T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ku BAND UYGULAMALARINDA DÜŞÜK PROFİLLİ HORN DİZİ ANTEN TASARIMI

SEZGİN ÖRDEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HABERLEŞME PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET KIZILAY

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ku BAND UYGULAMALRINDA DÜŞÜK PROFİLLİ HORN DİZİ ANTEN TASARIMI

Sezgin ÖRDEK tarafından hazırlanan tez çalışması 22.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Salih DEMİREL

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Y. Doç. Dr. M. Emre AYDEMİR

Hava Harp Okulu _____

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının danışmanlığını yürüten, yardımını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ahmet KIZILAY'a, çalışmam süresince bana destek olan Peyman MAHOUTI, Mehmet Ali BELEN ve Akay ÖRDEK'e, bana her zaman destek olan ve hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan kıymetli aileme ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan, 2016

Sezgin ÖRDEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 1
1.3 Hipotez 2

BÖLÜM 2

AÇIKLIK ve HORN ANTENLER 3

2.1 Açıklık Anten Yapıları 3
2.1.1 Uniform Akım Dağılımlı Dikdörtgen Açıklık Anten 3
2.2 Horn Anten Yapıları 4
2.2.1 H-Düzlem Horn Anten 5
2.2.1.1 Açıklık Alanları 6
2.2.1.2 Işınan Alanları 6
2.2.1.3 Yönlendiricilik 9
2.2.2 E-Düzlem Horn Anten 12
2.2.3 Piramit Horn Anten 14

BÖLÜM 3

DİZİ ANTENLER 16

3.1 Dizi Antenler Genel Bilgi 16
3.2 Patern Çarpım İlkesi 16

3.3 Düzgün Doğrusal Diziler 17
3.3.1 Doğrusal Dizilerin Temel Özellikleri 18
3.3.1.1 Ana Demet Doğrultusu 19
3.3.1.2 Sıfır Konumları 19
3.3.1.3 Yarım Güç Hüzme Genişliği 19
3.3.1.4 Yan Kulakçık Konumları 19
3.3.1.5 İlk Yan Kulakçık Seviyesi 20
3.3.2 Görünür Bölge 20
3.3.3 Izgara Kulakçıklar 21
3.4 Düzlemsel Diziler 21
3.4.1 Düzlemsel Diziler için Dizi Faktörü ve Işıma Örgüsü 21
3.5 Dizi Antenlerin Besleme Sistemleri 23

BÖLÜM 4

DALGA KILAVUZLARI VE GÜÇ BÖLÜCÜLERİ 24

4.1 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu 24
4.2 Koaksiyel Beslemeli Dalga Kılavuzu 28
4.3 E-Düzlem Dalga Kılavuzu Bölücü 29

BÖLÜM 5

SİMÜLASYON VE ÖLÇÜM SONUÇLARI 30

5.1 Birim Eleman Tasarımı 30
5.2 4x4 Elemanlı Horn Dizi Tasarımı 31
5.2.1 Besleme Sistemi 31
5.3 Grating Lobe Bastırılması 32
5.4 Anten Üretimi ve Ölçümü 35
5.4.1 Prototip Anten Üretimi 35
5.4.2 Prototip Anten Ölçümü 37

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 42

KAYNAKLAR 43

ÖZGEÇMİŞ 44

SİMGE LİSTESİ

λ	Dalgaboyu
ε	Dielektrik Geçirgenlik Sabiti
E	Elektrik Alan
F	Elektrik Vektör Potansiyel
G	Kazanç
H	Manyetik Alan
μ	Manyetik Geçirgenlik Sabiti
TE	Transverse Electric (Dik Elektrik)
D	Yönlendiricilik

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Dikdörtgen kesitli açıklık anten 4
Şekil 2.2 Dikdörtgen kesitli horn anten modelleri 5
Şekil 2.3 H-Düzlem Horn anten geometrisi 6
Şekil 2.4 H-Düzlem horn antenin örnek bir üç boyutlu ışıma paterni (balanis 2005) 8
Şekil 2.5 δ_2=12* λ iken farklı kanat açıları için H-düzlem horn antenin normalize ışıma örüntüsü 8
Şekil 2.6 H düzlem horn antenin faklı kanat açısı ve uzunluğuna bağlı olarak yarım güç hüzme genişliğinin değişimi (Balanis, 2005) 10
Şekil 2.7 A parametesinin bir fonksiyonu olarak G_H ifadesinin değişimi. 11
Şekil 2.8 E-düzlem sektörel horn anten geometrisi (Balanis, 2005) 12
Şekil 2.9 A parametresinin bir fonksiyonu olarak GH ifadesinin değişimi 13
Şekil 2.10 Piramit Horn anten geometrisi (Balanis, 2005) 14
Şekil 3.1 İki Öğeli Dizi 16
Şekil 3.2 Genel bir doğrusal dizi 18
Şekil 3.3 Besleme sistemi 23
Şekil 4.1 Dikdörtgen kesitli dalga kılavuzu 24
Şekil 4.2 Pin İle Beslenmiş Dalga Kılavuzu 28
Şekil 4.3 Dalga kılavuzu TE_{10} modunda elektrik alan dağılımı 28
Şekil 4.4 E-düzlem dalga kılavuzu güç bölücü 29
Şekil 5.1 Birim Horn anten 30
Şekil 5.2 Birim Horn Anten Kesiti 31
Şekil 5.3 4x4 elemanlı dizi antenin besleme sistemi yapısı 31
Şekil 5.4 4x4 elemanlı dizi antenin besleme sisteminin s-parametre değerlerinin CST simülasyon sonucu 32
Şekil 5.5 4x4 elemanlı dizi antenin perspektif ve üstten görünümü 32
Şekil 5.6 4x4 elemanlı dizi antenin alttan görünümü ve besleme siteminin kesit görünüşü 33
Şekil 5.7 4x4 elemanlı dizi antenin s-parametreleri değelerinin CST simülasyon sonucu 33
Şekil 5.8 4x4 elemanlı horn dizi antenin 14.25 GHz de ışıma örgüsü 33
Şekil 5.9 4x4 elemanlı horn dizi antenin 14.25 GHz de ışıma örgüsü 34
Şekil 5.10 4x4 elemanlı horn dizi antenin 14.25 GHz de ışıma örgüsünde ızgara yapısının grating lob bastırılmasındaki etkisi 34

Şekil 5.12 Anten Prototipinin Alt Kısmının Teknik Resim Çizimi 35
Şekil 5.12 Anten Prototipinin Üst Kısmının Teknik Resim Çizimi 36
Şekil 5.13 Anten Prototipinin Izgara Kısmının Teknik Resim Çizimi 36
Şekil 5.14 Anten Prototipi 36
Şekil 5.15 Anten Prototipi 37
Şekil 5.16 2x2 Horn Dizi Anten Modelinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken S11Benzetim Sonuçları 38
Şekil 5.17 2x2 Horn Dizi Anten Modelinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken S11 Ölçüm Sonuçları 38
Şekil 5.18 2x2 Horn Dizi Anten Prototipinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken H Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları 39
Şekil 5.19 2x2 Horn Dizi Antenin Izgaralı Yapıda iken H Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması..39
Şekil 5.20 2x2 Horn Dizi Antenin Izgarasız Yapıda iken H Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması..40
Şekil 5.21 2x2 Horn Dizi Anten Prototipinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken E Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları 40
Şekil 5.22 2x2 Horn Dizi Antenin Izgaralı Yapıda iken E Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması..41
Şekil 5.23 2x2 Horn Dizi Antenin Izgarasız Yapıda iken E Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması..41

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5. 1 Dizi anten kazancının anten sayısına göre değişim tablosu……..23

Ku BAND UYGULAMALARINDA DÜŞÜK PROFİLLİ HORN DİZİ ANTEN TASARIMI

Sezgin ÖRDEK

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

Mikrodalga ve milimetrik dalga frekanslarında sivil veya askeri amaçlarla dizi anten tasarımı son yıllarda popüler olmuştur. Tasarımı yapılan dizi antenler eş fazda ya da faz dizili olarak tek bir noktada birleştirilirken yol kayıpları meydana gelmektedir. Özellikle mikroşerit dizilerde frekans yükseldikçe malzemenin kayıp tanjantı, hatlarda yüzey pürüzlülüğü vb. sebeplerden dolayı kayıplar çok artmakta ve anten sayısının artırılmasıyla sağlanan kazanç, yol kayıplarından ötürü düşük olabilmektedir.

Bu çalışmada horn antenler dizilerek, horn antenin bant genişliği ve kazancından, dalga kılavuzundan oluşan besleme ağı kullanılarak ise dalga kılavuzlarının hem geniş bantlı hem de düşük kayıplı olma özelliklerinden faydalanılmış olacaktır. 14-14.5 GHz frekansları arasında tasarımı yapılmış olan bu dizi antende, dalga kılavuzu iletimi TE10 modunda olup üst seviye modları bastırabilecek kadar da küçük boyutta tasarlanmıştır.

Tasarım CST STUDIO SUITE zaman domeninde hesaplama yapan elektromanyetik benzetim programı ile yapılmıştır. Tasarımı yapılan prototipin network analizörde S-parametreleri, yansımasız odada ışıma paterni ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Horn Anten; Dizi Anten; Dikdörtgen Dalga Klavuzu.

ABSTRACT

HORN ARRAY ANTENNA DESIGN FOR KU-BAND APPLICATIONS

Sezgin ÖRDEK

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet KIZILAY

In recent years, designing array antenna at microwave and millimeter wave frequencies for commercial and military purposes have been popular. The feed network designed uniform phase or phased array causes losses. Especcially microstrip antenna array, when increase the frequency causes extreemly losses due to substrates tangent losses and surface roughness.

In this study used horn antenna bandwidth, extreemly low losses characteristic and waveguide feed network and their bandwidth. In this antenna designed between 14-14.5 GHz frequencies used waveguide propagate TE10 and the waveguide is small dimensions enough to suppress higher order modes.

The antenna designed by CST STUDIO SUITE the software use time domain computional electromagnetics. The prototype's S-parameter measured by Vector Network analyser, the radiation pattern measured in anechoic chamber.

Keywords: Horn Antenna, Array Antenna, Rectangular Waveguides

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kablosuz haberleşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte antenler hayatımızda bir yer edinmekle beraber bilim ve teknoloji açısından gelişmeye açık olmuştur. Başlarda sivil amaçlar için kullanılan antenler, İkinci Dünya Savaşıya beraber, radar ve askeri haberleşmede önemli bir yere sahip olmuştur.

Günümüzde GSM, Uydu haberleşmesi, Wi-Fi teknolojisinin tüketici elektroniğinde sıkça yer alması, antenleri insan hayatında vazgeçilmez hale getirmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Mikrodalga ve milimetrik dalga frekanslarında sivil veya askeri amaçlarla dizi anten tasarımı son yıllarda popüler olmuştur. Tasarımı yapılan dizi antenler eş fazda ya da faz dizili olarak tek bir noktada birleştirilirken yol kayıpları meydana gelmektedir. Özellikle mikroşerit dizilerde frekans yükseldikçe malzemenin kayıp tanjantı, hatlarda yüzey pürüzlülüğü vb. sebeplerden dolayı kayıplar çok artmakta ve anten sayısının artırılmasıyla sağlanan kazanç, yol kayıplarından ötürü düşük olabilmektedir.

Bu çalışmada horn anten dizisiyle, horn antenin bant genişliği ve kazancından, dalga kılavuzundan oluşan besleme ağı kullanılarak ise dalga kılavuzlarının hem geniş bantlı hem de düşük kayıplı olma özelliklerinden faydalanılmış olacaktır. 14-14.5 GHz frekansları arasında tasarımı yapılmış olan bu dizi antende, dalga kılavuzu iletimi TE_{10} modunda olup üst seviye modları bastırabilecek kadar da küçük boyutta tasarlanmıştır.

Tasarım CST STUDIO SUITE zaman domeninde hesaplama yapan elektromanyetik benzetim programı ile yapılmıştır.

Tasarımı yapılan prototipin network analizörde S-parametreleri, yansımasız odada ışıma paterni ve açık alanda kazancı ölçülmüştür. Yol kayıplarına sebep olduğu düşünülen faktörler incelenmiş ve çözüm metodlarına bakılmıştır.

1.3 Hipotez

Horn Antenler mikrodalga anten türlerinin içerisinde en yaygın olarak kullanılan anten türlerinden biridir [1]. Keşfedilmesi ve kullanılmaya başlanması 1800'lü yılların sonlarından itibarendir. 1930'lu yıllardan itibaren özellikle ikinci dünya savaşı boyunca mikrodalga ve dalga kılavuzu iletim hatlarında kullanım alanı bulmuşlardır. O zamandan beri horn antenlerin ışıma karakteristikleri tasarım yöntemleri ve uygulamalarına dair birçok yayın ortaya çıkmıştır.

Horn antenler ile ilgili çalışmaların fazla olmasına rağmen, horn dizi antenler ile ilgili çalışmalar yaygın değildir [2]-[5].

BÖLÜM 2

AÇIKLIK ve HORN ANTENLER

Horn antenler astronomide, uydu takibinde ve parabolic yansıtıcı yapılarda besleme elemanı olarak sıklıkla kullanılır.Horn anten dizileri yaygın olmayan bir yapı olup diğer tür yüksek kazançlı antenlerin kazanç ölçümlerinde ve kalibrasyonlarında genel standart olarak kabul edilir. Yaygın kullanımlarının başlıca sebepleri ise yapımının kolay olması, besleme kolaylığı çok çeşitli olması ve yüksek performans sağlaması olarak sıralanabilir.

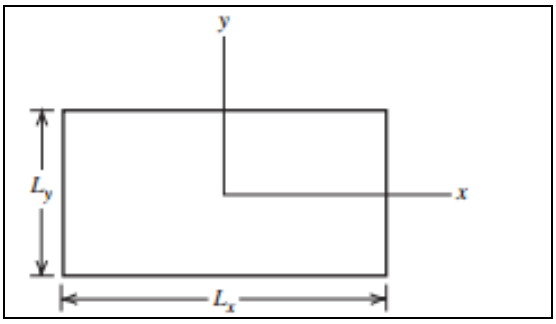
2.1 Açıklık Anten Yapıları

Antenlerin ışıma yapacağı kısım iki boyutlu olarak kabul edildiğinde antenin sahip olduğu yüzey alanındaki elektrik ve manyetik alana göre ışıma karakteristikleriyle, açıklık alanındaki eşdeğer akımlarına göre uzak alandaki elektrik ve manyetik alanları hesaplanabilir [6].

2.1.1 Uniform Akım Dağılımlı Dikdörtgen Açıklık Anten

Sonsuz toprak düzlemindeki dikdörtgen kesitli açıklığa sahip bir açıklık antenin aşağıdaki şekildeki gibi y yönünde uniform bir elektrik alana sahip olduğu düşünülürse;

Ea=Eŷ, $|x| < \frac{L_x}{2}$, $|y| < \frac{L_y}{2}$ (2.1)



Şekil 2.1 Dikdörtgen kesitli açıklık anten

Anten uzak alan elektrik alanları,

$u = \sin\theta\cos\phi,\ v = \sin\theta\sin\phi$ olmak üzere,

$$E_\theta = j\beta E_0 L_x L_y \sin\phi \frac{\sin[(\beta L_x/2)u]}{(\beta L_x/2)u} \frac{\sin[(\beta L_y/2)v]}{(\beta L_y/2)v} \tag{2.2}$$

$$E_\theta = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_0 L_x L_y \sin\phi \frac{\sin[(\beta L_x/2)u]}{(\beta L_x/2)u} \frac{\sin[(\beta L_y/2)v]}{(\beta L_y/2)v}$$
$$E_\phi = j\beta \frac{e^{-j\beta r}}{2\pi r} E_0 L_x L_y \cos\theta\cos\phi \frac{\sin[(\beta L_x/2)u]}{(\beta L_x/2)u} \frac{\sin[(\beta L_y/2)v]}{(\beta L_y/2)v} \tag{2.3}$$

Anten yarım güç huzme genişlikleri,

$$HP_x = 0.886\frac{\lambda}{L_x} rad = 50.8\frac{\lambda}{L_x}\deg$$
$$HP_y = 0.886\frac{\lambda}{L_y} rad = 50.8\frac{\lambda}{L_y}\deg \tag{2.4}$$

Anten yönlendiriciliği,

$$D_u = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\lambda^2} L_x L_y \tag{2.5}$$

Uniform dağılımlı açıklık antenlerde açıklık verimi 1'e eşittir.

2.2 Horn Anten Yapıları

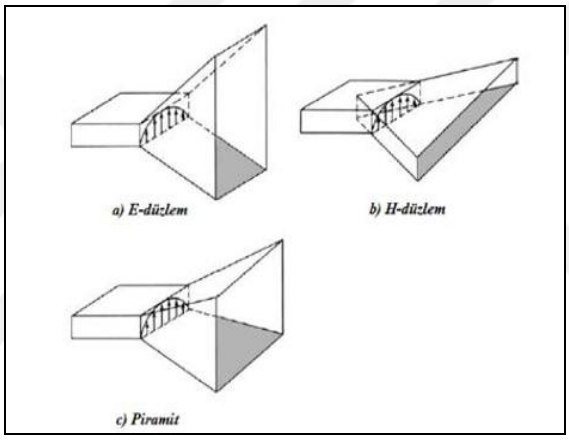
Dikdörtgen dalga kılavuzunun kendisi, açık uçtan enerjinin yayılmasına izin verdiğinden ışınım yapan bir anten olarak kullanılabilir. Kılavuz boyutları ve çalışma frekansındaki dalga boyu asındaki ilişkiye dayanarak, izotropik antene göre daha fazla kazanç sağlanabilir. Fakat dalga kılavuzunun karakteristik empedansı ile havada ya da boşluk

sinyalinin yayılacağı ortamın empedansları farklı olmasından dolayı, enerjinin bir kısmı geri yansıması olacağından pratik değildir. Empedansı uygun hale getirmek için dalga kılavuzunun tek ya da iki yönde ağzının genişletilmesi ile horn antenler meydana getirilir. Bu ayrıca iyi bir yönlendirme kazancı sağlamaktadır [1].

Horn anten çeşitleri;

- E-Düzlem Horn Anten
- H- Düzlem Horn Anten
- Piramit Biçimli Horn Anten

Bir elektromanyetik horn anten aşağıda da gösterildiği gibi çeşitli formlarda olabilir.

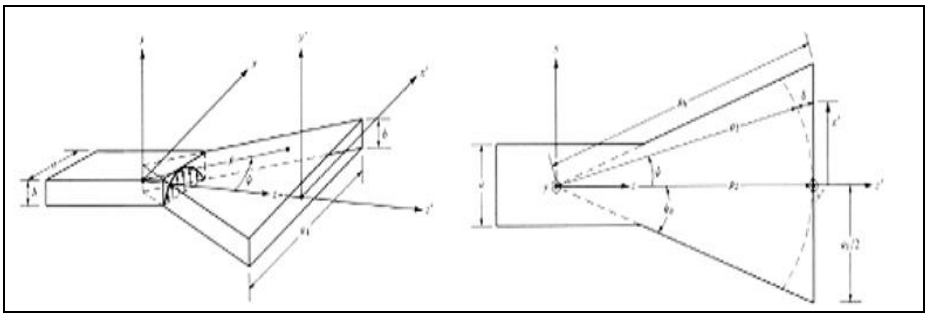


Şekil 2.2 Dikdörtgen kesitli horn anten modelleri

Horn anten temel olarak farklı kesitlere sahip içi boş bir dalga klavuzu yapısından ve bu yapıya ilave edilen bir kanattan oluşmaktadır. Horn antenin türü, yönü ve kanat yapısı ışıma performansını etkiler.

2.2.1 H-Düzlem Horn Anten

Dikdörtgen dalga klavuzunun boyutlarının H düzleminde (Elektrik Alan vektör yönüne dik) açılarak, diğer düzlemde ise sabit tutularak elde edilen yapı H düzlem sektörel horn anten yapısıdır. H düzlem horn anten geometrisi aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.3 H-Düzlem Horn anten geometrisi

2.2.1.1 Açıklık Alanları

Horn anten açıklığındaki alanlar horn antenin bir açıklık ışıyıcısı olarak düşünülmesi yardımıyla bulunabilir. Bu yöntemi kullanarak horn anten açıklığında aşağıdaki ifadeler yazılabilir [1]

$$E_x^{'} = H_y^{'} = 0 \tag{2.7}$$

$$E_x^{'} = E_2 \cos(\frac{\pi}{a_1} \mathrm{x}^{'}) \mathrm{e}^{-jk\delta(\mathrm{x}^{'})} \tag{2.8}$$

$$H_x^{'} = \frac{E_2}{\eta} \cos(\frac{\pi}{a_1} \mathrm{x}^{'}) \mathrm{e}^{-jk\delta(\mathrm{x}^{'})} \tag{2.9}$$

$$\delta(\mathrm{x}^{'}) = \frac{1}{2}(\frac{x^{'2}}{\rho_2}) \tag{2.10}$$

$$\rho_2 = \rho_h \cos\psi_h \tag{2.11}$$

2.2.1.2 Işınan Alanları

Horn Anten tarafından ışınan alanlar Js ve Ms eşdeğer akım yoğunluklarının formülize edilmesi yardımıyla bulunabilir. 2.7-2.9 ifadeleri kullanılarak horn anten açıklığı üzerindeki eşdeğer akım yoğunlukları şu şekilde tanımlanabilir [1].

$$J_x = J_y = M_x = M_y = 0 \tag{2.12}$$

$$J_y = -\frac{E_2}{\eta} \cos(\frac{\pi}{a_1} \mathrm{x}^{'}) \mathrm{e}^{-jk\delta(\mathrm{x}^{'})} \tag{2.13}$$

$$M_x = E_2 \cos(\frac{\pi}{a_1} \mathrm{x}^{'}) \mathrm{e}^{-jk\delta(\mathrm{x}^{'})} \tag{2.14}$$

Horn anten açıklığının haricindeki tüm bölgelerde bu ifadeler sıfıra eşit olur. Açıklık yüzeyi üzerindeki eşdeğer akım yoğunlukları bulunduktan sonra uzak alan için elde edilecek elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri aşağıdaki gibidir;

$$E_r = 0 \tag{2.15}$$

$$E_\theta = jE_2 \frac{b}{8}\sqrt{\frac{k\rho_2}{\pi}}\frac{e^{-j\beta r}}{r}\{\sin\varphi(1+\cos\theta)\frac{SinY}{Y}[e^{jf_1}F(t_1^{'},t_2^{'})+e^{jf2}F(t_1^{''},t_2^{''})]\} \tag{2.16}$$

$$E_\varphi = jE_2 \frac{b}{8}\sqrt{\frac{k\rho_2}{\pi}}\frac{e^{-j\beta r}}{r}\{\cos\varphi(1+\cos\theta)\frac{SinY}{Y}[e^{jf_1}F(t_1^{'},t_2^{'})+e^{jf2}F(t_1^{''},t_2^{''})]\} \tag{2.17}$$

Burada;

$$t_1^{'} = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}}[-\frac{ka_1}{2}-k_x^{'}\rho_2] \tag{2.18}$$

$$t_2^{'} = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}}[\frac{ka_1}{2}-k_x^{'}\rho_2] \tag{2.19}$$

$$t_1^{''} = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}}[-\frac{ka_1}{2}-k_x^{''}\rho_2] \tag{2.20}$$

$$t_2^{''} = \sqrt{\frac{1}{\pi k\rho_2}}[\frac{ka_1}{2}-k_x^{''}\rho_2] \tag{2.21}$$

$$F(t_1,t_2) = [C(t_2)-C(t_1)]-j[S(t_2)-S(t_1)] \tag{2.22}$$

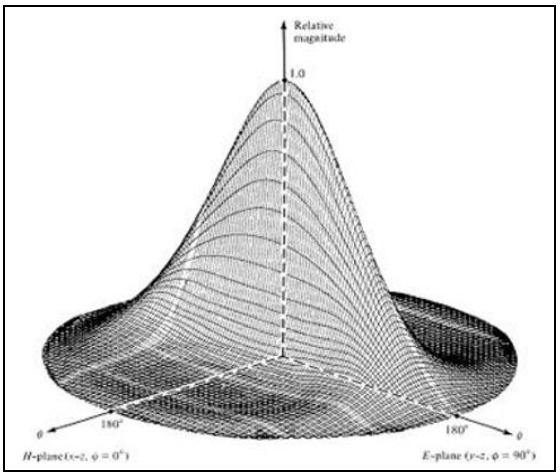
$$Y = \frac{kb}{2}\sin\theta\sin\varphi \tag{2.23}$$

$$k_x^{'} = k\sin\theta\cos\varphi+\frac{\pi}{a_1} \tag{2.24}$$

$$k_x^{''} = k\sin\theta\cos\varphi-\frac{\pi}{a_1} \tag{2.25}$$

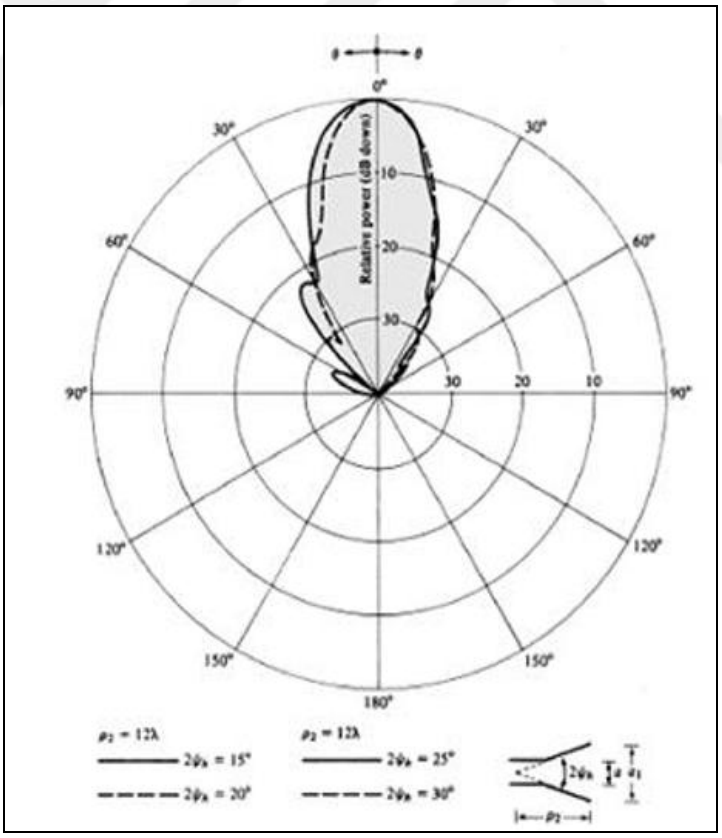
olarak belirtilebilir. C(x) ve S(x) ifadeleri kosinüs ve sinüs Fresnel integralleridir [1].

H- Düzlem horn antenin örnek bir üç boyutlu ışıma örgüsü şekil de verilmiştir.



Şekil 2.4 H-Düzlem horn antenin örnek bir üç boyutlu ışıma paterni (balanis 2005)

Yukarıdaki şekilde verilen ışıma örgüsüne bakılacak olunursa H-düzlem antenin E-düzlemine kıyasla H-düzleminde daha dar huzmeye sahip olduğu görülür. $\delta_2 = 12\lambda$ olacak şekilde tasarlanan H-düzlem antenin antenin farklı kanat açılarına bağlı olarak elde edilen normalize ışıma paterni grafikleri aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 2.5 δ_2=12* λ iken farklı kanat açıları için H-düzlem horn antenin normalize ışıma örüntüsü

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere kanat açısı arttırıldığında horn antenin huzmesi daralmaktadır ama bu karakteristik sürekli değildir. Kanat açısı belli bir seviyeden fazla arttırıldığında huzme genişlemeye başlar. Bu durum horn açıklığının faz hatasından kaynaklanmaktadır. Bu durum düzeltilebilmesi için horn anten açıklığında genellikle lens kullanılmaktadır.

2.2.1.3 Yönlendiricilik

H-düzlem horn antenin maksimum yönlendiriciliği şekil 2.5'e göre z-eksenindedir. Uzak alan için elektrik alanın maksimum değeri;

$$\left|E_\theta\right|_{\max} = \left|E_2\right| \frac{b}{4r}\sqrt{\frac{2\rho_2}{\lambda}}\left|\sin\varphi\{[C(t_2^{'}) + C(t_2^{''}) - C(t_1^{'}) - C(t_1^{''})] - j[S(t_2^{'}) + S(t_2^{''}) - S(t_1^{'}) - S(t_1^{''})]\}\right| \tag{2.26}$$

1.12 ve 1.15 ifadelerini $\theta = 0^o$ için düzenlersek,

$$t_1^{'} = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}}[-\frac{ka_1}{2} - \frac{\pi}{a_1}\rho_2] \tag{2.27}$$

$$t_1^{'} = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}}[\frac{ka_1}{2} - \frac{\pi}{a_1}\rho_2] \tag{2.28}$$

$$t_1^{''} = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}}[-\frac{ka_1}{2} + \frac{\pi}{a_1}\rho_2] = -t_2^{'} = v \tag{2.29}$$

$$t_1^{''} = \sqrt{\frac{1}{\pi k \rho_2}}[\frac{ka_1}{2} + \frac{\pi}{a_1}\rho_2] = -t_1^{'} = u \tag{2.30}$$

Benzer olarak;

$$\left|E_\varphi\right|_{\max} = \left|E_2\right| \frac{b}{4r}\sqrt{\frac{2\rho_2}{\lambda}}\left|\cos\varphi\{[C(u) - C(v)]^2 - j[S(u) - S(v)]^2\}\right| \tag{2.31}$$

Toplam elektrik alan şiddeti;

$$\left|E\right|_{\max} = \sqrt{\left|E_\varphi\right|_{\max}^2 + \left|E_\theta\right|_{\max}^2} = \left|E_2\right| \frac{b}{r}\sqrt{\frac{\rho_2}{2\lambda}}\{[C(u) - C(v)]^2 - j[S(u) - S(v)]^2\}^{1/2} \tag{2.32}$$

Anten tarafından ışınan toplam güç, horn antenin ağız açıklığı boyunca integralden elde edilir.

$$P_{rad} = |E_2|^2 \frac{ba_1}{4\eta} \tag{2.33}$$

$$D_H = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi b\rho_2}{a_1\lambda}\{[\mathrm{C(u)} - \mathrm{C(v)}]^2 - \mathrm{j}[\mathrm{S(u)} - \mathrm{S(v)}]^2\} \tag{2.34}$$

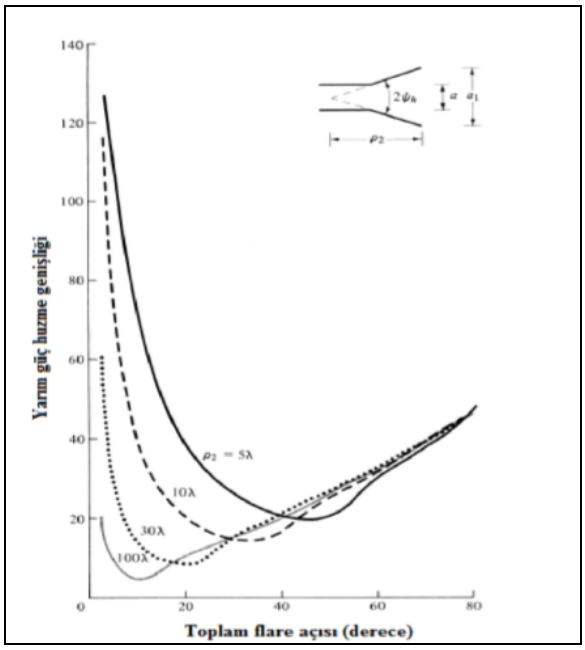
$$\mathrm{U_{max}} = |E_2|^2 \frac{b^2\rho_2}{4\eta\lambda}\sqrt{\frac{2\rho_2}{\lambda}}\frac{4\pi b\rho_2}{a_1\lambda}\{[\mathrm{C(u)} - \mathrm{C(v)}]^2 - \mathrm{j}[\mathrm{S(u)} - \mathrm{S(v)}]^2\} \tag{2.35}$$

$$\mathrm{v} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{\lambda\rho_2}}{a_1} + \frac{a_1}{\sqrt{\lambda\rho_2}}\right) \tag{2.36}$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\sqrt{\lambda\rho_2}}{a_1} - \frac{a_1}{\sqrt{\lambda\rho_2}}\right) \tag{2.37}$$

olarak belirtilebilir.

Yarım güç huzme genişliği (HPBW), kanat açısının bir fonksiyonudur ve şekil 2.6'da H-düzlem horn anten için bir örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.6 H düzlem horn antenin faklı kanat açısı ve uzunluğuna bağlı olarak yarım güç hüzme genişliğinin değişimi (Balanis, 2005)

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi H-düzlem horn antenin yarım güç hüzme genişliği, verilen sabit bir kanat uzunluğu için, kanat açısının artışıyla beraber azalmakta iken kanat açısının belli bir seviyesinden sonra artmaya başlamaktadır.

Bir H-düzlem horn antenin optimum yönlendiriciliği için kanat açısı yaklaşık olarak;

$$a_1 = \sqrt{3\pi\rho_2} \tag{2.38}$$

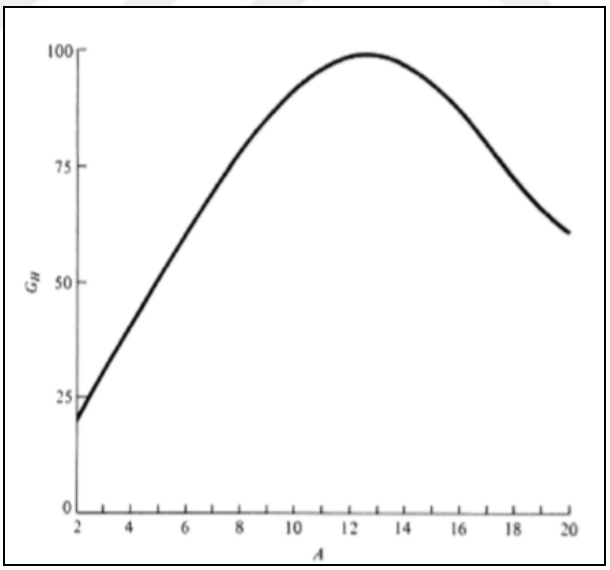
Bir H-düzlem sektörel antenin yönlendiriciliğinin hesaplanabilmesi aşağıda verilen yöntemle de mümkündür;

$$A = \frac{a_1}{\lambda}\sqrt{\frac{50}{\rho_h/\lambda}} \tag{2.39}$$

1-) A değeri 2.39 formülü ile hesaplanır;

2-) Bulunan A değeri kullanılarak şekil 2.7'dan GH değeri bulunur. Bununla beraber eğer A<2 ise GH değeri aşağıdaki formül ile de bulunabilir;

$$G_H = \frac{32}{\pi}A \tag{2.40}$$



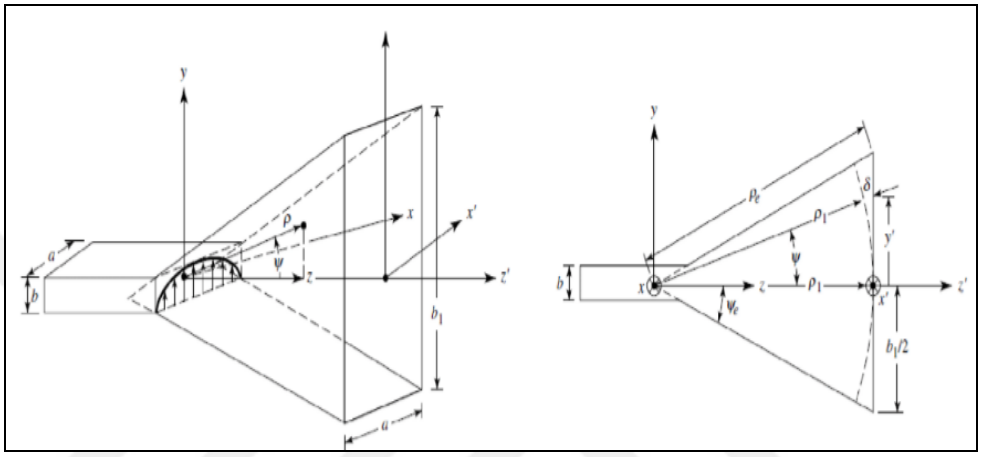
Şekil 2.7 A parametesinin bir fonksiyonu olarak G_H ifadesinin değişimi (Balanis, 2005).

3-) Bulunan GH değeri kullanılarak H-düzlem sektörel horn antenin yönlendiriciliği; ifadesi yardımıyla hesaplanabilir.

$$D_H = \frac{b}{h}\frac{G_H}{\sqrt{\frac{50}{\rho_h/\lambda}}} \tag{2.41}$$

2.2.2 E-Düzlem Horn Anten

E-düzlem horn antenin yapısında kanat elektrik alan doğrultusunda açılır. Şekil 2.7 de örnek bir E-düzlem sektörel horn antenin geometrisi görülmektedir.



Şekil 2.8 E-düzlem sektörel horn anten geometrisi (Balanis, 2005)

Yapılacak olan teorik analizde, aynen H-düzlem sektörel horn antende olduğu gibi, mod uyarma tekniği kullanılacaktır. H-düzlem horn için yazılan (1.1)-(1.5) açıklık alan ifadeleri E-Düzlem sektörel horn anten için aşağıdaki gibi verilebilir (Balanis, 2005)

$$E_Z^{'} = E_x^{'} = H_y^{'} = 0 \tag{2.42}$$

$$E_y^{'}(x^{'}, y^{'}) = E_1 \cos(\frac{\pi}{a_1}\mathrm{x}^{'})\,\mathrm{e}^{-j[ky^2/(2\rho_1)]} \tag{2.43}$$

$$H_z^{'}(x^{'}, y^{'}) = jE_1 \cos(\frac{\pi}{k\eta a}\mathrm{x}^{'})\sin(\frac{\pi}{a}\mathrm{x})\,\mathrm{e}^{-j[ky^2/(2\rho_1)]} \tag{2.44}$$

$$H_x^{'}(x^{'}, y^{'}) = -\frac{E_1}{\eta}\cos(\frac{\pi}{a}\mathrm{x}^{'})\,\mathrm{e}^{-j[ky^2/(2\rho_1)]} \tag{2.45}$$

$$\rho_1 = \rho_e \cos\varphi_e \tag{2.46}$$

Eşdeğer akım yoğunlukları ise;

$$J_y = -\frac{E_1}{\eta}\cos(\frac{\pi}{a}x')e^{-jk\delta(y')}, -\frac{a}{2} \le x' \le \frac{a}{2} \quad (2.47)$$

$$M_x = E_1\cos(\frac{\pi}{a}x')e^{-jk\rho(y')}, -\frac{b_1}{2} \le x' \le \frac{b_2}{2} \quad (2.48)$$

olarak yazılabilir. Tanımlanan bu bölge dışındaki bölgelerde J_S = M_s = 0 ifadesi geçerlidir. Akım yoğunluklarının bulunmsından sonra ışınan alanların bulunması H-düzlem sektörel horn antende yapılan işlmlerle benzerlik göstermektedir.

E sektörel horn antenin yönlendiriciliğinin hesaplanabilmesi için yapılması gereken işlemler aşağıda verilmiştir;

1-) Öncelikle B ifadesi

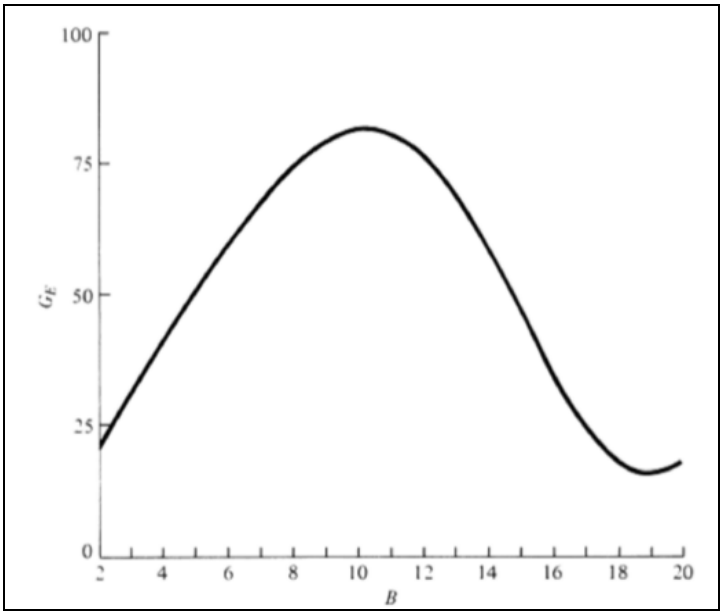
$$B = \frac{b}{\lambda}\sqrt{\frac{50}{\rho_e/\lambda}} \quad (2.49)$$

formülü kullanılarak hesaplanır;

2-) Bulunan B değeri kullanılarak şekil 2.9 yardımıyla karşılık düşen G_E bulunur, Eğer Ancak B değeri ikiden küçük ise;

$$G_E = \frac{32}{\pi}B \quad (2.50)$$

formülü kullanılır.



Şekil 2.9 A parametresinin bir fonksiyonu olarak GH ifadesinin değişimi (Balanis,2005)

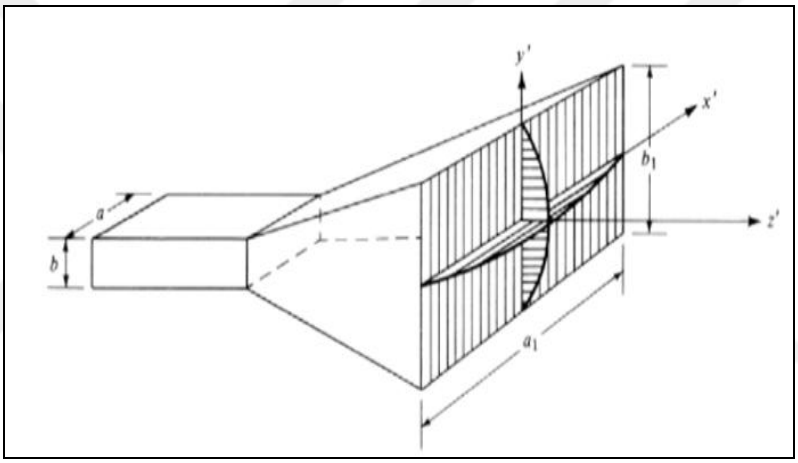
3-) Son aşamada ise antenin yönlendiriciliği

$$D_E = \frac{a}{\lambda}\frac{G_H}{\sqrt{\frac{50}{\rho_e/\lambda}}} \tag{2.51}$$

formülüyle hesaplanabilir.

2.2.3 Piramit Horn Anten

En çok kullanılan horn anten yapılarından birisi de piramit horn antenlerdir. Piramit horn antenlerde kanat hem E-düzleminde hem de H-düzleminde açılır. Şekil 2.10'da örnek bir piramit horn anten geometrisi görülmektedir.



Şekil 2.10 Piramit Horn anten geometrisi (Balanis, 2005)

Önceki horn anten yapılarında olduğu gibi piramit horn antenin teorik analizinde de mod uyarma tekniği kullanılacaktır.

Horn anten açıklığı boyunca E-alan ve H-alan teğetsel bileşenleri aşağıdaki gibi verilebilir (Balanis, 2005);

$$E_y(x', y') = E_0 \cos(\frac{\pi}{a}x')e^{-j[k(x^2/\rho_2 + y^2/\rho_1)/2]} \tag{2.52}$$

$$H_x(x', y') = -\frac{E_1}{\eta}\cos(\frac{\pi}{a_1}x')e^{-j[k(x^2/\rho_2 + y^2/\rho_1)/2]} \tag{2.53}$$

Açıklık üzerindeki eşdeğer akım yoğunlukları ise;

$$J_y(x',y') = -\frac{E_1}{\eta}\cos(\frac{\pi}{a}x')e^{-j[k(x^2/\rho_2+y^2/\rho_1)/2]} \quad (2.54)$$

$$M_x(x',y') = E_0\cos(\frac{\pi}{a_1}x')e^{-j[k(x^2/\rho_2+y^2/\rho_1)/2]} \quad (2.55)$$

şeklindedir. Eşdeğer akım yoğunlukları bulunduktan sonra ışınan alanların hesapları daha önceki horn antenlerde yapılan işlemlerle benzerdir.

Piramit horn antenin yönlendiriciliğinin hesaplanması için yapılması gereken işlemler aşağıda verilmiştir;

1-) A ve B ifadeleri aşağıdaki formüller yardımıyla bulunur;

$$A = \frac{a_1}{\lambda}\sqrt{\frac{50}{\rho_h/\lambda}} \quad (2.56)$$

$$B = \frac{b}{\lambda}\sqrt{\frac{50}{\rho_e/\lambda}} \quad (2.57)$$

2-) Bulunan A ve B ifadeleri kullanılarak sırayla şekil 2.7 ve şekil 2.9 yardımıyla G_E ve G_H ifadeleri bulunur. Fakat G_E veya G_H ifadelerinden herhangi biri ikiden küçükse şu formüller yardımıyla hesaplanabilir;

$$G_E = \frac{32}{\pi}B \quad (2.58)$$

$$G_H = \frac{32}{\pi}A \quad (2.59)$$

3-) Piramit horn antenin yönlendiriciliği D_p ;

formülüyle hesaplanır.

$$D_p = \frac{G_E G_H}{\frac{32}{\pi}\sqrt{\frac{50}{\rho_e/\lambda}}\sqrt{\frac{50}{\rho_h/\lambda}}} \quad (2.60)$$

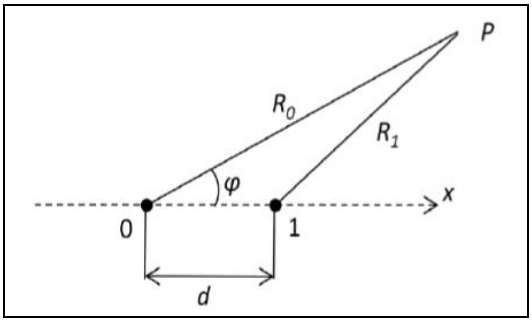
BÖLÜM 3

DİZİ ANTENLER

3.1 Dizi Antenler Genel Bilgi

Dizi antenler, istenilen ışıma özelliklerini verecek şekilde uygun genlik ve faz ilişkileri bulunan özdeş antenlerin değişik biçimlerde düzenlenmiş gruplarına denir. Genelde önemli ışıma özellikleri ana demetin doğrultusu ile yarım güç hüzme genişliği, yan kulakçık seviyeleri ve hüzme taramadır. Anten dizileri anten hüzmesini daraltmak, hüzmeyi şekillendirmek, yönlendirmek ve kazancı artırmak için kullanılırlar [1-2].

Anten dizileri doğrusal, dairesel, düzlemsel gibi farklı geometrik yapılarda oluşturulabilirler. Bu yapılar istenilen bir hüzme şeklini elde etmek amacıyla değişik biçimlerde kullanılabilir. Ayrıca anten elemanlarının sayısı ile anten besleme genlik ve fazları da değiştirilebilir parametrelerdir.



Şekil 3.1 İki Öğeli Dizi

3.2 Patern Çarpım İlkesi

Patern çarpım ilkesi dizi antenlerin ışıma paternini bulmak amacıyla kullanılır. Özdeş antenlerden oluşan bir dizinin ışıma paterni, tek bir antenin güç ışıma paterni ile dizi faktörünün çarpımından oluşur. Bu özelliğe patern çarpım ilkesi denir [3].

$$F_{dizi}(\theta,\phi)=\sum_{n=0}^{N-1}A(\mathrm{n})\,\mathrm{F}_n(\theta,\phi) \tag{3.1}$$

Şekil 3.1'deki antenlerin elektrik alanlarının θ doğrultusunda olduğu ve antenlerin *x* ekseni boyunca dizildiği varsayılmıştır.

$$E_0=E_m F(\theta,\phi)\frac{e^{-jkR_0}}{R_0} \tag{3.2}$$

$$E_1=E_m F(\theta,\phi)\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \tag{3.3}$$

Burada $F(\theta,\phi)$ her bir antenin güç ışıma paterni ve E_m ise genlik fonksiyonudur.

$$R_1\cong R_0-d\sin\theta\cos\phi \tag{3.4}$$

P noktasındaki toplam elektrik alan ayrı ayrı hesaplanan elektrik alanların toplamı olacaktır.

$$E=E_m F(\theta,\phi)\frac{e^{-jkR_0}}{R_0}[1+\mathrm{e}^{jkd\sin\theta\cos\phi}] \tag{3.5}$$

$$\psi=kd\sin\theta\cos\phi$$

$$E=E_m F(\theta,\phi)\frac{e^{-jkR_0}}{R_0}\mathrm{e}^{\frac{\psi}{2}}[\cos\frac{\psi}{2}] \tag{3.6}$$

Kullanılan antenler yarım dalga dipol anten seçilirse bu durumda oluşacak olan toplam elektrik alan eşitlik 3.7'deki gibi olacaktır.

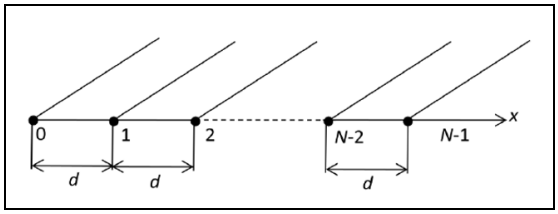
$$|E|=\frac{2E_m}{R_0}\left|\frac{\cos(\frac{\pi}{2}\cos\theta)}{\sin\theta}\right|^2\left|\cos\frac{\psi}{2}\right| \tag{3.7}$$

Eşitlik 3.7'den de görüldüğü gibi dizinin ışıma paterni diziyi oluşturan antenlerden herhangi birinin ışıma paterni ile dizi faktörünün çarpımına eşit olmaktadır.

3.3 Düzgün Doğrusal Diziler

Bir doğru boyunca eşit aralıklarla yerleştirilmiş özdeş ve eşit büyüklükte akımlarla beslenen antenlerden oluşan ve antenleri arasında düzgün olarak artan faz

kaymalarına sahip olan dizilere doğrusal diziler denir [3]. Böyle bir dizi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Genel bir doğrusal dizi

Doğrusal dizilerin dizi paterni de patern çarpım ilkesi kullanılarak hesaplanır. Bir doğrusal dizinin dizi faktörü Eşitlik 3.8'de gösterilmiştir.

•Eğer antenler x eksenine yerleştirilmiş iseler;

$$A(\mathrm{n}) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jkd_n} \tag{3.8}$$

•Eğer antenler y eksenine yerleştirilmiş iseler;

$$kd_n = nkd \sin\theta \cos\phi \tag{3.9}$$

•Eğer antenler z eksenine yerleştirilmiş iseler;

$$kd_n = nkd \cos\theta \tag{3.10}$$

olacaktır.

Doğrusal bir dizinin genelleştirilmiş dizi faktörü ifadesi Eşitlik 3.11'de gösterildiği gibidir.

$$\left|A(\psi)\right| = \frac{1}{N}\left|\frac{\sin\frac{N\psi}{2}}{\sin\frac{\psi}{2}}\right| \tag{3.11}$$

3.3.1 Doğrusal Dizilerin Temel Özellikleri

Eşitlik 3.11'de verilen ifadeden çeşitli önemli özellikler çıkarılabilir. İstenilen ışıma karakteristiklerinin elde edilebilmesi için bu özelliklerin kullanılması gerekir.

3.3.1.1 Ana Demet Doğrultusu

Ana demet doğrultusu bir dizi antenin kazancının yani ışıdığı gücün maksimum olduğu doğrultudur. Ana demet doğrultusu, dizinin maksimum ışıma yaptığı açı değerlerini gösterir.

ψ 'yi sıfır yapan θ ve/veya ϕ açı değerleri ana demet doğrultusunu gösterir.

Örneğin x eksenine yerleştirilmiş bir dizi için yatay düzlemde ($\theta = 90^o$);

$$\psi = kd\cos\phi \tag{3.12}$$

olacaktır. Burada görüldüğü gibi ψ , $\theta = 90^o$ olduğunda sıfır olacaktır. O halde böyle bir dizinin maksimum kazancı $\phi = 90^o$ 'de oluşur.

3.3.1.2 Sıfır Konumları

Sıfır konumları dizi paterninin sıfır olduğu açı değerleridir. Eşitlik 3.13'te sıfıra eşit olduğunda patern de sıfır olacaktır. Dizi faktörünün sıfır olduğu değerler eşitlik 3.15'te gösterilmiştir.

$$\frac{N\psi}{2} = \mp k\pi, \qquad \mathrm{k} = 1, 2, 3... \tag{3.13}$$

3.3.1.3 Yarım Güç Hüzme Genişliği

Yarım güç hüzme genişliği dizi antenin kazancının en yüksek olduğu noktadan 3 dB düştüğü noktalar arasındaki açı değeridir ve en önemli anten parametrelerinden biridir. Örneğin radar uygulamalarında daha doğru tespit sağlamak amacıyla yarım güç hüzme genişliğinin mümkün olduğunca küçük olması istenir.

3.3.1.4 Yan Kulakçık Konumları

Yan loblar eşitlik 3.13'te pay en büyük olduğunda, yani $\left|\sin(\frac{N\psi}{2})\right| = 1$

olduğunda ortaya çıkan küçük maksimumlardır. Payı en büyük yapan değerler aşağıdaki gibidir.

$$\frac{N\psi}{2} = \mp(2\,\mathrm{m}+1)\frac{\pi}{2}, \quad m = 1,2,3... \tag{3.14}$$

Yan kulakçıklar girişime sebep olduğundan mümkün olduğunca ana hüzmeden düşük seviyede olması istenir.

3.3.1.5 İlk Yan Kulakçık Seviyesi

Bir dizinin ışıma paterninin önemli bir özelliği ana hüzmeye göre ilk yan kulakçık seviyesidir. Tüm yan kulakçıklar olabildiğince düşük seviyede tutulmalıdır.

Böylece ışınan gücün çoğu ana demet doğrultusunda yoğunlaşacak ve yan kulakçık bölgelerine sapmayacaktır. İlk yan kulakçık seviyesinin genliği büyük *N* değerleri için eşitlik 3.17'de gösterildiği gibidir.

$$\frac{1}{N}\left|\frac{1}{\sin\frac{3\pi}{2N}}\right| \cong \frac{1}{N}\left|\frac{1}{\frac{3\pi}{2N}}\right| = \frac{2}{3\pi} = 0.212 \tag{3.15}$$

Logaritmik olarak çok öğeli bir doğrusal dizinin ilk yan kulakçıkları, ana maksimumdan 13.5 dB kadar aşağıdadır. Bu değer *N* büyük olduğu sürece *N*'den hemen hemen bağımsızdır [3].

3.3.2 Görünür Bölge

Dizi faktörü $A(\psi)$, ψ'ye göre periyodiktir ve periyodu 2π'dir. Bu nedenle ψ'yi bir Nyquist aralığında bilmek yeterlidir ($-\pi \le \psi \le \pi$). [1] Ancak ψ'nin gerçek

değişim aralığı $kd = {2d\pi}/{\lambda}$'ya bağlıdır. X eksenine yerleştirilmiş bir düzlemsel dizi için

yatay düzlemde ψ , $\cos\phi$ ile değişir. ϕ 0^0 ile 180^o arasında değiştiği için ψ

değeri -kd ile kd aralığında değişir. Bu değişim aralığı genel olarak görünür bölge olarak tanımlanır.

3.3.3 Izgara Kulakçıklar

$kd > \pi$ yani $d > \lambda/2$ olduğunda $A(\phi)$ görünür bölgeyi bir kez sarar ve daha sonra ikinci bir sarma yapar.

Bu durum ana demetin dışında ızgara adı verilen ve yan kulakçık olmayan kulakçıkların oluşmasına neden olur. Izgara kulakçıkların sayısı $2d/\lambda$ ile bulunabilir. Örneğin antenler arasındaki d mesafesi 2λ olduğunda 4 adet kulakçık oluşacaktır.

Izgara kulakçıkların oluşmaması için antenler arasındaki d mesafesinin dalga boyunun yarısında küçük veya eşit seçilmesi gerekir.

3.4 Düzlemsel Diziler

Düzlemsel diziler, diziyi oluşturan antenlerin tamamının xy, xz veya yz düzleminde yer aldığı dizi yapılarıdır. Düzlemsel diziler iki ana yapıya ayrılabilir. Bunlardan birincisi dikdörtgen veya kare şeklinde yerleştirilmiş antenlerden oluşan düzlemsel dizi yapısıdır. Diğeri ise eş merkezli halkalara yerleştirilmiş antenlerden oluşan düzlemsel dizi yapısıdır [4].

Bir boyutlu doğrusal diziler için geliştirilmiş olan analiz ve sentez teknikleri düzlemsel diziler için genişletilebilir. Ancak bazı pratik uygulamalarda düzlemsel dizilere özgü olan teknikler kullanılmaktadır. Düzlemsel dizilerde dik düzlemlere yerleştirilen antenler arasındaki mesafeler, antenlerin çeşidi, antenlerin sayısı, kullanılan düzlem, anten besleme genlik ve fazları gibi parametreler istenilen ışıma özelliklerini elde edebilmek için değiştirilebilir parametrelerdir.

3.4.1 Düzlemsel Diziler için Dizi Faktörü ve Işıma Örgüsü

Dikdörtgen sınırlı olarak yerleştirilen düzlemsel dizilerde ışıma diyagramı birbirine dik iki doğrusal dizinin ışıma diyagramlarının çarpımından elde edilir. Böylece doğrusal diziler için geliştirilmiş olan tüm yöntemler düzlemsel diziler için geliştirilebilir [5]. xy düzlemine yerleştirilmiş bir düzlemsel dizi için dizi faktörü ifadesi eşitlik 3.16'da gösterildiği gibidir.

$$A(\theta,\phi)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}a_{nm}e^{jnkd\sin\theta\cos\phi}e^{jmkd\sin\theta\sin\phi} \quad (3.16)$$

Burada N, x ekseni boyunca yerleştirilen anten sayısını, M ise y ekseni boyunca yerleştirilen anten sayısını göstermektedir. a_{nm} ise ilgili antenin besleme genliğini ifade etmektedir.

Eğer akım dağılımı ayrılabilirse bu durumda dizi faktörü eşitlik 3.17'de gösterildiği gibi olacaktır.

$$A(\theta,\phi)=\sum_{n=0}^{N-1}a_{n}e^{jnkd\sin\theta\cos\phi} \quad (3.17)$$

Burada;

$$A_x(\theta,\phi)=\sum_{n=0}^{N-1}a_{n}e^{jnkd\sin\theta\cos\phi} \quad (3.18)$$

$$A_y(\theta,\phi)=\sum_{m=0}^{M-1}a_{m}e^{jmkd\sin\theta\sin\phi} \quad (3.19)$$

biçimindedir.

Akım dağılımının ayrılabilir olduğu durum için a_{mn} ifadesi Eşitlik 3.20'de gösterildiği gibidir.

$$a_{nm}=a_n a_m \quad (3.20)$$

xz düzlemine yerleştirilmiş olan düzlemsel bir dizi için dizi faktörü eşitlik 3.21'de ifade edilmiştir.

$$A(\theta,\phi)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}a_{nm}e^{jnkd\sin\theta\cos\phi}e^{jmkd\cos\theta} \quad (3.21)$$

yz düzlemine yerleştirilmiş olan düzlemsel bir dizi için dizi faktörü eşitlik 3.22'de ifade edilmiştir.

$$A(\theta,\phi)=\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}a_{nm}e^{jnkd\sin\theta\sin\phi}e^{jmkd\cos\theta} \quad (3.22)$$

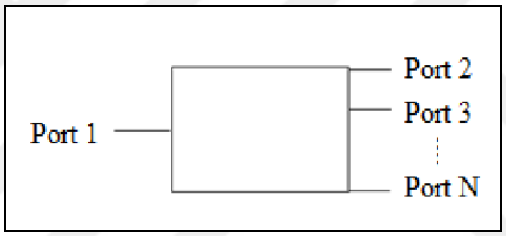
Düzlemsel diziler için ışıma diyagramı ise daha önce bahsedilen patern çarpım ilkesi kullanılarak hesaplanır.

$$F_{dizi}(\theta,\phi) = \mathrm{F}(\theta,\phi)A(\theta,\phi) \tag{3.23}$$

Eşıtlık 3.23'de görülen $F(\theta,\phi)$ ifadesi diziyi oluşturan antenlerden herhangi birinin güç ışıma diyagramıdır.

3.5 Dizi Antenlerin Besleme Sistemleri

Dizi antenlerin birim antenlerin pozisyonları kesinleştikten sonra bu antenler güç bölücü devreler ile birleştirilir. Antenleri tek bir noktaya birleştirecek olan ya da gücü anten sayısı kadar yola ayırabilen besleme sistemleri ile her bir antene gelen sinyalin genliği ile fazı ayarlanabilir. Bu devreler aktif ya da pasif devrelerden oluşabilir. Pasif devrelerden oluşan besleme sistemleri resiprok olup hem alıcı hemde verici anten olarak kullanılabilir. Bu çalışmada tasarımı yapılan besleme sistemi pasif olur çift yönlüdür.



Şekil 3.3 Besleme sistemi

Anten sayısı arttıkça besleme sistemlerinin çıkış sayısı arttığı için, besleme sisteminin üretilebilir ve düşük kayıplı olmasına özen gösterilmelidir. Şerit ve mikroşerit hatlar yüksek kayıplı olduğu için mikrodalga ve milimetrik dalga frekanslarında tasarlanan besleme sistemi dikdörtgen dalga kılavuzlarından yapılması uygundur. [1] [3] [5]

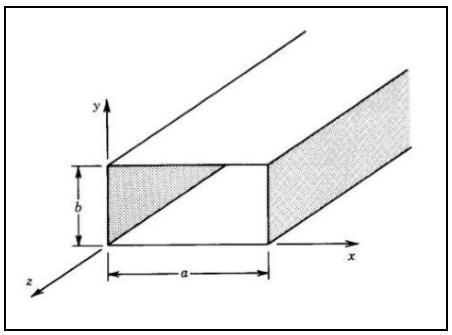
BÖLÜM 4

DALGA KILAVUZLARI VE GÜÇ BÖLÜCÜLERİ

4.1 Dikdörtgen Dalga Kılavuzu

Dalga kılavuzları genelde diktörtgen veya silindirik kesitli borulardan oluşan iletim hatlarıdır. Yüksek geçiren filtre karakteristiğine sahiptirler. Temel olarak aşağıdaki şekildeki gibi sonsuz uzunlukta olup kesitleri a ve b olup içi boş metal boru olarak düşünülebilir.

TEM modunda iletim yapamayan dalga kılavuzları TE ve TM modlarında iletim yapabilmektedir. Metal yapılarından dolayı yüksek güçte sinyalleri iletebilme özelliğine sahip olan dalga kılavuzları ayrıca geniş bantlıdır. Kullanım alanları genellikle mikrodalga ve milimetrik dalga frekanslarındaki uygulamalardır. Daha düşük frekanslarda kullanımı teorik olarak mümkün olmasına rağmen boyutlarından dolayı pratik olmayıp tercih edilmemektedir.



Şekil 4.1 Dikdörtgen kesitli dalga kılavuzu

$$H_x = \frac{-j}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_z}{\partial x \partial z} \tag{4.1}$$

$$H_y = \frac{-j}{\omega\mu\varepsilon}\frac{\partial^2 F_z}{\partial y \partial z} \tag{4.2}$$

$$H_z = \frac{-j}{\omega\mu\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial_z{}^2} + \beta^2\right)F_z \tag{4.3}$$

$$E_x = \frac{-1}{\varepsilon}\frac{\partial F_z}{\partial y} \tag{4.4}$$

$$E_y = \frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial F_z}{\partial x} \tag{4.5}$$

$E_z=0$, (4.6)

Helmholt Denkleminden,

$$\nabla^2 F_z(x,y,z) + \beta^2 F_z(x,y,z) = 0 \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial^2 F_z}{\partial_x{}^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial_y{}^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial_z{}^2} + \beta^2 F_z = 0 \tag{4.8}$$

üstteki iki denklemin çözümü değişkenlerine ayırma metodu ile elde edilebilir.

$$F_z(x,y,z) = f(x)g(y)h(z) \tag{4.9}$$

$$g(y)h(z)\frac{\partial^2 f(x)}{\partial_x{}^2} + f(x)h(z)\frac{\partial^2 g(y)}{\partial_y{}^2} + f(x)g(y)\frac{\partial^2 h(z)}{\partial_z{}^2} + \beta^2 f(x)g(y)h(z) = 0 \tag{4.10}$$

$$\frac{1}{f(x)}\frac{\partial^2 f(x)}{\partial_x{}^2} + \frac{1}{g(y)}\frac{\partial^2 g(y)}{\partial_y{}^2} + \frac{1}{h(z)}\frac{\partial^2 h(z)}{\partial_z{}^2} + \beta^2 = 0 \tag{4.11}$$

$$\frac{1}{f(x)}\frac{\partial^2 f(x)}{\partial_x{}^2} + \frac{1}{g(y)}\frac{\partial^2 g(y)}{\partial_y{}^2} + \frac{1}{h(z)}\frac{\partial^2 h(z)}{\partial_z{}^2} = -\beta^2 \tag{4.12}$$

$\beta^2 = \beta_x{}^2 + \beta_y{}^2 + \beta_z{}^2$ şeklinde ayrıştırırsak,

$$\frac{1}{f(x)}\frac{\partial^2 f(x)}{\partial_x^{\,2}} = -\beta_x^{\,2} \tag{4.13}$$

$$\frac{1}{g(y)}\frac{\partial^2 g(y)}{\partial_y^{\,2}} = -\beta_y^{\,2} \tag{4.14}$$

$$\frac{1}{h(z)}\frac{\partial^2 h(z)}{\partial_z^{\,2}} = -\beta_z^{\,2} \tag{4.15}$$

Şeklinde 3 ayrı diferansiyel denklem ortaya çıkar. Bu diferansiyel denklemler çözüldüğünde,

$$f(x) = C_1 \cos\cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x) \tag{4.16}$$

$$g(y) = C_2 \cos\cos(\beta_y y) + D_2 \sin(\beta_y y) \tag{4.17}$$

$$h(z) = A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{j\beta_z z} \tag{4.18}$$

$$F_z(x,y,z) = \left[C_1 \cos\cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)\right] \left[C_2 \cos\cos(\beta_y y) + D_2 \sin(\beta_y y)\right]\left[A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{j\beta_z z}\right] \tag{4.19}$$

Sonsuz uzunluktaki diktörtgen dalga kılavuzunda denklemi basitleştirmek için $B_3 = 0$ alabiliriz [**1**]

$$F_z^{+}(x,y,z) = \left[C_1 \cos\cos(\beta_x x) + D_1 \sin(\beta_x x)\right]\left[C_2 \cos\cos(\beta_y y) + D_2 \sin(\beta_y y)\right]\left[A_3 e^{-j\beta_z z}\right] \tag{4.20}$$

Dalga kılavuzu yapısında sınır koşullarını çözersek.

Mükemmel elektrik iletken bir malzemede malzeme yüzeyinde teğet elektrik alan ile dik manyetik alan sıfıra eşittir.

$$E_x(0 \le x \le a, y = 0, z) = 0 \tag{4.21}$$

$$E_x(0 \le x \le a, y = b, z) = 0 \tag{4.22}$$

$$E_z(0 \le x \le a, y = 0, z) = 0 \tag{4.23}$$

$$E_z\left(0 \le x \le a, y = b, z\right) = 0 \tag{4.24}$$

$$E_y\left(x = 0, 0 \le y \le b, z\right) = 0 \tag{4.25}$$

$$E_y\left(x = a, 0 \le y \le b, z\right) = 0 \tag{4.26}$$

$$E_z\left(x = 0, 0 \le y \le b, z\right) = 0 \tag{4.27}$$

$$E_z\left(x = a, 0 \le y \le b, z\right) = 0 \tag{4.28}$$

$$E_x^{+}\left(x, y, z\right) = -A_3 \frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1 \cos\cos\left(\beta_x x\right) + D_1 \sin\sin\left(\beta_x x\right)\right] \left[-C_2 \sin\sin\left(\beta_y y\right) + D_2 \sin\sin\left(\beta_y y\right)\right] e^{-j\beta_z z} \tag{4.29}$$

$0 \le x \le a, y = 0, z$ için,

$$E_x^{+}\left(0 \le x \le a, y = 0, z\right) = -A_3 \frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1 \cos\cos\left(\beta_x x\right) + D_1 \sin\sin\left(\beta_x x\right)\right] \left[-C_2\left(0\right) + D_2\left(1\right)\right] e^{-j\beta_z z} \tag{4.30}$$

ise, $D_2=0$

$0 \le x \le a, y = 0, z$ için,

$$E_x^{+}\left(0 \le x \le a, y = 0, z\right) = -A_3 \frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1 \cos\cos\left(\beta_x x\right) + D_1 \sin\sin\left(\beta_x x\right)\right] \left[-C_2 \sin\sin\left(\beta_y b\right)\right] e^{-j\beta_z z} = 0 \tag{4.31}$$

ise,

$$\sin\left(\beta_y b\right) = 0 \text{ ve } \beta_y b = n\pi \; n = 0, 1, 2, \ldots \tag{4.32}$$

$$\beta_y = \frac{n\pi}{b} \quad n = 0, 1, 2, \ldots \tag{4.33}$$

$x = 0, 0 \le y \le b = 0, z$ için,

$$E_x^{+}\left(x = 0, 0 \le y \le b = 0, z\right) = -A_3 \frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[C_1\left(1\right) + D_1\left(0\right)\right] \left[-C_2 \sin\sin\left(\beta_y y\right) + D_2 \sin\sin\left(\beta_y y\right)\right] e^{-j\beta_z z} = 0 \tag{4.34}$$

$C_1 = 0$ olur.

$$x = a, 0 \le y \le b = 0, z \tag{4.35}$$

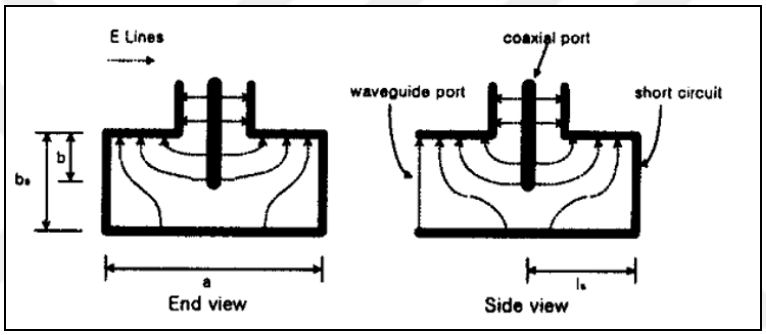
$$E_x^{+}(x,y,z) = -A_3 \frac{\beta_y}{\varepsilon}\left[D_1 \sin\sin(\beta_x a)\right] \left[-C_2 \sin\sin(\beta_y y) + D_2 \sin\sin(\beta_y y)\right] e^{-j\beta_z z} = 0 \tag{4.36}$$

$$\sin(\beta_x a) = 0 \tag{4.37}$$

$$\beta_x a = m\pi \;\; m = 0,1,2,\ldots \tag{4.38}$$

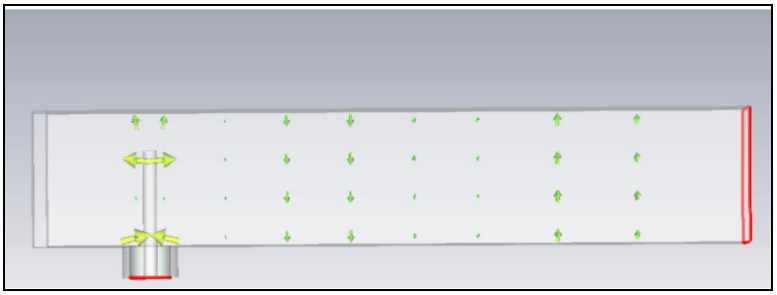
$$\beta_x = \frac{m\pi}{a} \quad m = 0,1,2,\ldots \tag{4.39}$$

4.2 Koaksiyel Beslemeli Dalga Kılavuzu



Şekil 4.2 Pin İle Beslenmiş Dalga Kılavuzu

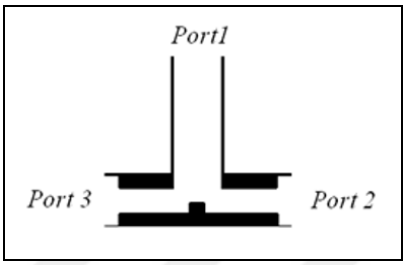
Koaksiyel kablonun canlı ucu dalga kılavuzunun arka duvarına λg /4 uzaklığında olacak şekilde monte edilerek dalga kılavuzu içinde TE modunda propagasyon yapmaya başlar.



Şekil 4.3 Dalga kılavuzu TE_{10} modunda elektrik alan dağılımı

4.3 E-Düzlem Dalga Kılavuzu Bölücü

Aşağıdaki şekilde görülen port 1'den alınan gücü port 2 ve port 3'ten verir. Port 2 ve port 3 ten çıkan sinyaller birbirine göre 180 derece faz farklı olur. Çıkış genlikleri aynı ya da farklı olabilir. Giriş ve çıkışlarında dalga kılavuzunun genişlikleri aynıdır. T-Junction'un ayrıldığı bölümde dalga kılavuzunun dar genişlikte olması empedans uyumu sağlar[3].



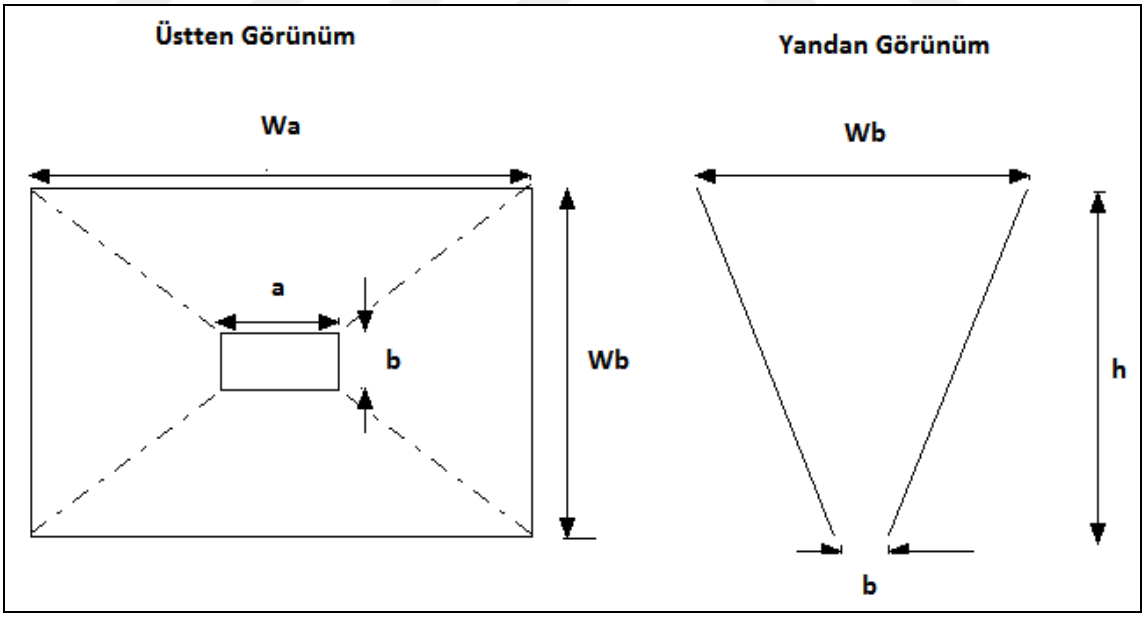
Şekil 4.4 E-düzlem dalga kılavuzu güç bölücü

BÖLÜM 5

SİMÜLASYON VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

5.1 Birim Eleman Tasarımı

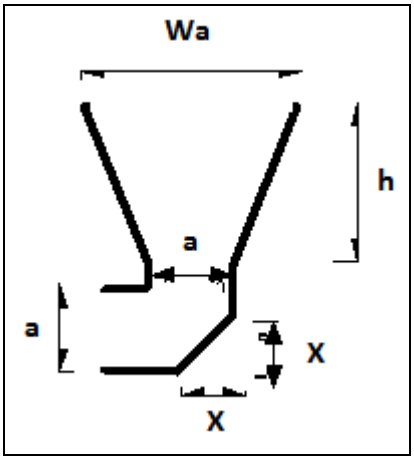
Birim horn anten elemanın tasarımı yapılırken dizi haline geldiğinde HPBW değeri azimutta ve elevasyonda 7 derece olacak şekilde ve dizinin açıklık veriminin mümkün olan en yüksek açıklık verimine sahip olacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 5.1 Birim Horn anten

Horn antende Wa=35 mm Wb=32 mm h=32 mm şeklinde tasarımı yapılmıştır. Dalga kılavuzu standart dalga kılavuzu yerine dizi antenin besleme sistemi tasarımı için kesim

frekansı çalışılan frekans bandının aşağısından olacak şekilde küçük olarak seçilmiştir. Dalga kılavuzunda a=14 mm ve b=6 mm olarak tasarımı yapılmıştır.

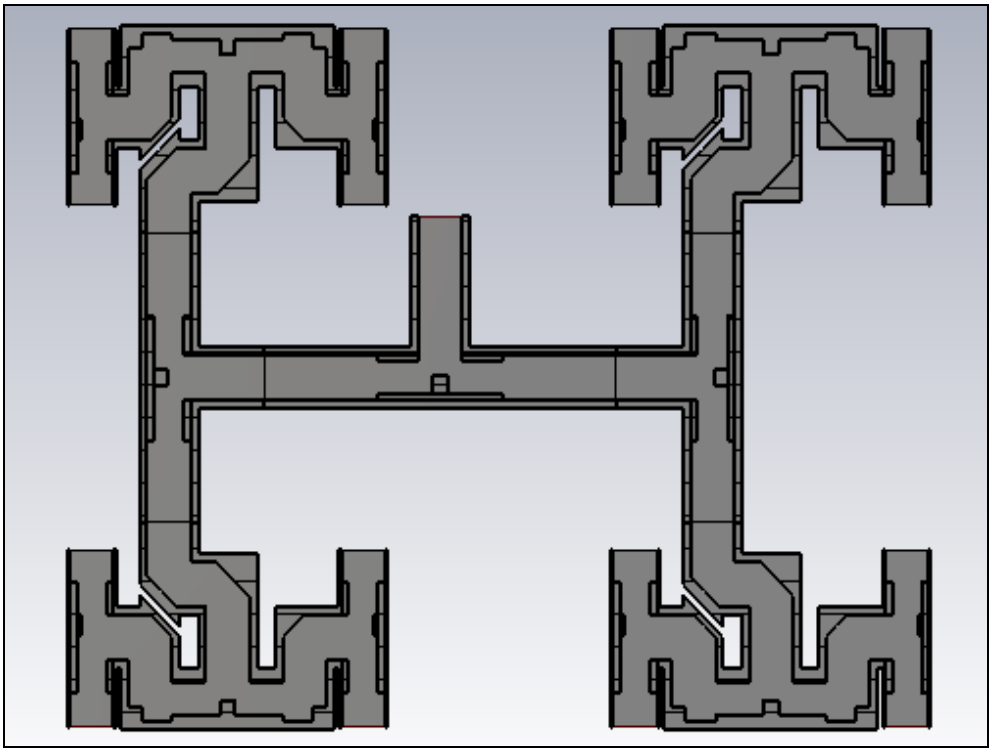


Şekil 5.2 Birim Horn Anten Kesiti

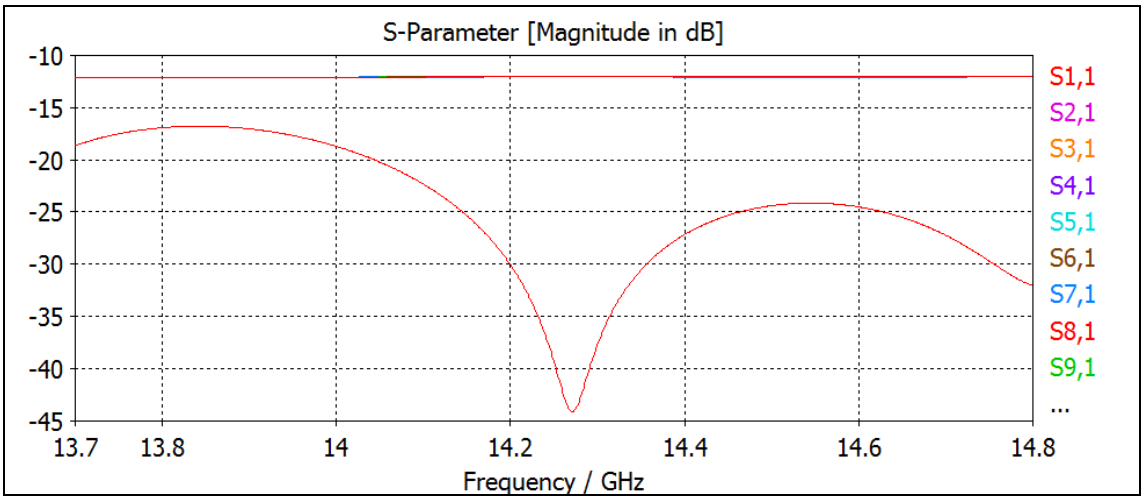
5.2 4x4 Elemanlı Horn Dizi Tasarımı

5.2.1 Besleme Sistemi

Besleme sistemi 4x4 çıkışlı, çıkışlar eşgenlik ve antenler eşfazla beslenecek şekilde tasarlanmıştır.



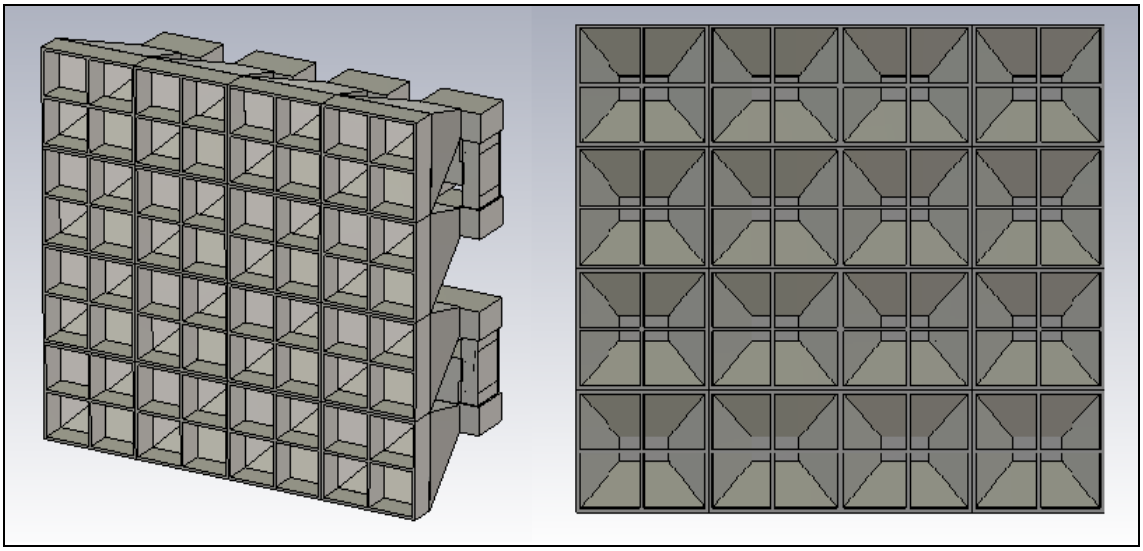
Şekil 5.3 4x4 elemanlı dizi antenin besleme sistemi yapısı



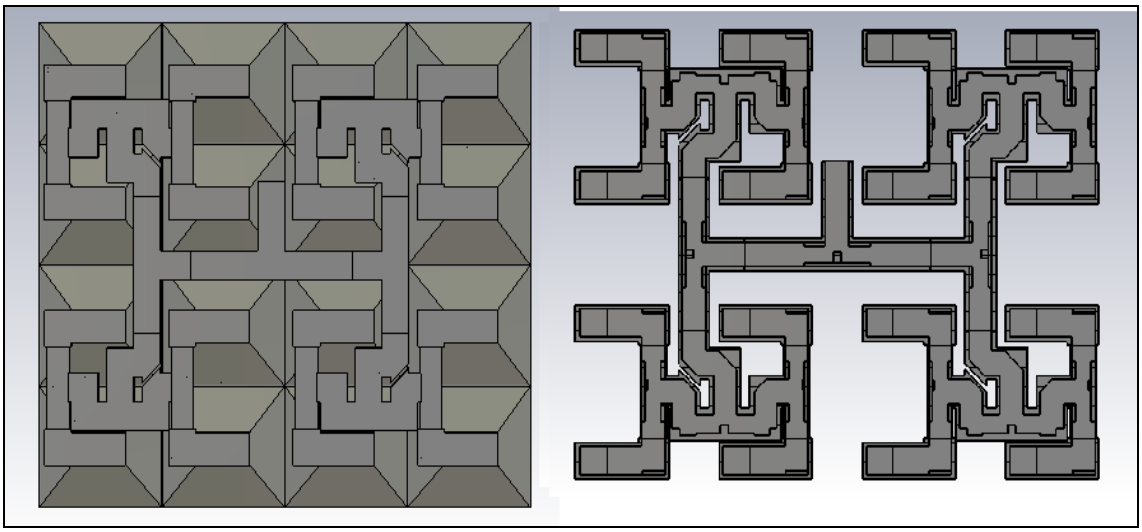
Şekil 5.4 4x4 elemanlı dizi antenin besleme sisteminin s-parametre değerlerinin CST simülasyon sonucu

5.3 Grating Lob Bastırılması

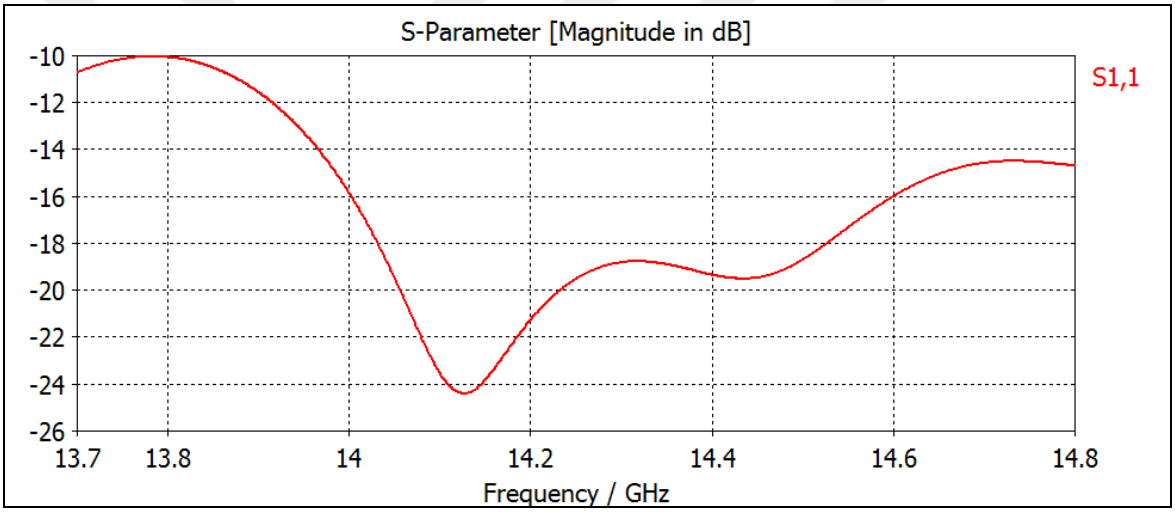
Tasarımı yapılan ve birim elemanları eşfaz beslenen horn dizi antende birim horn anten açıklığı bir dalga boyundan büyük olmasından dolayı ışıma örüntüsünde grating lob oluşmuştur. Grating lob birim anten açıklığına yerleştirilen ve anten açıklığını 4 eşit parçaya bölen ızgara yapısı ile bastırılmıştır. Bu tip ızgara yapıları grating lobları bastırabildiği gibi anten kazancını arttırabilmektedir.[5]



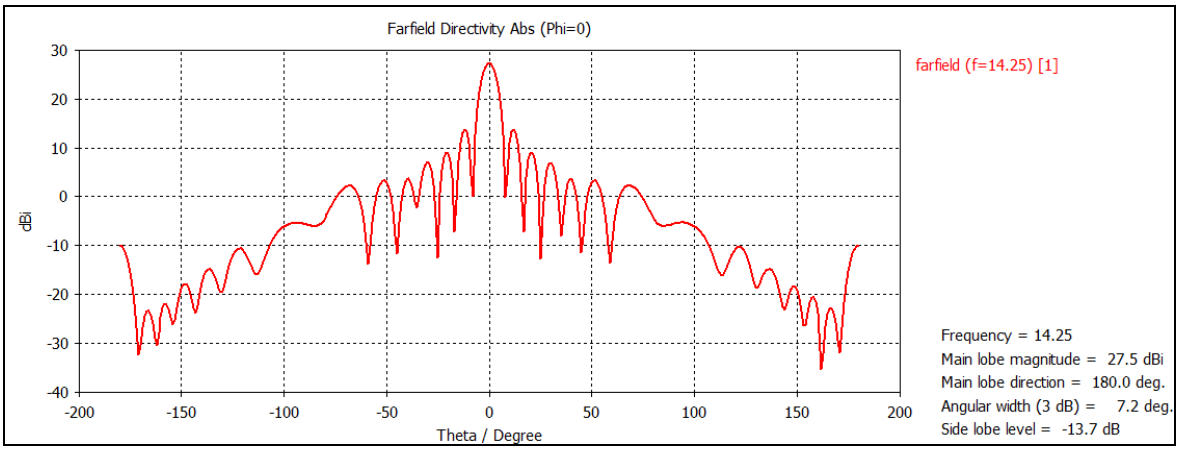
Şekil 5.5 4x4 elemanlı dizi antenin perspektif ve üstten görünümü



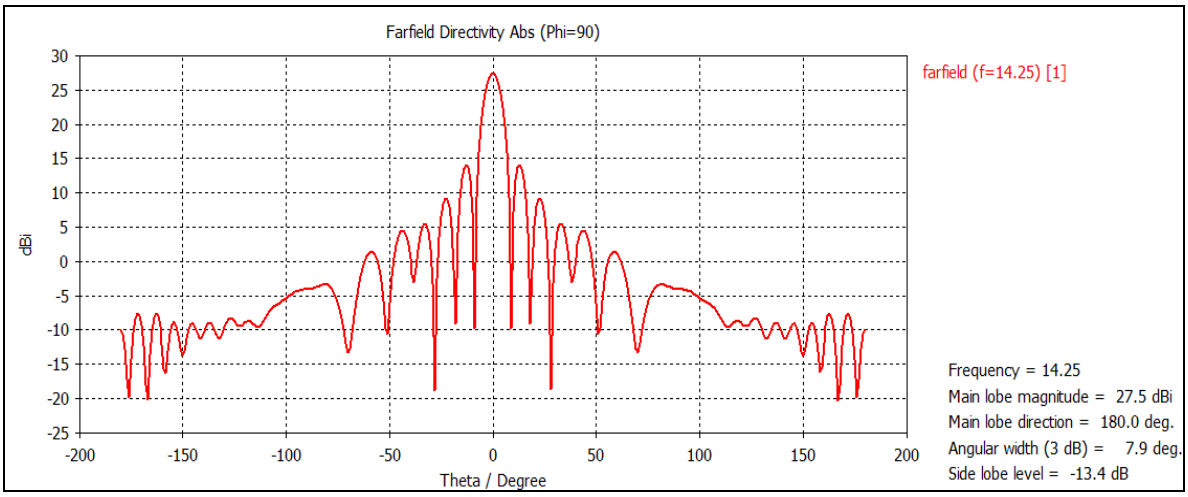
Şekil 5.6 4x4 elemanlı dizi antenin alttan görünümü ve besleme siteminin kesit görünüşü



Şekil 5.7 4x4 elemanlı dizi antenin s-parametreleri değelerinin CST simülasyon sonucu



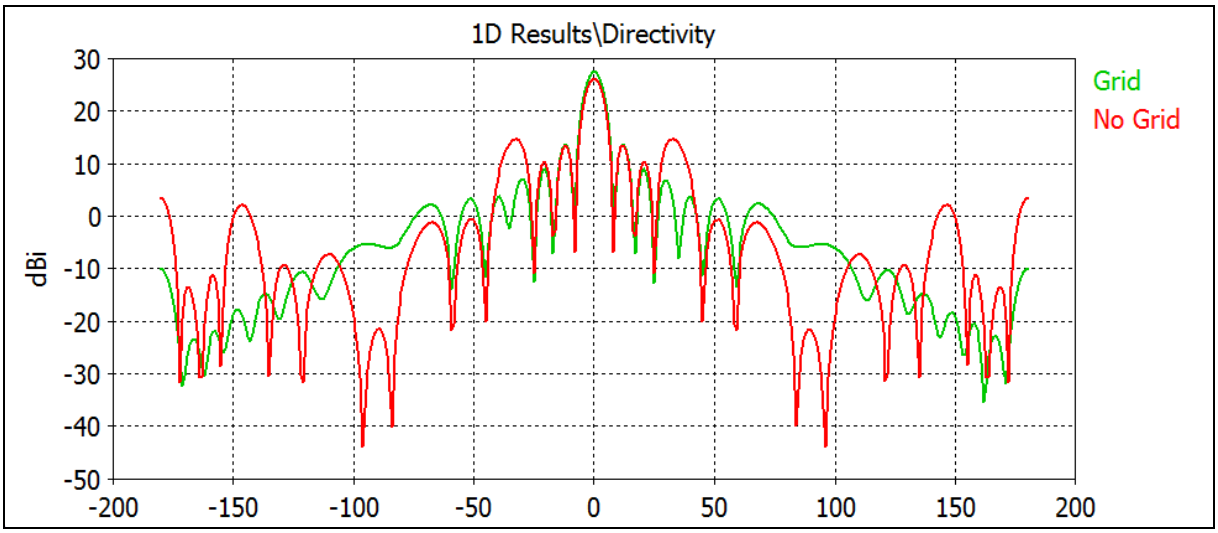
Şekil 5.8 4x4 elemanlı horn dizi antenin 14.25 GHz de ışıma örgüsü



Şekil 5.9 4x4 elemanlı horn dizi antenin 14.25 GHz de ışıma örgüsü

Çizelge 5. 1 dizi anten kazancının 14.25 GHz frekansında anten sayısına göre değişim tablosu

Anten Sayısı	Anten Kazancı (dB)
1	15.2
2	18.2
4	21.4
8	24.4
16	27.4



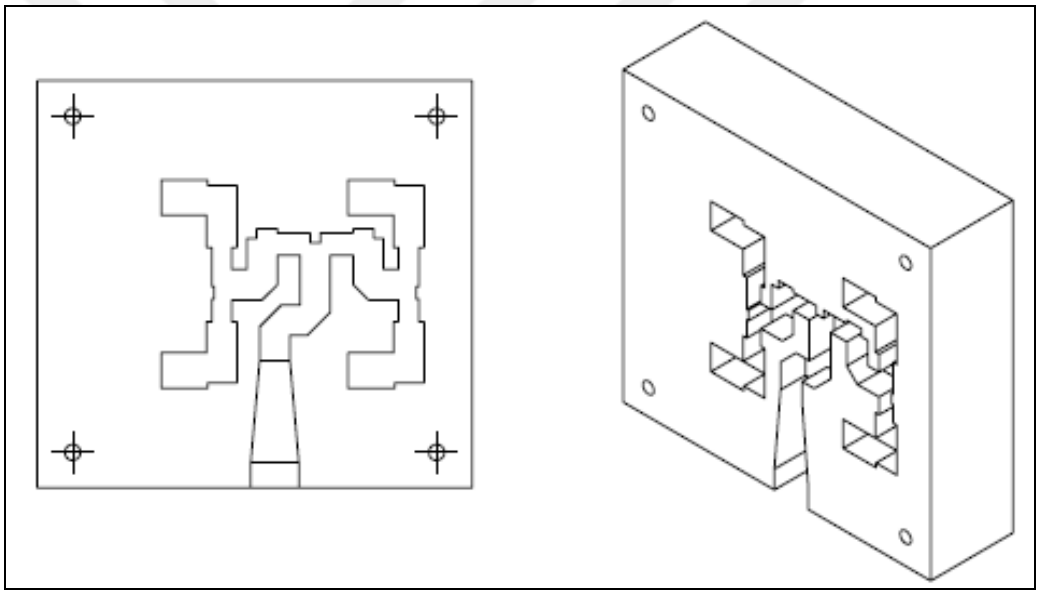
Şekil 5.10 4x4 elemanlı horn dizi antenin 14.25 GHz de ışıma örgüsünde ızgara yapısının grating lob bastırılmasındaki etkisi

5.4 Anten Üretimi ve Ölçümü

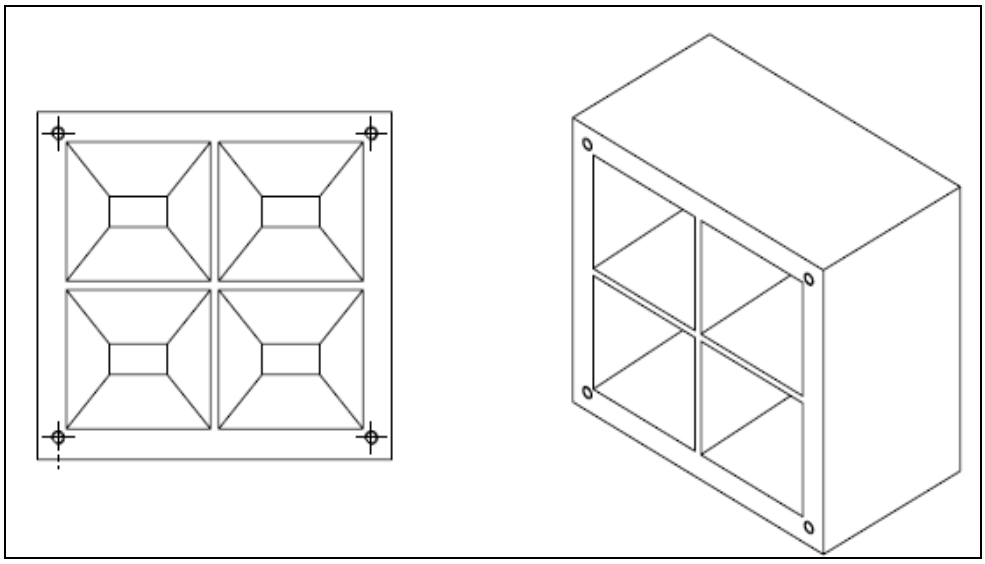
5.4.1 Prototip Anten Üretimi

Kesitleri a ve b olan TE_{10} modunda yayılım yapan diktörtgen dalga kılavuzu üretim teknolojilerine bakıldığında tek parça halinde üretimin çok zor olduğu görülmektedir. Bu yüzden birbirine vidalanarak birleştirilecek iki ayrı parçadan üretilmesi gereken dalga kılavuzunda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar olmaktadır.

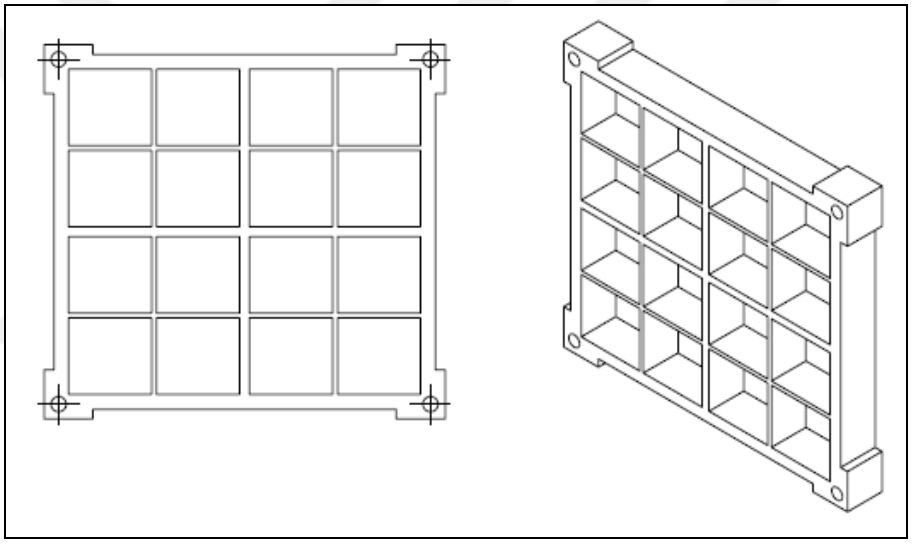
Üretilen dalga kılavuzunda yüzey prüzlülüğü ve akım dağılımındaki süreksizlikler kayıplara sebeb olabilmektedir. Dalga kılavuzu üretilirken akım yoğunluğunun en düşük olduğu yerden iki parçaya ayrılması kayıpları en aza indirgeyecektir. [3]. 2x2 Horn dizi anten üretilip ölçüm sonuçları benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



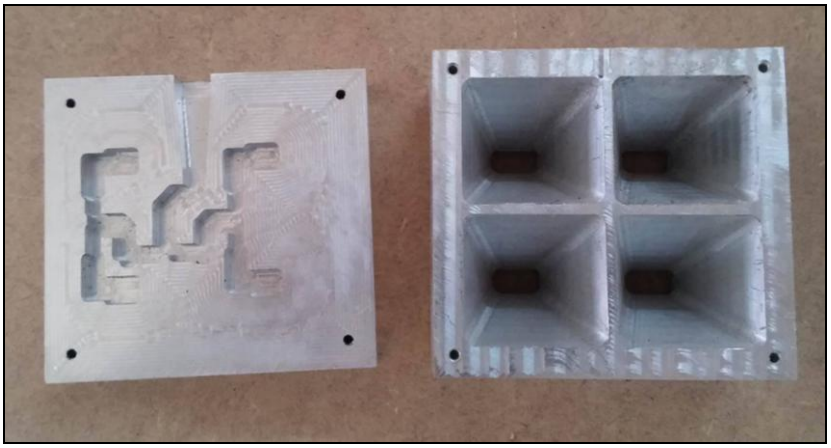
Şekil 5.12: Anten Prototipinin Alt Kısmının Teknik Resim Çizimi



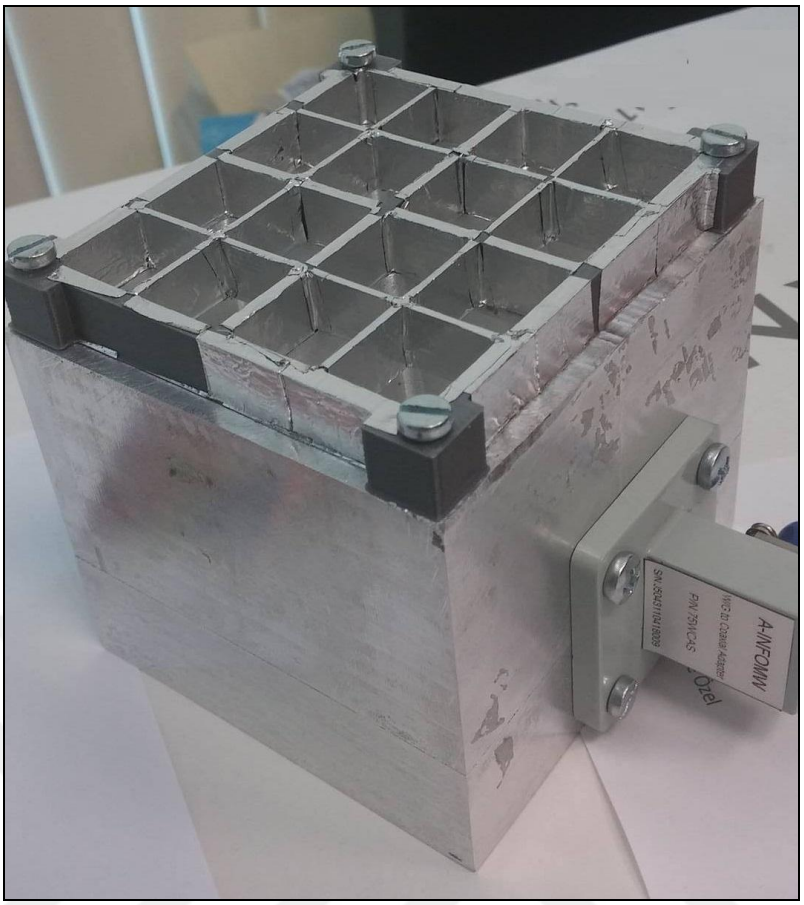
Şekil 5.12 Anten Prototipinin Üst Kısmının Teknik Resim Çizimi



Şekil 5.13 Anten Prototipinin Izgara Kısmının Teknik Resim Çizimi



Şekil 5.14 Anten Prototipi

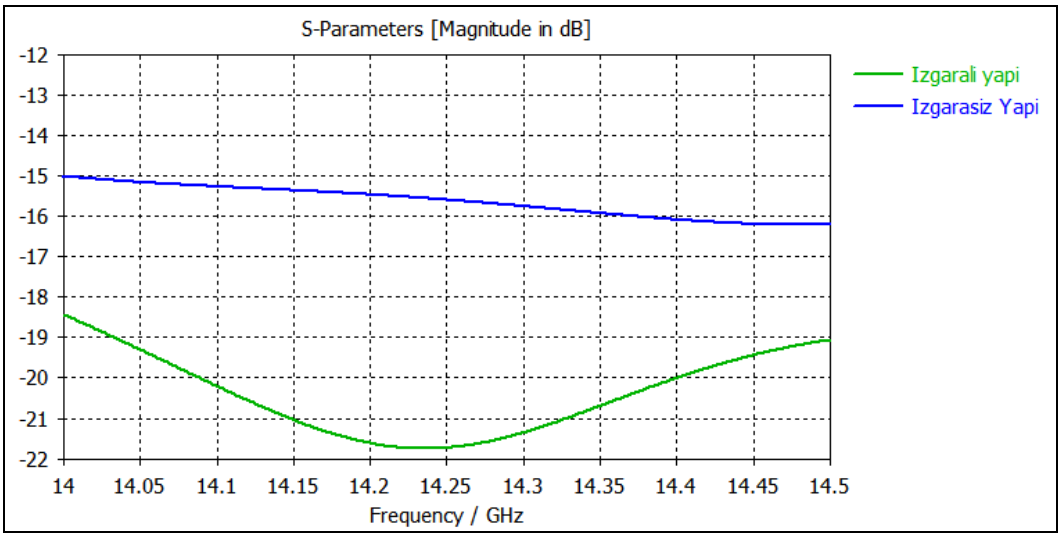


Şekil 5.15 Anten Prototipi

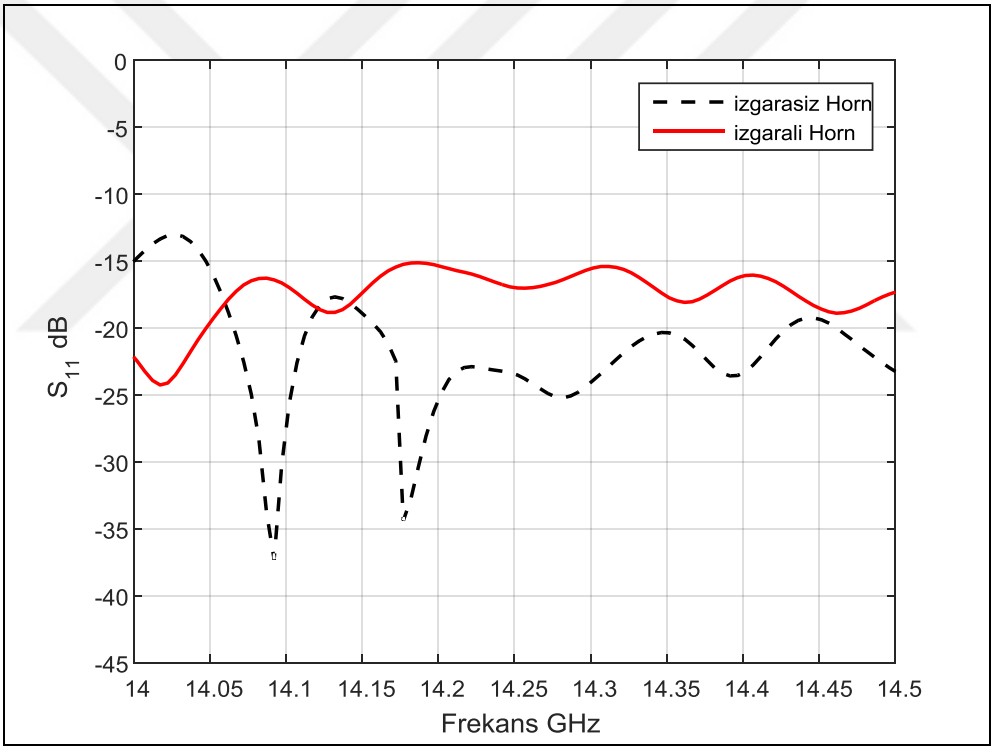
Tasarımı yapılan anten alüminyum bloktan freze ile işletilerek dalga kılavuzundan oluşan besleme devreleri iki parçaya ayrılmış şekilde üretilmiştir. Gelen prototip dalga kılavuzu çıkışına standart WR75 dalga kılavuzu adaptörü takılarak S-parametreleri, ışıma paterni ve anten kazancı ölçümü yapılmıştır. Frezeden kaynaklı dalga kılavuzu iç yüzeyinde prüzlülükten ve dalga kılavuzundan oluşan besleme ağı devresinin iki parça olmasından dolayı dalga kılavuzunda akım dağılımındaki süreksizliklerden meydana gelen yol kaybı oluşmuştur.

5.4.2 Prototip Anten Ölçümü

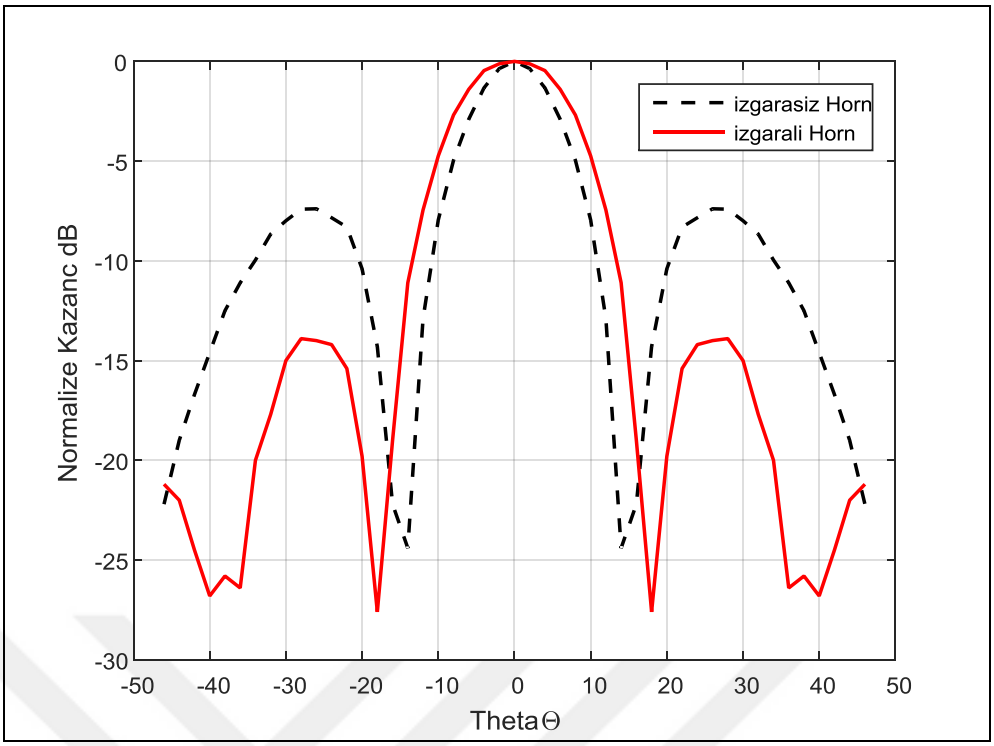
Anten prototipi yapılırken anten çıkışı WR75 dalga kılavuzu boyutlarında olacak şekilde tasarlanmıştır, böylece WR75 dalga kılavuzundan SMA tipi konektöre geçiş yapan adaptör takılarak network analizörde s-parametreleri değerlerine bakılmıştır.



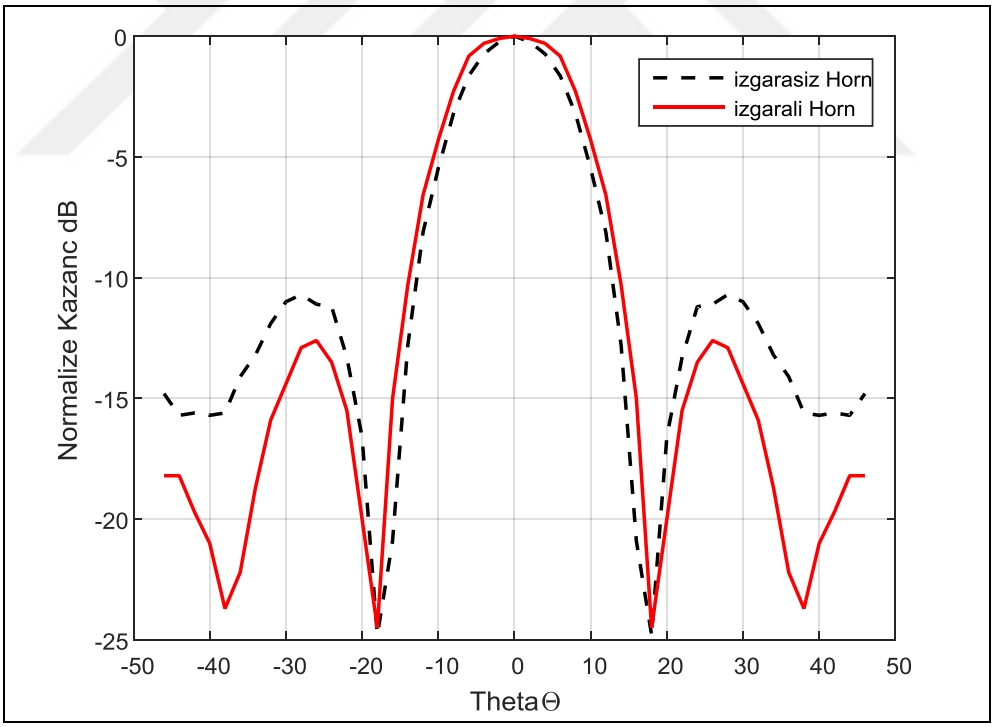
Şekil 5.16 2x2 Horn Dizi Anten Modelinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken S11Benzetim Sonuçları



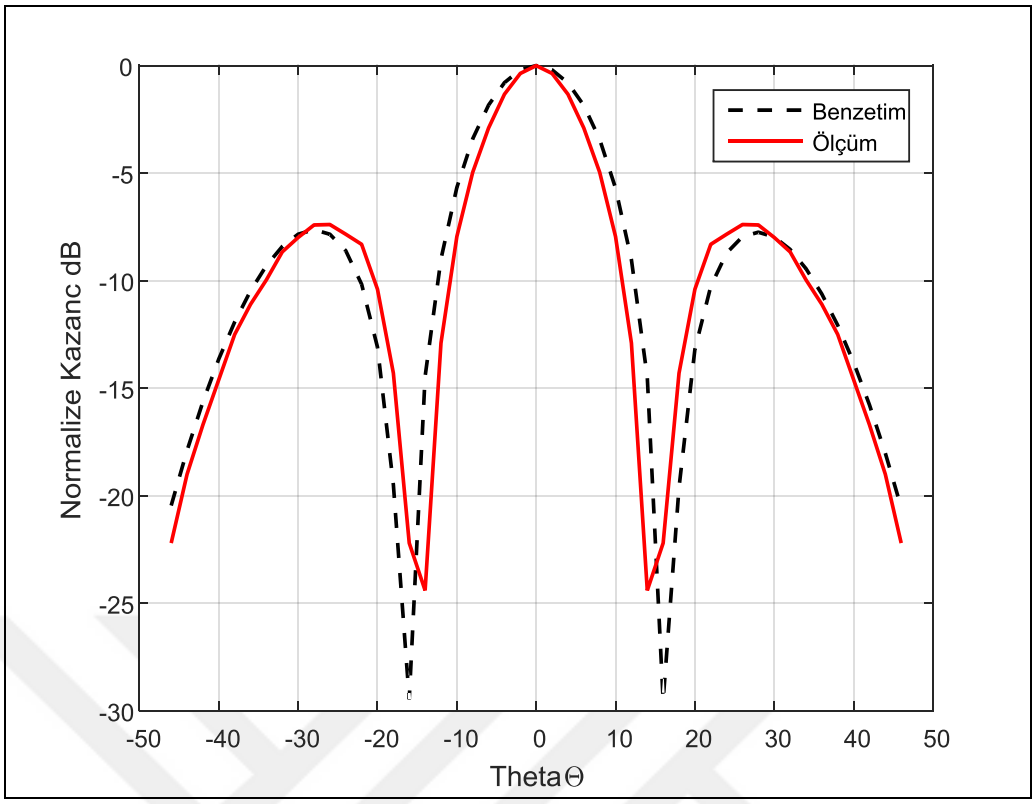
Şekil 5.17 2x2 Horn Dizi Anten Modelinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken S11 Ölçüm Sonuçları



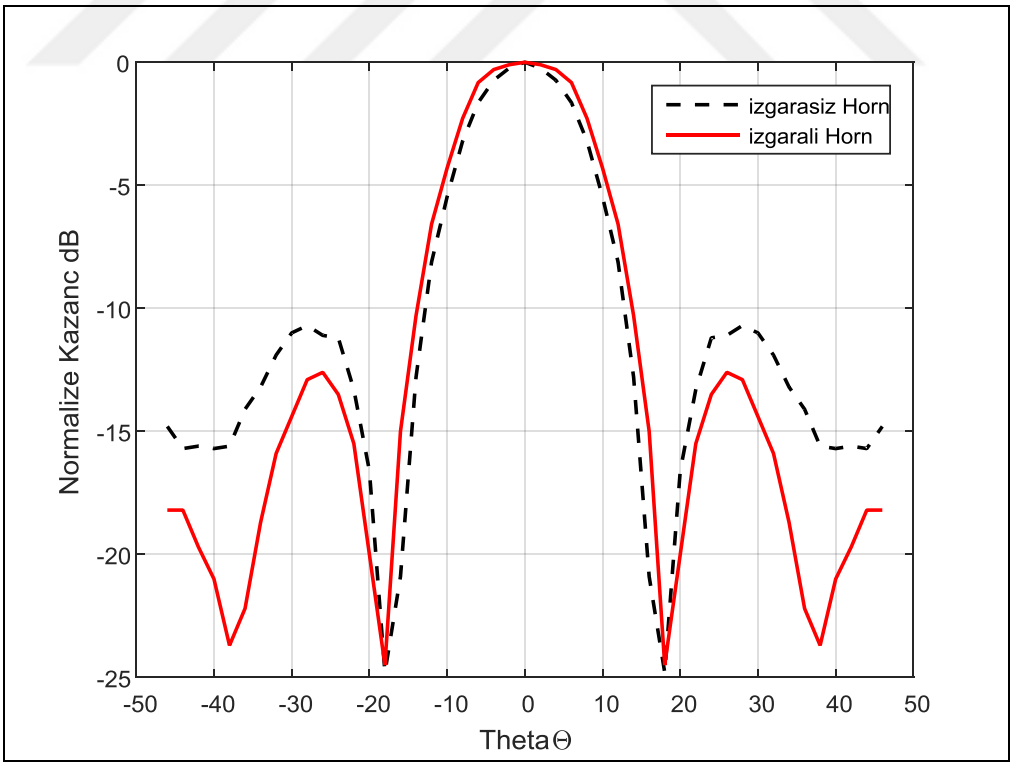
Şekil 5.18 2x2 Horn Dizi Anten Prototipinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken H Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları



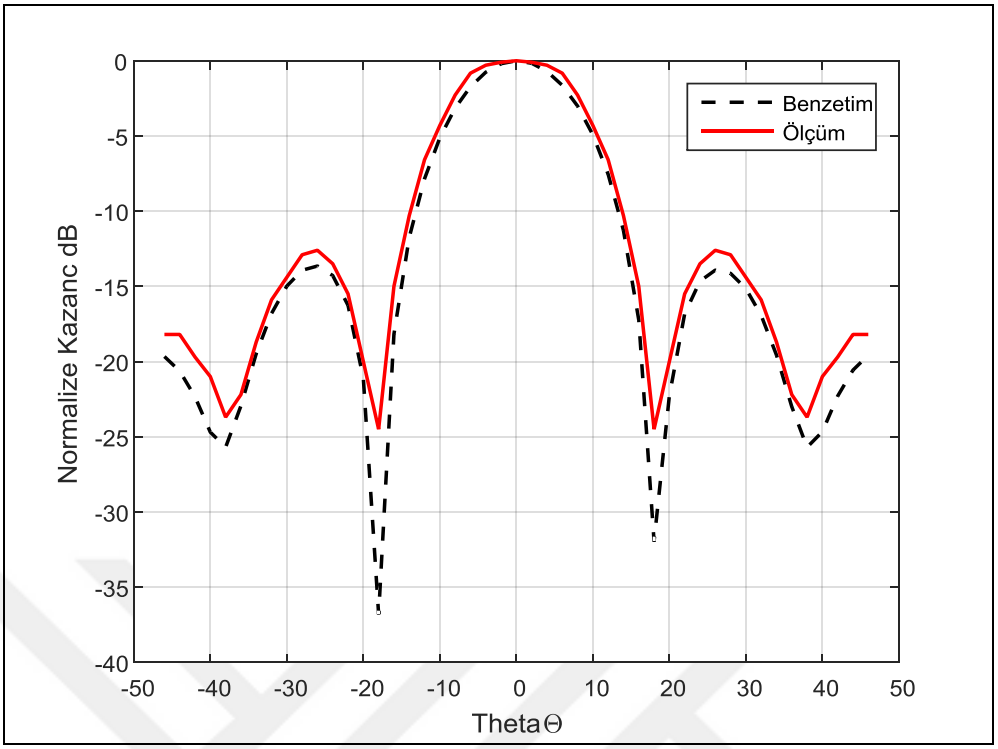
Şekil 5.19 2x2 Horn Dizi Antenin Izgaralı Yapıda iken H Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması



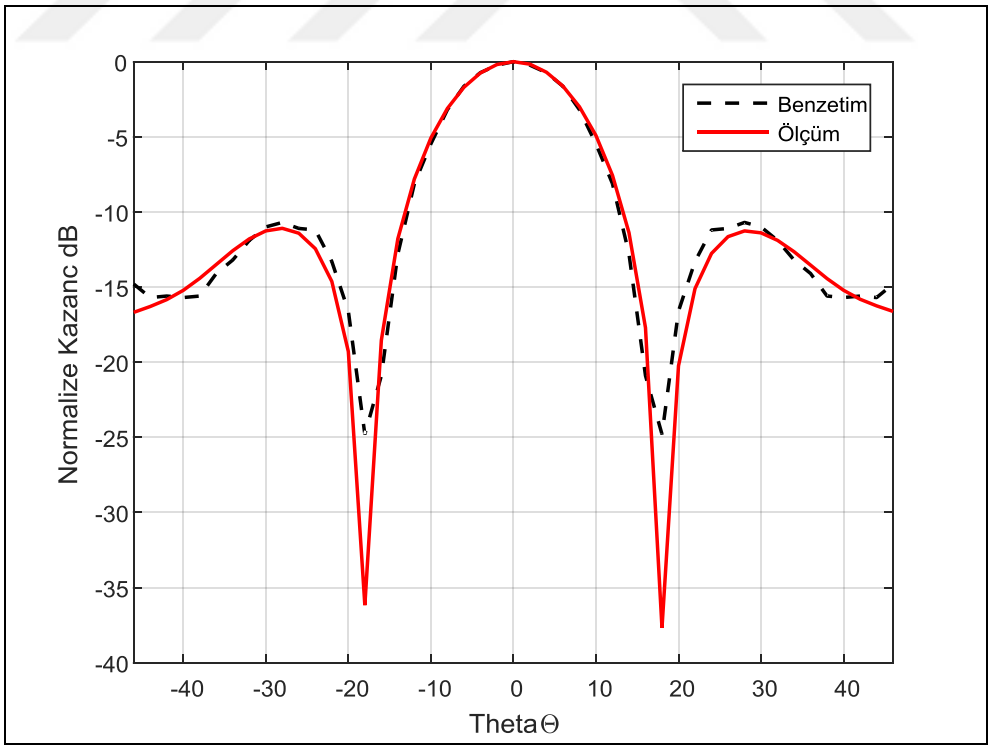
Şekil 5.20 2x2 Horn Dizi Antenin Izgarasız Yapıda iken H Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması



5.21 2x2 Horn Dizi Anten Prototipinin Izgaralı ve Izgarasız Yapıda iken E Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları



Şekil 5.22 2x2 Horn Dizi Antenin Izgaralı Yapıda iken E Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması



Şekil 5.23 2x2 Horn Dizi Antenin Izgarasız Yapıda iken E Düzlem Normalize Işıma Örüntüsü Ölçüm sonuçları Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Karşılaştırılması

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 14-14.5 GHz frekansları arasında çalışan horn dizi anten tasarımı yapılıp gerçeklendikten sonra ölçülmüştür. Anten dizilimi 4x4 şeklinde olduğundan eşit faz ve genlik çıkışı veren E-düzlem dalga kılavuzu güç bölücüler birleştirilerek 16 çıkışlı eşit faz ve genlik değeri veren besleme sistemi tasarımı yapılıp 2x2 dizi antenin üretimi ve ölçümü yapılmıştır.

Birim anten açıklık boyutları dalga boyundan büyük olduğu için ızgara kulakçık oluşumu gözlenmiştir. S-parametreleri ölçüm değerleri simülasyon değerleriyle tutarlı olup, kazanç değerleri, üretim hassasiyetlerinden kaynaklanan hatalar ve yüzey prüzlülüğünden dolayı kayıplar meydana gelmiştir.

KAYNAKLAR

[1] Balanis, C. A.,(2005), Antenna Theory Analysis and Design 3rd ed., John Wiley & Sons, New York

[2] Dubrovka, F.F. , Marchenko, V.V. , Ryabkin, Y.V. ve Stepanenko, P.Ya., (2005), "A broadband linear in-phase horn antenna array with slant polarization" Antenna Theory and Techniques, 5th International Conference

[3] Sehm, Tomas, Lehto, Arto ve Raisanen, A.V. , (2002), "A high-gain 58-GHz box-horn array antenna with suppressed grating lobes" Antennas and Propagation, IEEE Transactions

[4] Goto, J., Yamaguchi, S., Tanaka, M. ve Takahashi, T., (2013), "An injection-molded circular polarized horn array antenna with low axial ratio" Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference

[5] R. X. Zhang, (2013), Z. M. Xie ve Q. X. Chu "A New Horn Array Feed for Parabolic Cylindrical Reflector Antenna" A New Horn Array Feed for Parabolic Cylindrical Reflector Antenna

[6] Warren L. Stutzman ve Gary A. Thiele (June 2013)," Antenna Theory and Design", 3rd Edition

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Sezgin ÖRDEK

Doğum Tarihi ve Yeri :05/07/1987 ANTAKYA

Yabancı Dili : İNGİLİZCE, ARAPÇA

E-posta :sezginordek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Hacı Ali Nurlu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2015-Devam Ediyor	Ctech Bilişim Teknolojileri A.Ş	Donanım Mühendisi
2013-2014	Meteksan Savunma Sanayii A.Ş	Elektromanyetik Tasarım Mühendisi
2010-2013	Neta Elektronik A.Ş	RF Tasarım Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Ordek, S., Kizilay, A.," Horn array antenna design for Ku-band applications", 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 351 - 354, 26-28 Nov. 2015, Bursa, DOI: 10.1109/ELECO.2015.7394505