

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN ANTEN  
DİZİLERİ ARASINDAKİ KARŞILIKLI KUPLAJIN  
AZALTILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ahmet Hüsrev İPEKLİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hilmi  
NİŞANCI**

**Ocak 2021**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

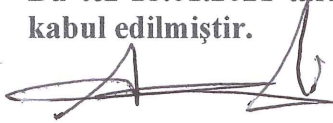
HAVA ARAÇLARINDA KULLANILAN ANTEN  
DİZİLERİ ARASINDAKİ KARŞILIKLI KUPLAJIN  
AZALTILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

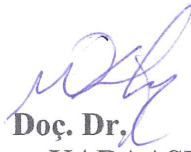
Ahmet Hüsrev İPEKLİ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

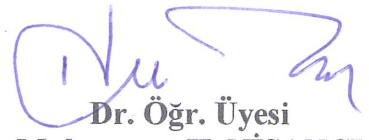
Bu tez 25.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Aşkın DEMİRKOL  
Jüri Başkanı



Doç. Dr.  
Muharrem KARAASLAN  
Üye



Dr. Öğr. Üyesi  
Muhammet H. NİŞANCI  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ahmet Hüsrev İPEKLI

./././....



## TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen saygıdeğer babama, kıymetli anneme ve değerli kardeşlerime, sevgili eşime., göz aydınlığım oğluma, eğitim hayatım boyunca üzerime emeği geçen tüm hocalarıma ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hilmi NİŞANCI'ya teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışma kapsamında prototip üretimi gerçekleőtirilen antenin elektriksel testlerinin yapılmasında Sakarya Üniversitesi Elektromanyetik Araőtırma Merkezi'nin kullanımı konusunda yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU'na da teşekkür ederim

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ .....	x
ÖZET .....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1 Tezin Amacı .....	3
1.2 Teze Genel Bakış .....	4
BÖLÜM 2.	
ANTENLER .....	5
2.1. Antenler .....	5
2.2. Antenlerin Devre Eşdeğerleri .....	6
2.2.1. Verici anten devre eşdeğeri.....	6
2.2.2. Alıcı anten devre eşdeğeri .....	7
2.3. Anten Alan Bölgeleri .....	8
2.4. Anten Parametreleri .....	10
2.4.1. Işıma diagram.....	11
2.4.2. Işıma güç yoğunluğu .....	11
2.4.3. Işıma şiddeti.....	11
2.4.4. Yarı güç hüzme genişliği.....	12
2.4.5. Yönlülük.....	13

2.4.6. Anten ışıma verimi.....	13
2.4.7. Kazanç.....	13
2.4.8. Anten verimi .....	14
2.4.9. Bant genişliği .....	15
2.4.10. Anten polarizasyonu .....	16
2.4.11. Voltaj duran dalga oranı .....	17
2.4.12 Saçılma parametreleri .....	17
2.5. Anten Çeşitleri .....	18
2.5.1. Tel antenler .....	18
2.5.2. Açıklık antenler .....	19
2.5.3. Mikroşerit antenler .....	19
2.5.4. Yansıtıcı antenler .....	19
2.5.5. Dizi antenler .....	20

### BÖLÜM 3.

MİKROŞERİT YAMA ANTENLER .....	22
3.1. Mikroşerit Yama Antenler .....	22
3.2. MYA'ların Yapısı ve Işıma Oluşumu .....	23
3.2.1. MYA'ların yapısı .....	23
3.2.2. MYA'larda elektromanyetik ışımanın oluşumu .....	25
3.3. MYA'ların Besleme Şekilleri .....	26
3.3.1. Koaksiyel prob ile besleme .....	28
3.4. MYA'ların Analiz Yöntemleri .....	30
3.4.1. İletim hattı modeli .....	30
3.4.2. MYA'da saçaklanma etkisi .....	32
3.4.3. İşaret iletkeninin etkin uzunluğu, rezonans frekansı ve etkin genişliği .....	33
3.4.4. MYA tasarımı .....	34

### BÖLÜM 4.

DİZİ ANTENLER ve ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK .....	35
4.1. Dizi Antenler .....	35

4.1.1. Doğrusal anten dizileri .....	36
4.2. Mikroşerit Dizi Antenleri Besleme Ağları .....	37
4.3. Elektromanyetik Girişim .....	39
4.4. Elektromanyetik Uyumluluk .....	41
4.5. Antenlerde Kuplaj etkisi .....	41
4.6. MYA’larda Kuplaj Etkisinin Azaltılması .....	43
4.7. Elektromanyetik Bant Aralığı Yapıları ve Örnek Uygulamalar.....	44
BÖLÜM 5.	
TASARIM VE BENZETİM .....	51
5.1. Computer Simulation Technology (CST).....	51
5.2. Antenna Magus.....	52
5.3. Dizi Anten Tasarımı.....	52
5.4. EBG Yapısı Tasarımı.....	57
5.5. EBG Yapısı İçeren Dizi Anten Tasarımı.....	64
5.6. Dizi Anten İçeren Hava Aracının Nümerik Analizleri.....	73
5.7. Prototip Üretimi ve Elektriksel Testler.....	77
BÖLÜM 6.	
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	85

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

Ae	: Etkin anten açıklığı
AF	: Anten faktörü
BW	: Band Genişliği,
C	: Işık hızı,
D	: Yönlendiricilik
E	: Elektrik alan şiddeti (V/m)
$\epsilon_0$	: Anten verimliliği
EBG	: Elektromanyetik bant aralığı yapıları
$\epsilon_{cd}$	: Anten ışınım verimliliği
EMC	: Elektromanyetik uyumluluk
EMI	: Elektromanyetik girişim
f	: Frekans
$f_r$	: Rezonans frekansı
G	: Kazanç
H	: Manyetik alan şiddeti
h	: Dielektrik taban kalınlığı
$h_e$	: Etkin anten uzunluğu
HPBW	: Yarı güç hüzme genişliği
L	: Mikroşerit antenin yama uzunluğu
$L_F$	: Anten kayıp faktörü
$L_R$	: Anten geri dönüş kaybı
MYA	: Mikroşerit yama anten
$R_F$	: Radyo frekans
U	: Işınım şiddeti
VSWR	: Gerilim duran dalga oranı
$y_f$	: Besleme probunun y konumu



$W$	: Mikroşerit antenin yama genişliği
$x_f$	: Besleme probunun x konumu
$W_{rad}$	: Işıma güç yoğunluğu
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$\mu_0$	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
$\epsilon$	: Elektrik geçirgenlik
$\epsilon_0$	: Boşluğun elektrik geçirgenliği
$\epsilon_{reff}$	: Etkin dielektrik sabiti
$\lambda$	: Dalga boyu
$\Gamma$	: Yansıma katsayısı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir geçiş cihazı olarak anten [1] .....	6
Şekil 2.2. Verici anten devre eşdeğeri [1] .....	7
Şekil 2.3. Alıcı antenin eşdeğer devresi [1] .....	8
Şekil 2.4. Anten alan bölgeleri ve genlik örüntüsünün değişimi [2] .....	9
Şekil 2.5. Anten ışınım diyagramı .....	11
Şekil 2.6. Yarı güç hüzm genişliği.....	12
Şekil 2.7. a) Anten referans terminalleri, b) Yansıma, iletim ve dielektrik kaybı [1].....	15
Şekil 2.8. Bant genişliği .....	15
Şekil 2.9. Anten polarizasyonları a) Doğrusal polarizasyon, b) Dairesel polarizasyon, c) Eliptik polarizasyon .....	16
Şekil 2.10. Örnek iki kapılı devre.....	17
Şekil 2.11. Çeşitli tel anten örnekleri a) Doğrusal tel anten, b) Dairesel tel anten, c) Heliks tel anten.....	19
Şekil 2.12. Horn anten örnekleri a) Konik açıklık anten, b) Piramit açıklık anten, c) Dikdörtgen dalga kılavuzu [1] .....	19
Şekil 2.13. Yansıtıcı antenler a) Düzlem yansıtıcı, b) Köşe yansıtıcı, c) Eğri yansıtıcı.....	20
Şekil 2.14. 2X2 elemanlı mikroşerit dizi anten.....	21
Şekil 3.1. Mikroşerit yama anten.....	24
Şekil 3.2. MYA'larda ışınım oluşumu [1] .....	26
Şekil 3.3. Farklı besleme çeşitlerinin eşdeğer devreleri a) Mikroşerit hat ile besleme b) Koaksiyel prob ile besleme c) Açıklık kuplaj ile besleme d) Yakınlık kuplaj ile besleme [1] .....	27
Şekil 3.4. Koaksiyel prob ile besleme yöntemi .....	29
Şekil 3.5. İletim hattı modeli .....	31

Şekil 3.6. İletim hattı devre modeli [1].....	31
Şekil 3.7. (a) İletim hattı modeli, (b) Saçaklanma etkileri ve elektrik alan çizgileri.....	32
Şekil 4.1. İki elemanlı bir dizi anten [1].....	36
Şekil 4.2. a) Seri hat ile besleme, b) Paralel besleme ağı ile besleme [1].....	38
Şekil 4.3. a) İnceltmiş besleme hatları ile empedans uyumlaştırma b) Çeyrek dalga boyu empedans dönüştürücü ile empedans uyumlaştırma .....	38
Şekil 4.4. EMI örneği .....	40
Şekil 4.5. Antenlerde kuplaj etkisi [1] .....	42
Şekil 4.6. 2D EBG yapısı a) Alttan görünüş, b) Üstten görünüş.....	45
Şekil 4.7. EBG yapılarının $S_{21}$ parametrelerinin frekansa bağlı değişimi.....	45
Şekil 4.8. EBG yapılarının çalışma prensibi.....	46
Şekil 4.9. Şekil 4. 9. a) İki elemanlı dizi anten tasarımı, b) İki elemanlı ve EBG yapısı içeren dizi anten tasarımı [21].....	47
Şekil 4.10. 4,32 GHz çalışma frekansında EBG yapısı içeren 2x1 dizi anten tasarımının a) Üstten görünüşü, b) Alttan görünüşü [22].....	47
Şekil 4.11. 2,45 GHz çalışma frekansında a) EBG yapısı, b) 1x3 EBG yapısı entegre edilmiş dizi anten tasarımı [23].....	48
Şekil 4.12. 6,04 GHz çalışma frekansında a) Önerilen EBG yapısı, b) 1x3 EBG yapısı entegre edilmiş 2x2 alıcı ve verici dizi anten tasarımı [25].....	49
Şekil 4.13. 10 GHz çalışma frekansında elemanları arasına EBG yapıları entegre edilmiş 3x3 dizi anten [26].....	49
Şekil 4. 14. 5.8 GHz çalışma frekansında 1x1EBG2x13 yapısı içeren 2x2 dizi anten [27].....	50
Şekil 5.1. Dizi anten tasarımı .....	53
Şekil 5.2. Tasarlanan dizi antenin benzetim görüntüsü .....	54
Şekil 5.3. Dizi anten tasarımının frekansa bağlı geri dönüş kaybı .....	55
Şekil 5.4. Dizi anten tasarımının çalışma frekansında oluşan elektrik alan dağılımı .....	56
Şekil 5.5. Dizi anten tasarımının çalışma frekansında 3D uzak alan ışınma örüntüsü (a) yan görünüş, (b) üst görünüş ve (c) perspektif görünüş .....	57
Şekil 5.6. 1x1EBG3x1 modelinin a) Görseli, b) Devre eşdeğeri.....	58

Şekil 5.7. 1x1EBG3x1 tasarım parametreleri .....	59
Şekil 5.8. 1x1EBG3x1 tasarımın frekansa bağlı S-parametreleri .....	60
Şekil 5.9. 1x1EBG3x1 tasarımı içeren işaret iletkeni ile EBG tasarımı içermeyen işaret iletkeninin frekansa bağlı $S_{11}$ parametreleri .....	61
Şekil 5.10. 1x1 EBG3x1 tasarımı içermeyen işaret iletkeni ile EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin 3.19 GHz frekansında a) Elektrik alan dağılımı b) Manyetik alan dağılımı.....	62
Şekil 5.11. 1x1 EBG3x1 tasarımı içermeyen işaret iletkeni ile EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin 4.94 GHz frekansında a) Elektrik alan dağılımı b) Manyetik alan dağılımı .....	63
Şekil 5.12. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi anten .....	65
Şekil 5.13. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin a) Üstten görünüşü, b) Alttan görünüşü .....	65
Şekil 5.14. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi anten frekansa bağlı $S_{11}$ parametreleri .....	66
Şekil 5.15. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin frekansa bağlı $S_{21}$ parametreleri .....	67
Şekil 5.16. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüsü .....	67
Şekil 5.17. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten .....	68
Şekil 5.18. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten (a) ön görünüş, (b) arka görünüş .....	69
Şekil 5.19. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten frekansa bağlı $S_{11}$ parametreleri .....	69
Şekil 5.20. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten frekansa bağlı $S_{21}$ parametreleri .....	70
Şekil 5.21. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüsü .....	70
Şekil 5.22. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin frekansa bağlı $S_{11}$ parametreleri .....	71
Şekil 5.23. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin frekansa bağlı $S_{21}$ parametreleri .....	72

Şekil 5.24. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüleri .....	72
Şekil 5.25. A320'nin üzerinde bulunan antenlerin yerleşimi .....	73
Şekil 5.26. A320'nin fiziksel boyutları .....	74
Şekil 5.27. A320'nin simülasyonlarında kullanılan kaynağın konumu .....	74
Şekil 5.28. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüsü .....	75
Şekil 5.29. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak ışınma alan örüntüsü .....	75
Şekil 5.30. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüleri.....	76
Şekil 5.31. Prototip üretimi tamamlanan dizi antenin görseli .....	77
Şekil 5.32. Prototip üretimi tamamlanan dizi antenin ölçüm esnasındaki görseli ...	78
Şekil 5.33. Ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı $S_{11}$ parametre değerlerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması .....	78

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. MYA’larda besleme yöntemlerinin birbirleri ile kıyaslanması [1],[9] ....	27
Tablo 5.1. Mikroşerit anten tasarımında kullanılacak FR4 malzemesinin karakteristik özellikleri .....	53
Tablo 5.2. Dizi antenin tasarım parametreleri .....	54
Tablo 5.3. 1x1EBG3x1 tasarım parametre değerleri .....	60

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Anten, mikroşerit yama anten, dizi anten, elektromanyetik bant aralığı yapıları (EBG), kuplaj azaltma.

Bu çalışmada, dizi antenler arasındaki istenmeyen elektromanyetik kuplajı azaltmak amacıyla EBG yapısı tasarımı ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak 4,3 GHz çalışma frekans değerine sahip mikroşerit dizi antenin benzetim modeli oluşturulmuş ve frekansa bağlı  $S_{11}$  parametre değerleri ile çalışma frekansındaki uzak alan ışınma örüntüleri elde edilmiştir. Çalışmanın devamında çift olarak kullanılacak mikroşerit dizi antenlerin arasına tasarımları yapılan EBG yapısı konumlandırılmış ve EBG yapısının antenler arasındaki karşılıklı kuplaj oluşumuna etkisi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca EBG içeren mikroşerit dizi anten çifti bir hava aracı üzerine yerleştirilerek nümerik analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen nümerik analiz sonuçlarının doğruluklarının gösterilmesi için son olarak mikroşerit dizi antenin prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen elektriksel test sonuçları nümerik analizler ile karşılaştırılmıştır.

# MUTUAL COUPLING SUPPRESSION BETWEEN ANTENNA ARRAYS USED IN AIRCRAFT

## SUMMARY

Keywords: Antenna, microstrip patch antenna, array antenna, elektromagnetic band-gap structure (EBG), coupling reduction.

In this study, an EBG structure design and electrical characterizations are carried out to suppress the unwanted electromagnetic couplings between array antennas. For this purpose, firstly a simulation model of the microstrip array antenna which has 4,3 GHz operation frequency value is developed and frequency dependent  $S_{11}$  parameter values and far-field radiation patterns at the operating frequency are obtained. After that, designed EBG structure is positioned between a pair of microstrip array antenna and the effect of EBG structure on mutual coupling between antennas has been analyzed. Within the scope of the study, the numerical analyzes were repeated by placing the microstrip array antenna pair containing EBG on an aircraft. Finally, in order to show the validity of the obtained numerical analysis results, a prototype of the microstrip array antenna is manufactured and the experimental results are compared with the numerical results.



## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Haberleşme sosyal bir varlık olarak yaratılan insanoğlunun temel ihtiyaçlarından birisidir. Bu ihtiyaç tarih boyunca insanoğlunu sahip olduğu imkânlar ölçüsünde haberleşme tekniklerini de geliştirmeye sevk etmiştir. İlk haberleşme yöntemi olarak yüksek tepelerin üzerinden bağırarak gibi oldukça basit ve kısıtlı bir yöntem kullanılmış olsa da zaman içerisinde insanoğlunun bilim ve teknoloji alanında yaşadığı gelişmeler haberleşme alanında kullanılan tekniklere de doğrudan etki etmiş ve ateş yakmak, duman çıkarmak, davul çalmak, eğitilmiş güvercinleri mektuplaşmak için kullanmak gibi yöntemler geliştirmiştir. 19. Yüzyıla gelindiğinde ise elektriğin kullanılabilir hale gelmesiyle birlikte haberleşme tekniklerinde de önemli gelişmeler yaşanmış ve kullanılan ilkel tekniklerin yerini gelişmiş teknolojik araçlar almaya başlamıştır. Bu kapsamda geliştirilen ilk teknolojik araçlar sırasıyla elektrikli telgraf, telefon, radyo ve televizyondur. Sahip olduğu bilgi, kabiliyet ve teknolojinin artmasıyla insanoğlunun gelişme hızı da her geçen gün artmakta ve buna paralel olarak haberleşmek için kullandığı yöntemleri ve cihazları da sürekli olarak geliştirmektedir.

Haberleşme sistemleri verici/vericiler ve alıcı/alıcılar arasındaki haberleşmeyi sağlayan sistemler olarak tanımlanmaktadır. Haberleşme sistemleri üç temel unsurdan oluşmaktadır: Bunlar iletilmek istenen bilgiyi alarak elektromanyetik sinyallere dönüştüren verici/vericiler, dönüştürülen sinyali taşıyan fiziksel iletim kanalı, iletken kablolar veya atmosfer, ve sinyali iletim kanalından alarak elektriksel işaretlere dönüştüren alıcı/alıcılarıdır. Bununla birlikte haberleşme sistemleri kullanılan iletim kanalına göre kablolu ve kablosuz haberleşme sistemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde bilgi kaynağı tarafından elektriksel işaretler olarak antene iletilen veriler antenlerde elektromanyetik dalgalara dönüştürülerek iletim

ortamına, serbest uzay, yayılması sağlanmaktadır. Alıcı antenlerin iletim ortamında yakaladığı elektromanyetik dalgalarda elektriksel işaretlere dönüştürülerek anlamlandırılmaktadır. Kısacası antenler kablosuz haberleşme sistemlerinde elektriksel veriler ile elektromanyetik dalgalar arasındaki dönüşümleri sağlayan cihazlardır.

Günümüzde haberleşme sistemlerinin gelişimine paralel olarak kullanılan antenlerde geliştirilmiş ve farklı uygulamalar için farklı özelliklere sahip antenler üretilmiştir. Son yıllarda geliştirilen anten türlerinden biri de mikroşerit antenlerdir. Mikroşerit antenler diğer mikrodalga antenlere kıyasla hafif yapıları, küçük hacimleri, üretim kolaylığı, ucuzluğu ve mekanik dayanaklıklarının yüksek olması ile öne çıkmakta ve bu özellikleri sayesinde uzay araçları, hava araçları, radarlar, uydu haberleşmesi, güdümlü roketler gibi pek çok uygulamada tercih edilmektedir.

Bununla birlikte mikroşerit antenlerin yapısı gereği dar bant genişliği, düşük kazanç ve verimlilik, ışıma elemanları ve besleme arasındaki zayıf yalıtım ve genellikle yarı düzlemsel ışıma karakteristikleri ve dizi anten olarak kullanımda yüzey dalgaları sebebiyle dizi elemanları arasında oluşan elektromanyetik kuplajın anten performansını bozması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu sebeple birçok avantajı bulunan bu antenlerin kullanım alanlarını genişletmek ve performanslarını iyileştirmek amacıyla söz konusu dezavantajların elimine edilebilmesi veya asgari seviyeye düşürülebilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri de mikroşerit antenlerin Elektromanyetik Bant Aralığı yapılarıyla (Electromagnetic Band Gap, EBG) birlikte kullanılmasıdır. Antenin çalışma frekans aralığı için bant durduran özelliği gösterecek şekilde tasarlanan EBG yapıları mikroşerit antenlerin performanslarının iyileştirilmesi ve antenler arasında oluşabilecek elektromanyetik kuplajın engellenmesi için mikroşerit antenlerle birlikte kullanılmaktadır.

### 1.1. Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında, hava araçlarının radyo altimetre radarlarında kullanılan anten ve anten sistemleri arasındaki oluşan elektromanyetik kuplajın bastırılmasında kullanılabilen EBG yapısı tasarımının yapılması amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle 4,3 GHz frekansında çalışan, hava araçlarında aracın irtifasını tespit edebilmek amacıyla kullanılan “Radyo Altimetre” sistemlerinde de kullanılabilen mikroşerit dizi anten tasarımı yapılmıştır. Anten olarak mikroşerit yama antenin kullanılmasının amacı: Mikroşerit yama antenlerin düşük hacimli, hafif, ucuz ve üretiminin kolay olması, ayrıca düzlemsel tasarımları sayesinde hava araçlarına gövde yapılarını bozmadan entegre edilebilir olmasıdır. Bununla birlikte mikroşerit antenlerin sahip olduğu dar bant genişliği, düşük kazanç, düşük verimlilik gibi dezavantajları iyileştirebilmek ve tek bir antenin sağlayacağı ışınım performansını geliştirmek amacıyla dizi anten tasarımı kullanılmıştır. Ancak dizi anten tasarımlarında, özellikle yüzey dalgalarının kuvvetli olduğu mikroşerit antenlerle oluşturulacak dizilerde, aynı frekansta ışınım yapan ve konum olarak birbirlerine çok yakın olan dizi elemanları arasında yaşanan elektromanyetik girişimler dizi antenin performansını olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak veya mümkün mertebe azaltabilmek amacıyla da EBG yapılarının karakteristik özelliklerinden yararlanılarak dizi anten çifti arasında oluşacak kuplajın azaltılması amaçlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan 4,3 GHz frekansında bant durduran özelliği gösteren EBG yapısı tasarım yama ve köprülerden oluşmakta ve RC filtre gibi davranmaktadır. Tasarlanan bu yapı ilk defa mikroşerit dizi antenler arasında oluşacak kuplaj etkisini azaltmak için kullanılmıştır. EBG yapısının frekansa bağlı olarak değişen tasarım parametreleri bu çalışma kapsamında üretilecek antenin çalışma frekansı olan 4,3 GHz değerine göre uyarlanarak yapının dizi anten çiftinin performansına ve dizi antenler arasındaki kuplaja olan etkisi incelenmiştir.

## 1.2. Teze Genel Bakış

Öncelikle yapılan çalışmaya bilimsel anlamda ön hazırlık olması amacıyla Bölüm 2’de antenler ve anten tasarımları için kullanılan önemli parametreler hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te bu çalışma kapsamında kullanılacak mikroşerit antenlerin özellikleri, kullanım alanları ve tasarım parametreleri hakkında önemli bilgilere yer verilmiştir. Bu çalışmada tek bir mikroşerit anten yerine dizi anten kullanılacağı için Bölüm 4’te de dizi antenler, besleme ağları ve dizi anten tasarımlarında son derece önemli olan elektromanyetik girişim, kuplaj, ve elektromanyetik uyumluluk hakkında bilgiler verilmiştir. Bununla birlikte dizi anten performansının iyileştirilmesi, karşılıklı kuplajın azaltılması ve yüzey dalgalarının bastırılması için kullanılacak olan EBG yapıları hakkında özet bilgiler verilmiştir. Son olarak, literatürde bulunan ve EBG yapısının bant durduran özelliği ile dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajı bastırmak için kullanıldığı çalışmalardan ve sonuçlarından örnekler verilmiştir.

Bölüm 5’te 4,3 GHz çalışma frekansında dizi antenin ve EBG yapısının tasarım adımlarına ve benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Çalışmanın devamında tasarlanan EBG yapısı içeren dizi anten çifti, Airbus A320 model uçağın kargo bölümüne yerleştirilerek antenlerin ışıma karakteristikleri ve uzak alan ışıma örüntüleri incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan tasarım ve benzetim sonuçlarının doğrulanması amacıyla tasarlanan dizi antenin üretimi yapıp elektromanyetik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçları simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Son bölümde ise bu çalışma kapsamında ulaşılan sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

## **BÖLÜM 2. ANTENLER**

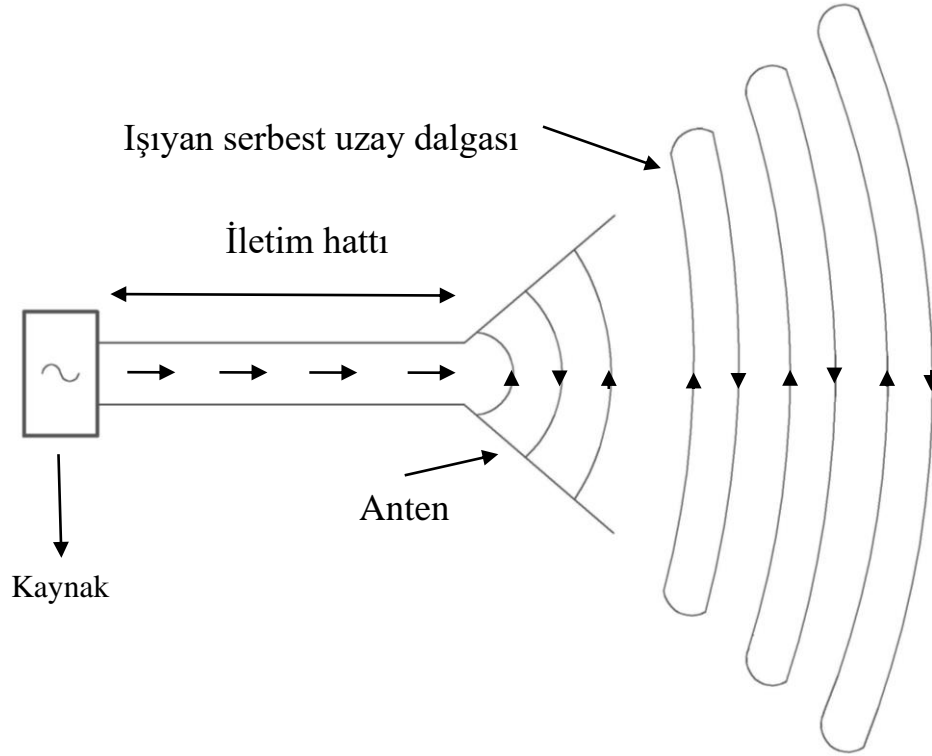
### **2.1. Antenler**

Antenler, radyo dalgalarını yaymak veya iletim kanalında yayılan radyo dalgalarını toplamak için kullanılan metalik cihazlardır. Daha geniş bir tanımla, haberleşme sistemlerinden aldığı elektriksel işaretleri elektromanyetik dalgalara dönüştürerek iletim kanalı vasıtasıyla yayılımını sağlayan veya iletim kanalından aldığı elektromanyetik dalgaları elektriksel işaretlere dönüştüren cihazlardır. Elektromanyetik dalgalarla elektriksel işaretler arasındaki dönüşümü sağlayan ve bu işlevleri ile kablosuz haberleşme sistemlerinin iletim kanallarına açılan ara yüzü olan antenler çift yönlü olarak kullanılabilir.

İlk anten örnekleri J. C. Maxwell' in elektromanyetik dalga teorisini doğrulamak amacıyla H. Hertz tarafından 1888'de yapılmıştır. Endüstride ilk kez kullanılması ise G. Marconi'nin telsiz telgrafı 1895'te icat etmesiyle başlamıştır. 1897'de O. J. Lodge anten için patent almıştır. 1901 yılında G. Marconi, 15 kW gücünde bir monopol anten vasıtasıyla 820 kHz frekansında İngiltere ile Amerika arasında Atlantik üzerinden iletişimi sağlamış ve anten teknolojisinin ilerlemesine ciddi bir ivme kazandırmıştır [1]. Anten teknolojisinin gelişmesine paralel olarak kablosuz haberleşme teknolojisi de hızlı bir şekilde gelişme kaydetmiştir.

Elektriksel işaretler olarak üretilen haberleşme verileri, iletim hattı üzerinden ışıma yapan metalik yapıya, antene, aktarılır ve bu yapılar elektriksel işaretleri elektromanyetik dalgalara dönüştürerek iletim kanalında yayılmasını sağlar. Şekil 2.1.'de verici olarak kullanılan bir antenin çalışma prensibi gösterilmiştir.

Şekilde de görüldüğü üzere, kaynaktan üretilen ve iletim hattı vasıtasıyla antene taşınan elektriksel işaretler elektromanyetik dalgalar olarak serbest uzaya yayılmaktadır.



Şekil 2.1. Bir geçiş cihazı olarak anten [1]

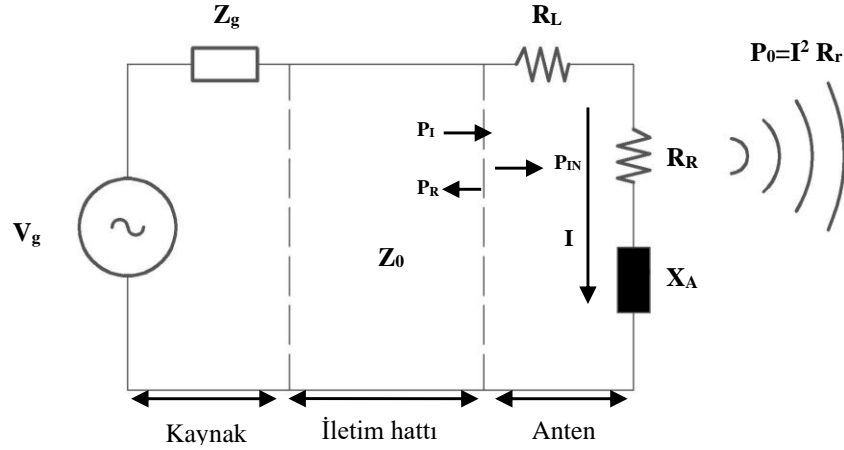
Yukarıda da anlatılan işlevleriyle antenler kablosuz haberleşme sistemlerinin temel elemanlarıdır ve kablosuz haberleşmenin kullanıldığı radyo ve televizyon yayınları, GSM, wireless başta olmak üzere her alanda kullanılmaktadır.

## 2.2. Antenlerin Devre Eşdeğerleri

### 2.2.1. Verici anten devre eşdeğeri

Antenler verici olarak kullanıldığında eş değer devresi Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi olmaktadır. Haberleşme kaynağının gerilimi  $V_G$  (V) ve empedansı  $Z_G$  ( $\Omega$ ) ile gösterilmektedir. İletim hattının ise  $Z_0$  ( $\Omega$ ) empedansı bulunmaktadır. Anten empedansı  $Z_A$  ( $\Omega$ ), anten radyasyon direnci  $R_r$  ( $\Omega$ ) ve kayıp direnci  $R_L$  'den ( $\Omega$ ) oluşan

$R_A$  ( $\Omega$ ) ve anten reaktansı  $X_A$ 'nın ( $\Omega$ ) toplamı olarak ifade edilmektedir. Antenden ise antenin giriş akımı  $I$  (A) akmaktadır.



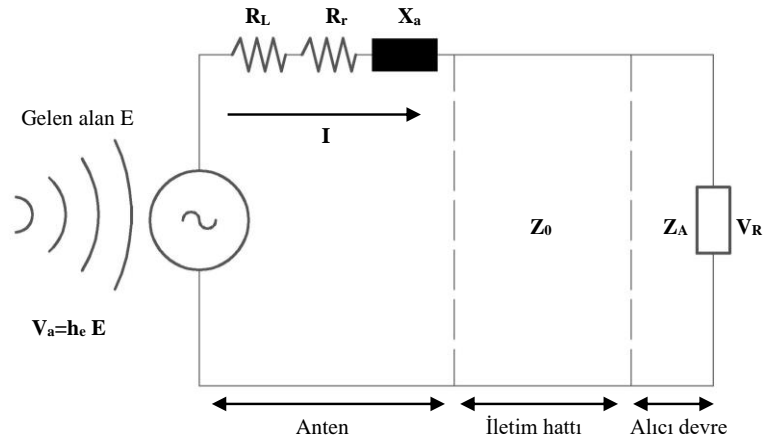
Şekil 2.2. Verici anten devre eşdeğeri [1]

$P_I$  antenin girişine ulaşan gücü (W),  $P_R$  ise antenden kaynağa yansıyan gücü (W),  $P_{IN}$  giriş gücünü (W)  $P_0$  ise toplam ışıma gücünü (W) ifade etmektedir [1].

### 2.2.2. Alıcı anten eşdeğer devresi

Antenler alıcı olarak kullanıldığında ise eş değer devresi Şekil 2.3.'de gösterildiği üzere verici antenin eş değer devresinin tersi olmaktadır.  $V_A$  (V) antenin soğurduğu elektromanyetik dalgalar sebebiyle indüklenen gerilimi ifade etmekte ve bu gerilim  $h_e$  etkin anten uzunluğunun gelen dalganın elektrik alan şiddeti olan  $E$  (V/m) ile çarpımıyla elde edilmektedir.

$I$  (A) anten üzerinden akan akımı,  $Z_0$  ( $\Omega$ ) iletim hattının empedansını  $Z_g$  ( $\Omega$ ) alıcı devrenin empedansını ve  $V_R$  (V) de alıcı devre üzerinde oluşan gerilimi ifade etmektedir [1].



Şekil 2.3. Alıcı antenin eşdeğer devresi [1]

### 2.3. Anten Alan Bölgeleri

Antenin çevresinde, Şekil 2.4.'te de görüleceği üzere, üç elektromanyetik alan bölgesi oluşmaktadır. Bunlar reaktif yakın alan bölgesi, ışılan yakın alan bölgesi (Fresnel) ve uzak alan (Fraunhofer) bölgesidir [1].

**Reaktif yakın alan:** Reaktif alanların baskın olduğu ve anteni çevreleyen kısımda oluşan alandır. Bu alandaki sabit dalgalar ve sabit dalgalar tarafından depolanan enerji reaktif alanı oluşturmaktadır. Bununla birlikte bu alan antenin alan tipini de karakterize etmektedir. Reaktif yakın alan bölgesinin dış sınırı  $\lambda$  dalga boyu ve  $D$  antenin maksimum boyu olmak üzere Eşitlik 2.1'de verildiği şekilde bulunmaktadır.

$$R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.1)$$

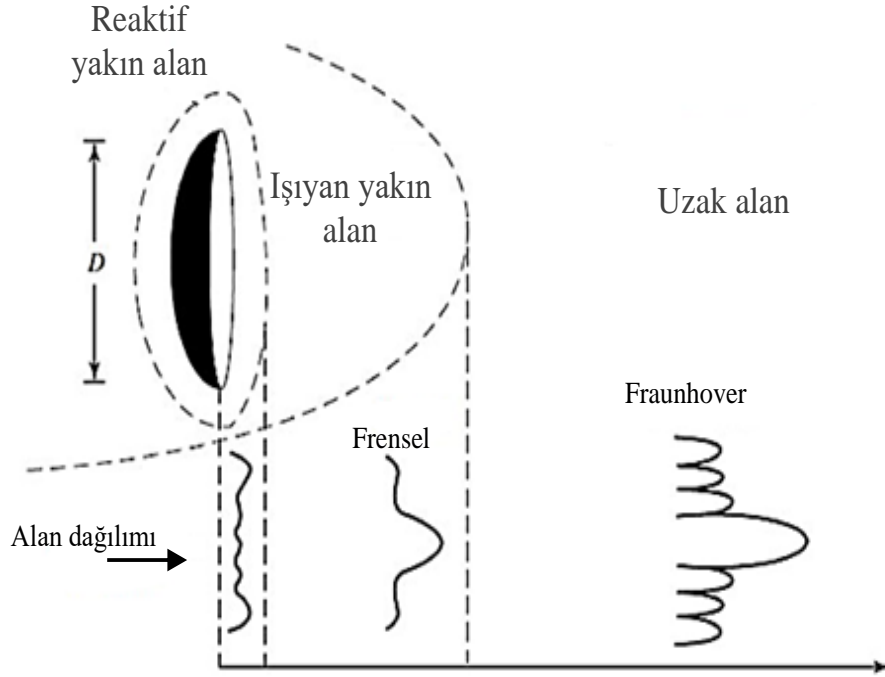
**Işıyan yakın alan bölgesi (Fresnel):** Bir antenin ışılan alanlarının baskın olduğu ve mesafeye bağlı olarak açısal alan dağılımının değiştiği bölgedir. Işıyan yakın alan bölgesi reaktif yakın alan bölgesi ile uzak alan bölgesi arasında bulunmaktadır ve anten alan tipini karakterize etmektedir. Işıyan yakın alan bölgesinin sınırları Eşitlik 2.2 ile belirlenmektedir.

$$R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \text{ ile } R < 2D^2/\lambda \text{ arası} \quad (2.2)$$



Uzak alan bölgesi (Fraunhofer): Antene olan uzaklığın antenin açılal alanını etkilemediği alan bölgesidir ve bu bölgede antenin ışıma örüntüsü tam olarak oluşmaktadır. Uzak alan bölgesinin sınırları Eşitlik 2.3 ile belirlenmektedir.

$$R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.3)$$



Şekil 2.4. Anten alan bölgeleri ve genlik örüntüsünün değişimi [2]

Şekil 2.4.'ten görüleceği üzere reaktif yakın alanda antenin ışıma örüntüsü dağınık olmakla birlikte kulakçıklar henüz oluşmamıştır. Işıyan yakın alan bölgesinde ışıma örüntüsünün daha düzgün olduğu ve kulakçıkların oluşmaya başladığı, uzak alan bölgesinde ise ışıma örüntüsünün tam olarak oluştuğu görülmektedir.

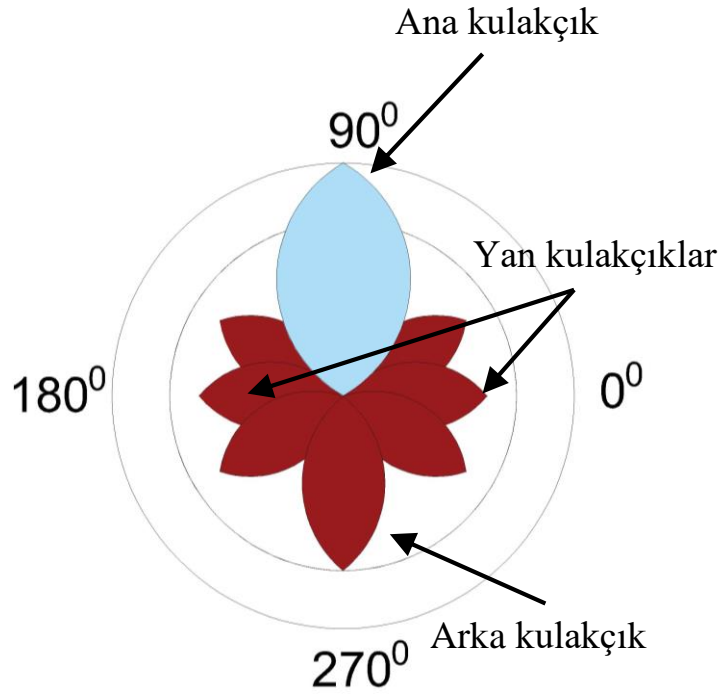
Anten ışımaları incelenirken uzak alan bölgesindeki ışıma örüntüsü dikkate alınmaktadır. Bu bölgede antenin ışıma yaptığı ana kulakçık tam olarak oluşmakla birlikte istenmeyen ışıma veya kayıp olarak isimlendirilebilecek diğer kulakçıklarda, ikincil kulakçıklar ve arka kulakçık, tam olarak oluşmaktadır.

## 2.4. Anten Parametreleri

Her anten bir amaç için belirli şartlarda kullanılmak üzere tasarlanmaktadır. Bir antenin belli bir amaç için kullanımının uygun olup olmadığı antenin elektriksel özelliklerini dolayısıyla sistem içerisindeki davranışını belirleyen anten parametreleri ile belirlenmektedir. Antenlerin elektriksel özelliklerini ifade eden birçok parametre olmakla birlikte bu bölümde bu çalışma kapsamında ihtiyaç duyacağımız ve tasarlanacak antenin amacımıza uygunluğunu değerlendirmeye yeterli olacak başlıca parametreler incelenecektir.

### 2.4.1. Işıma diyagramı

Işıma örüntüsü (radiation pattern), bir antenin ışıma özelliklerinin, uzay koordinatlarının bir fonksiyonu şeklinde matematiksel olarak ifade edilmesi veya grafiksel olarak, 2D veya 3D, gösterimidir [3]. Genellikle anten ışıma örüntüsünün tam olarak oluştuğu uzak alan bölgesi için belirlenmektedir. Bunun sebebi yukarıda da bahsedildiği üzere antenin ışıma örüntüsünün ancak uzak alan bölgesinde tam olarak oluşmasıdır. Bir antenin ışıma diyagramı o antene ait değerler, alan veya güç, kullanılarak elde edilmekte ve antenin yaptığı ışımanın açısal dağılımını göstermektedir. Şekil 2.5.' te örnek bir antenin ışıma diyagramı verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere, antenler ışıma yapması istenilen ana kulak yönü dışında arka kulak ve yan kulaklar olarak ifade edilen istenmeyen yönlerde de ışımalar gerçekleştirilmektedir. İstenmeyen bu ışımalar, antenin ışıma örüntüsünü bozmakla birlikte güç kaybına neden olacağından antenlerin tasarım aşamasında olabildiğince minimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.5. Anten ışıma diyagramı

### 2.4.2. Işıma güç yoğunluğu

Işıma güç yoğunluğu (radiation power density) uzak alan bölgesi için tanımlanmaktadır ve Eşitlik 2.4'ten hesaplanmaktadır. Eşitlikte geçen  $E$  antenin yaydığı elektrik alan şiddetini (V) ve  $\eta$  antenin öz empedansını ( $\Omega$ ) ifade etmektedir [3].

$$W_{\text{rad}} = \frac{|E(r,\theta\Phi)|^2}{2\eta} \left[ \text{W}/\text{m}^2 \right] \quad (2.4)$$

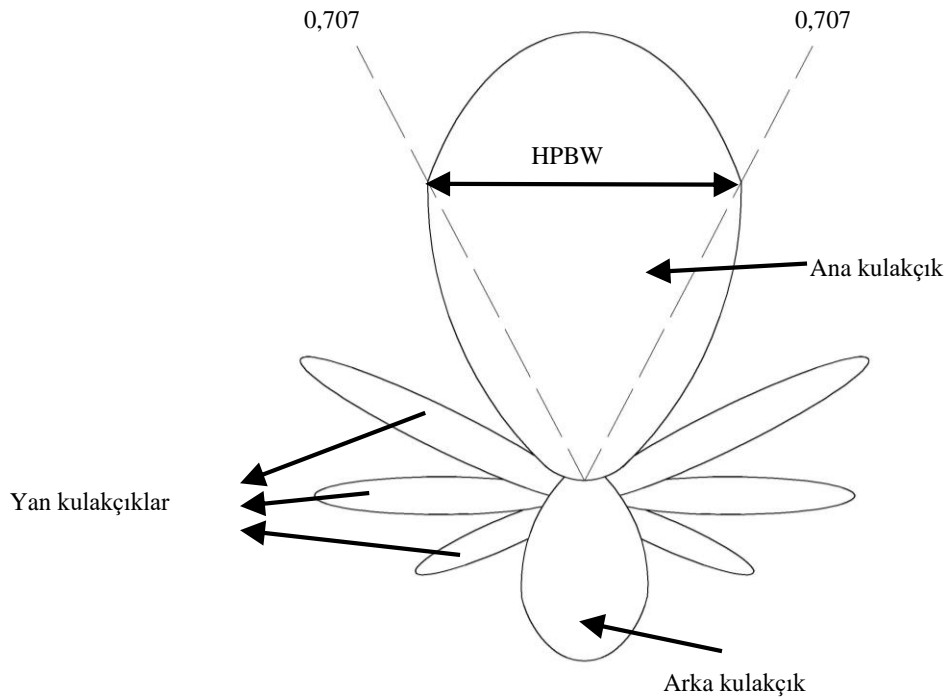
### 2.4.3. Işıma şiddeti

Işıma şiddeti (radiation intensity), belirli bir yön için tanımlanmaktadır ve antenin o yöndeki steradyan başına antenden yaydığı güç olarak Eşitlik 2.5'te verildiği gibi belirtilmektedir. Eşitlikte geçen  $E$  (V) antenden yayılan elektrik alanın şiddetini,  $\eta$  ( $\Omega$ ) antenin öz empedansını ve  $W_{\text{rad}}$  antenin ışıma güç yoğunluğunu ifade etmektedir. Işıma şiddetinin birimi ise Watt/Steradyan<sup>2</sup>'dir [1],[3].

$$U = r^2 W_{\text{rad}} = r^2 \frac{|E(r, \theta, \Phi)|^2}{2\eta} \left[ \text{Watt/Steradyan}^2 \right] \quad (2.5)$$

#### 2.4.4. Yarı güç hüzme genişliği

Bir antenin maksimum ışımaya yaptığı veya ışımaya örüntüsündeki ana kulakçığı doğrultusundaki gücün yarıya düştüğü noktalar arasındaki açısal genişlik Yarı Güç Hüzme Genişliği (Half Power Bandwidth, HPBW) olarak tanımlanmaktadır [3]. Yarı güç hüzme genişliği ile istenmeyen ışımaların oluşturduğu yan kulakçık seviyeleri arasında ters orantı bulunmaktadır. Bununla birlikte bir antenin yarı güç hüzme genişliği o antenin ışımaya yapabileceği veya ışımaya yakalayabileceği maksimum açıyı belirlemektedir. Şekil 2.6.' da HPBW genişliği gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Yarı güç hüzme genişliği

### 2.4.5. Yönlülük

Bir antenin yönlülüğü (directivity) antenin verilen bir yöndeki yaptığı ışımının şiddetinin tüm yönler üzerindeki yaptığı ışıma şiddetinin ortalamasına oranıdır ve Eşitlik 2.3.'te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır [3]. Yönlülük için herhangi bir yön belirtilmemiş ise antenin maksimum ışıma yaptığı yön baz alınmaktadır. Eşitlik 2.6'da verilen;  $D$  yönlülük (birimsiz),  $U$  ışıma şiddeti (W/birim katı açı),  $U_{max}$  maksimum ışıma şiddeti (W/birim katı açı),  $U_0$  izotropik bir antenin ışıma şiddeti (W/birim katı açı),  $P_{rad}$  antenden yayılan toplam güçtür (W).

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

### 2.4.6. Anten ışıma verimi

Kaynaktan antene aktarılan gücün tamamı ışımaya çevrilememektedir. Bunun nedeni aktarılan gücün bir miktarının kayıplı sistemler olan antenlerde ısı kayıpları olarak harcanmasıdır. Bu durumda antene aktarılan güç, ışıma gücü ve ısı kayıplarının toplamına eşit olmaktadır. Anten ışıma verimi Eşitlik 2.7'de verildiği gibi antenin ışıma gücü  $P_{OUT}$  (W)'un antenin giriş gücü  $P_{IN}$  (W)'e oranı olarak bulunmaktadır. Bu aynı zamanda anten ışıma direnci  $R_r$  ( $\Omega$ 'nin antenin ışıma direnci ve antenin ısı kayıp direnci  $R_L$  ( $\Omega$ )'nin toplamına oranı olarak da bulunabilmektedir [1],[3].

$$e_r = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{R_r}{R_r + R_L} [1] \quad (2.7)$$

### 2.4.7. Kazanç

Bir antenin kazancı (gain) belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun aynı giriş gücüyle kayıpsız izotropik bir antenden çıkan ışıma gücüne oranı olarak ifade edilmektedir [1],[3]. Eğer yön belirtilmemiş ise yön olarak maksimum gücün yayıldığı yön seçilir. Bir antenin kazancı aynı zamanda antenin yönlülüğünü de göstermektedir.

$$G = \frac{U(\theta, \Phi)}{U_{izo}} = \frac{U(\theta, \Phi)}{\frac{P_{in}}{4\pi}} = 4\pi \frac{U(\theta, \Phi)}{P_{in}} \quad (2.8)$$

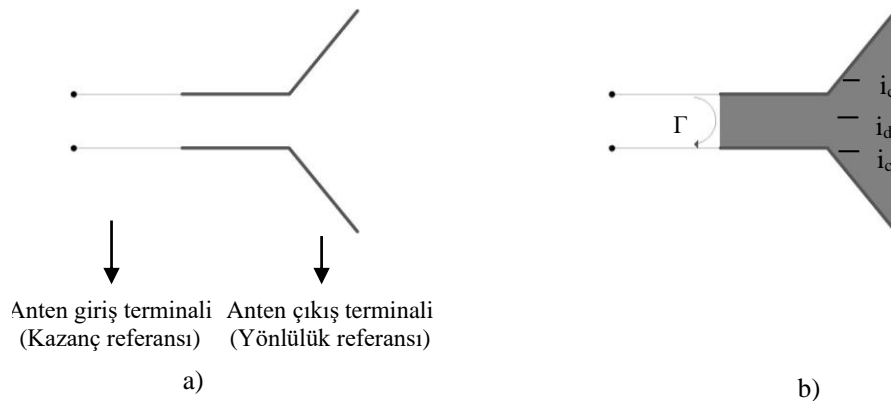
Eşitlik 2.8’de kullanılan parametrelerden kazanç  $G$  (birimsiz),  $U$  antenin ışıma şiddeti yoğunluğunu,  $P_{in}(W)$  antenin giriş gücünü ifade etmektedir.

#### 2.4.8. Anten verimi

Antenler de diğer sistemler gibi kayıplı sistemlerdir ve kaynaktan aldıkları gücün tamamını ışımaya dönüştüremez veya elektromanyetik dalgalardan aldığı enerjinin tamamını elektriksel işaretlere dönüştüremezler. Kaynaktan veya elektromanyetik dalgalardan elde edilen enerjinin bir kısmı kayıplar olarak sistemin dışına atılır. Antene iletilen toplam enerji, ışıma enerjisi ve ısı olarak kaybedilen enerjinin toplamına eşittir. Anten verimi (antenna efficiency), antenin gerçekleştirdiği ışıma gücünün kaynaktan antene aktarılan güce oranı olarak tanımlanmaktadır [3]. Antenin toplam verimi Eşitlik 2.9’da gösterildiği gibi kayıpların olduğu yerlerdeki verimlerin çarpımına eşit olmaktadır [3].

$$e_0 = e_r * e_c * e_d \quad (2.9)$$

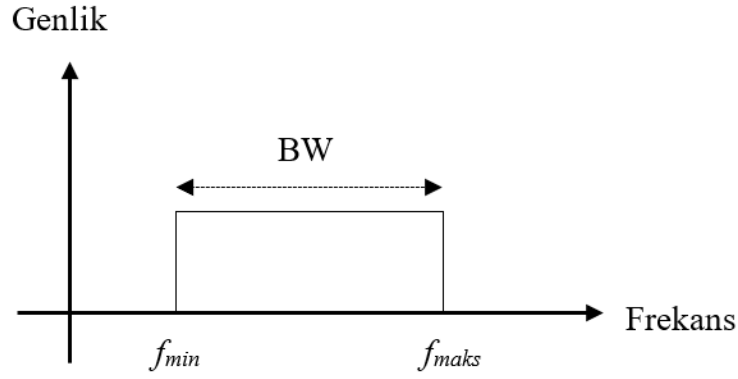
Eşitlik 2.9’da  $e_0$  anten verimini,  $e_r$  yansımaya verimini ( $1-|\Gamma|^2$ ),  $e_c$  iletim verimini  $e_d$  dielektrik materyalin verimini,  $\Gamma$  geri dönüş kaybını ifade etmektedir. Şekil 2.7.’de anten referans terminalleri baz alınarak anten kayıpları gösterilmiştir.



Şekil 2.7. a) Anten referans terminalleri, b) Yansımaya, iletim ve dielektrik kaybı [1]

### 2.4.9. Bant genişliği

Bant genişliği (bandwidth), bir antenin giriş empedansı, ışınma örüntüsü, hızı genişliği, kutuplanma, kazanç gibi karakteristiklerinin kabul edilebilir değerlerde olduğu merkez frekansının alt ve üst frekans limitlerinin aralığını ifade etmektedir [1]. Bu frekans aralığı antenin faydalı ışınma yapabileceği veya yakalayabileceği frekans bandının genişliğidir. Şekil 2.8.'de ışınma yaptığı frekans bandı gösterilen antenin bant genişliği Eşitlik 2.10'da verildiği üzere bir antenin kabul edilebilir ışınma yaptığı maksimum frekans olan  $f_{max}$  (Hz) ile minimum frekans olan  $f_{min}$  (Hz)'nin farkı olarak hesaplanmaktadır.

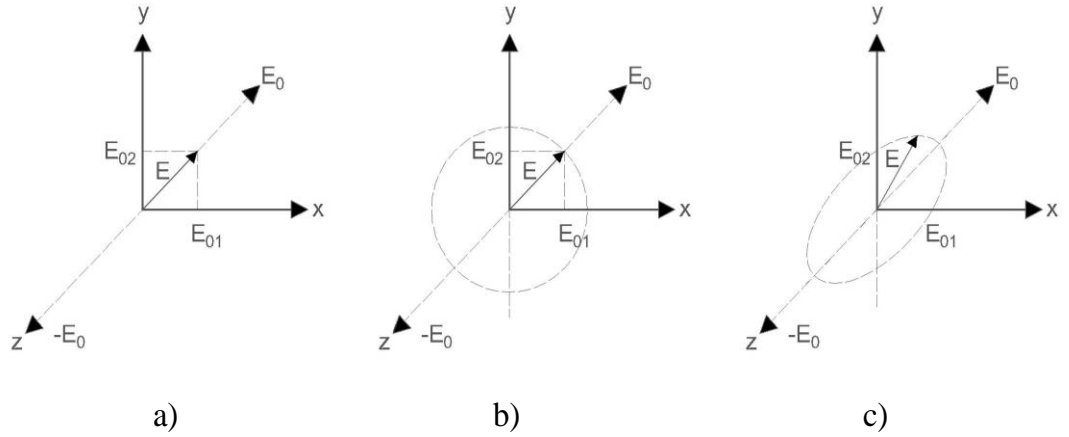


Şekil 2.8. Bant genişliği

$$BW = f_{max} - f_{min} [\text{Hz}] \quad (2.10)$$

### 2.4.10. Anten polarizasyonu

Polarizasyon, elektrik ve manyetik alan vektörlerinden oluşan elektromanyetik dalgaların elektrik alan bileşeninin yönüdür. Elektromanyetik dalgalar elektrik alan bileşenlerinin yönüne göre doğrusal, dairesel ve eliptik polarizasyonlu olabilmektedir. Bir antene gelen elektromanyetik dalganın polarizasyonu ile o antenin polarizasyonunun uyumu gelen elektromanyetik dalganın mümkün olan en az kayıpla elektriksel işarete dönüştürülebilmesi için önem arz etmektedir.



Şekil 2.9. Anten polarizasyonları a) Doğrusal polarizasyon, b) Dairesel polarizasyon, c) Eliptik polarizasyon

$$\mathcal{E}(z, t) = a_x \mathcal{E}_x(z, t) + a_y \mathcal{E}_y(z, t) \quad (2.11)$$

Polarizasyon denkleminin genel ifadesi Eşitlik 2.11’de verilmiştir [1]. Şekil 2.9.’da polarizasyon türlerinin grafiksel gösterimlerine yer verilmiştir. Doğrusal polarizasyonlu bir dalgada elektrik alanının sadece bir bileşeni bulunmaktadır. Dairesel polarizasyonlu bir elektromanyetik dalganın genlikleri eşit ve aralarında  $90^\circ$  faz farkı olan iki bileşeni bulunmaktadır. Dairesel polarizasyonun özel bir şekli de eliptik polarizasyondur. Eliptik polarizasyonlu elektromanyetik dalgaların dairesel dalgalar gibi iki bileşeni bulunmaktadır ve bileşenler arasındaki açı  $90^\circ$  olmakla birlikte dairesel polarizasyondan farklı olarak bileşenlerinin katsayıları birbirine eşit olmamaktadır.

#### 2.4.11. Voltaj duran dalga oranı

Voltaj duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR), anten ile besleme hattı arasındaki empedans uyumsuzluğu sebebiyle antene iletilen enerjinin ne kadarının geri yansıtacağını oransal olarak ifade etmektedir [3]. VSWR değerine hem yansıma katsayısı  $\Gamma$  ile hem de oluşan duran dalgada gerilimin maksimum değeri olan  $V_{max}$  ve minimum değeri  $V_{min}$  ile Eşitlik 2.12’de gösterildiği şekilde ulaşılabilmektedir.

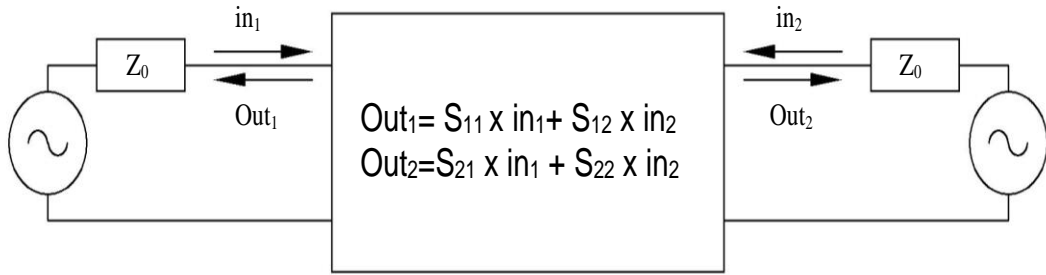
$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (2.12)$$



### 2.4.12. Saçılma parametreleri

Saçılma parametreleri (Scattering parameters) elektrik sistemlerini kapalı bir kutu olarak kabul ederek sistemin giriş çıkış portları arasındaki ilişkileri ifade etmek için kullanılmaktadır. Saçılma parametreleri vasıtasıyla antenlerin kazanç, geri dönüş kaybı, voltaj duran dalga oranı gibi elektriksel özellikleri belirtilebilmektedir.

Saçılma parametrelerinin kullanımında elektronik devre iç dizaynından bağımsız olarak bir kutu gibi kabul edilerek bu kutunun giriş ve çıkışından elde edilen değerler üzerinden sistemin davranışı belirlenebilmektedir. Örnek olarak Şekil 2.10.'da iki kapılı bir devre verilmiştir. Bu devre, içeriğinden bağımsız olarak giriş ve çıkış verileri üzerinden değerlendirilecektir.



Şekil 2.10. Örnek iki kapılı devre

Burada;

$S_{11}$ : Giriş portu, gerilim yansıma katsayısını,

$S_{12}$ : Ters gerilim kazancını,

$S_{21}$ : İleri gerilim kazancını,

$S_{22}$ : Çıkış portu, voltaj yansıma katsayısını

ifade etmektedir. Bu parametrik değerler ise verilen sisteme ait Eşitlik 2.13 – 2.16 ile elde edilmektedir.

$$S_{11} = \frac{out_1}{in_1} \quad (2.13)$$

$$S_{21} = \frac{out_2}{in_1} \quad (2.14)$$

$$S_{12} = \frac{\text{out}_1}{\text{in}_2} \quad (2.15)$$

$$S_{22} = \frac{\text{out}_2}{\text{in}_2} \quad (2.16)$$

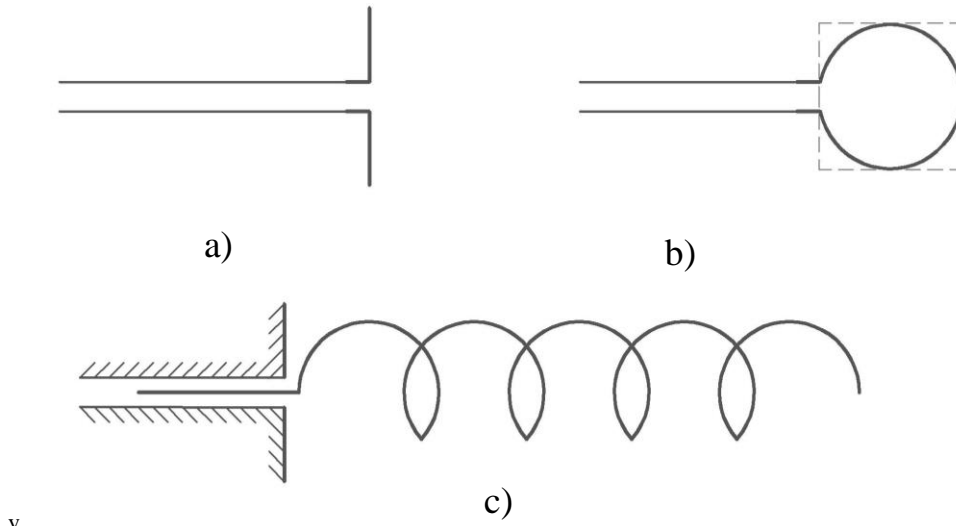
Bununla birlikte  $S_{11}$  parametresi ile VSWR arasındaki ilişkide Eşitlik 2.17’de ifade edilmektedir.

$$\text{VSWR} = \frac{1+|s_{11}|}{1-|s_{11}|} \quad (2.17)$$

## 2.5. Anten Çeşitleri

### 2.5.1. Tel antenler

Oldukça basit yapıda olan tel antenler en eski, en yaygın kullanılan ve çok çeşitli uygulama alanları olan anten çeşididir. Hemen hemen her alanda kullanılmakla birlikte otomobillerde, radyolarda, televizyonlarda gemilerde, uçaklarda ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1]. Şekil 2.11.’de çeşitli tel anten örnekleri görülmektedir.

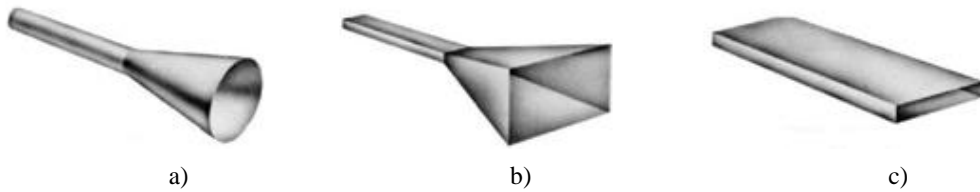


v

Şekil 2.11. Çeşitli tel anten örnekleri a) Doğrusal tel anten, b) Dairesel tel anten, c) Heliks tel anten

### 2.5.2. Açıklık antenler

Açıklık antenler, yüksek frekansta ve karmaşık formlarda ışıma elde edebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Söz konusu antenlerin açıklık yönleri elektromanyetik dalganın ışıma yönünü belirlemektedir. Kazancı yüksek olan bu anten çeşidinin ışıması dar bir ana hüzmeye oluşturmaktadır. Sabit anten ebatlarında ana hüzmeye genişliği frekans ile ters orantıya sahiptir. Bu tür antenler hava ve uzay araçlarına kolaylıkla uygulanabildiğinden sıklıkla bu alanlarda kullanılmaktadır. Parabolik reflektör antenler, huni antenler ve mercek antenler bu anten türüne örnek olarak verilebilir [1]. Şekil 2.12.'de çeşitli horn anten örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.12. Horn anten örnekleri a) Konik açıklık anten, b) Piramit açıklık anten, c) Dikdörtgen dalga kılavuzu [1]

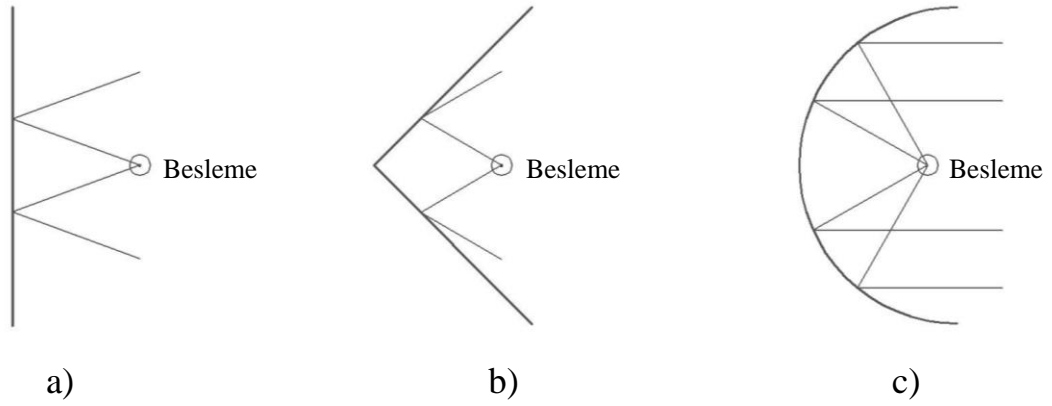
### 2.5.3 Mikroşerit antenler

Mikroşerit antenler iki yüzü iletken metal ile kaplı bir dielektrik malzemenin iletken yüzlerinden birinin işaret iletkeni diğerinin toprak olarak kullanılmasıyla elde edilmektedir. İletken metal katmanların oluşturulmasında bakır, gümüş veya altın gibi iletkenlik özelliği taşıyan herhangi bir metal malzeme kullanılabilir. Birlikte maliyet açısından standart uygulamalarda genellikle bakır malzemeler tercih edilmektedir. Mikroşerit antenler Bölüm 3.'te detaylı olarak incelenecektir.

### 2.5.4. Yansıtıcı antenler

Uzun mesafelerden iletişim kurulabilmesi için iletişim sinyallerinin bu mesafelere iletilmesi gerekmektedir. Bu sebeple besleme kaynağından üzerlerine gelen sinyalleri anten yüzeyine paralel biçimde yansıtan yansıtıcı antenler kullanılmaktadır.

Yansıtıcı antenler elektromanyetik dalgaları bir ayna gibi yansıtan metal yüzeyler üzerinde toplayarak odaklar ve böylece yönlendiricilik kazancını yükseltirler. En yaygın olarak parabolik yansıtıcı antenler kullanılmaktadır. Parabolik antenlerin kazançları yüksek olmakla birlikte yüksek kazanç değerleri antenin çapı ile doğru orantılı olarak artmaktadır [3]. Şekil 2.13.'te çeşitli fiziksel yapılarda yansıtıcı antenlere örnekler verilmiştir.



Şekil 2.13. Yansıtıcı antenler a) Düzlem yansıtıcı, b) Köşe yansıtıcı, c) Eğri yansıtıcı

### 2.5.5. Dizi antenler

Dizi antenler, istenilen ışımaya özelliklerinin tek bir anten ile elde edilemediği veya ortamda bulunan gürültüden dolayı amaçlanan karakteristik ışımaya sağlanamadığı durumlarda kullanılmaktadır. İstenilen ışımaya özellikleri, özdeş dizi elemanlarının uygun genlik ve faz sırasına göre değişik biçimlerde düzenlenmiş dizi antenlerle elde edilmektedir. Dizi anten kullanımı ile bant genişliğinin artırılması, yönlendiricilik kazancının yükseltilmesi veya çıkış gücünün yükseltilmesi sağlanabilmektedir [1]. Şekil 2.14.'te bir örneği gösterilen dizi antenler Bölüm 4'te detaylandırılacaktır.



Şekil 2.14. 2x2 elemanlı mikroşerit dizi antenin a) Üstten görünüşü b)Alttan görünüşü

## **BÖLÜM 3. MİKROŞERİT YAMA ANTENLER**

### **3.1. Mikroşerit Yama Antenler**

Mikroşerit yama anten (MYA) fikri 1953 yılında G.A. Deschamps tarafından üretilmiştir. 1955 yılında ise H. Gutton, G. Baissinot ile birlikte bir MYA tasarımına patent alınmıştır ancak ilk MYA 1970'te J.Q. Howel ve R. E. Munson tarafından üretilmiş ve tasarım ve üretim çalışmaları yayımlanmıştır. 1981'de K. Carver ve J. Mink MYA'ların analizinde ve tasarımında iletim hattı ve boşluk modellerini kullanmış bununla birlikte Moment Metodu (The Method of Moments, MoM) ve Sonlu Eleman Teknikleri (Finite Element Method, FET) gibi sayısal yöntemleri MYA'lara uygulamışlardır. G. Kumar ve K.C. Gupta 1985'te aynı dielektrik alttaş üzerine ana yamanın yanına yerleştirilmiş ilave yamalar vasıtasıyla antenin kaliteli ışımaya yaptığı bant genişliğini artırarak mikroşerit yama antenlerin kullanım alanlarının genişlemesine katkı sağlamışlardır [1],[4]-[8]

MYA'lar 100 MHz-5000 MHz gibi çok geniş frekans aralığında kullanılabilmeyle birlikte mevcut mikrodalga antenlere kıyasla en önemli avantajları yapısal hafiflik, küçük hacimlilik, düşük üretim maliyeti, üretim kolaylığı, taban malzemelerinin esnek materyallerden seçilebilmesi sayesinde istenilen yüzeye uygun olarak üretilebilmesi ve mekaniksel dayanıklılıklarının yüksek olmasıdır [9]. Çalışma frekansı ile küçülen fiziksel boyutları ve ince yapısı da yüzey şekillerinin bozulmasının istenmediği uygulamalarda önemli bir avantaj sağlamaktadır [1],[10]. Bu avantajlar; MYA'ların uzay araçları, hava araçları, radarlar, uydu haberleşmesi, güdümlü roketler gibi birçok askeri ve sivil alanda kolaylıkla kullanılabilmesini sağlamıştır. Ayrıca üretiminin baskı devre yöntemi ile kolayca ve düşük maliyetle sağlanabilmesi sebebiyle MYA'lar mikrodalga antenler içerisinde başlı başına bir konu haline gelmiştir [1],[10]. Diğer taraftan sahip oldukları bu avantajların yanı sıra dar bant genişliği, düşük kazanç ve

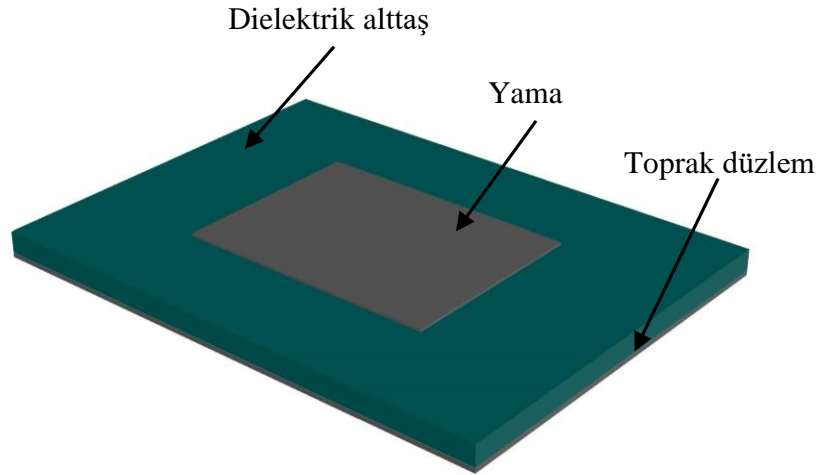
verimlilik, ışınma elemanları ve besleme arasındaki zayıf yalıtım ve genellikle yarı düzlemsel ışınma yapması MYA'ların en kritik dezavantajlarından biridir. Bununla birlikte yukarıda belirtilen dezavantajların bir kısmı tasarım ve üretimde kullanılan metotlar ve malzemeler ile minimize edilebilmekte ve dizi antenler kullanılarak performans iyileşmesi sağlanabilmektedir. İlk patenti alındığı 1955 yılından günümüze kadar üzerinde çalışılmaya devam edilen MYA'ların kullanım alanları genişlemekte ve kullanımları artmaktadır.

MYA'lar kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda çoğunlukla akıllı füzeler, roketler, radarlar ve uydularda kullanılırken günümüzde, askeri amaçların yanı sıra; kablosuz sistemler, uydu haberleşme sistemleri, mobil haberleşme sistemleri, hava ve uzay araçları ve biyomedikal ölçüm sistemleri, WLAN, GSM, DCS sistemleri gibi sivil amaçlarla da kullanılmaktadır.

### **3.2. Mikroşerit Antenlerin Yapısı ve Işınma Oluşumu**

#### **3.2.1. Mikroşerit antenlerin yapısı**

MYA'lar, Şekil 3.1.'de görüldüğü üzere üç katmanlı yapıdan oluşmaktadır. Taban malzemesi olarak kullanılan dielektrik malzemenin üzerinde iletken ışınma elemanları, yama, bulunmaktadır. Taban malzemesinin altındaki metal katman ise antenin toprak tabakasını oluşturmaktadır. Yama ve toprak tabakanın oluşturulmasında iletkenliği yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Bununla birlikte antenin kullanılmak istendiği ışınma örüntüsü ve bant genişliğini elde edebilmek amacıyla yama kısmı farklı geometrik biçimlerde tasarlanabilmektedir. Işınmayı oluşturan iletkeninin fiziksel boyutları ve geometrik şekli, dielektrik alttaşın kalınlığı ve alttaşın dielektrik sabiti antenin ışınma performansını doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir [1],[6],[10].



Şekil 3.1. Mikroşerit yama anten

MYA'nın yama ve toprak kısmı için genellikle bakır iletken kullanılır. Bunun en önemli nedeni piyasada bulunan PCB'lerin büyük bir kısmında bakır kullanılmasıdır. Dielektrik tabanlar yalıtkan malzemelerdir ve malzemeler dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerlerine göre seçilmektedir. Kayıp tanjantı yüksek malzeme kullanımı anten verimini önemli ölçüde düşüren bir etmen olduğu için MYA tasarımlarında kayıp tanjantı düşük malzemeler tercih edilir [7]. Mikrodalga devrelerde fiyat/performans açısından optimum değerleri sunan ve entegre devrelere montaj kolaylığı sağlayan FR-4 malzeme tercih edilmektedir.

MYA'ların tasarım ve üretiminde toprak tabaka ve yama olarak kullanılacak metallerin kalınlığının 50–200  $\mu\text{m}$  aralığında olması gerekmektedir birlikte, taban malzemesi olarak kullanılan dielektrik malzemelerin seçiminde ise dielektrik sabiti ( $\epsilon_{rs}$ )  $2.2 \leq \epsilon_{rs} \leq 12$  aralığında olan malzemeler kullanılması ve yüksekliğinin (h)  $0.003 \lambda \leq h \leq 0.05 \lambda$  arasında tutulması antenin optimum performansı sağlayabilmesi için gerekmektedir [10]. Düşük dielektrik sabitli alttaşın kullanılması kenar alanlar etkisinin artmasına sebep olarak anten ışıma karakteristiğine pozitif etki yapacaktır. Diğer taraftan kullanılan dielektrik malzemenin dielektrik sabiti antenin fiziksel boyutlarıyla doğru orantılıdır. Bu sebeple alttaş olarak dielektrik sabiti çok düşük olan malzemelerin seşilmesi durumunda aynı ęalıŐma frekans için daha büyük boyutta antenlerin kullanılması gerekmektedir [10], [7].

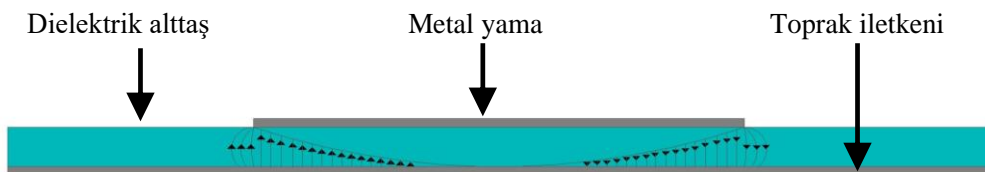


MYA'larda taban malzemesi olarak kullanılan dielektrik malzemelerinin görevi hem bir iletim hattının parçası olarak işlev görmek ve dielektrik geçirgenliği ve kalınlığı ile antenin elektriksel özelliklerini belirlemek hem de antenin yüzeylere monte edilmesini sağlamak ve yapıya mekaniksel dayanıklılık sağlamaktır [11].

Taban malzemesinin seçiminde dielektrik değerinin küçük seçilip kalınlığın yüksek tutulması, antenin ideal ışımaya sağladığı frekans bant genişliğini arttırdığı gibi anten verimini de arttırmaktadır [1], [10]. Bununla birlikte taban malzemesinin yüksekliğinin artırılması yüzey dalgalarını oluşturmaktadır. Yüzey dalgaları taban malzemesi içerisinde hareket ederek yüzey süreksizliği olan yerlerden saçılarak anten ışıma örüntüsünü ve kutuplanma karakteristiklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer taraftan yüzey dalgalarının oluşması antenin gerçekleştireceği doğrudan ışımalar için kullanılabilir toplam gücü azaltarak antenin veriminin düşmesine de neden olduğundan dolayı istenmemektedir. Taban malzemesinin seçiminde dielektrik sabiti yüksek malzemelerin tercih edildiği ve malzeme yüksekliğinin düşürüldüğü durumlarda ise antenlerin istenmeyen ışınımları minimize edilebilmekle birlikte oluşacak kayıplar artmakta bant genişliği de düşmektedir. Taban malzemesinin kalınlığının arttırıldığında ise antenin verimi azalmakta ve anten ışıma örüntüsünde bozulmalar oluşabilmektedir.

### 3.2.2. MYA'larda elektromanyetik ışımının oluşumu

MYA'larda, açıklık gibi davranan iletken işaret iletkeninin, yamanın, kenarlarının taban malzemesinin içerisindeki alan tarafından uyarılması sonucunda yamanın kenarları ile toprak yüzeyi arasında elektromanyetik dalgalar oluşmaktadır. Şekil 3.2.'de bir MYA'da ışıma oluşumu gösterilmektedir.

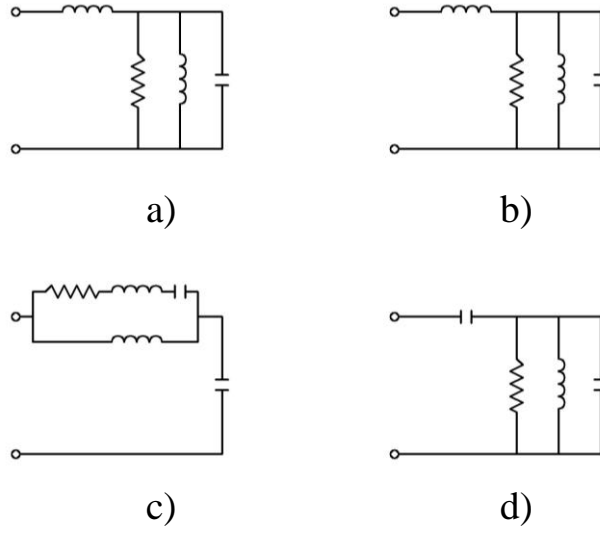


Şekil 3.2. MYA'larda ışıma oluşumu [1]

İletim hatlarında ışımanın gerçekleştiği kenarların yakın olduğu durumlarda hatlar boyunca oluşan ışımlar birbirinin etkilerini nötrler ve ışıma köşeler gibi süreksiz noktalarda gerçekleşir. Bu sebepten dolayı MYA'larda iletken ebatları geniş tutulur [11].

### 3.3. MYA'ların Besleme Şekilleri

MYA'lar farklı yöntemlerle beslenebilmektedir. Besleme yöntemleri temel olarak temaslı yöntemler ve temassız yöntemler olarak iki ayrı sınıfa ayrılmaktadır. Temaslı besleme yöntemlerinde elektrik enerjisinin taşındığı hat, mikroşerit hat ile besleme ve koaksiyel beslemede olduğu gibi, doğrudan ışıma elemanına bağlıdır. Temassız besleme yöntemlerinin de ise enerji hattı ile ışıma elemanı arasındaki enerji aktarımı, açıklık kuplajlı besleme ve yakınlık kuplajlı beslemede olduğu gibi, elektromanyetik kuplaj ile gerçekleştirilmektedir. MYA'ların beslemesinde kullanılan her bir tekniğin yapısına özgü avantajları ve dezavantajları vardır ve antenden beklenen ışıma özelliğine göre bu yöntemlerden en uygunu seçilmektedir. Kullanılan besleme yöntemi antenin giriş empedansını ve polarizasyonunu etkilemektedir. Bununla birlikte empedans uyumsuzluğu yansıma kayıplarını oluşturduğu için antenlerin beslemesinde empedans uyumuna dikkat edilmesi gerekmektedir [11]. Şekil 3.3.'de farklı besleme türlerinin eşdeğer devreleri görülmektedir.



Şekil 3.3. Farklı besleme çeşitlerinin eşdeğer devreleri a) Mikroşerit hat ile besleme b) Koaksiyel prob ile besleme c) Açıklık kuplaj ile besleme d) Yakınlık kuplaj ile besleme [1]

Şekil 3.3.'de eşdeğer devreleri görülen besleme yöntemlerinin birbirlerine kıyasla avantajlarını ve dezavantajları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. MYA'larda besleme yöntemlerinin birbirleri ile kıyaslanması [1],[10],[11]

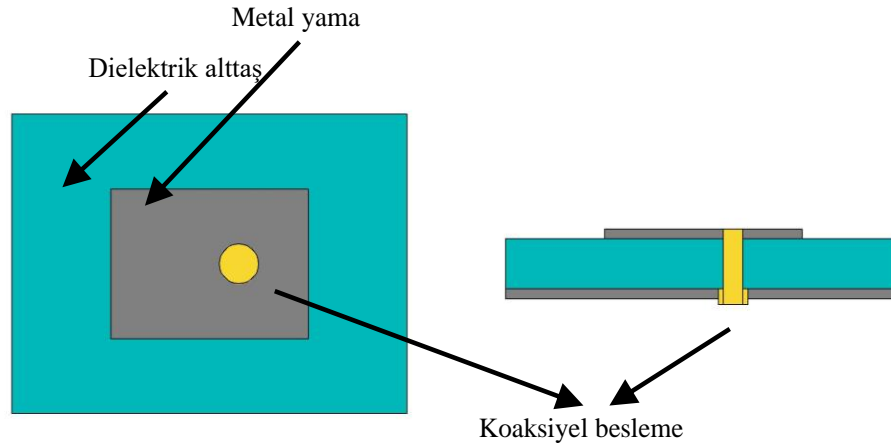
Besleme Yöntemi	Mikroşerit hat ile besleme	Koaksiyel prob ile besleme	Yakınlık kuplajlı besleme	Boşluk kuplajlı besleme
Tasarım	Eş düzlemsel	Düzlemsel değil	Düzlemsel	Düzlemsel
Besleme kaynaklı istenmeye ışım miktarı	Az	Fazla	Fazla	Fazla
Üretim zorluğu	Kolay	Delme ve lehimleme gerekir	Hizalama gerekir	Hizalama gerekir
Empedans uyumlaştırma	Kolay	Kolay	Kolay	Kolay
Bant genişliği	%2-5	%2-5	%13	%21

Tablo 3.1.' de ifade edildiği üzere dört besleme şeklinin her birinin kendine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Üretim tekniği açısından baskı devre tekniği ile antenin yama kısmı ile birlikte üretilebilen mikroşerit hatlı besleme yöntemi en kolay uygulanabilen yöntemdir. Bununla birlikte mikroşerit hatlı besleme yöntemi istenmeyen ışımların en aza indirilmesinin istendiği uygulamalarda da tercih edilmektedir. Boşluk kuplajlı besleme yönteminin avantajı ise en büyük bant genişliğinin elde edilebildiği besleme yöntemi olmasıdır.

### 3.3.1. Koaksiyel prob ile besleme

Koaksiyel prob ile besleme yöntemi, koaksiyel kablonun işaret ileten iç ucunu antenin işaret iletkenine, topraklamayı sağlayan kılıfını ise antenin en altta bulunan toprak düzlemine lehimleyerek gerçekleştirilmektedir. Lehimleme işleminden önce iletkenler ve alttaş üzerinde açılan yol ile kablonun elektriksel işaret taşıyan uç kısmı bu kanal içerisinden geçirilerek işaret iletkenine ulaştırılır ve işaret iletkeninin yüzeyine lehimlenir.

Koaksiyel besleme yönteminin en önemli avantajları üretiminin ve empedans uyumlaştırılmasının kolay olması ve yüzey dalgalarından kaynaklanan ve verimi düşüren ışımların az olmasıdır. Fakat bu besleme tekniğini kullanan antenlerin bant genişliği dar olduğu için uygulama alanları daha sınırlıdır. Ayrıca kullanılan dielektrik malzemenin kalınlığının artmasıyla modellemeyi zorlaşmakla birlikte antenin ışıma performansını olumsuz etkileyen ve beklenmeyen ışımlar da artmaktadır [10]. Şekil 3.4.'te koaksiyel besleme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Koaksiyel prob ile besleme yöntemi

Besleme noktasının pozisyonu iletim hattı ile MYA'nın empedans uyumunun,  $50 \Omega$ , en iyi şekilde sağlandığı pozisyon olarak belirlenir. Yamanın uyartımı besleme akımı  $J_z$ 'nin, yamanın  $E_z$  alanı ile kuplajlanması sayesinde oluşmaktadır. Kuplajlama sabiti:

$$\text{kuplajlama sabiti} = \cos\left(\frac{\pi x_0}{L}\right) \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1'de yer alan sabitler;  $L$  yamanın rezonans uzunluğunu,  $x_0$  ise besleme noktasının yama kenarından olan uzaklığını ifade etmektedir. Eşitlik incelendiğinde, koaksiyel beslemenin yamanın ışına yaptığı noktada olmasının ( $x_0=0$  veya  $x_0=L$ ), kuplajlamayı maksimum yapacağı anlaşılmaktadır [1].

Koaksiyel beslemenin uygulanacağı nokta belirlenirken Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 kullanılır.  $x$  ve  $y$  iki boyutlu koordinat olmak üzere;

$$x_f = \frac{L}{2\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (3.2)$$

$$y_f = \frac{W}{2} \quad (3.3)$$

formülleri kullanılmaktadır [1].

Koaksiyel besleme yönteminin en önemli avantajı giriş empedansının iletim hattı ile uyumlaştırılmasında besleme noktasının koordinasyonun değiştirilmesi aracılığı ile ayarlanabilmesi sayesinde empedans uyumunun kolaylıkla sağlanabilmesidir. Bu avantajının yanında MYA'nın performansını kısıtlayıcı ve üretimi zorlaştıran etkileri de bulunmaktadır. Bunlardan biri koaksiyel beslemeli MYA'lar kullanılarak oluşturulacak dizi antenlerde çok sayıda lehimleme noktası gerekmesinden dolayı üretimin zorlaşmasıdır. İkincisi, MYA'nın bant genişliğini artırmak için kalın dielektrik malzemenin kullanılması, daha uzun besleme probunun kullanılmasını gerektireceğinden üretimi de zorlaştıracaktır. Bu durumda besleme probundan dolayı oluşacak istenmeyen ışımalarda, yüzey dalga gücünde ve besleme indüktansında artmaya sebep olacaktır. Ancak, besleme indüktansı, seri bağlanacak kapasitörler ile kompanze edilebilmektedir. [12].

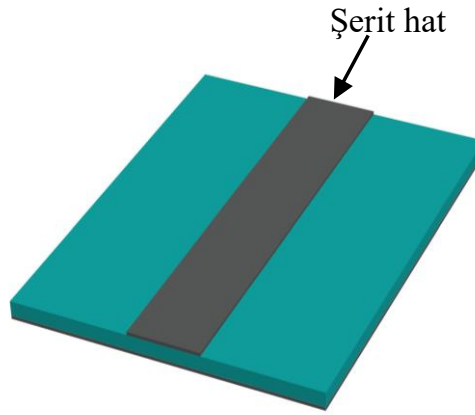
### **3.4. Mikroşerit Antenlerin Analiz Yöntemleri**

MYA'ların analizinde bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle birlikte sayısal yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan başlıca yöntemler Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method, FEM), Zaman Düzleminde Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain, FDTD), İletim Hat Modeli (Transmission Line Method, TLM) ve Momentler Yöntemidir [5]. Söz konusu yöntemlerden en çok kullanılanları, mikroşerit antenin bir iletim hattı ya da iletim hattının parçası olarak kabul edilerek analizinin yapılmasına imkân tanıyan iletim hattı modeli (TLM) ile yamanın dielektrik yüklü boşluk olarak kabul edilerek analizinin yapılmasına imkân tanıyan boşluk (Cavity Model) modelidir [1].

#### **3.4.1. İletim hattı modeli**

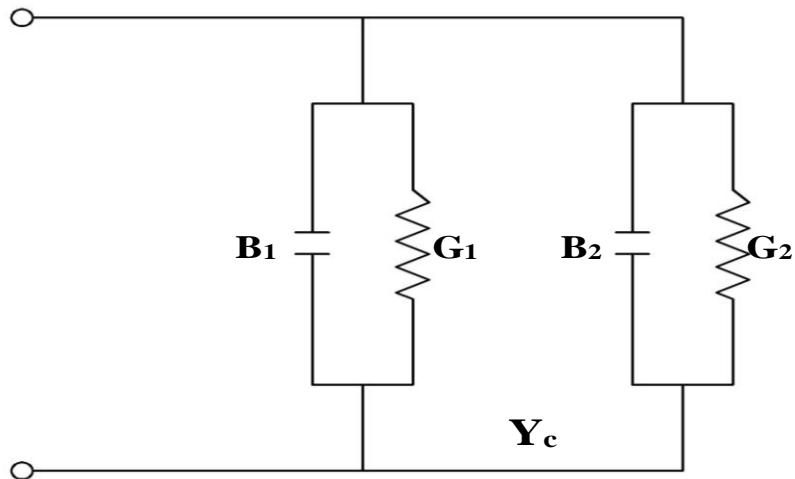
İletim hattı modeli (TLM), kare ve dikdörtgen yamalı antenlerin analizinde kullanılabilir ve diğer analiz yöntemlerine göre daha pratik olmakla birlikte anten parametrelerine tam olarak ulaşabilmek için deneysel çalışmalar gerektirmesinden dolayı özellikle yüksek frekanslarda kesin sonuçlar elde edilememektedir. Bununla birlikte bu model antenin ışımaya karakteristiğini basit ifadelerle verebilmesinden dolayı

tercih edilmektedir. TLM’de, dikdörtgenel bir MYA’nın mikroşerit yama anten,  $W$  genişliğinde,  $h$  yüksekliğinde,  $L$  mesafesinde ışılan iki dar yarık dizisi ile modellenmektedir [1]. İşaret iletkeninin boyutlarının, sonlu uzunlukta ve genişlikte olduğu için işaret iletkenini kenarlarındaki alanlar toprak tabakaya doğru saçaklanma etkisi göstermektedir. Saçaklanma etkisi ise işaret iletkeninin yüzeyi boyunca gözlemlenmektedir.



Şekil 3.5. İletim hattı modeli

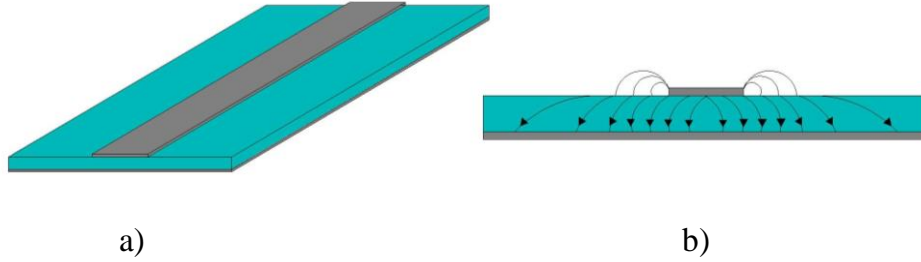
Şekil 3.5.’de verilen anten için TLM devre eşdeğeri Şekil 3.6.’da görülmektedir. Işıma boşlukları, düşük empedanslı iletim hattı olarak modellenmektedir.



Şekil 3.6. İletim hattı devre modeli [1]

### 3.4.2. MYA'da saçaklanma etkisi

MYA'nın işaret iletkeninin ölçüleri uzunluk ve genişlik boyunca sınırlıdır ve iletkenin kenarlarında oluşan elektromanyetik alanlar yamadan toprağa doğru saçaklanırlar. Şekil 3.7.b.'de saçaklanma etkisi denen bu durum gösterilmektedir. Bu etki işaret iletkeninin uzunluğu ve genişliği boyunca oluşmakla beraber büyüklüğü, işaret iletkeninin boyutları ve dielektrik alttaşın kalınlığının fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Elektromanyetik alan düzlemi için saçaklanma etkisi işaret iletkeninin uzunluğunun dielektrik alttaşın kalınlığına oranının ve alttaşın dielektrik sabitinin  $\epsilon_r$  fonksiyonudur. İşaret iletkeninin uzunluğunun alttaşın yüksekliğine oranının 1'den çok büyük olması durumunda saçaklanma etkileri azalmaktadır. Bununla birlikte, yama üzerinde oluşan saçaklanma etkisinin antenlerin rezonans frekanslarını da etkilemektedir [10].



Şekil 3.7. a) İletim hattı modeli, b) Saçaklanma etkileri ve elektrik alan çizgileri

Yamanın genişliğinin alttaşın kalınlığına oranının ve alttaşın dielektrik sabitinin 1'den büyük olduğunda elektrik alan bileşenleri alt katmanda yoğunlaşarak hattı olduğundan daha büyük gösterir. Dalgalar alt katmanda ve serbest uzayda yayılırken oluşacak saçaklanma etkisini tanımlamak amacıyla etkin dielektrik sabiti ( $\epsilon_{\text{reff}}$ ) tanımlanmaktadır.  $\epsilon_{\text{reff}}$  mikroşerit hattın dielektrik alttaş içerisine yerleştirildiği varsayımıyla tanımlanmaktadır. Bu şekilde  $\epsilon_{\text{reff}}$ , iletim hattının gerçek karakteristiğine sahip düzgün dağılımlı bir dielektrik malzemenin dielektrik sabiti olarak tanımlanır. Dielektrik alt katman ve havayla birlikte bulunan bir mikroşerit hat için, etkin dielektrik sabiti  $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$  arası değerler alır.  $\epsilon_r \gg 1$  olan uygulamalarda,  $\epsilon_{\text{reff}}$  değeri dielektrik alt katmanın gerçek dielektrik sabiti olan  $\epsilon_r$ 'ye daha yakındır. Etkin dielektrik sabiti, aynı zamanda frekansın da bir fonksiyonudur [1].



Etkin dielektrik sabiti [1]:

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-1/2} [1] \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te verilenlerden;  $\epsilon_{\text{reff}}$  etkin dielektrik sabitini,  $h$  dielektrik alttaşın yüksekliğini,  $W$  yama genişliğini ifade etmektedir.

### 3.4.3. İşaret iletkeninin etkin uzunluğu, rezonans frekansı ve etkin genişliği

Saçaklanma etkisi mikroşerit hattı, elektriksel olarak, gerçek ölçülerinden daha büyük göstermektedir. Elektromanyetik alan düzlemi için işaret iletkeninin uzunluğu her iki kenardan da bir miktar genişler.  $\Delta L$  kadar genişlediği kabul edersek bu uzunluk etkin dielektrik sabiti  $\epsilon_{\text{reff}}$  ve yama genişliğinin alttaşın yüksekliğine oranının bir fonksiyonudur ve Eşitlik 3.5'te verilmiştir [10].

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} [\text{cm}] \quad (3.5)$$

İki kenarından genişleyen yamanın etkin uzunluğunun aldığı değer Eşitlik 3.6'da verildiği şekilde hesaplanır.

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L [\text{cm}] \quad (3.6)$$

MYA'nın rezonans frekansı, uzunluğun bir fonksiyonu olacak şekilde Eşitlik 3.7'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{c}{2L\sqrt{\epsilon_r}} [\text{Hz}] \quad (3.7)$$

MYA'nın rezonans frekansı ise (saçaklanma etkileri hesaba katıldığında) Eşitlik 3.8'de verildiği şekilde hesaplanır [10].

$$f_{\text{rc}} = \frac{1}{2L_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} [\text{Hz}] \quad (3.8)$$

### 3.4.4. MYA tasarımı

Yukarıda yer alan denklemlerden elde edilen eşitlikler yardımıyla, istenen çalışma frekansında bir MYA'nın yaklaşık olarak tasarımı yapılabilmektedir. Tasarım parametreleri, dielektrik alt taşın dielektrik sabiti  $\epsilon_r$ , merkez frekansı  $f_r$  ve alt taşın yüksekliği  $h$ 'dir. Sonuç olarak MYA tasarımlarında aşağıda verilen adımlar izlenir [10].

1. Yaklaşık yama genişliğinin hesaplanması;

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} [\text{cm}] \quad (3.10)$$

2. Eşitlik 3.4'ten etkin dielektrik sabiti hesaplanır.

3. Eşitlik 3.4'ten elde edilen  $\epsilon_{\text{reff}}$  ve Eşitlik 3.10'dan bulunan  $W$  kullanılarak, Eşitlik 3.5.'ten  $\Delta L$  yamanın uzunluk artışı hesaplanır.

4. Eşitlik 3.11'den yamanın gerçek uzunluğu bulunur:

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}} - 2\Delta L [\text{cm}] \quad (3.11)$$

## **BÖLÜM 4. DİZİ ANTENLER ve ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK**

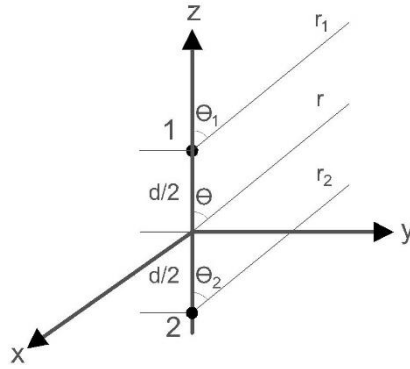
### **4.1. Dizi Antenler**

Bir ışına için yönlendirilen tek bir anten geniş ışına örüntüsü ve düşük yönlülük dolayısıyla düşük kazanç sağlar. Haberleşme uygulamalarında talep edilen uzun mesafelerden haberleşme ihtiyacını karşılamak için yüksek kazanç ve yönlendirilmiş hüzme genişliğinin sağlanması gerekmektedir. Tek bir anten ile bu talebin karşılanması zor olduğundan birden fazla antenin geometrik olarak yerleştirilmesiyle oluşan dizi antenler bu amaç için kullanılmaktadır. Dizi anten tasarımında özdeş elemanlar veya farklı elemanları kullanılabilir. Ancak dizinin toplam alanının ve ışına örüntüsünü daha basit şekilde hesap edilebilmesi ve uygulamanın pratik olarak gerçekleştirilebilmesi açısından dizi antenler genellikle özdeş dizi elemanları ile oluşturulmaktadır [1], [13].

Tasarlanacak dizi antenin toplam elektrik alanı, dizi elemanlarının her birinden ışın alanların vektörel olarak toplanmasıyla hesaplanır. Bu durum dizi elemanları arasındaki kuplajın ihmal edildiği durumlar için geçerlidir. İstenen yönlülükte ışına örüntüsü elde edebilmek için tasarlanan dizi antenin her elemanının ışına örüntüsünün istenen doğrultuda birbirlerine eklenerek artış sağlanması, istenmeyen yönlerde de birbirlerini yok etmeleri sağlanmalıdır. Bir dizi antende antenin tüm örüntüsünü biçimlendirebilecek beş parametre vardır. Bu parametreler; dizi elemanların geometrik dizilimleri, elemanlar arasındaki mesafe, dizi elemanlarının uyarım genlikleri, dizi elemanlarının uyarım fazı ve dizi elemanlarının ışına örüntüsüdür.

### 4.1.1. Doğrusal anten dizileri

Doğrusal anten dizileri tek bir doğrultuda yerleştirilen antenlerle oluşturulmaktadır. Şekil 4.1.'de ki gibi yerleştirilen iki özdeş antenin toplam ışıyan alanı, kuplaj etkisinin olmadığı varsayıldığında, iki antenin ışımalarının toplamına eşittir [1].



Şekil 4.1. İki elemanlı bir dizi anten [1]

Toplam ışıyan alan;

$$E_t = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j \eta \frac{k I_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\theta_1 - \frac{e^{-j[kr + (\beta/2)]}}{r_2} \cos\theta_2 \right\} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'deki  $\beta$  elemanlar arası faz uyarımı farkıdır. Faz değişimleri için;

$$r_1 \approx r - \frac{d}{2} \cos\theta \quad (4.2)$$

$$r_2 \approx r + \frac{d}{2} \cos\theta \quad (4.3)$$

olduğu göz önüne alındığında Eşitlik 4.1, Eşitlik 4.4'te olduğu gibi sadeleştirilebilir.

$$E_t = E_1 + E_2 = \hat{a}_\theta j \eta \frac{k I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\theta \left\{ 2 \cos\left[\frac{1}{2} [kd \cos(\theta + \beta)]\right] \right\} \quad (4.4)$$

Eşit 4.4'te de görüldüğü üzere toplam alan tek bir elemanın alanının dizi faktörü olarak tanımlanan bir faktörle çarpılmasına eşit olmaktadır ve dizi faktörü Eşitlik 4.5'te verildiği şekilde ifade edilmektedir [1];

$$AF=2 \cos\left[\frac{1}{2} [k d \cos(\theta + \beta)]\right] \quad (4.5)$$

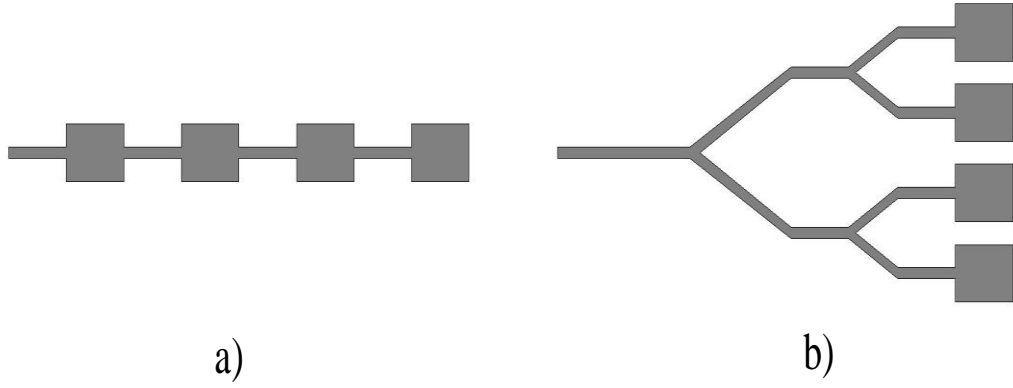
İkiden fazla elemanlı doğrusal dizi anten için dizi faktörünü genelleştirildiğinde ise Eşitlik 4.6'da verilen ifade elde edilmektedir [1].

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)kd \cos(\theta+\beta)} \quad (4.6)$$

## 4.2. Mikroşerit Dizi Antenleri Besleme Ağları

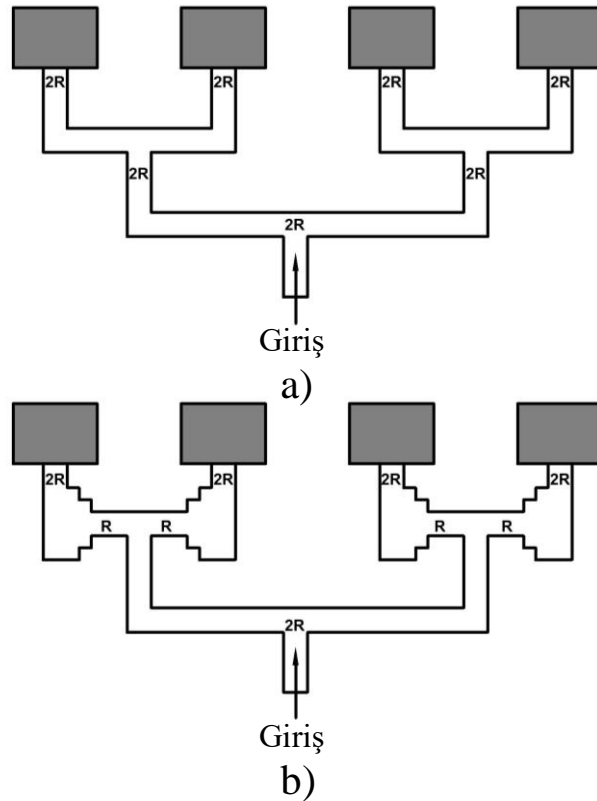
MYA'lar tek bir antenle elde edilemeyecek ışına örüntülerini elde etmek, yönlülüğü arttırmak ve hüzmeye genişliğini arttırmak için anten dizisi olarak tasarlandığında her bir dizi elemanının beslenmesi gerekmektedir. Besleme yöntemi olarak Şekil 4.2.a.'da ki gibi tek bir hat ile seri olarak besleme yöntemi tercih edilebileceği gibi Şekil 4.2.b.'de olduğu gibi paralel besleme yöntemi de tercih edilebilir [14].

Seri besleme yönteminin tasarımı ve üretimi kolay olmakla birlikte sabit hüzmeli veya değişken frekanslı diziler için dizi performansını sınırlayıcı etkileri olmaktadır. Bununla birlikte Bölüm 3.'te bahsedildiği gibi her ne kadar MYA'ların fiziksel dayanımları yüksek olsa da bu yöntemle beslenen dizi antenlerde elemanların birinde veya hatlarda meydana gelecek değişimler diğer elemanları ve anten performansını da olumsuz etkileyecektir. Bu sebeple dizi anten tasarımı yaparken bu etkilere ve dizi elemanları arasında oluşacak kuplaj etkilerini dikkate almak gerekmektedir [1],[14].



Şekil 4.2. a) Seri hat ile besleme, b) Paralel besleme ağı ile besleme [1]

Paralel besleme ağında ise her bir eleman ayrı ayrı beslenmektedir. Bu yöntemin kullanılmasının önemli bir avantajı her bir dizi elemanının beslemesinin daha kontrollü ve birbirlerinden bağımsız şekilde yapılabilmesidir.



Şekil 4.3. a) İnceltilmiş besleme hatları ile empedans uyumlaştırma b) Çeyrek dalga boyu empedans dönüştürücü ile empedans uyumlaştırma [14]

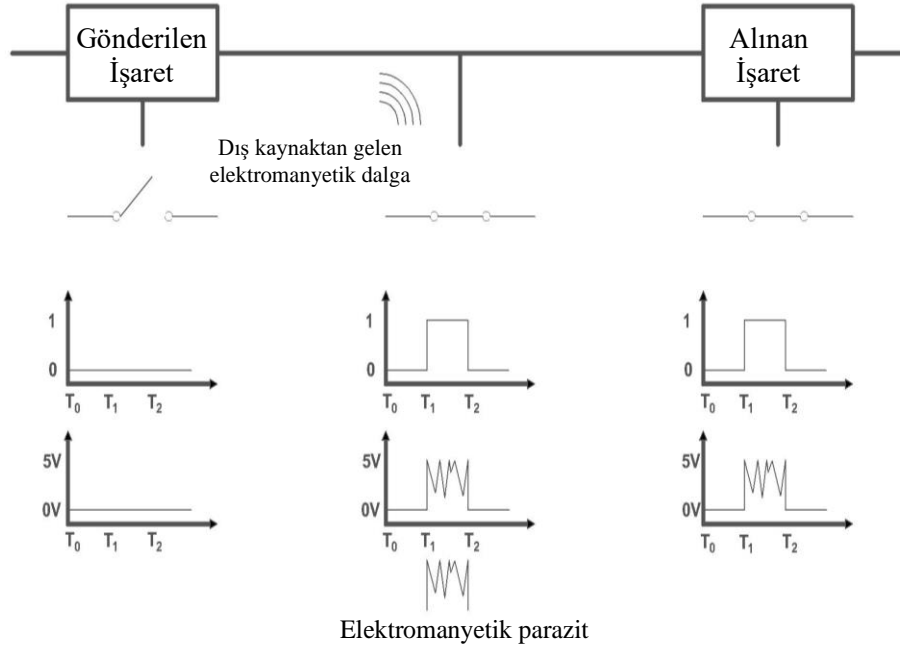
Şekil 4.3.'te toplu besleme ağının iki farklı tasarımı görülmektedir. Bu tasarımların ortak amacı 100  $\Omega$ 'luk yama elemanlarının empedansını 50  $\Omega$ 'luk besleme hattının giriş empedansına uyumlaştırmaktadır. Empedans uyumlaştırmak için Şekil 4.3.a.'da besleme hatlarının dallandığı kısımlar inceltilmiş, Şekil 4.3.b.'de ise  $\lambda/4$  empedans dönüştürücü hatlar kullanılmıştır [14].

MYA dizileri için tasarlanacak besleme ağlarında dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise; hattın yaptığı ışımların dizinin çapraz kutuplanmasında ve yan kulak seviyelerinin sınırlanmasında ciddi bir problem olacağından, besleme ağını dizinin ışına yüzeyinden izole edilmesi gerekmektedir [1],[10].

### 4.3. Elektromanyetik Girişim

Elektrik, elektronik ve elektromekanik sistemlerin çalışırken yaydıkları istenmeyen ve diğer cihazlar üzerinde bozucu etki oluşturan elektromanyetik ışımlar elektromanyetik kirlilik olarak adlandırılır ve diğer elektriksel cihazlar üzerinde bozucu etki oluşturur. Oluşan bu bozucu etki elektromanyetik girişim (Electromagnetic Interference, EMI) olarak adlandırılır. Bir diğer ifade ile de EMI bozucu elektromanyetik işaretlerin, ana işaretlere eklenerek (kuplaj olarak) ana işaretlerde oluşturdukları bozucu etki olarak da tanımlanmaktadır.

EMI olayları etkilenen sistemlerin çalışma performansının düşmesine veya bozulmasına sebep olabileceği gibi sistemleri çalışamaz hale de getirebilmektedir. Elektromanyetik girişimin etkileri televizyon sistemlerinde oluşan girişim sonucunda ekran görüntüsünün dalgalanması gibi küçük problemler olabileceği gibi 1967 yılında Forrestal uçak gemisindeki bir uçağın füze sisteminin geminin radar sinyallerinden etkilenerek istenmeden ateşlenmesi gibi büyük problemlere de sebep olabilmektedir. Şekil 4.4.'te EMI'nın bir sistem üzerindeki etkisine örnek verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere dışarıdaki elektromanyetik kirlilik sistemleri etkilemekte ve hatalı davranmaya sevk edebilmektedir.



Şekil 4.4. EMI örneği

EMI üç seviyede gerçekleşebilmektedir. Cihazlar seviyesinde olan girişim olayı birbirlerinin etki alanında çalışan iki cihazdan birinin diğeri tarafından yayılan elektromanyetik ışımalardan etkilenmesi şeklindedir. Sistem içi girişim olayı ise bir hava aracında olduğu gibi birçok alt sistemden oluşan bir sistemde alt sistemlerin birbirlerini etkilemesi şeklinde olmaktadır. Sistemler arası girişim ise birbirinden bağımsız çalışan iki sistemin birbirlerinin etki alanına girmesi ile birbirleri üzerinde bozucu etki göstermesiyle gerçekleşmektedir.

Elektromanyetik girişimin ortaya çıkardığı problemlerle elektriksel sistemlerinde yaygınlaşmasının da etkisiyle ilk defa 20. yüzyılın ortalarına doğru yaşanmıştır. Bu dönemde kullanılan radyo alıcılarının elektrikli motor, benzinli motor gibi elektromanyetik kirlilik oluşturan cihazların çalışmasından etkilendiği fark edildiğinden dolayı bu girişim olayları radyo frekans girişimi (RFI) olarak adlandırılmıştır. İkinci dünya savaşı sırasında artan radar ve telsiz haberleşmeleriyle birlikte sistemler arasındaki elektromanyetik girişim artmıştır.



#### 4.4. Elektromanyetik Uyumluluk

Elektrik, elektronik ve elektromekanik sistemlerin, başka bir sistemden kaynaklanan elektromanyetik girişimden etkilenmeden ve herhangi bir girişime yol açmadan çalışabilme yeteneği elektromanyetik uyumluluk (Electromagnetic Compatibility, EMC) olarak adlandırılmaktadır.

Elektriksel sistemler EMC sistem olarak nitelendirilirken, söz konusu sistemin benzer veya aynı sistem içerisindeki sistemlerle birlikte herhangi bir EMI'ya sebep olmaması, yaydığı elektromanyetik enerji ile etki alanındaki diğer sistemleri etkilememesi, diğer sistemlerden yayılan elektromanyetik enerjiden etkilenmemesi ve kendi içerisindeki bileşenlerinin birbirleri içerisinde elektromanyetik girişim oluşturma durumları incelenmektedir.

EMC tüm haberleşme sistemlerinin dolayısıyla antenlerin düzgün ve performanslı çalışabilmesi için son derece önemlidir. Bu sebeple EMI'nın antenler üzerindeki etkisi, bir anten tasarımında ve üretiminde dikkate alınmalı, üretilen antenleri ve haberleşme sistemlerinin elektromanyetik kirliliklerden etkilenmeyecek ve elektromanyetik kirlilik oluşturmayacak şekilde üretilmesi gerekmektedir.

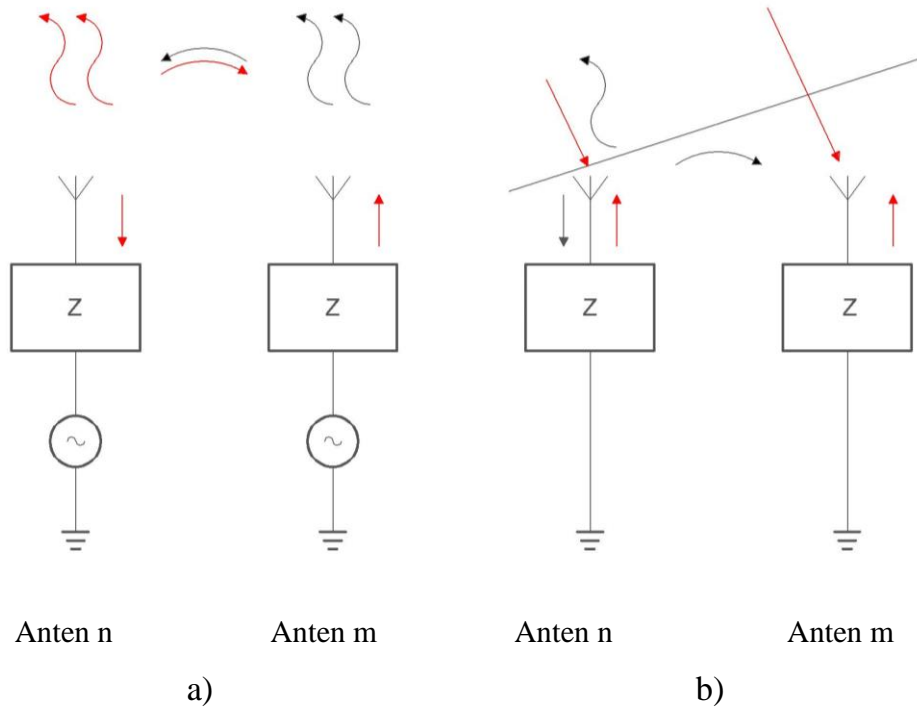
#### 4.5. Antenlerde Kuplaj etkisi

İki verici antenin birbirlerinin etki mesafesi içerisinde ışın yapığında antenlerin birinden ışınlanan enerjinin bir kısmı ideal olmayan yönlü ışın karakteristiğinden dolayı diğeri tarafından alınacaktır. Üzerlerine gelen bu ışınlardan bir kısmı da anten üzerinden tekrar etrafa saçılacaktır. Bu enerji değişimi kuplaj veya karşılıklı bağlaşım olarak ifade edilmektedir [1],[15]. Antenler arasındaki kuplaj antenlerin tasarımını karmaşıktırmakla birlikte önlenemediği zaman antenlerin performansında bozulmalara yol açmaktadır.

Birbirlerinin etki alanında olan her anten kuplaj etkisine maruz kalmamaktadır. Kuplajın bozucu etkileri birbirlerinin etki mesafesinde bulunan ve benzer frekanslarda

çalışan antenler arasında ortaya çıkmaktadır. Bunu nedeni antenlerin üretilirken belli frekans bandında ışınım veya yakalama yapacak şekilde üretilmesidir.

Şekil 4.5.a.'da verici olarak kullanılan iki elemanlı bir dizide, her bir antenin yaptığı ışınım hem iletim kanalına hem diğer antene ulaşacaktır. Diğer anten tarafından alınacak bu enerjinin bir kısmını tekrar iletim kanalına saçılacak bir kısmı da antenin beslendiği üretece doğru akım olarak akacaktır. Tekrar saçılan enerjinin bir kısmı ise ilk ışınan antene dönme durumu oluşacaktır. Bu durumda kuplaj etkisinin dizideki elemanların uzak alan örüntüsüne etkisi doğrudan uyarıma, diğer üreteçlerin uyarımına ve bu üreteçlerin oluşturduğu kuplaj etkisine bağlı olarak gerçekleşen parazitik uyarıma bağlı olacaktır [1],[15].



Şekil 4.5. Antenlerde kuplaj etkisi a) Verici antenler, b) Alıcı antenler [1]

Şekil 4.5.b.'de alıcı olarak kullanılan örneğin iki elemanlı bir dizide, iletim kanalı vasıtasıyla gelen ışınımın bir kısmı ilk anten tarafından alınıp akıma dönüşecek bir kısmı da iletim kanalına yansıtacaktır. Yansıyan ışınlardan bir kısmı iletim kanalına saçılacak kalan kısmı da gelen ışın ile vektörel olarak toplanarak diğer antene ulaşacak ve aynı saçılma burada da gerçekleşecektir [1],[15].

Benzer şekilde MYA dizilerinde de dizi elemanları arasında gerçekleşecek kuplaj tarama körlüğüne, kazancın düşmesine ve geri dönüş kaybının artmasına sebep olarak dizinin performansını olumsuz etkilemektedir.

MYA'ların, Bölüm 3'te de bahsedildiği üzere, en büyük dezavantajları düşük verimlilik, düşük güç ve düşük frekans bant genişliğidir [1]. Bu dezavantajların iyileştirilmesi için tek bir MYA yerine MYA dizisi kullanılabilir. MYA dizisi kullanıldığında ise dizi elemanları arasındaki kuplaj engellenemediğinde empedans uyumsuzluğu, anten ışınma örüntülerinde istenmeyen yan lob seviyelerinin artması dolayısıyla ışınma örüntüsünün bozulması gibi anten performansını etkiler meydana gelmektedir. [16]. Bununla birlikte MYA dizilerinde dizi elemanları taban malzemesi içerisinde oluşan yüzey dalgalarından güçlü bir şekilde etkilenmekte ve tarama körlüğüne sebep olmaktadır [1],[17].

#### **4.6. Mikroşerit Yama Antenlerde Kuplaj Etkisinin Azaltılması**

MYA'lar ve MYA dizi elemanları arasındaki kuplaj etkisinin mümkün olduğunca azaltılması ve antenlerin veya dizi anten elemanlarının birbirlerini etkilemeyecek şekilde aralarında izolasyonun sağlanabilmesi için metamalzemelerin kullanımı oldukça yaygındır ve anten performansında ciddi iyileşmeler sağlayabilmektedir [18]. Metamalzemeler, doğada bulunmayan dolayısıyla suni olarak üretilen ve olağan dışı elektromanyetik özellikler gösteren malzemelerdir.

Metamalzemeler, antenler ve dizi anten elemanları arasındaki girişimi azaltmak için birkaç farklı şekilde kullanılmaktadır. Metamalzemelerin en önemlileri kullanım şekilleri Frekans Seçici Yüzeyler (Frequency Selective Surfaces, FSS), Arızalı Zemin Yapıları (Defected Ground Structure, DGS), Ayrık Halka Rezonatörler (Split Ring Resonator, RSS) ve Elektromanyetik Bant Boşluğu (Electromagnetic Band Gap, EBG) yapılarıdır.

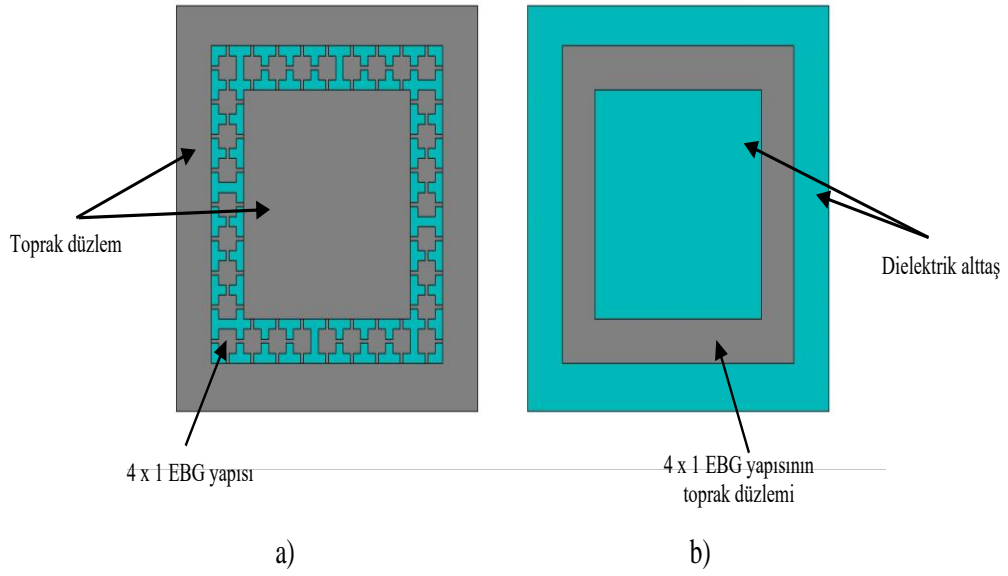
Bu çalışmada antenler ve dizi anten elemanları arasındaki kuplajı engellemek için metamalzemelerin özel bir hali olan Elektromanyetik Bant Aralığı (Electromagnetic Band Gap, EBG) yapıları kullanılacağından EBG yapıları üzerinde durulacaktır.

#### **4.7. Elektromanyetik Bant Aralığı Yapıları ve Örnek Uygulamalar**

Metamalzemelerin özel bir hali olan EBG yapıları, MYA'lar ve MYA dizilerinde bant durduran özelliği sayesinde anten performansını olumsuz etkileyen yüzey dalgalarını bastırmak için kullanılan ve bir dielektrik taban üzerine yerleştirilen periyodik metal yamalardan oluşan yapılardır.

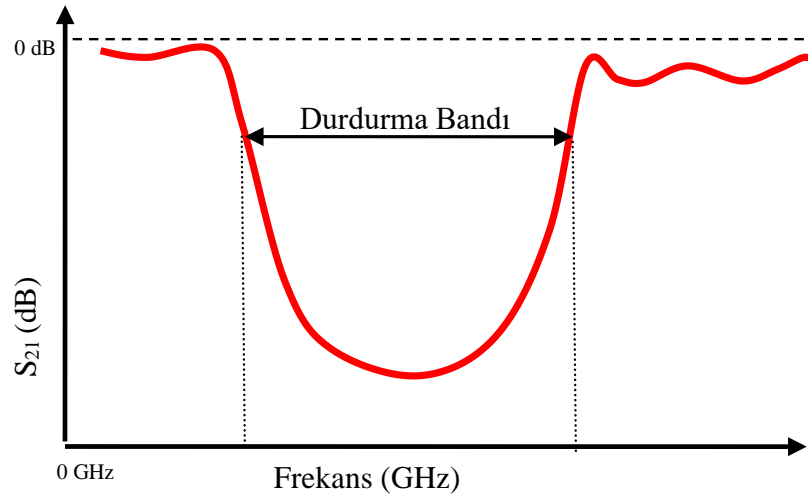
EBG yapıları entegre edildikleri antenlerin çalışma frekansındaki yüzey dalgalarının yayılmasını durdurup geri yansıtarak antenlerin söz konusu frekanslardaki elektromanyetik dalgalardan etkilenmesini engelleyerek bir antenin veya anten dizisinin performansının artırılması amacıyla kullanılmaktadır [19]. EBG yapılarının anten performansına bu olumlu etkileri, minyatür yapıları, basit tasarımları, hafifliği, kendilerine has elektromanyetik özellikleri ve yüzey elektromanyetik dalgalarının sönmülmesi özellikleriyle öne çıkan ve bilhassa telekomünikasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan yapılardır [20].

EBG yapıları oluşum biçimlerine göre delikli EBG yapıları ve metal dielektrik EBG yapıları olmak üzere ikiye, yapı bakımından ise bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere 3 sınıfa ayrıştırılırlar. Buradaki boyuttan kasıt EBG yapısının kendini periyodik olarak nasıl tekrarladığını tarif etmek için kullanılmaktadır. Metal bir yüzey üzerine açılan yarıklar tek boyutta periyodik olduğundan bir boyutlu EBG yapıları olarak sınıflandırılmaktadır. İki boyutlu EBG yapılarının en bilinen örnekleri frekans seçici yüzeylerdir ve iki boyutta periyodikliğe sahiplerdir. Üç boyutlu EBG yapılarında ise gelen işaretin frekansının yanı sıra polarizasyonu da önemli olmakla birlikte üretim zorlukları bulunmaktadır. Şekil 4.6.'da iki boyutlu örnek bir EBG yapısı görülmektedir.



Şekil 4.6. 2D EBG yapısı a) Alttan görünüş, b) Üstten görünüş

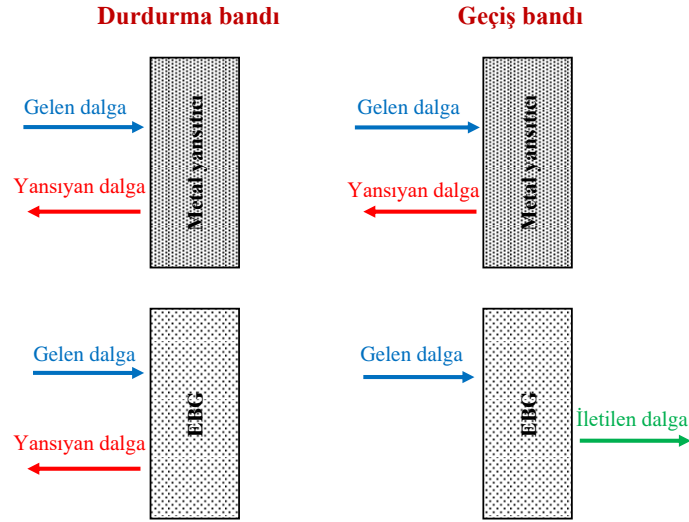
EBG yapıları sahip oldukları bant durduran özelliği nedeniyle antenler, dizi anten elemanları ve dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik girişimi engellemek amacıyla anten tasarımlarında sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 4.7. EBG yapılarının  $S_{21}$  parametrelerinin frekansa bağlı değişimi

Şekil 4.7.'de bir bant durduran EBG yapısının iki ölçüm noktası arasındaki iletimin bağıl değerini gösteren  $S_{21}$  parametresinin frekansa bağlı değişimi verilmektedir. Şekil incelendiğinde EBG yapısının belli frekans bandında elektromanyetik iletimi azalttığı görülmektedir. İletimin azaltıldığı ve EBG yapısının bant durduran özelliği gösterdiği

bu bölge bant çukuru (Bant Gap) olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgenin dışında kalan frekans aralığı ise geçiş bandı olarak adlandırılmaktadır. EBG yapıları bant çukuru bölgesinde Şekil 4.8.'de gösterildiği gibi metal yansıtıcı gibi davranarak gelen elektromanyetik dalgaları yansıtmaktadır. Bu frekans aralığı dışında ise yine şekilde gösterildiği gibi elektromanyetik dalgaların yayılımına izin vermektedir.



Şekil 4.8. EBG yapılarının çalışma prensibi

Literatürde yapılan çalışmalarda EBG yapılarının bant durduran özelliği MYA antenler ve anten dizileri arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. MYA'ların yüzey empedansı entegre edilen EBG yapılarının endüktif ve kapasitif empedanslarıyla artırılarak yapılarda yüzey dalgaları sönmölenmekte ve elektromanyetik kuplajın oluşması engellenmektedir.

Aşağıda konuyla ilgili literatürde yer alan çalışmalardan örnekler verilmiştir. Örneklerin tamamında antenler arasındaki elektromanyetik iletkenliğin bağıl değeri olan  $S_{21}$  parametresinin frekansa bağıl değişimleri EBG yapılarının bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için analiz edilmiş ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda antenlerin rezonans frekansındaki  $S_{21}$  parametresinin azalış miktarı incelenmiştir.

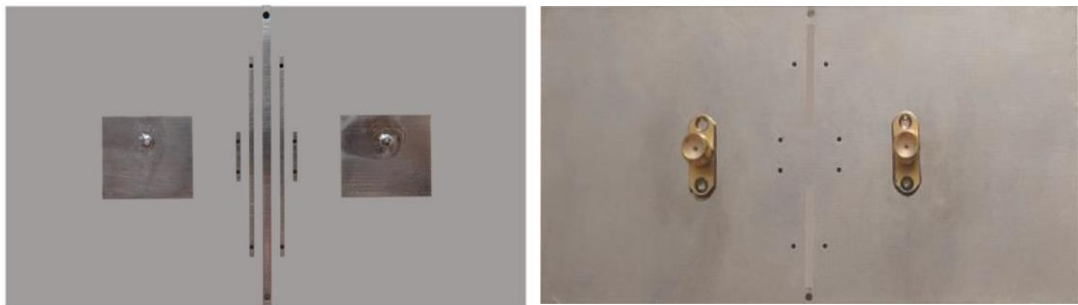


a)

b)

Şekil 4.9. a) İki elemanlı dizi anten tasarımı, b) İki elemanlı ve EBG yapısı içeren dizi anten tasarımı [21]

8.7-11.7GHz, 11.9-14.6 GHz, 15.6-17.1 GHz 22-26 GHz ve 29-34.2 GHz frekans aralık değerlerine karşılık gelen X, Ku, K ve Ka bantlarında antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajın azaltılmasını amaçlayan bir çalışmada [21] Şekil 4.9.a'da gösterildiği gibi aynı dielektrik alttaş üzerine konumlandırılmış, aralarında elektromanyetik izolasyon olmayan ve iki ayrı noktadan SMA konnetktör ile beslenen 2x1 eş elemanlı MYA dizisinin  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametrelerinin frekansa bağlı değişimi ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları antenlerin oluşturduğu yüzey dalgaları sebebiyle dizi elemanları arasında elektromanyetik kuplajın oluşturduğunu göstermiştir. Daha sonra aynı yapının arasına önerilen EBG yapısı Şekil 4.9.b'de gösterildiği şekilde entegre edilerek ölçümler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda önerilen EBG yapısının 8 GHz – 40 GHz çalışma frekansında 5 farklı çalışma bandında elektromanyetik kuplajın 10 dB ile 37 dB arasında bastırıldığı görülmüştür.

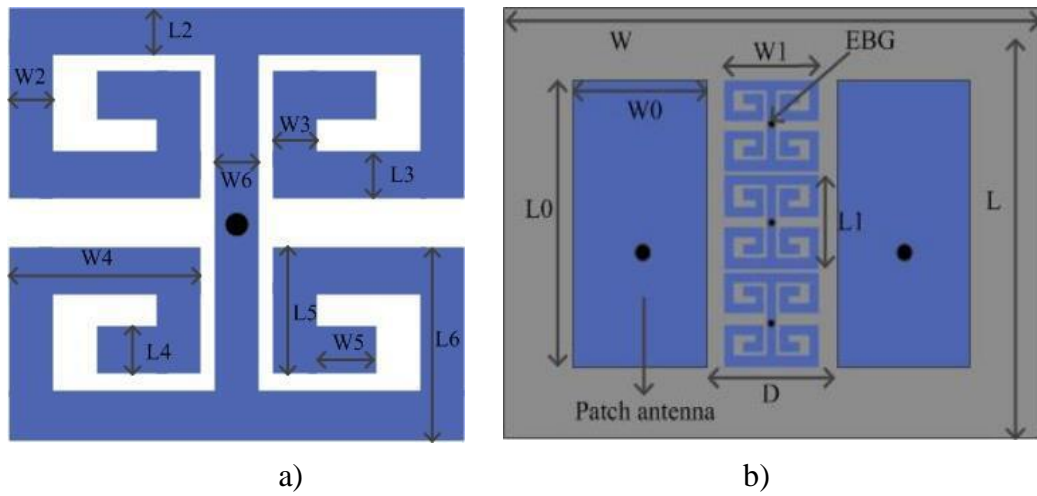


a)

b)

Şekil 4.10. 4,32 GHz çalışma frekansında EBG yapısı içeren 2x1 dizi anten tasarımının a) Üstten görünüşü, b) Alttan görünüşü [22]

Şekil 4.10.'da 4.32 GHz frekansında çalışan ve altimetre sistemlerinde kullanılmak için tasarlanan 2x1 dizi antenin elemanları arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemek amacıyla dizi elemanları arasına şekilde görülen EBG yapısı yerleştirilmiş ve EBG yapısının uç kısımları ile toprak düzlemi vialar ile birbirine temas ettirilmiş ve EBG yapısının ve yapının boyutlarının dizi elemanları arasında oluşan elektromanyetik kuplaja etkisi incelenmiştir [22]. Yapılan ölçüm sonucunda önerilen EBG yapısının dizi antenin rezonans frekansı olan 4.32 GHz'de dizi elemanları arasında oluşan karşılıklı kuplajı yaklaşık olarak 41 dB azalttığı görülmüştür.



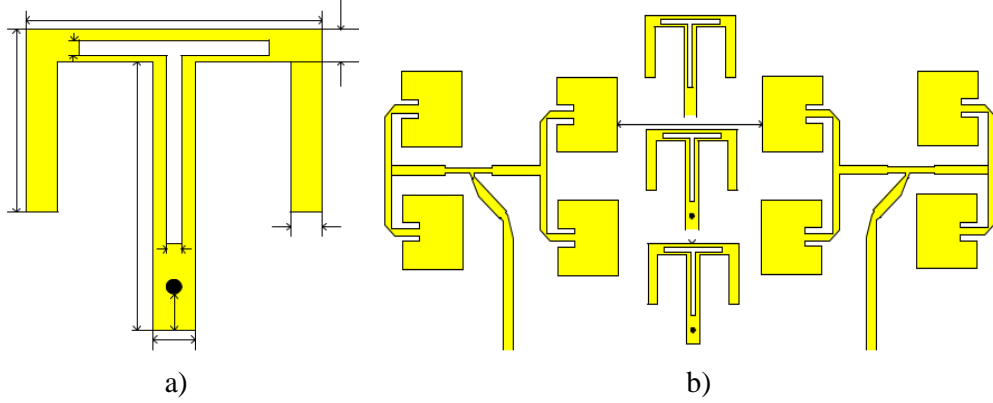
Şekil 4.11. 2,45 GHz çalışma frekansında a) EBG yapısı, b) 1x3EBG1x1 yapısı entegre edilmiş dizi anten tasarımı [23]

2,45 GHz çalışma frekansında dizi antenler arasında elektromanyetik izolasyonu sağlamak amacıyla Şekil 4.11.a.'da verilen yapı 1x3 konfigürasyonunda dizi anten elemanları arasına entegre edilmiştir [23]. EBG'li ve EBG'siz yapıların simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında 2,45 GHz frekansında dizi elemanları arasında oluşan kuplajın 14 dB kadar azaltıldığı görülmüştür.

28 GHz çalışma frekansında dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemek amacıyla yapılan bir çalışmada [24] aynı dielektrik alttaşı üzerine konumlandırılan eş iki anten arasına çalışma kapsamında tasarlanan EBG yapıları eklenerek antenlerin ışıma performansını etkilemeden aralarında oluşan

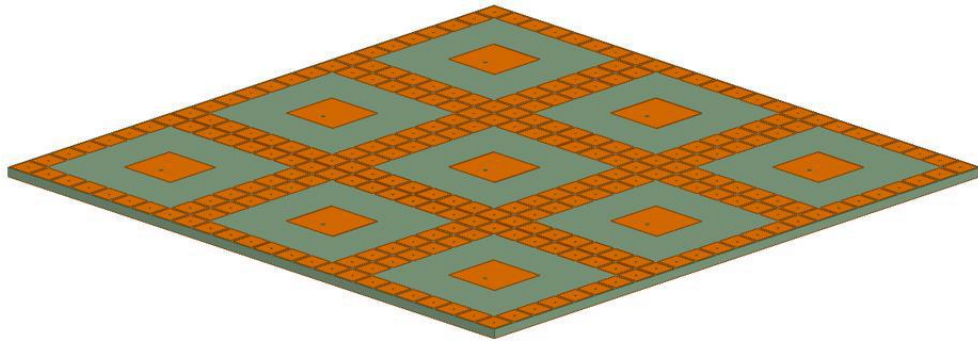


elektromanyetik kuplajın 34 dB kadar azaltıldığı yapılan nümerik analizler sonucunda görülmüştür.



Şekil 4.12. 6,04 GHz çalışma frekansında a) Önerilen EBG yapısı, b) 1x3EBG1x1 yapısı entegre edilmiş 2x2 alıcı ve verici dizi anten tasarımı [25]

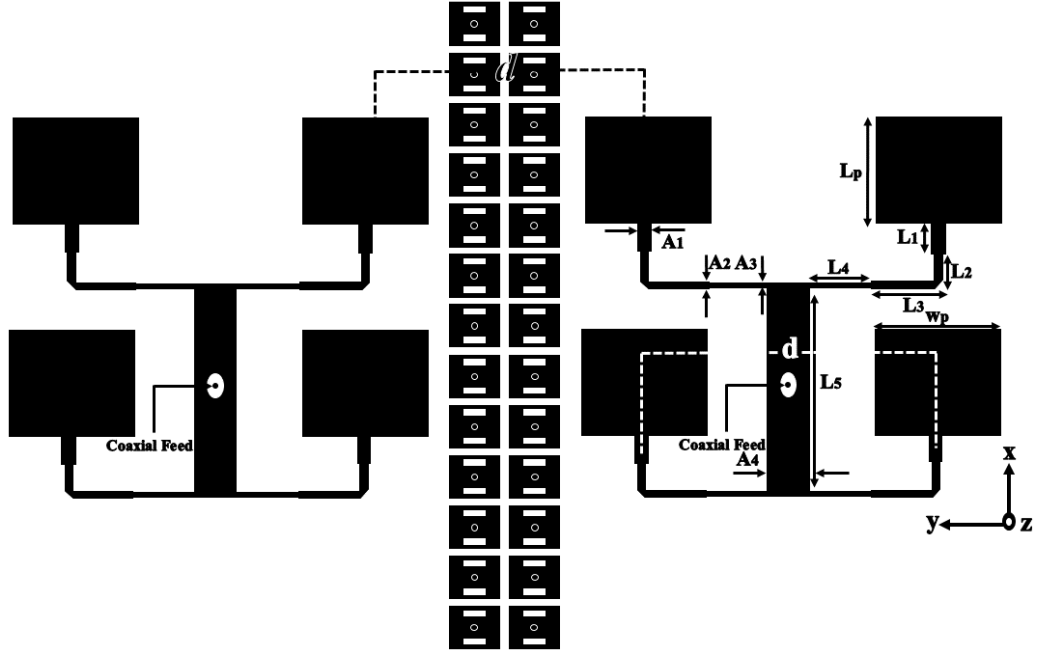
Radar antenlerinde alıcı ve verici antenler/anten dizileri birbirlerine yakın olarak konumlandırılmaktadır. Bu sebeple antenler arasında elektromanyetik izolasyonun sağlanması son derece önemli olmaktadır. Şekil 4.12.a'da verilen EBG yapısı 6,04 GHz frekansında aynı dielektrik alttaş üzerinde bulunan 2x2 alıcı ve 2x2 verici antenler arasına konumlandırılarak EBG yapısının antenler arasında oluşturduğu etki incelenmiştir [25]. Yapılan nümerik analizler neticesinde EBG yapısının dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajı 35 dB kadar sönümlerken dizi antenlerin ışınma karakteristiği üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığı görülmüştür.



Şekil 4.13. 10 GHz çalışma frekansında elemanları arasına EBG yapıları entegre edilmiş 3x3 dizi anten [26]

10 GHz frekansında yayın yapan ve uydu haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere tasarlanan Şekil 4.13'te konfigürasyonu verilen 3x3 boyutunda dizi antenin elemanları

arasında elektromanyetik kuplajı azaltmak amacıyla mantar şekilli EBG yapısı tasarlanmış ve her bir dizi elemanı periyodik EBG yapılarıyla çevrelenmiştir [26]. EBG yapılarının dizi antenler arasında yerleştirildikten sonra dizi elemanları arasında oluşan kuplajın 12 dB'ye kadar yansıma katsayısının da 17,8 dB'ye kadar azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.14. 5.8 GHz çalışma frekansında  $2 \times 13$  EBG  $1 \times 1$  yapısı içeren  $2 \times 2$  dizi anten [27]

5.8 GHz frekansında  $2 \times 2$  elemanlı dizi antenlerin arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemek amacıyla Şekil 4.14.'te verilen yapı kullanılmıştır [27]. Kullanılan  $2 \times 13$ 'lük EBG yapısının dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajı 26 dB kadar azalttığı görülmüştür.

## **BÖLÜM 5. TASARIM VE BENZETİM**

### **5.1. Computer Simulation Technology (CST)**

CST Microwave Studio [28], karmaşık geometrik ve optik özelliklere sahip parçacıklar tarafından gerçekleşen elektromanyetik saçılmayı analiz etmek için kullanılan ticari bir yazılım paketidir. Esasen elektromanyetik simülasyon, 1977 yılında Prof. Dr. Thomas Wieland tarafından geliştirilen sonlu integrasyon tekniğine (Finite Integration Technique, FIT) dayanmaktadır. Sonlu integrasyon tekniği, kavramsal olarak basit ve integral formatındaki Maxwell denklemlerinin ayrıık biçimini sağlamaktadır.

CST yazılımı elektromanyetik sistemler ve sistem parçalarını bilgisayar ortamında tasarlama, analiz etme ve optimize etme imkanı sağlaması, pratikliği, kullanıcılara birçok kolaylık sağlaması, analiz yöntemlerinde kullanılan zahmetli işlemlerle uğraştırmadan analizleri gerçekleştirmesi, bünyesinde tasarlanmış bileşenlerin istenilen elektromanyetik durumlarını yüksek gerçeklikle ortaya koyması nedeniyle literatürde yer alan çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılan programlardan biri olmuştur. CST programı vasıtasıyla 3 boyutlu tasarımlar ve analizler kolaylıkla yapılabilmektedir. Çizimlerin parametrelendirilerek yapılabilmesi geometrilerin çizimi, düzenlemesi ve optimizasyonu konularında oldukça kolaylık sağlamaktadır. Kullanıcıların geometrik yapıyı oluşturup, malzeme özelliklerini ve istenen analizleri ayarlamasından sonra nümerik analizleri gerçekleştirmektedir.

CST yazılımının bu çalışmada kullanılması vasıtasıyla tasarlanan antenin/antenlerin nümerik analizleri kolaylıkla elde edilmiş ve antene/antenlere ait geri dönüş kaybı, ışımaya örüntüsü, akım yoğunluğu, elektrik ve manyetik alan dağılımları, S-parametreleri ile uzak ve yakın alan ışımaya sonuçları kolaylıkla elde edilebilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yapılan MYA, dizi anten, EBG tasarım ve simülasyonlarında CST programı kullanılmıştır.

## **5.2. Antenna Magus**

Antenna Magus yazılımı [29], anten tasarımı ve modellemesinin pratikleştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Yazılım bünyesinde bulunan 350'den fazla anten modellerden istenilen model seçilerek istenen özelliklerde anten tasarımı ve optimizasyonu yapılabilmekte ve tasarlanan antenin tahmini parametrik değerleri elde edilebilmektedir. Bununla birlikte son yıllarda Antenna Magus yazılımı CST Studio Suite bünyesine dahil edilmesiyle birlikte yazılım aracılığıyla tasarlanan antenler CST Microwave Studio ortamına aktarılarak pratik bir şekilde anten tasarımlarının nümerik analizleri elde edilebilmektedir.

Antenna Magus programı sağladığı kolaylıklar ile anten tasarımı ve haberleşme üzerine çalışanların ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Bu program vasıtasıyla daha hızlı ve efektif tasarımlar yapılabilmektedir.

## **5.3. Dizi Anten Tasarımı**

Dizi MYA tasarım işlemleri Antenna Magus programı vasıtasıyla yapılmıştır. Bu program bünyesinde yapılan tasarımlar CST'ye kolaylıkla aktarılabilir. Buda tasarlanan antenin farklı tekniklerle elektriksel analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır.

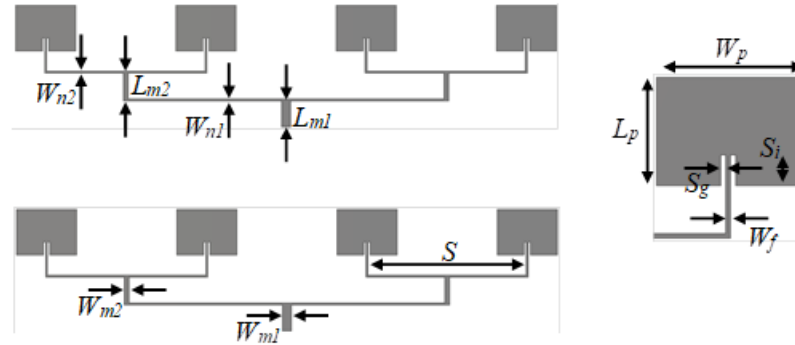
Anten tasarımında ilk adım kullanılacak malzemeyi seçmektir. Çünkü tasarım kullanılacak malzemenin fiziksel ve elektriksel özelliklerine göre yapılmaktadır. Dielektrik alttaş olarak kullanılmak üzere FR4 malzemesi seçilmiştir. Bunun sebebi kolayca temin edilebilmesi ve maliyetinin düşük olmasıdır. Ancak her malzeme elektriksel özelliklerini belli bir tolerans bandında sergilemektedir. Bu sebeple tolerans bandı geniş olan malzemelerin kullanılması bilgisayar tabanlı olarak yapılan

benzetimlerde alınan sonuçların elektriksel testler ile elde edilememesine sebep olabilmektedir. Piyasada çeşitli FR4'ler olmasına rağmen hassasiyeti daha iyi olan bir çeşit seçilmiştir. Seçilen iki yüzü bakır iletken olan FR4'ün ve iletken yüzlerinin karakteristik özellikleri ve çalışma frekansı Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Mikroserit anten tasarımında kullanılacak FR4 malzemesinin karakteristik özellikleri

Parametre	Açıklama	Değer
$\epsilon_r$	Kullanılan FR4'ün elektrik geçirgenliği	4.5
d	FR4'ün kalınlığı	1,6 mm
t	Yama ve toprak düzleminde kullanılan bakırın kalınlığı	35 $\mu$ m
tan $\delta$	Kayıp tanjantı	0.020

Bölüm 4.'te de bahsedildiği üzere dizi anten tasarımları anten performansını geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sebeple MYA'ların dar bant genişliği ve düşük kazanç gibi karakteristik dezavantajlarını minimize edebilmek ve anten performansını iyileştirmek amacıyla MYA dizisi tasarımlarının kullanımı oldukça yaygındır. Bu çalışma kapsamında da MYA dizisi tasarımı kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Dizi anten tasarımı

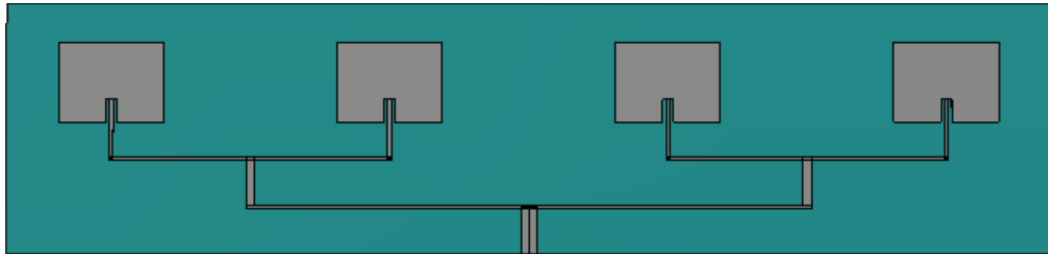
Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi, dizi anten 4 eş elemanlı olarak tasarlanmıştır. Dizi elemanlarını beslemek amacıyla paralel besleme ağı tasarımı tercih edilmiştir. Bununla birlikte besleme hattının empedans uyumlaştırılması için inceltilmiş besleme ağı tasarımı kullanılmıştır. Tasarımı yapılan dizi antenin fiziksel parametrelerine Şekil 5.1.'de, parametrik değerlerine Tablo 5.2.'de ve tasarım görünümüne de Şekil 5.2.'de yer verilmiştir.

Tablo 5.2. Dizi antenin tasarım parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer
$f_r$	Rezonans frekansı	4,3 GHz
$W_p$	Yama genişliği	20,0869 mm
$L_p$	Yama uzunluğu	15,1983 mm
$W_f$	Yamaya giden ikincil hat kalınlığı	0,69 mm
$L_f$	Yamaya giden ikincil hat uzunluğu	10,99 mm
$S$	Besleme noktaları arası mesafe	5,2586 mm
$S_g$	Besleme hattı ile yama arasındaki mesafe	0,69 mm
$S_i$	Besleme hattının yama içindeki uzunluğu	4,3057 mm
$L_{m1}$	Besleme girişinin uzunluğu	8,6962 mm
$W_{m1}$	Besleme girişinin kalınlığı	3,01 mm
$W_{n1}$	Ana besleme hattının kalınlığı	0,69 mm
$L_{m2}$	Besleme hatları arası bağlantı uzunluğu	8,57 mm
$W_{n2}$	İkincil besleme hattının genişliği	0,69 mm

Dizi anten tasarımlarında farklı yama boyutları ve/veya farklı dizi elemanı sayıları ile de tasarımlar gerçekleştirilebilmekle birlikte gerek tasarım kolaylığı gerekse üretim kolaylığı açısından simetrik ve eş yapılarla tasarımların yapılması büyük kolaylıklar sağladığından bu çalışmada da eş yamalardan oluşan eş dizi antenler ile tasarım gerçekleştirilmiştir.

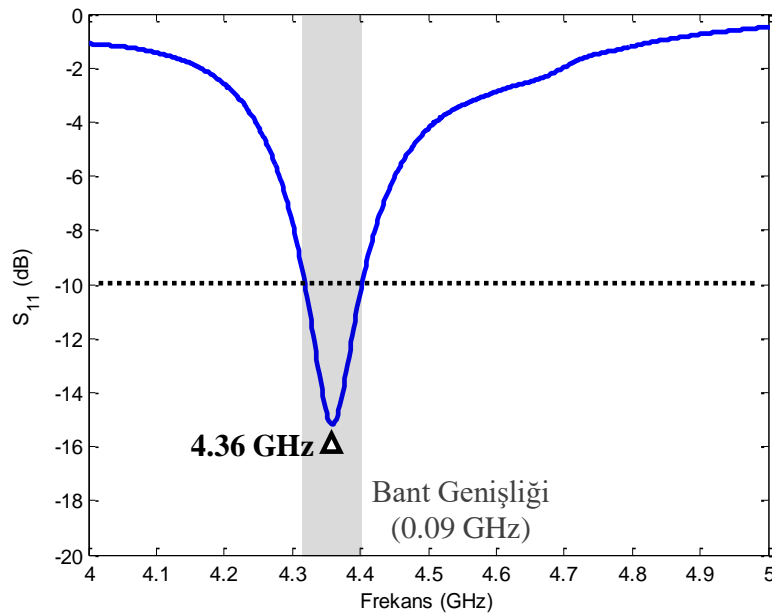
Bölüm 4.'te de bahsedildiği üzere besleme ağlarının tasarımında empedans uyumu kaynaktan gelen işaretlerin en az yansımayla antene aktarılacak elektromanyetik dalgalara dönüştürülmesinde önemli bir husustur. Besleme ağının tasarımında bu husus dikkate alınmıştır.



Şekil 5.2. Tasarlanan dizi antenin benzetim görüntüsü

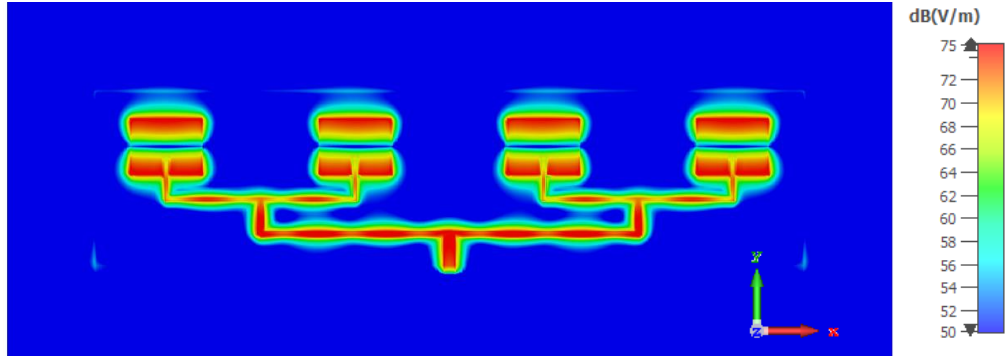
Tasarlanan dizi anten CST programına aktarılarak 2 GHz – 6 GHz frekans aralığında simülasyonu gerçekleştirilmiş ve frekansa bağlı S parametreleri (Scattering parameters) elde edilmiştir. Bilindiği gibi S parametreleri elektriksel sinyallerle uyarılan devrelerin davranışlarını karakterize etmek için kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle elektriksel sistemin giriş ve çıkış portları arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır.

Uygulamalarda S parametrelerinden en çok kullanılanı  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametresidir.  $S_{11}$  parametresi antenin giriş portuna uygulanan elektriksel sinyalin ne kadarının sisteme geri yansıdığını ifade etmektedir. Bu yansımanın sebebi işaret kaynağı ile anten arasındaki empedans uyumsuzluğudur. Antenin empedansı iletim hattının empedansı olan  $50\Omega$  ile uyumlu olmadığı durumlar özellikle yüksek frekans uygulamalarında yansımayı ve geri dönüş kaybını artırarak antenin ışımaya için kullanabileceği gücü azaltmaktadır.  $S_{11}$  parametresi aynı cins birimlerin oranı olduğundan dolayı birimsizdir ve dB cinsinden ifade edilmektedir.  $S_{11}$  in 0 dB olduğu durumda antene gelen işaretin tamamının sisteme geri yansıtıldığı ve antenin ışımaya yapmadığı anlaşılmaktadır.  $S_{11}$  parametresinin -10 dB ve daha düşük olduğu değerlerde anten verimli olarak kullanılabilir.  $S_{11}$ 'in -10 dB olduğu noktada kaynaktan gelen işaretin %90'ı antene ulaşmaktadır.



Şekil 5.3. Dizi anten tasarımının frekansa bağlı geri dönüş kaybı

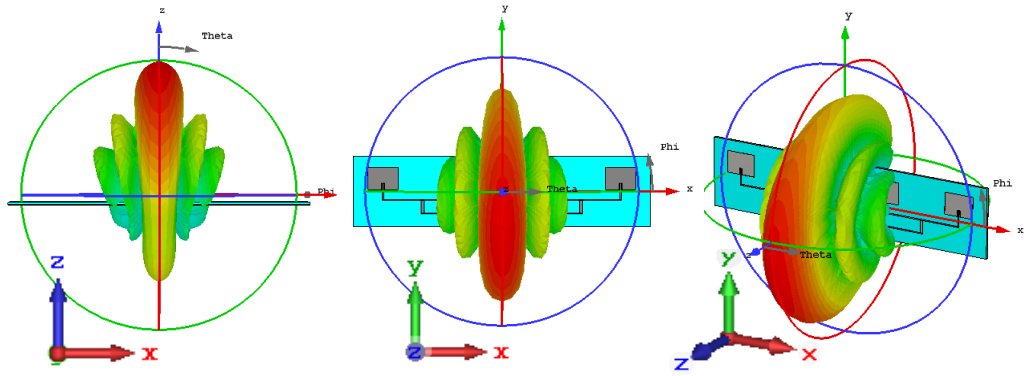
Şekil 5.3. 'te tasarlanan dizi antenin simülasyonu sonucunda geri dönüş kaybının,  $S_{11}$  parametresinin, frekansa bağlı olarak değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde dizi antenin rezonans frekansının, merkez frekansının, 4,36 GHz olduğu ve rezonans frekansında yaklaşık olarak geri dönüş kaybının -15.1 dB olduğu görülmektedir.  $S_{11}$  parametresinin -10 dB'nin altında olduğu 4,31 GHz ile 4,40 GHz arasında yaklaşık olarak 0,09 GHz bant genişliği olduğu görülmektedir. Başta da belirtildiği gibi çalışmanın ilk adımında çalışma frekansı 4,3 GHz olan dizi anten tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Tasarlanan dizi antenin  $S_{11}$  parametresinin frekansa bağlı değişimi incelendiğinde antenin söz konusu frekansta çalışmaya uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. Dizi anten tasarımının çalışma frekansında oluşan elektrik alan dağılımı

Şekil 5.4.'de dizi antenin çalışma frekansında 2D elektrik alan dağılımları verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere sinyallerin iletildiği besleme ağları dizi antenlerin karakteristik empedanslarını dolayısıyla anten performansını da etkilemektedir. Şekil 5.4. incelendiğinde dikkat çeken bir husus da yamaların orta noktalarında ışımının olmadığı şerit şeklinde bölgelerin oluşmasıdır. Bu da sinüzoidal olarak ilerleyen elektriksel işaretlerin sıfır kestiği noktalarda ışımının olmaması sebebiyledir.





Şekil 5.5. Dizi anten tasarımının çalışma frekansında 3D uzak alan ışıma örüntüsü (a) yan görünüş, (b) üst görünüş ve (c) perspektif görünüş

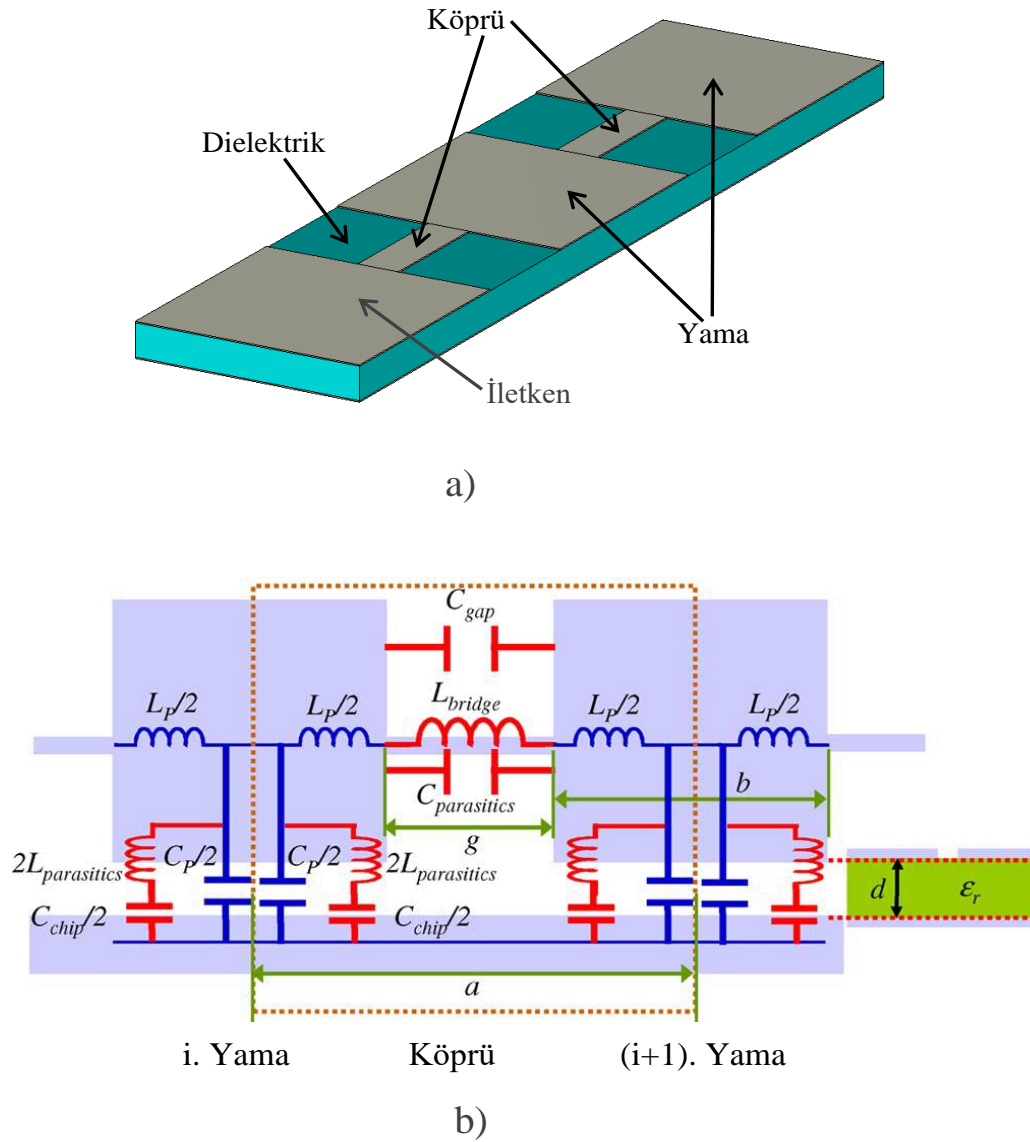
Şekil 5.5.'te dizi antenin 3D uzak alan ışıma örüntüsü görülmektedir. Işıma örüntülerinin çiziminde ana lobun yan ve arka loblardan daha belirgin olarak görülebilmesi için çizimlerde dB cinsinden bağlı değerler kullanılmıştır.

Şekil 5.5. incelendiğinde tasarımı yapılan antenin çalışma frekansında değerinde ana lob açısının  $17^\circ$ , anten kazancının 13,2 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin  $77,6^\circ$  olduğu görülmektedir. Bununla birlikte şekilde görülen ışıma örüntüsü MYA'ların karakteristik ışıma örüntüsüdür. Çünkü MYA'lar düzlemsel antenlerdir ve ışımının büyük bölümü toprak tabaka tarafından uyarılan yamanın kenarlarından üst yarı düzleme doğru gerçekleşmektedir. Bununla birlikte çoğunluğuna toprak tabakanın sebep olduğu arka ve yan loblarla oluşmaktadır. MYA'ların bu özelliği her yönlü ışımının gerçekleşmesinin istendiği uygulamalar için uygun olmamakla birlikte dizi antenin toprak tarafının uçak gövdesine yerleştirileceği dolayısıyla düzlemsel ışımının elde edilmek istendiği bu uygulamada sorun teşkil etmemektedir.

#### 5.4. EBG Yapısı Tasarımı

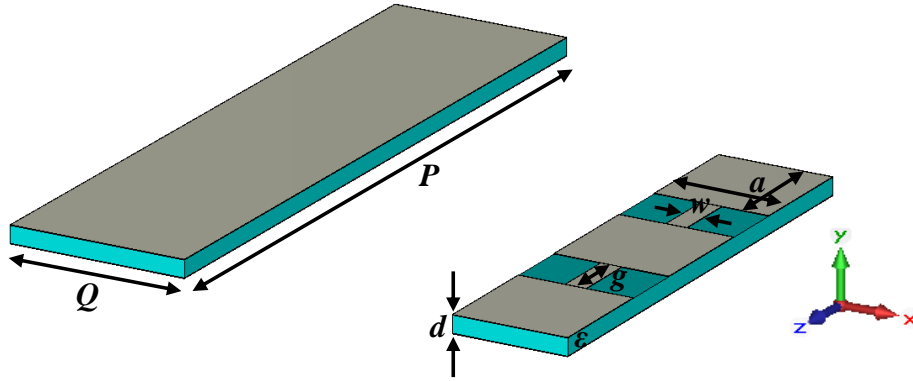
Tasarımı yapılan EBG yapısı daha önce farklı frekanslarda farklı amaçlar için kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; Yüksek hızlı dijital baskı devre kartlarında (Printed Circuit Board, PCB) gürültü yalıtımı için, gömülü elektromanyetik bant boşluğu (EBG) yapısına sahip iki paralel GND düzlemi arasındaki tek uçlu ve diferansiyel şerit hatlarının sinyal iletim performansını incelemek ve ortak mod filtresi

gerçekleştirmek gibi uygulamalar için kullanılmıştır [30]-[32]. Bu çalışmada ise söz konusu EBG yapısı ilk defa 4,3 GHz çalışma frekansına uyarlanmış ve mikroşerit anten dizileri arasındaki istenmeyen elektromanyetik girişimi engellemek amacıyla kullanılmıştır. Çalışma kapsamında tasarlanan EBG yapısının benzetim modeli ve eşdeğer devresi Şekil 5.6.'da verilmektedir. Şekil 5.7.'de ve Tablo 5.3.'te tasarım parametreleri verilen EBG yapısının tasarımında kullanılan yama ve köprüler yapının yüzey empedansını artırarak işaret iletkeninin elektriksel boyutlarını küçültmektedir.



Şekil 5. 6. 1x1EBG3x1 modelinin a) Görseli b) Devre eşdeğeri

Şekil 5.6.'da da görüldüğü üzere EBG yapısı üç adet yama ve yamaları birbirine bağlayan iki adet köprüden oluşmaktadır. Bu yapıda yamalar ile toprak iletkeni arasında, köprüler ile toprak iletkeni arasında, yamalar ile köprüler arasında ve yamalar arasında endüktif ve kapasitif etkiler oluşmaktadır. Ancak yapının oluşturduğu kapasitif etkiler endüktif etkilere kıyasla çok küçük değerlerde olduğu için ihmal edilmekte ve yapının tamamen endüktif karakterli olduğu kabul edilerek tasarımlar gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.7. 1x1EBG3x1 tasarım parametreleri

EBG yapısının tasarım parametreleri Şekil 5.7.'de verilmiştir. EBG yapısını istenen çalışma frekansını belirleyen yama ve köprülerin parametrik değerleri analitik olarak Eşitlik 5.1- Eşitlik 5.4'ten hesaplanmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi EBG yapısı gösterdiği endüktif ve kapasitif etki ile bant durduran RC filtre görevi görmektedir. Bununla birlikte yapının parametrik değerleri hesaplanırken tamamen endüktif etki gösterdiği kabulüyle aşağıda verilen eşitlikler kullanılmaktadır.

$$P = \frac{c_0}{2f_{10}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5.1)$$

$$L_{Yama} = \mu_0 d \quad (5.2)$$

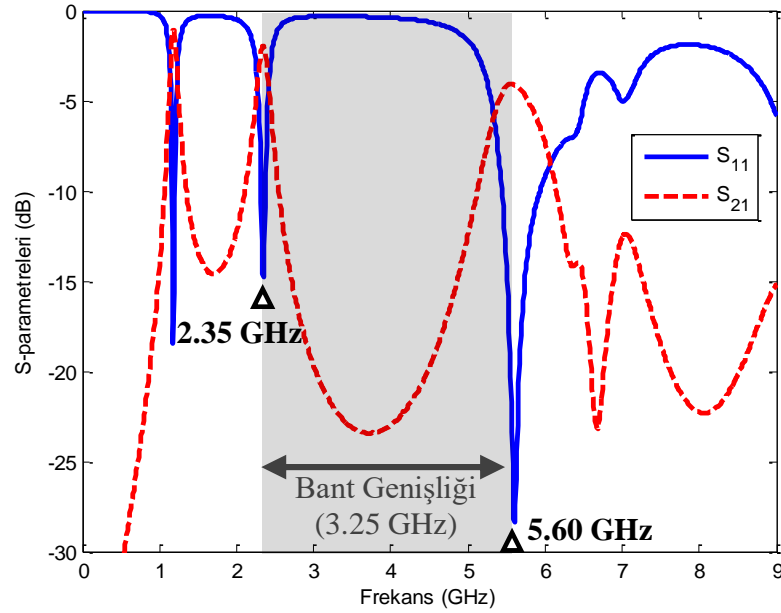
$$L_{Köprü} = \begin{cases} g \frac{60}{c_0} \ln \left( \frac{8d}{w} + \frac{w}{4d} \right) & \frac{w}{d} \leq 1 \\ \left[ g \frac{120\pi}{c_0} \left[ \frac{w}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{d} + 1.444 \right) \right] \right]^{-1} & \frac{w}{d} \geq 1 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$L_{Toplam} = \mu_0 d \frac{P}{a} = M \cdot L_{Yama} + (M - 1) \cdot L_{Köprü} \quad (5.4)$$

Tasarımları yapılan dizi antenin merkez çalışma frekans değeri göz önüne alınarak EBG yapısının geniş bir frekans aralığında çalışması hedeflenmiş ve yukarıda verilen eşitlikler yardımı ile tasarım parametre değerleri elde edilmiştir. Elde edilen parametre değerleri Tablo 5.3.'te listelenmiştir.

Tablo 5.3. 1x1EBG3x1 tasarım parametre değerleri

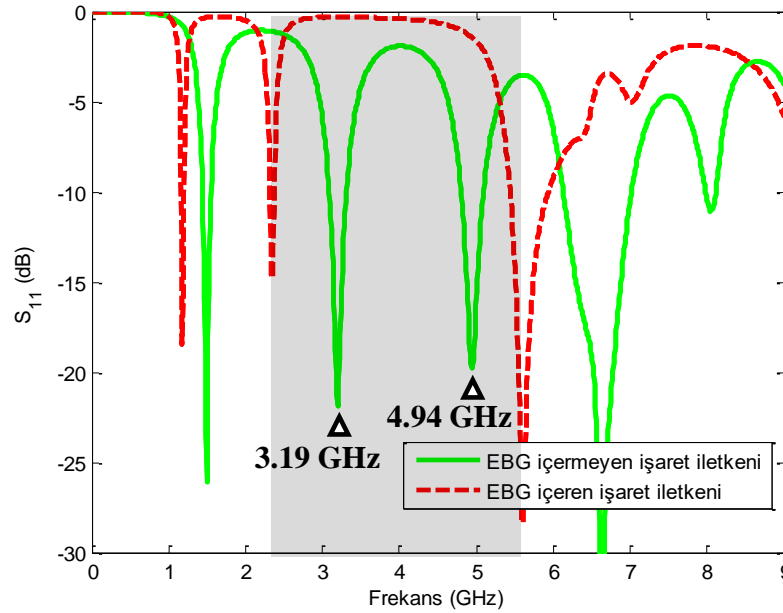
Parametre	Açıklama	Değer
$f_r$	Merkez frekansı	4,3 GHz
$BW$	Bant genişliği	3,25 GHz
$a$	Yama uzunluğu ve genişliği	11 mm
$g$	Köprü uzunluğu	6 mm
$w$	Köprü genişliği	2 mm
$d$	Dielektrik kalınlığı	1,6 mm
$t$	İletken kalınlığı	0,035 mm
$\epsilon$	Dielektrik geçirgenliği	4,5



Şekil 5.8. 1x1EBG3x1 tasarımının frekansa bağlı S-parametreleri

Tablo 5.3.'te verilen tasarım parametre değerlerine sahip EBG yapısının nümerik analizleri sonucunda elde edilen  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametrelerinin frekansa göre değişimi Şekil 5.8.'de verilmiştir. Yansıma katsayısının veya geri dönüş kaybının bağlı ifadesi olan  $S_{11}$  parametresinin -10 dB'nin altında olduğu bölge antenler için verimli ışınım

bölgesi olarak kabul edilirken iletimin bağıl ifadesi olan  $S_{21}$  parametresinin  $-3\text{dB}$ 'nin altında olduğu alan ise filtreler için kullanılabilir bölge olduğu kabul edilmektedir. Bu çerçevede şekilde verilen parametrelerin değişimleri incelendiğinde tasarlanan EBG yapısının iki ölçüm noktası arasındaki iletkenliğin bağıl değeri olan  $S_{21}$  parametresinin  $2,35\text{ GHz}$  ile  $5,6\text{ GHz}$  arasında  $3,25\text{ GHz}$ 'lik frekans bandında,  $S_{21}$  parametresinin  $-3\text{dB}$ 'nin altında olduğu dolayısıyla bu frekans aralığında iletkenliği azaltarak elektromanyetik sönümlenme sağladığı görülmektedir. EBG yapısının merkez frekansının yani en büyük oranda sönümlenme yaptığı frekansın dizi antenlerin çalışma frekansı olan  $4,3\text{ GHz}$  çok yakın olduğu görülmektedir. Buda yapının dizi antenlerin çalışma frekansı civarında en yüksek sönümlenmeyi sağladığını göstermektedir.  $S_{11}$  parametresinin EBG yapısının bant aralığı içerisindeki değerlerinin ise  $0$ 'a yakın olduğu dolayısıyla EBG yapısının bant aralığı içerisinde gelen işaretlerin ve elektromanyetik dalgaların tamamına yakını yansıttığını ve bir nevi bant durduran filtre gibi çalıştığını göstermektedir.

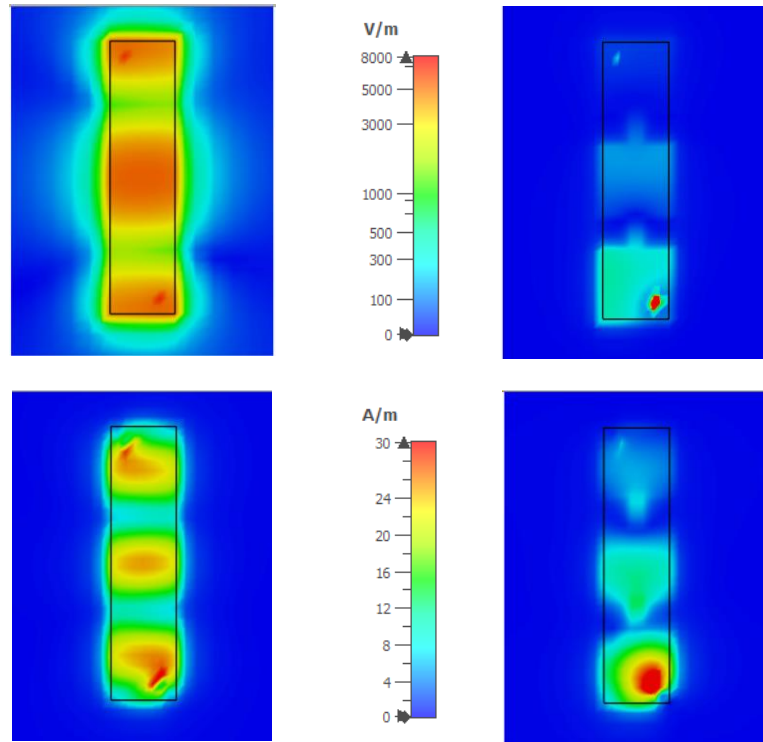


Şekil 5.9.  $3 \times 3 \text{EBG} 3 \times 1$  tasarımı içeren işaret iletkeni ile EBG tasarımı içermeyen işaret iletkenin frekansa bağlı  $S_{11}$  parametreleri

Şekil 5.9.'da EBG yapısının çalışma frekansında yansımaya katsayısına,  $S_{11}$  parametresine, etkisinin gösterilmesi amacıyla EBG yapısı içermeyen işaret iletkenin simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekilde de görüldüğü üzere

EBG yapısı içeren işaret iletkeni 3,19 GHz ve 4,94 GHz frekanslarında rezonanslar oluşturmaktadır. EBG yapısı içermeyen işaret iletkeni gelen işaretinin büyük kısmını iletirken EBG yapısı içeren işaret iletkeni çalışma frekansında yasak bant oluşturarak gelen işaretin neredeyse tamamını yansıttığı görülmektedir. Bu sonuçlardan hareketle bu çalışma kapsamında tasarlanacak anten dizileri arasındaki kuplaj etkisinin azaltılmasını sağlamak için bu yapının kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmaktadır.

EBG içeren dizi anten tasarımına geçmeden önce elde edilen simülasyon sonuçlarının daha iyi irdelenebilmesi ve Şekil 5.9.'un daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla EBG yapısı içeren ve içermeyen işaret iletkenlerinin 2D elektrik ve manyetik alan dağılımları incelenmiştir.

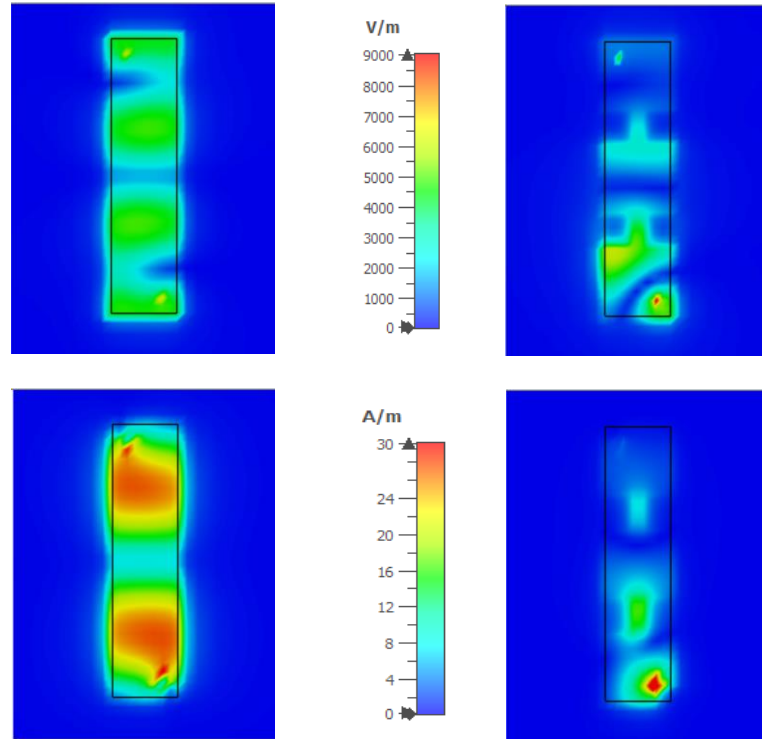


Şekil 5. 10. 3x3 EBG3x1 tasarımı içermeyen işaret iletkeni ile EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin 3.19 GHz frekansında a) Elektrik alan dağılımı b) Manyetik alan dağılımı

Şekil 5.10.a.' da gösterilen 3,19 GHz frekansında EBG yapısı içermeyen işaret iletkeninin elektrik alan dağılımı göz önüne alındığında, sağ alt köşede bulunan porttan

beslenen işaret iletkenin yüzeyinde oluşan elektrik alanının sol üst köşedeki diğer portta da indüklenmeye sebep olduğu görülmektedir. EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin elektrik alan dağılımı incelendiğinde ise sağ alt köşede bulunan ve yapının beslendiği portun çevresinde zayıf bir elektrik alan oluştuğu, EBG yapısı boyunca elektrik alanın zayıfladığı ve diğer port üzerinde neredeyse hiç indüklenme olmadığı görülmektedir.

Şekil 5.10.b.' de gösterilen 3,19 GHz frekansında EBG yapısı içermeyen işaret iletkeninin manyetik alan dağılımı incelendiğinde, sağ alt köşede bulunan porttan beslenen işaret iletkenin yüzeyinde oluşan manyetik alanın sol üst köşedeki diğer portta da indüklenmeye sebep olduğu görülmektedir. EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin manyetik alan dağılımı incelendiğinde ise sol alt köşede bulunan ve yapının beslendiği portun çevresinde zayıf bir manyetik alan oluştuğu, EBG yapısı boyunca manyetik alanın zayıfladığı ve diğer port üzerinde neredeyse hiç indüklenme olmadığı görülmektedir.



Şekil 5. 11. 3x3 EBG3x1 tasarımı içermeyen işaret iletkeni ile EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin 4.94 GHz frekansında a) Elektrik alan dağılımı b) Manyetik alan dağılımı

Şekil 5.11.a' da gösterilen 4,94 GHz frekansında EBG yapısı içermeyen işaret iletkeninin elektrik alan dağılımı göz önüne alındığında, sağ alt köşede bulunan porttan beslenen işaret iletkeninin yüzeyinde oluşan elektrik alanının sol üst köşedeki diğer portta da indüklenmeye sebep olduğu görülmektedir. EBG tasarımı içeren işaret iletkeninin elektrik alan dağılımı incelendiğinde ise sağ alt köşede bulunan ve yapının beslendiği portun çevresinde zayıf bir elektrik alan oluştuğu, EBG yapısı boyunca elektrik alanın zayıfladığı ve diğer port üzerinde neredeyse hiç indüklenme olmadığı görülmektedir.

Şekil 5.11.b.' de gösterilen 4,94 GHz frekansında EBG yapısı içermeyen işaret iletkeninin manyetik alan dağılımı incelendiğinde, 3,19 GHz frekansında olduğu gibi EBG yapısının kullanılmadığı işaret iletkeninde oluşan manyetik alanın ölçüm portunda indüklenmeye sebep olduğu, EBG yapısı içeren tasarımda ise yapı boyunca zayıflayan manyetik alanın ölçüm portuna ulaştığında son derece zayıfladığı ve portta neredeyse hiçbir indüklenmeye sebep olmadığı görülmektedir.

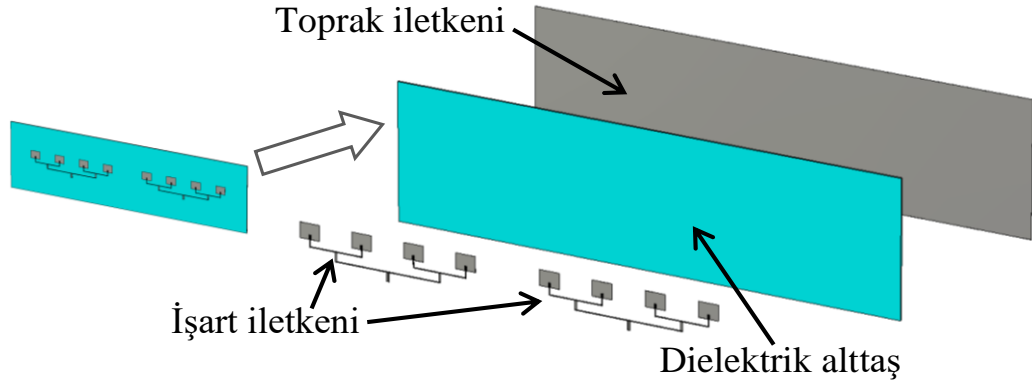
3,19 GHz frekansında oluşan elektrik ve manyetik alanların 4,94 GHz frekansında oluşandan daha kuvvetli olması söz konusu işaret iletkenin Şekil 5.9.'da da görüleceği üzere 3,19 GHz frekansında geri dönüş kaybının daha az olması dolayısıyla söz konusu frekansta daha yüksek kazançlı ışıma gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır.

Tasarlanan EBG yapısının simülasyon sonuçları incelendiğinde, yapının 4,3 GHz frekansında bant durduran özelliği gösterdiği dolayısıyla bu frekansta dizi anten çifti arasında elektrik alan ve manyetik alan geçişini engelleyerek diziler arasındaki kuplajı olabildiğince azaltmak amacıyla kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmaktadır.

### **5.5. EBG İçeren Dizi Anten Tasarımı**

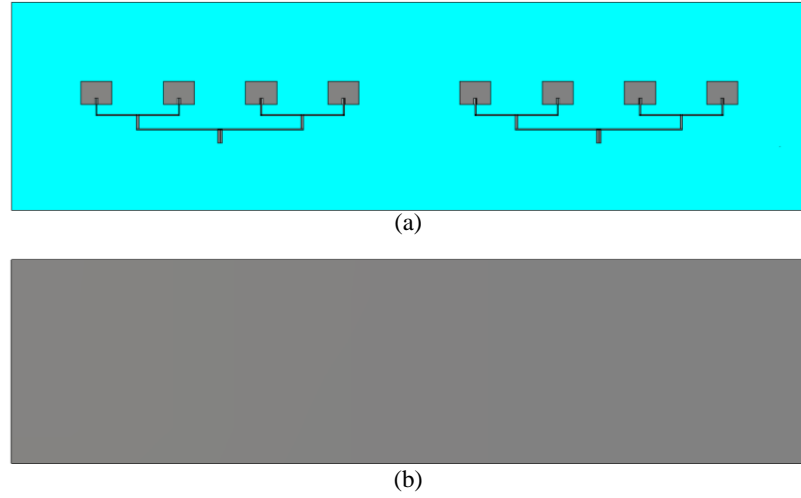
Tasarlanan EBG yapısının dizi antenin performansını ve dizi antenler arasında yüzey dalgaları sebebiyle oluşacak elektromanyetik kuplaja etkisini analiz edebilmek amacıyla 4,3 GHz frekansında çalışmak üzere tasarlanan dizi antene aynı dielektrik alttaş üzerinde eş bir dizi anten daha yerleştirilmiştir. Yeni dizi anten Şekil 5.12.'de gösterilmektedir.





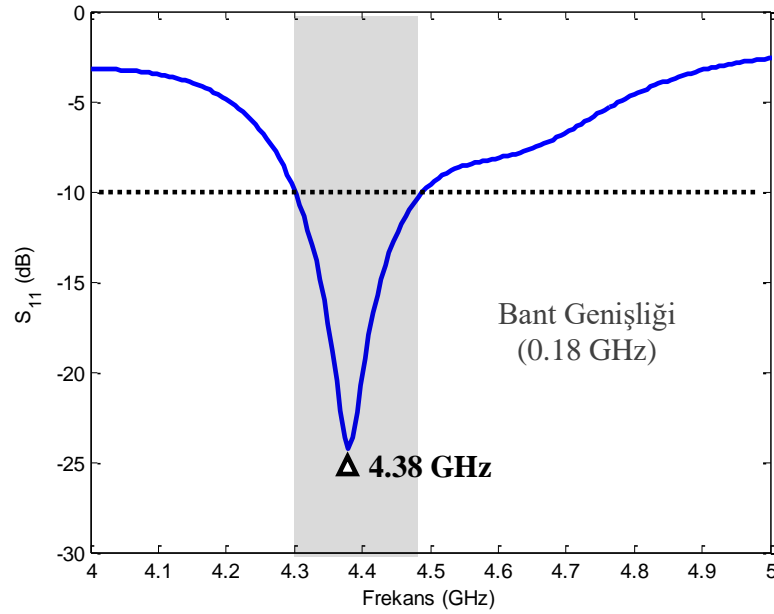
şekil 5. 12. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi anten

şekil 5.12. ve şekil 5.13.'te tasarlanan dizi antenin tasarımları ve fiziksel görünümüne yer verilmiştir. Tasarlanan yeni dizi anten birbirleriyle tamamen simetrik iki adet eş dizi antenden oluşmaktadır.



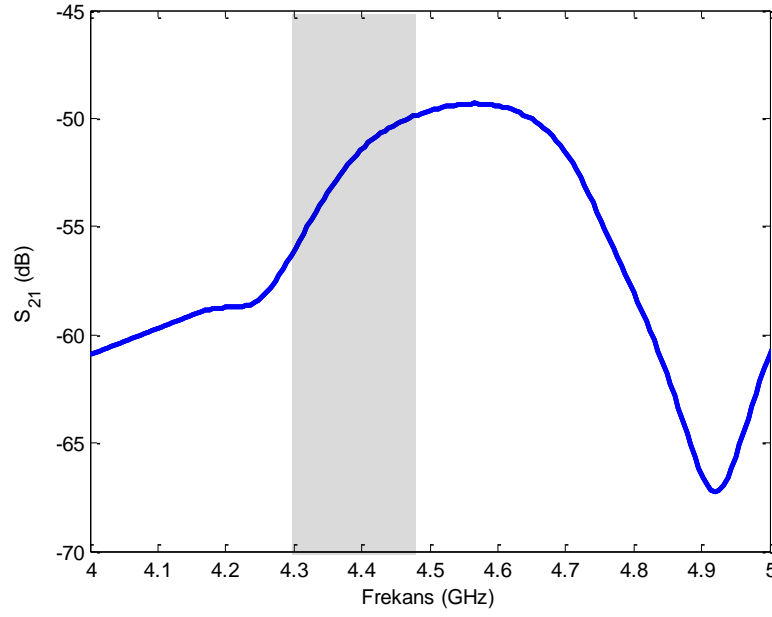
şekil 5. 13. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin a) Üstten görünüşü, b) Alttan görünüşü

Eş dizi antenin beslenmesi her dizinin besleme ağının en uç noktasından bağlanan koaksiyel proplarla beslenmiştir.



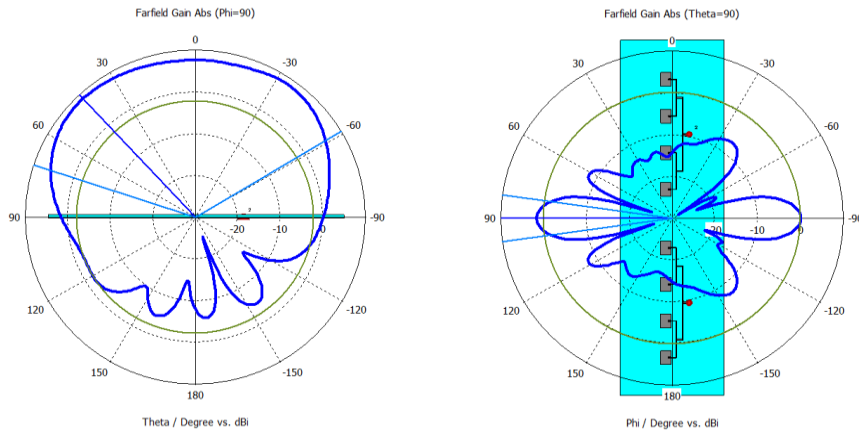
Şekil 5. 14. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi anten frekansa bağlı  $S_{11}$  parametreleri

Eş dizi anten tasarımının  $S_{11}$  parametreleri Şekil 5.14.'te verilmektedir. Grafik incelendiğinde ilk göze çarpan husus bant genişliğinin yaklaşık iki katına çıkmasıdır. Bölüm 4.'tde bahsedildiği üzere dizi antenin en büyük avantajlarından biri ışınım yapılan çalışma bant genişliğinin arttırılmasıdır. Şekil 5.14., Şekil 5.3. ile karşılaştırıldığında görülecektir ki yeni dizi antenin çalışma bant genişliği 0,09 GHz'in iki katına çıkarak 0,18 GHz olduğu ve rezonans frekansının 20 MHz yükseldiği ve anten geri dönüş kaybının logaritmik değeri olan  $S_{11}$  parametresinin 9,8 dB civarında azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında yeni dizi anten tasarımının daha geniş bant aralığına sahip olduğu ve antene uygulanacak işaretin daha yüksek oranda ışımaya dönüştürüleceği anlaşılmaktadır.



Şekil 5. 15. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin frekansa bağlı  $S_{21}$  parametreleri

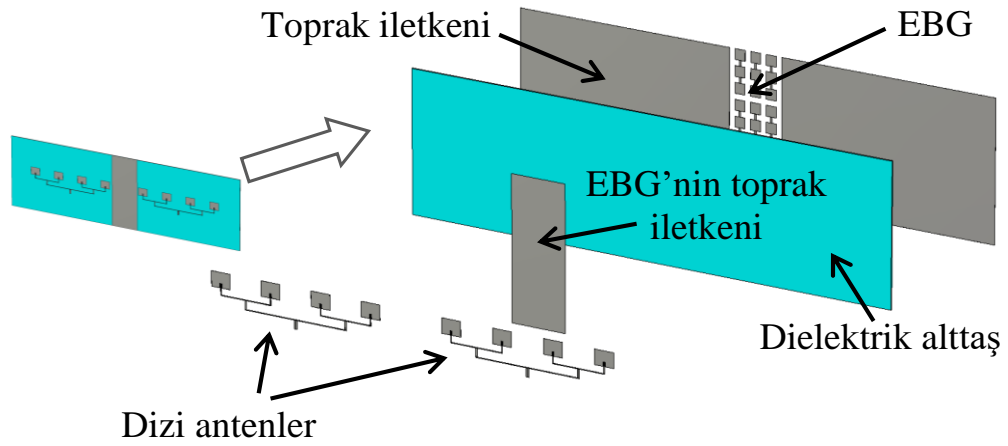
Şekil 5.15.'de eş dizi antenin frekansa bağlı  $S_{21}$  parametresinin değişimi verilmektedir. Bilindiği üzere  $S_{21}$  parametresi elektriksel sistemlerin girişine uygulanan işaretin çıkışından alınan işarete oranının logaritmik değeri olarak hesaplanmaktadır. Bununla birlikte eş dizi antenlerin arasına EBG yapısı tasarımı eklendiğinde  $S_{21}$  parametresinin EBG'nin çalışma bant aralığında değişmesi beklenmektedir.



Şekil 5. 16. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüsü

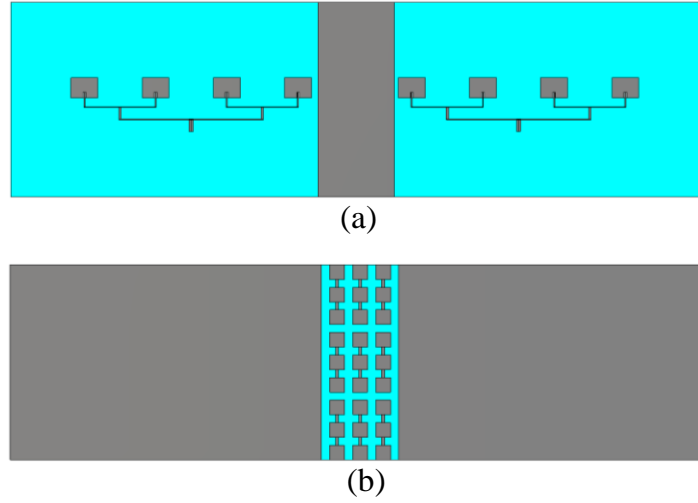
Şekil 5.16.'da verilen EBG yapısı içermeyen dizi antenin uzak alan ışınma örüntüleri incelendiğinde 4,38 GHz çalışma frekans değerinde ana lob açısının  $39^\circ$ , anten kazancının 8,82 dB ve -3 dB hüzmeye genişliğinin  $131,26^\circ$  olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan EBG yapısının eş dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple EBG yapısı birbirlerine tam simetrik olan eş dizi antenlerin arasına yerleştirilmiştir.

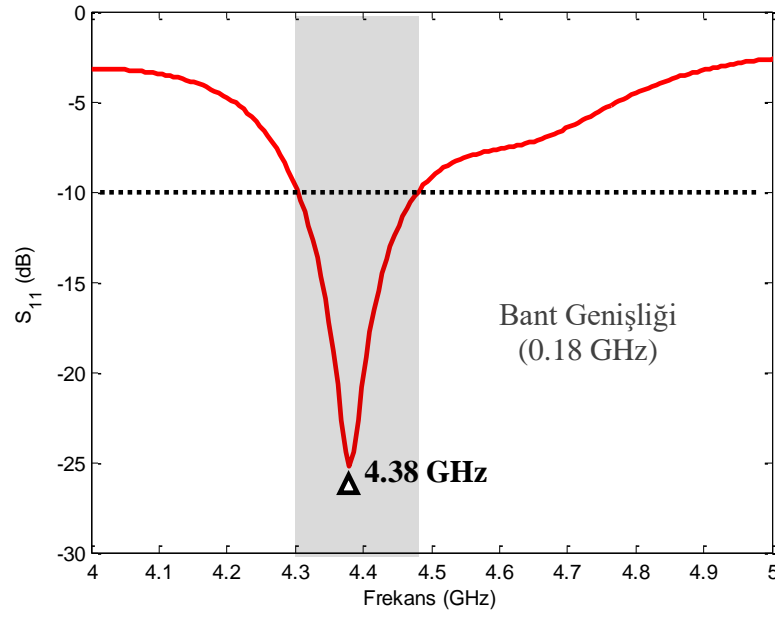


Şekil 5.17. Toprak iletkeni 3x3 EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten

Literatürde yer alan çalışmalarda görüldüğü üzere, Bölüm 4.6.1.'de verilen örneklerde olduğu gibi, EBG yapıları anten tasarımlarında farklı şekillerde konumlandırılabilir. EBG yapıları bazı uygulamalarda antenleri veya dizi elemanlarını çevreleyecek şekilde yerleştirilmekte iken antenlerin veya dizi antenlerin arasına şerit şeklinde yerleştirildiği uygulamalarda bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan EBG yapısı Şekil 5.17.ve Şekil 5.18'de görüldüğü gibi eş dizi antenlerin ortak olan toprak iletkenine iki dizinin arasına gelecek şekilde entegre edilerek yüzey empedansının artırılması dolayısıyla dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajın azaltılması amaçlanmıştır. EBG yapısının toprak iletkeni ise dizi antenlerin ışınma elemanlarının arasına yerleştirilmiştir.

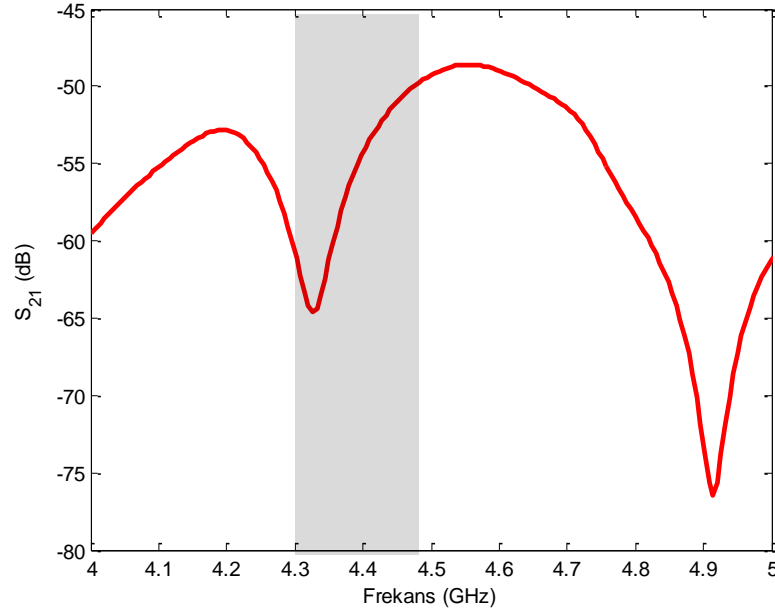


Şekil 5.18. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten (a) ön görünüş, (b) arka görünüş



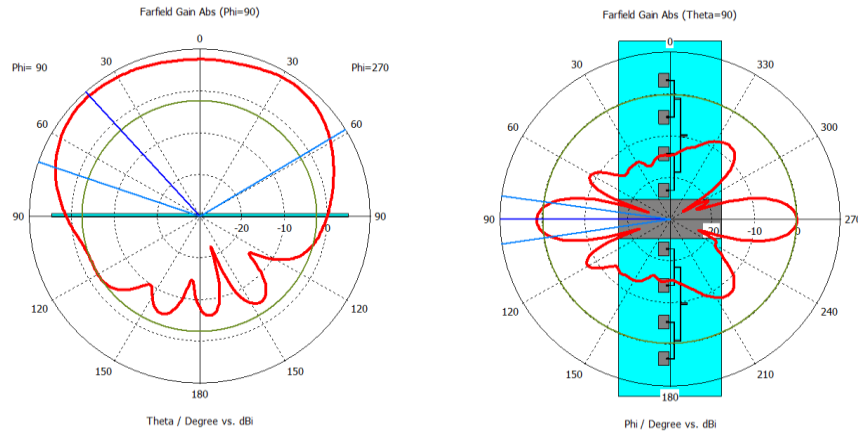
Şekil 5.19. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten frekansa bağlı  $S_{11}$  parametreleri

Şekil 5.19.'da EBG yapısı içeren dizi antenin  $S_{11}$  parametresinin frekansa bağlı değişimi görülmektedir. EBG yapısı içeren dizi antenin bant genişliği 4,3 GHz ile 4,48 GHz aralığında olmak üzere 0.18 GHz, rezonans frekansı 4,38 GHz ve rezonans frekansında yansımaya kaybı yaklaşık olarak -26,5 dB olduğu görülmektedir.



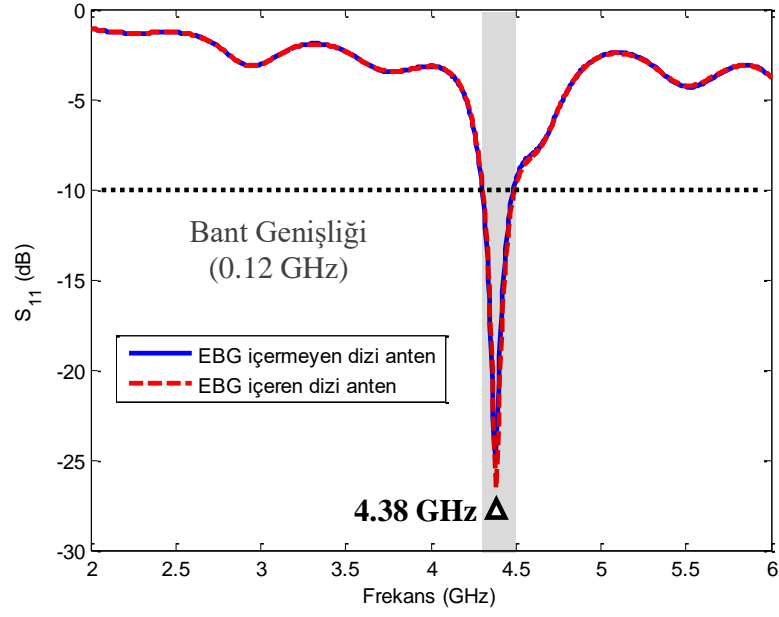
Şekil 5.20. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi anten frekansa bağlı  $S_{21}$  parametreleri

Şekil 5.20.'de EBG yapısı içeren dizi antenin  $S_{21}$  parametresinin frekansa bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 5.20.'de EBG yapısının eklendiği dizi antenin rezonans frekansında oluşan bant çukuru görülmektedir.



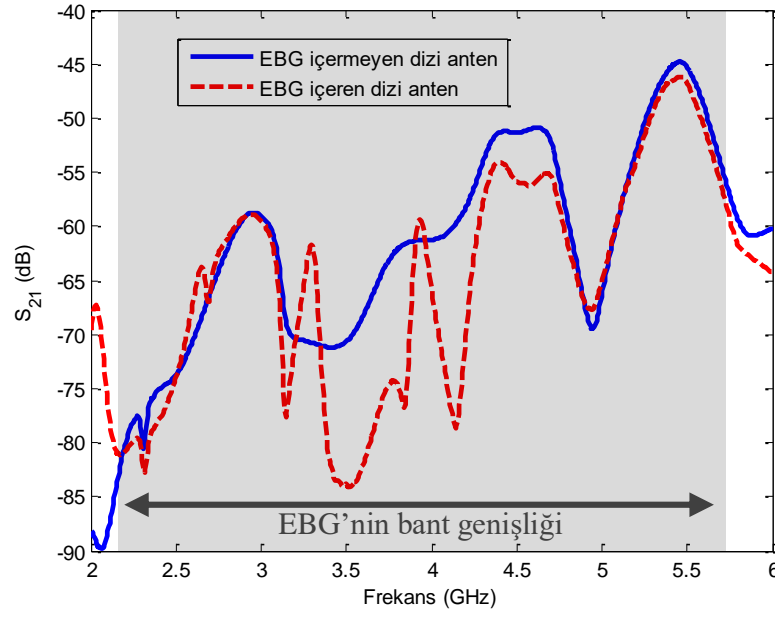
Şekil 5.21. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışıma örüntüsü

Şekil 5.21.'de verilen EBG yapısı içeren dizi antenin uzak alan ışıma örüntüleri incelendiğinde 4,38 GHz çalışma frekans değerinde ana lob açısının  $42^\circ$ , anten kazancının 8,66 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin  $129,29^\circ$  olduğu görülmektedir.



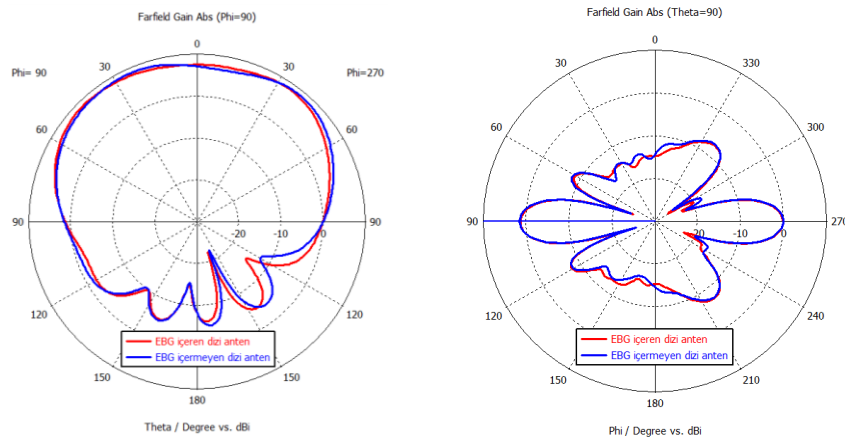
Şekil 5.22. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin frekansa bağlı  $S_{11}$  parametreleri

EBG yapısı içermeyen ve içeren dizi antenlerin  $S_{11}$  grafiklerinin karşılaştırıldığı Şekil 5.22. incelendiğinde EBG yapısının dizi antenin rezonans frekansında ve bant aralığında kayda değer bir etki oluşturmadığı görülmektedir. Bununla birlikte antenin rezonans frekansı olan 4.38 GHz’de yansıma kaybını gösteren  $S_{11}$  parametresinin yaklaşık olarak -24,9 dB’den -26,5 dB’e gerileyerek çok küçük bir iyileşme kaydettiği görülmektedir.



Şekil 5.23. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin frekansa bağlı  $S_{21}$  parametreleri

EBG yapısı içermeyen ve içeren dizi antenlerin  $S_{21}$  grafiklerinin karşılaştırıldığı Şekil 5.23. incelendiğinde EBG yapısının dizi antenin rezonans frekansında bant çukuru oluşturduğu ve dizi antenler arasında oluşan kuplajı 18,7 dB kadar azalttığı görülmektedir.  $S_{21}$  parametresinin frekansa bağlı değişimini incelerken eş dizi antenlerin tamamen simetrik olması dolayısıyla  $S_{21}$  parametresinin  $S_{12}$  parametresine eşit olduğu unutulmamalıdır.



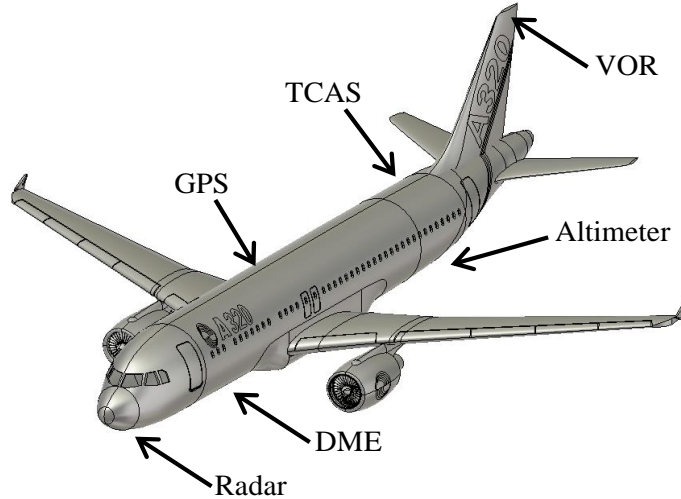
Şekil 5.24. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüleri



EBG yapısı içermeyen dizi anten ile EBG yapısı içeren dizi antenin uzak alan ışınma örüntülerinin karşılaştırıldığı Şekil 5.24. incelendiğinde EBG yapısının antenin  $\theta$  açısına bağlı düşeyde üst yarı düzleme yaptığı ışınımın kazancını çok küçük miktarda düşürdüğü ve istenmeyen ışınımın olduğu alt yarı düzlemdeki ışınmaları da bir miktar arttırdığı görülmektedir. Dolayısıyla EBG yapısının dizi anten çiftinin ışınma örüntüsünü bozmamış olduğu ve bu çalışmanın ana hedefi olan dizi anten çifti arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemek için kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.

### 5.6. Dizi Anten İçeren Hava Aracının Nümerik Analizleri

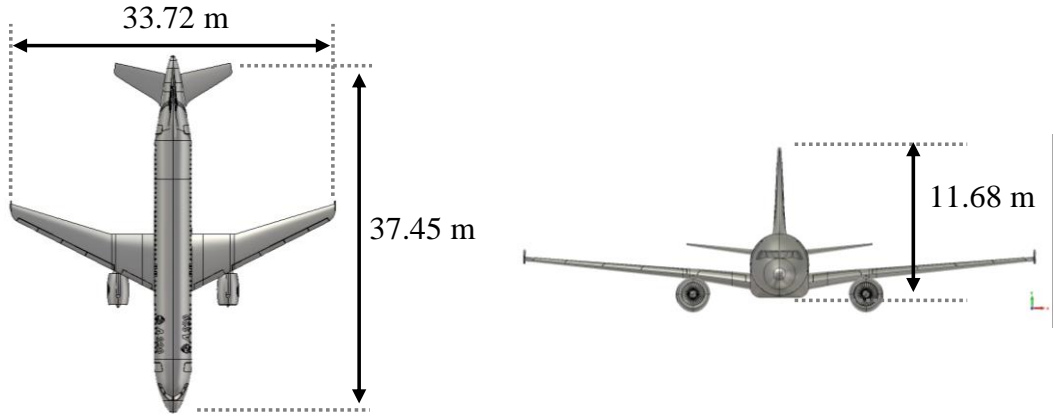
Bu çalışmanın devamında EBG yapısı içeren ve içermeyen dizi anten tasarımları hava aracı üzerine konumlandırılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır. Hava aracı Airbus A320 modeli uçak olarak seçilmiştir. Şekil 5.25.'de gösterildiği gibi A320 model hava aracı üzerinde farklı konumlarda bulunan ve her biri farklı bir amaç için kullanılan antenler barındırmaktadır. Bu antenlerin yerleşimleri genellikle kullanım amaçlarına ve çalışma frekanslarına göre belirlenmektedir.



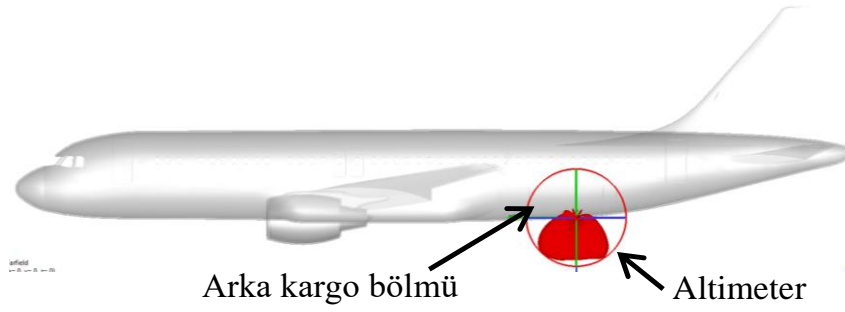
Şekil 5.25. A320'nin üzerinde bulunan antenlerin yerleşimi

Şekil 5.26.'da verilen benzetim modelinde gösterildiği gibi A320 yaklaşık olarak 37,4 m gövde uzunluğuna, 33,7 metre kanat açıklığına ve 11,6 m kuyruk yüksekliğine

sahiptir. A320'nin fiziksel boyutunun büyük olmasından dolayı uzun simülasyon sürelerinden kaçınmak için gövde malzemesi mükemmel iletken (Perfect Electrical Conductor, PEC) olarak seçilmiş ve uçağın elektriksel boyutu küçültülmüştür. Ayrıca, simülasyonlarda tasarımları yapılan EBG yapısı içeren ve içermeyen dizi antenlerin uzak alan sonuçları kaynak olarak kullanılmış ve Şekil 5.27.'de gösterildiği gibi hava aracının arka kargo bölümünün alt yüzeyine konumlandırılmıştır.

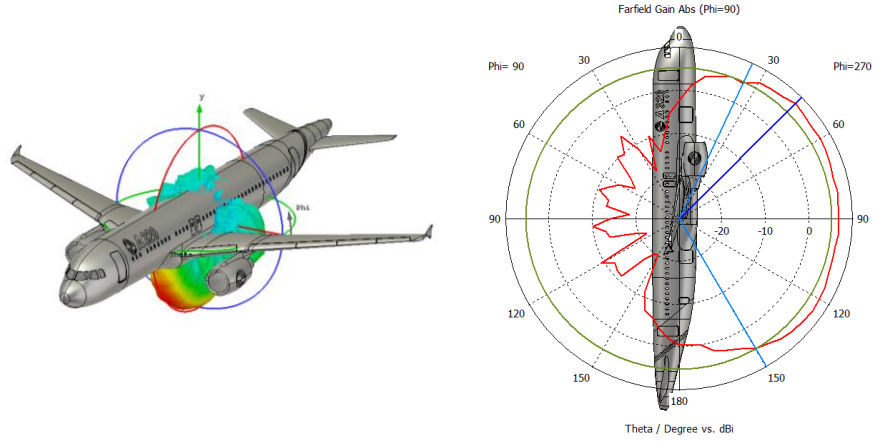


Şekil 5.26. A320'nin fiziksel boyutları



Şekil 5.27. A320'nin simülasyonlarında kullanılan kaynağın konumu

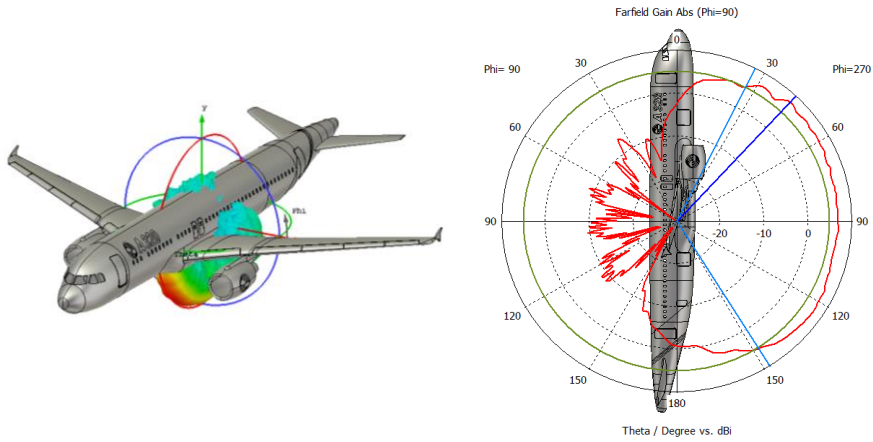
EBG içermeyen dizi antenin Şekil 5.27.'de gösterildiği şekilde A320'e konumlandırılması ile elde edilen benzetim modelinin 4,3 GHz çalışma frekans değerinde nümerik olarak elde edilen uzak alan ışıma örüntüleri Şekil 5.28.'de verilmiştir.



Şekil 5.28. Toprak iletkeni 3x3EBG3x1 tasarımı içermeyen dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışıma örüntüsü

Şekil 5.28.'de verilen 3D ve 2D uzak alan ışıma örüntüleri incelendiğinde 4,3 GHz çalışma frekans değerinde ana lob açısının  $45^\circ$ , anten kazancının 7,95 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin  $124,7^\circ$  olduğu görülmektedir.

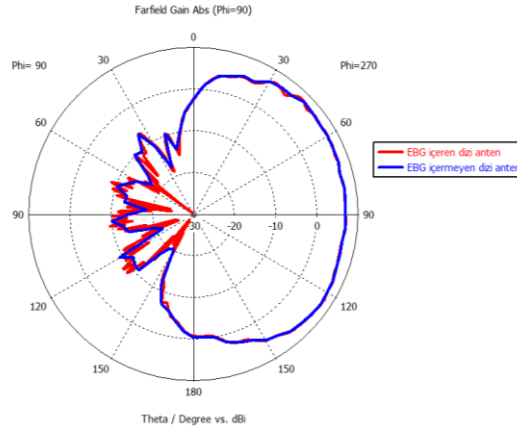
EBG yapısının dizi antenin uzak alan ışıma örüntülerine etkisini incelemek amacıyla EBG içeren dizi anten yine aynı şekilde A320'e konumlandırılmıştır. Elde edilen uzak alan ışıma örüntüleri Şekil 5.29.'da verilmiştir.



Şekil 5.29. Toprak iletkeni 1x1EBG3x1 tasarımı içeren dizi antenin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışıma örüntüsü

Şekil 5.29. incelendiğinde 4,3 GHz çalışma frekans değerinde EBG içeren antenin ana lob açısının  $43^\circ$ , anten kazancının 8,08 dBi ve -3 dB hüzme genişliğinin  $121,2^\circ$  olduğu görülmektedir.

EBG yapısının antenin elektriksel performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi için Şekil 5.28. ve Şekil 5.29.'da elde edilen 2D uzak alan ışınma örüntüleri Şekil 5.30.'da karşılaştırılmıştır.



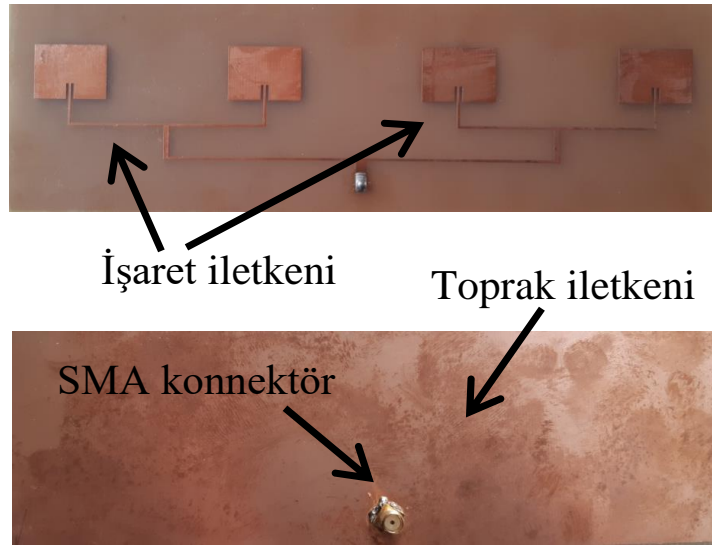
Şekil 5.30 Toprak iletkeni  $1 \times 1 \text{EBG} 3 \times 1$  tasarımı içeren ve içermeyen dizi antenlerin çalışma frekansında oluşan uzak alan ışınma örüntüleri

Şekil 5.30. incelendiğinde EBG içeren ve içermeyen dizi antenler hava aracı üzerine konumlandırıldığında benzer ışınma örüntüleri oluşturdukları görülmektedir. Antenlerin faydalı ışınma olarak nitelendirilen ana loblarının birbirlerine çok yakın olduğu bununla birlikte EBG yapısı içeren dizi antenin kayıp olarak nitelenen arka lobunda dalgalanmalar olmakla birlikte bu dalgalanmaların eş dizi anten çiftinin çalışma performansına etki etmemektedir.

Bu çalışma kapsamında eş dizi antenler arasındaki elektromanyetik kuplajı azaltmak için kullanılan EBG yapısının antenler arasında izolasyonu sağladığı ve antenlerin uzak alan ışınma örüntülerini bozmadığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlarla önerilen EBG yapısının 4,3 GHz frekansında dizi antenlerin izolasyonu için kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır.

## 5.7. Prototip Üretimi ve Elektriksel Testler

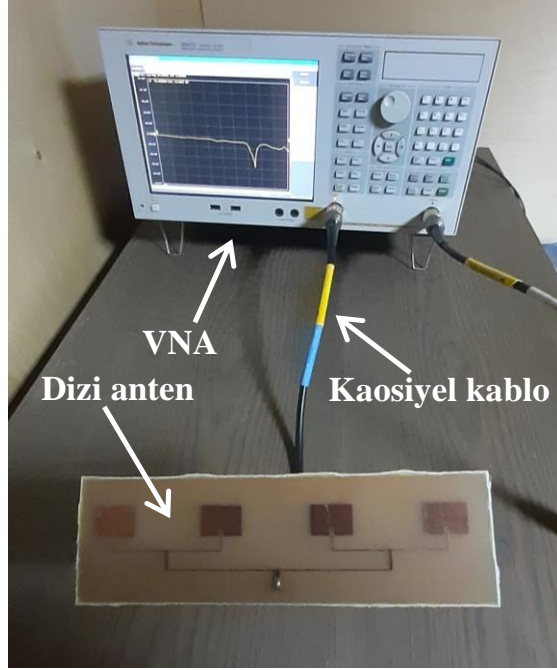
Çalışma kapsamında son olarak simülasyon sonuçlarının doğruluklarının gösterilmesi amacıyla Şekil 5.2.'de benzetim modeli gösterilen dizi antenin prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve elektriksel testleri yapılmıştır. Prototip üretiminde simülasyonlarda kullanılan elektriksel parametre değerlerine sahip çift taraflı bir bakır plaket kullanılmıştır. Bakır plaketin iletken yüzeylerinden bir tanesi toprak olarak seçilirken diğeri işaret iletkeni olarak seçilmiş ve işaret iletkeni üzerine yamalar bilgisayarlı nümerik kontrol (Computer Numerical Control, CNC) teknolojisi kullanılarak oluşturulmuştur. Daha sonra simülasyonlarda ayrık portun konumlandırıldığı noktaya  $50\Omega$  empedans değerine sahip SMA konnektör yerleştirilmiştir. SMA konnektörün canlı ucu işaret iletkenine lehimlenirken dış koruması toprak iletkenine lehimlenmiştir. Prototip üretimi tamamlanan dizi antenin görseli Şekil 5.31.'de verilmiştir.



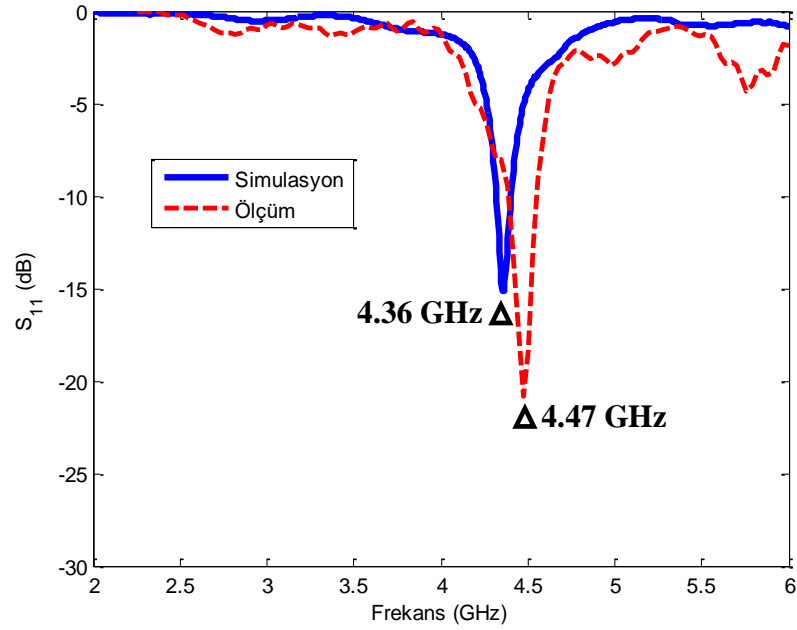
Şekil 5.31. Prototip üretimi tamamlanan dizi antenin görseli

Şekil 5.32.'de gösterildiği gibi dizi antenin frekansa bağlı  $S_{11}$  parametrelerinin elde edilmesi için Agilent E5071C vektör network analizör (Vector Network Analyser, VNA) cihazı kullanılmıştır. VNA'in birinci portu  $50\Omega$  empedans değerine sahip yarı esnek koaksiyel kablo ile SMA konnektöre bağlanmıştır. Daha sonra 2 GHz-6 GHz

frekans aralığında dizi antenin  $S_{11}$  parametreleri ölçülmüş ve simülasyon sonuçları ile Şekil 5.33.'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.32. Prototip üretimi tamamlanan dizi antenin ölçüm esnasındaki görseli



Şekil 5.33. Ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı  $S_{11}$  parametre değerlerinin simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 5.33.'de verilen ve dizi antenin simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik incelendiğinde ölçüm sonucunda elde edilen rezonans frekansının 0.01 GHz kaydığı ve rezonans frekansında oluşan yansıma katsayısının 5 dB kadar azaldığı görülmektedir. Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları arasındaki bu farkın ölçüm kararsızlıklarından veya üretimde kullanılan dielektrik malzemenin karakteristik değerlerindeki toleranstan kaynaklandığı ve kabul edilebilir olduğu değerlendirilmektedir.

## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, hava araçlarında irtifa tayini görevi gören radyo altimetre radarlarında kullanılmak üzere dizi anten tasarımı ve anten sistemleri arasındaki istenmeyen elektromanyetik kuplajların bastırılması için EBG yapısı tasarımı ve elektriksel testleri yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak 4,3 GHz çalışma frekans değerine sahip mikroşerit dizi antenin benzetim modeli oluşturulmuş ve frekansa bağlı  $S_{11}$  parametre değerleri ile çalışma frekansındaki uzak alan ışınma örüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tasarlanan antenin 4.36 GHz rezonans frekansına ve 0.09 GHz çalışma bant genişliğine sahip olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın devamında çift olarak kullanılacak ve aynı toprak düzlemi paylaşacak dizi anten çiftleri arasında kuplajı azaltmak amacıyla kullanılacak EBG yapısı tasarlanmış ve nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, tasarlanan EBG yapısının 2,3 GHz-5,6 GHz arasında yaklaşık 3.25 GHz'lik bir bant genişliğinde bant durduran filtre görevi gördüğü ve bu çalışma kapsamında dizi antenler arasında oluşacak elektromanyetik kuplajı sönmümlüme amacıyla kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Sonraki adımda söz konusu yapı dizi anten çiftinin arasına yerleştirilmiş ve EBG yapısının 4,3 GHz frekansında antenler arasındaki kuplajı 20 dB kadar azalttığı bununla birlikte dizi anten çiftinin uzak alan ışınma örüntüsünde herhangi bir bozulmaya sebep olmadığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında önerilen yapının anten dizileri arasında oluşan elektromanyetik kuplajı sönmülediği dolayısıyla kullanımının uygun olduğu anlaşıldıktan sonra, tasarlanan EBG yapısı içeren ve içermeyen dizi anten çiftlerinin uzak alan sonuçları A320 model uçağın kargo bölümüne kaynak olarak yerleştirilerek simülasyonlar tekrarlanmış ve EBG yapısının hava aracı üzerindeki dizi anten çiftinin ışınma performansı üzerinde bozucu bir etki oluşturmadığı ve EBG yapısı içeren ve



içermeyen dizi antenlerin uzak alan ışıma örüntülerinin birbirine son derece yakın olduğu görülmüştür.

Son adımda ise simülasyon sonuçlarının desteklenmesi amacıyla tasarlanan 1x4 elemanlı dizi antenin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen antenin ölçümleri yapılmış ve ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar tutarlı olmakla birlikte rezonans frekansının kabul edilebilir bir miktar kaydığı, rezonans frekansındaki yansıma kayıplarının 8 dB kadar azaldığı ve bant genişliğinin 50 MHz arttığı gözlenmiştir. Ölçüm kararsızlıkları ve üretimde kullanılan dielektrik malzemenin karakteristik değerlerindeki tolerans bandı göz önüne alındığında aradaki farkın kabul edilebilir olduğu değerlendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan nümerik analizler sonucunda elde edilen veriler dikkate alındığında tasarlanan EBG yapısının, 4.3 GHz çalışma frekansında dizi antenler arasında oluşan elektromanyetik kuplajı engellemek amacıyla kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Balanis, C. A. 2013 Anten Teorisi Analiz ve Tasarım. Nobel Yayıncılık,1-1044.
- [2] Rahmat-Samii, Y., Williams, L. I., & Yaccarino, R. G. 1995. The UCLA bipolar planar-near-field antenna-measurement and diagnostics range. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 37(6), 16-35.
- [3] Balanis, C. A. 1969. Fundamental parameters and definitions for antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 17(3).
- [4] Kumar, G., & Gupta, K. 1985. Directly coupled multiple resonator wide-band microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 33(6), 588-593.
- [5] Sullivan, P. L. A. D. H. S., Schaubert, D. 1986. Analysis of an aperture coupled microstrip antenna. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 34(8), 977-984.
- [6] Başaran, S.2008. Kablosuz Haberleşme Uygulamaları İçin Yarık-Halka Mikroşerit Anten Tasarımı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [7] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I. J., Ittipiboon, A. 2001. Microstrip antenna design handbook. Artech house.
- [8] Zhong, S. S., Zhang, L. N., Liang, X. L. 2007, March. Compact tri-band printed monopole antenna. 2007 International workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications (pp. 271-274). IEEE.
- [9] Howell, J. Q. 1975. Microstrip antennas. *ITAP*, 23, 90-93.
- [10] Pozar, D. M. 1992. Microstrip antennas. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
- [11] Çekingen, M. 2011 Yapay Manyetik İletken Toprak Yüzeyle Genişbant Mikroşerit Anten Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

- [12] Biçer, M. 2011. Wlan/Wimax Uygulamaları İçin Kompakt Mikroşerit Anten Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi.
- [13] Pozar, D. M. 2011. Microwave engineering. John wiley & sons.
- [14] Munson, R. 1974. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, 22(1), 74-78.
- [15] Allen, J., L. Diamond, B., L. 1966. Mutual Coupling in Array Antennas, *Tecnicaq Report MIT 66-443*.
- [16] Pozar, D. 1982. Input impedance and mutual coupling of rectangular microstrip antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30(6), 1191-1196.
- [17] Pozar, D. M., Kaufman, B. 1987. Increasing the bandwidth of a microstrip antenna by proximity coupling. *Electronics letters*, 23(8), 368-369.
- [18] Tang, M. C., Xiao, S., Wang, B., Guan, J., Deng, T. 2011. Improved performance of a microstrip phased array using broadband and ultra-low-loss metamaterial slabs. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 53(6), 31-41.
- [19] Lee, Y. J., Yeo, J., Ko, K. D., Mittra, R., Lee, Y., Park, W. S. 2004. A novel design technique for control of defect frequencies of an electromagnetic bandgap (EBG) superstrate for dual-band directivity enhancement. *Microwave and Optical Technology Letters*, 42(1), 25-31.
- [20] Farahani, H. S., Veysi, M., Kamyab, M., Tadjalli, A. 2010. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays using a UC-EBG superstrate. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 9, 57-59.
- [21] Alibakhshikenari, M., Khalily, M., Virdee, B. S., See, C. H., Abd-Alhameed, R. A., & Limiti, E. 2019. Mutual coupling suppression between two closely placed microstrip patches using EM-bandgap metamaterial fractal loading. *IEEE access*, 7, 23606-23614.
- [22] Emadeddin, A., Shad, S., Rahimian, Z., & Hassani, H. R. 2017. High mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using novel structure. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 71, 152-156.
- [23] Jiang, X., Mei, J., Jiang, T., & Zhang, Y. 2017. A novel electromagnetic band gap structures for two-element MIMO antenna. 2017. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* (pp. 1673-1674). IEEE.

- [24] Harbel, M., Zbitou, J., Hefnawi, M., & Latrach, M. 2020. Mutual Coupling Reduction in MmWave Patch Antenna Arrays Using Mushroom-like EBG Structure. 2020. IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS) (pp. 1-3). IEEE.
- [25] Jiao, T., Peng, Z., Luo, S., Li, Y., & Li, C. 2018. Mutual Coupling Reduction in a T/R Array with T-Resonate Cavity EBG (TRC-EBG). 2018. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (pp. 1381-1382). IEEE.
- [26] Araújo, J., B., O., Souza, V., P., R., Magri, Ferreira, T., N., Matos, L., J., Siqueira, G., L., Souza, Jorge M., & Silva, Maurício W. B. da. 2020. Mutual Coupling Reduction in Phased Array Antennas Applying High-Impedance Surface at X Band. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 19(1), 118-128
- [27] Ghaloua, A., Zbitou, J., Latrach, M., El Abdellaoui, L., Errkik, A., & Mandry, R. 2017. Mutual coupling reduction and miniaturization arrays antennas using new structure of EBG. 2017. International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS) (pp. 1-5). IEEE.
- [28] CST: Computer Simulation Technology (CST-2019), DassaultSystems Simulia, <https://www.3ds.com>, Son Erişim Tarihi: 10 Eylül 2020.
- [29] Antenna Magus: Antenna Magus Antenna design Software (Antenna Magus-2019), DassaultSystems Simulia, <https://www.3ds.com>, Son Erişim Tarihi: 10 Temmuz 2020.
- [30] De Paulis, F., Nisanci, M. H., Orlandi, A. 2012. Practical EBG application to multilayer PCB: Impact on power integrity. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 1(3), 60-65.
- [31] Nisanci, M. H., De Paulis, F., Di Febo, D., Orlandi, A. 2013. Practical EBG application to multilayer PCB: Impact on signal integrity. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2(2), 82-87.
- [32] Nişancı, M.H., Varner, M. A., de Paulis, F., Orlandi, A., Connor, S., Cracraft, M., Archambeault, B., Di Febo, D. 2015. Removable EBG-based common-mode filter for high-speed signaling: Experimental validation of prototype design. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(4), 672-679.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Ahmet Hüsrev İPEKLİ 07.10.1994 tarihinde Ankara'da doğdu. İlk okul, orta okul ve liseyi Ankara'da okudu. 2012 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılında halen görev yaptığı Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'na Enerji Uzman Yardımcısı olarak atandı.