaplanır, fazları aynı olmak zorunda değildir. Bununla birlikte, çoğu pratik uygulamalarda, konik ana hüzmenin aynı yön ve doğrultuda konik kirişlerinin kesişmesi ve maksimumların aynı yöne yönelmesi gerekir. $\theta = \theta_0$ ve $\phi = \phi_0$ boyunca yönlendirilen tek bir ana hüzmenin olması isteniyorsa, x- ve y yönlerindeki elemanlar arasındaki aşamalı faz kayması şuna eşit olmalıdır [9]:

$$\beta_x = -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 \quad (2.14a)$$

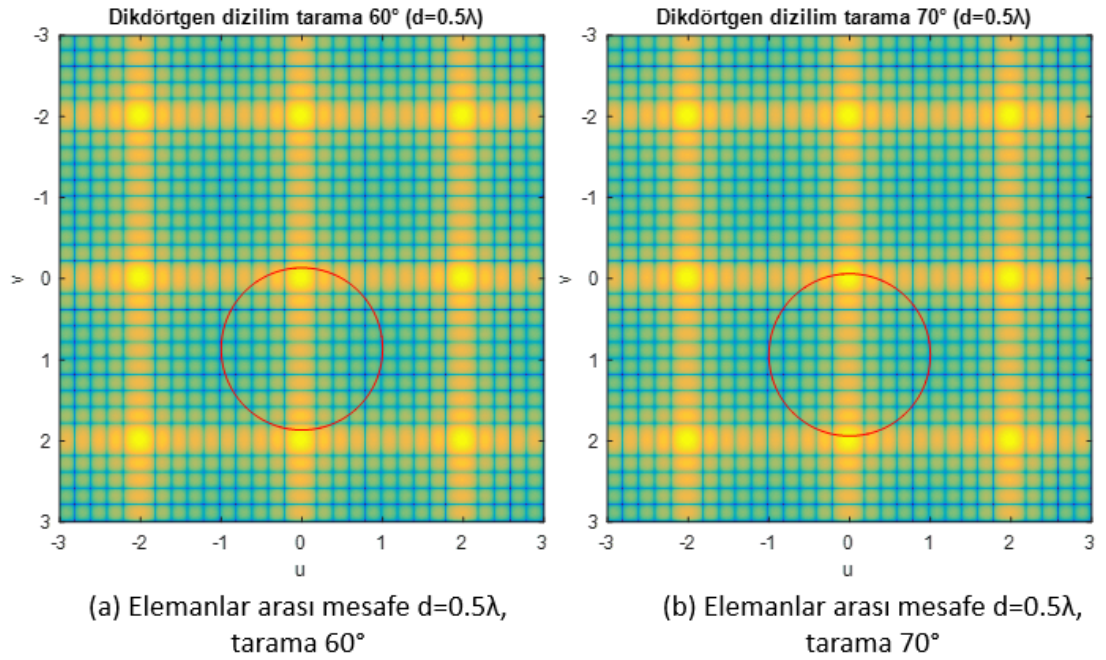
$$\beta_y = -kd_y \sin\theta_0 \sin\phi_0 \quad (2.14b)$$

Dikdörtgen dizilime sahip bir dizi antenin, nişan hattında elemanlar arasındaki mesafenin $d=0.5\lambda$ ve $d=\lambda$ olması durumunda grating lobe oluşma durumu Şekil 2.10'da görülmektedir. Şekil 2.10'da koyu sarı renkte görülen noktaların her biri bir örüntüyü ifade etmektedir. Kırmızı renkte görülen birim hücre görünür uzayı temsil etmektedir. Birim çember içinde bir örüntü olması gerekmektedir. Birim hücre içine ikinci bir örüntünün girmesi grating lobe oluşması anlamına gelmektedir. Şekil 2.10'da nişan hattında, elemanlar arasında mesafe $d= 0.5\lambda$ olduğunda grating lobe oluşmazken, $d= \lambda$ olduğunda oluştuğu görülmektedir.



Şekil 2.10 : Dikdörtgen dizilime sahip düzlemsel dizinin nişan hattında grating lobe analizi, (a) Elemanlar arasında ki mesafe $d=0.5\lambda$, (b) Elemanlar arasında ki mesafe $d=1\lambda$.

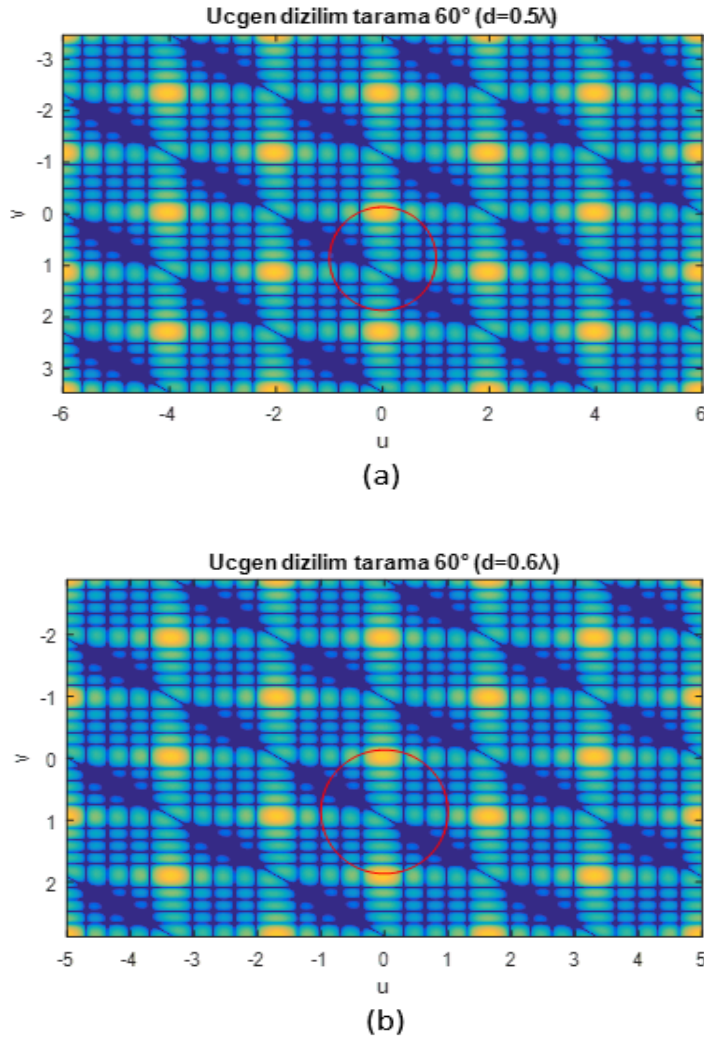
Dizilerin aralarında ki mesafenin maksimum değerini d_{max} , antenin maksimum taraması dikkate alınarak bulunduğu denklem 2.12’de ifade edilmiştir. Bu doğrultuda, dikdörtgen dizilime sahip dizi antenin elemanlar arasında $d=0.5\lambda$ olduğunda, grating lobe oluşturmada yapabildiği maksimum tarama analizi Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Dikdörtgen dizilime sahip düzlemsel dizinin $d=0.5\lambda$ eleman mesafesi için yapabildiği maksimum tarama analizi, (a) 60° tarama, (b) 70° tarama.

Şekil 2.11’de görüldüğü gibi, elemanlar arasında $d=0.5\lambda$ mesafe olduğunda, dikdörtgen dizilime sahip antenin maksimum tarama kabiliyeti 60° olarak görülmektedir. Tarama 70° olduğunda grating lobe oluşmaya başladığı görülmektedir. Bu sonuca göre, dikdörtgen dizilime sahip düzlemsel dizi antenleri 60° tarama kabiliyetine sahip olması için elemanlar arasında ki mesafenin maksimum $d=0.5\lambda$ olması gerekmektedir. Bu mesafenin artması için üçgensel dizilime sahip düzlemsel dizi antenler kullanılmaktadır.

Üçgensel dizilime sahip düzlemsel dizi antenin 60° tarama için elemanlar arasında ki mesafenin $d=0.5\lambda$ ve $d=0.6\lambda$ ’ya göre grating lobe analizi Şekil 2.12’de görülmektedir. Bu sonuçlara göre, üçgensel dizilime sahip diziler, aynı tarama açısı için, dikdörtgen dizilime sahip dizilere göre elemanlar arası mesafe daha fazla olmaktadır.

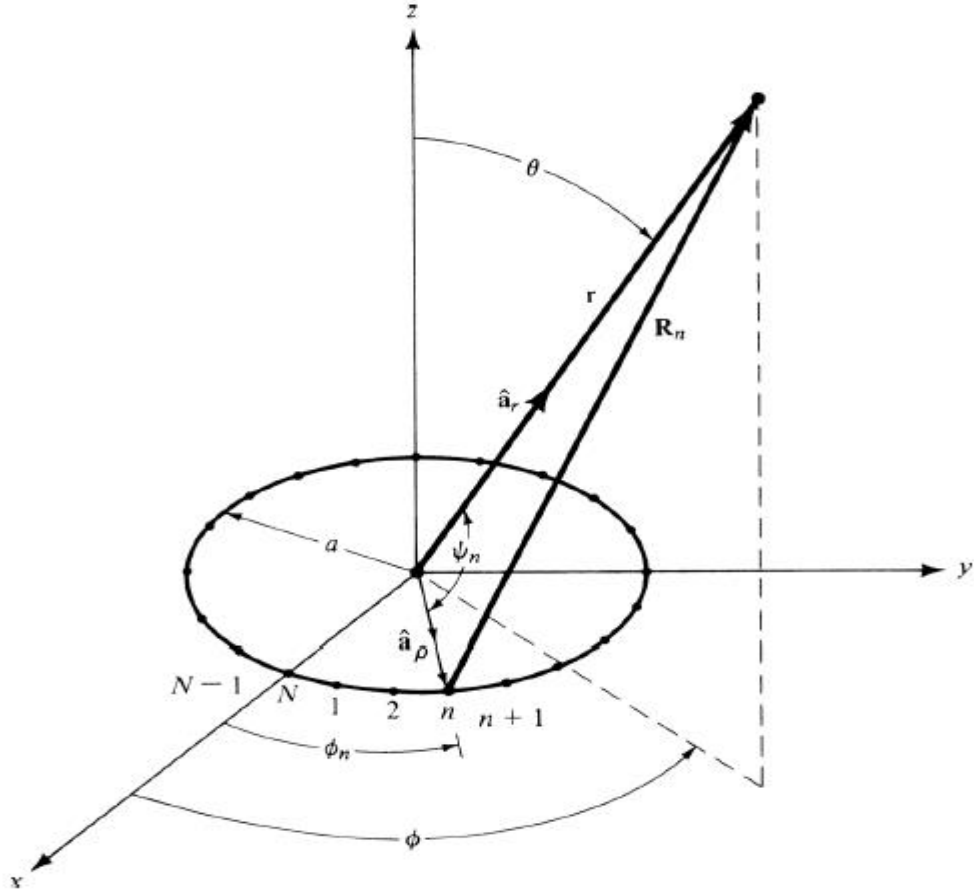


Şekil 2.12 : Üçgensel dizilime sahip düzlemsel dizinin 60° tarama için grating lobe analizi, (a) elemanlar arasın mesafe $d=0.5\lambda$, (b) elemanlar arası mesafe $d=0.6\lambda$.

2.4 Silindirik/Dairesel Dizi

Elemanların dairesel bir halka içine yerleştirildiği dairesel dizi, kullanım alanı giderek yaygınlaşan bir dizi konfigürasyonudur. Dairesel dizilerin üst üste dizilmesiyle de silindirik dizi olarak kullanılmaktadır. Dairesel dizi anten, lineer dizi düzlemsel dizi antenlerin bir yapı taşı olduğu gibi, dönme simetrisine sahip konformal dizi antenlerin temel bir yapı taşı olarak görülebilir. Dairesel dizileri inceleyerek, konformal dizi antenlerin bazı temel yönlerini, özellikle silindirik ve konik dizileri ve dönme simetrisine sahip diğer şekilleri anlaşılabilir. Ayrıca, eliptik bir diziden gelen ışıma, eşdeğer bir dairesel diziden türetilir.

Şekil 2.13’de görülen, a yarıçaplı dairesel bir halka boyunca x - y düzleminde N -eleman eşit aralıklarla dizilmiştir [9].



Şekil 2.13 : N -elemanlı Dairesel dizi geometrisi [9]

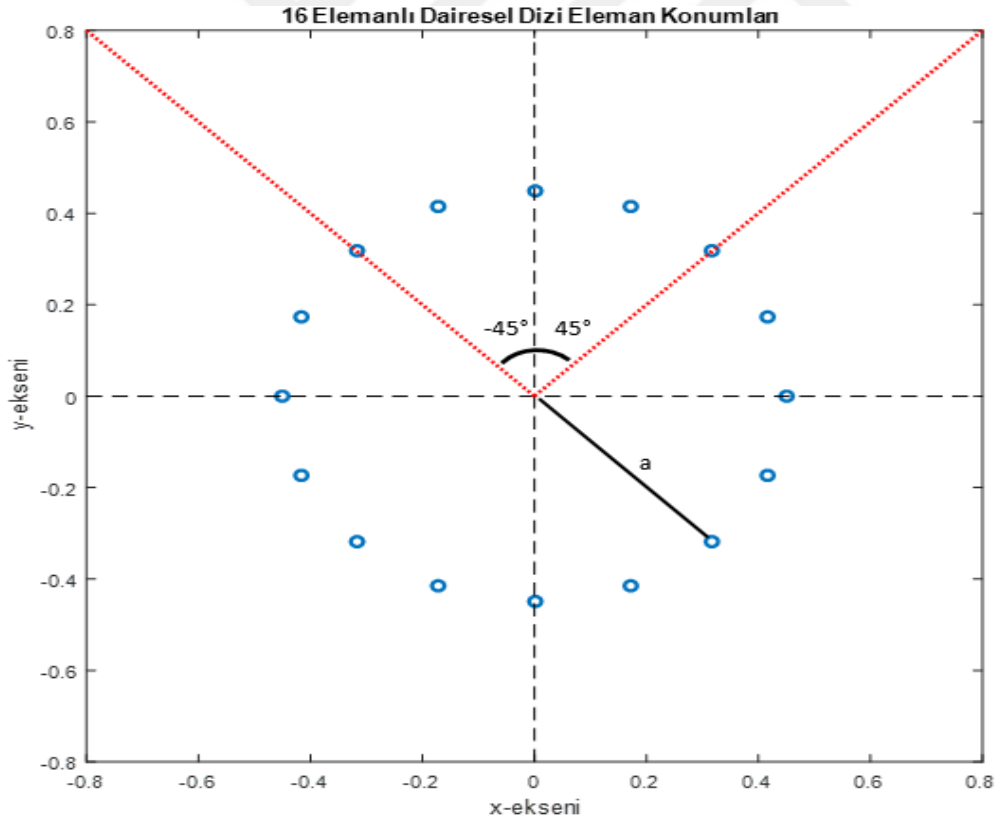
Dairesel dizi için dizi faktörü ifadesi [9];

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[k \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + a_n]} \quad (2.15)$$

Burada; $\phi_n = 2\pi(\frac{n}{N})$, n'inci elemanın x-y düzlemindeki açısal konumu, $a_n = -k \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)$, n'inci elemanın uyarılma katsayılarıdır.

Dairesel diziler, lineer ve düzlemsel dizilere kıyasla, dizinin eğriliği nedeniyle biraz daha karmaşık faz ifadesi vardır. Ayrıca lineer ve düzlemsel dizilerde ki gibi, ilerleyici bir faz verilememektedir [2],[12],[13].

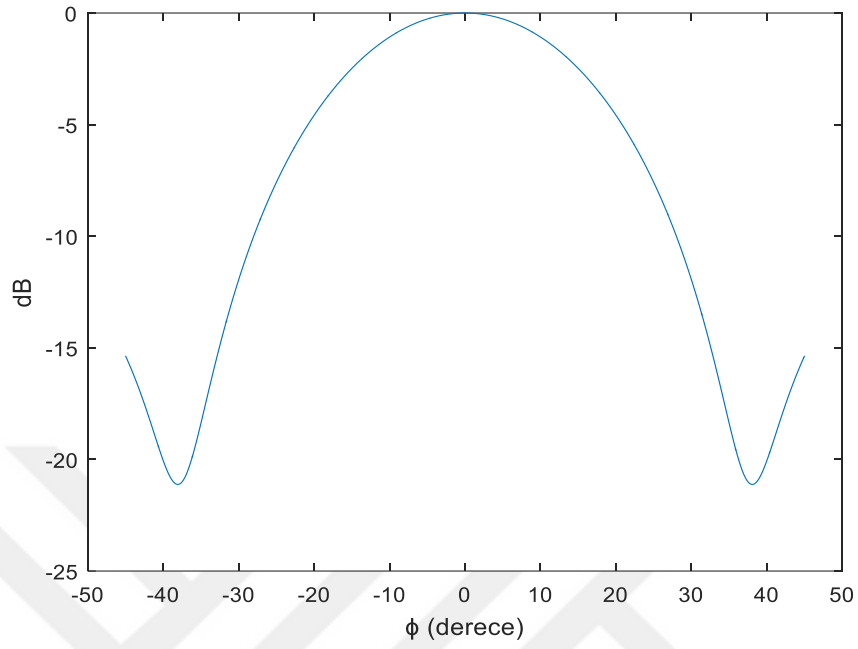
Yanca (azimut) düzleminde tüm yönlerde eşit radyasyona sahip bir ışın (çok yönlü bir ışın) oluşturmak için daireSEL diziler, daireSEL simetrleri sayesinde bunun için özellikle uygundur. Ayrıca dizi çevresindeki elemanların dizi faktörünü sektör sektör hesaplamak mümkündür. Örneğin, elemanların çevrenin dörtte biri (90°) üzerine yerleştirildiği daireSEL bir sektör dizisi, dizi faktörü denklemi 2.15 kullanılarak, farklı yarıcaplarda ki dizi faktörü oruntusu incelenebilir.



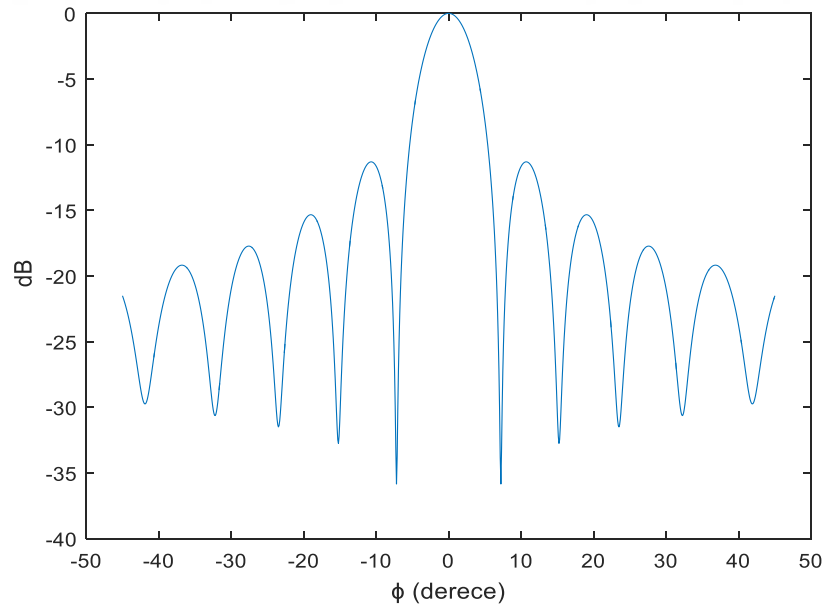
Şekil 2.14 : 90° 'lik çevre üzerine yerleştirilmiş daireSEL bir sektör dizi geometrisi

İzotropik elemanlara ve eşit genlik ve faza sahip 16 elemanlı bir dizi için denklem 2.15 kullanılarak, $-45^\circ \leq \phi \leq 45^\circ$ sektörü için, yarıcapı 1λ , 5λ ve 15λ değerlerinde

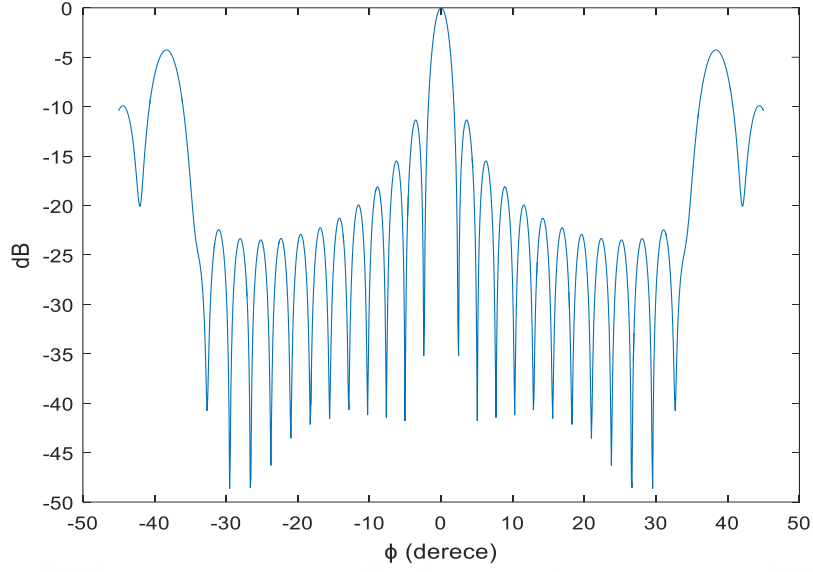
hesaplanan sonuçlar Şekil 2.15-2.17'de gösterilmektedir. Daire boyunca eleman aralığı 0.5 dalga boyu olarak seçilmiştir.



Şekil 2.15 : $a = 1\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesel sektör dizisi antenin dizi faktörü yayılım örüntüsü.

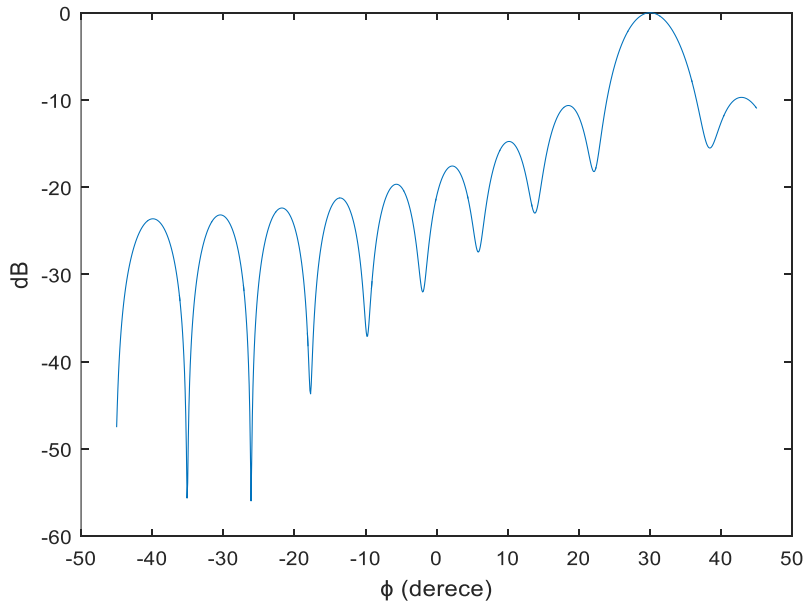


Şekil 2.16 : $a = 5\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesel sektör dizisi antenin dizi faktörü yayılım örüntüsü.



Şekil 2.17 : $a = 15\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesel sektör dizisi antenin dizi faktörü yayılım örüntüsü.

Bu örüntü şekilleri $20\log\left(\frac{|AF|}{16}\right)$ degerinin hesaplanmasıyla çizdirilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi yarıçap arttıkça yan lobe seviyeleri yükselmeye başlamıştır. Dizinin yarıçapı belirlenirken yan lobe seviyeleri yükselmemesi için dikkatli secilmelidir. Bunlara ek olarak dizi faktörü denklemi kullanılarak hüzme yönlendirmesi de yapılabilir [2], [12], [13]. Şekil 2.18’de hüzmenin $\phi_0 = 30^\circ$ yönlendirilmiş örüntüsü görülmektedir.



Şekil 2.18 : $a = 5\lambda$ için 16 elemanlı, 90° dairesel sektör dizisi antenin $\phi_0 = 30^\circ$ taramalı dizi faktörü yayılım örüntüsü.

Lineer ve dairesel diziler arasında bazı temel farklar vardır. Şekil 2.19 (a)'daki doğrusal dizi için, yayılan elemanlar eşit d aralığı ile aynıdır ve hepsi aynı yönü gösterir [2]. Yanca (Azimut) düzlemdeki uzak alan ışıma fonksiyonu, lineer dizi denklemlerinde anlatıldığı gibi şu şekilde ifade edilebilir [2];

$$E(\phi) = EL(\phi) \sum_n I_n e^{jkn d \sin(\phi)} \quad (2.16)$$

Burada, $EL(\phi)$ = Eleman faktörü, $k=2\pi/\lambda$ yayın sabiti, I_n uyarılma genlik katsayısıdır. Eleman faktör tüm elemanlarda ortak olduğu için toplamın başına alınabilir ve böylece toplam ışıma foksiyonunu, eleman faktörü X dizi faktörü şeklinde yazılabilir.

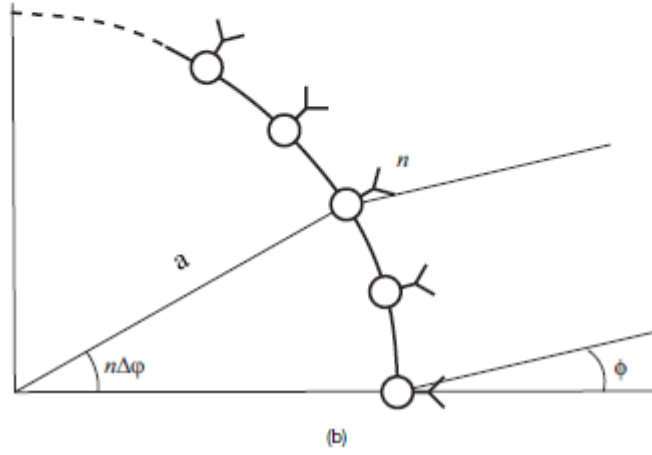
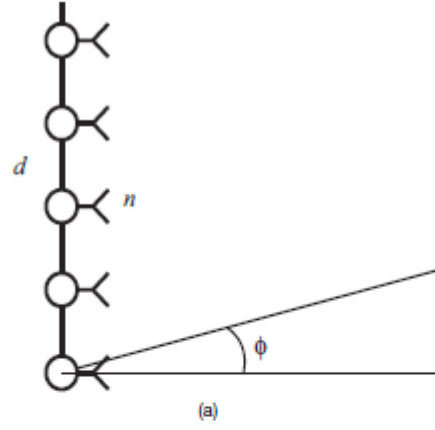
Şekil 2.19 (b)'de ki dairesel dizi için, yanca eksenindeki uzak alan ışıma fonksiyonu şu şekilde yazılabilir;

$$E(\phi) = \sum_n I_n EL(\phi - n\Delta\phi) e^{jk a \cos(\phi - n\Delta\phi)} \quad (2.17)$$

Burada, $n\Delta\phi=\phi_n$, $EL(\phi - n\Delta\phi)$ = Eleman faktörü, $k=2\pi/\lambda$ yayın sabiti, I_n uyarılma genlik katsayısıdır.

Fazlar çemberin merkezine referanslı olarak verilmektedir. Dizi elemanları özdeşdir ve daire boyunca $R\Delta\phi$ aralıklıdır, her eleman radyal yönü gösterir [9], [6]. Denklem 2.17'da görüleceği gibi, eleman faktörü, elemanın konumuna bağlı bir fonksiyon olduğu için, ortak bir eleman faktörü yoktur. Bu sebeple, elemanlar izotropik olmadıkça, dairesel dizilerin uzak alan ışıma fonksiyonunu, doğrusal ve düzlemsel dizilerdeki gibi, eleman faktörü X dizi faktörü şeklinde tanımlanmaz.

Dönme ilişkisi, dairesel dizideki her bir elemanın, yönlü ışınlar için dizi incelemelerinin ve ışın yönlendirme ağırlıklarının karmaşık bir senteziyle sonuçlanan benzersiz bir gömülü eleman örüntüsüne sahip olduğu anlamına gelir. Dairesel bir dizi için tarama açısı veya çalışma frekansı her değiştiğinde, elemanlara uygulanan ağırlıkların yeniden hesaplanması gerekir. Başka bir deyişle, elemanlara uygulanan ağırlıkların, dairesel dizinin çalıştığı her tarama açısı ve frekansı için optimize edilmesi gerekir, bu da dairesel dizi tasarımını zorlaştırır. Dairesel dizilerin kullanım avantajlarına rağmen, doğrusal diziler kadar yaygın olarak kullanılmamasının nedenlerinden biri de budur.



Şekil 2.19 : (a) Lineer dizi geometrisi; (b) Dairesel dizi geometrisi [2]

Denklem 2.16, doğrusal bir dizi için uzak alan ifadesinin, esasen uzak alan örüntüsü ile karmaşık uyarım arasında bir Fourier ilişkisini gösterdiğini belirtir. Ancak dairesele dizi ifadesi bu ilişkiyi göstermez. Dairesel dizi örüntü oluşturma için benzer bir Fourier ilişkisi elde edilebilirse, dairesele dizi örüntü oluşturmaya daha az karmaşık hale getirmek mümkündür. Bunu başarmak için kullanılan yöntem faz modu teorisidir.

Dairesel dizideki eleman sayısı kadar olan faz modlarının bir lineer dizinin elemanlarına benzer olduğu düşünülebilir ve bu nedenle bunların kullanımı, örüntü oluşturmak için lineer dizi tekniklerinin kullanılmasına izin verecektir. Faz modu konseptinin kullanımı genel bir yöntemdir, tüm konformal antenler için genelleştirilebilir. Bu çalışmada faz modu konsepti, silindirik bir dizinin hızlı tasarımı ve analizi için kullanılmıştır.

3. FAZ MODU TEORİSİ

Daha önce bahsedildiği gibi, düzgün bir dairesel dizinin yönlendirme vektörü, doğrusal bir dizide olduğu gibi elemanlar boyunca ilerleyici faza sahip değildir. Ayrıca eleman faktörü, dairesel dizinin merkeziyle elemanlar arasındaki açının ve mesafenin bir fonksiyonu olarak tanımlandığından ve ortak bir eleman faktöre sahip olmadığından, ortalama bir eleman ışınma örüntüsüyle, dizi faktörünün çarpılmasıyla toplam ışınma örüntüsünü bulunamayacağı anlamına gelir. Bu durumda, dairesel dizi için, örüntü sentezi problemini tekdüze bir lineer dizi problemine dönüştüren faz modları kavramı kullanılmaktadır. Faz modu konsepti, dizideki tüm öğeleri kullanır ve oldukça arzu edilen bir özellik olan, esas olarak frekanstan bağımsız bir ışınma modeli oluşturabilir. Bunun nedeni, uzak alan modelinin bu faz modları cinsinden temsil edilebilmesi ve bunların bağıl genliklerinin sabit olması kontrol edildiği süreçte tüm modelin frekansla sabit olmasıdır. Elemanları uyarımına göre iki farklı faz modu analizi vardır. Bunlar sürekli dizi uyarımı olan sürekli elemanlar ve ayrık dizi uyarımı olan ayrık elemanlardır [2].

3.1 Sürekli Elemanlar

Faz modlarını açıklamak için, dairesel bir dizideki uyarımın sürekli olduğu ve ayrık olduğu durumlar vardır. İlk olarak sürekli uyarımın olduğu durum incelenirse, yanca (azimut) düzlemindeki uzak alan paterni, Denklem 3.1'de gösterildiği gibi, karmaşık uyarılma I_n ve eleman ışınma örüntüsü EL cinsinden yazılabilir [2].

$$E(\phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I(\varphi) EL(\phi - \varphi) e^{jk a \cos(\phi - \varphi)} d\varphi \quad (3.1)$$

$I(\varphi)$ uyarılma fonksiyonu 2π üzerinden periyodik olduğundan bir Fourier serisinde genişletilebilir. Dairesel diziye, 2π periyotlu $I(\varphi)$ uyarılması uygulandığında;

$$I(\varphi) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_m e^{jm\varphi} \quad (3.2)$$

$$C_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I(\varphi) e^{-jm\varphi} d\varphi \quad (3.3)$$

Her bir C_m katsayısı bir faz modunu ifade etmektedir. Dairesel dizideki eleman sayısı kadar olan modlardan, $m=0$, daireysel dizinin çevresi boyunca faz değişimi olmayan ilk moddur. Benzer şekilde m 'inci mod $m \times 2\pi$ varyasyonuna sahiptir. Mod sayısı olan m pozitif veya negatif olabilir.

Dairesel diziye elemanların izotropik olduğu örneğe bakıldığında, uzak alan ışınma örüntüsü, faz modu uyarımları açısından şu şekilde yazılabilir:

$$E(\phi) = \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi} C_m \int_{-\pi}^{\pi} e^{jm\varphi} e^{jkac\cos(\phi-\varphi)} d\varphi \quad (3.4)$$

Uygulanan uyarım periyodik ise uzak alan fonksiyonu da 2π üzerinden periyodik olduğundan, Denklem (3.5)'de gösterildiği gibi bir Fourier serisi olarak da temsil edilebilir.

$$E(\phi) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_m e^{jm\phi} \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ile (3.5), uzak alan ışınma örüntüsü için iki ifadenin karşılaştırılmasıyla;

$$A_m = C_m \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-jm(\phi-\varphi)} e^{jkac\cos(\phi-\varphi)} d\varphi \quad (3.6)$$

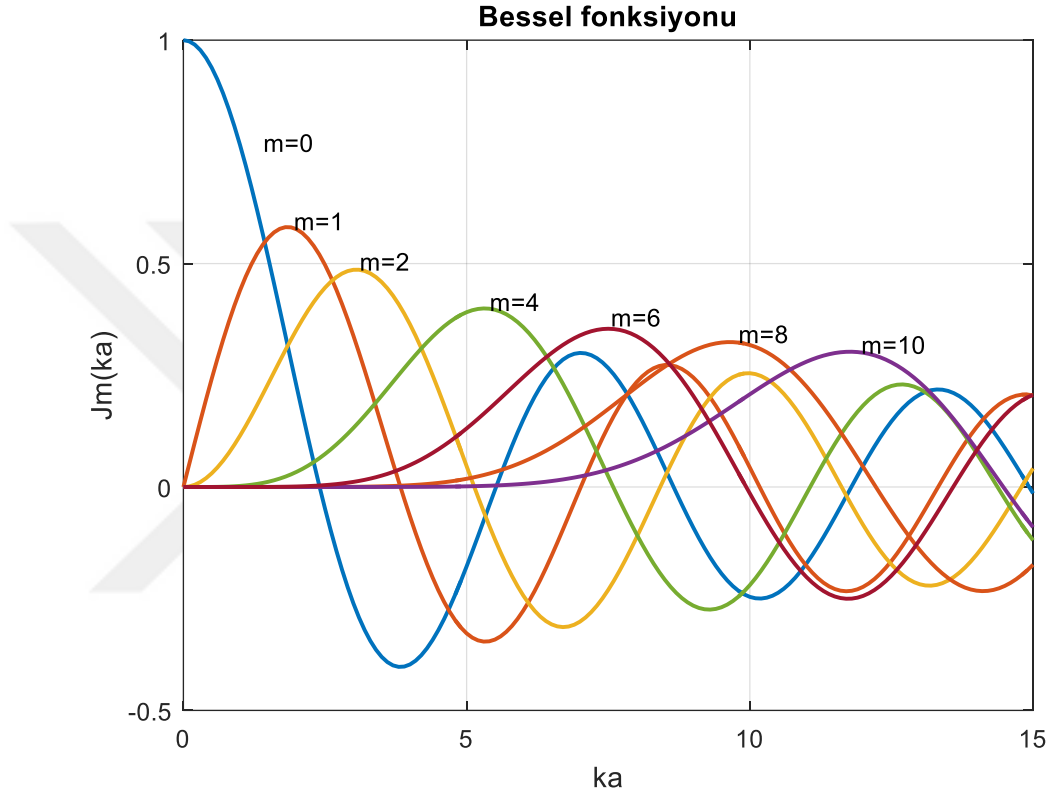
Buradan denklem biraz daha ilerletildiğinde;

$$A_m = j^m C_m J_m(ka) \quad (3.7)$$

Uzak alan faz modu genliği olan A_m , sürekli bir uyarımın olduğu bir durum için, birinci türden Bessel fonksiyonu ve C_m uyarım katsayılarıyla ifade edilir. Uzak alan ışınma örüntüsü, Denklem (3.5)'de gösterildiği gibi faz modlarının bir toplamı olarak ifade edildiğinde, lineer diziye benzer şekilde aşamalı bir faz kaymasına sahip olmaktadır. Böylece, faz modu dönüşümü kullanılarak, lineer bir dizi için olduğu gibi benzer bir şekilde daireysel dizi ışınma modellerini tanımlamak mümkündür. Denklem 3.7'yi, 3.5'de ki denklemde yerine koyulursa, m 'inci uyarım modundan kaynaklanan örüntü fonksiyonu denklemi 3.8'de yazıldığı gibi bulunur. Böylece, her bir mod için uzak alan faz modu örüntüleri elde edilmiş olur. Tüm faz modu örüntülerinin toplamı, lineer dizide olduğu gibi, toplam uzak alan ışınma örüntüsünü verir.

$$E_m(\phi) = j^m C_m J_m(ka) e^{jm\phi} \quad (3.8)$$

Bessel fonksiyonu sürekli bir fonksiyondur ama Şekil 3.1’de de görüleceği gibi, büyük salınımlar sergiler ve birkaç değeri sıfıra yakındır. Bessel fonksiyonu, J_m sıfıra yakın olacak şekilde dizi boyutları ve frekansları ka ile karşılık gelen uzak alan bileşeni E_m uyarmak mümkün olmayacaktır. Bu durumun, örüntü sentezi ve frekansa karşı örüntü kararlılığı için önemli sonuçları vardır.



Şekil 3.1 : Birinci dereceden Bessel fonksiyonu $J_m(ka)$, $m=0, 1, 2, \dots, 10$.

Belirli bir ka bağımsız değişkeni için, yüksek dereceli Bessel fonksiyonları, artan sırayla hızla bozulur ve bu nedenle, daha yüksek uyarma fazı modları zayıf bir şekilde yayılır. Temel kural, Bessel sıraları olan m , bağımsız değişken değeri ka ’ya en az eşit seçilmelidir.

3.2 Ayırık Elemanlar

Ayrık dizi uyarımı, sürekli durumun örneklenmiş bir versiyonudur. Bu durumda, elemanları doğrusal artan bir fazla beslemek, istenen faz modlarını sağlayacaktır, ancak aynı zamanda ek radyasyon modları ile sonuçlanabilecek temel faz moduna harmoniklerin üretilmesine neden olur. Bunlar genellikle “bozulma modları” olarak

adlandırılır. Bu bozulma modları, hüzmleme için kaç modun kullanılabileceğini sınırlar.

Yayın yapan elemanlar izotropik değil yönlendirici ise, bu etkinin de faz modlarının ifadesine dahil edilmesi gerekir. Eleman ışına örüntüsü de 2π üzerinden periyodik olacaktır ve bir Fourier serisi olarak yazılabilir.

$$EL(\alpha) = \sum_{-\infty}^{\infty} D_p e^{jp\alpha} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'u uzak alan ışına örüntü denklemi olan 3.1'de yerine yazıldığında;

$$E(\phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I(\varphi) \sum_{p=-\infty}^{\infty} D_p e^{jp(\phi-\varphi)} e^{jk\alpha \cos(\phi-\varphi)} d\varphi \quad (3.10)$$

Buradan faz mod uyarımına genişletmek için denklem 3.2 kullanılırsa;

$$E_m(\phi) = C_m e^{jm\phi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} D_p \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j(m-p)(\phi-\varphi)} e^{jk\alpha \cos(\phi-\varphi)} d\varphi \quad (3.11a)$$

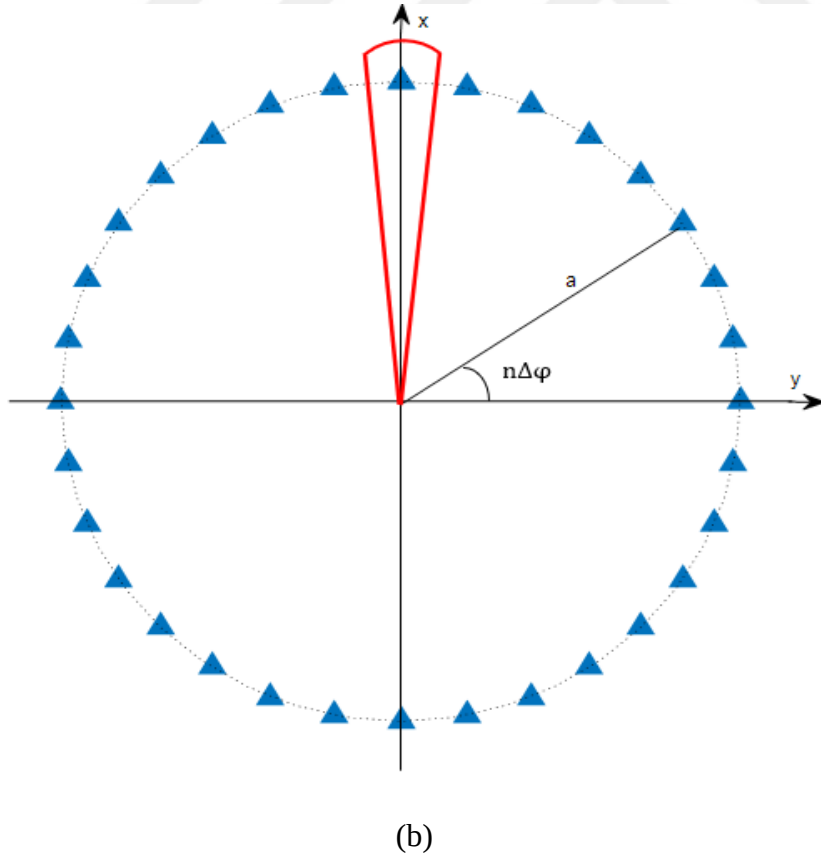
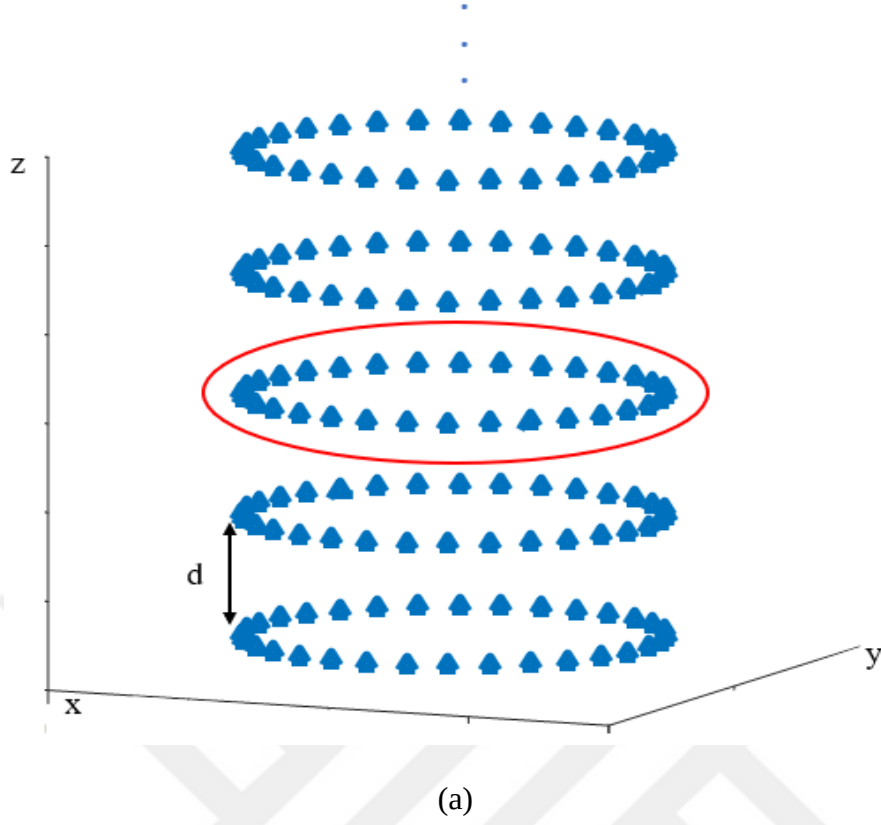
$$E_m(\phi) = A_m e^{jm\phi} \quad (3.11b)$$

Buradan, faz modu uzak alan ışına örüntüleri elde edilir. Her bir faz modu için, yayın yapan elemanların (D_p) tüm katkısı toplama eklenmek zorundadır. Nihayi olarak, toplam uzak alan ışına örüntüsünde, faz modları toplanmasıyla elde edilmiş olur [2].

4. FAZ MODU TEKNİĞİNİN UYGULANMASI VE SONUÇLARI

Silindirik bir dizinin tasarımı ve analizi oldukça zor bir problemidir. Dizilerin boyutu artıkça, tasarım ve analiz süreleri, maliyeti ve elektromanyetik simülasyonlar için gerekli olan donanım kaynaklı yetersizlikler gibi problemler oluşmaktadır. Lineer/Düzlemsel fazlı dizi tasarımı için geliştirilen, bazı yaklaşımlara dayanan bir simülasyon tekniği mevcuttur. Sonlu elemanlar metoduyla (Finite Element Method (FEM)) çözüm yapan Ansys Yüksek Frekans Yapı Simülatöründe (HFSS) kullanılan bu simülasyon tekniği sadece lineer/düzlemsel dizi tasarımlarında kullanılabilir, silindirik/dairesel veya konformal diziler için kullanılamaz. Lineer/Düzlemsel diziler için kullanılan simülasyon tekniği, dizideki elemanların ve yerleşiminin simetrisinden yararlanan sonsuz dizi yaklaşımını kullanır. Bu tipik olarak hesaplama alanını, dizinin dizilim düzlemi boyunca sonsuz bir periyodik uzantıyı simüle eden uygun efendi/köle (master/slave) olarak adlandırılan sınır koşullarına sahip tek bir hücreye indirger. Birim hücre olarak adlandırılan bu yapının tasarımı ve analiz sonuçları, dizinin tüm elemanlarıyla birlikte olan tasarım ve analiz sonuçlarıyla aynı sonuçları vermektedir. Düzlemsel olmayan geometrik yerleşimlerde bu yöntem kullanılamadığı için, silindirik/dairesel veya konformal dizinin tasarımı ve analizi için yeni bir yöntem olan faz modu konsepti kullanılmaktadır [7],[8].

Şekil 4.1(a)'de görüldüğü gibi, silindirik dizi, dairesele dizinin üst üste dizilmesiyle oluşmaktadır. Böyle bir dizinin tasarımı ve analizi oldukça zor olduğundan, kırmızı bir halka ile gösterilmiş bir dairesele dizi kesiti alınarak Şekil 4.1(b) elde edilmiştir. Şekil 4.1(b)'de, $N=32$ elemanlı, elemanlar arası mesafe $d=0.5\lambda$, $a=Nd/2\pi$ yarıçaplı dairesele dizinin yan yana olan elemanları arasında ki açısal mesafed $\Delta\phi=2\pi/N$ 'dir. Elemanlar arasında ki mesafe geniş taramada grating lobe oluşmayacak şekilde $d=0.5\lambda$ seçilmiştir. Elemanlar x-y düzlemine yerleşmiş ve dizinin dönme eksenini z yönü olarak belirlenmiştir. Dairesel dizide kırmızı ile gösterilmiş bir eleman alınarak, lineer/düzlemsel dizilerde olduğu gibi, dizinin tamamını tasarlamak ve analiz etmek yerine, Şekil 4.1(b)'de kırmızı alanda ki birim hücre çözümünü kullanan bir yaklaşım geliştirilmiştir.

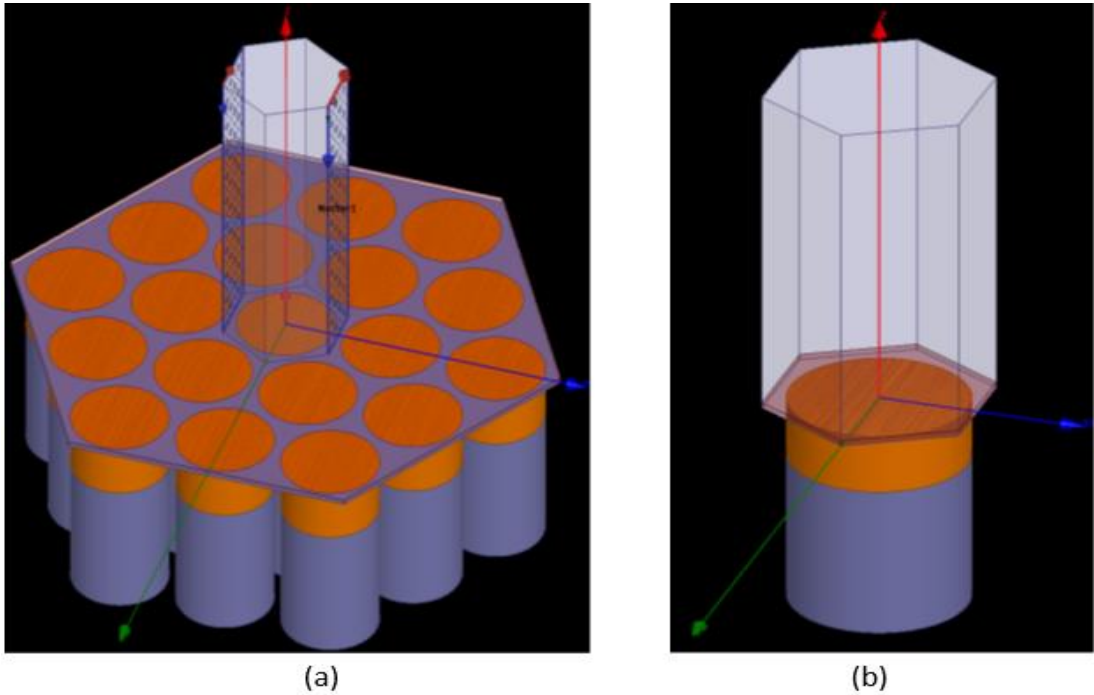


Şekil 4.1 : (a) N-dairesel dizi ile oluşan silindirik dizi, (b) Silindirik dizinin bir sırası alınmış, a yarıçaplı N elemanlı dairesel dizi, tüm dizi elemanlarını ve birim hücre sınırını gösterilmiştir.

Burada, düzgün bir dairesel dizinin dönme simetrisi, sonsuz dizi simülasyonlarının uygulanmasını basitleştirir. Silindirik diziler yükseliş eksenini boyunca lineer dizi karakteristiği gösterdiği için master/slave sınır koşulları kullanılırken, yanca eksen sınır koşulu için faz modu konseptine dayanan sınır koşulları kullanılmaktadır. Şekil 4.1(b)'de gösterildiği gibi, birim hücrenin yanca ekseninde ki elemanlar arasında $2\pi m/N$ kadarlık faz kaymasına sahip silindirik faz sıralı uyarım bağlantılı sınır tanımlanır. Birim hücre simülasyonlarından elde edilen bilgileri kullanan bir yaklaşımla, dizinin elemanlarının uyarılma sayısına göre yanca kesiminin gömülü ışıma örüntüsünü belirli bir yükseklik açısı (θ_{tarama}) için elde edilmektedir.

4.1 Lineer/Düzlemsel Dizilerde Master/Slave Sınır Koşulları

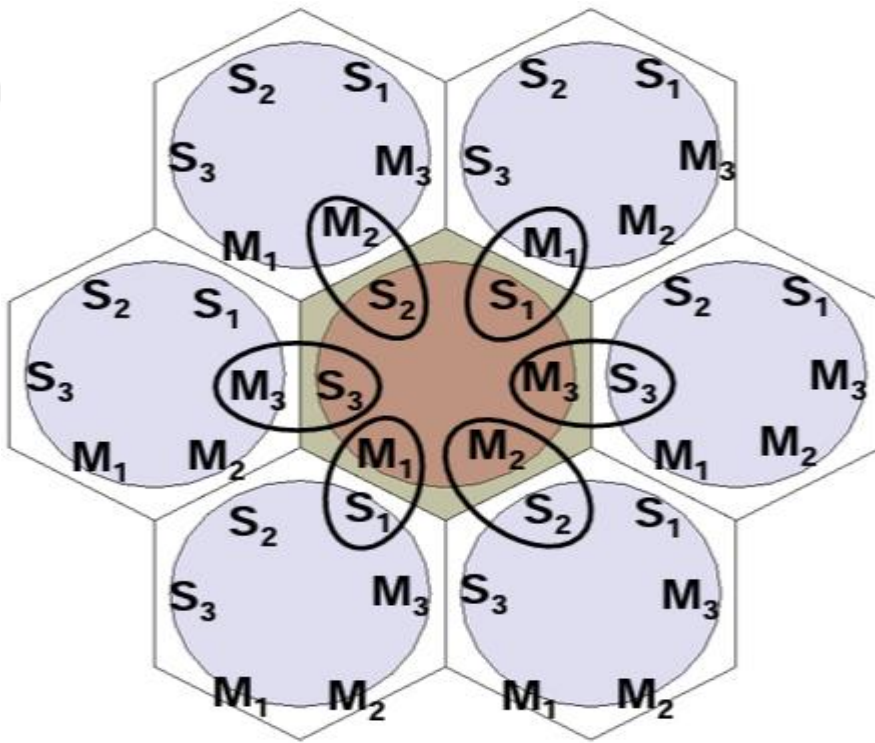
Lineer/Düzlemsel dizilerin antenleri, aynı anten eleman olması ve elemanlar arası mesafenin aynı olmasından dolayı simetrik bir yapıya sahiptirler. Dizinin boyutu arttıkça tasarımın ve çözümün zor olacağından dolayı, dizide ki bu simetriyi kullanan uygun sınır koşulları kullanan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Master/Slave olarak adlandırılan bu sınır koşulları sayesinde, Şekil 4.2(a)'da görülen tasarımı hepsini çözmek yerine, Şekil 4.2(b)'deki birim hücreyi tasarlamak ve çözmek yeterli olmaktadır [3].



Şekil 4.2 : (a) Düzlemsel bir dizi geometrisi, (b) Düzlemsel dizinin master/slave sınır koşullu uygulanmış birim hücresi [3].

Master/Slave sınır koşulları, dizinin tek bir elemanını sanki sonsuz bir dizi ortamındaymış gibi modeller. Bu sayede, dizinin kendi etkisini, eleman etkisini ve dizi elemanları arasında ki kuplaj etkisini dikkate alarak gerçek çözüme yakın bir analiz yaparak, hesaplama alanını tek bir elemana düşürür.

Bir eleman periyodik uzunluk boyunca çoğaltıldığı zaman, master sınırı, bitişik hücrenin slave sınırı ile temas kurmalıdır. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, master/slave karşılıklı olarak birim hücrenin dış duvarlarına tanımlanır. Bu master ve slave çifti, slave yüzeydeki elektrik ve manyetik alanı, bir faz farkı dahilinde master yüzeydeki elektrik ve manyetik alanıyla eşleşir [3].



Şekil 4.3 : 'Master/Slave' çiftinin birim hücre üzerinde tanımlanması [3].

Master/slave sınır koşulları düzlemsel olan tüm periyodik geometrilere tanımlanabilir. Master/slave sınır çiftleri, yalnızca çözüm uzayının dış yüzlerine atanabildiği için, bu yüzler düzlemsel olmalıdır. Düzlemsel anten elemanları üniform dağıldığı için ilerleyici faz verebilmektedir. Düzlemsel diziler ilerleyici faz verebildiğinden, ışıma örüntüsü oluştururken ortalama Eleman faktör X Dizi faktörü durumu kullanılır.

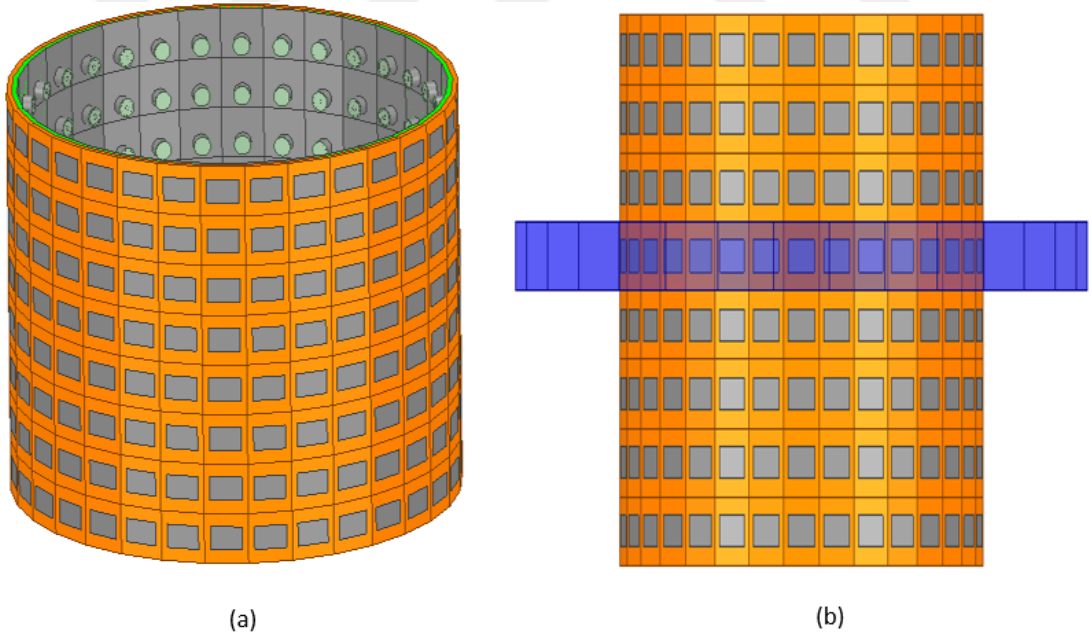
Silindirik/dairesel dizilerde master/slave sınır koşulları sadece yükseliş eksenı boyunca, dizinin yükseliş ekseninde lineer dizi karakteristiği gösterdiği için kullanılır.

Yanca ekseninde kullanılmadığı için, bu eksendeki sınır koşulu olarak faz modları kullanılmıştır.

4.2 Silindirik Dizi Tasarımı Ve Analizi

Silindirik dizi anten tasarımı için, bilgisayar destekli bir teknik kullanılarak, Ansys Yüksek Frekans Yapı Simülatöründe (HFSS) bir birim hücre yaklaşımı simule edilmiş ve matlab ortamında veriler analiz edilerek silindirik dizi tasarımı yapılmıştır. Birim hücre yaklaşımı daha çok büyük düzlemsel dizilerin analizi için benimsense de, faz modu konsepti kullanılarak silindirik dizilerin analizi için de birim hücre yaklaşımı kullanılmaktadır.

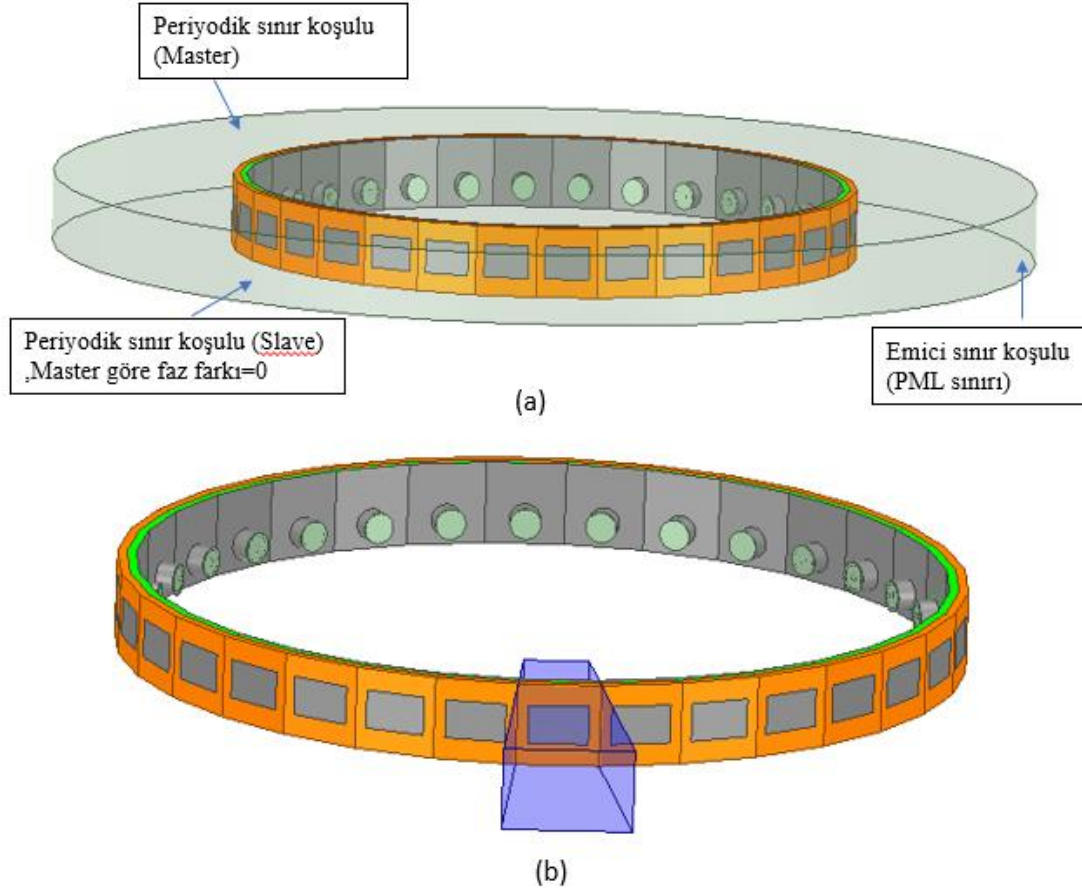
Şekil 4.4(a)'da görüldüğü gibi, yanca ekseninde $N=32$ elemanlı, yükseliş ekseninde 8 elemanlı, toplamda $8 \times 32 = 256$ anten elemanına sahip ve elemanlar arası mesafe $d=0.5\lambda$, $a=Nd/2\pi$ yarıçap olan, X bantta yayın yapan silindirik bir antendir. Bu dizinin bir dairesel dizi kesit alınmış hali Şekil 4.4(b)'de görüldüğü gibidir. Silindirik dizi yükseliş ekseninde 8 tane dairesel dizinin aralarında $d=0.5\lambda$ mesafeyle dizilmesiyle oluşur.



Şekil 4.4 : (a) Silindirik yama dizi, (b) Silindirik diziden dairesel diziye geçmek için alınan kesit.

Yükseliş ekseninde lineer dizi karakteristiği gösterdiği için, Şekil 4.5(a) dairesel bir dizi kesiti alıp yükseliş eksenine master/slave sınır koşulları tanımlanarak analiz

yapılabilir. Şekil 4.5(b)'de görülen, dairesel bir diziden birim hücresi olarak adlandırılan tek bir elemanın kesini alınmıştır. Kesiti alınmış birim hücrenin, yanca eksenini boyunca faz modu konsepti kullanılarak sınır koşulları tanımlanır. Yapılan bu sadeleştirmeye, düzlemsel diziler için kullanılan simülasyon tekniklerine benzer şekilde, silindirik bir diziyi uygun sınırlara sahip bir birim hücreye kadar basitleştirir.



Şekil 4.5 : (a) Dairesel bir dizini geometrisi ve sınır koşulları,(b) Dairesel bir diziden alınan kesitle elde edilen birim hücre sınırı.

Şekil 4.5(b)'deki birim hücrenin, çevresi etrafında soğurucu radyasyon sınırlarına ve üst ve alt sınırları üzerinde master/slave sınırlarına sahiptir. Bu master/slave sınırları arasında istenen yükseklik tarama açısı θ_t 'de yönlü bir ışın oluşturacak şekilde ayarlanır. Birim hücrenin paralel olmayan yan duvarlarına, elemanlar arasında ki açısal mesafe $2\pi/N$ kadar faz farkı olan master/slave sınırları tanımlanır. Burada faz mod uyarımını simule etmek için iki sınır arasına $m\frac{2\pi}{N}$ kadar faz farkı uygulanır. Mod sayısını ifade eden m , $m=0, 1, 2, 3, \dots, N=32$ değerlerine sahip ve dairesel dizi geometrisindeki eleman sayısı kadar faz modu uyarımını simule etmektedir. Bu işlem her yükseliş tarama açısı θ_t için gerçekleştirilir.

Birim hücre simülasyonundan, tüm $m=0, 1, 2, 3, \dots, N=32$ e kadar tüm modları ve farklı yükseliş tarama açısı θ_t için, dizinin birim hücresinin faz mode uyarımı altında, $E_{sim}^m(\theta_t, \phi)$ birim hücre ışıma örüntüsü elde edilir. Dairesel dizideki tüm elemanlar, belirli bir faz modu uyarımı için, aralarında $m\frac{2\pi}{N}$ acısal faz farkı dışında aynı olduğundan döndürülmüş ve faz geçikmesi verilmiş $E_{sim}^m(\theta_t, \phi)$, birim hücreyi simülasyon ortamında fiziksel olarak döndürülerek veya matematiksel olarak matlab ortamında hesaplayarak denklem 4.1 bulur.

$$E^m(\theta_t, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} E_{sim}^m(\theta_t, \phi - n\frac{2\pi}{N}) e^{j\frac{2\pi}{N}nm} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de görülen, m: dairesele dizideki mode sayısı, n: dairesele dizideki eleman sayısı, $E_{sim}^m(\theta_t, \phi - n\frac{2\pi}{N})$: simülasyon ve matlab ortamından elde edilmiş, yükseliş ekseninde farklı tarama ve yanca ekseninde farklı dönüş açılarında olan birim hücre ışıma örüntüleridir, E^m : m’ninci mod için elde edilen faz modu örüntüleridir.

Denklem 4.1 kullanılarak, her mode için faz modu örüntüleri hesaplanmaktadır. Faz modu örüntüleri hesaplandıktan sonra, birim hücre konseptini kullanan lineer dizilerde ki gibi, dizi elemanının toplam gömülü ışıma örüntüsünü bulmak için, faz modu ışıma örüntüleri denklem 4.2’de görüldüğü gibi toplanır.

$$E_{göm}(\theta_t, \phi) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_{sim}^m(\theta_t, \phi - n\frac{2\pi}{N}) e^{j\frac{2\pi}{N}nm} \quad (4.2)$$

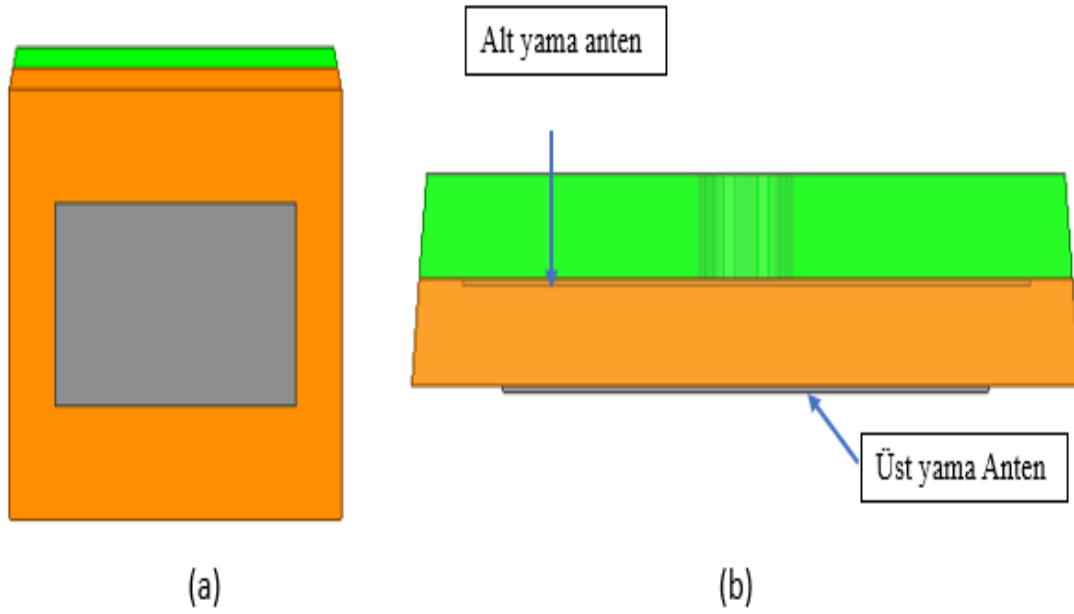
4.2.1 Birim Hücre Modeli Ve Periyodik Sınır Tanımları

Silindirik bir dizi tasarımında antenin yarıçapı, yüksekliği ve elemanlar arasındaki mesafenin belirlenmesi önemlidir. 8-11 GHz frekans bandında X bantta tasarlanan antenin elemanlar arasında ki mesafe üst frekansa göre belirlenmektedir. 11 GHz için, yanca ve yükseliş elemanlar arası mesafe $d=13.62\text{mm}$, yarıçapı $a=69.4\text{mm}$ olarak belirlenmiştir. Dizi anten elemanı olarak, bu frekans bandında yayın yapabilen, dizi anten oluşturmaya yatkın, lineer polarize yayın yapabilen, basit bir geometrisi olan yama anten kullanılmıştır.

Yama antenler genellikle tek rezonansa sahip dar bantlı antenlerdir. Genellikle %5 bant genişliğine sahip yama antenlerin bandını genişletmek için yığın yama konfigürasyonu seçilmiştir. Bu tasarımda, yama antenler için oldukça geniş bir bant

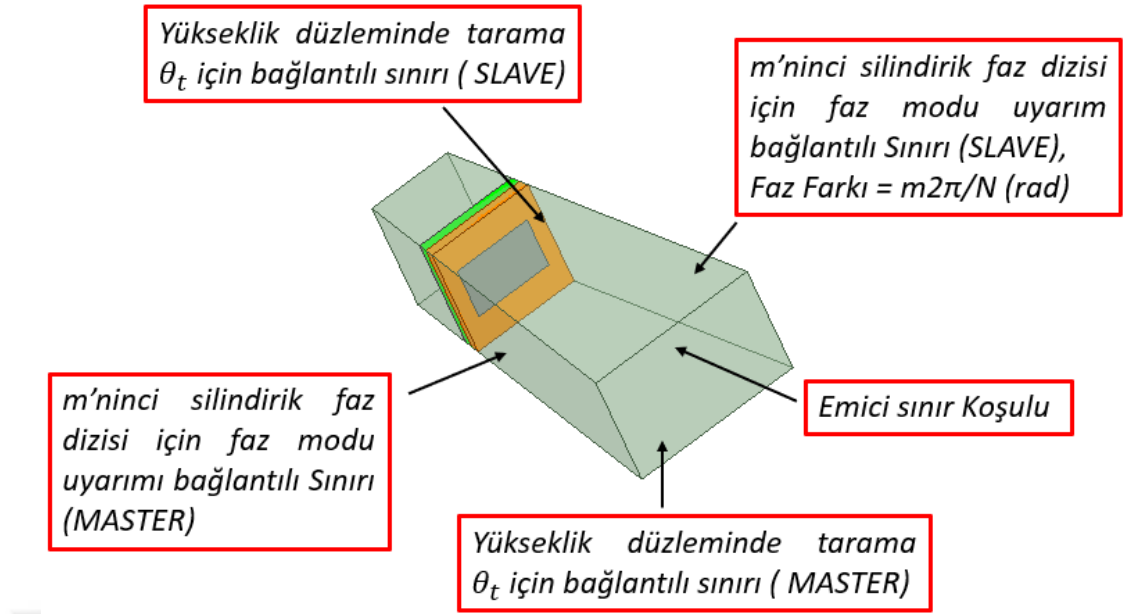
olan, %32 (8-11 GHz) bant genişliğinde $\pm 45^\circ$ taramaya (yükseliş ekseninde 90 derece kapsamaya sahip) kadar geri dönüş kaybı -10 dB'den az olan bir tasarım hedeflenmiştir. Bu zor tasarım problemiyle, konseptin doğruluğunun ve pratikliğinin daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır.

Şekil 4.6'da silindirik dizinin birim hücresi görülmektedir. Yığın yama anten konseptinin kullanıldığı bu tasarımda, birim hücre şekli dairesel dizinin kıvrımlarına uygun modellenmiştir.



Şekil 4.6 : (a) Birim hücre yama anten karşıdan görünüm, (b) Birim hücre yama anten üstten görünüm.

Dairesel dizi kıvrımına uygun modellenmiş birim hücreye tanımlanan sınır koşulları Şekil 4.7'de görülmektedir. Yükseliş ekseninde lineer dizideki tanımlama gibi master/slave sınırları tanımlanmıştır. Yanca ekseninde, m'mode için silindirik faz sıralı uyarımlar içeren faz modu sınırı tanımlanır.



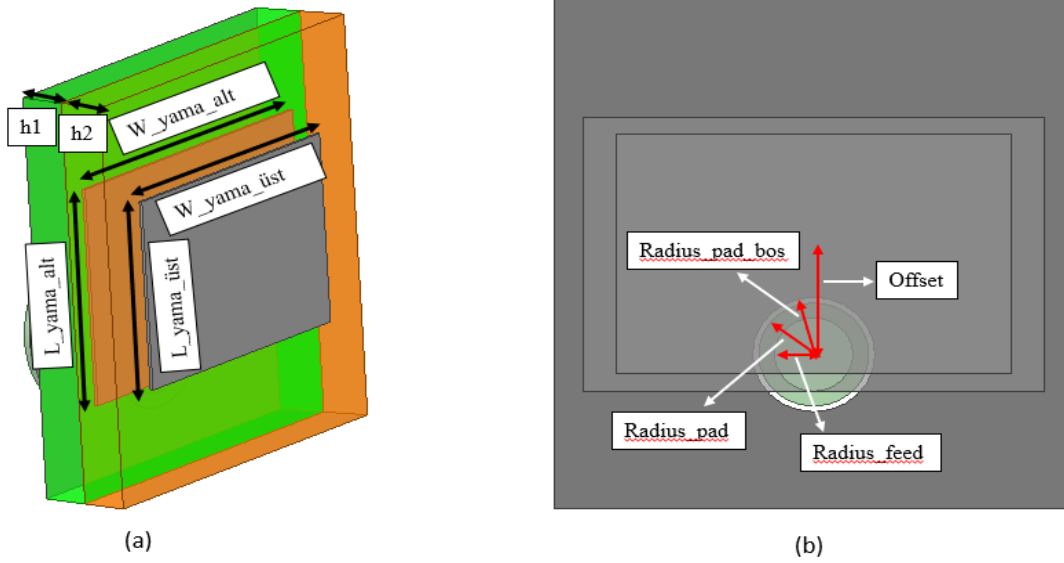
Şekil 4.7 : Birim hücre bağlantı sınır koşulları tanımlama.

4.2.2 Birim Hücre Tasarımı

Birim hücre tasarımı başlangıç olarak, faz modları arasında en geniş frekans bant genişliğine sahip olan mod 0 faz modu koşulları altında optimize edilir. Ayrıca mod 0'ın dizinin çalışma aralığındaki tüm frekanslarda çalışan mod olduğundan, ilk optimizasyon aşamaları bu mod ile gerçekleştirilir. Mod 0 performansı tasarım kriterlerini karşıladığında, tam bir faz-mod analizi gerçekleştirilir.

Mod 0 kullanılarak yapılan optimizasyonla, 8-11 GHz frekans bandında $\pm 45^\circ$ taramaya kadar geri dönüş kaybı -10 dB'den az olan bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Birim hücrenin tasarım isterlerini sağladıktan sonra tüm faz modları için, farklı θ_t tarama açılarında, tam bir simulasyon yapılmıştır. Yanca eksen duvarlarındaki sınırların $m\frac{2\pi}{N}$ faz kaymasına sahip olduğu için m, $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ için olan çözümleriyle dizinin tüm faz modları elde edilmiştir.

Tüm isterleri sağlayan tasarımın, birim hücre anten boyutlarının tanımları Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu boyutların çok iyi optimize olmuş değerleri de çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Birim hücre yama antenin detaylı görünümü, (a) yandan kesiti, (b) üstten kesiti.

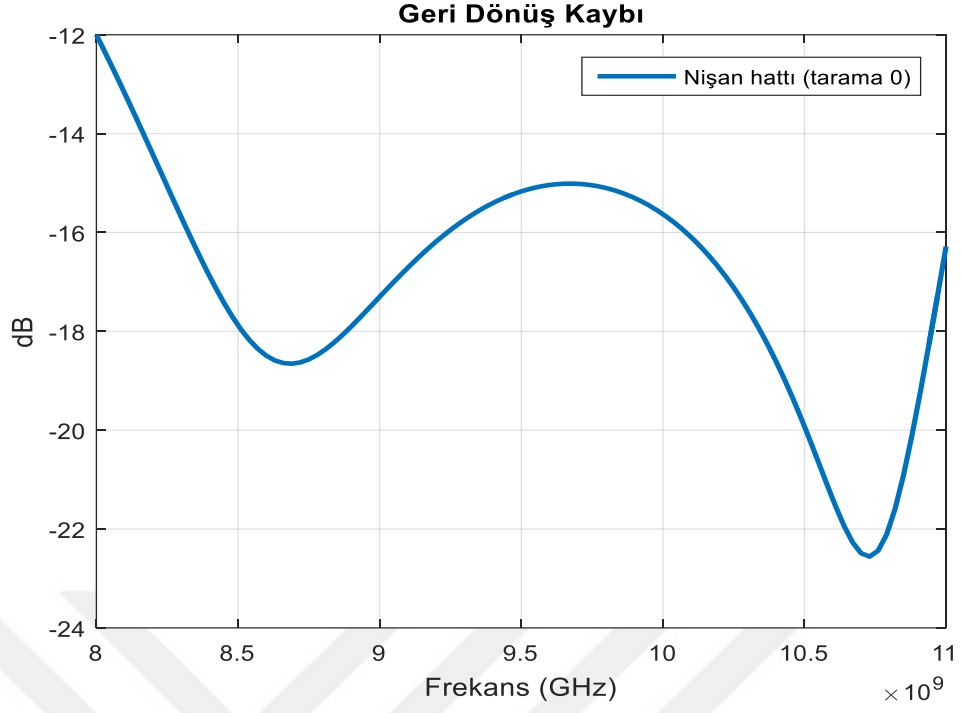
Çizelge 4.1’de görülen degerler mod 0 kullanılarak elde edilmiş degerlerdir.

Çizelge 4.1 : Şekil 4.8 boyut değerleri.

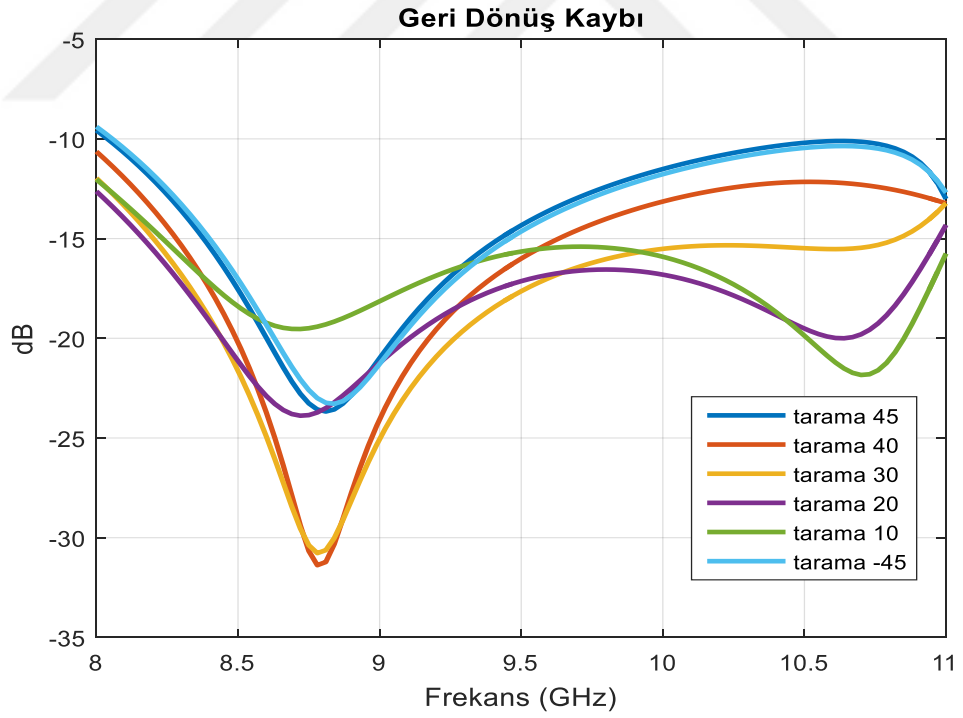
Anten Değişkenleri	Boyutları
h1	1.52mm
h2	1.52mm
W_yama_alt	11.56mm
W_yama_üst	9.89mm
L_yama_alt	7.35mm
L_yama_üst	6.4mm
Radius_feed	0.978mm
Radius_pad	0.4mm
Radius_pad_bos	1.378mm
Offset	1.532mm

Çizelge 4.1’de görülen değerlere göre tasarlanmış antenin nişan hattında (0°), 10° , 20° , 30° , 40° , 45° ve -45° taramada ki geri dönüş kaybı degeri Şekil 4.9’da verilmiştir. Anten simetrik yapıya sahip olduğu için, Şekil 4.9(b)’de görülen $+45^\circ$ tarama ile -45° tarama aynı geri dönüş kaybına sahiptir ve bu durum diğer tarama değerleri içinde geçerlidir.

Birim hücrenin nişan hattında mod 0 durumunda ki farklı frekanslar için, yanca örüntüsü ve yükseliş örüntüsü, sırasıyla, Şekil 4.10(a) ve Şekil 4.10(b)’de görülmektedir. Örüntüler, anten yerleşimi yz düzlemine yapılmıştır ve anten x eksenine bakarken elde edilmiştir.

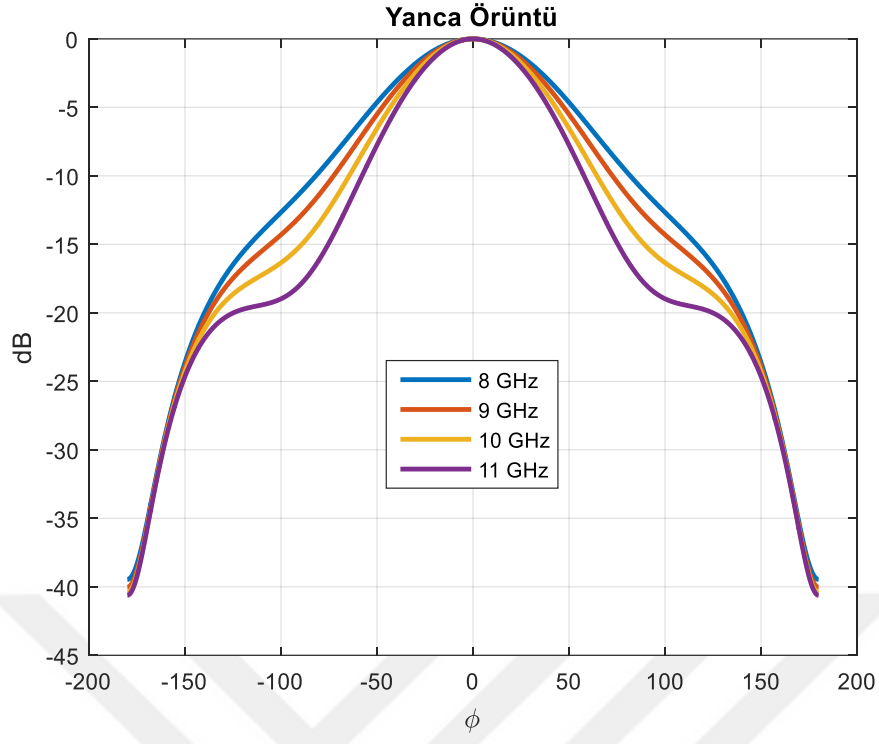


(a)

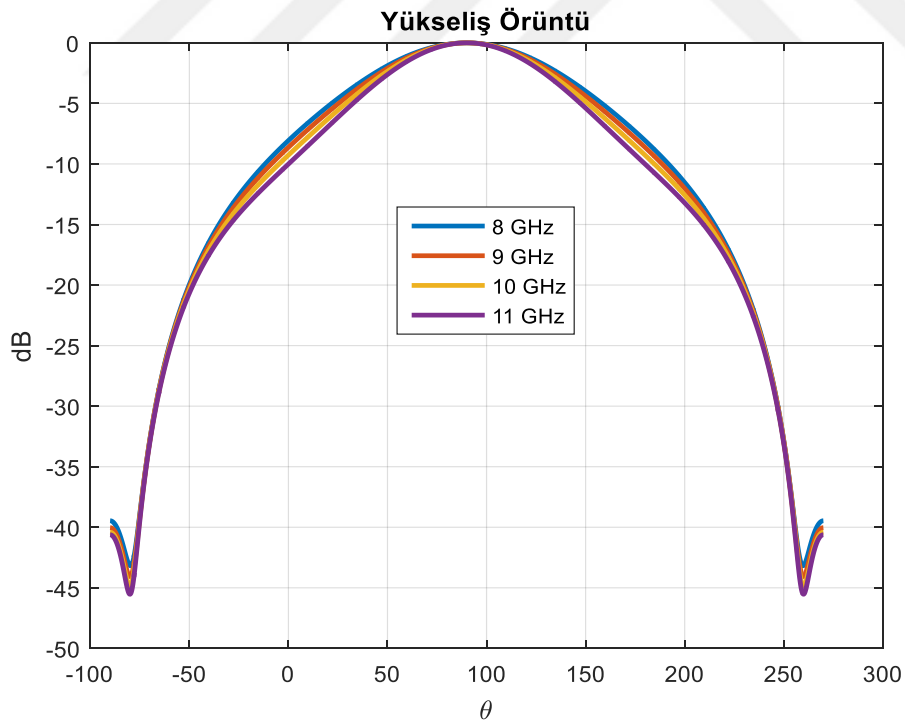


(b)

Şekil 4.9 : Mod 0'da optimize edilmiş birim hücrenin,(a) nişan hattı geri dönüş kaybı,(b) yükseliş ekseninde taramaya göre geri dönüş kaybı.



(a)



(b)

Şekil 4.10 : Mod 0’da, nişan hattında birim hücre örüntüleri, (a) yanca örüntüsü, (b) yükseliş örüntüsü.

Birim hücre simülasyonundan elde edilen şekiller incelendiğinde, tasarım hedefleri olan %32 (8-11 GHz) çalışma bandında, geniş tarama kabiliyeti olan bir dizi antenin birim hücresi tasarlanmıştır. Birim hücre tasarımı tamamlandıktan sonra, faz modu uyarımı kullanılarak gömülü eleman örüntülerini oluşturmak için gerekli olan bilgiler birim hücre simülasyonundan elde edilir.

4.2.3 Gömülü Eleman Örüntü Hesaplanması Ve Sonuçların Değerlendirilmesi

HFSS'de tasarlanan birim hücrenin uzak alan örüntüsünü tüm modlar ve θ_t tarama açısı için elde edildikten sonra, faz modu konseptine dayanan HFSS-MATLAB kodu geliştirilmiştir. Bu kod, birim hücre modelinden elde edilen, her θ_t tarama açısı için, tüm modlara göre ayrı ayrı simüle edilmiş yanca ve yükseliş örüntülerini kullanır. Faz modu konseptini kullanan bu kod, gömülü eleman örüntüsünü hesaplamak için denklem 4.2'yi kullanır. Ayrıca dairesel dizinin istenilen yönde ve sayıda elemanın gömülü eleman örüntüsünü oluşturacak şekilde geliştirilen kod sayesinde, analiz içinde büyük kolaylık sağlanmıştır.

Faz modu konsepti kullanılarak tasarlanan, silindirik dizinin birim hücre yama antenin gömülü eleman örüntüleri, aktif geri dönüş kaybı elde edildikten sonra, yöntemin doğruluğunu kontrol etmek için silindirik dizinin tamamının simülasyon çözümüyle çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Faz modu konsepti kullanılarak birim hücreden elde edilen gömülü eleman örüntüleri Şekil 4.11'de görüldüğü gibidir. Dairesel dizide 1 eleman uyarılarak elde edilen bu örüntüleri, farklı yerlerde ve sayılarda eleman uyararak da elde edilebilir. Bunun için denklem 4.5 kullanılmalıdır.

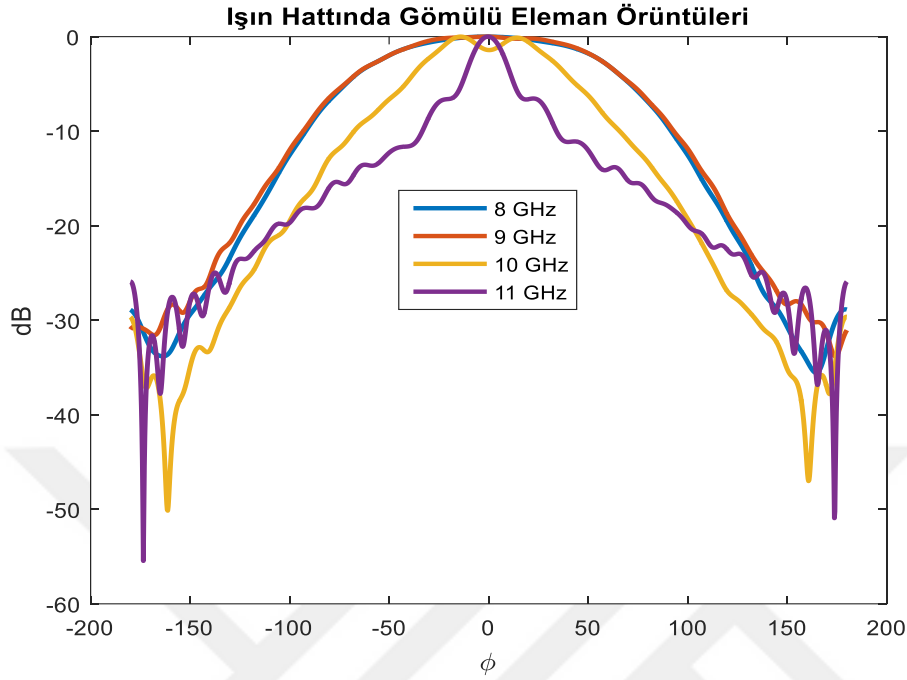
$$A = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} e^{i\frac{2\pi}{N}nm} \quad (4.3)$$

$$Ax = B \Rightarrow x = A^{-1}B \quad (4.4)$$

$$E_{göm}^n(\theta_t, \phi) = xE^m(\theta_t, \phi) \quad (4.5)$$

Denklem 4.3-5'te, A: mod katsayılar matrisi (NxN), B: aktifleştirmek istediğin eleman sayısını içeren vektör (Nx1 olan vektörün aktifleştirmek istenilen elemanlar 1 diğerleri 0 olarak tanımlanır.), x: ilgili elemanı uyarmak için elde edilen vektör (Nx1),

$E_{göm}^n(\theta_t, \phi)$: istenilen sayıda ve konumda oluşturulmuş gömülü eleman örüntüleri,
 $E^m(\theta_t, \phi)$: faz modu örüntüleri.

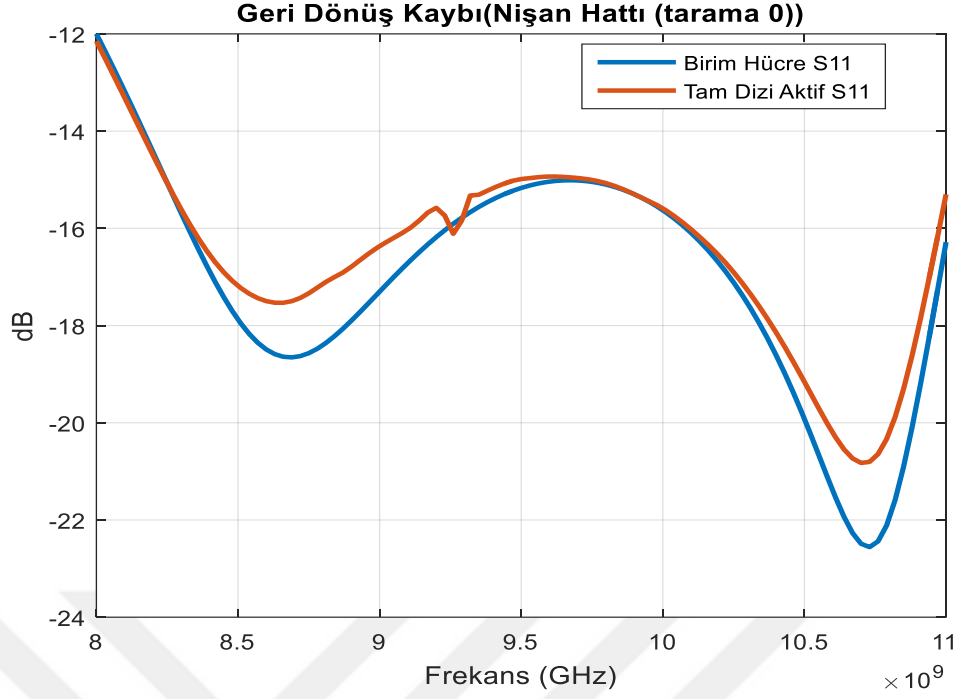


Şekil 4.11 : Faz modu konsepti kullanılarak farklı frekanslar için elde edilen gömülü eleman örüntüleri.

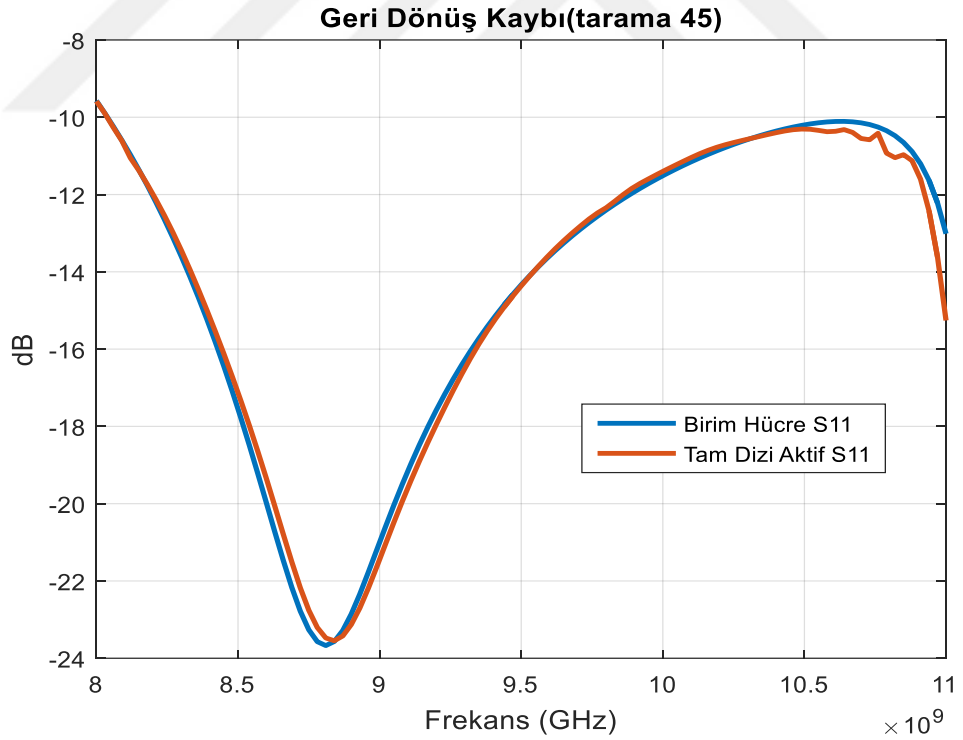
Sonuçların Karşılaştırılması:

Faz modu konseptini kullanarak tasarlanan birim hücre anten ile tam dizi simülasyonun geri dönüş kaybı sonuçlarını Şekil 4.12’de görülmektedir. Nişan hattında ve 45° tarama için yapılan karşılaştırmada, tam dizi simülasyonu ile birim hücre simülasyon tekniği sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir. Bu uyum diğer tarama içinde geçerli olduğu gözlemlenmiştir.

İki çözüm aynı donanıma sahip bilgisayarlarda ve aynı koşullar altında gerçekleşmiştir. Birim hücre anteninin bir tarama açısı için gerçekleşen simülasyon süresi yaklaşık 2 dakika 35 saniye iken, tam dizi simülasyon süresi bir tarama açısı için yaklaşık 81 dakika olmuştur. Bu süreler tasarımın ne kadar kısaldığı konusunda bilgi vermesi açısından önemlidir. Süreye ek olarak donanım kaynaklı kullanımlarda da önemli farklar oluşmuştur. Birim hücre modelinin tek bir açının simülasyonu için ortalama 3 GB RAM kullanırken, tam dizi modelinin tek bir açının simülasyonu için ortalama 35 GB RAM kullanmaktadır.



(a)

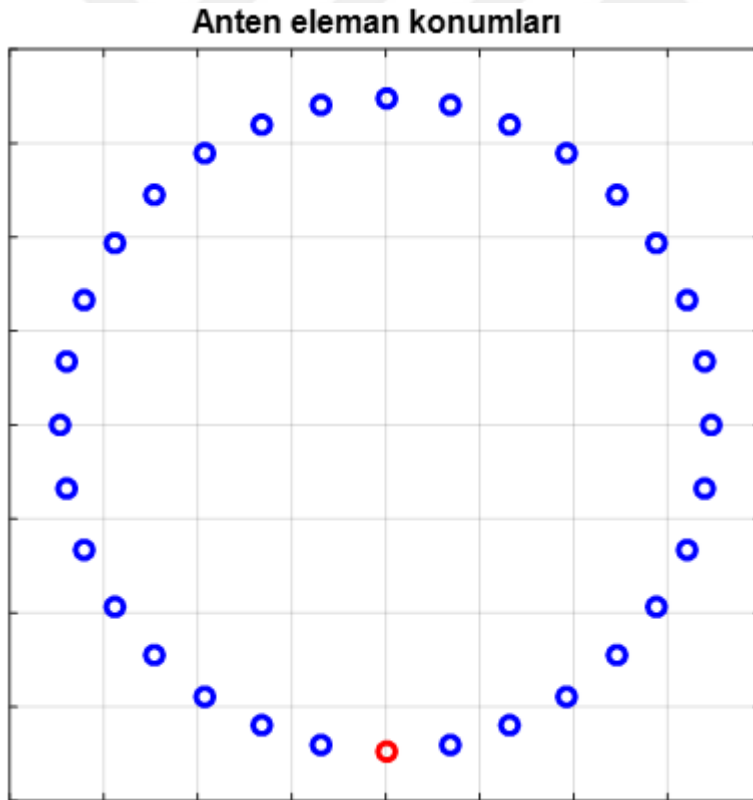


(b)

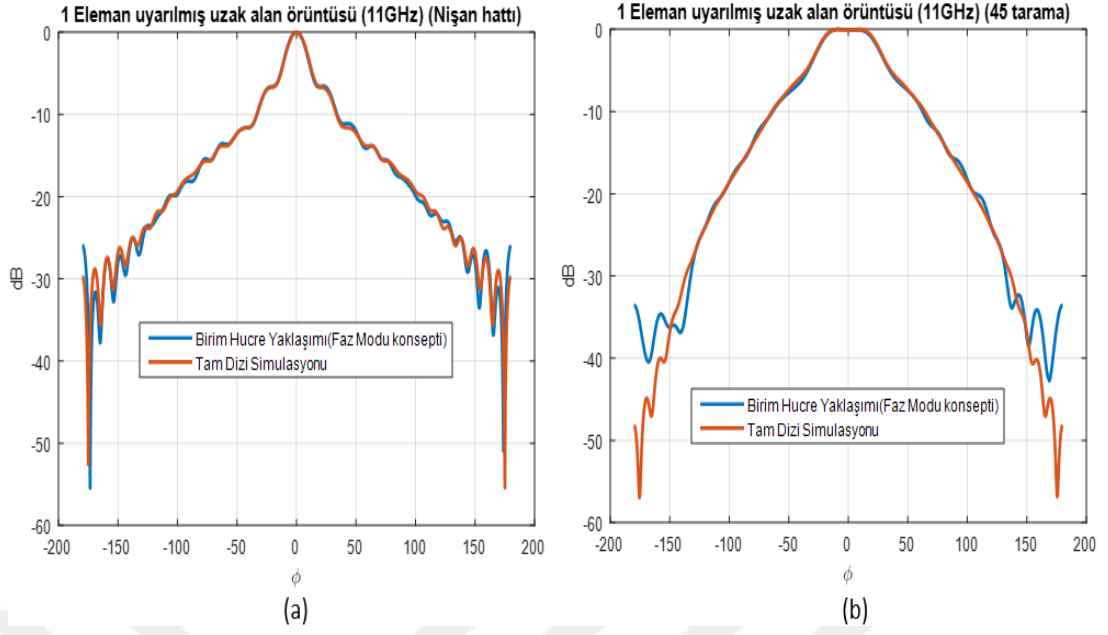
Şekil 4.12 : Tam dizi simülasyonu ile birim hücre simülasyonunu geri dönüş kaybı karşılaştırılması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.

Geri dönüş kaybı sonuçlarına göre, faz modu konsepti kullanılarak yapılan birim hücre anten tasarımı, tam dizi anten tasarımıyla büyük bir tutarlılık göstermiştir. Böylece, tam dizi anten tasarımı yapmak yerine birim hücre tasarımının yapılabileceği görülmüştür. Geri dönüş kaybına ek olarak, yöntemin doğruluğunu eleman ışıma örüntülerinde de doğrulamak gerekmektedir.

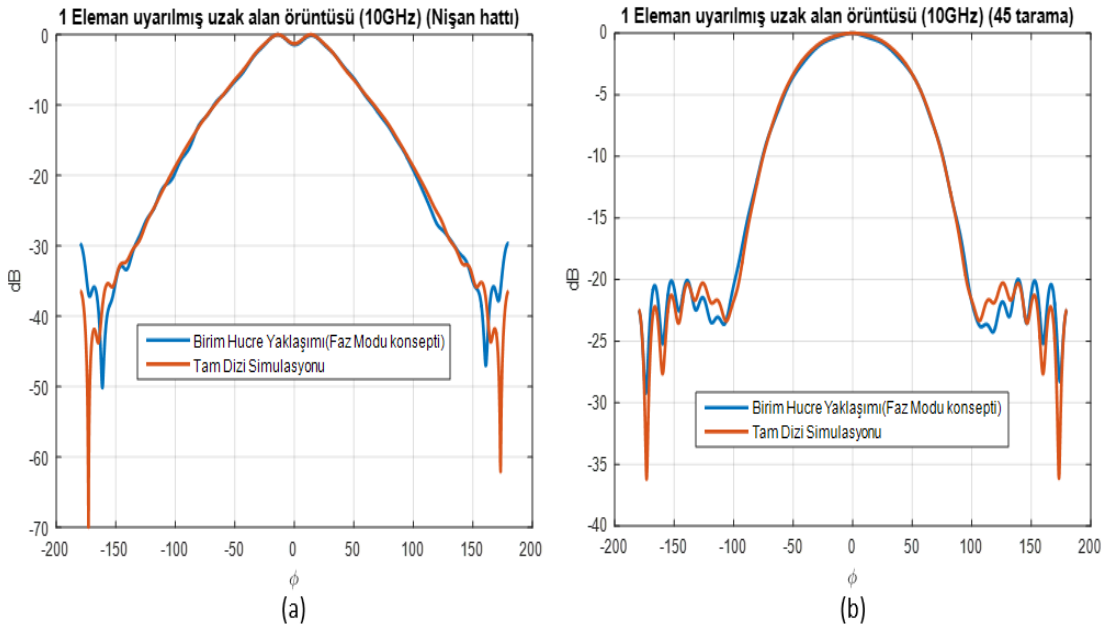
Birim hücre ve tam dizi modelleme ile elde edilen silindirik bir aşamalı dizide yama anteninin 1 eleman uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüleri farklı frekanslar için sırasıyla, Şekil 4.13-4.17’de görülmektedir. Şekil 4.13 uyarılan anten elemanının konumunu göstermektedir. Şekil 4.14’de, birim hücre ve tam dizi modelleme ile elde edilen 1 eleman uyarılmasıyla oluşan gömülü eleman örüntülerinin nişan hattında (0° tarama) ve yükseliş ekseninde 45° tarama durumlarında oluşan sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlara göre, faz modu konsepti kullanılarak yapılan birim hücre anten tasarımı, tam dizi anten tasarımıyla büyük bir tutarlılık göstermiştir.



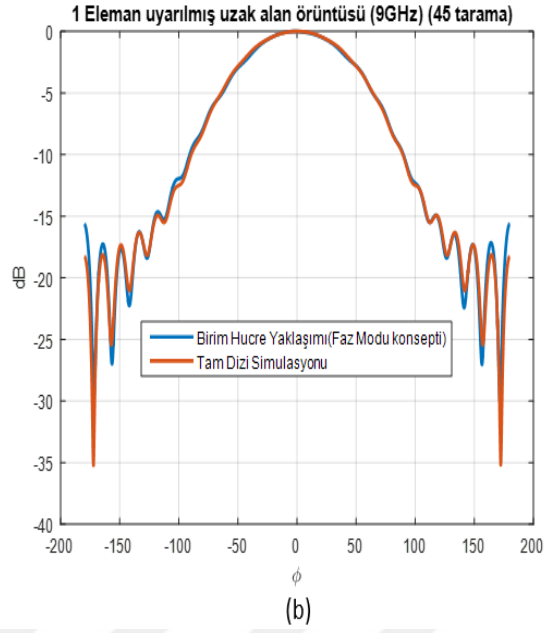
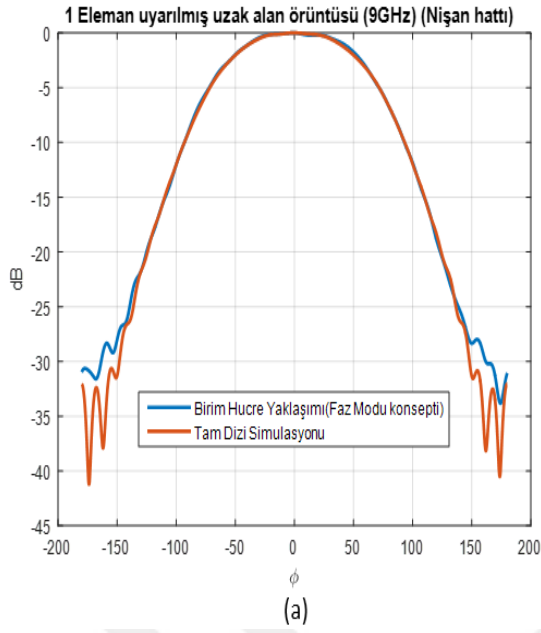
Şekil 4.13 : 11 GHz frekansında, dairesel dizinin eleman konumları ve uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı),



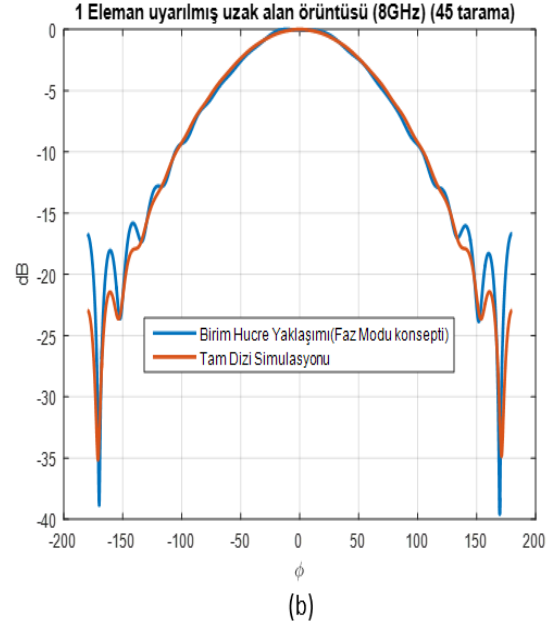
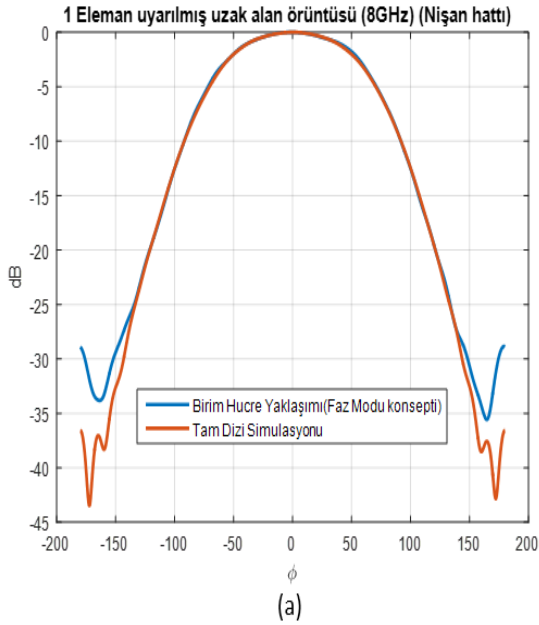
Şekil 4.14 : Silindirik yama dizi anteninin 11 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanının uyarılmasıyla oluşan gömülü ışınma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.



Şekil 4.15 : Silindirik yama dizi anteninin 10 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanının uyarılmasıyla oluşan gömülü ışınma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.



Şekil 4.16 : Silindirik yama dizi antenin 9 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanının uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama.



Şekil 4.17 : Silindirik yama dizi antenin 8 GHz frekansında, Şekil 4.13'te belirtilen elemanının uyarılmasıyla oluşan gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) nişan hattı, (b) yükseliş 45° tarama

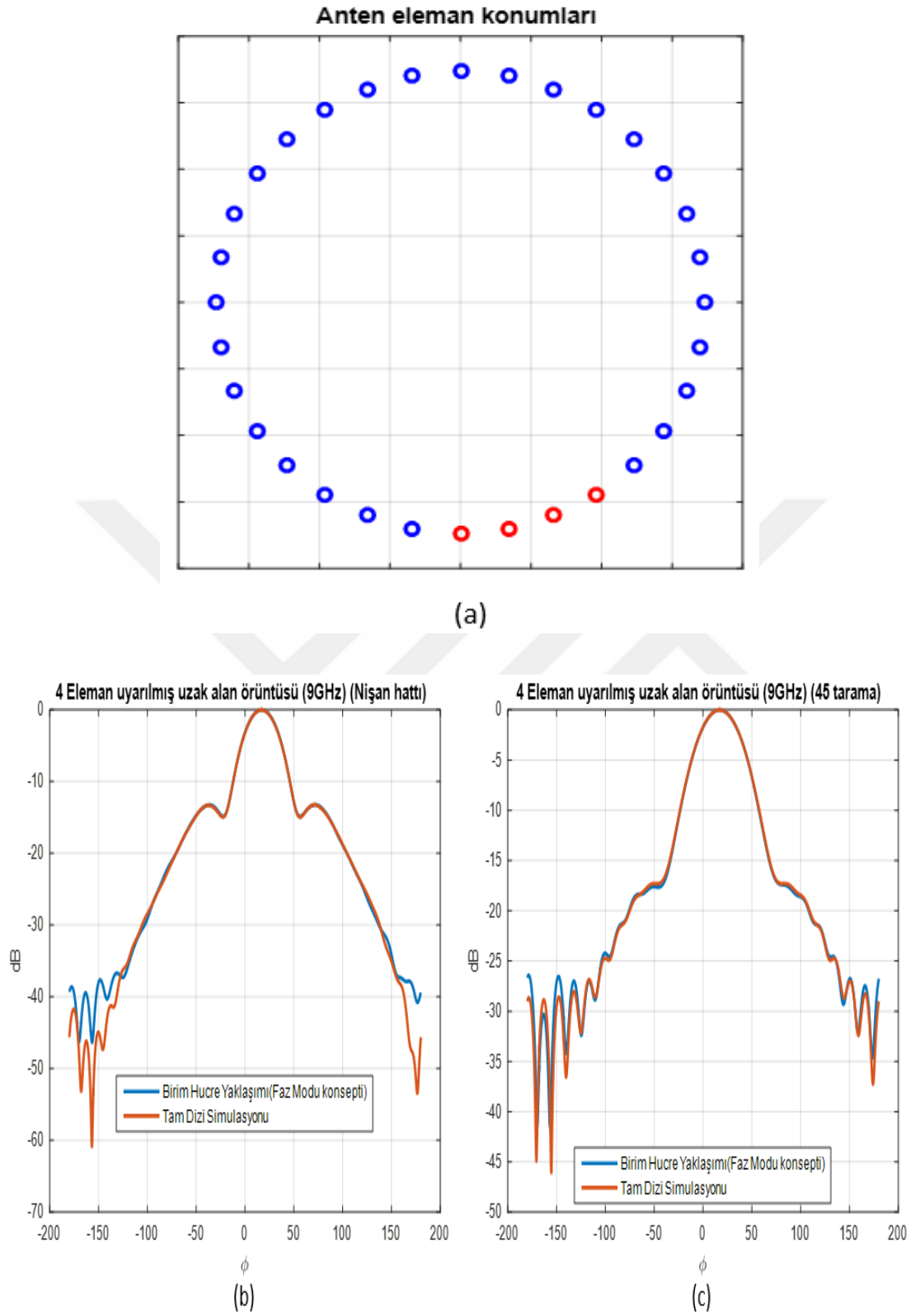
Farklı sayıda ve yöndeki elemanların uyarılmasıyla oluşabilecek ışıma örüntülerini de incelenmiştir. Silindirik dizinin yanca ekseninde ki elemanları nişan hattında ve yükseliş ekseninde 45° tarama için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Dairesel diziler yanca eksende aktifleştirilmiş eleman yerine ve sayısına göre, hüzmeyi yanca eksende yönlendirme ve değiştirme özelliğine sahiptir. Bu nedenle daireseel diziler yanca eksende 360° sahiptirler.

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, dizinin 4 anten elemanının uyarılmasıyla elde edilen örüntüler karşılaştırılmış ve burada da sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Dizinin merkez elemanından bir yöne doğru 4 eleman uyarıldığı zaman, yanca eksende ki hüzmeye 16.75° yönlendiğı görülmektedir.

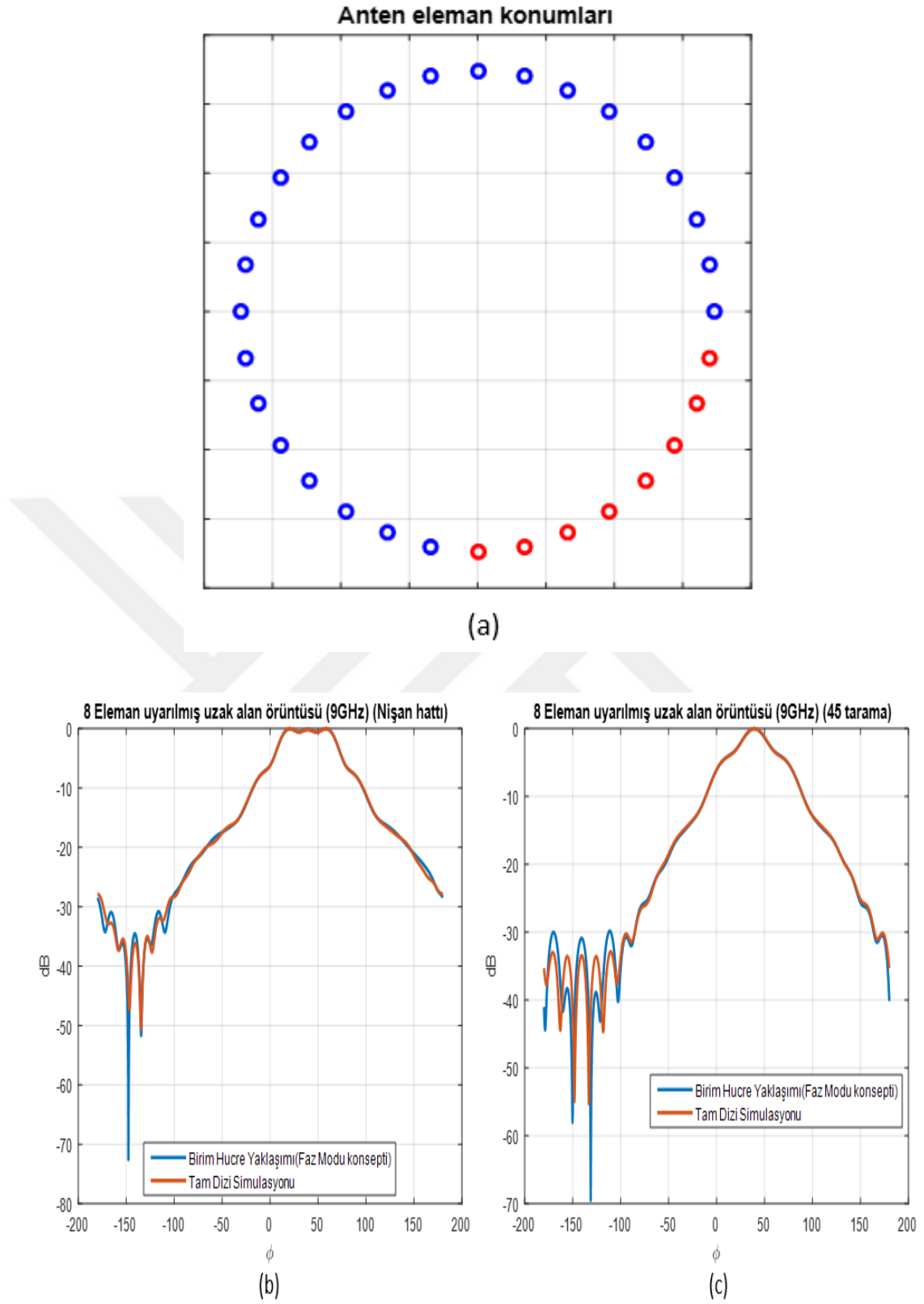
Dizinin 8 anten elemanının uyarılmasıyla elde edilen örüntüler karşılaştırılmış ve burada da sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu Şekil 4.19’da görülmektedir. Dizinin merkez elemanında bir yöne doğru 8 eleman uyarıldığı zaman, yanca eksende ki hüzmeye 39.5° yönlendiğı görülmektedir.

Dizinin 16 anten elemanının uyarılmasıyla elde edilen örüntüler karşılaştırılmış ve burada da sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu Şekil 4.20’de görülmektedir. Dizinin merkez elemanında bir yöne doğru 16 eleman uyarıldığı zaman, yanca eksende ki hüzmeye 84.5° yönlendiğı görülmektedir. Ayrıca uyarılan eleman sayısının artması, hüzmanın genişlemesine sebep olduğu görülmektedir.

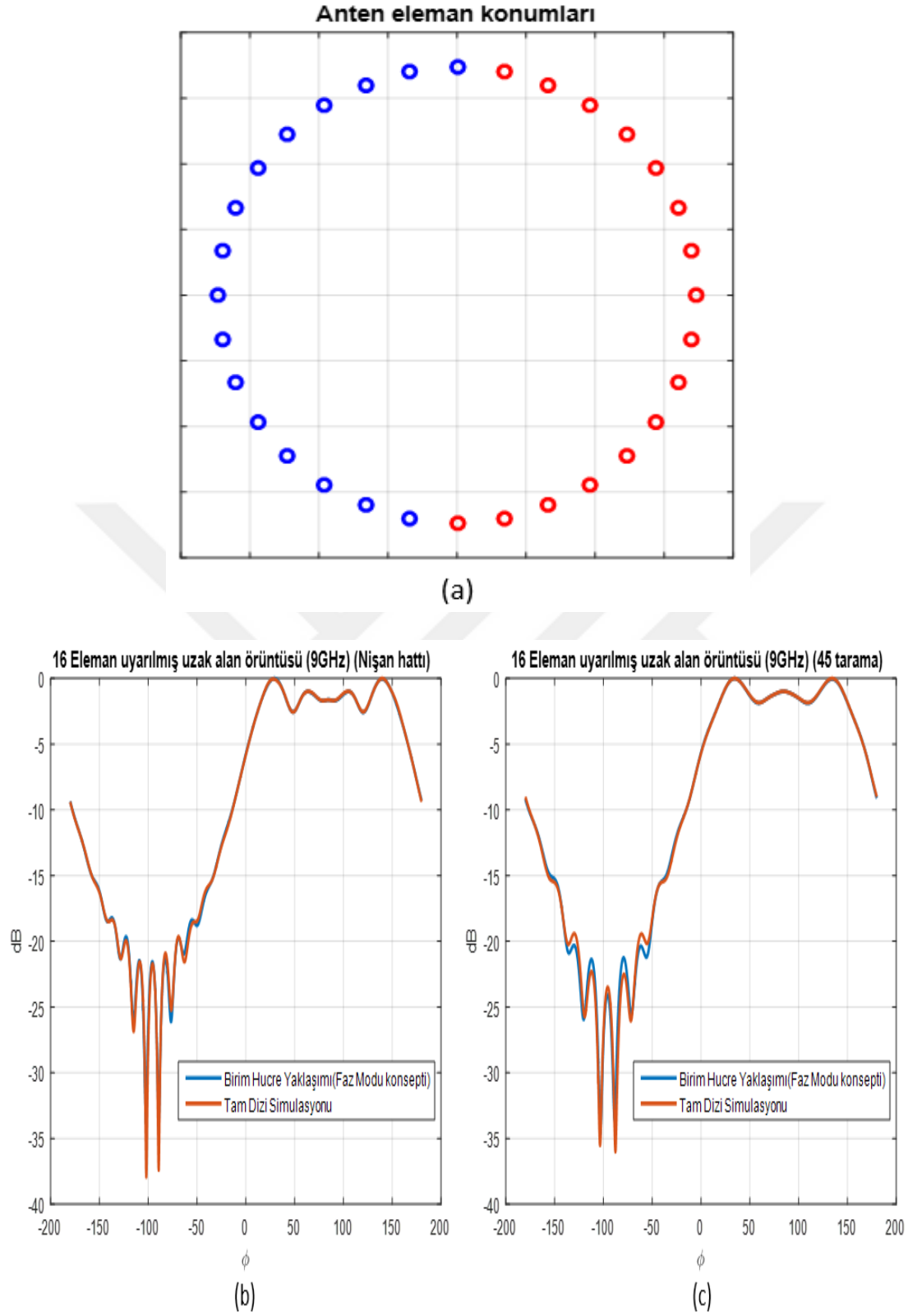
Bu sonuçlar, önerilen yöntemin hızlı bir tasarım yapmanın yanı sıra dizinin karakteristigi hakkında hızlı bir analiz gerçekleştirme kabiliyetinin olduğunu göstermiştir. Şekillerde de görüldüğü gibi, uyarılan eleman sayısına göre hüzmanın şekli ve yönlenmesi hakkında tasarımcıya yüksek doğrulukta bilgi sağlamaktadır.



Şekil 4.18 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) 4 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) 4 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.



Şekil 4.19 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) 8 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) 8 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.



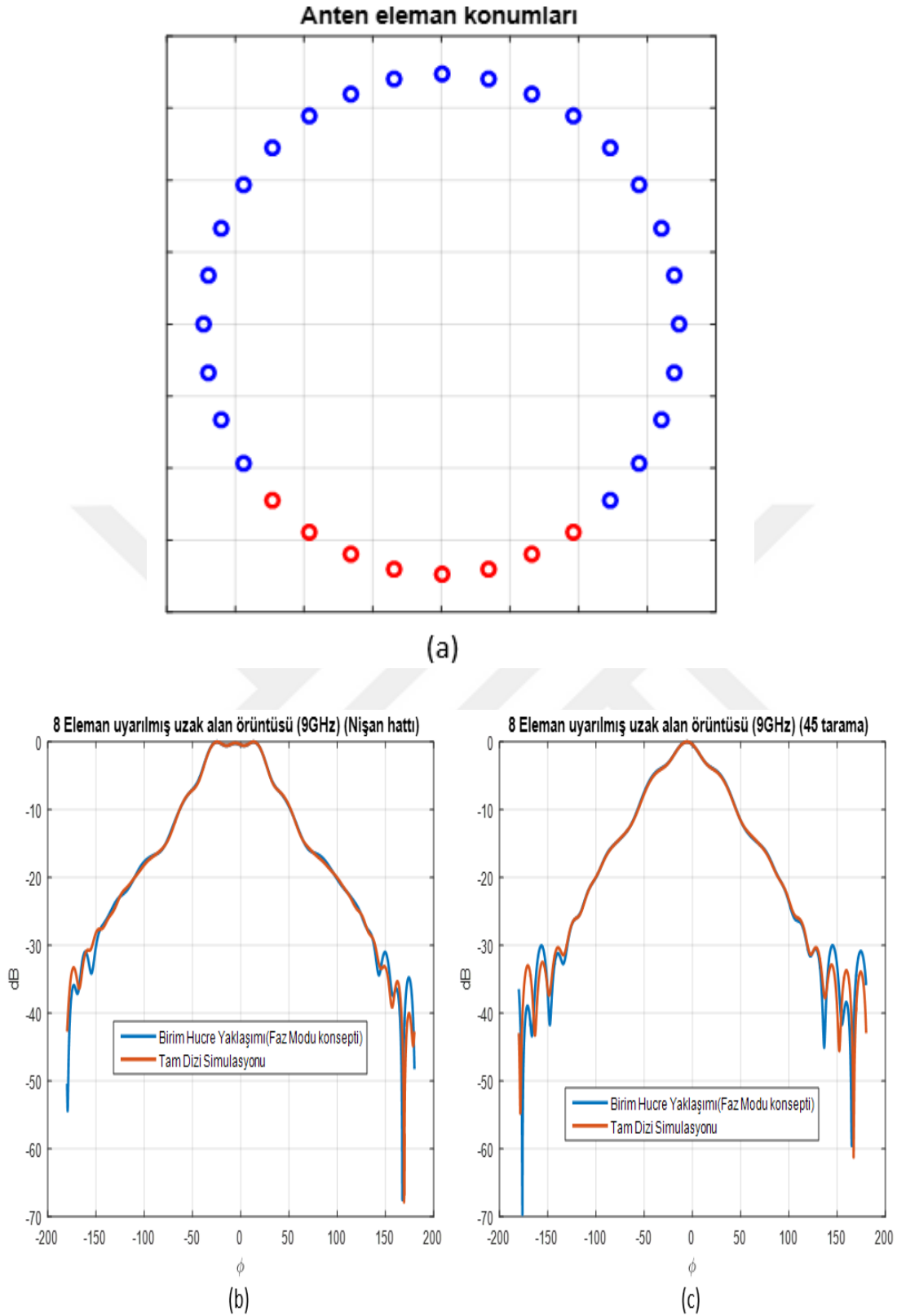
Şekil 4.20 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) 16 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) 16 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.

Bu sonuçlara ek olarak, hüzmeyi yanca ekseninde yönlendirme yapmadan da hüzmanın şeklini değiştirebilirsiniz. Bazı durumlarda nişan hattında geniş bir hüзма istenebilir. Bu şekilde bir hüзма oluşturulma sonuçları da analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

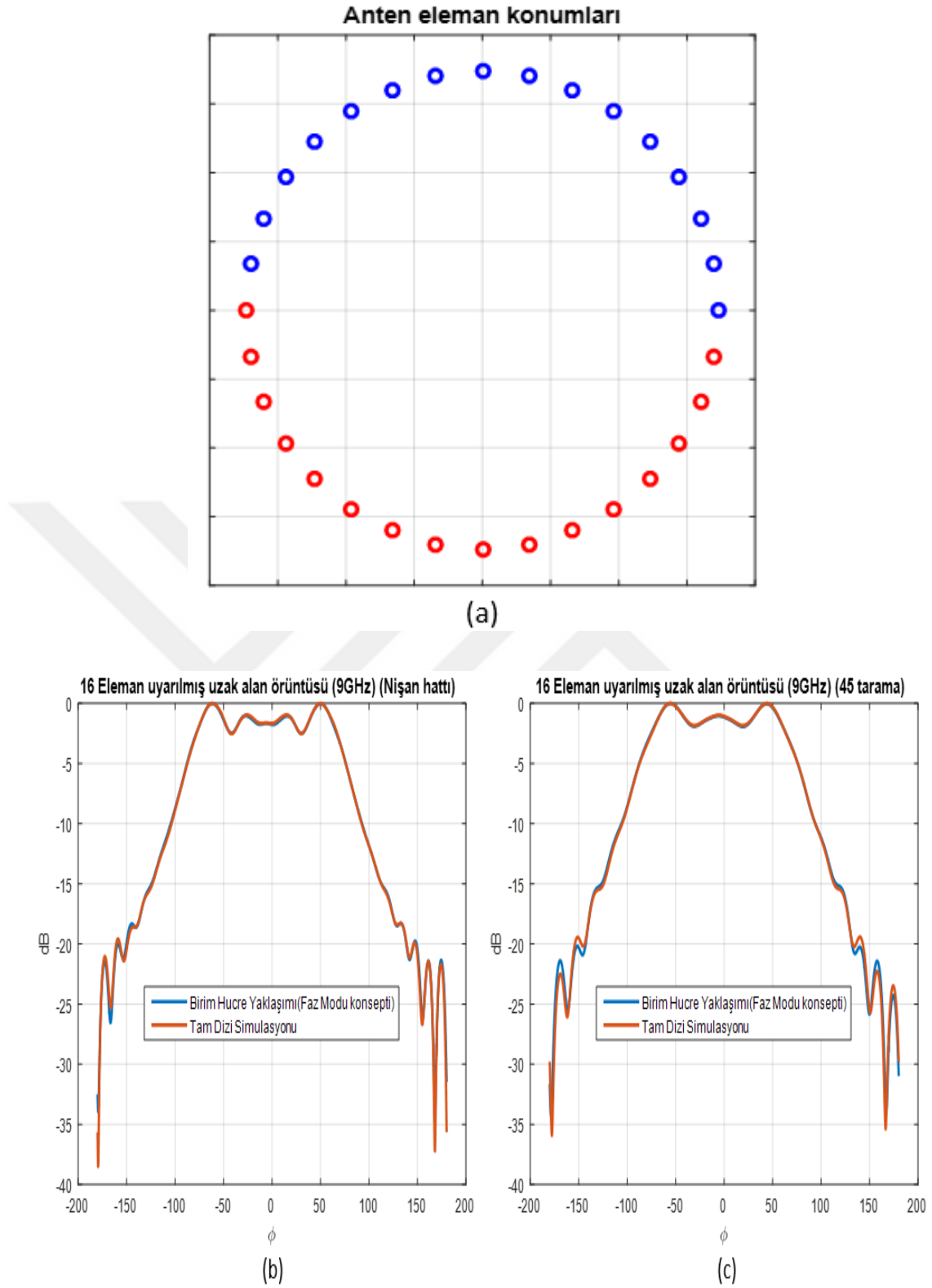
Şekil 4.21’de görüldüğü gibi, dizinin merkez elemana göre simetrik olan 8 anten elemanın uyarılmasıyla elde edilen örüntüler karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Dizin merkez elemana simetrik olan 8 eleman uyarıldığı zaman, yanca ekseninde ki hüzmanın yönlenmesi değişmezken, hüzmanın genişliğinin değiştiği gözlenmiştir.

Dizin merkez elemana göre simetrik olarak 16 ve 24 anten elemanın uyarılmasıyla elde edilen örüntülerin karşılaştırması Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de görülmektedir. Merkeze göre uyarılan eleman sayısı arttıkça hüzmanın genişlediği görülmektedir. Dairesel diziler için tüm elemanlarının (N=32) uyarılmasıyla çok yönlü bir örüntü elde edileceği bilinmektedir. Analiz sonucu bulduğumuz sonuçlarda, uyarılan eleman sayısı arttıkça hüzmanın genişlediğini göstermiş ve beklentiye uygun gerçekleşmiştir.

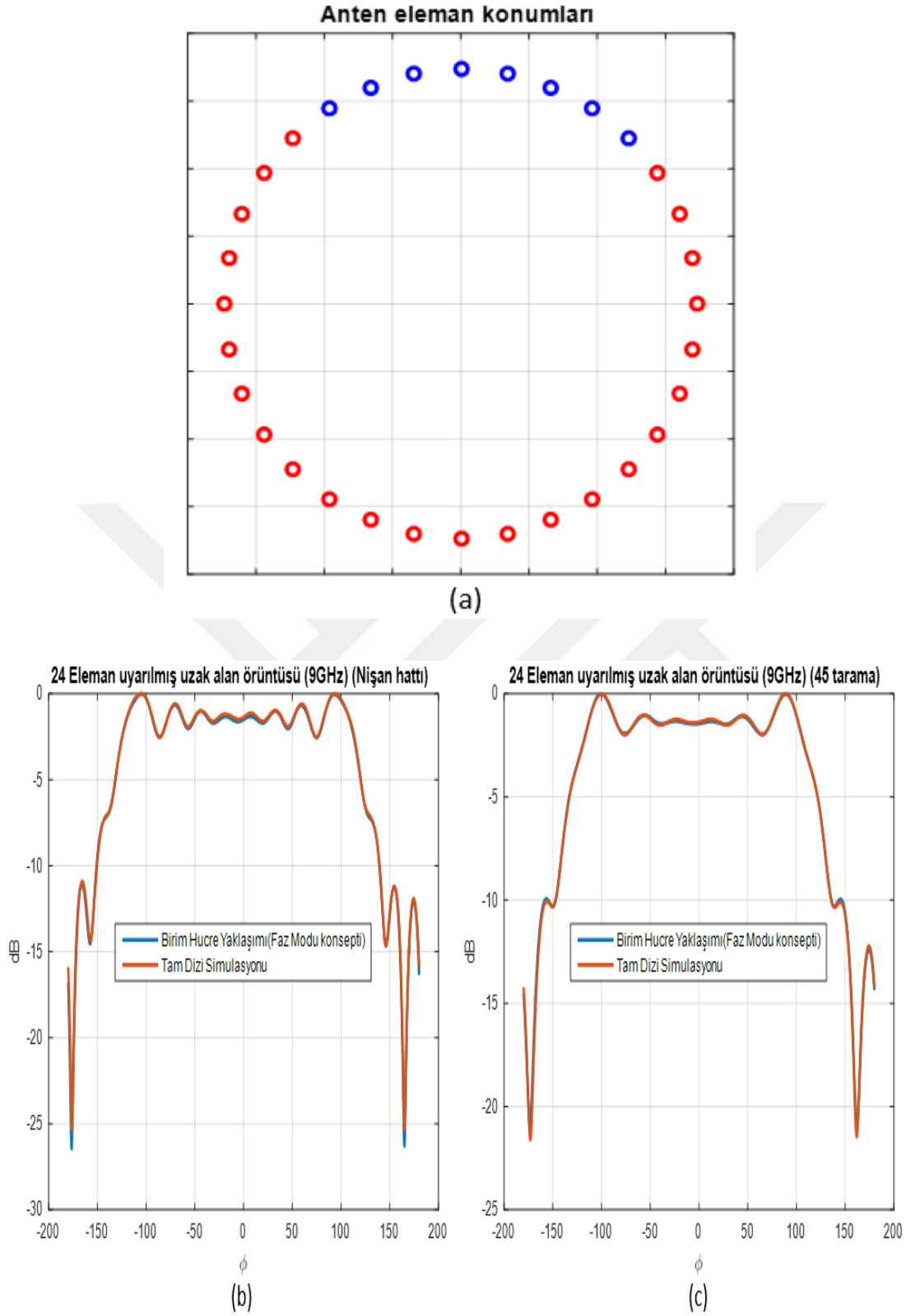
Uyarılan eleman sayısı ve konumuna göre gerçekleşen örüntü senteziyle tasarımcıya tüm diziyi simüle etmeden oluşturmak istediği örüntü şeklini ve yönünü analiz etme imkanı vermiştir. Bu yöntem sayesinde, örüntü analizlerini yapmak için gereken süre oldukça kısalmış ve pratikleşmiştir. Oldukça esnek olan bu yöntemle herhangi bir konfigürasyona sahip aktif elemanların örüntüsünün analizi hızlıca yapılmaktadır. Değişik konfigürasyonlarda yapılmış karşılaştırmalar da bu analizlerin doğru bir şekilde yapıldığını göstermiştir. Tasarımcıya, gerçekleştirdiği tasarım hakkında da önemli bilgiler veren bu yöntemle, tasarımın başında gerçeklemeye çalıştığı tasarım amaçları hakkında bilgi verip tasarımı şekillendirmede yardımcı olmaktadır ve bunu oldukça hızlı yaptığı için zaman kaybının önüne geçmiş olmaktadır.



Şekil 4.21 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi antenin gömülü ışına örüntüsü karşılaştırması, (a) simetrik uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) simetrik 8 eleman uyarılmış nişan hattı için ışına örüntüsü, (c) simetrik 8 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışına örüntüsü.



Şekil 4.22 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) simetrik uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) simetrik 16 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) simetrik 16 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.



Şekil 4.23 : 9 GHz frekansında, silindirik yama dizi anteninin gömülü ışıma örüntüsü karşılaştırması, (a) simetrik uyarılmış olan eleman sayısı ve konumu (kırmızı), (b) simetrik 24 eleman uyarılmış nişan hattı için ışıma örüntüsü, (c) simetrik 24 eleman uyarılmış yükseliş 45° tarama için ışıma örüntüsü.

Bu sonuçlar ışığında, faz modu konseptine dayanana birim hücre tasarımı, dizinin tüm elemanlarıyla oluşan model tasarımının yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Sonuçlar arasında büyük bir uyum görülmüş ve konsept doğrulanmıştır.

Silindirik bir dizinin elemanlarının gömülü özelliklerini ve aktif geri dönüş kaybını elde etmek için sunulan bilgisayar destekli numerik yöntemin, lineer/düzlemsel dizilerin tasarımına benzer bir tasarım yöntemiyle yapılabileceği gösterilmiştir. Teknik, herhangi bir eleman uyarılmasıyla elde edilen geometrilerin silindirik dizilerini analiz etmek için kullanılabilir.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, radar sistemlerinde son yıllarda kullanımı artan dizi antenlerin bir çeşidi olan silindirik dizinin hızlı tasarımı ve analizi için, lineer/düzlemsel dizilerin tasarımında kullanılan birim hücre yöntemine benzer bir sayısal yöntem geliştirilmiştir. Faz modu konseptine dayanan bu yöntemle, lineer/düzlemsel dizi tasarımında olduğu gibi hesaplama alanını tek bir elemana indirgemıştır.

Silindirik dizilerin ya da en genel haliyle konformal dizilerin sisteme kazandırdığı önemli bir çok özelliğe rağmen çok kullanılmamasını sebebi antenin tasarımsal zorluğudur. Lineer/Düzlemsel diziler, tasarımı için geliştirilen bazı yaklaşımlara dayanan bir simulasyon tekniği mevcut olduğu için, silindirik dizilere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma, silindirik bir dizinin tasarım zorluklarını azaltmak için geliştirilen sayısal yöntemi detaylı olarak ele almaktadır.

Konformal dizilerin uydu iletişimi ve askeri hava gözetleme radarları gibi askeri ve sivil uygulamalarda geniş bir kullanım alanı vardır. Modern uçaklar, savaş gemileri gibi platformların, navigasyon, çeşitli iletişim sistemleri, radar sistemleri vb. için platformun geometrik yapısına uyumlu konformal dizilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Silindirik dizilerin tasarımını kolaylaştırmak için, faz modu teorisine dayanan numerik yöntem HFSS ve Matlab ortamında geliştirilmiştir. Yöntemin uygulanması detaylı olarak anlatılmış ve örnek bir tasarımda uygulanmıştır. Bu yöntemle, silindirik dizi tasarım süresi oldukça kısalmış ve pratikleşmiştir. Ayrıca silindirik dizinin örüntü analizinde daha kolay ve hızlı bir şekilde yapılmıştır. Aynı donanıma sahip bilgisayarda yapılan, faz modu konsepti kullanılarak modellenmiş silindirik dizinin birim hücre yama dizi anteninin 1 itersayonu için gereken simulasyon süresi ortalama 2 dakika 35 saniye iken, tam dizi modeli kullanılarak yapılan yama dizi anteninin 1 iterasyonu için gerekli olan simulasyon süresi ortalama 81 dakikadır. Bu süreler dikkate alındığında tasarım süresi yaklaşık 1/40 oranında kısalmıştır. Bu süreler anten tasarımına etki eden, 1 anten parametresi için 1 iterasyon yapıldığında oluşan sürelerdir. Anten tasarımlarında tasarımı etkileyen parametreler tasarımdan tasarıma değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada tasarlanan yama anten için tasarımı etkileyen 10 anten parametresi vardır. Anten parametrelerini kullanarak %32 bant genişliğine sahip bir yama anten tasarlamak için çok sayıda iterasyon yapıp uygun çözümün bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada, faz modu konsepti kullanılarak tasarlanan %32 bant

genişliğine sahip birim hücre yama dizi anten tasarımı yaklaşık 11 gün sürmüştür. HFSS ortamında yapılan anten tasarımının 1 iterasyonu için gerekli simülasyon süreleri dikkate alındığında, tam dizi modeli kullanılarak yapılacak yama dizi anten tasarım süresi birim hücreye kıyasla oldukça zaman alacağı açıktır. Birim hücre yaklaşımının diğer bir avantajı, simülasyonun yapılması için kullanılan bilgisayar donanımıdır. Aynı donanıma sahip bilgisayarda yapılan simülasyonlarda, birim hücre yama dizi anten modeli kullanılarak yapılan simülasyon yaklaşık 3 GB RAM kullanırken, tam dizi yama anten modeli kullanılarak yapılan simülasyon yaklaşık 35 GB RAM kullanmaktadır. Ayrıca geliştirilen bu yöntemle birim hücreden elde edilen örüntü analizleriyle, tam dizi modeline gerek kalmadan hızlı bir şekilde örüntü analizi yapılmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen yöntemle, yama anten elemanı kullanılarak 8-11 GHz frekans bandını kapsayan geniş bant silindirik bir dizi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Birim hücre yama antenin simülasyon çözümünün faz modu kullanarak elde edilen gömülü eleman örüntüsü ve geri dönüş kaybı, silindirik/dairesel dizideki tüm elemanların olduğu dizi modelinin simülasyon çözümüyle elde edilen eleman örüntüsü ve geri dönüş kaybıyla, nişan hattında ve yükseliş eksenindeki herhangi bir tarama açısı için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Burada anten dizisi etrafındaki birden fazla elemanın uyarılmasıyla elde edilecek olan örüntü şekilleride incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, faz modu konsepti kullanılarak yapılan birim hücre yama anten tasarımı, tam dizi yama anten tasarımıyla büyük bir tutarlılık göstermiştir ve yöntem doğrulanmıştır.

Silindirik diziler için kullanılan faz modu konsepti geneldir. Konformal dizilerin bir çeşidi olan silindirik diziler dönme ekseninde simetriye sahip olduğundan faz modu konsepti uygulanması diğer konformal dizilere göre biraz daha kolaydır. Bu yöntemi her türlü dizilime sahip konformal dizilere genişletilebilir ve geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Stutzman, W.L. ve G.A. Thiele.** 1998. Antenna theory and design. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] **L. Josefsson and P. Persson,** 2006. Conformal Array Antenna Theory and Design Hoboken, NJ: Wiley.
- [3] **ANSYS HFSS for Antenna Design,** 2015. Lecture 9: Unit Cell Analysis (Infinite Array), 2015.
- [4] **Sima Noghanian,** 2020. Efficient And Accurate Simulation Of Antenna Arrays In HFSS, Retrieved April 2, 2020, from <https://www.padinc.com/2020/04/02/efficient-and-accurate-simulation-of-antenna-arrays-in-hfss/>
- [5] **Dr. Robert L. Eisenhart,** 2020. “Antenna Array Design from A Collection of Thoughts, Tips and Techniques for Microwave Circuit Design”, November 2020, from <http://www.DR-HFSS.com>
- [6] **Herbert M. Aumann,** 2008. Phase Mode Analysis of Directional Elements in a Circular Array, MIT Lincoln Laboratory, 244 Wood Street, Lexington, MA 02420
- [7] **C. J. Fulton and A. Mirkamali,** 2015. "A computer-aided technique for the analysis of embedded element patterns of cylindrical arrays [EM programmer's notebook]," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 3, pp. 132-138, 2015.
- [8] **W. Dorsey, A. Stumme, and J. Coleman,** 2019. “Tutorial: Applying phase-mode theory to the design of cylindrical arrays,” Naval Research Laboratory, Washington, DC, Tech. Rep. NRL/MR/5310–19-9915, August 2019.
- [9] **Constantine A. Balanis,** 2016. Antenna Theory Analysis And Design, Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.,2016.
- [10] **Mailloux R.,** 2005. Phased Array Antenna Handbook. 2nd ed., Artech House, Boston, 2005.
- [11] **H. Wheeler,** 1966. “The grating-lobe series for the impedance variation in a planar phased-array antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 14, no. 6, pp. 707–714, November 1966.
- [12] **M. Askari, M. Karimi, and Z. Atbaee,** 2013. “Robust beamforming in circular arrays using phase-mode transformation,” IET Signal Processing, vol. 7, no. 8, pp. 693–703, October 2013.
- [13] **H. Steyskal,** 2008. "Digital beamforming aspects of wideband circular arrays," in 2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2008.

- [14] **G. Borgiotti and Q. Balzano**, 1972. “Analysis and element pattern design of periodic arrays of circular apertures on conducting cylinders,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 20, no. 5, pp. 547–555, Sep 1972.
- [15] **D. Kelley and W. Stutzman**, 1993. “Array antenna pattern modeling methods that include mutual coupling effects,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 12, pp. 1625–1632, 1993.
- [16] **W. M. Dorsey, J. O. Coleman, and W. R. Pickles**, 2015. “Uniform circular array pattern synthesis using second-order cone programming,” *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 9, no. 8, pp. 723–727, 2015.
- [17] **G. V. Borgiotti and Q. Balzano**, 1970. “Mutual coupling analysis of a conformal array of elements on a cylindrical surface,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 18, no. 1, pp. 55–63, 1970.
- [18] **J. Herper, A. Hessel, and B. Tomasic**, 1985. “Element pattern of an axial dipole in a cylindrical phased array, Part I: Theory,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 33, no. 3, pp. 259–272, 1985.
- [19] **J. Herper, A. Hessel, and B. Tomasic**, 1985. “Element pattern of an axial dipole in a cylindrical phased array, Part II: Element design and experiments,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 33, no. 3, pp. 273–278, 1985.
- [20] **T. Martin and L. Pettersson**, 2003. “Cylindrical FDTD using phase shift boundaries for simulation of large cylindrical antenna arrays,” in *Proc. Nordic Antenna Symp.*, Kalmar, Sweden, May 13–15, 2003.
- [21] **B. Tomasic and N. Herscovici**, 2009. “Analysis of cylindrical array of infinitely-long slots fed by connected dipoles,” in *Proc. IEEE Antennas Propagation Society Int. Symp.*, 2009, pp. 1–4.
- [22] **A. K. Bhattacharyya**, 2006. *Phased Array Antennas, Floquet Analysis, Synthesis, BFNs and Active Array Systems*. Hoboken, NJ: Wiley, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hasan AYDIN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Dokuz Eylül Üniversitesi, – Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği / 2019

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılında Dokuz Eylül Üniversitesini bölüm 2'inci olarak mezun oldu ve 2'incilik ödülünü kazandı.
- 2019 yılında Dokuz Eylül Üniversitesinde lisansını Yüksek Onur Öğrencisi olarak tamamladı ve Yüksek Onur Öğrencisi ödülünü kazandı.
- 2019 yılında Dokuz Eylül Üniversitesinde Bitirme Projeleri yarışmasında 1'incilik ödülü kazanmıştır
- 2018-2019 yılları arasında VESTEL ELEKTRONİK SANAYİ VE TİCARET A.Ş. TV Sistem Tasarım Mühendisi olarak çalıştı.
- 2019-Günümüz yıllarında halen aktif olarak ASELSAN Şirkentinde RF/Anten Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.